

Réchauffement climatique : la question des forçages

En climatologie, on parle de forçage pour désigner les perturbations dans l'équilibre énergétique de la Terre, qui engendrent des changements de températures. Ces forçages sont fluctuants et pourtant déterminants dans l'évaluation et la prévision du réchauffement climatique.

Page 1/11 - Réchauffement climatique : la question des forçages

Dans un dossier sur les prévisions climatiques, paru en septembre 2006, l'auteur faisait le point sur les principales causes d'incertitude dans les projections climatiques, en abordant la question des forçages. Quatre années plus tard, on peut essayer de voir comment les choses ont évolué et, par l'occasion, donner quelques éclaircissements sur les questions qui ont alimenté les controverses.



Quand le système climatique est soumis à des contraintes (ou forçages), il se réchauffe (forçage positif) ou se refroidit (forçage négatif). © DR

Le terme de forçage s'emploie en climatologie pour désigner les perturbations dans l'équilibre énergétique de la Terre, perturbations qui engendrent des changements de températures.

Ce dossier propose un point sur les notions à prendre en compte dans l'étude du réchauffement climatique : le principe du système climatique et de la sensibilité climatique, les forçages par gaz à effet de serre ou aérosols, les forçages naturels (avec les éruptions volcaniques par exemple et le forçage solaire)...

Pour compléter ce dossier, consultez celui consacré au rôle des UV, nuages et rayons cosmiques dans le réchauffement et celui sur les rétroactions.

Page 2/11 - Les différents types de forçage

De façon générale, un forçage est une action qui agit sur (qui force) un système dynamique (océan, atmosphère, activités humaines) et peut perturber son état d'équilibre.



Les éruptions volcaniques font partie des forçages naturels. © Arareko, by nc sa 30

Dans le cas du climat, les forçages sont des perturbations du bilan d'énergie de la planète, c'est-à-dire de son bilan radiatif. Ils sont donc définis au sommet de l'atmosphère (à une altitude non définie mais suffisante pour que la pression atmosphérique soit très faible) et s'expriment en W/m^2 . Le système climatique réagit à ces forçages par des variations de température.

Ces forçages peuvent être naturels ou d'origine humaine.

Les forçages naturels

Parmi les forçages naturels, les plus importants sont :

- les variations de l'ensoleillement, elles mêmes causées soit par des variations de l'intensité du rayonnement émis par le soleil soit par des variations de la distance Terre – Soleil ;
- les éruptions volcaniques qui provoquent des variations de la quantité de rayonnement solaire réfléchi par la planète.

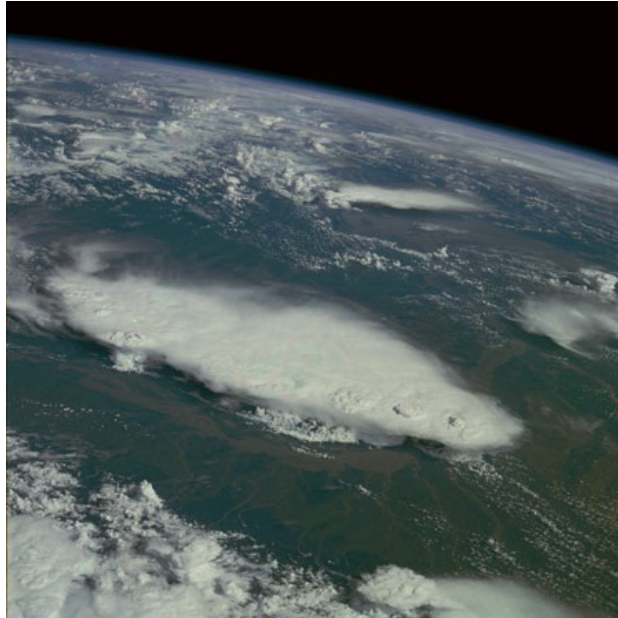
Les forçages anthropiques

Parmi les forçages anthropiques, on trouve :

- les émissions de gaz à effet de serre ;
- les émissions d'aérosols ;
- la déforestation et plus généralement la modification des surfaces végétales.

Page 3/11 - Introduction sur les prévisions climatiques

Le réchauffement climatique est toujours présenté en parallèle à des prévisions climatiques des décennies suivantes, en comparaison avec les températures passées. Quelques précisions sont à donner sur ces prévisions climatiques.



Les inondations gigantesques du Queensland sont une des manifestations de La Niña qui est elle-même une des phases de l'oscillation ENSO (*El Niño, Southern Oscillation*). Les implications de cette oscillation concernent une grande partie des régions subtropicales et au-delà. Elle module en particulier l'intensité de la mousson asiatique. © DR

Précisions sur les prévisions climatiques

Tout d'abord, il faut dire et redire que les prévisions climatiques présentées à ce jour ne cherchent pas à déterminer l'évolution précise des conditions météorologiques ici ou là mais qu'elles ne cherchent qu'à préciser une tendance générale qui sera, bien entendu, modulée par les oscillations internes au système climatique et les forçages naturels.

Cela se traduit par le fait qu'on prévoit un réchauffement de X degrés pour la période 2070-2099 mais pas pour l'année 2099 elle-même car, pour elle, on ne sait pas. La prévision de l'évolution du climat aux échelles de temps inférieures ne fait que commencer, on en verra bientôt les premiers résultats, en particulier lors du prochain rapport du Giec mais on peut déjà s'attendre à une importante dispersion pour une année donnée.

C'est qu'il s'agit de prévoir des phénomènes liés au couplage océan-atmosphère à l'échelle de bassins tels que le Pacifique (*Pacific Decadal Oscillation* par exemple) ou de l'Atlantique (*North Atlantic Oscillation*) alors même que l'on dispose de peu de recul sur ces phénomènes et qu'on les connaît donc mal. Il n'empêche que c'est en marchant qu'on apprend à marcher et que l'intérêt de la chose est à la hauteur des risques : il faut donc le faire et ça sera fait. **Dans ce qui suit, nous en restons aux projections climatiques et nous ne parlerons donc plus des questions relatives aux oscillations.**

Si l'intérêt de la prévision décennale est évident, ne serait-ce que par la possibilité de vérification que cela offre à relativement courte échéance, il n'en reste pas moins que la connaissance des tendances à long terme est essentielle puisqu'elle conditionne d'éventuels comportements adaptatifs (qu'on songe un peu à ce qu'il aurait été nécessaire de faire si la canicule de 2003 s'était déjà renouvelée deux ou trois fois depuis lors !).

Page 4/11 - Le système climatique : interaction et effet de serre

Afin de bien comprendre les difficultés et les enjeux des prévisions climatiques, voyons ici le système climatique dans son ensemble.

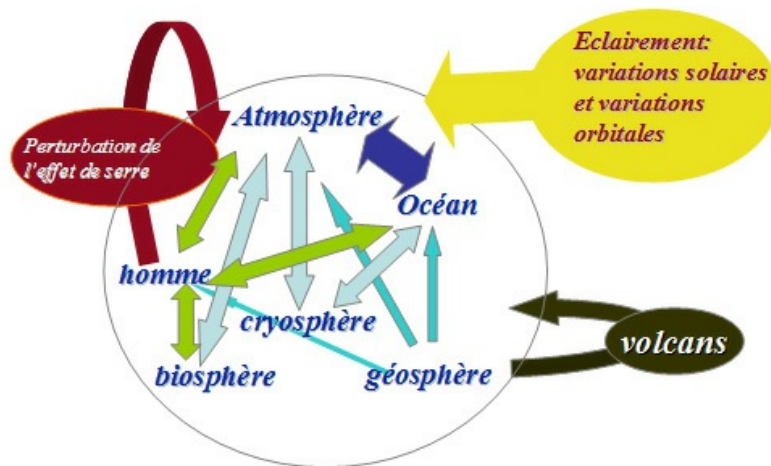


Figure 1. Le système climatique, ses couplages internes et ses contraintes (ou forçages). © Yves Fouquart

Le système climatique et ses interactions

La figure 1 ci-dessous présente le système climatique, c'est évidemment la planète dans son ensemble. On peut en distinguer les différents sous-systèmes comme l'atmosphère, l'océan, la glace, la biosphère et la Terre interne.

Entre ces sous-systèmes se trouvent des interactions plus ou moins fortes (ex : le vent à la surface de la mer qui provoque un brassage de l'eau, l'évaporation à la surface des océans, etc.). Ces interactions sont responsables des oscillations dont on parlait ci-dessus. L'ensemble du système est soumis à des contraintes qui modifient le bilan de l'énergie qui y entre et qui en sort, les variations de l'énergie solaire arrivant sur Terre en sont un exemple évident. Ce sont ces contraintes (ou forçages) qui conditionnent l'évolution générale du climat, comme ce sont des modifications du bilan d'énergie, elles s'expriment en W/m^2 .

Avec un ordinateur et des données climatiques, il est très facile de calculer l'énergie qui est émise par la surface de la planète (continents et océans inclus) dans son ensemble : elle est en moyenne annuelle d'environ $390 W/m^2$. Depuis l'espace, on peut mesurer la quantité qui sort du sommet de l'atmosphère vers l'espace : elle est de $240 W/m^2$.

Principe et rôle de l'effet de serre

L'atmosphère retient la différence et joue donc le rôle d'un isolant efficace. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre, il est dû aux gaz de l'atmosphère dont la molécule est composée de trois atomes et plus (H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 , N_2O) et aux nuages. Son accroissement provoqué par l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 et autres gaz à effet de serre (GES) augmente donc l'isolation de la planète qui perd moins d'énergie. C'est un forçage positif parce qu'il tend à augmenter la quantité d'énergie qui reste dans le système. Ce forçage s'exerce constamment et il s'accroît au cours du temps puisque la concentration de ces gaz est en augmentation.

Puisqu'on sait que la Terre perd moins de chaleur, elle doit se réchauffer. Cette conclusion très simple a été tirée dès les années 1970 quand les premiers résultats des mesures systématiques de la concentration en CO_2 à

Hawaï ont été publiés. La question qui se pose est alors de savoir de combien sera ce réchauffement et à quelle vitesse il arrivera. **Cela pose deux sortes de questions** : quels sont les autres forçages appliqués au système et quelle est la sensibilité de celui-ci ?

Page 5/11 - La sensibilité climatique : les gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre engendrent un forçage radiatif, mais peut-on connaître, par le calcul, l'augmentation de température qu'il entraîne ?



Port Titi (Iac Saint Point). © Yves Fouquart

Le système climatique : un amplificateur

Dans le premier dossier sur les prévisions climatiques, Yves Fouquart a comparé le système climatique à un amplificateur. Pour une concentration donnée en CO₂ et autres GES, on peut calculer le forçage radiatif qui en découle avec une précision raisonnable, de l'ordre de 10%. Pour en déduire l'augmentation de température qui en résulte (**toutes choses égales par ailleurs**), il faut connaître le gain de l'amplificateur ¹¹ sur la figure 1 de ce dossier.

Puisqu'on connaît assez bien l'évolution de la température globale et celle du CO₂ depuis cent-cinquante ans, il est tentant d'en déduire ce gain de façon empirique en divisant tout simplement l'augmentation de température par le forçage du CO₂. C'est tentant, mais ça n'a pas de sens parce que depuis cent-cinquante ans, il y a eu d'autres forçages, certains naturels, d'autres anthropiques, certains positifs, d'autres négatifs. Il faut donc déterminer ces forçages et les ajouter à celui du CO₂.

Les forçages par aérosols

Outre le forçage créé par les GES, l'activité humaine génère un forçage négatif par l'intermédiaire des aérosols. Parmi les forçages naturels, on trouve les variations de l'intensité du rayonnement solaire (*Total Solar Irradiance* ou TSI) et l'influence des volcans.

Page 6/11 - Les aérosols : un autre forçage anthropique

Grâce aux mesures systématiques effectuées depuis la surface (réseau Aeronet) et surtout grâce aux

observations de satellites (instruments Meris, Modis, Polder, etc.) on dispose maintenant d'une climatologie de la répartition des aérosols.

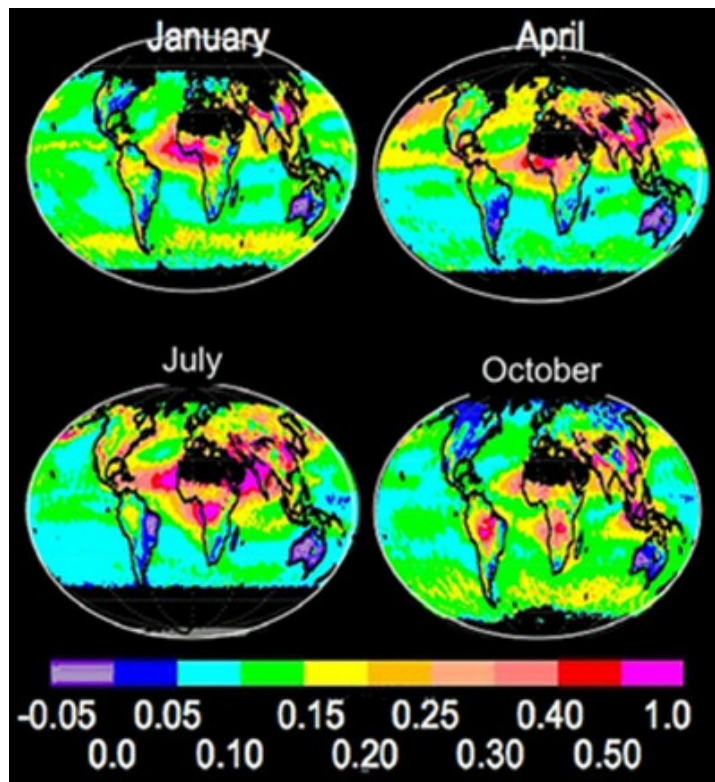


Figure 2. Moyenne sur cinq ans de l'épaisseur optique d'aérosols à 550 nm mesurée par l'instrument Modis pour quatre mois sélectionnés : janvier, avril, juillet et octobre. Les valeurs négatives correspondent à des zones où l'épaisseur optique est si faible qu'elle ne peut être distinguée de zéro. Les zones noires correspondent à des zones où la surface très réfléchissante rend la méthode de détection inapplicable. © J of Geophys Research

Les modèles climatiques

Ces données satellites peuvent être utilisées pour valider et améliorer les modèles climatiques dans la mesure où les aérosols sont de bons traceurs de la circulation atmosphérique moyenne. Certains des modèles qui ont participé aux simulations du climat du XXI^e siècle disposaient de module de transport des aérosols mais les sources étaient imposées. **Le couplage de la chimie de l'atmosphère avec la partie dynamique des modèles se généralise.**

Dans le cas des aérosols d'origine anthropique, il permet de ne plus spécifier les émissions d'aérosols mais de préciser les émissions de leurs précurseurs à partir des consommations de combustibles fossiles. Parmi ceux-ci, le charbon est à la fois le plus abondant et le plus gros émetteur de CO₂ et de polluants divers comme le SO₂ qui s'oxyde et forme des aérosols. Un article récent (Shindell et Faluvegi, 2009) tire avantage de cela pour explorer l'impact du recours massif au charbon. **Les forçages qui sont maintenant précisés dans ce modèle, ce sont les consommations des divers combustibles fossiles dans les grandes régions consommatrices.** Le modèle gère les transformations chimiques et le transport des gaz et des aérosols qui en résultent.



Figure 3. L'aube à Shanghaï. © DR

L'influence des aérosols

La durée de vie des aérosols est courte, de l'ordre de une à deux semaines, ils ne se répartissent donc pas d'une façon plus ou moins homogène comme le font les GES, au contraire ils restent proches des régions sources. L'étude est centrée sur le cas des centrales thermiques. Dans ce cas la combustion est suffisamment complète pour que la part de suie soit très faible et les aérosols ne sont donc pas absorbants. Localement leur effet est donc de réfléchir la lumière du soleil (effet direct) et d'augmenter l'albédo des nuages (effet indirect).

La circulation de l'atmosphère et de l'océan tend à homogénéiser la réponse du système climatique mais très incomplètement, en conséquence les projections font apparaître d'importantes disparités dans les réponses régionales. On sait qu'en Europe et en Amérique du Nord les politiques de lutte contre la pollution, en particulier contre les pluies acides, ont fortement impacté les émissions de SO_2 et donc d'aérosols. Les auteurs envisagent le cas où de telles politiques seraient plus ou moins rapidement mises en place ailleurs et principalement en Chine et en Inde. Actuellement ces politiques antipollution sont presque inexistantes (voir figure 3) mais les conséquences sur les populations locales sont importantes et ces pays, à leur tour, prendront des mesures pour limiter les émissions les plus toxiques sur l'environnement et la population.

Si l'on réduit les émissions, alors cela diminue les quantités d'aérosols émis et puisque ceux-ci ont une durée de vie courte l'effet de cette réduction sur le forçage est immédiat. En conséquence Shindell trouve que si les mesures de lutte contre la pollution ne sont prises que tardivement le recours massif au charbon entraîne d'abord une limitation du réchauffement global et même un refroidissement au voisinage des régions sources, ensuite les GES s'accumulent alors que les aérosols varient au rythme des émissions, leur influence l'emporte de toute manière. Si les mesures de la pollution sont prises très rapidement l'effet retardateur des aérosols est évidemment moindre et la tendance au réchauffement s'affirme plus rapidement partout.

Quantitativement les projections sont sans doute discutables ne serait-ce que parce que les scénarios d'émission le sont eux-mêmes mais, qualitativement, elles sont très logiques et on peut s'attendre à une évolution des températures très différente suivant les régions considérées.

L'évolution du climat du XX^e siècle

Un autre résultat très intéressant de ce travail concerne l'évolution du climat du XX^e siècle. Shindell et Faluvegi, montrent en effet que si l'on tient compte précisément des types de combustibles utilisés (préférentiellement le charbon au XIX^e et au début du XX^e siècle) et des politiques de lutte contre la pollution, on explique fort bien

l'allure générale de l'évolution de la température au XX^e siècle et en particulier le plateau des années 1940 - 1970 suivi par la forte remontée des années 1990. **Cela fait longtemps qu'on soupçonne les aérosols mais c'est la première fois que cela est montré quantitativement à partir de l'inventaire des émissions.** Une des conséquences de ce travail c'est aussi que le relatif ralentissement du réchauffement récent a probablement déjà une part de son explication dans l'industrialisation rapide de la Chine et de l'Inde et le recours massif au charbon.

La question du forçage des aérosols est loin d'être résolue et il n'est pas question ici de considérer que les émissions d'aérosols anthropiques sont LA raison seule et unique de ce plateau. Il est fort possible et même sans doute probable que les causes en soient multiples. La question n'est pas là. Ce que ce travail illustre ainsi, c'est l'importance considérable des émissions d'aérosols et de leurs précurseurs.

Page 7/11 - Forçage naturel : les éruptions volcaniques

L'impact climatique des éruptions volcaniques se fait essentiellement par l'intermédiaire des émissions de SO₂ (dioxyde de soufre) et des aérosols qui en résultent. Encore faut-il que les aérosols se dispersent sur une surface suffisamment grande et perdurent suffisamment longtemps pour renvoyer vers l'espace une quantité significative de la lumière solaire ou, dit autrement, pour augmenter l'albédo pendant assez longtemps. Pour cela, il faut que les émissions atteignent la stratosphère.



Volcan Eyjafjallajökull Island . L'éruption de ce volcan a semé la pagaille dans le transport aérien mais le panache n'a pas atteint la stratosphère et l'influence climatique en est restée très limitée. © Boaworm, Creative Commons Attribution 3.0 Unported license

Le calcul du forçage des éruptions

La figure suivante, adaptée de l'AR4, ch2 présente l'épaisseur optique (en moyenne globale) des aérosols stratosphériques estimée pour les principales éruptions des derniers cent-cinquante ans. Les deux estimations diffèrent par environ 20 à 30 %. À partir de l'épaisseur optique, on peut calculer la perturbation de l'albédo et le forçage radiatif correspondant. Ce forçage avoisine les -3 W/m² pour les éruptions les plus intenses du Krakatau et du Pinatubo. La méthode est forcément approchée mais, dans le cas du Pinatubo, on dispose de mesures directes par méthode d'occultation (SAGE), on connaît alors la distribution spatiale de l'épaisseur optique et sa variation dans le temps, on peut donc ainsi valider la méthode. Dans le cas des éruptions plus faibles d'El Chichon et du Mont Agung, le forçage maximum est de l'ordre de -2 W/m². Il perdure typiquement de un à trois ans.

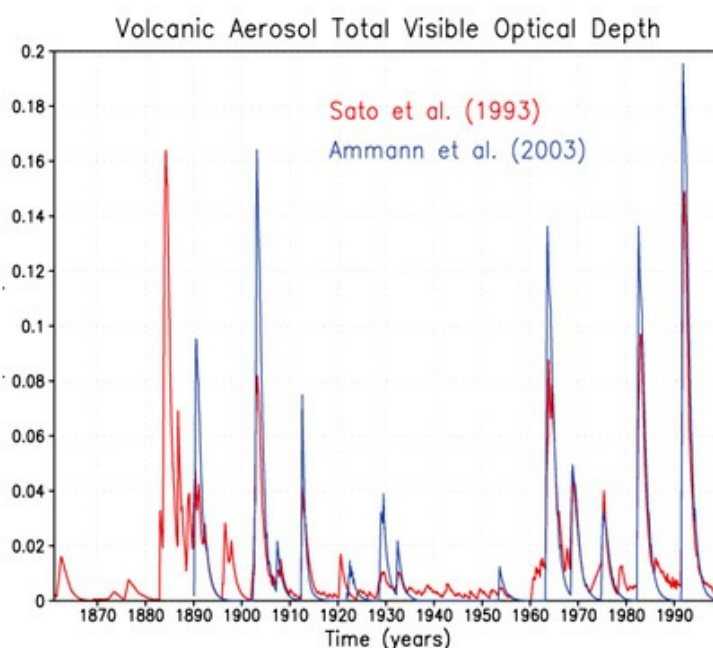


Figure 4. Deux estimations des épaisseurs optiques estimées (à 550 nm) des aérosols stratosphériques produits par les éruptions volcaniques entre 1860 et 2000 d'après IPCC AR4, ch 2. © IPCC (Giec)

L'influence des éruptions volcaniques sur le climat

Ces forçages peuvent avoir une influence notable sur le climat moyen de la planète dans les quelques années qui suivent (voir Figure 5). C'est ainsi que l'année qui a suivi l'éruption du Pinatubo a vu la température moyenne globale diminuer d'un peu plus de 0,2 °C. On pourrait une nouvelle fois être tenté d'en déduire la sensibilité climatique mais il faudrait pouvoir isoler la part des fluctuations chaotiques, celle des oscillations naturelles et tenir compte du temps de réponse du système et de la part de chaleur fournie par l'océan sans compter, évidemment le forçage des GES.

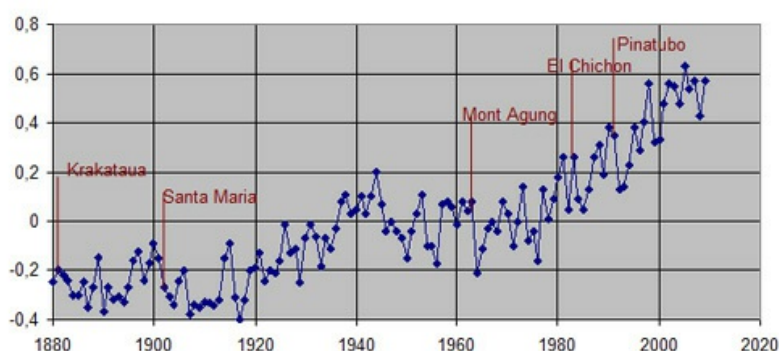


Figure 5. Évolution de la moyenne annuelle de la température globale depuis 1880 et principales éruptions volcaniques (données GISS). © Yves Fouquart

Le rayonnement solaire est peu différent de celui d'un corps noir à 5.800 kelvins. Il est issu de la photosphère du Soleil qui correspond donc à la zone visible. L'irradiance solaire totale (ou TSI) est l'intensité totale du rayonnement solaire reçu par une surface de 1 m^2 , perpendiculaire à la direction du Soleil, au sommet de l'atmosphère. Elle dépend de la température moyenne de la photosphère solaire, du rayon du Soleil et de la distance Terre-Soleil [1].

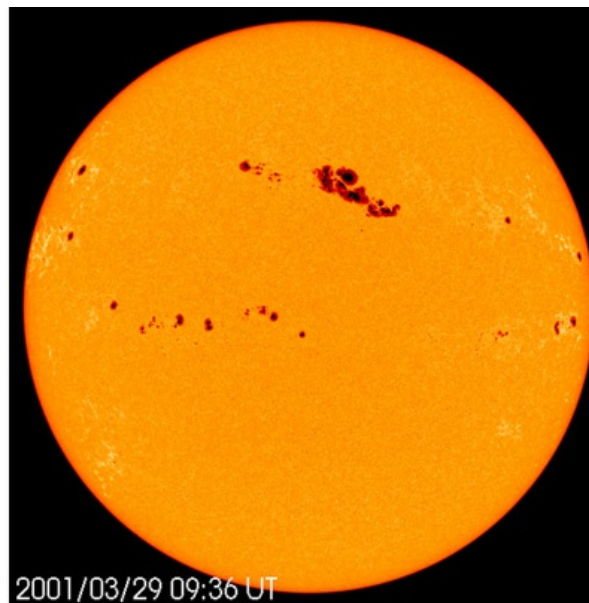


Figure 6. Taches solaires. © Nasa

Mesures de l'irradiance solaire

Les premières tentatives de mesure de la TSI ont commencé dans les années 1830, avec des mesures indépendantes par Claude Pouillet et John Herschel, mais elles étaient près d'un facteur deux trop faibles en raison de l'absorption atmosphérique. Même les mesures depuis des ballons dans les années 1900 manquaient de la précision instrumentale nécessaire pour détecter des changements de l'ordre de 0,1 %. Ce ne fut que lorsque les mesures spatiales ont été disponibles que les changements de TSI ont pu être mesurés et l'idée fausse d'une « constante solaire » a changé. Ces mesures ont démarré avec le lancement du satellite Nimbus 7 en Novembre 1978, bientôt suivi par un radiomètre à cavité (*Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor* : Acrim) sur la mission Solar Maximum et par l'expérience *Earth Radiation Budget Experiment* (Erbe). Puis, les deuxième et troisième instruments Acrim ont été lancés, de même que deux instruments sur la Nasa/Esa *Solar and Heliosphere Observatory* (Soho).

Les divers ensembles de données sont globalement en accord et démontrent de manière concluante que les variations de la TSI suivent le passage des taches sur le disque solaire avec une amplitude d'environ 0,2 %, et que, à long terme, les variations du cycle solaire ne sont que de l'ordre de 0,1 %.

Depuis 2003, l'expérience Sorce (*Solar Radiation and Climate Experiment*) poursuit ces observations avec une meilleure précision, de l'ordre de $\pm 0,01\%$.

Ces différents instruments n'ont pas fonctionné tous en même temps et il existe un désaccord significatif entre eux. Pour mesurer l'irradiance solaire, on utilise des radiomètres à cavité (ou encore dits absolus).

Principes et difficultés des mesures par radiomètres à cavité

Le principe est simple : il s'agit de piéger le rayonnement au sein d'une cavité et de l'absorber, le rayonnement est

alors transformé en chaleur et on détermine la puissance électrique nécessaire pour le maintenir à température constante. C'est simple à dire mais quand on cherche une précision de l'ordre de 0,01 %, il faut que, au minimum, 99,99 % du rayonnement soit absorbé dans la cavité. Puisque le rayonnement non observé est réfléchi, il faut que la réflectance de la cavité à toutes les longueurs d'onde du spectre soit inférieure à 0,0001.

Pour obtenir ce résultat, on dessine la cavité de façon à ce que le rayonnement non absorbé soit réfléchi sur les parois de nombreuses fois avant d'éventuellement sortir. Il n'empêche que la réflectance n'est pas parfaitement nulle. Cela a des conséquences non seulement sur la calibration absolue de l'appareil mais aussi sur l'évolution de celle-ci : il y a dégradation dans le temps car les parois, surtout les plus proches de l'ouverture, sont exposées au rayonnement solaire, y compris à la partie la plus énergétique, au vent solaire et même au rayonnement cosmique.

Dans un premier temps, immédiatement après le lancement, les parois proches de l'ouverture de la cavité sont rapidement attaquées, leurs propriétés d'absorption changent, cela se traduit par une augmentation temporaire de la sensibilité, par la suite, la dégradation entraîne une baisse de la sensibilité dans le temps ce qui se traduit par une apparente diminution de la TSI. Pour y remédier, on a maintenant recours à un second radiomètre qui n'est utilisé que ponctuellement en tant que référence. Il y a donc des corrections à apporter aux mesures. Comme les périodes de fonctionnement des différents instruments ne se recouvrent que partiellement, il faut composer les mesures des différents instruments après leur avoir fait subir ces corrections.

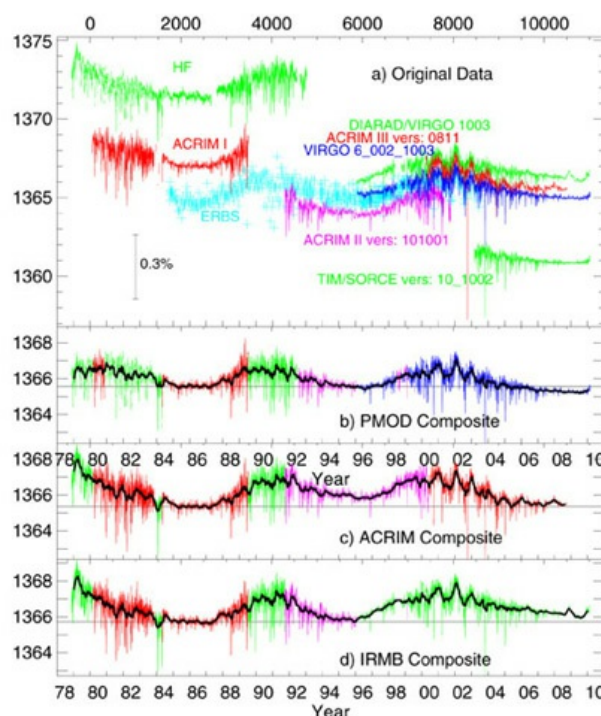


Figure 7. Valeurs moyennes journalières de l'irradiance solaire totale (TSI) mesurée par différents radiomètres et reconstructions composites selon trois sources différentes (voir texte). © pmodwrc.ch

La figure 7 présente les mesures brutes des différents instruments disponibles ainsi que les trois reconstructions qui en ont été dérivées. La différence essentielle réside dans la façon dont on fait la liaison entre les données de Acrim I et Acrim II. Les trois reconstructions utilisent les observations des instruments qui étaient en fonctionnement pendant cette période, c'est-à-dire celles de l'instrument HF (expérience ERB à bord du satellite Nimbus7) et celles de l'expérience Erbe à bord du premier satellite dédié à la mesure du bilan radiatif ERBS. La reconstruction PMOD corrige un problème de pointage connu de l'instrument HF, tandis que celle nommée Acrim n'en tient pas compte.

Cette différence se traduit dans les variations de la TSI entre les deux précédents minimum (86 et 96) : pour Acrim, la TSI augmente de $0,6 \text{ W/m}^2$ alors que pour PMOD, la variation est négligeable. [2]

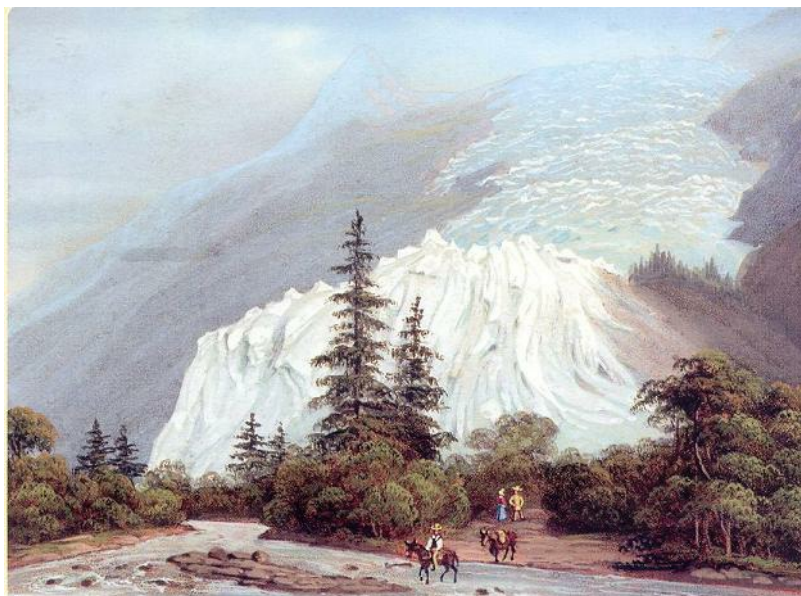
L'approche de PMOD a été validée par des expériences de vieillissement en synchrotron, elle est aussi la seule qui s'accorde avec les mesures du champ magnétique solaire. Le débat n'est pas clos mais PMOD est aussi la seule reconstitution qui montre une variation similaire à celle du nombre de taches solaires (la TSI croît avec le nombre de taches), on peut donc extrapoler.

[1] Notez que, entre la périhélie qui a lieu le 4 janvier et l'aphélie du 4 juillet, la distance au Soleil varie de 3,3 %, ce qui donne une variation de la « constante solaire » de près de 85 W/m^2 , équivalente à un forçage périodique de 15 W/m^2

[2] Cette variation éventuelle est celle de la TSI, pour en déduire le forçage, il faut la multiplier par un facteur $(1-A)/4$ où $A = 0,3$ est l'albédo et le facteur $1/4$ traduit la sphéricité de la Terre. Le forçage serait donc de $0,1 \text{ W/m}^2$.

Page 9/11 - Variabilité de l'irradiance solaire : les variations des taches solaires

Penchons-nous sur le forçage solaire. Les plus anciens relevés des observations télescopiques des taches solaires datent du début XVII^e siècle. Plus avant dans le temps, ce sont les isotopes qui résultent de l'impact des rayons cosmiques comme le Be10 ou le C14 qui sont utilisés. Ces indicateurs (ou proxys) sont calibrés sur les observations récentes. Le problème avec les isotopes, c'est que leur taux de formation dépend aussi des conditions climatiques, ce qui rend leur utilisation délicate.



Glacier des Bossons en 1830. © Domaine public

La question des taches solaires

Le trait le plus marquant de l'évolution de l'activité solaire au cours des derniers siècles est l'absence de taches pendant une grande partie du XVII^e siècle (le minimum de Maunder : MM). Cette époque est située au début du Petit Âge glaciaire et on s'accorde généralement pour attribuer le refroidissement correspondant à ce phénomène. Quel est donc le forçage solaire correspondant ? TSI et taches solaires sont reliés par l'intermédiaire du champ

magnétique solaire dont les taches sont une manifestation. (Lockwood 2002, Wang *et al*, 2005, Kristova *et al*, 2007). Cela permet de fixer une limite supérieure aux variations de la TSI depuis le Petit Âge glaciaire. On obtient ainsi une différence de $1,24 \text{ W/m}^2$ par rapport à la moyenne des deux derniers cycles qui est de $1.365,8 \text{ W/m}^2$. Il y correspond un forçage maximum de $1,24 * 0,7/4 = 0,22 \text{ W/m}^2$. Les valeurs les plus communément admises sont plus proches de $0,1 \text{ W/m}^2$ (GIEC, AR4, ch2).

Un lien entre réchauffement et forçage solaire ?

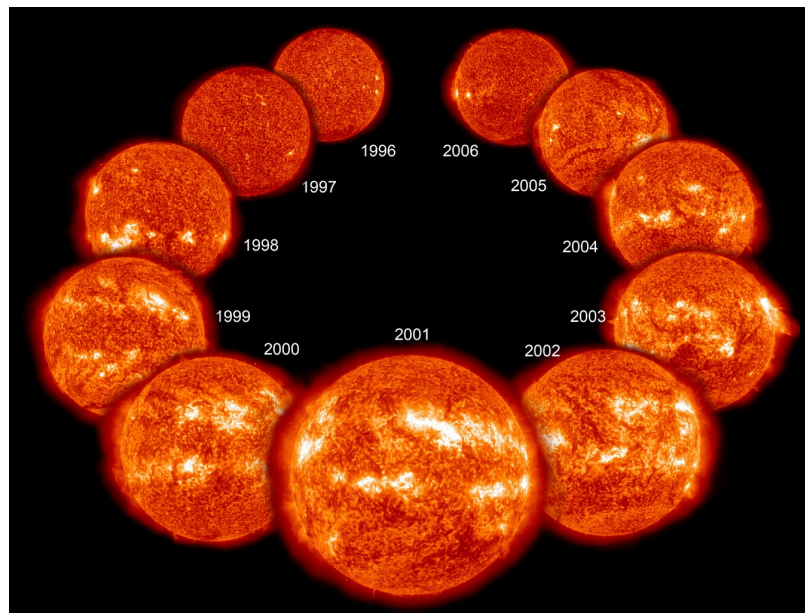
Le forçage solaire est un ordre de grandeur inférieur à celui des GES, pourtant l'idée que le réchauffement climatique actuel est dû au Soleil reste encore fort populaire dans certains milieux. **Pour l'envisager sérieusement, il faudrait trouver :**

- un mécanisme amplificateur (une rétroaction positive) spécifique au rayonnement solaire et qui soit susceptible d'amplifier la réponse initiale par plus d'un facteur 10 (Lockwood, 2010) ;
- simultanément, une rétroaction négative qui ne s'applique qu'aux GES.

Ces deux conditions sont nécessaires si l'on veut que le forçage solaire soit l'élément déterminant comme l'affirment certains. On verra dans la suite quels sont les candidats possibles.

Page 10/11 - Variabilité décennale : les cycles solaires

En plus de ce forçage séculaire, les variations de la TSI lors des cycles solaires exercent un forçage similaire en amplitude mais périodique. Peut-on en détecter l'impact climatique ? Il y a sans doute eu des milliers d'articles publiés ces deux-cent dernières années à propos des réponses climatiques régionales aux variations solaires associées au cycle de onze ans. Ils vont des cycles des inondations du Nil à la sécheresse en Afrique en passant par des séries de températures pour des stations locales ou des ensembles de ces stations.



Cette image montre le Soleil durant les onze ans de son cycle, de 1996 à 2006. Au premier plan, l'image montre le Soleil en 2001, au maximum de son activité. Les phénomènes déterminant ce rythme restent très mal expliqués. © Soho/Esa/Nasa

La question du forçage solaire

Puisque le forçage est global, on s'attend à une réponse globale mais le forçage est faible et la question n'est pas simple :

- le signal du forçage solaire est dégénéré car il est mélangé à d'autres forçages dont la répartition spatiale est souvent peu différente (aérosols volcaniques, GES etc.) ;
- l'évolution temporelle ne se distingue pas systématiquement des oscillations naturelles comme l'Oscillation nord-atlantique (NAO) et elle est affectée par des événements volcaniques (exemples El Chichon en 83 et Pinatubo en 92, tous deux près de la fin d'un maximum solaire).



Satellite Picard. © Cnes

Les réanalyses : l'outil le plus adapté

Le paramètre le mieux adapté pour ce genre d'études n'est évidemment pas non plus la température globale. Bien que la réponse attendue soit globale, elle n'est certainement pas uniforme. Par exemple, une augmentation du rayonnement solaire a tendance à réchauffer la stratosphère plus que la basse atmosphère à cause d'une plus forte absorption des UV. On cherche donc une signature qui s'apparente à une empreinte spatiale.

L'outil le mieux adapté s'appelle les réanalyses. À l'initiative du Programme mondial de recherche sur le climat (WCRP), la NOAA et le CEPMMT (Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme) ont entrepris de refaire l'analyse de l'ensemble des données disponibles avec les schémas les plus récents d'assimilation de données utilisés par les modèles de prévision météorologiques. (NCEP, ERA-40).

L'avantage de cette méthode, c'est qu'elle fournit des champs météorologiques (ex : température, vents, etc.) homogènes sur l'ensemble de la planète et ceci deux fois par jour. Avec ces réanalyses, plusieurs auteurs ont, par exemple, pu mettre en évidence une relation entre des modes de la circulation atmosphérique (ex NAO) et les cycles solaires. Tung et Camp (2008) ont précisément tiré avantage des caractéristiques spatiales de la réponse au cycle solaire en analysant les différences entre les ensembles composites formés par les champs correspondants aux maximum et aux minimum solaires.

Après filtrage de la tendance globale au réchauffement, ils ont identifié un signal climatique d'environ 0,2 kelvins statistiquement attribuable au cycle solaire. Avec un forçage d'environ 0,18 W/m², ils trouvent que ce signal est compatible avec les réponses rapides du système climatique en tenant compte des rétroactions usuelles (albédo, vapeur d'eau, ozone stratosphérique, etc.) et qu'il n'est pas nécessaire d'envisager des mécanismes amplificateurs particuliers, on les examinera pourtant dans un dossier à venir.

Page 11/11 - Pour en savoir plus sur les forçages climatiques

Pour approfondir le sujet des forçages, l'auteur présente une bibliographie à consulter ainsi que son ouvrage collectif.



Le climat est déterminé par un mécanisme complexe. © DR

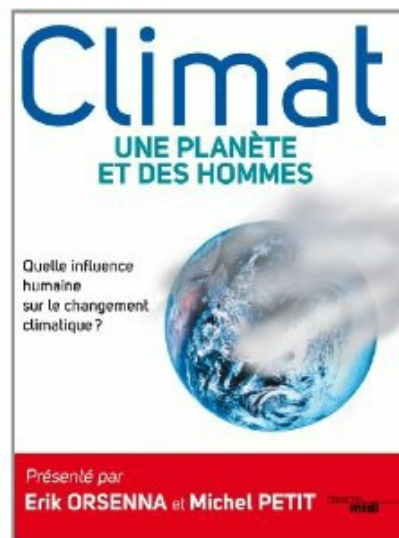
Dans un papier paru depuis la rédaction de ce dossier, la TSI est revue à la baisse : $1.360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$. Pour en arriver à cette révision, les auteurs se sont appuyés sur les observations de l'instrument *Total Irradiance Monitor* (TIM) à bord du satellite *Solar Radiation and Climate Experiment* (Sorce) ainsi que sur de nouvelles calibrations en laboratoire. La cause essentielle de la différence tiendrait à la conception instrumentale de TIM qui permet d'éviter une diffusion parasite de lumière. Cette correction revient à diminuer l'énergie moyenne absorbée de $0,8 \text{ W/m}^2$ mais elle ne modifie pas les variations de la TSI qui restent inférieures à 0,1 % au cours d'un cycle solaire.

Bibliographie

- Réseau Aeronet
- L'instrument Modis
- Lockwood 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 382, 678-687
- Wang *et al*, 2005, *ApJ* 625 522
- Kristova *et al*, 2007 *Astronomy and Astrophysics* 467, 335-346 (2007)
- Lockwood, 2010 *Proc. R. Soc. A* 8 February 2010 vol. 466no. 2114 303-329
- Tung et Camp (2008) , *JGR*, VOL. 113, D05114, 11 PP., 2008

Découvrez le livre de l'auteur

Climat : une planète et des hommes



[Cliquez pour acheter le livre](#)

« Voici le livre que nous étions beaucoup à attendre. Car il répond à la question clé de notre avenir : quelles conséquences les activités humaines ont-elles sur le climat de la Terre ? » Erik Orsenna, de l'Académie française.

Alors que le changement climatique nous concerne tous, la virulence des débats nous étonne. Pourquoi le doute, voire la méfiance, se sont-ils installés face à la réalité du réchauffement climatique et de l'influence des activités humaines sur ce phénomène ? Comment les « climato-sceptiques » sont-ils allés jusqu'à remettre en cause des faits établis et faire passer les chercheurs du Giec pour des imposteurs ? Chacun d'entre nous a besoin d'informations objectives pour se forger sa propre opinion. À l'initiative du Club des argonautes, vingt-six chercheurs français de renom international ont décidé, avec cet ouvrage, de répondre à cette attente légitime.

Ce livre, présenté par Erik Orsenna et Michel Petit, apporte des réponses précises sur les mécanismes complexes qui régissent la Terre et son climat, en s'appuyant sur l'état actuel des connaissances scientifiques. Il dresse un véritable bilan de l'impact des activités humaines sur le changement climatique et de tout ce qu'il est possible de faire pour en limiter l'ampleur. C'est une condition pour, qu'aujourd'hui et demain, les Hommes puissent continuer à vivre sereinement sur leur planète.

Un ouvrage collectif sous la direction de Michel Petit et Aline Chabreuil, avec Pierre Bacher, Édouard Bard, François Barlier, Pierre Bauer, Yves Coppens, Yves Dandonneau, Jean-Pierre Dupuy, Yves Fouquart, Jean-Claude Gall, Alain Gioda, Stéphane Hallegatte, Sylvie Joussaume, Robert Kandel, Jean Labrousse, Michel Lefebvre, Emmanuel Le Roy Ladurie, Hervé Le Treut, Valérie Masson-Delmotte, Sandrine Mathy, Jacques Merle, Serge Planton, Bernard Pouyaud, Gilles Ramstein, Bernard Seguin, Bruno Voituriez.

Avec la participation d'Alain Juppé et de Michel Rocard.

