

Changement climatique : perspectives sur des menaces complexes

En 1895 le grand savant suédois Arrhénius annonçait une estimation du réchauffement que la combustion du charbon pourrait provoquer à la longue. Quelques décennies plus tôt, l'économiste anglais Gibon calculait que les réserves anglaises de ce combustible seraient épuisées en un siècle. Les perspectives étaient justes, les chiffres erronés. Il y a dix-huit ans, un livre, *Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles*, identifiait le problème des émissions de CO₂ et de CH₄ comme symétrique de celui de l'épuisement du pétrole, avec pour enjeu la bonne gestion de ressources planétaires finies et la maîtrise géopolitique des rentes qu'elles induisent. A l'aune de ce repère, le chemin depuis parcouru et les quatre points qui dominent le débat.

par Paul-Henri BOURRELIER, *Ingénieur général des Mines*

Introduction

Dix-huit années se sont écoulées depuis que le Groupe intergouvernemental d'études sur le climat a été constitué par le Programme des Nations unies pour le Développement et l'Organisation météorologique mondiale (1).

J'avais, en cette année 1988, rédigé avec Robert Diethrich un livre, *Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles*, dont le titre se rapportait à la fois aux mobiles de Calder, modèles chaotiques de la dynamique terrestre, et aux mobiles humains aussi instables. Le thème était notamment suscité par la découverte de la tectonique des plaques au début des années 1960 et par les observations spatiales qui avaient révélé l'apparition récente du trou d'ozone stratosphérique.

L'ouvrage soulignait que la notion de ressource devait être élargie, incluant les produits et l'espace, et que les limites contraignantes se trouvent réparties entre les deux extrémités des cycles des matériaux : à l'origine (les gisements) et à la fin (les sites de stockage des déchets). Ainsi, indiquions-nous, les gisements de combustibles fossiles sont épuisables, mais la capacité de l'atmosphère à recevoir les produits de la combustion l'est aussi ; à la rareté des stocks naturels d'uranium répond celle des sites de stockage équipés pour stocker des déchets nucléaires. Les deux raretés sont sources de rentes, et les dépenses à consentir aux deux bouts de la chaîne pourraient à l'avenir devenir comparables.

Il y a dix-huit ans, ce livre identifiait donc bien le problème des émissions de CO₂ et de CH₄ comme symétrique de celui de l'épuisement du pétrole, avec pour enjeu la bonne gestion de ressources planétaires finies et la maîtrise géopolitique des rentes qu'elles induisent. Le cadre conceptuel était déjà tracé. Principale différence par rapport au discours actuel : les lecteurs étaient supposés ne pas connaître l'expression « effet de serre ».

Nous n'avions pas un grand mérite à nous intéresser à ce phénomène car il avait été identifié près de deux siècles auparavant, et le grand savant suédois Arrhénius avait annoncé en 1895, qu'après de pénibles calculs, il était parvenu à estimer le réchauffement que la combustion du charbon pourrait provoquer à la longue. Quelques décennies plus tôt, l'économiste anglais Gibon avait calculé que les réserves anglaises de ce combustible seraient épuisées en un siècle. Tous deux avaient vu juste sur les perspectives, et fait des prédictions chiffrées erronées.

On attend pour la fin de l'année prochaine le 4^e rapport du Giec. Mais le précédent est encore représentatif de sa démarche, et nous pouvons nous référer aux communications partielles, au flux intense des informations diffusées sur Internet, ainsi qu'aux travaux de l'académie des technologies en liaison avec l'académie des sciences, ou à de multiples publications comme les actes du séminaire du Collège de France de 2005 (3).

J'utiliserai donc le repère de notre livre pour mesurer le chemin parcouru. Non spécialiste, je m'efforcerais par ce moyen de rester à une distance qui permette une mise en perspective.

La complexité de l'évolution climatique

Cette complexité était bien perçue en 1988. On savait que la machinerie climatique est mue par :

- ✓ les paramètres astronomiques : excentricité de l'orbite de la terre, obliquité... qui entraînent des variations d'insolation aux différentes latitudes ;
- ✓ les variations des émissions solaires et les éruptions volcaniques terrestres ;
- ✓ l'absorption du rayonnement solaire, dépendant de la couleur du sol et de la végétation ;
- ✓ la teneur de l'atmosphère en divers gaz créant l'effet de serre ;

- ✓ le cycle de l'eau dans l'atmosphère, dans les océans et sur les continents, sous ses formes liquide, solide et vapeur ;
- ✓ les particules atmosphériques de diverses origines ;
- ✓ les réactions des milieux vivants.

Les situations chaotiques, dont le paradigme est fourni par certaines configurations météorologiques, avaient été esquissées quatre-vingts ans plus tôt par Poincaré et explorées depuis une vingtaine d'années par les mathématiciens au moyen des fractales et de la théorie des catastrophes. La hausse de la teneur en CO₂ et autres gaz à effet de serre était observée, mais le cycle du carbone dans ses diverses combinaisons dépendant des mouvements atmosphériques et océaniques, de la végétation et autres formes de vie, et des émissions anthropiques était mal bouclé. Les effets thermiques relatifs au cycle de l'eau (nuages, fusion des glaces...) n'étaient connus qu'avec des incertitudes considérables, et on négligeait les particules.

Le niveau des connaissances sur les phénomènes (*Level of Scientific Understanding*) reste contrasté. Un tableau établi par le Giec symbolise l'éventail. Depuis 1988, les investigations ont allongé la liste des facteurs de complexité pris en considération : par exemple les nuages, les aérosols, les courants océaniques circum-terrestres... Les progrès dans la compréhension des cycles restent insuffisants ; même celui du carbone, le plus étudié, comporte des segments incertains de sorte que le bouclage ne permet pas un véritable contrôle.

Les progrès extraordinaires de la connaissance des climats du passé

La mise en place du Giec a dynamisé la recherche mondiale et a conduit à un progrès remarquable dans la connaissance des climats, des atmosphères et de la biodiversité du passé. Les observations spatiales, marines et dans les calottes glaciaires par le moyen de forages profonds, et les précisions des datations, ont permis de repérer des périodes de changements rapides et d'extinctions massives des espèces. On est désormais certain que la situation de la planète est passée par des phases de ruptures qui ont frappé dramatiquement les formes de vie sans la détruire complètement. Mais la terre bénéficie d'un privilège de robustesse par rapport aux autres planètes du système solaire, scrutées finement quelques décennies.

La précision des connaissances décroît au fur et à mesure que les tranches de temps considérées s'éloignent. On dispose :

- ✓ depuis vingt ans, d'un ensemble complet de mesures fiables et précises qui laissent cependant subsister des incertitudes sérieuses sur la plupart des cycles biogéochimiques ;
- ✓ depuis la révolution industrielle du début du XIX^e siècle, de séries reconstituées ;
- ✓ depuis le début de l'holocène, de recoupements entre les mesures et des données historiques... ;
- ✓ en remontant à 600 000 ans, d'une chronique documentée sur l'alternance des glaciations et des réchauffements ;

- ✓ sur les centaines de millions d'années de l'histoire géologique, de quelques repères en partie hypothétiques.

La modélisation et son bon usage

La modélisation des phénomènes est une démarche inhérente à la recherche scientifique. La pertinence et la puissance des modèles climatiques ont effectivement réalisé des progrès impressionnants. Comme dans tous les autres domaines, ces outils ne sont pas des représentations exactes de la nature (4), mais des constructions simplifiées établies dans un objectif fixé à l'avance ; chacune est pertinente dans un champ déterminé en vue de tester des hypothèses, combiner plusieurs effets, décrire une transformation observée, suivre une évolution. Les limites ne résultent pas de la capacité de calcul, sans cesse accrue, mais des informations sur la situation initiale et sur les conditions aux limites, et de l'imperfection de la représentation des phénomènes par des relations mathématiques.

Les modèles météorologiques en sont l'illustration : ils sont capables de prévoir correctement les événements sur une durée de quelques jours ; pour allonger cette durée, il faut accroître les mesures et les puissances informatiques de façon qui devient assez vite démesurée. La météorologie a fait, depuis quelques décennies, des progrès remarquables que l'on résume par le gain tous les dix ans d'une journée dans la prévision, mais qui n'iront pas beaucoup plus loin, en raison de la croissance excessive des coûts (5). On progressera, non pas en essayant d'étendre indéfiniment le champ d'un mégamodèle, mais en multipliant les modèles spécifiques.

Les modélisations climatiques globales constituent un véritable défi dans la mesure où elles sont issues des modèles météorologiques que l'on fait tourner au-delà de leurs limites (6). On les enrichit pour mettre l'accent sur tel ou tel effet. On les ajuste pour que leurs résultats coïncident avec les observations dans une période de temps et d'espace donnée. A ce prix on réalise des modèles qui répondent à beaucoup de questions spécifiques et qui sont instructifs.

Ils n'ont cependant pas pour autant acquis une capacité prédictive sur l'évolution réelle de la nature - même dans des hypothèses déterminées d'émissions futures (7). Cette impossibilité est souvent masquée ; elle décevrait la demande des non initiés, du public, des politiques qui le représentent, des décideurs. Tout lecteur attentif d'un exposé sur l'avenir du climat peut en faire l'expérience : il n'y a guère de cas où, après les précautions de présentation, ne se glissent des expressions qui laissent penser au lecteur non averti ou engagé qu'on lui présente des prédictions dotées d'une certaine probabilité (8).

Un perfectionnement important a été apporté par le durcissement des exigences de validation et par les inter-comparaisons des résultats des modèles. Ce dernier procédé peut donner des indications en quelque sorte expérimentales sur la sensibilité à certains paramètres ou à certains phénomènes qui sont calés différemment. Mais il ne fournit ni un encadrement des trajectoires possibles, ni une indication fiable sur le futur le plus probable, ni une mesure de l'incertitude.

Place de l'effet de serre parmi les causes de changement climatique

La reconstitution des climats passés fournit un éclairage sur la relation entre le climat et la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre – en CO₂ pour simplifier (9). Le constat est net, la corrélation saute aux yeux. On peut en déduire que les réchauffements entraînent des émissions qui ont pu accentuer le changement, et inversement confirmer que l'élévation de la teneur en CO₂ accentue l'effet de serre. Malheureusement dans cette simultanéité, la corrélation ne constitue pas une détermination scientifique du sens et de l'expression mathématique de la relation de cause à effet (10).

L'utilisation des modèles apporte une forte présomption, sinon une preuve. Les hausses (reconstituées) des émissions et de la teneur de l'atmosphère en CO₂, depuis le début de la révolution industrielle jusqu'à 1970, sont restées assez faibles ; la température (nous ne discutons pas pour l'instant la fabrication de ce paramètre) a varié en hausse ou en baisse selon les tranches de temps. Les modélisations effectuées avec l'ensemble des paramètres du climat sans l'intervention d'un changement de l'effet de serre permettent de reconstituer cette évolution. En revanche, l'évolution de la température depuis trente ans ne peut être reconstituée par les modèles que s'ils prennent en compte la croissance de la teneur en gaz à effet de serre (11).

La période est courte, mais elle est suffisante pour convaincre qu'il s'est passé quelque chose de nouveau et d'important, qu'un nouvel effet émerge, se superposant aux autres. Sa brièveté même est inquiétante, car si la divergence s'est produite en si peu de temps, il y a tout lieu de craindre qu'elle ne s'accroisse d'année en année jusqu'à de possibles ruptures puisque, en toute hypothèse, les teneurs en gaz à effet de serre vont continuer à croître. Le préavis a été bref.

A ce constat s'ajoute le fait que ces teneurs vont, d'ici la fin du siècle, atteindre des niveaux jamais connus depuis 400 000 ans. Nous allons donc entrer dans un monde inconnu.

Le lissage des mesures et la portée des indicateurs

Dans ces études, le climat se définit par des lissages dans l'espace et dans le temps qui effacent une grande partie des variabilités pour produire des indicateurs synthétiques. Lorsqu'on trace la courbe de la température, on ne suit pas la température en un lieu donné mais un indicateur censé représenter une moyenne annuelle de la température sur l'ensemble du globe. S'il faut sans doute passer par cette construction pour synthétiser une évolution, on doit se garder de lui donner un sens représentatif d'évolutions concrètes, diversifiées dans le temps et dans l'espace.

En fait, il apparaît qu'aux hautes latitudes boréales et, dans une moindre mesure, australes, la hausse est beaucoup plus forte que dans les zones tempérées ou tropicales. La dilution dans le temps du siècle et sur l'ensemble de la sur-

face terrestre atténue donc la spécificité du réchauffement actuel dont les modèles rendent compte. Aux latitudes moyennes de l'Europe, des Etats-Unis et de la Chine, ce réchauffement, malgré ce qu'en pense l'opinion, n'est guère sensible, d'autant que les particules ont un effet inverse : le retrait des glaciers alpins a débuté il y a un siècle et les déplacements d'espèces jouent seulement le rôle de marqueurs sensibles des effets sur la biodiversité.

En outre, en tant qu'indicateur de risques, la température est d'une pertinence discutable. Les conséquences positives d'une élévation peuvent l'emporter dans certaines zones, tandis que dans d'autres la somme des effets peut être négative. Fixer comme objectif une hausse maximale de deux degrés pour l'indicateur moyen de température terrestre ne repose sur aucune base sérieuse. Cela s'apparente à une application au doigt mouillé du principe de précaution ou d'un principe de réalisme qui ne résulte aucunement, comme certains voudraient le faire croire, d'une démonstration, impossible à faire, que les dommages s'aggravaient soudainement au-delà (12).

Les modifications du cycle de l'eau et des précipitations saisonnières constituent un paramètre beaucoup plus significatif. L'eau est à la fois la cause de l'ampleur du changement climatique, puisque la principale rétroaction positive est due à la vapeur d'eau, gaz à effet de serre dominant (13), et la source des effets les plus déterminants : inondations et érosion, sécheresse, désertification, famines, conflits d'usage... Par ailleurs, un des impacts les plus préoccupants, la hausse possible du niveau des océans, en est une des composantes.

Or, le bilan des impacts du changement climatique ne sera pas univoque en ce qui concerne l'eau : le réchauffement s'accompagnera d'un accroissement global des précipitations, qui devrait être d'effet positif dans l'ensemble, sans que cela contredise le fait qu'il soit négatif dans une partie des territoires.

Le même type de problématique s'applique au CO₂, élément positif de la croissance végétale mais aussi cause d'acidification des océans nuisible aux coraux.

Les événements extrêmes à caractère catastrophique

Les aléas à l'origine des catastrophes naturelles plus ou moins fréquentes – cyclones, tempêtes, crues, avalanches, glissements de terrain, inondations, épisodes de sécheresse, canicules – sont qualifiés d'extrêmes sans que l'on sache donner à ce terme un sens autre que relatif. Deux questions se posent à leur sujet :

- ✓ leur fréquence et leur intensité va-t-elle être accrue par le changement climatique ? L'intuition le fait craindre, mais les modèles ne disent rien de tel car ils n'ont pas été conçus pour proposer une réponse, et les analyses statistiques ont plutôt apporté des constats négatifs (14). Il est en revanche à craindre que les modalités de ces événements : saisons des pluies, trajectoires des cyclones... changeront, mettant en défaut les dispositifs séculaires de prévention ;



© Tony Martin/OSF/BIOS

Il existe selon le Giec et les chercheurs de sérieuses présomptions sur les phénomènes de rupture des courants océaniques en liaison avec les fontes de grandes masses glaciaires des régions polaires, ou de largage des hydrates de méthane des terres glacées, en relation avec le réchauffement différencié de ces régions.

✓ le changement accroît-il le risque d'événements beaucoup plus intenses ou graves, tels ceux qui, dans les temps géologiques, ont provoqué des extinctions massives des espèces ? C'est un domaine où les connaissances sont faibles. Le Giec et les chercheurs évoquent des « surprises » possibles, c'est-à-dire des bifurcations inattendues résultant du caractère des systèmes écologiques (15). Il existe ainsi de sérieuses présomptions sur les phénomènes de rupture des courants océaniques en liaison avec les fontes de grandes masses glaciaires des régions polaires, ou de largage des hydrates de méthane des terres glacées, en relation avec le réchauffement différencié de ces régions.

Insistons sur ce point : le caractère non prédictif des modèles, déjà souligné, sera encore accentué du fait que l'atmosphère terrestre contiendra des gaz à des teneurs jamais connues depuis un million d'années. Déjà, nous ne pouvons être avertis que tardivement de l'arrivée des tempêtes dévastatrices dont nous avons l'expérience en mémoire, ce qui oblige à mettre en place un dispositif de vigilance à l'échelle de la journée : pour de grandes ruptures d'équilibre, le préavis pourrait être court, à l'échelle de quelques années peut-être.

L'adaptation

Les réactions d'adaptation seront essentielles comme elles l'ont été dans le passé de la terre. Elles peuvent être

plus ou moins effectives, et les doutes à leur sujet contribuent à l'incertitude générale sur les perspectives du changement climatique.

Le défi principal est désormais la vitesse de l'évolution à laquelle il faut opposer la rapidité des mesures.

A condition d'être étudiées, appréciées à leur dimension, et mises en œuvre à temps, beaucoup de dispositions sont à la portée des capacités humaines. Mais l'incertitude qui affecte les prises de décisions est particulièrement élevée. Que dire, par exemple, des possibilités de migrations massives des populations depuis les terres désertifiées ou envahies par les eaux vers les terres devenues plus accueillantes ?

Raréfaction des ressources fossiles et chocs éventuels

Revenons enfin aux ressources en combustibles fossiles et à leur consommation.

Le paysage n'a guère évolué depuis dix-huit ans. La consommation d'énergie a repris sa croissance, la part des combustibles fossiles est restée prépondérante, le nucléaire a confirmé son palier, les énergies nouvelles n'ont pris qu'une place modeste. L'évaluation des ressources ultimes de carbone sous forme d'hydrocarbures et de charbon n'a pas été bouleversée. Si les progrès technologiques ont été appréciables, aucune percée majeure n'a été réalisée.

L'explication de cette évolution molle tient au prix du pétrole qui est resté bas jusqu'à ces derniers mois. Ni les

économies, ni les substitutions n'ont été encouragées par le marché.

Or la raréfaction des meilleures ressources est inéluctable à échéance d'une cinquantaine d'années. Le pic de la production du pétrole devrait être atteint d'ici une vingtaine d'années. La tendance à la hausse des coûts est inéluctable bien avant, puisque, s'il existe des ressources potentielles en carbone considérables, elles ont une valeur d'usage bien moins avantageuse que celles qui auront été épuisées.

Pas plus que pour le climat, nous ne pouvons prédire la nature, la violence, la date des chocs qui en seront la conséquence, par le jeu du marché. Ils seraient atténués si le relèvement actuel du prix du baril se poursuivait, permettant aux économies et aux substitutions de s'accélérer. Mais il est peu probable que l'évolution se produise sans à-coups.

Et, comme pour le climat, il faut considérer l'hypothèse de catastrophes ayant des origines localisées : en l'occurrence, les conflits engendrés par la hausse de la rente pétrolière et la concentration des ressources dans des zones géopolitiquement instables.

Le découplage entre croissance mondiale et émissions de gaz à effet de serre

Le découplage entre la croissance mondiale et les émissions de gaz à effet de serre se fait à trois niveaux :

- ✓ l'intensité énergétique, avec un potentiel important d'économies de consommation primaire (consommation sur la chaîne, consommation finale) ;
- ✓ la part des combustibles fossiles dans les fournitures énergétiques ;
- ✓ le confinement des gaz émis, en premier lieu du CO₂. Cette dernière possibilité nous ramène à la maîtrise du cycle global du carbone : il est aberrant d'extraire celui-ci des gisements et de se contenter de l'évacuer dans l'atmosphère, poubelle gratuite. Certaines formations géologiques, notamment celles qui ont stocké des hydrocarbures, peuvent le recevoir après combustion : cette opération demande des installations de séparation, des conduites, des moyens de contrôle et une réglementation internationale (16).

Conclusions

Quatre conclusions dominent à mon sens le débat.

Une politique globale du carbone peut seule réaliser un pilotage

L'emboîtement des problèmes (17) ne doit pas masquer qu'il y a une question centrale, la politique du carbone.

L'amont du cycle est principalement piloté par le marché qui réagit brutalement aux situations de déséquilibre, tandis que l'aval commence seulement à l'être par des droits d'émission dont l'institution a été une avancée majeure du protocole de Kyoto.

C'est un cas exceptionnel de régulation par deux commandes, amont et aval, en considération des risques de

catastrophe aux deux extrémités du cycle. La complémentarité des interventions doit permettre d'ajuster le pilotage (18) : ainsi, une contrainte réglementaire forte assistée d'un mécanisme de marché à l'émission permettrait d'anticiper sur l'effet de raréfaction qui affectera inéluctablement, mais tardivement sans doute, la disponibilité de la ressource (19). Seule une telle cohérence rendrait la politique lisible, avec ses signaux forts pour les opérateurs et les consommateurs.

La gouvernance scientifique qui s'est rodée sur le changement climatique a ses mérites : le Giec a constitué un remarquable pas en avant. C'est la première fois dans l'histoire que la communauté internationale a collaboré avec les grandes organisations scientifiques spécialisées et certains groupes de chercheurs pour parvenir à formuler une analyse et des recommandations. Cette prouesse ne doit pas masquer les limites du consensus qui ne représente aucune vérité établie : c'est le produit d'un processus mixte, diplomatique et scientifique, fait de concessions mutuelles.

Toutes les parties sont concernées par les réalités financières : les entreprises actives sur le marché sur la ressource manipulent des intérêts considérables au service d'une efficacité incontestable. L'institution de marchés à l'aval a amorcé des mécanismes de même type, rapprochant les opérateurs. La communauté scientifique, qui a travaillé sur le changement climatique par conviction, n'est pas non plus ignorante des intérêts économiques.

Les conditions de la convergence pour des actions immédiates sont donc réunies.

La vigilance doit s'ajuster au caractère imprédictible des risques catastrophiques

Les prochaines décennies, peut-être même les prochaines années, comportent une double menace de catastrophe, climatique et d'approvisionnement. L'imprévisibilité globale est encore beaucoup plus forte que celle qui a été soulignée pour les modèles climatiques.

La vigilance doit être orientée en priorité vers les manifestations susceptibles de dégénérer, immédiate, entretenue (20). Elle ne doit pas être détournée ou atténuée par des prédictions à long terme, fragiles, issues de modélisations qui tôt ou tard seraient démenties. Elle doit être conçue en considération de risques qui peuvent survenir de façon imprévisible. Elle ne doit pas masquer les aspects positifs du changement, mais déclencher des réponses à partir d'une surveillance des précurseurs de ruptures et une appréciation constante de la vitesse des modifications. Cela impliquera un redéploiement et une amplification des moyens.

L'effort d'adaptation est insuffisamment calibré

L'adaptation repose sur la révolution technologique appliquée à la consommation, au contrôle des cycles de bout en bout, à la substitution des ressources, à la gestion des écosystèmes et à l'implantation d'espèces appropriées. Et aussi dans les mœurs qui sont ce qu'il y a de plus stable, mais qui ne sont pas insensibles aux technologies de l'information.

L'effort à appliquer consiste à anticiper un changement de trajectoire inéluctable, fruit de la nécessité – l'épuisement des meilleures ressources et la saturation des capacités de stockage des déchets sans graves répercussions – et des chances offertes par le progrès technologique. Cette anticipation, accompagnée d'un apprentissage accéléré, n'est certes pas gratuite, mais son coût n'est probablement pas excessif. Un bilan global le démontrerait sans doute.

Le pilotage géopolitique des changements sera capital

A cet égard, il faut aussi s'acharner à rapprocher les points de vue. La Chine par exemple, qui pouvait imaginer il y a vingt ans tout sacrifier à sa croissance, est désormais pleinement consciente des impacts écologiques sur sa propre survie. Le gap avec les pays avancés est en voie de se combler en même temps que sa puissance économique la sensibilisera aux risques de déséquilibres mondiaux.

Notes

- (1) Nous utiliserons les sigles Giec, PNUD et OMM.
- (2) *Le mobile et la planète, l'enjeu des ressources naturelles*, Economica, 1989.
- (3) En compléments des documents disponibles sur les sites Internet, signalons, pour alimenter la réflexion :
- Collège de France : L'homme face au climat, une vingtaine de communications, notamment d'André Berger, Dominique Raynaud, Edouard Bard, Gavin Schmidt, Jean-Pierre Dupuy, Jean-Marc Jancovici. Odile Jacob, 2006 ;
 - Académie des sciences : Incertitudes scientifiques et risques climatiques, rédacteur invité Michel Petit, articles de Neil Adger, Anthony Patt, Midling Kandlinkar, J.-P. Dupuy. Numéro thématique de Geoscience, mars 2005 ;
 - Académie des technologies, (www.academie-technologies.fr), commission énergie et environnement : divers documents, notamment GT « Que peut-on faire contre le CO₂ ? », chapitre 1 : le changement climatique, et « Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle » ;
 - la modélisation informatique, exploration du réel, notamment articles de Raoul Robert, Serge Planton, Ha Duong. Dossier de Pour la Science, juillet-septembre 2006 ;
 - Frédéric Denhez : Atlas de la menace climatique ; préface de Michel Petit, Editions Autrement, 2005 ;
 - Nature Sciences Sociétés, numéro d'avril/juin 2006, éditorial d'Olivier Godard, article de Philippe Ambrosi : « Attention au rythme du changement climatique »
 - Onerc (Observatoire national sur les effets du changement climatique) ; rapport : Un climat à la dérive : comment s'adapter ?
 - Jean-Marc Jancovici : L'avenir climatique, Points sciences, 2005 ;
 - François Ramade : Des catastrophes naturelles ? Dunod, 2006.
- (4) Cette caractéristique de la modélisation est clairement énoncée par Jean-paul Delahaye et François Rechenmann dans l'introduction du numéro de « Pour la science » sur l'exploration du réel par la modélisation.
- (5) Voir « L'effet papillon n'existe plus » de Raoul Robert, directeur de recherche à l'Institut Fourier de Grenoble qui souligne les interprétations abusives de l'effet papillon. Cet auteur montre que les situations chaotiques locales donnent naissance à des structures cohérentes. Il apparaîtrait statistiquement que les informations nécessaires croîtraient donc de façon seulement proportionnelle, et non exponentielle, au temps de la prédiction. Même si on ne se trouvait pas devant un mur comme l'avait supposé Lorenz, la contrainte n'en resterait pas moins très forte.

(6) L'observation précédente sur les structures stables issues de chaos locaux ou temporaires explique que de telles modélisations puissent être établies. Ce qui correspond au fait que le climat est une réalité compatible avec les turbulences météorologiques.

(7) A ce stade, nous ne tenons pas compte de l'incertitude correspondant aux comportements humains (scénarios d'émissions de gaz à effet de serre notamment) qui sera introduite plus loin.

(8) La présentation de cartes reproduites dans l'Atlas cité en référence, ou dans la presse, contribue fortement à l'illusion de la prédiction.

(9) Bien que les causes des émissions et les taux de croissance des teneurs des différents gaz à effet de serre ne soient pas identiques, on peut pour simplifier le langage parler d'une croissance globale symbolisée par celle du CO₂ (ou d'un équivalent calculé selon certaines conventions). La vapeur d'eau mériterait d'être dissociée dès ce stade, car elle est d'origine tout à fait différente et son effet est prépondérant. Le méthane pourrait aussi être traité à part car ses origines sont également particulières (animales notamment).

(10) L'effet de serre produit directement par un accroissement de la teneur en CO₂ (ou en CH₄) est connu, ce sont les rétroactions positives ou négatives par d'autres substances, avant tout l'eau sous forme de vapeur ou de nuages, qui sont problématiques.

(11) Ce constat traduit la montée en flèche simultanée des indicateurs de teneurs et de températures si visible sur les courbes depuis deux à trois décennies. On cite toujours la hausse de la température (un demi degré) depuis un siècle, c'est celle depuis trente ans qui est la plus significative.

(12) *Grosso modo*, on admet que la fourchette des projections se partage à parts égales entre les incertitudes sur le fonctionnement climatique et celles sur l'évolution des émissions. Un objectif au milieu de cette fourchette reviendrait, en quelque sorte, et sans le dire, à ne pas aggraver l'incertitude résultant de la variabilité naturelle.

(13) L'effet de serre relatif à la vapeur d'eau domine en raison de la teneur beaucoup plus élevée que les gaz en traces. Cependant, la vapeur d'eau n'étant pas une émission, elle n'apparaît pas sur les graphiques de répartition des gaz à effet de serre par ordre d'importance ! Cela masque un élément essentiel, lié à une incertitude majeure sur les changements d'état de l'eau.

(14) C'est ce qui ressort des études de Météo France sur les tempêtes et de l'excellente thèse récente de Benjamin Renard sur la détection d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France (crues et étiages).

Ce que nous considérons actuellement comme des aléas catastrophiques – les grandes tempêtes, les grandes crues, etc. –, se produit avec une probabilité annuelle que l'on estime de l'ordre de 1 %. Mais cette estimation dépend de la durée d'observation, et il est inévitable qu'elle s'accroisse quand cette durée s'allonge (de combien ? Les modèles mathématiques peuvent diverger à ce sujet). Les statistiques établies depuis quelques dizaines d'années ne peuvent donc être significatives sur leur évolution ; elles perdent toute pertinence pour l'évolution d'aléas plus rares. Il faut rechercher des éléments de réponse dans les archives paléo-géologiques.

Or le rapport cité de l'Onerc place l'aggravation des aléas extrêmes en tête des effets du changement climatique en France. Le caractère hypothétique de cette supposition affaiblit singulièrement ce rapport. Les études indispensables devraient porter sur les modalités des événements plus que sur leur intensité.

(15) Sur cet aspect essentiel du changement climatique, voir notamment les publications citées de Jean-Pierre Dupuy que je remercie de m'avoir adressé un exemplaire de sa contribution au rapport mondial de l'Unesco sur la construction des sociétés de savoir : « Peut-on anticiper les crises ? ».

(16) La séparation et le stockage du CO₂ ne peuvent être pratiqués que dans les grandes installations ; elles pourraient concerner une grande

part des produits de combustion du charbon dans la mesure où ce combustible est de plus en plus exclusivement destiné aux centrales électriques.

(17) On peut jouer à coupler entre eux des modèles climatiques et des modèles économiques qui incorporent les coûts et les effets des mesures préventives. On fabrique ainsi des modèles dits « intégrés ». Ceux-ci peuvent tout au plus servir à des exercices de comparaison de stratégies en vue de tester des raisonnements. Rien d'autre.

(18) La double commande n'est pas nouvelle : nous avons déjà, en 1988, souligné que la charge fiscale sur le pétrole était, globalement dans le monde, répartie également entre l'amont (les prélèvements des pays producteurs) et l'aval (les taxes sur les carburants des pays consommateurs). Cette équivalence est-elle fortuite ou le résultat empirique d'une recherche d'équité ?

La notion de « double dividende » souvent évoquée pour l'application du principe de précaution, mérite qu'on s'interroge : lorsqu'il existe, comment se répartit le financement global ? Il peut, semble-t-il, s'établir un jeu de bascule, l'anticipation étant financée au titre d'une des contraintes, la charge passant ensuite à l'autre...

(19) Il faut, sur ce point, être circonspect car la quantité des ressources totales en carbone serait considérable si les prix étaient suffisamment élevés. Seuls les hydrocarbures conventionnels sont rares, tandis que les pétroles lourds, bitumes, huiles de schistes, hydrocarbures, ainsi que le charbon représentent de grandes ressources potentielles. On ne peut envisager de libérer dans l'atmosphère les quantités correspondantes de CO₂. Tôt ou tard, le confinement s'imposera (le confinement le plus raisonnable étant parfois de laisser la ressource dans son gîte sans l'extraire).

(20) Le caractère contre-productif d'un catastrophisme mal conçu est double : si la catastrophe menace à long terme, pourquoi se presser ? Et lorsqu'on exploite la peur de façon excessive ou erronée, on suscite la méfiance en fonction du dicton : à force de crier au loup... A cet égard, c'est une faute que de ne mettre en évidence que l'aspect négatif du changement climatique. Il faut pratiquer un catastrophisme :

- « éclairé », selon l'expression employée par Jean-Pierre Dupuy, notamment fondé sur l'incertitude ;
- « mobilisateur », c'est-à-dire qui habitue à agir en développant la résilience, aptitude à rebondir et à exploiter les potentialités de toute situation.