

Réponse à l'article
"Science du climat : faiblesses et manquements"
écrit par Pascal Iris le 12 février 2024

Frédéric Hourdin, Directeur de Recherche CNRS, LMD/IPSL/SU

20 août 2024

Pascal Iris, ingénieur à la retraite, et 20 ans responsable du réseau d'ingénieurs ARMINES, a écrit un article intitulé "Sciences du climat : faiblesses et manquements" publié sur le site de l'Institut de Recherches Economiques et Fiscales. Cet article utilise beaucoup l'article publié en 2017 dans le Bulletin of the American Meteorological Society et intitulé "The art and Science of climate Model Tuning" dont j'ai coordonné la rédaction. Vous trouverez ci-dessous une réponse que j'ai postée en réaction sur le site du journal ainsi qu'une réponse point par point à l'article.

Réponse postée sur le site

Cher Monsieur,

J'ai lu votre article avec beaucoup d'intérêt, comme celui d'un citoyen ordinaire avec un très grand bagage scientifique essayant de comprendre ce qui se cache derrière ces fameux modèles de climat. Et bien sûr, en tant que scientifique et citoyen, je ne peux que comprendre cette motivation. Vous vous appuyez en particulier pour ce faire sur un article de synthèse d'une conférence dont j'ai coordonné l'écriture. Cet article portait sur la façon dont ces modèles sont réglés et il mettait en avant la part d'incertitude associée à cette modélisation.

Malheureusement, malgré cette incertitude, on peut dire effectivement que "la science a parlé" : l'augmentation des gaz à effet est responsable de l'essentiel du réchauffement global observé, et il n'y a malheureusement pas de paradoxe entre la simplicité de ce lien et la complexité du système climatique. Plus encore : les observations depuis les années 80 sont venues valider a posteriori des simulations réalisées à la fin des années 70 avec les premiers modèles de climat alors que les températures globales n'évoluaient pas à l'époque.

La communauté scientifique n'a jamais caché quoi que ce soit. On peut même dire qu'éclairer la société sur l'impact de l'action de l'homme sur l'évolution du climat en tenant compte de ces sources d'incertitude est la mission fondamentale du Giec.

Enseignant moi-même la modélisation du climat, je vois très bien à quel point il est difficile de faire passer l'idée de cette modélisation hybride, combinant des modèles très établis de mécanique des fluides et des parties beaucoup plus heuristiques. Je conçois aussi facilement que les rapports du Giec soient trop indigestes pour qui souhaite exercer son esprit critique sur ces questions. J'ai donc pris le temps d'écrire une longue réponse à votre article, reprenant point par point le votre, que vous trouverez à cette adresse :

https://web.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PUBLIS/Reponse_a_Pascal_Iris_2024.pdf

En espérant que cet échange vous sera utile, bien cordialement,
Frédéric Hourdin, directeur de recherche au CNRS

Réponse complète

Cher Monsieur,

J'ai lu votre article avec beaucoup d'intérêt, comme celui d'un citoyen ordinaire avec un très grand bagage scientifique essayant de comprendre ce qui se cache derrière ces fameux modèles de climat. Vous avez besoin de cette compréhension pour vous faire votre propre point de vue face à ce que vous ressentez comme une injonction non fondée à un changement radical de politique. Et bien sûr, en tant que scientifique et citoyen, je ne peux que comprendre cette motivation. Vous vous appuyez en particulier pour ce faire sur un article de synthèse d'une conférence sur le réglage des modèles dont j'ai coordonné l'écriture [1]. Cet article plaidait entre autres pour que la communauté communique davantage sur la façon dont ces modèles étaient réglés, et surtout pour qu'elle fasse de cette question une question scientifique à part entière. Dix ans après, le paysage a fondamentalement changé sur ce terrain scientifique. Cet article comme ceux de Gavin Schmidt sur lesquels vous vous appuyez également, mettent l'accent sur les parts d'incertitude liées à la modélisation de ce système complexe, et vous rendez bien compte de ces sources d'incertitudes et du défi que représente la modélisation d'un système tellement complexe. Pour autant, Gavin Schmidt comme moi, en tant que scientifiques, sommes convaincus que ces modèles sont exploitables pour éclairer les changements climatiques consécutifs à l'augmentation des gaz à effet de serre. Cette conviction motive pour une grande part mon investissement dans ces recherches, et c'est probablement le cas pour Gavin Schmidt aussi, ainsi que pour beaucoup de collègues du domaine.

Malheureusement, malgré cette incertitude, effectivement, "la science a parlé" : l'augmentation des gaz à effet est responsable d'une large part du réchauffement global observé. Plus encore : les observations depuis les années 80 sont venues valider a posteriori des simulations réalisées à la fin des années 70 avec les premiers modèles de climat alors que les températures globales n'évoluaient pas à l'époque.

Passant pas mal d'énergie sur la modélisation du climat et son enseignement [2], je suis bien placé pour savoir qu'il serait illusoire de vous convaincre en une page de réponse. Difficile en effet, sans l'avoir pratiqué soi-même, d'appréhender pleinement ce que sont ces modèles de climat et leur potentiel à comprendre et prévoir. Comme d'autres, ces modèles mélangent des parties très bien connues basées sur une traduction numérique d'équations premières de la physique et quelques paramètres relativement bien connus (on peut penser à la conduction dans un solide) avec des modèles plus "heuristiques", en particulier pour passer de cette physique élémentaire à la complexité du "réel" : des modèles de production agricoles basées sur la modélisation de la physiologie d'un brin de blé sensée représenter une diversité de ces brins, modèles résumant l'ensemble de mouvement turbulents dans l'atmosphère, ou un nuage moyen ou "effectif" représentant un ensemble de nuages. Dans ces modèles, certains paramètres sont bien connus (comme la gravité qu'on ne se permet pas de régler dans un modèle de climat), d'autres beaucoup moins. Pour y consacrer beaucoup d'énergie, je sais qu'il est difficile de faire comprendre vraiment ce que sont ces objets hybrides fascinants, apparus finalement assez récemment dans l'histoire des sciences, avec l'arrivée des ordinateurs. Et pourtant je ressens un besoin d'appropriation plus large pour que chacun puisse effectivement exercer son esprit critique. Je ne vois pas d'autre façon de faire que dans un échange plus directe avec la recherche et nous essayons avec des collègues de multiplier les occasions d'associer des citoyens (et parmi eux les étudiants à différents niveaux) comme vous à des moments de recherche ; peut être une des seules façons de combler ce fossé. Autrement il faut faire confiance à une communauté scientifique qui est unanime sur l'essentiel du constat, pas par idéologie mais par la force des faits. Il faut bien réaliser que cette communauté est composée de citoyens comme vous, souvent parents d'enfants comme moi, qui préféreraient nettement que les résultats de leurs recherches dessinent un avenir moins anxiogène.

Ce qui est sans doute un peu plus simple à expliquer, c'est pourquoi il n'y a pas de paradoxe entre la complexité du système climatique et la simplicité du lien entre consommation d'énergie fossile et réchauffement global. En effet, nous sommes face à un enchaînement relativement simple ou au moins robuste. La combustion d'énergie fossile (pétrole et charbon) entraîne inévitablement l'augmentation du CO_2 atmosphérique. Le CO_2 est un gaz à effet de serre et son augmentation

limite les pertes d'énergie par rayonnement infrarouge vers l'espace si les températures ne changent pas (c'est le fameux effet de serre). La température globale va donc s'élever jusqu'à ce que les pertes d'énergies (rendues plus inefficaces par l'augmentation du CO₂) équilibrent à nouveau la source d'énergie provenant du soleil. D'autres effets sont relativement simples et robustes et notamment deux mécanismes d'amplification (ou rétroactions positives) : une atmosphère plus chaude peut contenir davantage de vapeur d'eau, et la vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre également, on a une amplification. Le second est celui de la moindre couverture en neige, banquise et glaciers dans un climat plus chaud. La diminution de ces surfaces très réfléchissantes va renvoyer moins de rayonnement solaire vers l'espace, aboutissant là aussi à une amplification. Au delà de ces "rétroactions" de premier ordre, d'autres effets vont compliquer le paysage et rendre la réponse plus incertaine en amplitude, et en premier lieu l'effet des nuages qui peuvent conduire à la fois à des rétroactions positives ou négatives. Un des grands enjeux de la modélisation du climat depuis les années 80 est de tester l'ensemble de ces processus au sein des modèles climat et d'estimer les incertitudes associées. Et malheureusement, ces sophistications et complexités supplémentaires ne viennent altérer qu'à la marge ces effets de premier d'ordre que sont l'effet direct du CO₂ et de la rétroaction vapeur d'eau.

Contrairement à ce que votre article laisse entendre, ces sources d'incertitude n'ont absolument pas été cachées à la société. Elles sont une des raisons d'être fondamentales de l'énorme effort collectif des rapports du Giec et sont très présentes y compris dans les résumés pour décideurs. Ces rapports dressent tous les sept ans environ un tableau aussi fidèle que possible de l'état des connaissances et de la grande part d'incertitude dans les projections futures, qui est largement documentée dans le résumé pour décideurs. Ce que vous pointez du doigt comme des choses choquantes concernant la "pondération" ou la "démocratie" des modèles ne concerne pas la science à proprement parler (comme vous le notez d'ailleurs) mais bien cette difficile question de l'articulation entre recherche scientifique et éclairage politique, utilisant au mieux les résultats de simulations et autres lignes d'évidence. On peut décider de faire l'autruche et de se dire que l'incertitude de ces modèles est trop grande. Notre conviction de chercheuses et chercheurs du domaine est qu'il serait absurde pour la société de se passer de leur formidable capacité à anticiper et comprendre, malgré ces incertitudes inéluctables ; que la question n'est pas de savoir si oui ou non ils sont exploitables mais d'apprendre à articuler les résultats de cette modélisation et de cette recherche, avec ses incertitudes, dans le débat politique.

Pour ne pas pouvoir donner l'impression de fuir certaines question, je réponds ci-dessous de façon détaillée à chacun des points de l'article.

J'ai pris le temps nécessaire pour écrire cette réponse parce que je crois que, comme le soulignait Hélène Guillemot dans un article de 2014 [3], il est important dans cette période tendue et anxiogène d'essayer de sortir "d'un climat bipolaire" sur les débats sur le changement climatique ; comme dans bien d'autres domaines sans doute.

Bien cordialement,

Frédéric Hourdin

Cette réponse a bénéficié d'une relecture et de retours de Mathieu Hourdin (Ingénieur et étudiant en philosophie), Najda Villefranque (chercheuse en sciences du climat, spécialiste du régalge des modèles), Maëlle Coulon-Decorzens (étudiante en thèse en sciences du climat, spécialiste du réglage des modèles), Gerhard Krinner (chercheur en sciences du climat), Stéphane Blanco (chercheur physicien en sciences pour l'ingénieur et spécialiste de la transition énergétique), Jacques Gautrais (chercheur en biologie), Hélène Guillemot (historienne des Sciences et chercheuses en "Science and technology studies"), Hannah Gautrais (étudiante en thèse sur la sociologie des sciences du climat) et Olivier Blaecke (cinéaste réalisateur).

Réponse point par point

Codes couleurs :

Le contenu intégral de l'article de Pascal Iris.

Les citations données dans l'article de Pascal Iris.

Mes commentaires.

Science du climat : faiblesses et manquements

Un travail bibliographique, portant exclusivement sur les publications de chercheurs spécialisés reconnus par le GIEC, montre que les modèles de simulation climatique qui sont le cœur de la recherche climatique actuelle et les seuls outils susceptibles de fournir des prévisions chiffrées sont en réalité inexploitable.

Aussi surprenant que cela puisse paraître, ce sont les numériciens du climat qui l'écrivent eux-mêmes dans des publications spécialisées qui restent confidentielles faute de relais médiatiques et institutionnels.

Il est exact que les prévisions chiffrées reposent sur des modèles, même si les résultats de simulations sont de plus en plus combinés avec d'autres "lignes d'évidences". Il est faux de dire que les simulations sont inexploitable. En tous cas ni Gavin Schmidt ni moi n'avons à aucun moment laissé entendre ça dans les publications citées dans cet article ou dans nos travaux de recherche. Nous sommes au contraire tous les deux pleinement engagés, au même titre que nombre de collègues, dans nos recherches en modélisation du climat avec comme objectif d'éclairer au mieux l'avenir.

Le présent travail montre qu'en réalité la plus grande incertitude règne en la matière, avec l'incapacité de simuler certains phénomènes atmosphériques dominants (comme les nuages), l'absence de fiabilité des résultats et le caractère contestable de leur exploitation.

Les tournures comptent. "la plus grande incertitude règne" fait un certain effet littéraire. En recherche en sciences du climat, on dira que les projections climatiques sont sujettes à plusieurs sources d'incertitudes qu'il faut prendre en compte et quantifier. Un des grands enjeux politiques est d'être capable de prendre des décisions sur la base de ces modèles incertains. Le Giec fait un travail énorme dans cette interface entre science et politique, essayant de dire ce qui est plus ou moins certain, de quantifier ces incertitudes, etc.

Pourtant ces modèles sont à l'origine de l'équation qui mène aujourd'hui le monde occidental vers la fameuse "neutralité carbone en 2050" qui limiterait la hausse de la température mondiale à environ 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle.

Pour l'auteur, la société est ainsi entraînée sur la pente brutale de la décarbonation généralisée, malgré l'absence d'une information équilibrée sur l'état réel de la recherche scientifique qui fonde les décisions de politique publique.

Je pense, comme l'auteur, extrêmement important que la "société" soit consciente de la réalité de cette recherche; à savoir d'un côté ses incroyables succès et notamment celui d'avoir prédit la trajectoire observée des températures dès la fin des années 1970 comme on peut le voir sur la Fig. 1 tirée de l'encyclopédie Universalis [2]; mais aussi effectivement cette part d'incertitude,

particulièrement forte ici du fait de la complexité du système modélisé ; cette part d'incertitude qui est au cœur des recherches d'une très grande partie de la communauté scientifique concernée. Cette incertitude n'est absolument pas cachée mais je peux comprendre que des gens à la fois très éduqués scientifiquement mais non formés à cette modélisation numérique particulière puissent avoir du mal à se faire leur propre opinion. C'est pour ça que j'ai pris le temps de détailler une réponse point par point en ce qui concerne la modélisation du climat et ces incertitudes.

Une démarche fondée sur la raison critique

Pour qu'il n'y ait aucune ambiguïté, posons en préambule qu'il est clair, pour nous comme pour la très grande majorité de la population, que la protection de l'environnement et l'utilisation sobre et rationnelle de l'énergie sont un enjeu majeur pour l'avenir. Il est également indéniable que la température moyenne de l'atmosphère a augmenté ces 200 dernières années.

Aujourd'hui des décisions drastiques et engageant l'avenir sont prises au motif que la science climatique aurait définitivement statué, science qui aurait « parlé », comme il est commun de l'entendre.

Sur le fond, constater l'élévation de température ces 200 dernières années est une chose (assez complexe en soi), en interpréter la cause en est une autre, et quantifier l'avenir une troisième : la thermodynamique de l'atmosphère n'a malheureusement pas la simplicité de la bille qui tombe sous l'effet de la pesanteur !

L'évaluation des températures sur les 200 dernières années est effectivement complexe en soi, mais elle est relativement bien connue. De plus, l'essentiel du réchauffement a eu lieu depuis la brusque accélération des années 80, après un relatif plateau entre 1960 et 1980, donc dans une période beaucoup mieux observée. Or cette élévation des températures a été prédite par les modèles de climat dès 1980, avant d'être observée (Fig. 1). Comme il est de mise dans les sciences expérimentales, les expériences numériques présentées dans cet article étaient conçues avec un objectif particulier : évaluer le risque que l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère puisse faire croître sensiblement la température moyenne du globe, et entraîner des perturbations problématiques du climat dans différentes régions du globe. Pour ce faire, les chercheurs ont modifié la concentrations en CO_2 dans une simulation par rapport à une autre simulation où la concentration n'était pas changée. A l'époque de ces premières projections, à la fin des années 70s, il n'y avait pas de réchauffement détectable sur les enregistrements de températures. Les observations sont venues valider ces prédictions a posteriori et non le contraire. Tous les scientifiques du domaine savent très bien que d'autres facteurs modulent les fluctuations de la température globale : la variabilité naturelle, la pollution (qui a plutôt un effet refroidissant), éventuellement des changements d'usage des sols. La quantification de ces différents effets et leur modélisation font partie des choses travaillées dans la communauté et intégrées dans les projections climatiques. Malheureusement, il faudrait aller imaginer que la communauté scientifique dans son ensemble a raté quelque chose d'énorme, pour qu'on puisse expliquer les évolutions récentes sans que le CO_2 soit responsable de la plus grande partie du réchauffement. Mais surtout, encore une fois, les choses se sont passées dans l'autre sens : inquiet d'un possible effet de l'augmentation des gaz à effet de serre, des études ont prédit l'effet d'une augmentation de la concentration en gaz à effet de serre sur la température globale dès 1980. L'augmentation observée depuis a donné raison à ces prédictions.

Elle est au contraire d'une extrême complexité, chacun le reconnaît et il y a un paradoxe entre cette complexité admise et la simplicité de « la seule faute au CO_2 ».

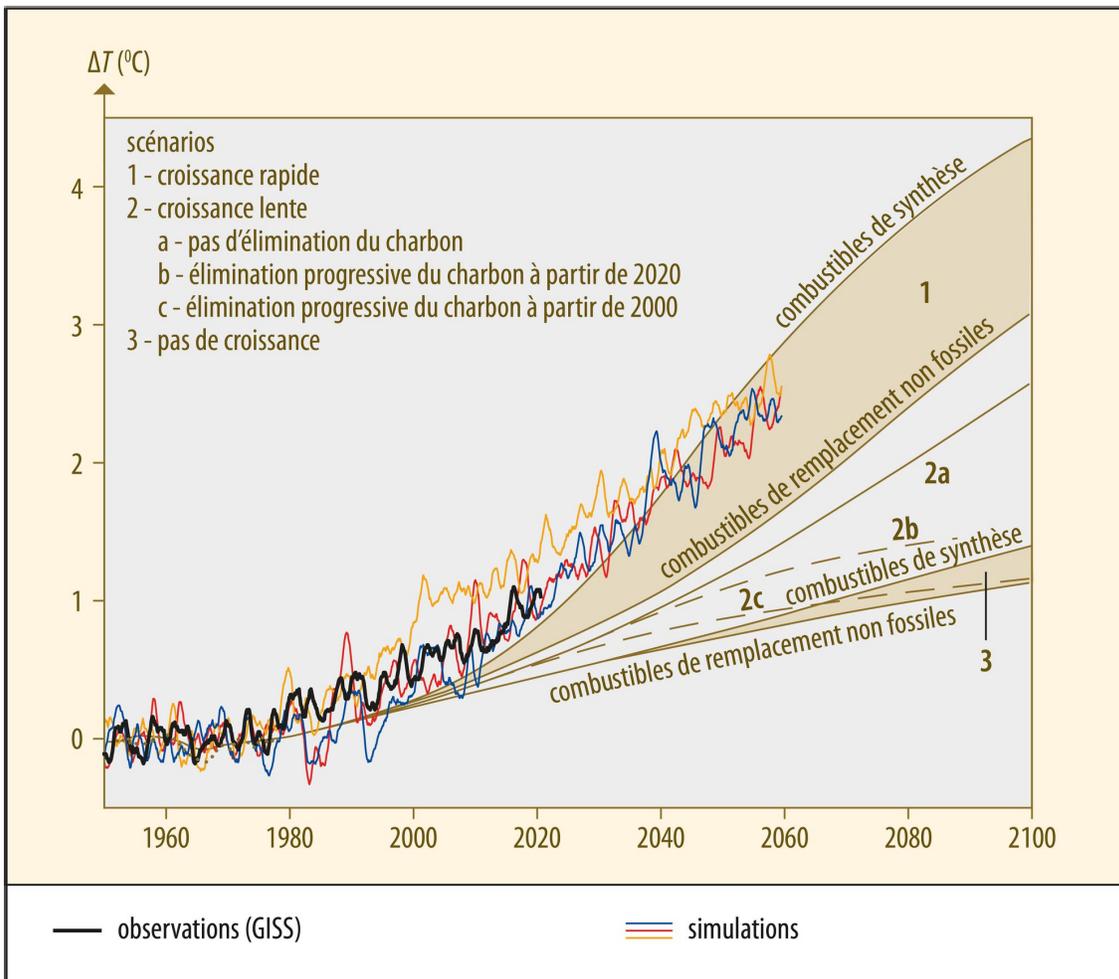


FIGURE 1 – Le réchauffement global prévu dès les années 1980

Cette figure est reproduite du chapitre sur la modélisation du climat de l'encyclopédie Universalis. Cette figure superpose à l'une des premières projections du réchauffement global – réalisée en 1980 par James Hansen et ses collaborateurs – des simulations produites par un modèle de climat actuel (courbes en couleurs) montrant l'évolution de la température globale sous l'effet de l'accroissement des gaz à effet de serre réalisées avec le modèle de l'IPSL. Les courbes de la figure de 1980 correspondent à différentes hypothèses sur le taux de croissance et les sources d'énergie de l'avenir (on prévoyait alors une raréfaction du pétrole et du gaz et leur remplacement par des combustibles de synthèse fossiles ou non fossiles). Le réchauffement n'était pas encore perceptible dans les observations de la température globale en 1980 (petits pointillés marrons à peine visibles), mais on voit que la projection la plus pessimiste d'alors (la courbe qui augmente le plus vite) correspond à peu près à l'évolution réelle observée depuis (courbe noire jusqu'à 2020), ou à celle provenant de calculs réalisés plus récemment (courbes rouge, bleue et orange issues du modèle IPSL-CM du CNRS). Le fait que le réchauffement ait d'abord été prédit avant d'être confirmé par l'observation est une grande source de confiance dans les modèles.

Ni paradoxe ni faute. La question est d'anticiper quelle va être la réponse en température globale et climats régionaux du système à l'augmentation de la concentration de CO₂ notamment. On pourra peut-être parler de faute plus tard si des décisions ont été prises à l'encontre des alertes scientifiques. Même si certains scientifiques tancent la classe politique, exigeant une action plus forte, la prise de conscience est là et une part de réaction. La complexité accroît l'incertitude sur les projections mais ne remet en aucun cas en cause le fait que l'augmentation du CO₂ est le responsable de l'augmentation très rapide de la température du globe depuis les années 80 et surtout que cette élévation de température se continuera tant qu'on n'aura pas réduit drastiquement la consommation de pétrole et de charbon. Et il n'y a pas là de paradoxe pour les raisons expliquées plus haut.

Faisant totalement fi de ce paradoxe, les politiques publiques en la matière se résument désormais à la « décarbonation » de la société tout entière.

Alors, que dit vraiment la science du climat ?

Compte tenu des enjeux, il n'est pas inutile de se poser cette question, si peu abordée tant les choses paraissent certaines et sans appel.

Cette question si peu abordée ? C'est exactement ce dont se chargent les milliers de pages des rapports du Giec, un effort collectif sans précédent dans l'histoire des sciences. Alors leur côté indigeste et la complexité du domaine fait qu'on peut avoir un sentiment d'opacité peut-être. Mais la question est abordée. La communauté y met un effort monumental.

Pour le savoir, un travail bibliographique a été entrepris, EXCLUSIVEMENT fondé sur des publications de scientifiques spécialisés reconnus, par le GIEC en particulier, de façon à éliminer tout biais qui pourrait qualifier la démarche de « climatoseptique ».

La modélisation numérique au cœur de la recherche climatique

Aujourd'hui, la climatologie est un large domaine d'étude et de recherche qui relève de nombreuses disciplines scientifiques distinctes les unes des autres (océanographie, glaciologie, hydrologie, astronomie, géologie, thermodynamique, paléoclimatologie, histoire, analyse numérique, physique du rayonnement, etc.).

Aucune de ces disciplines n'est, à elle seule, capable d'une interprétation globale et encore moins d'une évaluation quantitative.

Les seuls outils susceptibles d'évaluer les températures futures de la planète sont les modèles climatiques de simulation, les plus évolués étant dénommés « modèles climatiques globaux ».

C'est tout à fait ça ; même si le signal observé devient suffisamment fort ces dix ou vingt dernières années pour qu'on puisse commencer à ajouter des contraintes observationnelles à ces prédictions de modèles.

Supposés intégrer l'ensemble des facteurs en jeu, ces outils de simulation sont à l'origine de l'équation du GIEC qui gouverne désormais l'avenir de nos sociétés européennes : neutralité carbone en 2050 = espérance d'une élévation de la température moyenne limitée à 1,5°C en 2100 (par rapport à l'ère préindustrielle).

Si leur rôle est central, quelles sont les capacités réelles de ces modèles ?

Cette question, qui n'est jamais posée publiquement et dont le GIEC ne fait aucunement état dans ses « résumés aux décideurs », mérite pourtant de l'être.

Le résumé aux décideurs a un rôle d'interface entre la synthèse scientifique faite dans les rapports du Giec et le monde "politique"¹. L'idée est d'établir un consensus sur cette synthèse pour que les faits scientifiques ne soient pas systématiquement remis en cause ensuite dans les négociations entre états, ou au sein des assemblées nationales, ou autre. Justement, du fait de la complexité de cette science, l'idée est de faire d'abord un énorme effort de synthèse des recherches récentes sur le sujet, puis d'en faire un résumé pour l'interface avec le politique. Peut-être qu'un revers de la médaille est que le "politique" est de ce fait un peu coupé du contenu de la science. Je serais assez d'accord pour regretter que les sources d'incertitudes ne soient pas explicitement résumées dans ce résumé. Mais tous les résultats sont affichés avec un degré de confiance qui est lié pour une grande part à la confiance dans les simulations du changement climatique. Donc cette question de l'incertitude des modèles n'est pas visible explicitement sans doute dans le résumé, mais elle y prend implicitement une très grande place.

La modélisation du climat est par ailleurs une discipline qui présente la particularité d'être hyper spécialisée, extrêmement complexe et surtout quasi confidentielle parce que les numériciens du climat représentent une infime minorité de chercheurs étiquetés « spécialistes du climat ».

C'est effectivement en partie une réalité et nous sommes un certain nombre à nous en alarmer. Il y a une bonne dizaine d'années, Christian Jakob, chercheur reconnu du domaine, présentait les modélisateurs du climat comme une espèce en voie de disparition et une conférence à Caltech (Californie) avait fait une large place à cette question. Mais cette hyper spécialisation n'est pas forcément une fatalité. Nous sommes un certains nombre de collègues convaincus de l'importance de diffuser à la fois dans la communauté et beaucoup plus largement une appropriation de ce qu'est cette modélisation. C'est par exemple dans cet esprit en partie que j'ai écrit un chapitre d'une trentaine de pages sur la modélisation du climat avec Hélène Guillemot dans l'Encyclopédie Universalis[2]

Elle est de ce fait quasi inaccessible, y compris aux autres scientifiques et c'est là un second paradoxe, loin d'être négligeable vu l'importance stratégique de la discipline.

Un paradoxe en quel sens? Que ce soit aussi important et aussi peu partagé? J'y vois surtout un formidable défi. On a beau y consacrer de l'énergie, on ne sait pas trop ce qui est possible/utile. A titre personnel, je suis tiraillé au quotidien entre la part de mon activité que je consacre d'un côté à la transmission sur ces questions (par exemple en enseignant, en formant des jeunes chercheuses et chercheurs des sciences du climat ou de disciplines connexes à la modélisation du climat, en écrivant des textes comme celui d'Universalis, ou encore en écrivant cette réponse) et de l'autre à faire avancer la recherche sur ces aspects plus spécialisés et techniques, pour améliorer les modèles, mieux quantifier leurs incertitudes et aider à l'anticipation des changements à venir et à l'éclairage des décisions à prendre.

La question du «réglage» des modèles climatiques

Un modèle, c'est la représentation virtuelle et discrétisée d'un domaine au sein duquel se développent des phénomènes physiques que l'on formalise par des équations, dont on estime certains paramètres directs non mesurables et qu'on borne par des conditions spécifiques aux limites du domaine.

1. J'ai personnellement beaucoup de mal avec ce mot de "décideur" sauf à y voir, en démocratie, le peuple

Qualité des « équations », « conditions aux limites » et « réglage » des paramètres directeurs sont les facteurs clefs de toute simulation numérique.

Des incertitudes peuvent concerner ces trois éléments mais le plus critique, quand il s'agit de modéliser la géosphère (c'est-à-dire les milieux naturels), est l'estimation des paramètres directeurs des équations, dénommée souvent « calage » ou « réglage » du modèle. On le fait en ajustant les résultats de calcul sur des historiques pertinents de données, quand ils existent, ou bien on les estime comme on peut.

Tout ça est assez exact. Peut être le seul bémol mais qui mettrait plutôt de l'eau au moulin du doute porté par Pascal Iris : les équations elles-mêmes sont très incertaines. Sans doute tout autant que les paramètres. Les équations de la physique à la base de ces modèles sont bien connues (Navier Stokes, principes de la thermodynamique, équations du transfert radiatif par exemple). Mais dans la "maille" d'un modèle de climat, on est obligé de représenter un ensemble de nuages sans les décrire individuellement. Les "paramétrisations" développées pour les représenter sont donc un mélange de ces premiers principes et d'une connaissance de l'émergence de propriétés propre à l'ensemble de nuages, à leur organisation, à leur interaction avec le rayonnement. Ce travail sur les paramétrisations est pour moi un des aspects les plus fascinants des sciences du climat. Il est un endroit assez unique pour comprendre les couplages entre ce qui se joue à l'échelle des processus turbulents et nuageux et l'organisation de la circulation de l'air sur le globe. Face à cette complexité bien réelle, la communauté scientifique des physiciens du climat a multiplié les propositions de nouveaux modèles, les campagnes d'observations pour les confirmer, l'envoi de satellites dédiés, les méthodologie de validation des modèles à toutes échelles de temps et d'espace.

Le réglage est par conséquent un acte essentiel et délicat, consubstantiel à la modélisation elle-même. Les résultats de calcul y sont très sensibles et les paramètres non mesurables sont un des talons d'Achille de la modélisation des milieux naturels, tous les numériciens le savent et ont à gérer ce sujet. Cela fait partie de leur « art » qui ne relève en aucun cas du « presse bouton ».

Oui. Pourquoi "talon d'Achille" ? Je ne sais pas. Mais un acte essentiel et délicat sans aucun doute et c'était l'objet de la conférence synthétisée dans la première publication citée par Pascal Iris.

Un résultat de modélisation doit par conséquent s'accompagner d'une notice sur ces paramètres, les hypothèses qu'ils contiennent et l'incertitude qu'ils produisent sur les résultats de calcul.

Oui. En théorie il faut faire tout ça. Et les configurations des modèles mises en jeu dans les simulations du projet C mip (Coupled Model Intercomparison project) qui servent de base aux projections mises en avant dans les rapports du Giec, font systématiquement l'objet de nombreuses publications documentant leur contenu physique, les hypothèses faites, les qualités et défauts des simulations. Pour le modèle de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) dont je coordonne la partie atmosphérique, on peut citer à titre d'exemple [4, 5] parmi la dizaine de publications concernant ce modèle en particulier. Quant à la documentation de l'incertitude paramétrique (liée au choix du réglage des paramètres libres) elle reste très difficile du fait notamment de la complexité même des modèles et du coût de chaque simulation. Mais l'arrivée de méthodes de calibration automatique est en train de nous aider en ce sens.

Dans le cadre d'une étude d'inter comparaison des modèles à l'échelle internationale reconnue par le GIEC, un article collectif publié en 2017 sous la direction de F. Hourdin du laboratoire de météorologie dynamique (CNRS - Université Pierre et Marie Curie) (1) constate la très faible prise en compte de la question du « réglage » des modèles et regrette explicitement que le GIEC ne s'y intéresse pas. L'opacité sur le sujet est signalée par les auteurs qui y voient une lacune importante. Ils appellent explicitement à plus de transparence.

C'est un détail sans conséquence sur l'analyse de Pascal Iris, mais cet article n'a pas été publié dans une étude d'inter-comparaison. Il s'agit de la synthèse d'un colloque international que nous avons organisé en 2014 sur le sujet avec un collègue, Torsten Mauritsen. Cette réunion était motivée pour nous deux par le fait que nous trouvions que la question du réglage des paramètres des modèles n'était pas suffisamment discutée comme un sujet scientifique à part entière, un enjeu de recherche. Dans cet article nous tentions de dresser un paysage des pratiques, de proposer des pistes de recherche pour la suite, et nous tentions également de comprendre pourquoi cette question n'était pas davantage discutée dans les publications scientifiques à l'époque (et de ce fait dans les rapports du Giec qui ne sont qu'une synthèse de ces publications). On peut considérer qu'il s'agissait en partie d'un manquement de la communauté. Mais aussi en partie d'un moment de l'histoire des modèles. Un moment où l'arrivée à maturité des modèles eux-mêmes (à la fois en termes de contenu physique et de code informatiques) et les capacités accrues des calculateurs (permettant de multiplier des simulations de réglages) permettaient de se pencher plus sérieusement sur cette question. Dix ans après le workshop en question, on peut dire que cette question est devenue centrale dans la communauté et des outils d'apprentissage machine ont été développés pour automatiser et objectiver ce réglage [6]. Et encore une fois (malheureusement), tout ça ne change rien à l'ordre de grandeur du réchauffement induit par une augmentation des gaz à effet de serre.

Le papier est très honnête, très direct et en même temps édifiant compte tenu de l'importance du sujet. Je cite :

« Il existe une subjectivité dans le réglage du modèle climatique [...] il est souvent ignoré lors des discussions sur les performances des modèles climatiques dans les analyses multimodèles [...] Pourquoi un tel manque de transparence ?

Effectivement nous pouvions ressentir un relatif manque de transparence à l'époque. Il est beaucoup moins vrai aujourd'hui. En revanche, une chose ne changera pas : la part de subjectivité du réglage des modèles. Comme tout modèle, les modèles de climat sont par essence imparfaits. On peut donc privilégier certains aspects plutôt que d'autres dans le réglage. Cet aspect est largement explicité dans cet article. Ces modèles de climat sont des objets un peu particuliers sur un point : ils visent à représenter aussi correctement que possible le climat observé dans toutes les régions du globe, depuis les climats polaires jusqu'aux lignes de grains au Sahel.

« Cela est peut-être dû au fait que le réglage est souvent considéré comme un élément inévitable mais sale de la modélisation du climat [...] un acte de rafistolage qui ne mérite pas d'être écrit dans la littérature scientifique [...]

Une des pistes qu'on évoquait pour essayer de comprendre ce que nous ressentions comme une insuffisance de la communauté à l'époque. L'article ne validait absolument pas cette vision des choses.

« Le réglage peut en effet être considéré comme un moyen inracontable de compenser les erreurs de modèle. »

La dernière phrase est un peu sortie de son contexte. On essayait clairement à cet endroit là d'expliquer pourquoi la crainte des discours climato-sceptiques (parfois au plus haut niveau des états) avait pu contribuer à moins faire de publicité pour ce réglage (et à titre personnel je voyais déjà ça comme une mauvaise raison, si ça en a jamais été une). Les deux phrases bout à bout : *On peut également craindre que le fait d'expliquer que les modèles sont réglés ne renforce les arguments de ceux qui remettent en cause la validité des projections relatives au changement climatique. Le réglage peut en effet être vu comme un moyen inavouable de compenser les erreurs*

*des modèles.*² Et encore une fois, tous le sujet de l'article était un plaidoyer pour sortir de cette situation et pour expliquer que ce réglage ne devait pas être pris comme de la cuisine mais comme une étape absolument essentielle de la modélisation.

Au-delà de sa clarté, ce propos direct illustre parfaitement une lacune méthodologique majeure, car l'exploitation des résultats s'exonère manifestement de toute documentation sur les hypothèses de calcul, sur les conditions de réglage, sur la sensibilité des résultats aux paramètres, etc. toutes choses élémentaires et encore une fois consubstantielles à la simulation elle-même. Un jury de thèse demanderait systématiquement ces éléments à un doctorant présentant des résultats de calcul. Cette situation n'est par conséquent pas conforme aux « règles de l'art » et les spécialistes la dénoncent à juste titre.

Il faut bien comprendre qu'une simulation climatique peut mobiliser une fraction significative d'un ordinateur pendant plusieurs semaines ou mois. On ne peut pas les multiplier à l'infini. On se donne de plus en plus les moyens d'explorer cette sensibilité un peu systématiquement comme on l'explique dans un article récent dans la revue américaine *Science Advances* [6]. Donc non : la communauté ne s'exonère pas. Donc oui. On peut toujours dire qu'elle ne respectait pas ces "règles de l'art" théoriques. Comme toute communauté elle est à l'état de l'art de la recherche à un moment de l'histoire des sciences. Elle était et elle est toujours au travail sur ces questions, consciente des difficultés et des enjeux.

Mais les auteurs vont plus loin, je cite : « **Vingt-deux groupes sur 23 ont signalé avoir ajusté les paramètres du modèle pour obtenir les propriétés souhaitées, en particulier à la partie haute de l'atmosphère.** »

Ca serait trop long à expliquer et l'article [1] cité par l'auteur tente d'expliquer ça en particulier : on parle là d'un réglage absolument indispensable des flux au sommet de l'atmosphère. 23 modèles ont signalé qu'ils le faisaient parce que tous les modèles doivent faire ça d'une façon ou d'une autre. Et le réglage s'il est bien compris est absolument essentiel. Celui là en particulier pour les modèles de climat.

Cette phrase ne peut que susciter davantage d'interrogations : suggèrerait-elle que cette opacité permettrait de régler les modèles pour obtenir les résultats souhaités ?

Oui. Quand on règle les paramètres du modèle par rapport à une cible, c'est pour s'approcher de cette cible ; donc effectivement pour obtenir un résultat souhaité. Quoi d'autre ? Mais beaucoup de propriétés du climat simulées ne sont pas réglées. Il faut comprendre que c'est le fait que le modèle soit entièrement basé sur la physique qu'il fait qu'il est capable de simuler simultanément le climat en tous les points du globe et à toutes les saisons. Il y a infiniment plus de degrés de liberté dans les cibles possibles de réglage du modèle que de paramètres réglés. Le réglage de quelques dizaines de paramètres ne permettra jamais de régler tous les aspects d'un modèle de climat.

A la recherche des résultats attendus

2. En anglais *There may also be some concern that explaining that models are tuned, may strengthen the arguments of those claiming to question the validity of climate change projections. Tuning may be seen indeed as an unspeakable way to compensate for model errors.*

En creusant davantage, on découvre que tel est bien le cas, au moins dans un cas publié : un modèle, mis en œuvre en 2019 au sein de l'Institut Max Planck de climatologie en Allemagne [2], conduisait à une sensibilité climatique à l'équilibre (ECS) de 7°C jugée irréaliste (la sensibilité climatique est la variation de la température mondiale estimée pour un doublement du CO₂ par rapport à l'ère préindustrielle). On comprend qu'un paramètre de réglage de la convection atmosphérique a été multiplié par 10 par rapport à la valeur initialement estimée, pour corriger la chose et aboutir à une sensibilité considérée comme plus acceptable de 3°C... Je cite :

« [...] nous avons décidé de viser une sensibilité climatique d'équilibre d'environ 3 °C. La réduction de la sensibilité du modèle a été principalement obtenue en augmentant le taux d'entraînement pour une convection peu profonde d'un facteur 10 [...] dans le but de réduire la rétroaction des nuages tropicaux de basse altitude. »

Cet épisode mérite qu'on s'y attarde. Il se trouve que l'auteur de cette étude est Torsten Mauritsen avec qui j'avais organisé la conférence sur le réglage des modèles. Il avait à l'époque jeté un pavé dans la marre en remettant en cause un paradigme qui sans être forcément complètement explicite, était largement partagé dans la communauté. Jusqu'alors il y avait l'idée que les modèles de climat étaient développés sur une base aussi physique que possible, et que si, sur cette base physique, on représentait bien le climat présent, alors on représenterait bien son évolution. Il s'agit en partie d'un pari. Rien n'est garanti. Donc le paradigme était évidemment plus fin. La communauté a par exemple identifié des mécanismes (nuageux par exemple) qu'elle pensait importants pour la sensibilité climatique et à insisté sur le fait de vérifier et garantir dans les modèles une bonne représentation physique de ces mécanismes. Une fois ce modèle existant il était ajusté d'une façon ou d'une autre. Et il y avait l'idée que cet ajustement aussi se faisait sur un climat présent. On effectue alors une simulation dite de contrôle sans changer la concentration en CO₂ et une simulation dans laquelle on impose une évolution du CO₂ (ou les flux de CO₂ si le modèle physique inclut son cycle). Cette façon de faire a été essentielle pour démontrer que l'augmentation des gaz à effet de serre allait faire croître de façon significative la température globale, et que cette augmentation permettait d'expliquer en grande partie l'évolution récente de cette température (surtout à partir des années 90 puisqu'on était sur un plateau dans les années 70). Mais si cette démonstration est faite (ce que refuse Pascal Iris), alors on peut vouloir régler le modèle y compris sur la vitesse d'augmentation des dernières décennies et pas seulement sur le climat présent (ou régler la sensibilité comme l'avait fait Torsten Mauritsen mais c'est l'équivalent), afin de produire les meilleures simulations possibles du futur, pour éclairer au mieux les politiques de mitigation et d'adaptation. Il se trouve que pour un certain nombre de raisons discutées dans l'article [1], liées notamment aux incertitudes introduites par la variabilité interne et la modélisation de la pollution qui a masqué sans doute en partie le réchauffement dans les années 70, certains scientifiques dont je fais partie pense qu'il est prématuré de faire ça. Mais les deux positions se défendent.

On ne peut que s'interroger sur la pertinence de ce « réglage » de circonstance : pourquoi multiplier par 10 le paramètre jugé correct initialement, pourquoi pas 5, 20 ou 50... ?

C'est une excellente question. Ça dépend beaucoup du paramètre. Si c'est une taille effective de gouttes d'eau nuageuse par exemple, un facteur 10 est un peu grand. Mais certains paramètres sont vraiment très incertains. Par exemple des paramètres contrôlant le mélange entre l'intérieur et l'extérieur des nuages. Ces échanges passent par tout un tas de mouvements turbulents ou convectifs (dans le jargon de la météorologie et du climat des mouvements à forte composante verticale). Pour certains paramètres, un changement de 20% va être plus suspect qu'un changement d'un facteur 10 sur un autre. Par exemple, on ne se permet pas de jouer avec la valeur de la gravité.

Quel est le sens physique d'un tel réglage ?

C'est une vraie belle question de recherche qui s'est très largement ouverte depuis quelques années avec l'arrivée de méthodes d'apprentissage machine pour explorer la sensibilité aux pa-

ramètres et régler les modèles.

Cette question précise est essentielle car si l'on n'est pas capable de clarifier le sens physique d'un réglage, le modèle perd totalement de son intérêt et de sa pertinence : il fait l'objet d'un ajustement opportuniste sans nécessaire cohérence avec la physique des phénomènes simulés.

Non seulement on essaie de donner du sens mais en plus on a mis en place dans la communauté et depuis des décennies tout un tas de méthodologies pour permettre de vérifier qu'un bon réglage n'était pas obtenu par exemple en détériorant la représentation physique des processus nuageux. On fait par exemple recours de façon massive à l'utilisation de simulations numériques dites LES (Large Eddy Simulations ou Simulations des grands tourbillons) qui avec des mailles de quelques dizaines de mètres résolvent explicitement les mouvements au sein de chaque nuage. On utilise ses simulations pour comprendre le fonctionnement, en proposer des paramétrisations pour les modèles de climat, les évaluer à l'échelle d'une scène nuageuse et enfin effectuer un réglage à l'échelle de ces processus.

L'article n'en parle pas alors que c'est un des pièges bien connu du réglage ; on peut faire l'analogie (également bien connue des statisticiens) avec les corrélations sans cause.

Ce piège n'en n'est pas vraiment un parce que c'est avant tout la physique qui détermine le comportement du modèle.

Ce réglage montre simplement que, toute chose étant égale par ailleurs et en particulier à effet de serre donné, la mécanique interne de l'atmosphère, en l'occurrence la convection des nuages, a un impact considérable sur la température.

Pour le coup, c'est un sujet hyper identifié et travaillé depuis longtemps et discuté dans tous les rapports du Giec. La représentation de la convection et des nuages dans ces modèles de climat sont une des plus grosses sources d'incertitude dans les projections climatiques, pour une trajectoire donnée d'évolution du CO₂ par exemple. Cette source d'incertitude est largement documentée dans les rapports du Giec.

La mise en évidence de l'influence d'un tel « mécanisme interne » ne manque pas d'intérêt, à l'inverse de la température qui, calculée dans ces conditions, n'en présente aucun.

Je n'ai pas tout à fait compris.

Tout cela pose question et c'est un euphémisme.

Tout cela pose effectivement pleins de questions identifiées depuis longtemps dans la communauté et qui font fait l'objet de nombreuses recherches.

Des objets de recherche incertains.

En 2020, F. Hourdin et son équipe précisent la problématique à gérer et les modalités d'amélioration de leur modèle [3]. Je cite :

« [...] Il est communément admis qu'une grande partie de l'incertitude dans les projections futures du changement climatique avec les modèles climatiques mondiaux provient de la représentation de processus physiques non résolus par ce qu'on appelle

des paramétrisations, et en particulier des paramétrisations de la turbulence, de la convection et des nuages. Les mêmes paramétrisations sont également responsables d'erreurs importantes, qui persistent dans la représentation du climat actuel avec les modèles globaux.

« [...] L'amélioration des modèles numériques globaux est essentielle pour l'anticipation des changements climatiques futurs.

« [...] Les améliorations sont basées sur des changements significatifs du contenu physique ainsi que sur une stratégie de réglage mieux contrôlée. »

Cette analyse confirme sans ambiguïté ce qui est évoqué plus haut, à savoir le champ considérable des inconnues et des insuffisances.

La qualité des équations est problématique puisque la physique de bon nombre de phénomènes n'est pas formulable explicitement, comme les nuages qui jouent un rôle majeur et variable selon leur configuration et leur extension.

Cette publication confirme que les modèles climatiques, sur lesquels tout repose, sont en fait eux-mêmes des objets de recherche, encore peu avancée compte tenu de la difficulté et de la complexité du sujet.

Pourquoi "insuffisante", "peu avancée" ? Effectivement se sont des objets de recherche. Mais je parlerais plutôt d'objets de recherches multiples et incroyablement avancées sur un système particulièrement complexe. On utilise par exemple de façon massive des simulations dites LES (Large Eddy Simulations), avec des mailles d'une dizaine de mètres, qui permettent de représenter le détail du mouvement dans chaque nuage d'une scène de cumulus par exemple. On utilise ensuite ces simulations pour comprendre le fonctionnement collectif des nuages et en proposer des paramétrisations mises en œuvre dans les modèles globaux de climat (cf. Fig.5 [2]).

A l'évidence ce ne sont pas des outils numériques d'ingénierie prédictive, comme les modèles de calcul de structure ou de calcul thermique par exemple : dans ces deux cas, les équations sont connues et les paramètres mesurables par voie expérimentale ; il ne s'agit pas de simuler le milieu naturel.

Je ne connaissais pas cette distinction entre outils numériques d'ingénierie prédictive et simulation des milieux naturels ; mais je veux bien admettre deux niveaux de complexité différents. En tous cas les succès énormes des modèles de circulation générale pour prédire le temps à quelques jours (les prévisions du temps sont faites avec les mêmes modèles utilisés différemment) ou pour l'anticipation de l'augmentation des températures depuis un siècle, avant qu'elle soit observée, leur confèrent certainement une qualité prédictive³. Comme les modèles qui pendant la Covid permettaient de programmer plusieurs semaines à l'avance l'évolution des vagues de la pandémie malgré leur part d'incertitude.⁴

En d'autres termes, le domaine du calcul climatique relève clairement de la « recherche » avec par essence ses incertitudes, ses inconnues et ses obstacles. . . à ne pas confondre avec la « science », c'est-à-dire un corpus de connaissances établies, fondées sur la théorie et l'expérience.

Je veux bien admettre cette distinction entre recherche et science, ou entre "recherche scientifique" et "science établie". Et oui. Tout à fait. Sur cette question comme sur beaucoup de questions

3. Même si la communauté préfère dans ce cas parler de projections pour ne pas surprendre ce caractère prédictif, du fait notamment des grandes incertitudes.

4. Il est d'ailleurs intéressant de noter que ces modèles permettaient aux hôpitaux de programmer la gestion des lits et services plusieurs semaines à l'avance alors que le pouvoir politique semblait toujours prendre ses décisions avec un temps de retard, sans profiter du caractère prédictif de ces modèles.

science/société, un des enjeux est d'arriver à bénéficier des résultats de la recherche et éclairer les décisions avec une science non complètement établie. C'est ça ou décider de rester aveugle. Ces questions sont d'ailleurs au cœur d'une discipline des sciences humaines peu représentée en France, les "Science and Technologies Studies", et nous avons monté il y a quelques années un projet de recherche pluridisciplinaire sur la confiance dans les projections climatique. On y étudiait à la fois les mécanismes (pas si triviaux) de la confiance dans les projections au sein même de la communauté des sciences du climat, et les questions d'articulation avec le champ politique (projet ANR Climaconf).

Cet état de fait n'est pas choquant en soi ; le fait que ce soit un non-dit masqué vis-à-vis des décideurs et du public est en revanche très choquant et révèle un problème épistémologique méconnu mais majeur.

"Non-dit" par je ne sais pas qui. Problème d'appropriation de cette complexité par le politique sans doute. Mais ces choses sont dites dans les rapports du Giec. L'article [1] était là pour demander à ce qu'on explicite et travaille davantage cette question du réglage qui n'était pas un non-dit. Mais je suis d'accord qu'il y a dans cette articulation entre recherche scientifique et société une question majeure.

L'amalgame médiatique entre recherche et science est souvent fait par méconnaissance, abus de langage et confusion des termes.

Des calculs prédictifs inexploitable

Le 5 mai 2022, l'insuffisance majeure des modèles climatiques est explicitement admise dans un commentaire publié dans la revue Nature, co-signé par des spécialistes tout à fait reconnus, dont Gavin A. Schmidt, le directeur du GISS (Goddard Institute for Space Studies de la NASA) [4]. Le GISS est un des piliers mondiaux de la science climatique officielle.

Ce commentaire, destiné à alerter la communauté scientifique, intitulé « Reconnaître le problème du modèle chaud » se fonde sur la comparaison la plus récente de 50 modèles (CMIP6).

Il indique qu'une part significative de ces outils de dernière génération, supposés plus performants, «surchauffent » et sont incapables de reproduire le passé. Je cite :

« Avis aux utilisateurs : un sous-ensemble de la dernière génération de modèles « surchauffe » et prévoit un réchauffement climatique en réponse aux émissions de dioxyde de carbone qui pourrait être plus important que celui obtenu à partir d'autres modèles. »

Tout à fait. Il s'agit non pas d'un article scientifique (passant par un processus de revue) mais effectivement d'un "Commentaire" dans la revue Nature. Ce commentaire est une prise de position sur un sujet qui a agité la communauté climatique et qui n'a pas été étouffé je pense. Le fait que, alors que la fourchette entre les modèles les plus optimistes et les plus pessimistes n'avait quasiment pas bougé depuis le rapport Charney en 1979, subitement, quelques centres de modélisation, et non des moindres, prédisaient un élargissement du côté de la plage des futurs pessimistes. Et à aucun moment Gavin Schmidt ne laisse entendre que les modèles seraient inexploitable. Il propose une façon de les utiliser au mieux pour éclairer la société.

Et les auteurs d'expliquer :

« **Auparavant, le GIEC et de nombreux autres chercheurs utilisaient simplement la moyenne et la dispersion des modèles pour estimer leurs impacts et leurs incertitudes.**

»

Il faut s'arrêter sur cette phrase, car on découvre à l'occasion une situation étonnante : on comprend que le GIEC estimerait la température future de la planète en faisant la moyenne des résultats des modèles climatiques globaux disponibles !

Cette forme de « démocratie numérique » n'a rien de scientifique et, sauf erreur, n'existe dans aucune autre discipline... un peu comme si on décrétait que le bon résultat d'une épreuve de mathématiques au bac n'était pas dans celle de la copie qui a 19/20 mais dans celle qui a 10/20, en faisant une moyenne avec les mauvaises notes qui pèsent aussi lourd que les bonnes (à supposer qu'il y ait des bonnes notes en modélisation du climat... ce qu'on ne sait pas) !

Encore une fois : le Giec est une organisation diplomatique chargée de coordonner l'éclairage de la société sur l'impact de l'émission des gaz à effet de serre sur le réchauffement global et le climat. Les simulations du changement climatique effectuées par les différents centres montrent une certaine dispersion des résultats. Cette dispersion est utilisée pour avoir une idée de l'incertitude. Il y a un peu deux façons de communiquer autour de ce type de simulations : soit montrer l'ensemble des simulations soit présenter une trajectoire la plus probable et une incertitude autour. Faute de ne savoir (du fait de l'état des connaissances pour plein de bonnes raisons qu'on pourrait prendre le temps de détailler) estimer une "meilleure trajectoire", on utilise la moyenne (dont pas mal d'études ont montré au passage qu'elle était souvent meilleure que le meilleur modèle pour prévoir certains phénomènes climatiques, mais c'est surtout parce qu'on ne sait pas faire mieux). Le fait que certaines études aient suggéré que les modèles qui chauffaient le plus étaient incompatibles avec les observations historiques poussent certains auteurs à demander qu'on les enlève des moyennes où qu'on leur donne un poids moindre et c'est ce qui a été fait dans le rapport AR6 du Giec. Il faut savoir que d'autres scientifiques (dont je suis) ne sont pas convaincus qu'on puisse vraiment rejeter ces modèles; ces études qui rejettent certains modèles ont elles mêmes des sources d'incertitudes assez fortes. Plus le climat va se réchauffer (et malheureusement ça va très vite) plus il sera facile de décréter que certains modèles chauffent trop ou insuffisamment. Pour moi il est encore un peu tôt. Mais je comprends le point de vue de Gavin Smith.

Mais attention : la mise en avant de la trajectoire moyenne n'est qu'une façon de communiquer. En pratique toutes les simulations sont distribuées de façon totalement ouverte. Et les nombreuses études qui utilisent ces simulations "en entrée" d'études dites "d'impact" sur l'agriculture, le confort urbain, etc. sont réalisées en utilisant l'ensemble des simulations (ou un sous ensemble pour des soucis de coût de calcul) afin de tenir compte des incertitudes liées à la simulation du changement climatique par les différents modèles globaux.

La validation des modèles n'est manifestement pas faite comme il se doit, c'est-à-dire individuellement ; on fait la moyenne de tous les modèles. L'incertitude ne repose pas sur une analyse de sensibilité aux paramètres pour chaque modèle, mais sur les écarts entre les modèles pris dans leur globalité. Cette approche « démocratique » de la recherche est singulière pour ne pas dire baroque et conduit à s'interroger légitimement sur le GIEC qui, s'il s'appuie effectivement sur des résultats de recherche, les exploite d'une façon sans doute politique mais en aucun cas scientifique, comme ce type de moyenne inusitée le montre.

Si, bien sûr ! La validation des modèles est faite individuellement. Comme on l'explique plus haut, chaque centre de modélisation consacre beaucoup d'énergie à valider son propre modèle, et beaucoup d'équipes se saisissent de l'ensemble des simulations mises à disposition par les différents centres pour intercomparer les performances des différents modèles. On essaie aussi de plus en

plus de documenter la sensibilité aux paramètres pour chaque modèle au travers d'ensembles de simulations aux paramètres perturbés (perturbed physics ensembles). Mais on reste toujours limité par le coût des simulations climatiques.

Mais l'article va plus loin. Je cite :

« Dans le rapport AR6 (ndlr : sixième cycle d'évaluation du GIEC, le plus récent – 2021), ces méthodes simples ne fonctionnent plus (ndlr : il s'agit de cette moyenne) : les modèles à haute sensibilité pris isolément n'ont pas le même poids que les autres pour estimer la température globale. Les auteurs du rapport AR6 ont décidé d'appliquer des pondérations à chaque modèle avant d'en faire la moyenne, afin de produire des projections de réchauffement climatique « réévaluées ».

En d'autres termes, « le principe » qui consistait jusqu'à présent à prendre en compte la moyenne des résultats de tous les modèles pour prévoir l'avenir thermique de la planète n'est désormais plus valable... Les auteurs approuvent le principe d'une « pondération » effectuée par le GIEC de façon à limiter l'impact des modèles les plus récents qui « surchauffent »!

Que dire de cet invraisemblable bricolage manifestement destiné à aboutir aux valeurs qui conviennent ?

Qu'il est un reflet de la complexité du problème, de l'importance qu'il revêt, et de l'état de l'art d'une recherche scientifique collective très sérieusement au travail.

En réalité, les auteurs reconnaissent explicitement qu'il est impossible de quantifier l'avenir dans la mesure où il n'est pas possible de prendre en compte tous les facteurs de la thermodynamique atmosphérique (ils reviennent en particulier sur le rôle central des nuages quasi impossibles à représenter numériquement).

Je cite : « La Terre est un système complexe dans lequel les océans, la terre, la glace et l'atmosphère sont interconnectés, et aucun modèle informatique ne pourra jamais en simuler exactement tous les aspects. [...] »

Certes. Un modèle (n'est) (qu')un modèle.

« Les modèles varient dans leur complexité qui font chacun des hypothèses et des approximations différentes sur les processus qui se produisent à petite échelle, comme la formation de nuages. [...] »

C'est tout à fait ça. C'est un point essentiel, identifié depuis des décennies et travaillé largement dans la communauté. Et parce que la représentation de ces processus de petite échelle peut se faire avec différentes approches, il est essentiel d'avoir dans les ensembles de simulations du changement climatique des modèles explorant différentes façons de faire. A défaut de pouvoir quantifier ce qu'on appelle l'incertitude structurelle des modèles, cette approche permet d'en avoir une idée.

« Il y a de nombreux aspects du changement climatique que nous ne comprenons pas encore, d'où la nécessité de continuer à améliorer la science du climat. [...] »

Je signe.

« Cependant, même si nous connaissions précisément ce volume (gaz à effet de serre), nous ne saurions toujours pas exactement quel serait le niveau de réchauffement de la planète. [...] »

Oui. C'est documenté à chaque rapport du Giec. Il y a un facteur de 2 à 3 entre le réchauffement simulé par les modèles les moins et les plus sensibles, avec typiquement un ECS variant de 2.1 à 4.7° dans l'exercice CMIP5 réalisé en amont du rapport AR5 du Giec.

Et ils proposent tout simplement de ne plus utiliser ces outils pour faire des prévisions dans le temps !

Pas du tout.

Telle est la conclusion insoupçonnée à laquelle aboutissent aujourd'hui des spécialistes de haut niveau international, insoupçonnables de « climato scepticisme », après des décennies de modélisation et de progrès supposés.

Pas du tout.

Les modèles les plus récents, c'est-à-dire les plus évolués, donnent de « mauvais » résultats, au point de devoir être massivement « pondérés ».

C'est une des choses qui agite effectivement la communauté. On parle de passer d'une fourchette de sensibilité climatique (ECS) de 2.1 à 4.7 dans CMIP5 à 1.8 à 5.6 dans CMIP6. Si on n'avait pas fait cette pondération (justifiée mais fragile pour moi) dans l'AR6, ce rapport aurait été légèrement plus alarmiste que le précédent sans doute. Mais la moyenne des modèles continue à prédire un ECS autour de 3°.

En matière d'évaluation et de prévision quantifiée, ces publications montrent que la science est en réalité du côté de la plus grande incertitude et nous sommes par conséquent très loin d'une ingénierie numérique exploitable contrairement à ce que l'on fait croire.

Les rapports du Giec font aussi rigoureusement que possible la synthèse de tout ça. Personne n'essaie de "faire croire" quelque chose. Les résultats des modèles numériques sont effectivement incertains mais disent tous de façon certaine que l'émission dans l'atmosphère des produit de la combustion du pétrole et du charbon nous entraîne vers un réchauffement global fort avec des conséquences climatiques importantes.

On ne sait pas évaluer les températures futures, on ne sait pas prendre en compte correctement une partie des phénomènes internes essentiels et cela se comprend très bien vu l'extrême complexité de l'objet simulé.

Si assez bien. On a prédit il y a 50 ans l'évolution qui a été observée depuis.

Ces chercheurs honnêtes l'écrivent, mais cela reste confidentiel faute de relais médiatiques et institutionnels.

Je ne connais pas personnellement de chercheurs malhonnêtes. Les relais médiatiques pourraient peut-être éventuellement mieux fonctionner, ou les chercheurs passer plus de temps à des actions de transmissions. Ce sont des questions permanentes.

Les rapports du GIEC cachent aux décideurs la réalité de ces insuffisances ; au contraire, ils assèment des certitudes : l'homme reste responsable du climat et il y a urgence à agir.

Non, les rapports du Giec ne cachent rien. Oui l'émission des gaz à effet de serre explique l'essentiel du réchauffement global depuis les années 80 et oui, l'amplitude de ce réchauffement dans le futur dépendra de notre capacité à agir rapidement pour limiter fortement ces émissions.

Il faut rappeler à ce stade que l'objet statutaire du GIEC n'est pas d'étudier le réchauffement climatique, mais d'étudier le réchauffement climatique d'origine humaine.

C'était bien l'intention initialement d'instruire la question de savoir si l'homme risquait d'altérer significativement le climat. C'est bien de le rappeler. Mais pour autant le mandat n'était évidemment pas de démontrer que c'était le cas. Le mandat était bien d'éclairer entièrement cette question, en tenant compte évidemment de toutes les autres sources de variabilité du climat par exemple. C'est tellement évident, tellement central quand on travaille dans ce domaine, qu'on oublie parfois de rappeler les énormes efforts d'observations ou de modélisation qui sont déployés pour attaquer chacune de ces sources possibles de modification ou de fluctuations climatiques. Et au delà, il faut bien comprendre que toutes les autres sources vont bientôt être tout à fait négligeables en amplitude par rapport à la combustion des énergies fossiles.

Ce biais originel a manifestement des conséquences considérables sur l'orientation des travaux de recherche à l'échelle mondiale, sachant que les rapports du GIEC sont approuvés formellement par chacun des Etats et deviennent de ce fait des éléments de politique publique, particulièrement suivis en Europe.

Un biais dans quoi ? Encore une fois, le réchauffement était encore très peu marqué à l'époque de la création du Giec. Quel aurait été le sens de créer un organisme pour statuer sur l'explication d'une réchauffement qui n'était pas là ? En revanche, les modèles prédisaient déjà que l'augmentation du CO₂ impacterait fortement la température et le climat, et la communauté internationale s'est très heureusement saisie de cette question avec la création du Giec.

Une unanimité scientifique factice

Au-delà de la science qui aurait parlé et dont on peut mesurer la faiblesse prédictive, on entend également en permanence qu'il y a unanimité de la communauté scientifique sur le sujet et qu'il faut « écouter les scientifiques ».

La responsabilité centrale du CO₂ dans la perspective climatique catastrophique à venir est de ce fait considérée comme une vérité absolue.

Oui ; on peut sans doute dire que la science a parlé et qu'elle affirme le fait que la poursuite de la consommation d'énergie fossiles au rythme actuel conduit le climat à de graves dérèglements. La recherche conclut ça en affichant clairement les plages d'incertitudes. En gros un facteur deux en réchauffement entre les modèles les moins et les plus alarmistes.

Tout scientifique interrogé dans la rue le dira sans doute comme tout le monde, d'autant que le contester pourrait s'avérer préjudiciable à sa carrière. Mais qu'en est-il quand il s'exprime dans le cadre professionnel des publications scientifiques à comité de lecture, c'est-à-dire le seul qui compte ?

La question ne se pose pas en fait. Je ne connais pas de scientifique travaillant sérieusement sur ce sujet qui doute de ces conclusions.

La référence est une étude australienne [5] parue en 2013 (et reprise par Greenpeace) qui conclut effectivement que 97% des scientifiques compétents considèrent que le réchauffement climatique est bien d'origine anthropique.

Le diable étant dans les détails, il faut regarder de plus près la méthodologie de l'étude : 11944 publications (environ 25 000 coauteurs) dont les résumés contiennent les termes « global warming » et « global climate change », parues entre 1991 et 2011 dans des revues à comité de lecture, ont été analysées et classées.

Sur ces 11944, 7970 soit près de 70% ne donnent aucun avis sur le sujet... et ont été éliminées du « panel » !

Sur les 30% restantes, en réalité seules 1010 publications (soit 8,5% du nombre initial) donnent un avis explicite et 986 d'entre elles indiquent effectivement que l'homme est responsable, soit bien 97,6%. Mais... 97,6% de 8,5%, soit... 8,25% du total !

Ainsi en réalité, 91,5% de la communauté scientifique concernée ne donne aucun avis explicite professionnel sur la question et l'unanimité affichée par les medias (et Greenpeace) ne porte que sur un peu plus de 8%. Une étude américaine de même nature publiée en 2021 conduit à des résultats comparables [6]

L'unanimité scientifique sur l'origine humaine du réchauffement climatique relève clairement d'une exploitation fallacieuse des chiffres, si l'on s'en tient à la réalité des publications professionnelles sur laquelle est basée cette affirmation.

Je ne vois pas bien ce que l'auteur veut démontrer ici.

En matière de chiffres, le dernier rapport du GIEC suscite également bien des interrogations.

Les chiffres du GIEC... pas exactement l'idée qu'on s'en fait

Partons maintenant de l'hypothèse que les évaluations du GIEC sont fiables et intéressons-nous à l'impact du CO2.

Dans son dernier rapport aux décideurs concernant les aspects scientifiques [7], il est indiqué (p9 A. 1.3° que pour le passé et jusqu'à nos jours, le « probable réchauffement dû à l'homme depuis 1850–1900 est d'environ +1°C ». Plus loin, il est écrit pour le futur (p35 D1.1) que « chaque tranche de 1000 Gt d'émissions cumulées de CO2 provoque une augmentation probable de la température mondiale de 0,45 °C (meilleure estimation) ».

On peut s'arrêter sur ce chiffre.

Les émissions annuelles de CO2 résultant de la combustion des hydrocarbures représentent aujourd'hui environ 35 GT.

Un calcul simple montre qu'en 2100, dans 80 ans et selon les hypothèses du GIEC, on aboutirait au rythme de la consommation mondiale actuelle (du fait des hydrocarbures) à une hausse de température estimée depuis 1850 de 2,3 °C ($1+80*35/1000*0,45^{\circ}\text{C} = 2,26^{\circ}\text{C}$)... à comparer avec l'objectif de neutralité carbone en 2050 qui conduirait à une hausse comprise limitée à 1,5°C.

Soit un écart inférieur à 1 °C entre les deux scénarii d'émissions !

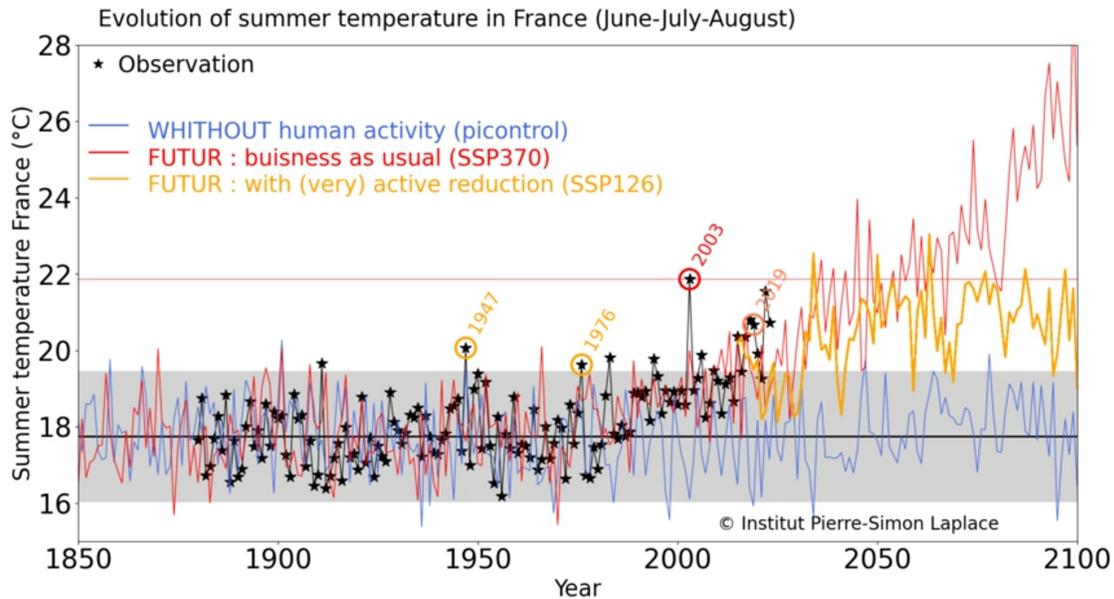


FIGURE 2 – Evolution des températures d'été sur la France.

On montre sur cette figure l'évolution des températures moyenne estivales l'été sur la France. Les observations montrent que ces température oscillaient de typiquement $\pm 1,7^\circ$ autour d'une moyenne jusqu'aux années 80. Les températures des dernières années sont typiquement déjà à $+3^\circ$ par rapport à cette moyenne. Les courbes en couleurs correspondent à des estimations de ces températures calculées dans trois simulations réalisées avec le modèle couplé IPSL-CM : dans la première, on suppose que les concentrations des gaz à effet de serre (mais aussi de la pollution, ou de l'usage des sols) n'ont pas changé depuis avant l'air industriel. Dans les deux autres, on prend en compte l'évolution observée jusqu'en 2014, et on applique ensuite deux scénarios possibles d'évolution de ces concentrations. On voit à la fois la capacité du modèle à bien reproduire l'amplitude des oscillations de température d'un été sur l'autre, et aussi la tendance au réchauffement récent.

Ce faible écart estimé est à mettre en regard de l'objectif de « neutralité carbone en 2050 » qui lui, à contrario, représente bien une révolution industrielle, économique et sociale aussi faramineuse que brutale par rapport à notre mode de fonctionnement actuel où 80% de l'énergie utilisée dans le monde est d'origine fossile. D'après l'Agence internationale de l'énergie [8] en effet, pour atteindre la neutralité carbone en 2050, il faudrait réduire la consommation mondiale de charbon de 90%, celle de pétrole de 75% et celle de gaz naturel de 55%.

Cet objectif de réduction drastique est colossal et ne peut s'obtenir que par une forte décroissance... pour moins de 1°C d'écart estimé !

C'est assez surprenant mais pour mieux comprendre, il faut savoir que le GIEC présente en fait différents scénarii d'émission de CO_2 d'ici la fin du siècle. La hausse spectaculaire autour de $4,5^\circ\text{C}$ (voire plus) souvent mise en avant dans les media, est en réalité « calculée » par le GIEC sur la base du scénario d'émission de CO_2 le plus extrême (scénario SSP5-8.5- voir 8 p.13- fig. SPM.4) qui prévoit non pas la poursuite de nos émissions au niveau actuel, mais leur multiplication par deux d'ici 2050 puis par trois d'ici 2080... c'est à dire une croissance effrénée (et sans doute irréaliste) de la consommation d'hydrocarbures !

Malheureusement, les chiffres présentés dans les media ne sont jamais assortis des hypothèses qui les sous-tendent, ce qui entretient la confusion.

Effectivement, tous les centres de modélisation fournissent des projections climatiques effectuées avec différents scénarios d'évolution des gaz à effet de serre ou de leur émission afin

que chacun puisse se faire une idée du rapport entre l'effort de réduction de l'émissions des gaz à effet de serre et le futur climatique. Peut-être qu'on ne communique pas suffisamment là dessus. J'aurais plutôt dit que si. Mais je peux me tromper. C'est évidemment essentiel. Pour ce qui est de l'ampleur du réchauffement, il ne faut pas oublier que les continents chauffent typiquement deux fois plus vite que la moyenne globale des températures. Il faut savoir qu'en température d'été sur la France, l'été 2023 est en train de devenir l'été moyen. Avec 1 ou 2 degrés en plus en moyenne globale, on parle de 2 à 4 sur la France l'été (cf. Fig. 2).

Pour terminer de façon pratique, notons que la Chine, l'Inde et les pays dits « du Sud » qui représentent l'essentiel de l'humanité fondent leur développement majoritairement sur les énergies fossiles et n'ont pas l'intention d'y renoncer.

La Chine met en œuvre aujourd'hui un programme électro-charbonnier sur dix ans qui représente environ 300 GW, soit 5 à 6 fois la puissance électronucléaire totale installée en France, quand l'Inde multiplie les ouvertures de mines de charbon.

La France pèse moins de 1% des émissions mondiales.

Pour le coup je n'entrerai pas dans la discussion sur savoir comment compter les émissions, pour rester sur des réponses sur le plan de la physique et de la modélisation du climat.

Un débat d'intérêt public interdit et une société prise en otage

Qu'ont à répondre sur le fond les spécialistes médiatiques de l'urgence (voire de la terreur climatique) et sur quoi fondent-ils précisément leur certitude affichée et chiffrée du rôle majeur, immédiat et catastrophique du CO₂ ?

Quand on interroge les spécialistes et des leaders d'opinion, la réponse est toujours la même : pas de réponse. Tout cela est manifestement un non sujet, n'a pas à être discuté et surtout l'expression du moindre doute apparaît comme une inadmissible transgression.

Or, comme pour tout domaine de recherche scientifique, le doute est non seulement légitime mais salutaire et le débat contradictoire, nécessaire.

Au nom de quoi la climatologie serait-elle le seul domaine à pouvoir s'y soustraire ?

C'est mal connaître ce champ de recherche traversé de très intenses débats sur ces questions ; et c'est bien entre autres malgré ces débats ou parce qu'ils n'ont pas permis de trouver de faille que "la science a parlé" sur la question de l'impact du CO₂ sur le réchauffement global.

Les interdits intellectuels sont bien sûr antinomiques avec l'essence même de la recherche et posent un problème éthique, déontologique et épistémologique.

Parle-t-on des medias ou du monde académique ? Je n'ai pas connaissance d'interdits intellectuels dans la recherche académique publique.

Nos médias donnent une parfaite illustration de cette situation, comme en témoigne la récente charte environnementale de Radio France, dont le premier article est le suivant, je cite :

« **Article 1 : Nous nous tenons résolument du côté de la science, en sortant du champ du débat la crise climatique, son existence comme son origine humaine. Elle est un fait scientifique établi, pas une opinion comme une autre.** »

Cette position officielle « d'autorité » qui s'exprime à longueur d'antenne sans la moindre contradiction (sur les radios de service public supposées pluralistes par leur statut) illustre à quel point l'idéologie, le militantisme, voire l'endoctrinement ont pris la main.

Sans parler d'autorité ou d'endoctrinement, je trouve moi aussi ces discours parfois un peu trop simplistes. Autant je pense important de répéter l'importance du changement prédit par les modèles, autant on ne peut pas le faire que comme une simple leçon de morale, sans reconnaître les questions d'acceptabilité, de difficulté d'adaptation des sociétés, etc. Il est essentiel que la prise de conscience ait lieu et un magnifique travail a été fait de ce point de vue. Mais effectivement, une fois ce point acquis, tout reste à inventer et les choix seront difficiles et politiques.

C'est ce qui est dénoncé par de nombreux scientifiques au plan international, à l'image de l'américain John Clauser, prix Nobel de physique 2022, ou bien de Steven Koonin [9], membre de l'Académie des

sciences américaine, ancien sous-secrétaire d'Etat à la science du département de l'énergie de l'administration Obama.

Si cette affaire ne relevait que d'un débat savant, cela ne poserait pas vraiment de problème ; la tectonique des plaques a mis soixante ans avant d'être admise par la communauté des géologues.

Mais en l'occurrence, il s'agit de l'avenir de notre société et c'est une affaire d'Etat.

Nos concitoyens sentent bien qu'il y a sur ce sujet quelque chose d'anormal, même s'ils n'ont aucun outil ni aucune information structurée leur permettant des choix éclairés.

Ils ont raison car on n'a sans doute jamais pris de décisions aux conséquences aussi lourdes sur des fondements aussi faibles.

Il n'est pas trop tard pour les décideurs d'en prendre la mesure et pour les experts d'avoir le courage de s'expliquer publiquement et contradictoirement.

Puisque l'auteur semble attribuer à mes recherches un caractère plus honnête que d'autres (ce que je ne crois pas être vrai), et si par exepert il entend des chercheurs du domaine, alors oui, je veux bien m'expliquer d'avantage publiquement et contradictoirement. Mais si je me retrouve face à d'autres chercheurs experts, nous auront peut être des débats scientifiques acharnés sur certains aspects ; mais qui ne remettront pas en cause le message central sur le réchauffement globale conséquence de la combustion d'énergies fossiles ; malheureusement.

Références bibliographiques

[1] Frédéric Hourdin et all : « The art and science of climate model tuning » – Bulletin of American Meteorological Society – BAMS mars 2017 98, n ° 3 , pp. 589–606

[2] Thorsten Mauritsen et all – Développements dans le modèle du système terrestre MPI-E version 1.2 –MPI-ESM1.2– et sa réponse à l'augmentation du CO2 – Journal of advances in modelling earth systems – 13 janvier 2019

[3] Frederic Hourdin, Catherine Rio, Jean-Yves Grandpeix, Jean Baptiste Madeleine, Frédérique Cheruy – La composante atmosphérique du modèle climatique IPSL avec une physique améliorée et mieux réglée – Journal of advances in modelling earth systems – 06 avril 2020.

- [4] Zeke Hausfather, Kate Marvel, Gavin A.Schmidt et al : « climate simulations : recognize the « hot model » problem – Nature – vol 605 – 5 mai 2022
- [5] John Cook et al – Environmental research letters – Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature – Environ. Res. Lett. 8 024024 – 15 05 2013
- [6] Mark Lynas, Benjamin Z Houlton et al – Environmental research letters – Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific l – 19 October 2021
- [7] GIEC – changement climatique 2021 – Les bases scientifiques physiques – résumé à l’intention des décideurs. (IPCC_AR6_WG1_SPM)
- [8] Net zero by 2050 – A roadmap for the global energy sector – AIE – mai 2021
- [9] Steven Koonin : « Climat, la part d’incertitude » Edition l’Artilleur – 2022

Présentation de l’auteur

Citoyen ordinaire à la retraite, l’auteur est ingénieur - Mines de Nancy) et scientifique de formation (thèse de 3ème cycle de mathématique appliquée en géosciences à l’Ecole des Mines de Paris) ; ancien chef d’une entreprise technologique spécialisée dans les modèles numériques de simulation pour l’industrie mécanique et métallurgique (Transvalor SA), il a une expérience pratique de la modélisation numérique appliquée à différents domaines.

Il est familier du milieu de la recherche, ayant été pendant 20 ans directeur de l’association ARMINES, importante structure de recherche partenariale (partenariat recherche publique – recherche privée).

C’est bien sûr à titre strictement personnel qu’il s’exprime, considérant disposer de l’expérience et de la compétence pour exercer sa raison critique sur l’état de l’art de la modélisation climatique qui est à la source des prévisions chiffrées en la matière.

Références

- [1] Hourdin, F. *et al.* The Art and Science of Climate Model Tuning. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **98**, 589–602 (2017).
- [2] Hourdin, F. & Guillemot, H. Modélisation du climat. Enciplopédie Universalis (2021).
- [3] Guillemot, H. Les désaccords sur le changement climatique en France : au-delà d’un climat bipolaire. *Nature Sciences Sociétés* **22**, 340 – 350 (2014). URL <https://hal.science/hal-03096972>.
- [4] Boucher, O. *et al.* Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. *J. of Adv. in Modeling Earth Systems* **12**, e02010 (2020).
- [5] Hourdin, F. *et al.* LMDZ6A : The Atmospheric Component of the IPSL Climate Model With Improved and Better Tuned Physics. *J. of Adv. in Modeling Earth Systems* **12**, e01892 (2020).
- [6] Hourdin, F. *et al.* Toward machine-assisted tuning avoiding the underestimation of uncertainty in climate change projections. *Science Advances* **9**, eadf2758 (2023).