

Réchauffement anthropique, Partie 1 : La fin de la récréation

**Shaun Lovejoy,
Département de Physique,
Université McGill, Montréal, Qué.**



Shaun Lovejoy

Introduction

La science et la connaissance avancent par l'opposition systématique des idées, des modèles et des paradigmes, puis la confrontation des théories avec des données. La science est donc remplie de controverses. Bien que la plupart des théories en sciences naturelles n'aient d'intérêt que pour les spécialistes concernés, il arrive parfois qu'elles menacent les conceptions dominantes du monde ainsi que notre place dans ce dernier. Le plus illustre exemple est possiblement l'émergence de l'héliocentrisme, qui en 1633 mena au bannissement des travaux de Copernic en 1633 et a valu à Galilée de se faire montrer les instruments de torture. Bien que l'héliocentrisme ait été profondément en conflit avec la doctrine de l'Église, c'était bien plus qu'une simple question d'idéologie. À l'époque, les auteurs et poètes qualifièrent l'héliocentrisme de « ridicule » (Jean Bodin, 1592) ou encore comme porteur d'un profond désespoir (John Donne, 1611, « Le Soleil est Perdu... »). L'Église a simplement réaffirmé et officialisé le « gros bon sens », c'est-à-dire le géocentrisme, et a du même coup fait de l'héliocentrisme une doctrine hérétique (Sherwood, 2011).

Les siècles se sont enchaînés et nous sommes aujourd'hui témoins d'une confrontation similaire, en l'occurrence à l'idée reçue selon laquelle le climat est une contrainte externe devant laquelle l'humanité impuissante ne peut espérer que s'adapter. La réalité est toute autre: l'action humaine modifie le climat. Plutôt que d'être une partie bienveillante et nourricière de Mère Nature, le climat se révèle

comme altérable et potentiellement malveillant. L'industrie des combustibles fossiles et autres intérêts complices n'ont seulement qu'à semer le doute et doucement leurs lobbys entretiennent la reconfortante illusion pré-scientifique. Malheureusement, le parallèle avec l'héliocentrisme s'arrête ici, car les conséquences d'une mauvaise conception du réchauffement anthropique sont bien plus qu'idéologiques. Si nous échouons à le ralentir et à mitiger son effet, les conséquences pourraient être terribles pour le futur de l'humanité. Je ferai ici le résumé de progrès récents en ce qui a trait à notre compréhension du climat, ainsi que l'apport anthropique au changement climatique en cours, et tiendrai la thèse que d'un point de vue purement intellectuel et scientifique, nous sommes (finalement) arrivés à la fin du débat climatique. Le débat n'est plus rationnel. Les climato-sceptiques ne sont que des négationnistes climatiques. Je discuterai ensuite des conséquences du changement climatique, et comment agir, en particulier pour les humanistes.

Qu'est-ce que le climat ?

L'adage dit que « le climat est ce à quoi on s'attend, la météo est ce qu'on reçoit », signifiant que le climat est la météo typique ou moyenne. Il se trouve que c'est un point de vue théorique, détaché de la réalité de l'atmosphère (Lovejoy, 2013). Une analyse empirique démontre que pour des périodes allant jusqu'à dix jours, les fluctuations de température, de vélocité éolienne ou autres quantités reliées à l'atmosphère, tendent à augmenter avec l'échelle temporelle, c'est-à-dire, par exemple, qu'en moyenne on doit s'attendre à ce que la température de

la semaine prochaine soit plus éloignée d'aujourd'hui que celle de demain. Par contre, cette relation s'inverse pour des périodes allant de 10 jours jusqu'à 30 ans. Bref, à cette échelle, plutôt que d'augmenter avec le temps, les fluctuations tendent à s'annuler entre elles. Des moyennes sur des périodes de plus en plus longues semblent donc tendre à converger vers une valeur stable. C'est le régime qui satisfait l'idée que « le climat est ce à quoi on s'attend ». Malgré tout, passé trente ans, pour l'ère post-industrielle, et passé cent ans, pour la période pré-industrielle, cette moyenne recommence à errer, les fluctuations augmentent encore avec l'échelle temporelle. Par exemple, les normales climatiques, définies comme une moyenne sur trente ans, auront tendance à fluctuer de manière croissante sur des périodes allant jusqu'à des dizaines de milliers d'années, périodes correspondant, par exemple, aux âges glaciaires. Il y a donc trois différents régimes, pas que deux. J'ai d'ailleurs proposé que le régime intermédiaire, un genre de météo plus « lente », soit dénommé « macrométéo » et que le terme « climat » soit réservé aux plus grandes périodes, caractérisées par des variations instables. Une façon équivalente de comprendre ces deux comportements types est de dire que pour le régime macrométéo, caractérisé par la stabilité, les boucles de rétro-action négatives dominent alors que pour les périodes plus grandes, les boucles de rétro-action positives dominent, puisque ces dernières périodes sont caractérisées par l'instabilité. Si l'on applique la même approche à l'éon phanérozoïque, les derniers 542 millions d'années, qui vit l'avènement du règne animal, on trouve que pour des échelles temporelles d'environ 1 million d'années et plus, appelons ce régime « mégaclimat » les fluctuations de température tendent encore à augmenter avec l'échelle [Lovejoy, 2014e]. Cela signifie que sur cette période, les boucles de rétro-action positive l'emportent sur les négatives, un comportement contraire à l'homéostasie terrestre telle que conçue par Lovelock avec l'hypothèse de la « terre vivante » ou l'hypothèse Gaïa. Nous y reviendrons.

La distinction entre la météo, la macrométéo et le climat est utile pour comprendre le réchauffement anthropique. Aux temps pré-industriels, ce n'est qu'aux échelles supérieures à environ un siècle que les processus naturels, à action lente, réussissent à surpasser les processus macrométéorologiques stabilisants, alors que pour la période post-industrielle, définie comme les années après 1880, les effets anthropiques dépassent les variations climatiques naturelles et commencent ainsi à dominer la macrométéo pour des périodes supérieures à seulement trois décennies. C'est important puisque ça veut

dire que la variation depuis 1880, environ un siècle, est due en grande partie à la variabilité anthropique plutôt que naturelle. On peut donc séparer de manière assez précise les variations anthropiques des naturelles.

Une brève histoire du réchauffement anthropique

Pourquoi la Terre se réchauffe-t-elle ? En 1896, essayant de comprendre les causes des âges glaciaires, le chimiste suédois Svante Arrhenius estima que si la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone doublait, la température globale augmenterait de 5-6 degrés Celsius. Puis en 1938, Guy Stewart Callander révisa cette estimation à 2 degrés Celsius. Ces deux estimations sont en fait assez près des estimations modernes. D'un point de vue scientifique, l'idée est simple. Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre (GES) laissant la lumière visible du soleil passer, mais retenant une partie de la chaleur ré-émise par la Terre, augmentant donc la température globale. La réalité est plus complexe, des boucles de rétro-action entre le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et les nuages amenant un grand degré d'incertitude que nous discuterons plus bas.

La prochaine grande étape dans l'étude du réchauffement anthropique fut le développement par Charles Keeling d'une nouvelle technique pour estimer la concentration de dioxyde de carbone qui permit, en 1957, de commencer à mesurer sur une base régulière la concentration à deux endroits différents, l'Antarctique et Mauna Loa, deux sites choisis pour leur isolement, réduisant ainsi l'effet de perturbations locales dues à l'agriculture ou à l'industrie. Ces mesures démontrèrent sans l'ombre d'un doute que le taux moyen annuel de dioxyde de carbone dans l'atmosphère était en croissance continue. On a pu aussi déterminer ainsi qu'environ la moitié des émissions reste atmosphérique alors que l'autre moitié se dissout dans les océans. Finalement, dans les années 70, le développement d'immenses modèles sur des super-ordinateurs, les *Modèles de circulation générale* ou GCM de l'anglais « *Global Circulation Model* », nous permirent d'estimer qu'un doublage du dioxyde de carbone atmosphérique mènerait à une augmentation de la température globale d'environ 1.5 à 4.5 degrés Celsius (Académie Nationale des Sciences des États-Unis, 1979). C'est l'augmentation à laquelle on doit s'attendre si tout d'un coup on doublait la concentration de dioxyde de carbone et attendions d'atteindre un nouveau point d'équilibre. En effet, et cela souligne les limites liées à cette approche, malgré les progrès majeurs

tant dans les algorithmes que dans la puissance de calcul des ordinateurs, le même résultat a été présenté dans le plus récent rapport du *Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat*, le GIEC (GIEC, cinquième rapport du GIEC, RE5, 2013).

Scepticisme légitime et illégitime

Lorsque confrontée à un nouvel ensemble de faits ou à une nouvelle théorie, l'attitude scientifique correcte est une de scepticisme désintéressé. L'histoire du réchauffement anthropique montre que cette théorie a dû surmonter plusieurs critiques [Weart, 2008]. Si on décide d'ignorer les effets de rétro-action liés à la vapeur d'eau et aux nuages, le réchauffement anthropique devient simple à établir. La mécanique elle-même de l'effet de serre n'a jamais été mise en doute. La difficulté principale, qui nécessita le développement des modèles numériques, était d'estimer les boucles de rétro-action. Même aujourd'hui elles sont toujours difficiles à quantifier ce qui explique que l'intervalle de 1.5-4.5 degrés Celsius, lié au doublement du dioxyde de carbone, reste assez large.

Même dans les années 60, alors que les mesures prises par Keeling étaient bien connues, la résistance principale à la théorie du réchauffement dû au dioxyde de carbone était, comme mentionné dans l'introduction, plutôt idéologique. On disait que le réchauffement était très faible et la possibilité d'une contribution humaine au changement climatique qui serait dominante répugnait. Finalement, les associations météorologiques officielles de l'époque refusèrent de l'endosser. Il faut dire que l'époque n'était pas un terrain fertile pour Keeling étant donné que dans l'après-guerre on assistait à un refroidissement naturel (1944-1976).

Après le calcul du premier *Modèle de circulation globale* (Manabe et Wetherald, 1975), les critiques passèrent au manque de réalisme des modèles ainsi qu'aux piètres qualités et quantités de données. En effet, ce ne fut pas avant les années 80 que les preuves du réchauffement devinrent vraiment convaincantes. Pour ce qui est des modèles, la critique est particulièrement facile étant donné qu'un modèle parfait n'existe tout simplement pas. Aujourd'hui les modèles de circulation globale sont immensément complexes et assemblés par de grandes équipes. On peut raisonnablement croire qu'un seul individu comprenant chaque partie du modèle n'existe pas non plus. Bien qu'un modèle ne puisse décrire la réalité de

manière infaillible, il peut répondre à des questions spécifiques comme l'existence de points de bascule liés à des boucles de rétro-action par exemple. Malgré tout, les modélisateurs sont bien conscients de ces limites et ainsi les critiques légitimes des modèles sont partie intégrante du développement routinier des modèles de circulation générale, ce qui implique une large gamme de tests et comparaisons avec des données réelles. De mon point de vue, extérieur à la communauté modélisatrice étant issue du domaine de la physique non linéaire, des années d'études m'ont mené à la conclusion que les prédictions de modèles analysés sur de larges gammes d'échelles temporelles et spatiales ont en effet des types de variabilité assez semblables aux données, donc réalistes.

Même si l'on ignore les modèles, la température croissante nécessitait une explication. Les sceptiques ont donc commencé une longue bataille pour remettre en question les données, les extrémistes doutant de la réalité même du réchauffement. Par exemple, dans les années 90 l'effet « d'îlots de chaleur », dans lequel les températures mesurées sont augmentées de façon non représentative de leur région par le développement de zones urbaines entourant des zones auparavant non développées par l'homme, fut utilisé pour déclarer les estimés de température globale biaisés. Par ailleurs, les mesures de la température atmosphérique, et non de surface, ont d'abord échoué à corroborer la tendance au réchauffement déjà mesurée par les stations de surface. Les protagonistes principaux de cette saga furent les scientifiques évangélistes chrétiens J. Christy et R. Spencer qui collaborèrent à l'analyse. Les deux furent francs en ce qui a trait à leur religion avec une publication récente justifiant leur scepticisme basé sur les Écritures: « La Terre et ses écosystèmes, créés par la conception intelligente et le pouvoir infini de Dieu est maintenue par Sa fidèle providence, sont robustes, élastiques, s'autorégulent et s'autocorrigent ». Au cours des quinze années qui suivirent leur publication initiale, pas moins de quatre erreurs subtiles furent identifiées dans leur interprétation des mesures par satellite [Mann, 2012]. Dès 2005, il devint clair que contrairement aux prétentions initiales, les satellites supportaient en fait la tendance au réchauffement de surface observé. Un an plus tard, vint le son du glas pour le scepticisme légitime. Michael Shermer, éditeur du magazine *Skeptical Inquirer* (littéralement: « L'enquêteur sceptique »), changea de position disant qu'à la lumière des nouveaux développements survenus en science climatique, s'opposer à l'idée du réchauffement anthropique sur les bases du scepticisme serait antiscientifique.

Le problème est que quand il y a des intérêts en jeu, les règles habituelles du discours intellectuel et du scepticisme scientifique ne s'appliquent plus. C'est particulièrement vrai aux États-Unis où des groupes de réflexion de droite tels que *l'Institut Marshall* et le *Science and Environment Policy Project* furent généreusement financés par l'industrie des hydrocarbures. Par exemple en 1998, Exxon-Mobile leur alloua 20 millions de dollars dans le but de répandre le doute à propos du réchauffement anthropique, lancer une campagne de publicité afin d'affirmer que le réchauffement n'était ni réel ou dommageable et effectuer des actions lobbyistes auprès du congrès États-Unien. En 2007, le *American Enterprise Institute* offrit 10 000\$ ainsi que le remboursement de dépenses pour effectuer des tournées de conférences critiquant le quatrième rapport du GIEC qui venait d'être publié. En 2012, *l'Institut Heartland* paya des individus pour intervenir sur Internet pour dénigrer l'idée d'un réchauffement anthropique et de plus, paya aussi des scientifiques pour écrire des rapports exprimant des points de vue sceptiques. L'institut commença aussi une campagne afin qu'on introduise des éléments de climato-scepticisme dans les curriculums scolaires. Dans une étude récente Brulle (2014) établit que pas moins de 91 différentes organisations, incluant des groupes de réflexion, des groupes de défense et des associations professionnelles, avec un financement combiné de plus de 900 millions de dollars par année, forment collectivement un « contre-mouvement sur la question des changements climatiques ».

Les tactiques climato-sceptiques sont difficilement compatibles avec le principe du débat désintéressé. En effet, ces techniques ont souvent été exactement les mêmes que celles utilisées par les compagnies tabatières pour nier les effets délétères liés à la consommation de cigarettes. Certains individus ayant fait carrière en tant que « sceptiques » avec l'industrie tabatière se sont simplement recyclés en « climato-sceptiques » ! Une tactique sceptique est de décrédibiliser des publications réputées en y juxtaposant des citations provenant d'une multitude de sources prises hors contexte. De cette façon, on amplifie de simples désaccords entre scientifiques et on exagère la signification de n'importe quelle erreur, peu importe son importance réelle, pour ainsi vraiment dénigrer la science.

Finalement, la sociologie et la politique du climato-scepticisme sont « impressionnantes ». Aux États-Unis, au moins, sous l'égide du fondamentalisme religieux, il y a eu une convergence des organisations créationnistes et climato-sceptiques se servant des mêmes médias, tels Fox News, et des mêmes porte-paroles, tels Glenn Beck et Rush Limbaugh.

Un excellent survol, écrit par un participant actif, est le livre : « Le Bâton de Hockey et les Guerres Climatiques : Missives en Provenance du Front » (« The Hockey Stick and the Climate Wars: Dispatches from the Front Lines ») [Mann, 2012].

Une nouvelle et simple démonstration du réchauffement climatique sans modèles de circulation générale

Aucune théorie scientifique de la nature peut être prouvée d'une manière mathématique et rigoureuse. Il y aura toujours de la place pour un « doute raisonnable ». Dans le cas du réchauffement anthropique, les démonstrations ont comporté plus que souvent d'immenses modèles dont les tenants et aboutissements étaient souvent difficiles à comprendre même pour les spécialistes. Puisqu'aucun modèle n'est parfait, cela a reconforté les sceptiques pour qui l'argument fondamental est l'inadéquation des modèles, permettant d'affirmer que le réchauffement est purement naturel. J'aimerais présenter ici de nouveaux travaux qui démolissent cette position suffisante. J'ai lancé l'idée initiale aux *Sceptiques du Québec* qui en 2012 demandèrent : « Si le réchauffement est si évident, pourquoi est-ce qu'un superordinateur est nécessaire pour le démontrer ? » (La présentation répondant à la question peut être consultée sur mon site web : <http://www.physics.mcgill.ca/~gang/Lovejoy.htm> voir le résumé (en Français, [Dubé, 2013])). Comme nous verrons, la démonstration sans modèle nous donne un résultat plus puissant. Nous pouvons rejeter l'hypothèse sceptique affirmant que le réchauffement n'est rien de plus qu'une gigantesque fluctuation naturelle centenaire. Notons au passage une asymétrie fondamentale de la méthode scientifique. Il est beaucoup plus facile de réfuter une théorie que d'en prouver une afin que le résultat résolve et apaise effectivement le débat scientifique ou intellectuel [Lovejoy, 2014d], [Lovejoy, 2014c], [Lovejoy, 2014b].

J'ai expliqué plus haut que le dioxyde de carbone est responsable d'un forçage climatique positif, phénomène altérant la balance énergétique. Il y a cependant une variété d'autres forçages anthropiques ayant un impact significatif. Les plus importants sont les autres gaz à effet de serre (notamment le méthane), mais aussi les aérosols, c'est-à-dire de fines particules en suspens souvent issues de la pollution qui tendent à « brunir » l'atmosphère, de ce fait refroidissant la Terre en réfléchissant de la radiation solaire vers l'espace. Un troisième type de forçage, plus faible, est

celui lié à l'utilisation du territoire, notamment la conversion des habitats naturels en terres agricoles, rasant de vastes étendues de forêts pluviales tropicales. Cependant, plusieurs de ces effets sont particulièrement difficiles à quantifier, en particulier le refroidissement dû aux aérosols. En plus de ça, il faut considérer la vapeur d'eau et les boucles de rétro-action liées aux nuages qui sont responsables du degré élevé d'incertitude. On parle du 1.5-4.5 degrés Celsius par doublement de la concentration de dioxyde de carbone. Malgré tout, sans

sophistiquées ou à une connaissance spéciale, il est facile de voir que la température augmente de manière quasi linéaire, c'est-à-dire en ligne droite, mais avec des fluctuations superposées en plus, qui représentent la variabilité naturelle. La variabilité naturelle croissante n'est pas seulement une conséquence due aux interactions non linéaires complexes qui sont propriété interne inhérente au système climatique, en particulier les systèmes atmosphériques et océaniques, mais elle est une réponse naturelle aux forçages naturels externes, en particulier la variabilité solaire et les éruptions volcaniques.

Températures globales : NASA - GISS

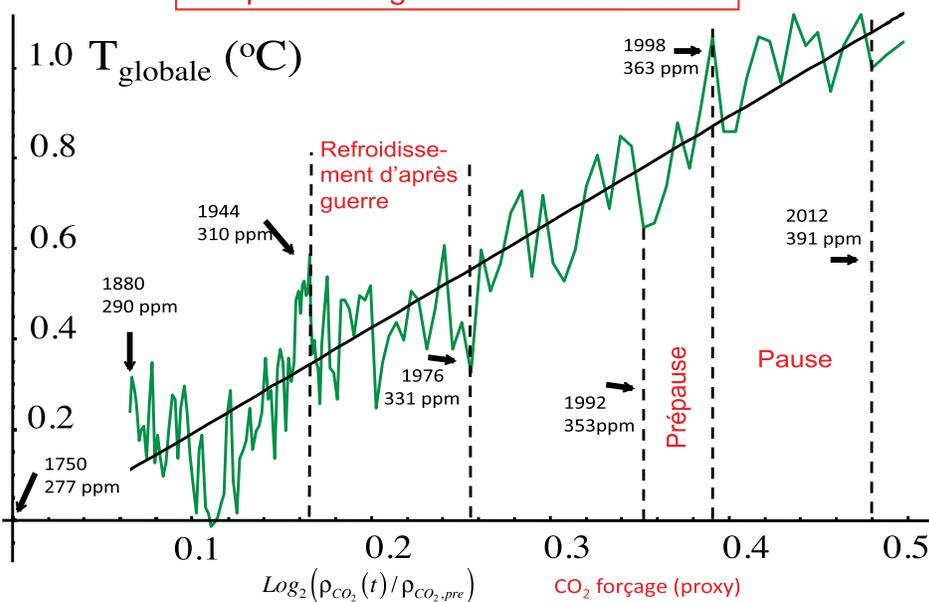


Figure 1. Anomalies globales de température (NASA, 1880-2013) en fonction du forçage carbonique radiatif comme substitut linéaire. La droite a une pente de 2,33 degrés Celsius par doublement de dioxyde de carbone. Certaines dates et les concentrations moyennes annuelles de dioxyde de carbone sont indiquées en référence. Les lignes verticales pointillées indiquent le commencement et la fin d'événements discutés dans le texte (1944, 1976, 1992, 1998). Adapté de Figure 1a [Lovejoy, 2014a].

même considérer tous les forçages en détail, on peut faire état des liens solides qui les relient, c'est-à-dire l'économie. Dire que si l'économie mondiale double, on verrait doubler les concentrations de dioxyde de carbone, celles de méthane, celles d'aérosols ainsi que la superficie de territoire réaménagé, est en fait une très bonne approximation. C'est la justification pour utiliser les relativement bonnes mesures du forçage carbonique prises depuis 1880 comme substitut pour tous les forçages anthropiques. Par exemple, les données historiques concernant tous les GES montrent que le total des forçages est presque exactement 79 % plus grand que celui du dioxyde de carbone seulement.

On peut donc estimer le réchauffement anthropique total depuis 1880 sur la figure à l'aide du domaine vertical couvert par la droite. On trouve alors qu'il y a eu un réchauffement d'un degré Celsius et que la pente de la droite, la « sensibilité climatique effective », est de 2.33 degrés Celsius par doublement de dioxyde de carbone. Cela représente donc l'augmentation historique réelle de la température en fonction du dioxyde de carbone observé, ce qui, implicitement, prend en compte les autres effets anthropiques. Ce résultat est bien ancré dans l'intervalle avancé par le GIEC, 1.5-4.5 degrés Celsius. Notons que c'est une estimation pour une quantité légèrement différente, c'est-à-dire la « sensibilité climatique au point d'équilibre ». La faiblesse de notre approche est qu'elle considère que c'est l'augmentation de dioxyde de carbone de l'année en cours qui détermine le réchauffement anthropique pour l'année alors qu'en fait, la plus grande partie de la chaleur (et la moitié du CO₂) se retrouve d'abord dans l'océan et il y a donc délai avant qu'elle remonte dans l'atmosphère, et c'est sans prendre en compte des boucles de rétro-action qui compliquent davantage les choses ! On peut refaire le calcul

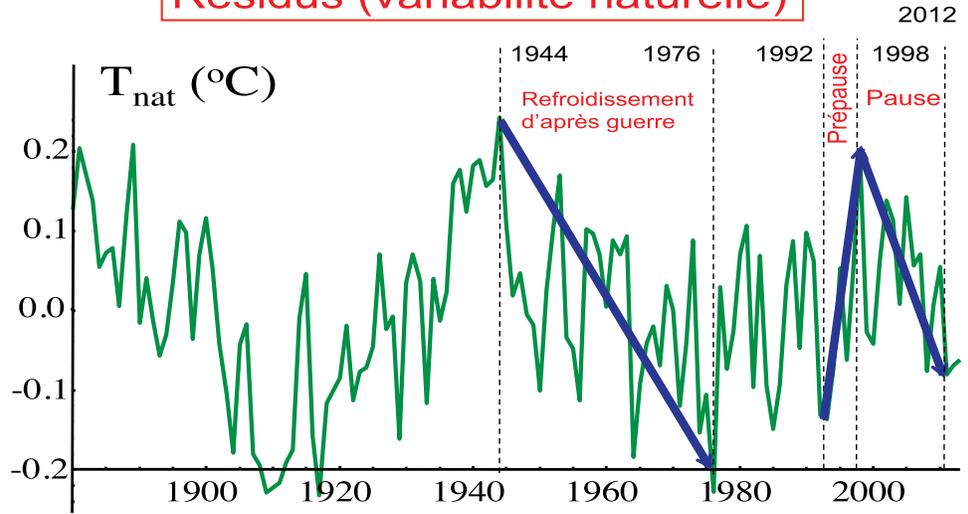
Figure 1, ne nous donne pas la température en fonction du temps comme d'habitude, mais plutôt en fonction du forçage carbonique. Sans faire appel à des statistiques inpénétrablement

en prenant partiellement en compte ce délai en alignant la température avec le forçage carbonique 10 ou 20 ans avant. Avec cette approche, la conclusion reste la même, mais l'estimation de la sensibilité climatique effective passe à 3.73 degrés Celsius par doublement de dioxyde de carbone. Une analyse statistique détaillée des deux estimations nous donne le résultat final de 1,9-4,2 degrés Celsius, avec un degré de certitude de 95 %, ce qui est exactement au milieu de l'intervalle du GIEC, mais quelque peu plus précis.

Sur la figure 1, la différence entre la ligne noire, représentant la contribution anthropique à la température et la température réelle, c'est-à-dire la courbe verte plus variable, est un estimé de la variabilité naturelle, c'est d'ailleurs ce qu'illustre directement figure 2. Sur ce dernier, on peut directement voir les grandes fluctuations naturelles de la température globale. Par exemple, considérons la période allant de 1998 à 2013, la fameuse « pause ». Au cours des dernières années, les climato-sceptiques ont claironné que cet hiatus était une preuve que le réchauffement s'était arrêté et qu'il n'était donc pas d'origine humaine. Sur figure 1, la période depuis 1998 apparaît comme des fluctuations autour d'une droite relativement plate. Le figure 2 montre que c'est effectivement un refroidissement naturel assez important, d'environ 0,3 degré Celsius, qui éclipse le réchauffement anthropique, la ligne noire du premier diagramme, qui fut d'une magnitude pratiquement égale. Bien que ce refroidissement apparaît inhabituel, il n'est pas si rare puisque l'analyse montre que de tels événements, d'une durée d'environ 15 ans, reviennent naturellement tous les 20 à 50 ans [Lovejoy, 2014a]. Si on considère la situation dans son ensemble, c'est-à-dire que le refroidissement survient après un réchauffement pré-pause qui fut encore plus important, de 1992 à 1998, la pause est donc un comportement qu'on peut simplement qualifier de « retour vers la moyenne ». Sur la figure 1, on voit que c'est seulement depuis 2012 que la température globale a retraversé sous la droite de tendance à long terme du réchauffement anthropique. En effet, la théorie du réchauffement anthropique prédit qu'il y aura une pause à partir de 1998. Sans cette pause

le réchauffement aurait été si fort qu'il aurait invalidé la théorie ici présentée ! Une analyse supplémentaire nous montre que si les émissions continuent d'augmenter à la vitesse actuelle, on pourra rejeter cette théorie avec 95 % de certitude si la pause venait à se prolonger jusqu'en 2019-2020. D'ici là on s'attend donc à un nouveau retour vers la moyenne, mais cette fois vers le haut, donc

Résidus (variabilité naturelle)



un réchauffement.

Figure 2: Les résidus de la droite sur le diagramme de la figure 1 sont une estimation de la variabilité naturelle. Les lignes pointillées verticales sont les mêmes ici que dans le diagramme précédent et les flèches indiquent les événements discutés dans cet article. Adapté de la figure 1c, [Lovejoy, 2014a].

Finalement, nous avons effectué une analyse statistique de plus utilisant les estimations pré-industrielles de température, la période allant de 1500 à 1900 reconstruite à l'aide de différents indicateurs notamment les carottes glaciaires, les sédiments de lac, les anneaux de croissance d'arbres, etc. Cette analyse nous permet d'estimer la probabilité que le réchauffement depuis 1880 ne soit qu'une gigantesque fluctuation naturelle. Nous démontrons ainsi que l'hypothèse d'un réchauffement naturel peut être rejetée avec un degré de certitude entre 99 et 99,9 % ([Lovejoy, 2014d]).

La réaction sceptique

Notre conclusion affirmant que la pause est naturelle, mais

que le réchauffement industriel ne l'est *pas* a provoqué de fortes réactions chez les sceptiques. À peine quelques heures après le communiqué de presse McGillois annonçant la publication de l'article [Lovejoy, 2014d], le sceptique *major domo* Viscount Lord Christopher Monkton of Brechely a donné le ton en qualifiant l'article d'« émanation d'ectoplasme méphitique des forces des ténèbres ». Dans les semaines qui suivirent, j'ai été inondé par un flot constant et abusif de messages courriels et Twitter. Il y a même eu tentative d'intimidation envers l'Université McGill par un groupe de Calgary au nom Orwellien, les « *Amis de la Science* », afin que le communiqué de presse soit retiré du site web de l'institution. Malgré tout, la critique scientifique a été faible. La réaction habituelle a été l'utilisation de l'information historique, en particulier en ce qui a trait à l'optimum climatique médiéval, pour avancer qu'il y a 800 ans les températures *globales* *auraient pu* être plus chaudes qu'aujourd'hui et de par le fait même contredire notre analyse. Cette position rate une information essentielle. La probabilité qu'un tel changement de température en *une période de 125 ans* est extrêmement faible et rien n'empêche qu'un tel changement survienne bien plus lentement, c'est-à-dire sur des périodes beaucoup plus longues. Une erreur connexe est de tirer des conclusions de données, paléo ou instrumentales, représentant des fluctuations centenaires plus importantes, mais représentatives de petites régions géographiques. Par exemple, sur leur site web, les « *Amis* » clament haut et fort une augmentation de 0,9 degré Celsius dans le centre de l'Angleterre sur une période allant de 1663 à 1762, prétendant ainsi que [Lovejoy, 2014d] se trompe. Il faut considérer ici qu'étant donné que l'Angleterre recouvre environ 0,04 % de la superficie terrestre, c'est difficilement justifiable de la prendre comme représentant le globe en entier. Dans les faits, pour la même période la température à l'échelle globale a augmenté de seulement 0,21 plus ou moins 0,12 degré Celsius, ce qui bien sûr est moins que le réchauffement global industriel, environ 0,9 degré.

Remerciements:

Je tiens à remercier Raphael Hébert pour la traduction du texte de l'Anglais.

Références

- Dubé, L. (2013), Qu'est ce que c'est le Climat: un Regard Sceptique sur les Climato-Sceptiques *Québec Sceptique*, 81, 57-64.
- Lovejoy, S. (2014a), Return Periods of Global Climate Fluctuations and the Pause, *Geophysics Research Letters*, 41, 4704-4710 doi: 10.1002/2014GL060478.
- Lovejoy, S. (2014b), Opinion: Research shows that Global Warming isn't Natural, Op-Ed, in *The Gazette*, edited, Montreal, 10 juin, 2014.
- Lovejoy, S. (2014c), Climate Closure: Game over for Climate Sceptics, *EOS* (submitted).
- Lovejoy, S. (2014d), Scaling Fluctuation Analysis and Statistical Hypothesis Testing of Anthropogenic Warming, *Climate Dynamics*, 42, 2339-2351 doi: 10.1007/s00382-014-2128-2.
- Lovejoy, S. (2014e), A Voyage through Scales, a Missing Quadrillion and why the Climate is not What ou Expect, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-014-2324-0.
- Mann, M. E. (2012), *The Hockey Stick and the Climate Wars: Dispatches from the Front Lines*, Columbia University Press.
- Weart, S. R. (2008), *The Discovery of Global Warming*, Harvard Univ. Press.

NDLR : La deuxième partie de ce texte, intitulée « Réchauffement Anthropique, Partie 2 : Que Faire ? » paraîtra dans le prochain numéro de Québec humaniste



Réchauffement Anthropique, Partie 2 : Que Faire ?

Shaun Lovejoy *

Quel sera l'impact du réchauffement global ?

Dans un premier essai publié dans le numéro précédent de *Québec humaniste*, j'ai essayé de rendre l'hypothèse d'un réchauffement anthropique aussi convaincante que possible. Cette recherche est certes un travail à compléter. Malgré tout elle est suffisamment robuste pour priver les climato-sceptiques de leurs derniers arguments affirmant que les modèles pourraient être erronés et la variabilité climatique naturelle. Bien que le scepticisme scientifique soit fondamental pour l'avancement scientifique, en ce qui concerne le réchauffement anthropique, la science a atteint une conclusion où les dernières zones d'ombre dans le débat sont devenues si insignifiantes que le moment est venu de tourner la page. Ceux qui persistent à affirmer que le réchauffement est naturel ne peuvent plus être qualifiés de climato-sceptiques, mais de négationnistes climatiques.

Mais quelles seront les conséquences de la dynamique en cours du climat ? Pour commencer, les températures croissantes vont mener à une expansion océanique ainsi qu'à la fonte des calottes glacières, contribuant à la hausse du niveau de la mer, et de par ce fait à l'inondation des basses terres. Du même coup, l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère contribuera à l'acidification des océans, étant donné que l'excès se dissout dans l'océan sous forme d'acide carbonique, ce qui attaque directement les crustacés, mollusques à coquille ainsi que les coraux puisque leurs coquilles de carbonate solide sont vulnérables à la corrosion par cet acide. À l'échelle temporelle biologique, le réchauffement sera rapide, ce qui présage que tous les organismes ne pourront s'adapter à temps. Plusieurs espèces viendront à s'éteindre. À l'échelle humaine, les impacts sur notre santé incluent une hausse de la mortalité directement liée à l'augmentation de températures extrêmes ainsi qu'un fardeau supplémentaire de maladies favorisées

par les températures élevées telle la malaria. Il y aura aussi des bénéfices: l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone fertilise la croissance végétale, et de par le fait même augmente la productivité agricole. Nous nuancerons ces propos sous peu. Ce n'est pas tout, les régions nordiques comme par exemple le nord du Québec, bénéficieront de conditions plus clémentes. En effet le « paradoxe de la biodiversité nordique » est tel que même si le réchauffement mène à l'extinction d'espèces polaires, il encourage les niches d'espèces plus méridionales à migrer vers le nord et de ce fait augmente la biodiversité locale.



Les conséquences générales s'exprimeront à divers degrés d'intensité dépendamment de l'amplitude et de la portée du réchauffement. Un problème important est l'incertitude sur l'amplitude, c'est-à-dire à quelle quantité de réchauffement devrions-nous nous attendre ? Dans les mots de Tim Palmer, président de la *Société Météorologique Royale* (2012): « [...] dû aux profondes incertitudes, principalement en ce qui a trait au cycle hydrologique, nous sommes toujours incapables d'écarter les possibilités qu'un changement climatique anthropique soit catastrophique pour l'humanité dans les siècles à venir ou qu'il sera tel qu'on pourra s'y adapter facilement [...] » [Palmer, 2012].

Le problème est qu'il y a plusieurs conséquences du réchauffement qui ne sont pas simplement

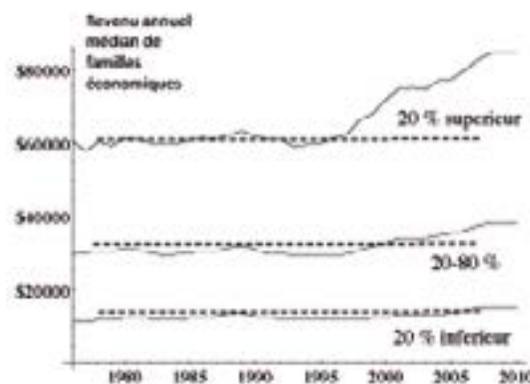
incrémentales et quantitatives. Plusieurs sont qualitatives et comportent des « points de bascule » qui pourraient être potentiellement catastrophiques. Par exemple, en plus des effets généraux mentionnés ci-haut, en considérant d'abord un réchauffement modeste, d'environ 1.5 degré Celsius, il y aura une augmentation de stress hydraulique, c'est-à-dire des sécheresses simultanément à une augmentation des dommages liés aux inondations. Un réchauffement entre 2 et 3 degrés Celsius intensifiera les conclusions établies ci-haut, mais risque aussi de provoquer la fonte complète des calottes polaires ce qui apportera une importante élévation du niveau de la mer (jusqu'à 70 m) et des changements climatiques irréversibles.

En effet, une étude complète de la situation, incluant le fait que la concentration actuelle de dioxyde de carbone est d'environ 400 parties par millions (ppm), la concentration la plus élevée donc depuis 650 000 ans, a mené à la fameuse conclusion affirmant que des niveaux en excès de seulement 350 ppm ne sont pas « compatibles avec la planète sur laquelle la civilisation s'est développée ou à laquelle la vie sur Terre est adaptée. » [Hansen et al., 2008]. Le risque de terribles conséquences est la raison pourquoi il y a vingt ans déjà la communauté internationale a fixé 2 degrés Celsius au-dessus de la température pré-industrielle comme limite du réchauffement. Ce fut la base de l'accord de Kyoto qui visait à limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau de 1990. Nous sommes déjà à mi-chemin. Ironiquement, à la lumière de nouvelles avancées scientifiques, la mise à jour [Hansen et al., 2008] conclut que la cible des émissions de 1990 est déjà trop élevée pour être considérée sécuritaire.

Que faire?

Dans le contexte de changements environnementaux, nous entendons souvent le slogan innocent: « Sauvons la planète ! ». Bien que cela puisse être bien intentionné, peu importe nos actions, la planète survivra. La position

humaniste est plutôt : « Sauvons les humains ! ». C'est plus qu'une simple nuance, « Sauvons la planète ! » correspond plus justement à la position clairement anti-humaniste, l'idéologie « Gaïenne », de James Lovelock pour qui la Terre est littéralement un super-organisme et l'humanité n'est rien de plus qu'une composante microscopique esseulée. Son but Gaïen est de sauver Gaïa, avec ou sans les humains, afin de maintenir en vie cette planète hypothétiquement vivante.



La relation moyenne entre PIB et IPV pour une vingtaine de pays (adapté de [Kubiszewski et al., 2013]). À partir de 1975 notez la relation inverse entre le Produit Intérieur Brut (PIB) et l'Indice de Progrès Vériquide (IPV).

Si les émissions arrêtaient demain, le niveau de dioxyde de carbone continuerait d'être élevé et la température continuerait d'augmenter à mesure que la chaleur emmagasinée dans les océans continuerait de réchauffer l'atmosphère. Puis, en supposant qu'il n'y a pas de changements catastrophiques et irréversibles déjà à nos portes, le niveau de dioxyde de carbone ainsi que la température diminueraient tranquillement au fil des siècles. Par conséquent, peu importe ce qui sera fait, nous devons mitiger les conséquences du réchauffement.

Mais comment garder l'augmentation sous 2 degrés Celsius, bien que ce soit un niveau avoué arbitraire. Sans considérer une avancée technologique qui nous permettrait de séquestrer de manière économiquement viable le dioxyde de carbone de l'atmosphère et de l'enterrer sans danger, les émissions doivent être réduites et cette avenue passe inévitablement par la réduction de la combustion d'hydrocarbures. Le problème est que nous dépendons des combustibles fossiles. L'économie et la consommation d'hydrocarbures croissent simultanément depuis cent ans et aujourd'hui l'énergie fossile compose 80 % de l'usage énergétique global (voir [Evans, 2007]). Le Groupe d'Experts sur l'Évolution du Climat et sur l'Adaptation et la Mitigation, composé en majeure partie d'économistes, a développé plusieurs « scénarios d'émissions » pour le développement économique global jusqu'en 2100 (Cinquième rapport du GIEC, RE5, 2013). Ceux-ci projettent

une croissance économique mondiale de 2 % par an, ajustée à 3 % par an si on réduit les émissions suffisamment pour garder les températures sous la limite de l'augmentation de 2 degrés Celsius. Malgré un ton optimiste dans leurs rapports, il reste que même le scénario de croissance de 2 % par an sous-entend qu'en 2100, environ 90 % de la consommation énergétique proviendra de technologies qui n'existent pas encore. Voir Pielke et collègues [2008] en particulier pour une critique. En effet, la seule technologie existante qui peut effectivement soutenir ces scénarios est l'énergie nucléaire qui, dans sa forme conventionnelle, devrait arriver à court de combustibles avant la fin de ce siècle. Cette option nécessiterait une transition vers des réacteurs nucléaires à surgénération qui n'ont pas encore fait leurs preuves et sont très dispendieux (voir [Hoffert et al., 2002]).

Enfin, aussi attrayantes qu'elles puissent paraître, les sources d'énergie éolienne et solaire ne peuvent combler le vide en entier, du moins pas à court terme. Étant hautement intermittentes, ces énergies ne peuvent combler qu'environ 10 % de la demande sur les réseaux électriques nationaux [Evans, 2007]. Augmenter la capacité d'entreposage augmente grandement le coût et n'efface pas le fait qu'à cause de leur densité énergétique faible, de grands territoires devront être réaménagés. Certains scénarios évoquent que des millions de kilomètres carrés seront requis pour complètement remplacer les combustibles fossiles existants.

L'économie néolibérale nous enseigne une chose : si le prix y est, nous pouvons oublier les lois de la nature, la magie du marché est sans limites ! Il suffit d'émettre l'incitatif économique approprié en créant un marché du carbone, ou même en imposant effrontément une taxe sur le carbone, pour que le marché réponde spontanément en créant des technologies vertes sans émissions carboniques. Inquiets que ces technologies seront trop dispendieuses ? En 2100, l'économie sera au moins 5 fois plus productive alors restons calmes, empruntons maintenant et les paiements seront faciles.

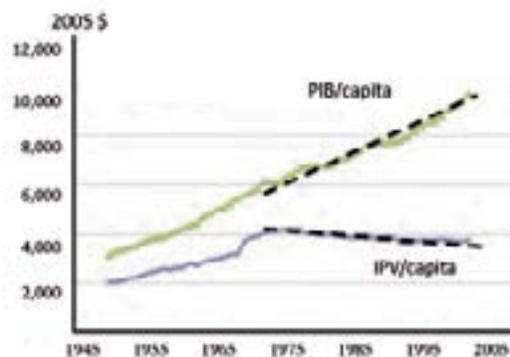
L'approche ci-haut est à peine une caricature. Considérons la position d'un économiste de premier plan à

Yale, l'économiste William Nordhaus qui, dans *Science* (1992), affirma : « L'agriculture, la partie de l'économie la plus sensible aux changements climatiques, ne compose qu'un maigre 3 % de la productivité nationale. Cela veut dire qu'il est impossible que l'effet soit important pour l'économie États-Unienne. » Cette idée fut reprise par l'économiste d'Oxford Wilfred Beckerman dans *Petit est Stupide* (*Small is Stupid*, 1995) : « même si la productivité nette de l'agriculture États-Unienne baisse de 50 % d'ici la fin de ce siècle, le résultat sera une baisse minimale de 1,5 % du PIB. » (cité dans [Foster et al., 2010],

position répétée par le lauréat du prix Nobel d'économie Thomas Shelling dans *Affaires Étrangères* (*Foreign Affairs*, 1997). On peut donc se consoler que même si un changement climatique venait à rendre impossible toute agriculture, l'économie se contracterait de seulement 3 % !

Depuis, la position de Nordhaus a évolué puisque dans son livre publié récemment [Nordhaus, 2008], son estimation de réduction de la production mondiale en 2100 pour cause du changement climatique a augmenté de 1 % à 3 % du PIB.

Comparons ceci avec le rapport « Marchands de Peur » (*Wall Street Journal*) par l'ancien économiste en chef à la Banque Mondiale, Nicolas Stern (« The Stern Review », 2007). La différence clé entre les analyses de Nordhaus et Stern est le taux d'escompte. Ce dernier quantifie la valeur actuelle de bénéfices futurs. C'est une tentative de prendre en compte le fait que si une économie continue de croître, les coûts en deviendront une fraction moindre. Par exemple, avec un taux d'escompte de 10 %, une catastrophe affectant l'humanité dans 50 ans aurait une valeur actuelle de moins d'un point de pourcentage du coût futur. En utilisant les taux d'escompte de Nordhaus, 6 %, et de Stern, 1,5 %, afin de compenser des dommages climatiques de trilliards de dollars, en l'an 2100, on trouve que ça vaut, respectivement, 2,5 milliards de dollars ou 247 milliards de dollars (voir l'excellente discussion [Foster et al., 2010]). Clairement, quand il s'agit du



Revenu annuel médian des familles, 1976 - 2010 (dollars constants de 2010). En 2010, au Québec la médiane était de \$ 58,100 et au Canada de \$ 65,500 Source: Statistiques Canada.

changement climatique, la valeur du taux d'escompte est en majeure partie une question éthique concernant la part que les générations futures auront à payer pour réparer les dommages causés par les émissions d'aujourd'hui tout en tenant compte des projections de croissance. La différence principale entre Nordhaus et Stern est donc le coût et, pour les politiques, combien taxer le carbone. Pour résumer, les économistes du courant dominant croient qu'une croissance économique exponentielle perpétuelle est *nécessaire*, même si ce n'est que pour que les coûts des mesures d'adaptation et de mitigation soient abordables !

Considérez quelques-unes des suppositions typiques d'un peu plus près. Tout d'abord, elles ne tiennent pas compte des conséquences d'un point de bascule catastrophique, ni ne considèrent-elles sérieusement les menaces plus prévisibles. On le voit dans la recommandation de Stern de stabiliser les niveaux de dioxyde de carbone à 550 ppm, même si cela mènerait presque certainement à une augmentation au delà de 2 degrés Celsius et probablement même 3 degrés Celsius. Pourquoi ? Ce haut niveau évitera des perturbations économiques potentielles. L'économie se joue de l'humanité. Plus fondamentale encore que d'ignorer des changements catastrophiques possibles est la supposition qu'une croissance exponentielle soutenue soit possible. En se basant sur la crise de la dette combinée aux prix élevés des combustibles fossiles et d'autres matières premières, plusieurs auteurs, comme Robert Heinberg, ([*Heinberg*, 2012]) et Jeff Rubin ([*Rubin*, 2012]), soutiennent que la croissance économique réelle est déjà terminée, du moins pour les pays industrialisés.

Même s'il n'existe pas de point de bascule et même si les conséquences d'un réchauffement de 3 ou même 4 degrés Celsius pouvaient être contingentes, et même si une réduction de la croissance des émissions de dioxyde de carbone était en effet possible sans détruire l'environnement et le climat, l'humaniste doit se demander : une croissance économique soutenue est-elle *désirable* ? Il est ironique qu'aujourd'hui on se pose la question quand depuis des générations, certainement depuis l'humanisme socialiste du 19^e siècle, on a pris pour acquis qu'une croissance économique quantitative était désirable ainsi que nécessaire afin d'améliorer la condition humaine. L'économie classique, qu'elle soit libérale ou Marxiste, fut formulée à une époque où les concepts de changement climatique et de déplétion des ressources naturelles étaient soit inimaginés

ou si éloignés de la réalité qu'ils ne furent pertinents qu'à titre académique.

Certainement, il est justifiable que les pays pauvres de ce monde veuillent croître afin de s'élever au-dessus de la misère, mais qu'en est-il du monde déjà développé ? Le cas canadien est typique. Depuis 1980, le Produit Intérieur Brut, PIB, *per capita*, a plus ou moins doublé bien que le revenu médian ait stagné, c'est-à-dire que virtuellement tous les profits liés à la croissance économique furent empochés par les 20 % déjà les plus fortunés, et même que de ce pourcentage la majeure partie enrichit le 1 % supérieur (Statistiques Canada). Cette tendance est largement répandue dans l'économie mondiale, montrant clairement que depuis 1980 ce n'est pas la croissance populaire qui est responsable de la surconsommation de ressources et de la dégradation environnementale ([*Monbiot*, 2011]). Dans son livre séminal, « Le capital au vingtième siècle », Thomas Piketty [*Piketty*, 2014] remet dans son contexte historique la récente explosion d'inégalités en effectuant une analyse originale des données historiques économiques. Son idée principale est simplement que dans son développement historique « normal », le taux de retour sur le capital est plus élevé que la croissance économique en entier ayant pour conséquence que ceux possédant le capital augmentent systématiquement leur part de l'économie globale. La période allant de 1930 à 1970 est exceptionnelle de par son caractère particulièrement plus méritocratique. Le vingt-et-unième siècle est donc établi comme similaire au dix-neuvième siècle durant lequel l'accès hérité au capital est, plus que jamais, déterminant de la classe sociale, de la richesse, du revenu et du pouvoir. Dans son livre récent, Naomi Klein [*Klein*, 2014] tire les conclusions politiques nécessaires.

Malgré tout, le PIB est un très mauvais indicateur de bien-être économique. Si on creuse un trou, le PIB augmente, puis si on le remplit, le PIB augmente encore ! Si on détruit un pays, disons l'Irak, le PIB augmente, puis si on le reconstruit, le PIB augmente encore ! Si on construit une usine, le PIB augmente, puis si on nettoie la pollution qu'elle aura causée, le PIB augmente encore, et ça continue ainsi. L'inadéquation du PIB est la raison pourquoi certains économistes ont développé d'autres indicateurs de bien-être économique, en particulier *l'Indicateur de Progrès Véritables*, l'IPV. Au lieu d'ajouter perpétuellement, comme dans les exemples précédents, l'IPV tente de soustraire où soustraction il devrait

y avoir. Il est donc très possible que construire une usine diminue l'IPV en fin de compte plutôt que de l'augmenter. Cela pourrait se produire si les impacts environnementaux et les coûts sociaux imposés aux générations présentes et futures étaient pris en compte correctement, ce que les économistes du courant principal appellent les « externalités ». Quand on le fait, des tendances des plus intéressantes émergent. Par exemple, des estimations de l'évolution de l'IPV de vingt différentes économies depuis les années 60 ont démontré que jusqu'à 7000 \$ par personne par an, l'IPV et le PIB sont liés de près. Par contre, au-delà de ce niveau de richesse moyenne, une relation inverse émerge menant l'IPV à diminuer à mesure que le PIB augmente. Sur ces prémices, depuis 1975, les pays développés ne *s'appauvrissent pas* mais *ne prospèrent point* ! (voir le résumé d'études internationales [Kubiszewski et al., 2013], et des détails pour le Québec en particulier dans [Meade, 2011]). Une partie de la pauvreté est cachée dans le sens qu'elle reflète les coûts de la destruction environnementale et de l'épuisement des ressources qui retombera sur les générations futures. À l'aide de l'idée de la « capacité porteuse », c'est-à-dire une façon de quantifier « l'empreinte écologique » humaine, on peut comprendre cela d'une façon quelque peu différente (voir: http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/footprint_basics_overview/). Par exemple, il fut estimé que depuis 1978, l'empreinte écologique globale *per capita* a dépassé la biocapacité *per capita*, et aujourd'hui l'excédent s'est élevé de plus de 50 %.

D'un point de vue humaniste, arrêter la croissance économique, du moins pour les pays développés, paraîtrait donc comme une condition essentielle pour arrêter la croissance des émissions de GES ainsi que pour prévenir un appauvrissement collectif provoqué par une croissance du PIB dû au marché libre. Des arguments similaires contre la croissance continue furent émis par Robert Heinberg [Heinberg, 2012], Hervé Kempf [Kempf, 2011] et Jeff Rubin [Rubin, 2012]. Terminer la croissance même, ce qui en soi ne résoudrait pas le problème climatique, sera extrêmement difficile à faire puisque la fin de la croissance économique exponentielle sur une période de temps allongée signera l'arrêt de mort du système capitaliste. Il suffit de se rappeler que récemment, pendant le *crash* de 2008-2009, nous avons assisté aux conséquences immédiates d'un arrêt de la croissance, même si ce n'est que pour un an ou deux. Des pauses prolongées rendront nécessaires des modèles économiques alternatifs et des changements politiques et

sociaux fondamentaux. On a déjà effleuré les difficultés associées à une telle transition étant donné que durant les 30 à 40 dernières années, la part du lion de la croissance a été engloutie par le 1 % déjà le mieux nanti. Une façon plus précise de mesurer la difficulté associée peut être établie en considérant non pas la concentration de la richesse, mais plutôt la concentration du contrôle économique et, par le fait même, de la puissance. Une étude novatrice récente par [Vitali et al., 2011] utilisant de nouveaux outils d'analyse réseautique empruntés à la physique statistique analysant une base de données comprenant 37 millions de compagnies privées a découvert que les 147 plus puissantes contrôlaient 40 % du tout. C'est plus près de 0,004% que de 1% en fait. Une concentration si importante de la puissance, investie par des organisations ayant pour seul but existentiel d'extraire un revenu positif sur leur investissement, sera probablement réfractaire au discours rationnel du changement.

* Professeur au Département de Physique, Université McGill, Montréal, Qué.

Remerciements :

Je tiens à remercier Raphael Hébert pour la traduction du texte de l'Anglais.

Références

- Beckerman, W. (1995). *Small is stupid: Blowing the whistle on the Greens*, Duckworth, London.
- Evans, R. L. (2007). *Fueling our future: an introduction to sustainable energy*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Foster, J. B., B. Clark, and R. York (2010). *The ecological rift*, Monthly Review Press.
- Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo, D. L. Royer, and J. C. Zachos (2008). Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim?, *The Open Atmospheric Science Journal*, 2 217-231 doi: 10.2174/1874282300802010217.
- Heinberg, R. (2012). *The end of growth*, The Post Carbon Institute.
- Hoffert, M. I., et al. (2002). Advanced technology paths to global climate stability: Energy for a greenhouse planet, *Science*, 298, 981- 987.