

## MÉCANISMES

# Le réchauffement climatique : les certitudes, les incertitudes, les conséquences

Yves FOUQUART, Professeur, Université des sciences et technologie, Lille 1

**L**es mécanismes du réchauffement climatique sont peu connus du grand public. Aussi nous a-t-il paru indispensable de faire le point sur les connaissances scientifiques actuelles.

L'élévation des températures moyennes annuelles terrestres depuis 100 ans est sans équivoque. Elle semble aller de paire avec une augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) dans l'atmosphère qui renforce l'effet de serre. Or, les rejets anthropiques de gaz carbonique s'accroissent depuis le début de la révolution industrielle, l'homme peut-il être tenu pour seul responsable du changement climatique ? Sans doute même si d'autres causes de rejet de CO<sub>2</sub> existent et si des mécanismes de régulation peuvent apparaître. Toutefois, d'autres mécanismes tendent à renforcer les effets du CO<sub>2</sub> sur l'élévation des températures.

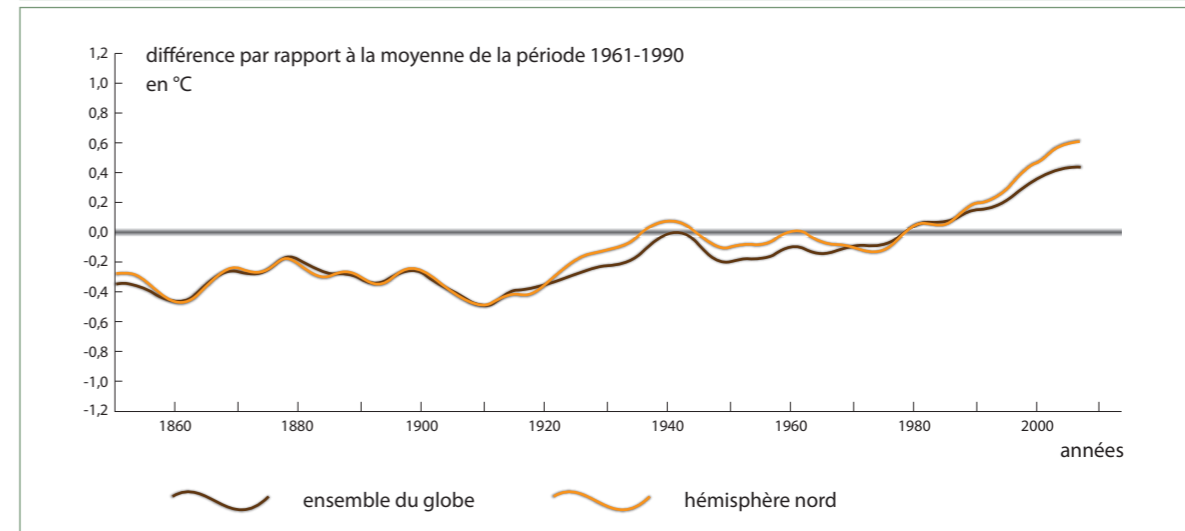
Le prix Nobel de la paix accordé au GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et à Al GORE en 2007 a sanctionné 30 ans de recherches, et de mises en garde. C'est assurément le signe que le message répété et expliqué inlassablement depuis cette date a largement pénétré la conscience populaire de nos sociétés occidentales. Cela ne met pas fin au débat, loin de là. Depuis lors, les recherches se poursuivent, le dossier s'épaissit. Les enjeux, en effet, sont énormes : peu ou prou, c'est tout notre système économique qui repose sur l'énergie disponible à profusion. En désignant l'utilisation des énergies fossiles comme le responsable d'un réchauffement aux conséquences potentiellement catastrophiques, c'est tout notre mode de vie qu'on met en cause. Qu'il y ait là de quoi donner lieu à un débat acharné n'est donc pas étonnant, c'est le contraire qui le serait.

À ce débat, tout le monde participe, comme toujours

dans nos sociétés ; et j'ai tendance à dire que les avis sont d'autant plus tranchés, qu'ils sont moins connus. Les médias amplifient les déclarations des uns et des autres sans grand discernement ce qui, là non plus, n'est pas étonnant vu la complexité du sujet. D'où, de leur part, cette attitude de neutralité, très journalistique sans doute, mais bien peu scientifique. C'est tout juste donc si le temps de parole du GIEC et celui du scénariste maintenant décédé d'« Urgences » et déniateur militant Michael Crichton n'étaient pas équilibrés à la minute près comme pendant les élections.

Les déclarations à l'emporte-pièce se succèdent, le comité Nobel est maintenant voué aux gémonies dans certains milieux et il est difficile de se faire une opinion réellement argumentée, compte tenu de la très réelle complexité du problème. Néanmoins, cette complexité n'empêche pas tout un chacun d'avoir une opinion sur le climat, sans doute parce

Figure 1 : évolution de la température moyenne du globe terrestre et de l'hémisphère nord, de 1870 à 2007 (écarts par rapport à la moyenne 1961-1990)



que le temps qu'il fait est un des sujets favoris de discussion de tous les jours. On peut cependant y voir un peu plus clair en s'en tenant aux seules certitudes au sens scientifique du terme.

### Les certitudes

#### La température terrestre augmente

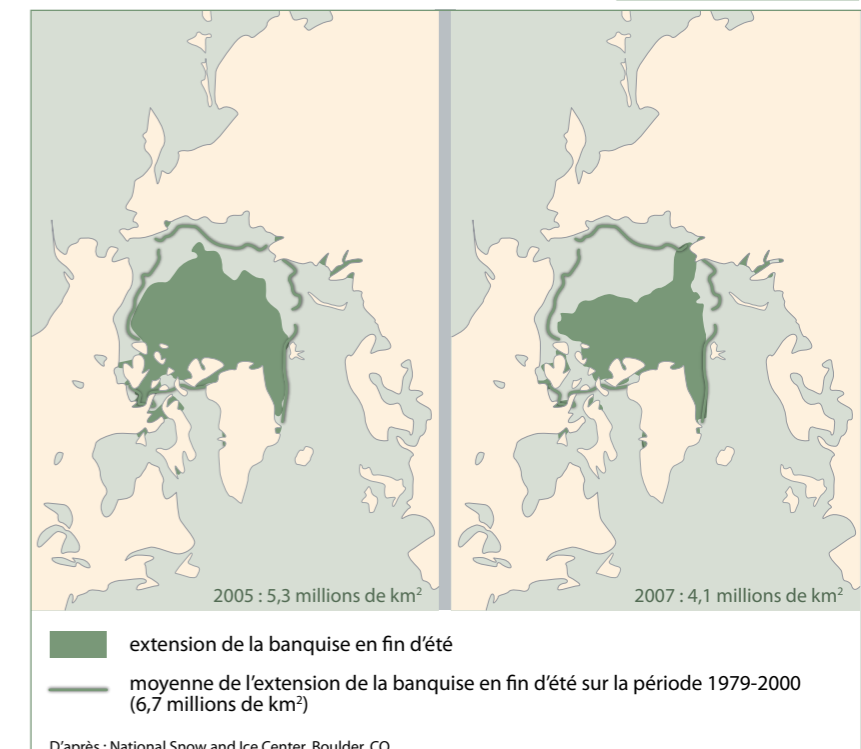
La température de la planète a augmenté très sensiblement depuis 150 ans et plus particulièrement au cours des 30 dernières années.

La figure 1 représente l'évolution de la température moyenne de la planète depuis le début des observations météorologiques, c'est-à-dire depuis un peu plus de 150 ans. La température moyenne a augmenté d'environ 0,7°C. L'année la plus chaude est 1998 qui reste une année très exceptionnelle du fait d'un très puissant événement El Niño. Les années les plus chaudes observées sur la série sont les suivantes : 1998, 2005, 2003, 2002, 2004, 2006, 2001. Dans l'hémisphère nord, c'est encore plus frappant. La raison de cette différence est surtout que l'hémisphère sud est essentiellement maritime et que l'océan joue un rôle d'amortisseur.

D'autres éléments confortent cette impression d'un monde plus chaud. C'est par exemple le cas de l'allongement de la durée de l'activité photosynthétique avec des printemps plus précoces et des hivers plus tardifs, c'est aussi la diminution généralisée du bilan de masse des glaciers de montagne : les glaciers ne font pas que reculer, ils rétrécissent, c'est le cas de pratiquement tous les glaciers des Alpes en dessous

d'à peu près 4000 m. C'est encore plus spectaculaire avec la diminution accélérée de la banquise Arctique qui, en 2007, a perdu plus d'un million de km<sup>2</sup>, c'est-à-dire 20 % de sa surface par rapport à son dernier minimum absolu en 2005 (figure 2). Il apparaît maintenant que 2007 était hors norme puisque 2008 et 2009 ont vu des extensions plus grandes (respectivement 4,7 et 5,1 millions de km<sup>2</sup>). 2009 retrouve ainsi la tendance à long terme observée depuis 30 ans : une diminution d'environ 1 million de km<sup>2</sup> tous les 10 ans.

Figure 2 : extension de la surface de la banquise arctique en fin d'été



Compte tenu de ces tendances, plus personne ne conteste le réchauffement

## La concentration en CO2 augmente

La teneur en CO2 et autres gaz à effet de serre a augmenté très fortement depuis le début de l'ère industrielle pour atteindre un niveau encore jamais atteint depuis, au moins, deux millions d'années. Au milieu des années 1970, Charles Keeling publie la courbe des mesures systématiques de la concentration en CO2 qu'il effectuait journalièrement à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. Cette publication a fait l'effet d'un coup de tonnerre : on était encore en pleine guerre froide et certains géologues parlaient de glaciation prochaine... enfin sur plusieurs milliers d'années. À la réflexion il fallait bien s'attendre à ce changement. C'est un peu comme la poussière que l'on repousse sous les meubles au lieu de la ramasser : elle finit un jour par déborder. Le phénomène ne s'est pas arrêté en 1975 comme on peut le constater sur la figure 3.

On connaissait l'effet de serre et le rôle du CO2 depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, quand Arrhenius cherchait une explication aux grandes glaciations. Dès que la courbe de Keeling est parue on s'est évidemment précipité pour la vérifier et pour refaire les calculs d'Arrhenius plus proprement ce qui n'était pas bien difficile

puisque, à son époque, on ignorait la mécanique quantique et donc les détails de la spectroscopie. On s'est aussi empressé de voir ce qu'il était advenu plus loin dans le passé. Pour cela, on a utilisé les informations contenues dans les micro bulles présentes dans la glace qui s'est formée au cours du temps. Le résultat a été sans équivoque : la concentration en CO2 est restée remarquablement stable depuis 2000 ans au moins et augmente rapidement depuis le début de l'ère industrielle. C'est vrai aussi d'autres gaz comme le méthane qui ont un effet de serre encore plus important.

## L'effet de serre

Comprendre dans le détail ce qu'est l'effet de serre et surtout en quantifier les variations est relativement complexe et réclame, disons, un master de physique. Mais en saisir les principes de base ne réclame rien de plus qu'un peu de logique, de réflexion et de rigueur.

Un corps quelconque, quel qu'il soit, passe son temps à échanger de la chaleur avec ce qui l'entoure et sa température est stable quand il reçoit autant de chaleur qu'il en perd, sinon il se refroidit ou il se réchauffe. Ces échanges de chaleur peuvent se faire sous trois formes : conduction, convection, rayonnement. Les deux premiers nécessitent aussi des échanges de matière, en conséquence la Terre n'échange de chaleur que sous forme de rayonnement, c'est-à-dire sous forme de lumière au sens large du terme (en incluant la lumière que nos yeux de détectent pas, en particulier l'infrarouge). Évidemment, ces échanges s'effectuent entre la Terre et ce qui l'entoure c'est-à-dire le vide et le Soleil : la Terre est chauffée par le Soleil et c'est le vide qui la refroidit.

Ce qui différencie la lumière du Soleil de celle émise par la Terre, c'est une question de longueur d'onde ou encore de couleur toujours au sens large du terme (il faut donc inventer un nom pour ces couleurs : infrarouge par exemple) du coup, l'atmosphère qui entoure la planète peut filtrer la lumière. Elle est en effet fort transparente pour les courtes longueurs d'onde (lumière du Soleil) et fort absorbante, au contraire, pour ce qui correspond à la lumière émise par

la Terre, l'infrarouge. La conséquence c'est que l'atmosphère, en bloquant, ce rayonnement infrarouge, empêche une partie de la chaleur de s'évacuer vers l'espace, autrement dit l'atmosphère est un isolant au même titre, ou à peu près, que la laine de verre que l'on met autour des maisons pour les isoler.

## Les incertitudes

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, une part du réchauffement observé est nécessairement due à l'activité humaine. Mais on quitte le domaine des certitudes quand on cherche à préciser cette proportion. On rentre alors dans celui des probabilités, du faisceau de présomptions comme on dit en matière judiciaire, c'est encore bien plus le cas évidemment quand on cherche à se projeter dans l'avenir. La difficulté tient en trois expressions : couplages, rétroactions, contraintes externes.

## Couplages

Quand on examine les composants du système climatique air-océan-glace-biosphère, on voit tout de suite que leurs inerties sont forcément très différentes : l'atmosphère à une masse très faible et réagit donc très rapidement, l'océan, au contraire, a une inertie très grande et sert en quelque sorte d'amortisseur au système. Il existe donc des transferts de chaleur de l'océan vers l'atmosphère et réciproquement et des oscillations de couplage entre ces deux composants ; ceci est la cause de la variabilité du climat aux échelles de quelques années (comme El Niño par exemple) ou de plusieurs décennies. Autrement dit, une partie du réchauffement présent peut être due à un transfert de chaleur depuis l'océan, mais, inversement, l'océan stocke une partie de la chaleur gagnée par l'augmentation due à l'effet de serre et masque donc partiellement le réchauffement.

## Contraintes

Les contraintes externes sont celles qui sont imposées aux climats par le Soleil et par l'activité volcanique essentiellement. Il est vrai que la quantité d'énergie totale fournie par le Soleil est restée remarquablement constante depuis le début des mesures satellites. Cependant, ce n'est pas aussi vrai de la répartition spectrale, en particulier les ultraviolets, qui varient de près de 10 % au cours d'un cycle solaire de 11 ans et ces ultraviolets interagissent fortement avec la stratosphère (figure 4). Il

y a là probablement l'une des raisons du réchauffement du début du XX<sup>e</sup> siècle. Quant aux éruptions volcaniques, la dernière de grande importance climatique date de 1992, c'est celle du volcan Pinatubo aux Philippines. Elle a provoqué un refroidissement temporaire de quelques dixièmes de degré pour l'ensemble de la planète dans l'année qui a suivi.

Il est plus que probable que la consommation d'énergie fossile va se poursuivre et, compte tenu du rapide développement de l'Inde et de la Chine, le rythme risque fort de s'accélérer. Il faut donc s'attendre à une concentration en CO2 de l'ordre de 600 à 1000 ppmv d'ici la fin du siècle. On peut calculer assez facilement que, si la concentration en CO2 double par rapport à l'heure présente (c'est-à-dire devient proche de 800 ppmv), alors l'isolation supplémentaire équivaudra à un gain d'énergie proche de 4 W/m<sup>2</sup>. En supposant que rien d'autre ne change dans le système climatique (c'est-à-dire sans aucune rétroaction), le réchauffement qui en résulterait serait très proche de 1°C.

## Rétroactions

Bien entendu, sous l'influence de ce réchauffement, une foule de paramètres climatiques importants vont eux-mêmes changer.

Ces changements constituent ce que l'on appelle des rétroactions. Les rétroactions sont le point-clé de toute tentative de prévision du réchauffement dans les années à venir. L'exemple le plus évident est celui de la rétroaction de la glace et de la neige.

On sait que neige et glace réfléchissent fortement la lumière solaire : si la température augmente, il neige moins et, la planète réfléchissant moins la lumière du Soleil, elle en absorbe donc davantage, ce qui la réchauffe un peu plus encore. Cet effet « boule de neige » est une rétroaction positive parce qu'elle amplifie le réchauffement initial.

Quand on examine le fonctionnement du système climatique, on trouve

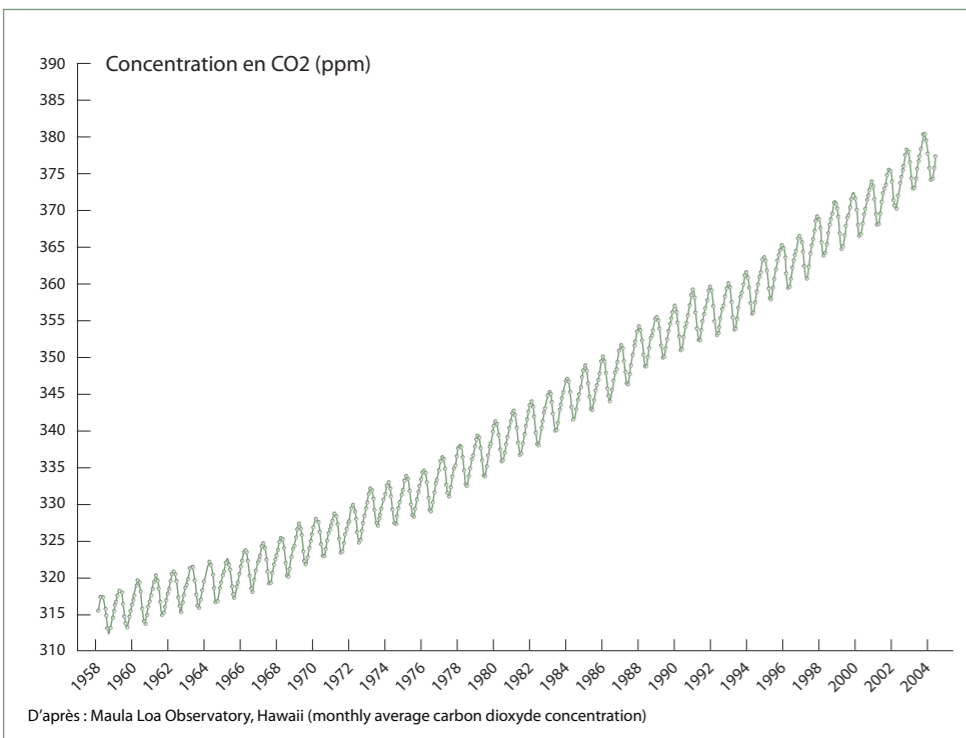


Figure 3 : évolution annuelle de la concentration atmosphérique en CO2 en ppmv (parties par million en volume) mesurée à Hawaï par Keeling

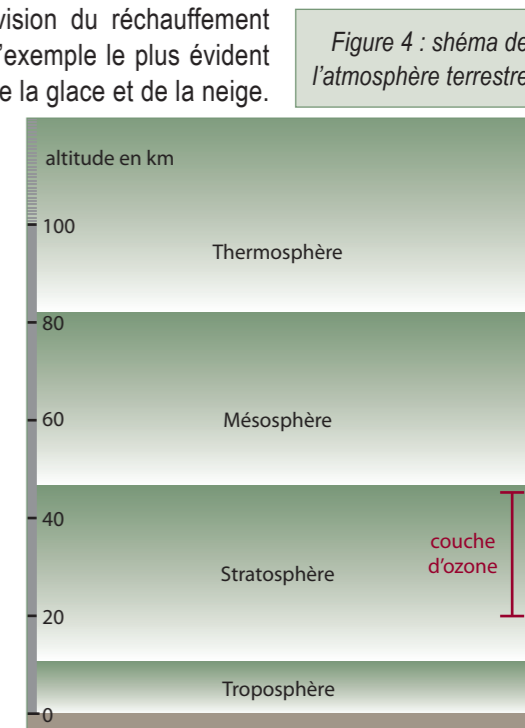


Figure 4 : schéma de l'atmosphère terrestre

beaucoup de rétroactions positives dont certaines sont potentiellement très puissantes, bien qu'il soit très difficile de les quantifier précisément. On trouve, par contre, très peu de rétroactions négatives, pourtant ce sont elles et elles seules qui permettraient de stabiliser le climat et d'éviter un réchauffement aux conséquences peut-être catastrophiques. Le processus idéal pour une rétroaction négative puissante se trouve très probablement dans la convection tropicale, plusieurs idées ont été avancées mais aucun des processus mis en avant ne semble avoir l'intensité nécessaire pour contrecarrer efficacement le réchauffement. La question reste cependant ouverte.

## Comment identifie-t-on la part anthropique du réchauffement ?

Malgré la variabilité du climat, les chercheurs s'accordent sur le fait « qu'il y a 90 % de chances pour que la majorité du réchauffement actuel soit dû à l'activité humaine » (GIEC, AR4 – 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation, 2007). On lit parfois que 90 % du réchauffement serait d'origine anthropique, c'est évidemment une déformation volontaire ou non de la conclusion précitée. La part naturelle du réchauffement pourrait être de 49 % sans la contredire le moins du monde.

Compte tenu de cette variabilité importante, il serait naïf de croire que la communauté scientifique arrive à une telle conclusion sur la seule comparaison des évolutions de la température globale et de celle de la concentration en CO<sub>2</sub>. La méthode employée pour y parvenir est dite méthode « des empreintes digitales »\*.

La variabilité climatique et les variations des ultraviolets solaires constituent une sorte de bruit de fond qui, pour le moment, masque encore, au moins partiellement, le réchauffement dû à l'augmentation de l'effet de serre

mais, à moins qu'il existe une rétroaction négative salvatrice, le réchauffement est inévitable et viendra s'ajouter aux fluctuations naturelles que l'on vient d'évoquer. Bien sûr, on peut parier sur l'existence de cette fameuse rétroaction et sur sa capacité à enrayer le réchauffement, mais il s'agit là d'une sorte d'acte de foi du type « ça a toujours marché

jusqu'ici, ça s'arrangera forcément ».

L'autre attitude consiste à évaluer les risques et à faire des choix qui en tiennent compte. Un risque, c'est le produit d'une probabilité d'occurrence par la gravité de l'événement. À la demande des politiques et de l'ONU, les chercheurs font régulièrement le point sur l'avancement de la science en ce qui concerne l'évolution du climat et sur les incertitudes. Le GIEC dans son rapport de 2006 a conclu que, suivant les scénarios d'émission de CO<sub>2</sub>, la température devrait augmenter entre 1 et 4°C d'ici 2100. Des valeurs inférieures à 1°C sont pratiquement exclues, des valeurs de l'ordre de 6°C sont possibles, voire probables si les ressources non conventionnelles d'énergie fossiles sont utilisées à plein.

En réalité, les émissions de CO<sub>2</sub> depuis dix ans dépassent tous les scénarios, même les plus pessimistes (figure 5). Actuellement, ce sont 45 % des émissions annuelles qui restent dans l'atmosphère et s'y accumulent, le reste étant absorbé par l'océan et la biosphère. En conséquence, la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> augmente de 1,9 ppmv en moyenne par an depuis 2000 contre 1,5 ppmv dans les années 1990. L'augmentation de la concentration dans l'atmosphère est peut-être malgré tout inférieure à ce qu'on pourrait le craindre avec de telles émissions, ce qui veut dire que, pour le moment, l'océan et la biosphère absorberaient peut-être davantage de CO<sub>2</sub> que prévu ce qui serait quand même une bonne nouvelle mais cela reste à confirmer.

Au rythme de ces dix dernières années, les prévisions les plus pessimistes du GIEC pourraient être dépassées : ce qui signifie que l'on a plus de deux chances sur trois pour que le réchauffement soit compris entre 2,4 et 6,4°C en 2100. Malgré tout, on pense que les émissions devraient se ralentir et la fourchette la plus probable est entre 1,7 et 4,4°C, avec une moyenne de 3°C. Cela donne une idée de la probabilité d'occurrence, il reste évidemment une chance sur trois d'être en dehors de la fourchette, mais cela signifie aussi bien un réchauffement supérieur qu'un réchauffement inférieur.

## Conséquences du réchauffement

Ce qu'il faut savoir maintenant pour préciser le risque, c'est la gravité des dégâts correspondants. Un réchauffement moyen de 3°C peut sembler important certes, mais ce n'est pas suffisant

pour en déduire des règles générales. Il faut aussi savoir comment il se répartira et quelles en seront les conséquences. Prévoir tout cela avec un peu de précision est extrêmement difficile. On peut cependant en avoir une idée générale en nous basant sur la compréhension des grands mécanismes, le cycle hydrologique ou la circulation océanique.

En premier lieu le réchauffement ne sera pas égal partout et il sera maximum dans les régions de hautes latitudes. Par exemple, compte tenu de l'évolution récente, on pense maintenant que la banquise arctique estivale disparaîtra sans doute d'ici 15 à 20 ans. En deuxième lieu, qui dit réchauffement pense à l'élévation du niveau de la mer. *A priori*, celui-ci devrait rester relativement modeste (autour de 60 cm) sauf si les calottes du Groenland et de l'Antarctique Ouest venaient à se disloquer, auquel cas la hausse pourrait être beaucoup plus rapide et dépasser 1 m en 2100. Cette possibilité n'est pas retenue pour le moment mais les observations de la périphérie de la calotte groenlandaise tendent à montrer que cette dernière est assez instable.

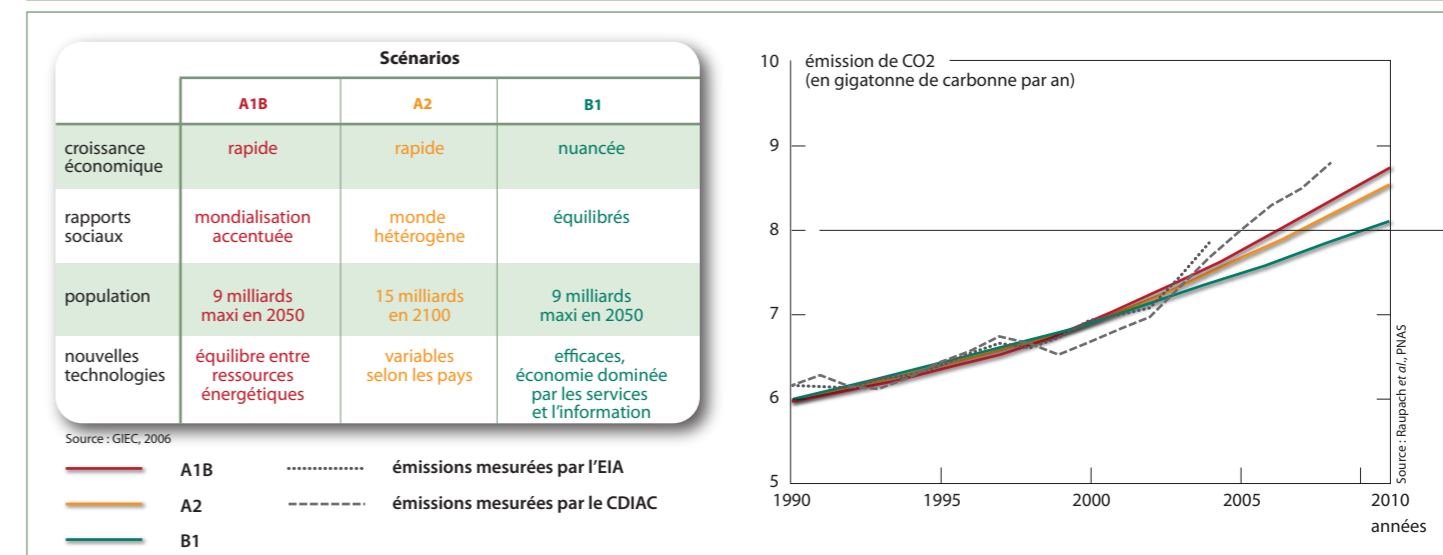
S'il fait plus chaud, l'évaporation devrait augmenter et avec elle les précipitations mais tout cela ne se fera pas de façon uniforme et il est tout aussi probable (deux chances sur trois) que les régions du bassin méditerranéen, par exemple, connaîtront davantage de sécheresse quand, au contraire, les latitudes moyennes seront nettement plus arrosées. Il en résultera évidemment que certaines régions

déjà déficitaires en eau le seront encore plus.

Le réchauffement ne sera évidemment pas linéaire, il faut donc s'attendre à des épisodes de canicules plus nombreux ou plus intenses ou les deux mais surtout à moins d'épisodes froids ce qui peut présenter certains avantages. De façon générale, ce ne sont pas les moyennes qui importent le plus mais les événements extrêmes : 2°C de plus en été ne semble pas catastrophique. Mais, s'ils s'ajoutent à une canicule comme celle de 2003, on imagine qu'il faudra sans doute bien plus que des pulvérisateurs pour rendre ces conditions supportables aux personnes les plus fragiles. De même, 1 m d'augmentation du niveau de la mer, c'est sans doute déjà grave par ses conséquences, mais, si on les ajoute à une grande tempête, on imagine aisément les dégâts.

Une fois le risque évalué, il reste évidemment à décider de la marche à suivre. On parle beaucoup de lutte contre le réchauffement, cela n'a pas ou n'a plus beaucoup de sens. Il faut préciser : ce qui reste possible, c'est de le ralentir et de le limiter peut-être, ou tout au moins éviter qu'il ne dérape complètement vers les limites supérieures de la fourchette. Ensuite, il reste sans doute à s'adapter et le temps qui reste pour le faire est extrêmement précieux de même... que l'énergie fossile dont nous disposons encore et qu'il faudrait peut-être employer de façon un peu plus optimisée ■

Figure 5 : bilan du CO<sub>2</sub> observé et simulé par le centre d'analyse et d'information sur le dioxyde de carbone (CDIAC) et de l'administration des États-Unis sur l'information énergétique (EIA) — Simulations selon trois scénarios



\*La méthode dite « des empreintes digitales », consiste à rechercher un signal de changement anthropique dans les observations, caractérisé par une répartition géographique, et souvent aussi une évolution temporelle, déduites de simulations climatiques. Dans le cas de la détection, ce signal est testé statistiquement par rapport au bruit de la variabilité climatique interne, c'est-à-dire la variabilité qui se manifeste en l'absence de tout forçage externe au système (naturel comme la variabilité solaire et le volcanisme, ou anthropique avec les émissions de gaz à effet de serre et de sources d'aérosols). Dans le cas de l'attribution, l'objectif est de trouver quelle est la meilleure combinaison de l'ensemble des forçages, naturels et anthropiques, qui explique les observations et leur évolution récente. Cette technique s'apparente à une méthode de régression généralisée dans laquelle on reconstruit les observations à partir d'une combinaison pondérée des différents forçages et du bruit de la variabilité climatique interne. Ici aussi la qualité de la reconstruction est testée statistiquement.