

# La compréhension du changement climatique, de ses sources à sa modélisation : questions encore ouvertes ?

*Vincent Courtillot est professeur Émérite de géophysique et de géodynamique<sup>1</sup> à l'Université Paris-Diderot. Ancien Directeur de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP<sup>2</sup>), il est membre de l'Académie des Sciences et membre honoraire de l'Institut Universitaire de France. Il a présidé l'Union Européenne des Géosciences, qui lui a discerné la médaille Holmes, ainsi que la section géomagnétisme<sup>3</sup> et paléomagnétisme<sup>4</sup> de l'American Geophysical Union.*

La vision du changement climatique proposée dans ce chapitre n'est pas celle à laquelle la majorité des scientifiques adhèrent aujourd'hui. Cette vision, que je pense naturellement juste, doit nourrir un débat scientifique sur la compréhension du système climatique, système de très grande échelle, turbulent, non

linéaire, fait d'enveloppes très différentes mais couplées, bref un système extraordinairement complexe. Je me concentre sur les observations qui doivent permettre d'identifier les sources du changement climatique, au moins de manière qualitative. On ira ensuite vers la modélisation, qui ne peut rendre

1. La géophysique concerne l'étude des caractéristiques physiques de la Terre (et d'autres planètes) en utilisant de nombreuses techniques d'observation et de modélisation des phénomènes naturels ; elle comprend notamment le géomagnétisme, la sismologie, la gravimétrie, la géodésie. La géodynamique concerne l'étude de la dynamique du globe terrestre à toutes les échelles de temps, d'espace, de profondeur. Elle s'appuie sur les apports de la géologie, de la géophysique, de la géochimie et de la science des matériaux.

2. [www.ipgp.fr](http://www.ipgp.fr)

3. Le géomagnétisme concerne l'étude du champ magnétique terrestre, dont les origines sont à la fois internes (effet dynamo dans le noyau) et externes (influence du Soleil) à la Terre.

4. Le paléomagnétisme désigne l'étude du champ magnétique terrestre passé ; c'est notamment l'outil qui a permis de mesurer la vitesse de dérive des continents.

compte que de ce qu'on y a introduit comme mécanismes et comme hypothèses. La vision majoritaire actuelle du changement climatique et la modélisation qui l'accompagne sont exposées dans le **Chapitre de H. Le Treut** de cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016).

## 1 La vision majoritaire du « changement climatique »

Les principaux aspects de la vision majoritaire du changement climatique sont – rappelés de façon très simplifiée – les suivants (cf pour un exposé complet le **Chapitre de H. Le Treut**) :

(1) La température globale moyenne de la basse atmosphère (un concept dont la signification thermodynamique est loin d'être évidente) a augmenté d'environ 0,7 °C depuis 100 à 150 ans. Presque tous les chercheurs, une grande partie des minoritaires compris, acceptent ce point, mais la description et l'importance de ces variations font l'objet de débat.

(2) C'est le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) d'origine anthropique (dont il est incontestable qu'il est émis par l'homme de façon accélérée depuis le début de l'ère industrielle) qui est responsable de ce réchauffement global, à cause de ce qu'on appelle de façon impropre l'effet de serre. Ce terme est en fait impropre parce qu'une serre a un toit, dont le rôle est essentiel dans la préservation de la chaleur, tandis que l'atmosphère n'en a pas.

(3) Un troisième point est que les variations de l'activité du Soleil sont estimées avoir des conséquences négligeables, en ce qui concerne les modifications du climat observées depuis environ un demi-siècle. Le rôle du Soleil au cours des milliards d'années passées et jusqu'en 1950 n'est en revanche contesté par personne.

Le débat porte sur les mécanismes du réchauffement observé et sur les rôles respectifs du Soleil et du CO<sub>2</sub> dans ce réchauffement récent.

Certains grands chercheurs des disciplines climatiques et de nombreux médias ont cru pouvoir affirmer au cours de ces dernières années que la compréhension du changement climatique était un problème résolu et que la vision majoritaire rappelée ci-dessus était la bonne. Je plaide ici le droit au débat et à l'existence d'un autre point de vue, actuellement minoritaire, mais cependant partagé par un nombre de chercheurs qui est loin d'être négligeable, comme on le lit ici ou là. Les arguments qui posent problème à la vision majoritaire du changement climatique sont forts et nombreux.

## 2 La « science du climat » : une science jeune appliquée à des phénomènes anciens

En tant que géophysicien, je suis attaché aux observations. Même si cela peut paraître étonnant, un géophysicien peut (doit ?) s'intéresser au climat. Avec les outils dont il dispose, il peut être amené à

montrer que les modèles disponibles à un moment donné ne rendent pas bien ou pas totalement compte des observations, y compris des siennes ; il pose alors des questions utiles pour la recherche et peut contribuer aux solutions. C'est évidemment aussi le cas de nombreuses autres disciplines, qui peuvent apporter beaucoup, comme elles le font depuis des décennies, à la « climatologie ».

La science du climat est en fait une science jeune dans laquelle à peu près toutes les disciplines scientifiques ont des choses importantes à dire. J'ai été amené à m'intéresser aux sujets climatiques par des chemins inattendus, notamment pour un géophysicien (comme c'est souvent le cas en recherche). De la dérive des continents et de la collision entre l'Inde et l'Asie, qui est responsable de la surrection de l'Himalaya et de la formation du grand plateau tibétain, je suis passé à l'étude du volcanisme massif qui s'est produit il y a environ 65 millions d'années en Inde, et de là à faire face à « l'extinction des dinosaures » puis aux problèmes d'extinction en masse des espèces. J'ai été amené à montrer que l'évolution de la vie au cours des cinq cents derniers millions d'années de l'histoire de la Terre a été forgée par un petit nombre d'éruptions volcaniques brèves et gigantesques. À chaque étape de cette carrière de chercheur, une observation inattendue conduisait à « sauter » d'un problème à l'autre, d'une série de disciplines à une autre. C'est l'un des aspects fascinants de la

recherche dans le domaine si vivant des sciences de la Terre, qui a connu une grande révolution avec l'avènement de la tectonique des plaques dans les années 1960-1970.

La plus célèbre des extinctions en masse est celle de la limite dite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années, qui a vu entre autres la disparition des fameux dinosaures, pour laquelle deux théories, représentées de façon humoristique par les deux dessins de la *Figure 1*, se sont affrontées pendant un quart de siècle :

- l'idée qu'un astéroïde était responsable à lui seul de cette extinction ;
- l'idée que des éruptions volcaniques gigantesques en étaient responsables.

Un article récent paru dans *Science* vient de confirmer que la vision volcanique, que je défends depuis trente ans en étant minoritaire et parfois ultra-minoritaire, était probablement la bonne. En passant du paléomagnétisme à la dérive de l'Inde, puis à la datation du volcanisme du Deccan en Inde, puis à la dynamique de ce volcanisme géant et notamment celui des gaz injectés dans l'atmosphère, nous étions passés naturellement de la géophysique à la climatologie. Avec des collègues spécialistes de modélisation climatique (principalement Frédéric Fluteau à l'IPGP), nous avons donc essayé de modéliser les conséquences de ces éruptions - heureusement, sans équivalent historique ou récent - dans lesquelles le rôle du dioxyde de carbone et surtout, semble-t-il, celui du dioxyde de soufre sont essentiels.

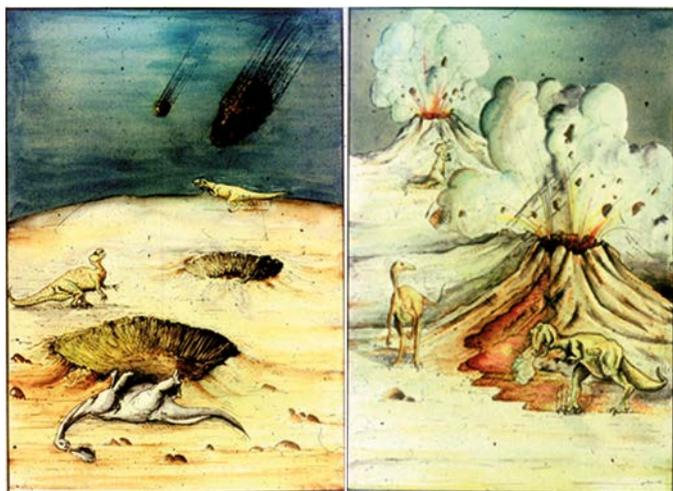


Figure 1

*L'extinction des dinosaures est-elle due à une météorite ou à de gigantesques éruptions volcaniques ?*

Source : dessins de Joël Dyon, IPGP.

### 3 L'évolution du climat sur de longues périodes (du siècle au million d'années)

Le climat est défini, de façon simple, comme « la moyenne de la météorologie sur trente ans ». De nombreux paramètres – température, pression, précipitations, vent, insolation<sup>5</sup>, nébulosité<sup>6</sup> – sont nécessaires pour décrire complètement la météo et le climat sur ces moyennes de temps.

**Pour étudier le climat, il faut en outre observer (de manière directe ou indirecte) des échelles de temps emboîtées de plus en plus anciennes.**

5. Insolation : durée d'exposition d'un site au Soleil et bilan thermique en résultant.

6. Nébulosité : valeur de la couverture nuageuse, observée à diverses altitudes.

#### 3.1. Les périodes glaciaires et interglaciaires

Commençons par le remarquable travail des géochimistes-isotopistes<sup>7</sup> qui, en extrayant des carottes de glace de milliers de mètres de longueur de l'Antarctique et du Groenland (voir le *Chapitre de M. Legrand* dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016), ont réussi à reconstituer l'évolution de certaines caractéristiques climatiques régionales sur 450 000 ans (*Figure 2*) et notamment :

- de la température moyenne de l'atmosphère dans ces régions, déterminée à partir de l'évolution des rapports isotopiques de l'oxygène ;

- de la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère, mesurée dans des bulles emprisonnées dans la glace.

On voit sur l'échelle de droite que la température moyenne (en bleu) varie de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , par rapport à une moyenne prise comme référence. On repère sur cette courbe les glaciations avec leur périodicité ou leur quasi-périodicité de 100 000 ans. On voit que, tous les 100 000 ans environ, on entre dans une période glaciaire de façon un peu chaotique.

7. Géochimiste-isotopiste : scientifique qui étudie les composants chimiques de la Terre (et des autres planètes), leurs transformations et leurs propriétés isotopiques. Par exemple, l'étude des rapports des concentrations en isotopes 16 et 18 de l'oxygène permet de remonter aux processus qui accompagnent le cycle de l'eau (évaporation, transport, précipitation) et notamment, moyennant certaines hypothèses, à la température à laquelle se sont effectués ces processus.

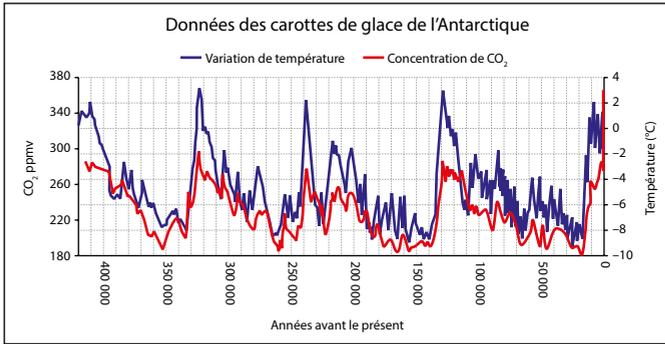


Figure 2

Évolution de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère et de la température depuis 450 000 ans. La température moyenne est représentée en bleu. L'évolution de la concentration en  $\text{CO}_2$  est en rouge.

tique et lente, puis on en sort par une série de périodes de dégel, qui, elles, sont rapides, parfois extrêmement rapides, pour arriver dans les périodes interglaciaires, beaucoup plus courtes.

**Nous vivons actuellement dans une telle période interglaciaire (plus chaude) à un moment de l'histoire géologique de la Terre où celle-ci connaît pourtant la plupart du temps les glaciations.** Or il faut savoir que, pendant la plus grande partie de l'histoire de la Terre, il n'y a pas eu de glaces ; les périodes glaciaires sont des périodes géologiquement rares.

La courbe rouge de la *Figure 2* donne l'évolution de la concentration en  $\text{CO}_2$  mesurée sur l'échelle de gauche. On voit que les courbes rouge et bleu, sans aller trop dans le détail, sont bien corrélées. Bien que, on le sait, corrélation n'implique pas forcément causalité, une telle corrélation suggère plus que fortement une relation de cause à

effet. Mais dans quel sens ? Est-ce que la température « piloterait » la concentration de l'atmosphère en  $\text{CO}_2$  ? Ou le contraire ? Ou bien un autre agent déclencherait ces deux variations concomitantes ?

Il est pratiquement impossible de savoir si l'une des courbes précède l'autre, à l'échelle de temps de la *Figure 2*. La plupart des chercheurs pensent qu'à la sortie d'une période glaciaire, c'est d'abord la température qui augmente ; le « facteur forçant » est l'ensoleillement, qui varie avec les cycles orbitaux du Soleil<sup>8</sup>. Le réchauffement des eaux de l'océan conduit alors à un dégazage d'une partie du  $\text{CO}_2$  qui y était dissout.

Certains chercheurs pensent que dans un premier temps la température augmente en effet et que l'océan mondial

8. Ou cycles de Milankovic, liés à des perturbations de l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil, principalement dues à l'attraction gravitationnelle des planètes géantes.

dégaze, augmentant la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique ; mais ils pensent que le gaz carbonique entraînerait ensuite un réchauffement de l'atmosphère par effet de serre (effet de rétroaction). La réalité d'une telle rétroaction est l'un des nombreux éléments du débat qui ne sont pas tranchés. Il n'en reste pas moins que le Soleil paraît bien être le principal déterminant des cycles de Milankovic illustrés par la **Figure 2**.

Depuis la fin de la dernière glaciation il y a 18 000 ans, la température dans les régions étudiées s'est réchauffée de 6 °C à 8 °C – ce qui a été bénéfique pour le développement de toutes les populations humaines, qui a été rendu possible par cette dernière période de réchauffement –, et le niveau moyen des mers s'est élevé de 125 mètres. Ces chiffres, issus des recherches paléoclimatiques<sup>9</sup>, rappellent que les variations de températures peuvent se faire de façon très rapide, autant les hausses que les baisses ; les hausses du niveau de la mer, en particulier, peuvent être relativement rapides. L'homme a toujours connu le changement climatique, avec des échelles de temps et des amplitudes très variées. Il semble s'y être assez bien adapté.

### 3.2. L'évolution du climat au cours des derniers millénaires

Pour ce qui est de l'étude de l'amplitude et de la vitesse

9. La paléoclimatologie est la science qui étudie les climats passés et leurs variations.

de variation de la température à l'échelle de mille ans, une courbe d'apparence très inquiétante réalisée par Michael Mann en 1998 a figuré de nombreuses fois dans le troisième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Étude du Climat (GIEC<sup>10</sup>) (**Figure 3**). La température représentée par la courbe de droite en orange est obtenue par des mesures thermométriques. Celle de gauche, en vert, est obtenue par des mesures indirectes puisqu'on ne disposait pas encore de thermomètres (ou d'une couverture globale suffisante de thermomètres) jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. L'estimation indirecte de la température moyenne de la basse atmosphère a été faite à

10. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il « a pour mission d'évaluer, sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ». Sur cette définition, dont l'analyse montre combien elle est ambiguë, et pour une analyse critique du fonctionnement du GIEC, voir par exemple Postel-Vinay O., *La comédie du climat*, 263 pp., J.C. Lattès, Paris, 2015.

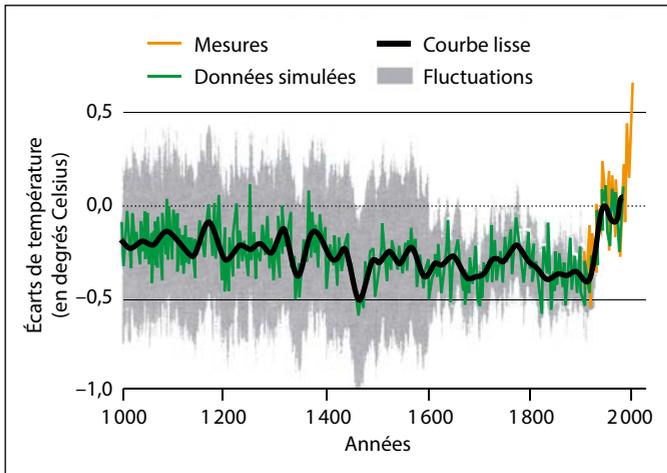


Figure 3

Graphique en « crosse de hockey » de Michael Mann (1998), publié dans le 3<sup>e</sup> rapport du GIEC, donnant la variation de la température relative par des moyens directs (courbe orangée) ou dendrochronologiques (cernes d'accroissement des arbres, courbe verte : cette courbe est légèrement décroissante de l'an 1000 à 1900, puis elle croît en deux étapes à partir de 1900, puis à partir de 1950).

partir des cernes (ou anneaux) d'accroissement des arbres.

Les anneaux d'accroissement des arbres sont sensibles à la température (et aussi aux précipitations), et on peut essayer d'étalonner la taille de ces cernes et leurs variations pour en faire des indicateurs de température. La dendrochronologie permet de dater ces variations. C'est ce qui a été réalisé pour obtenir cette courbe, qui semble montrer une période froide de l'an 1000 à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (avec un léger refroidissement mais sans grandes variations), suivie d'un réchauffement beaucoup plus rapide au cours des cent dernières années, sans équivalents dans les mille années précédentes, que ce soit en amplitude ou en vitesse.

En fait, cette courbe pose problème, comme l'ont montré

un certain nombre de chercheurs<sup>11</sup>, par exemple Anders Moberg et ses collègues dans une publication de 2007 dans la revue *Nature*. Moberg et son équipe font remarquer que les arbres sont des organismes vivants qui s'adaptent aux variations de leur environnement. S'ils enregistrent avec leurs cernes les variations rapides de la température et des précipitations d'une année à l'autre, ils n'enregistrent pas bien les variations sur des temps plus longs, tout simplement parce qu'ils s'adaptent. Les arbres sont des filtres « passe-haut », à l'image des

11. Il existe d'autres arguments, notamment mathématiques. La méthode utilisée pour construire une courbe moyenne à travers le nuage des données d'observation est biaisée et engendre presque forcément une courbe en forme de « crosse de hockey ».

filtres électroniques qui ne laissent passer que les hautes fréquences.

Moberg a utilisé de meilleurs marqueurs des variations lentes de la température qui sont les isotopes de l'oxygène, dont les variations sont mesurées dans des carottes sédimentaires réparties dans tous les océans du globe. Il a ainsi reconstitué la courbe de la **Figure 4**. Il a en outre étendu l'étude sur mille ans de plus, jusqu'aux environs de l'an 0. L'amplitude et la forme des variations de température de « haute fréquence », c'est-à-dire les variations rapides sur des temps courts, n'ont pas beaucoup changé par rapport à celles de la courbe de la **Figure 3**. Mais apparaît nettement, sur des temps plus longs, une période froide que connaissent bien les historiens (voir le **Chapitre d'E. Garnier** dans *Chimie et changement climatique*), que l'on appelle le Petit Âge Glaciaire (PAG) et qui s'étend du  $xiv^e$  au  $xix^e$  siècles, au moins en Europe, probablement dans tout l'hémisphère Nord et, certains le pensent maintenant, à l'échelle globale. Cette diminution de température a été précédée, vers l'an 1000, d'une période chaude appelée

Optimum Climatique Médiéval (OCM), avec avant une période plutôt plus froide. Maintenant, les paléoclimatologues ont des indices de l'existence d'une période chaude au temps des Romains et d'une autre mille ans auparavant.

**Il semble donc qu'apparaisse un cycle de mille ans qui ne peut pas être dû aux variations du gaz carbonique : le dégagement accéléré de  $CO_2$  « anthropique » au cours du  $xx^e$  siècle n'a bien sûr pas d'équivalent au  $x^e$  siècle.**

Cela, avec d'autres éléments dont nous reparlerons plus loin, a conduit un certain nombre de chercheurs à étudier le rôle du Soleil, dont tout le monde est d'accord pour dire que depuis des milliards d'années jusqu'au milieu du  $xx^e$  siècle il était le principal pilote de l'évolution du climat : ce n'est que pour le dernier demi-siècle que se posent des questions !

### 3.3. L'évolution du climat au cours des derniers 150 ans

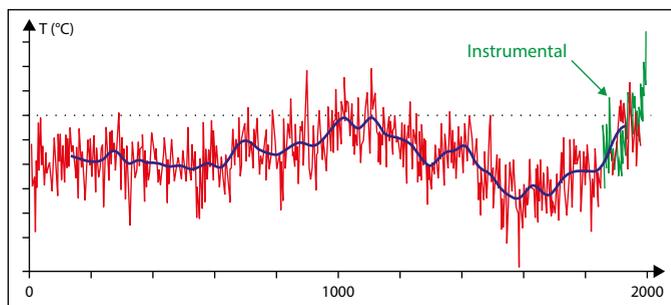
Continuons à « zoomer » sur ces échelles de temps emboîtées et regardons maintenant les 150 dernières années, avec une courbe plus précise de l'évolution de la tempéra-

**Figure 4**

Évolution de la température relative de l'an 0 à l'an 2000 : les reconstitutions de la température combinent les cernes d'accroissement des arbres avec les isotopes de l'oxygène de carottes sédimentaires réparties dans les océans du globe.

Source : Moberg et coll. (2007).

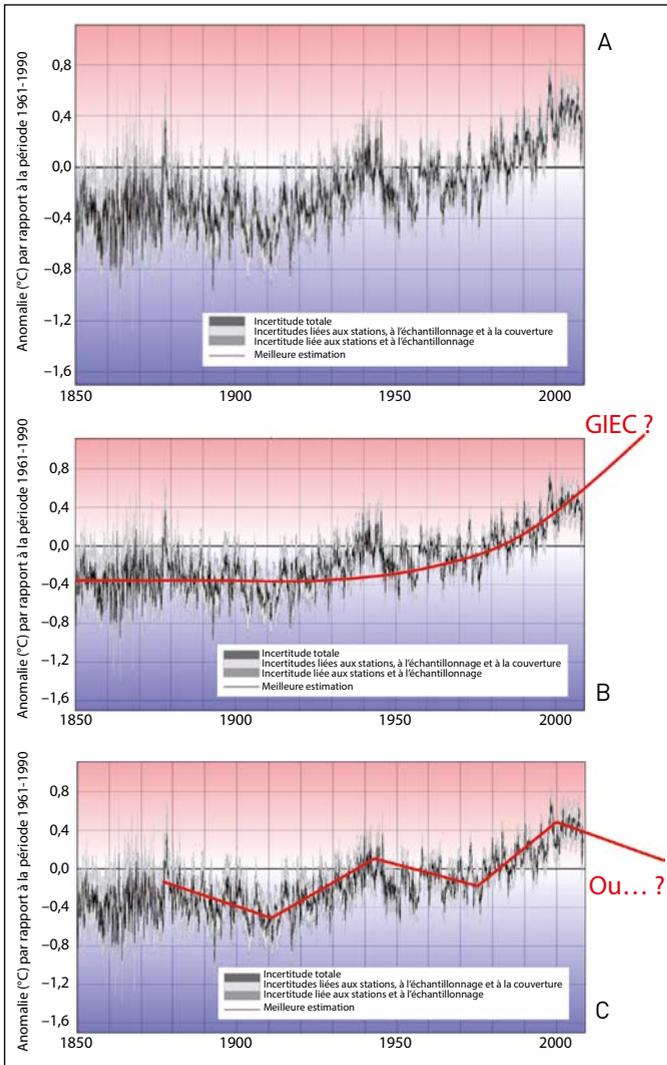
Nature.



ture, ou plutôt de ses « anomalies », prises par rapport à une certaine référence de la température globale de la basse atmosphère à la surface de la Terre (souvent la moyenne des températures entre 1961 et 1990 ; **Figure 5A**). L'échelle de gauche est en dixièmes de degrés Celsius et les lignes horizontales sont espacées de 0,4 °C. **Une augmentation de 0,7 °C ou 0,8 °C entre 1850 et 2000 apparaît**

**sur ce diagramme. C'est le fameux réchauffement climatique.**

Si on souhaitait déduire une tendance à partir de cette courbe, celle-ci pourrait avoir l'allure de la courbe rouge de la **Figure 5B** (qui n'est pas ici déterminée mathématiquement mais esquissée à la main). Il serait tentant de l'extrapoler au-delà des années 2000 comme indiqué sur la partie droite de la figure.



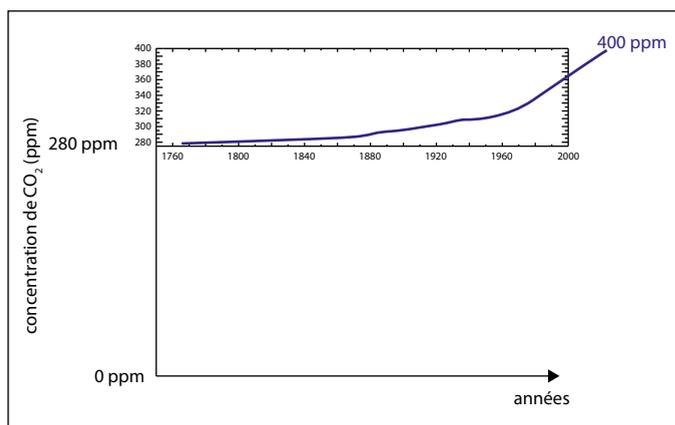
**Figure 5**

A) Évolution de l'anomalie globale de température de 1850 à 2007 (source CRU, Hadley Research Center). Les moyennes mensuelles sont exprimées par rapport à une référence qui est la moyenne des températures de 1961 à 1990 ; B) une esquisse de la tendance de cette évolution à l'échelle pluridécennale à séculaire, représentée par une courbe monotone croissante, qui rappelle la croissance de la concentration de  $CO_2$  dans l'atmosphère et sa possible extrapolation ; C) une interprétation alternative soulignant une succession de segments de droite (évolution linéaire du climat) séparés par des changements de pente (bifurcations) alternativement positive et négative (ou stable pour la période la plus récente, voir la **Figure 11**).

Mais la détermination de la tendance et son extrapolation pourraient aussi être effectuées d'une façon différente, selon la façon d'analyser les observations (**Figure 5C**). Je fais partie d'un groupe de chercheurs qui pensent que, de façon très significative, cette courbe est faite d'une alternance de segments de droite : la pente moyenne sur 150 ans est certes croissante, mais elle est affectée d'une variation de la pente de segments de 30 ans (sur lesquels je reviendrai parce qu'ils ont à mes yeux une grande importance).

Cette discussion est pour l'instant indépendante du fait que l'homme, qui brûle en quelques siècles des ressources carbonées fossiles accumulées pendant des millions d'années, connaît une situation qui ne pourra pas durer indéfiniment. La source du  $\text{CO}_2$  ainsi produit est bien une source « anthropogénique ».

Le diagramme utilisé la plupart du temps pour montrer l'évolution de la teneur en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère est celui du rectangle du haut de la **Figure 6**, dans lequel l'axe des abscisses est représenté au niveau de la valeur de la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère dans les années 1750. Elle part de 280 parties par million (ppm) pour monter à la valeur actuelle de 400 ppm. C'est certes une augmentation importante (40 %). Mais si on montre où est vraiment le départ de l'axe des ordonnées, l'évolution demeure importante mais son effet visuel est relativisé : deux présentations également justes des mêmes observations peuvent véhiculer des messages subliminaux très différents. Il faut aussi se souvenir que 400 ppm (0,04 %) est une concentration très faible qui fait du gaz carbonique un gaz rare dans l'atmosphère, cependant indispensable à la Vie sur Terre.



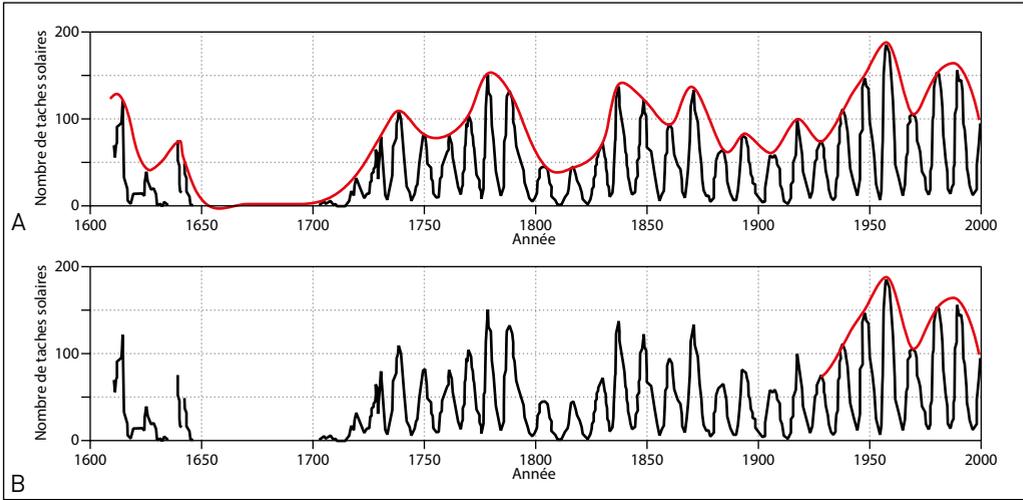
**Figure 6**

Variation de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Le message qu'on retient inconsciemment est sans doute assez différent si l'on place l'axe des abscisses à la valeur 280 ppm (comme c'est fait en général) ou 0 ppm (comme je l'ai surajouté ici) de l'axe des ordonnées (concentrations en  $\text{CO}_2$ ).

## 4 Évolution de l'activité solaire

La concentration en  $\text{CO}_2$  a certes augmenté depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle de plus de 40 % dans l'atmosphère à cause de l'activité humaine (surtout depuis 50 ans). Il est intéressant de regarder comment, pendant cette même période, a varié l'activité du Soleil dont tout le monde est d'accord pour dire qu'auparavant il était le pilote principal du climat.

On a la chance de pouvoir reconstituer, par des moyens divers, l'activité du Soleil dans le passé, et en particulier pour les 400 dernières



**Figure 7**

*A) Variations de l'activité solaire (caractérisée par le décompte du nombre de taches solaires) depuis 400 ans. L'enveloppe rouge met en évidence des variations pluri-décennales à séculaires (depuis 1700), particulièrement marquées au siècle dernier (enveloppe de 1925 à 2000 ; B) même figure, mettant l'accent sur la variation en forme de M majuscule dissymétrique du xx<sup>e</sup> siècle (représentée de manière quantitative plus exacte sur la Figure 8).*

années, grâce à l'observation de l'évolution du nombre de taches solaires<sup>12</sup> (Figure 7A). Les maxima de la courbe noire montrent, entre l'an 1600 et l'an 2000, l'existence de cycles de onze ans ; l'enveloppe rouge (dessinée à la main) met en évidence les variations sur le plus long terme.

Durant la deuxième moitié du xvii<sup>e</sup> siècle (« Minimum de Maunder »), qui correspond à la période la plus froide du Petit Âge Glaciaire, et durant la période autour de 1800-1830 appelée « minimum de Dalton », qui correspond aussi à une période froide (cf la retraite de Russie), l'activité du Soleil était très réduite : il n'y avait pas ou peu de taches solaires.

Il se trouve que le Soleil a connu ses cycles les plus importants justement au xx<sup>e</sup> siècle (Figure 7B). Ceux-ci

sont cependant d'amplitude très variable (courbe noire), avec une enveloppe (en rouge) en forme de M majuscule dissymétrique. Nous sommes en ce moment dans une période de cycle d'activité solaire faible, et certains astrophysiciens spécialistes du Soleil pensent pouvoir, en analysant ces courbes et la physique du Soleil, extrapoler vers une chute qui nous ramènerait d'ici 30 à 60 ans dans un minimum analogue à celui des années 1800, voire un minimum de type « Maunder ».

## 5 Corrélation entre l'activité solaire et la variabilité des températures au xx<sup>e</sup> siècle

Quelques résultats d'études des dix dernières années portant sur le xx<sup>e</sup> siècle sont reportés sur les Figures 8 et 9.

Sur la Figure 8, on compare deux courbes, une en bleu qui mesure l'activité solaire (c'est, en plus précis, le « M majuscule » de la Figure 7B), et la courbe en vert, qui me-

12. Tache solaire : région à la surface du Soleil marquée par une température inférieure (donc moins lumineuse) et une intense activité magnétique.

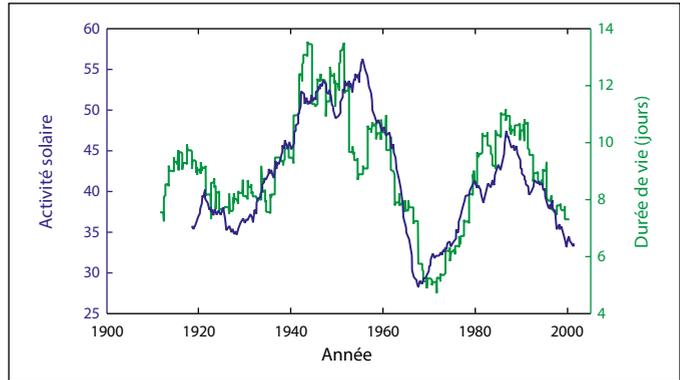


Figure 8

Évolution de l'activité solaire et de la variabilité (ou durée de vie) de la température aux Pays-Bas de 1910 à 2000. Ces deux courbes suivent des variations très proches.

Source : Le Mouël et coll. (2009).

sure la variabilité des températures observées dans les stations météo des Pays-Bas ; la même comparaison a été réalisée pour l'ensemble des stations météo d'Europe. Cette corrélation entre l'activité solaire et la variabilité de la température aux Pays-Bas et en Europe est remarquable, et il est difficile de ne pas y rechercher une forme de causalité. Or, à ma connaissance, il n'existe aucun modèle qui rende compte de ces observations.

Nous avons aussi montré que les cycles du nombre de taches solaires observées sur une quarantaine d'années, représentés en rouge sur la **Figure 9**, corrélient bien avec une composante de la variation de la rotation de la Terre, c'est-à-dire de la longueur du jour. *Comment les minuscules fluctuations de la rotation de la Terre peuvent-elles être liées aux cycles solaires ?* Nous pensons que ces fluctuations résultent d'un changement du moment angulaire de l'en-

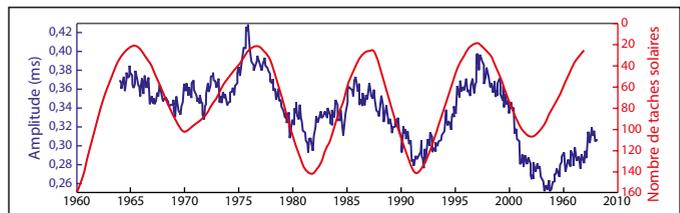


Figure 9

Corrélation entre le nombre de taches solaires (en rouge) et l'amplitude de la raie spectrale de 6 mois de la longueur du jour entre 1964 et 2007. Le nombre de taches solaires est inversé (changement de signe) et décalé d'un an, pour être en phase avec les rayons cosmiques, élément sans doute important du lien physique responsable de la corrélation.

Source : Le Mouël et coll., GRL (2010).

semble des vents zonaux<sup>13</sup> de l'atmosphère. Il est difficile d'imaginer que le Soleil, dont l'activité corrèle si bien, n'en est pas d'une façon ou d'une autre à la source, mais par un mécanisme dont nous n'avons pas encore l'explication physique. Il existe déjà quelques hypothèses, faisant notamment intervenir les rayons cosmiques, qui corrèlent très bien et de manière indubitablement causale avec les cycles de taches solaires.

## 6 Sur le bilan radiatif

La **Figure 10** est une figure de base de tous les traités de climatologie, qui résume les différents flux de chaleur de l'atmosphère, ainsi que les contributions au bilan radiatif. La quantité d'énergie qui arrive du Soleil au niveau de la haute atmosphère est en moyenne sur 24 heures, en tenant compte de l'alternance jour/nuit, de  $342 \text{ W/m}^2$ . Le 100 %, représenté par la large barre orangée, se répartit de diverses façons. Environ la moitié (47 %) atteint la surface de la Terre qu'elle réchauffe. La Terre renvoie une partie de cette énergie par émission infrarouge, représentée par la large flèche rouge (sur ce dessin, les rayonnements visible et infrarouge ont été séparés). Dans la vision majoritaire, le réchauffement de l'atmosphère terrestre dû à l'effet de serre (abordé dans le **Chapitre de H. Le Treut** dans *Chimie et changement climatique*) résulte de l'effet

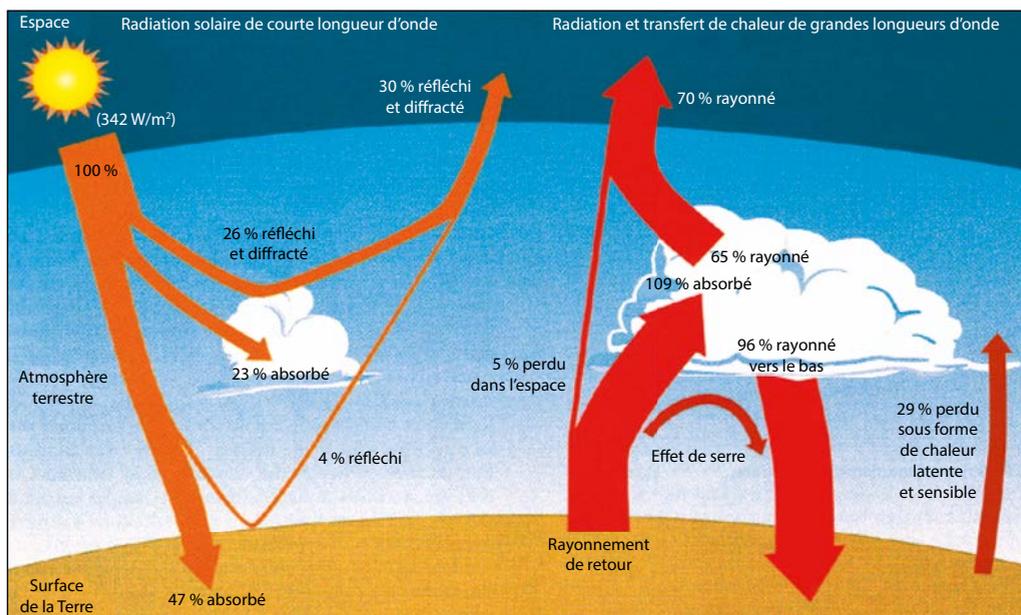
représenté par la petite flèche courbe rouge foncé.

Une partie de l'énergie incidente est absorbée et une partie réfléchiée par les nuages. Donc, quand la nébulosité change, la quantité d'énergie solaire renvoyée vers l'atmosphère peut varier beaucoup. Or la répartition et la surface de ces nuages ne sont bien connues de façon quantitative que depuis le début de l'ère satellitaire, soit une trentaine d'années (variations de quelques pourcents). Quelques pourcents du quart de  $342 \text{ W/m}^2$ , cela fait un flux équivalent à celui que l'on invoque dans l'effet de serre ( $3,7 \text{ W/m}^2$ , quand on aura atteint – ce qui n'est pas encore le cas – un doublement de la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère par rapport à la teneur préindustrielle).

Cette variation de la couverture nuageuse n'est pas encore pleinement prise en compte par les modèles, faute d'une bonne compréhension des causes exactes de ces variations. Le GIEC le reconnaît comme un sujet de recherche essentiel et une grande source d'incertitude. Les variations de l'activité solaire se marquent par des variations de la lumière visible mais aussi par des variations plus fortes de la part de cette énergie qui réside dans l'ultra-violet. Le rayonnement ultra-violet influence les couches de la haute atmosphère, l'ionosphère<sup>14</sup>, et par là les champs magnétique

13. Les vents circulant le long des parallèles, c'est-à-dire à latitude constante.

14. Partie de l'atmosphère ionisée par les radiations solaires (notamment UV) qui s'étire de 60 à 800 km.



**Figure 10**

Les flux de chaleur dans l'atmosphère et leur contribution au bilan radiatif

et électrique qui y règnent. Ces derniers ont une influence sur la charge électrique des nuages et sur les processus de leur nucléation. On a ainsi, au moins de manière qualitative, une chaîne physique causale qui relie les variations à long terme de l'activité solaire à celle des nuages, composante majeure du système climatique. Ces processus ne sont généralement pas exprimés dans les modèles numériques actuels.

## 7 La modélisation du changement climatique : les problèmes encore non résolus

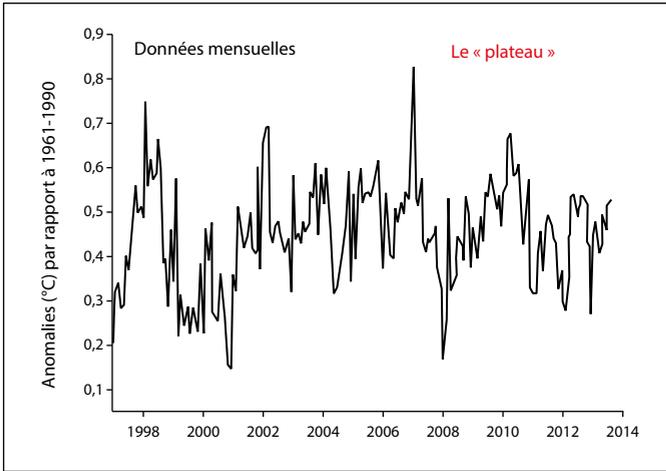
### 7.1. Un plateau dans l'anomalie des températures depuis au moins 15 ans

Depuis la fin des années 1990, la température moyenne a

atteint un plateau (**Figure 11**), constaté dans tous les rapports du GIEC et reconnu comme très difficile à expliquer.

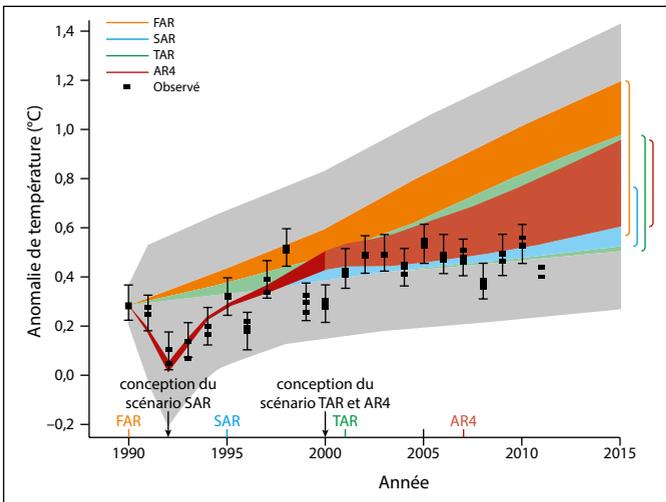
De nombreuses équipes mènent des recherches pour voir si les modèles existants sont capables de rendre compte de ce plateau. Je considère, avec beaucoup d'autres, que ce plateau n'a pas été pour l'instant expliqué<sup>15</sup> ; la **Figure 12** illustre ce point de vue. Elle montre, avec des couleurs différentes, les prévisions des températures de la basse atmosphère et de la couverture continentale issues des modèles présentés dans les rapports du GIEC depuis le premier rapport du début des années 1990 jusqu'à 2015. À droite figurent les prédictions pour 2015 avec leurs

15. Une trentaine d'hypothèses, mutuellement incompatibles, ont récemment été suggérées...



**Figure 11**

Évolution de l'anomalie de température entre 1997 et 2014 (par rapport à la température moyenne entre 1961 et 1990). 1998 correspond à un grand phénomène El Niño, qui est météorologique et non climatique. 2015, non représentée ici, est une autre année de grand épisode El Niño.



**Figure 12**

Évolution de la température de la basse atmosphère et de la couverture continentale : comparaison des données observées avec celles prévues par les différents rapports du GIEC. FAR = first assessment report ; SAR = second assessment report ; TAR = third assessment report ; AR4 = assessment report number 4.

marges d'incertitude. En noir, avec les incertitudes, sont reportées les températures observées ; on y voit apparaître le plateau depuis la fin des années 1990 (1998 est une année de fort El Niño ; 2015 aussi). Plus le temps passe, plus ce plateau infirme un nombre considérable de modèles qui « sur-prédisent » les observations.

L'évolution des températures moyennes de la tropo-

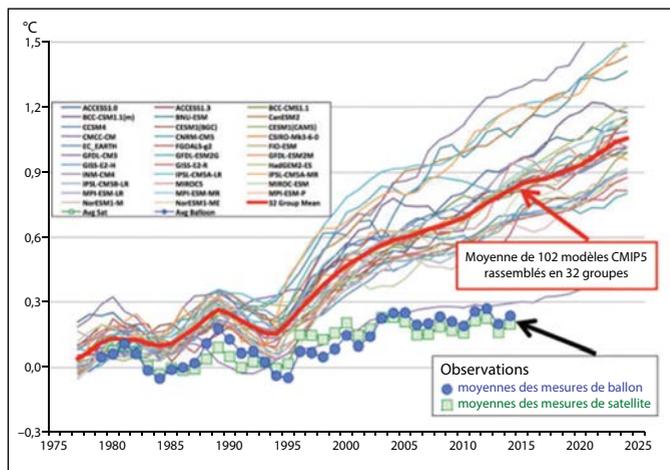
sphère<sup>16</sup>, déduite des mesures de ballons (points bleus sur la **Figure 13**) et des mesures de

16. Troposphère : première couche de l'atmosphère en partant de la surface du sol, où se produisent les phénomènes météorologiques (nuages, pluies, etc.) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents). Le sommet de cette couche de l'atmosphère varie avec la saison et la latitude, entre un maximum de 18 km à l'équateur et un minimum de 8 km aux pôles.

Figure 13

Évolution de l'anomalie de température dans la troposphère moyenne entre 1975 et 2025 par des mesures de ballons et par des mesures de satellites. Comparaison entre les modèles et les observations. Toutes les courbes (moyennes sur cinq ans) partent de zéro en 1979.

Source : J.R. Christy, Univ. Alabama.



satellite (points verts sur la **Figure 13**) fait également apparaître le plateau. Ce n'est pas le cas des courbes obtenues à partir de nombreux modèles qui ont été inter-comparés et dont la moyenne figure en rouge.

## 7.2. Le changement du niveau des mers

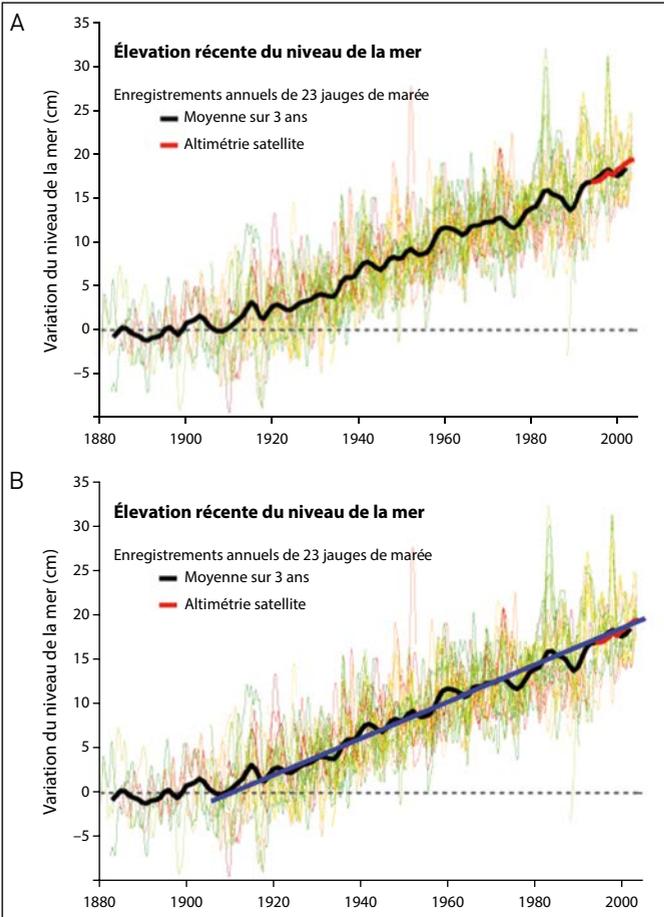
Grâce aux satellites, on sait que depuis une vingtaine d'années, l'élévation du niveau de la mer est d'environ 3 mm par an, ce qui voudrait dire 30 cm si l'on pouvait extrapoler sur un siècle (**Figure 14A**, segment rouge). Grâce aux marégraphes<sup>17</sup>, on sait que le niveau moyen global des mers s'est élevé de 20 cm au xx<sup>e</sup> siècle (**Figure 14A**), soit 2 mm par an en moyenne (courbe bleue, **Figure 14B**).

Cette accélération de 2 à 3 mm par an depuis les années 80-

90 est-elle significative (voir aussi le **Chapitre d'A. Cazenave** dans *Chimie et changement climatique*) ? Il me semble que, l'évolution du climat ne se voyant qu'à long terme (un point moyen nécessite trente ans d'observations), une évolution sur vingt ans ne suffit pas pour déterminer une tendance. En effet, si l'on prend des segments de vingt ans à des endroits divers de la courbe de la **Figure 14A**, on peut obtenir des pentes sensiblement inférieures ou supérieures à 2 mm par an, qui peuvent être interprétées comme autant de ralentissements ou d'accélération, mais qui sont de trop courte durée pour être considérées comme ayant une signification « climatique ».

En fait, il me semble qu'on ne puisse pas encore démontrer que les valeurs observées soient sorties de cette variabilité naturelle et que si elles le sont, cette augmentation est une augmentation modeste. La Terre a connu 20 cm d'augmentation du niveau des mers au xx<sup>e</sup> siècle. Est-ce que

17. Marégraphe : instrument permettant d'évaluer les variations du niveau moyen de la mer à un endroit donné sur une durée déterminée.



**Figure 14**

Variation du niveau de la mer depuis 1880. Courbe noire : moyenne sur trois ans obtenue à partir des mesures marégraphiques ; courbe rouge : mesures satellites ; courbe bleue (B) : tendance observée au  $xx^e$  siècle.

30 cm ou 40 cm au  $xxi^e$  siècle seraient un problème plus difficile à résoudre ? Peut-être un peu, mais pour des raisons de démographie et d'économie. Et des progrès raisonnables devraient permettre d'y faire face avec des réponses techniques appropriées.

## 8 Les difficultés des prévisions climatiques

Les difficultés des prévisions climatiques peuvent être illustrées par cette citation

d'un des principaux protagonistes du GIEC, disparu en 2010, Stéphane Schneider :

« L'importance dramatique des changements climatiques pour l'avenir du monde a été dangereusement sous-estimée par beaucoup, souvent parce que la technologie moderne nous a bercés dans l'idée que nous avons conquis la nature, mais ce livre bien écrit souligne dans un langage clair que la menace climatique pourrait être aussi terrifiante que tout ce à quoi nous pourrions être confrontés et que des actions massives et mondiales pour se préserver

de cette menace doivent être envisagées sans délai ».

Cette citation est pourtant issue de la quatrième de couverture d'un livre de 1976 consacré à démontrer que nous allons vers le froid et que nous devons être terrifiés par la perspective d'un nouvel âge glaciaire ! Notons, en songeant aux cycles de Milankovic et aux quatre glaciations les plus récentes (voir la **Figure 2**), qu'une prochaine glaciation semble en effet inévitable, mais à l'échelle des prochains milliers d'années.

De même, John Holdren, conseiller scientifique du président américain Barack Obama, a soutenu dans les années 1970 la venue imminente d'un nouvel âge glaciaire, alors que dans les années 2010 il nous alerte sur la « *perturbation du climat global* » due aux terribles réchauffements climatiques que nous devrions attendre.

Risquons avec un sourire une interprétation semi-psychologique de ces déclarations, mais peut-être pas sans fondement : les fluctuations de température pourraient être bien représentées par ce qui ressemble, pour les physiciens-chimistes, à la réponse non linéaire d'un système d'oscillateurs couplés. Il a été noté, par exemple par A. Tsonis et ses collaborateurs (GRL, 2007), que le fonctionnement des océans ressemble à un système d'oscillateurs non linéaires couplés. Cela est bien compatible avec l'évolution des anomalies globales de la température des océans (voir les **Figures 5C** et **15A**), où l'on observe, comme nous

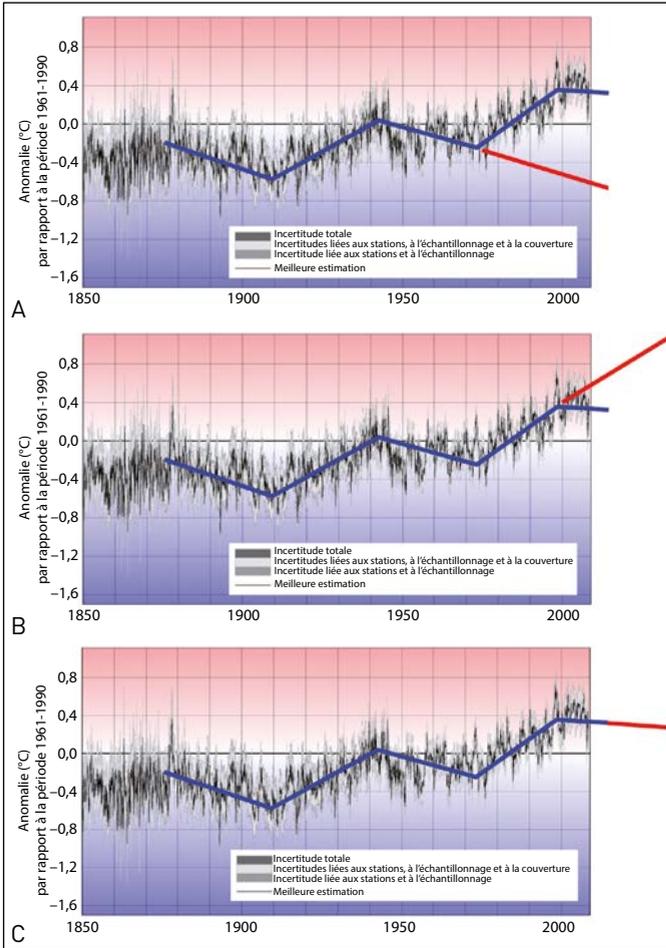
l'avons vu, des tendances relativement uniformes sur des périodes de trente ans pendant lesquelles successivement la température croît ou décroît, séparées par des basculements de pente relativement rapides.

La **Figure 15A** montre qu'après trente ans de décroissance de la température entre 1940 et 1970, Schneider, Holdren et d'autres pouvaient en effet être tentés d'extrapoler (ligne rouge) et s'inquiéter d'un retour vers un âge glaciaire.

Comme après trente ans de réchauffement, on s'inquiète maintenant de la poursuite de ce réchauffement et l'on est tenté d'extrapoler selon la ligne rouge de la **Figure 15B**.

Mais si on croit à la réalité de cette pseudo-périodicité de trente ans (en fait  $2 \times 30 = 60$ ), qui apparaît sur la **Figure 15C**, on pourrait dire que les quinze ans de plateau que nous venons de vivre ont toutes les chances de se continuer par un plateau (ligne rouge), ce qui ne veut pas dire que la tendance linéaire séculaire qui est en arrière-plan n'existe pas. Mais qu'elle soit due en partie au  $\text{CO}_2$  ou au Soleil est un sujet de recherche ouvert : personne ne sait vraiment bien quelle est la part de chacune de ces deux sources, et il faudrait démontrer l'une avant d'exclure l'autre.

On peut remarquer que le réchauffement entre 1910 et 1940, quand il y avait pourtant une faible augmentation du  $\text{CO}_2$ , est pratiquement de la même valeur, de la même durée, avec les mêmes caractéristiques que celui qui



**Figure 15**

Évolution de l'anomalie globale de température de 1850 à 2007 et « prédictions » (?) pour les décennies à venir. Ce qu'on pouvait imaginer par simple prolongation de la tendance des décennies précédentes :

- A) dans les années 1970 ;
- B) dans les années 1990 ;
- C) en 2015 ?

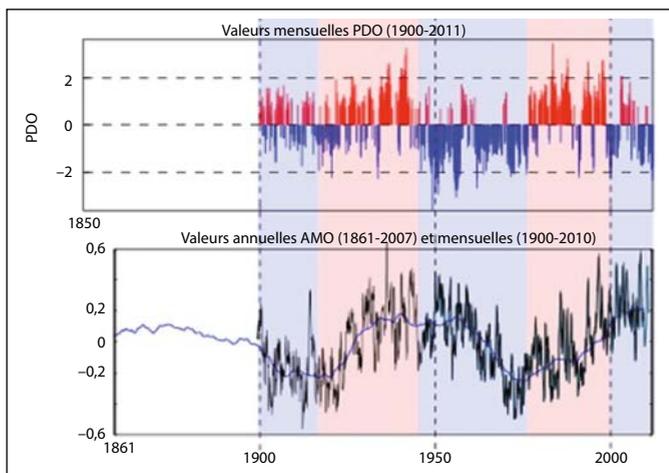
La courbe bleue est notre proposition de ce qui pourrait être la signature d'un modèle d'oscillateurs couplés.

semble avoir effrayé tant de monde entre 1970 et l'an 2000, et qui est à la base des conclusions actuelles du GIEC. Cela ne plaide pas en faveur d'une relation entre évolution de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et sa température.

Les changements de pente des courbes d'évolution des températures moyennes de surface des océans corrélient en revanche avec les changements de signe ou de pente des grands indicateurs de l'état de l'Océan Pacifique et de l'Océan Atlantique

(Figure 16) : ceci laisse penser que c'est bien l'océan qui, par le biais d'un mécanisme d'oscillateurs couplés, est un pilote majeur de l'atmosphère.

Cependant, on y voit mal la corrélation avec le gaz carbonique. Est-ce que l'océan seul est un système chaotique qui produit ces oscillations ? Ou est-ce qu'elles sont pilotées ou déclenchées, ou même contrôlées par le Soleil par exemple ? Nous ne savons pas encore répondre à ces deux questions (voir Tsonis et coll.).



**Figure 16**

Variations des caractéristiques de l'océan Pacifique (PDO = Pacific decadal oscillation = oscillation décennale du Pacifique) et de l'océan Atlantique (AMO = Atlantic multidecadal oscillation = oscillation multi-décennale de l'Atlantique) entre 1900 et 2011. Les bandes à l'arrière-plan alternativement bleues et roses pâles correspondent aux segments de pente respectivement croissante et décroissante de la température sur la Figure 15. Elles montrent la bonne corrélation entre changements de pente de la température, de signe de PDO et de pente d'AMO.

Source : Courtillot et coll. (2010).

## Un débat toujours ouvert

Un réchauffement global est effectivement observé depuis 150 ans, mais :

- il est faible (environ un dixième) comparé au réchauffement (bénéfique) qui a fait suite à la dernière des glaciations ; il ne sort pas de la variabilité naturelle observée depuis des siècles, pour autant qu'on sache la reconstituer correctement à l'échelle globale ;
- il est irrégulier et dans l'espace et dans le temps ;
- il n'est pas sans précédent, ni en amplitude, ni en vitesse, depuis deux millénaires, contrairement à ce que pensent beaucoup de gens.

Les sources de ce réchauffement sont complexes, multiples, certaines encore mal

comprises et non prises en compte dans les modèles (physique des nuages, rôle des rayons cosmiques, des UV solaires,...).

Il existe des indices forts, basés sur des observations non encore prises en compte dans les modèles, de l'influence de la variation de l'activité solaire sur le climat sur des échelles de temps allant de quelques décennies à des millénaires, et ce, jusqu'à aujourd'hui.

Les mécanismes physiques à l'origine de ces observations ne sont pas encore bien compris. Ils pourraient impliquer, pour certains chercheurs, les rayons cosmiques et les fluctuations dues aux champs magnétiques du Soleil ou de la Terre, ou encore les courants ionosphériques et leur action sur la couverture nuageuse.

La compréhension du changement climatique est un sujet de recherche encore ouvert.

On peut rappeler un beau texte de Marcel Conche sur Montaigne : « *Avec les sceptiques, il convient de suspendre son jugement au sujet des choses elles-mêmes et de renoncer à exprimer l'être de quoi que ce soit. Avec les dogmatiques, il faut s'essayer à juger et à vivre de la vie de l'intelligence. On ne sera pas sceptique, car on se formera une opinion et on n'hésitera pas à la donner ; on ne sera pas dogmatique, car on ne prétendra pas exprimer la vérité, mais seulement ce qui, pour nous, à un moment donné, en a l'apparence* ». Un scientifique peut-il faire autre chose qu'adhérer à ces définitions et se situer à égale distance (loin) du scepticisme pur et dur et du dogmatisme ? C'est à dire être pour l'instant « climato-agnostique ».

Tout chercheur doit être ouvert au doute. C'est ce que nous dit Richard Feynman, ce grand physicien, prix Nobel en 1965, qui a écrit des livres remarquables de réflexion sur la science : « *Nous avons trouvé extrêmement important que, de façon à progresser, nous devons reconnaître*

*notre ignorance et laisser la place au doute. Notre liberté de douter est née d'un combat contre l'autorité dans les jours anciens de la science. Ça a été un combat profond et difficile, permettez-nous de questionner et de douter de ne pas être sûr. Je pense qu'il est important que nous n'oublions pas ce combat et ce que nous avons à perdre si nous l'oublions »*

Il y a du travail pour tout le monde, notamment pour tous les chercheurs, et il y en a beaucoup pour les chimistes, aussi bien dans le domaine du climat que dans le domaine de l'énergie, comme le montrent les divers chapitres de cet ouvrage. Il y a quasiment unanimité pour dire que le problème de l'énergie est un problème essentiel. Il est dû à la démographie. Il y a bien d'autres problèmes à résoudre comme la recherche de l'eau potable, des ressources naturelles, le traitement des déchets, la pollution : ce sont les grands problèmes écologiques, pour l'essentiel sans rapport avec le changement climatique mais qui reçoivent étonnamment beaucoup moins d'attention que lui.

Mettre, comme l'a fait l'Environmental Protection Agency américaine, le CO<sub>2</sub> dans la catégorie des polluants n'est pas sérieux. Sans CO<sub>2</sub>, la vie n'existe pas, la photosynthèse n'existe pas. La culture scientifique est une chose importante : elle devrait nous préserver de certaines affirmations hâtives. Il y a besoin, dans ce domaine, comme dans d'autres, de recherche, d'innovation, dans un esprit positif, et donc de débats ouverts et tolérants, loin de tout dogmatisme. En sommes nous préservés ? L'alarmisme exagéré dans lequel nous vivons actuellement est en fait démobilisateur.