

Evaluation des changements climatiques futurs : le rôle essentiel de la modélisation *par Hervé Le Treut*

Résumé - Aujourd'hui, les activités humaines modifient fortement et rapidement les quantités de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère de la planète. Comment cette situation sans précédent peut-elle affecter le climat de la planète ? L'effet de serre - en particulier mais pas seulement celui du CO₂ - est une réalité physique parfaitement établie, et son action va se superposer aux autres perturbations de notre environnement, sous l'effet de dynamiques naturelles ou par les activités humaines. Un outil d'analyse indispensable est constitué par les modèles climatiques : et nous passons en revue leurs fondations physiques, allant des formulations les plus sommaires à des représentations plus élaborées de la complexité du «système Terre». Ces modèles ont été développés et testés dans un cadre international depuis les années 1980. Les modèles actuels sont tous capables de simuler, avec un formalisme physique et mathématique inchangé, les grands traits de climats aussi variés que le climat actuel, celui d'il y a 6000 ans quand le Sahara était vert, ou d'il y a 21 000 quand les glaces recouvraient l'Amérique du Nord et l'Europe. La communauté des scientifiques du climat a alerté très tôt la communauté internationale sur les risques du changement climatique anthropique, et cette alerte a conduit à l'établissement d'un outil d'expertise dédié, le GIEC. Nous décrivons le fonctionnement de ce nouveau – et jusqu'ici unique – cadre d'interaction entre les scientifiques et les décideurs. Les modèles climatiques, s'ils convergent pour faire le diagnostic de risques importants, restent des outils très imparfaits d'aide à la décision, et nous concluons en présentant les avancées scientifiques qui seraient importantes pour mieux relever le défi du changement climatique pour les sociétés humaines.

Un problème nouveau

Les débats qui entourent le problème du changement climatique, en agrégeant des informations multiples et souvent complexes, ont contribué à rendre peu lisible pour les non-spécialistes la nature même des problèmes auxquels nous sommes confrontés. Cette difficulté est renforcée par le fait que nous nous trouvons dans une situation nouvelle, inédite à l'échelle de la présence humaine sur Terre. Alors que la composition chimique de l'atmosphère en gaz à effet de serre était restée stable depuis 10 000 ans environ, c'est-à-dire durant le

Projections of future climate change: the essential role of models :

Abstract - How will climate change in the unprecedented situation now upon us? Human activities are rapidly and strongly changing the amounts of greenhouse gases (GHG) in the global atmosphere. We recall the well-established physics of the greenhouse effect, in particular but not only regarding CO₂, which add up to other human perturbations of the natural environment. Physically based climate models constitute a necessary tool in order to diagnose the risks that we face, and their foundations will be reviewed, from simple to more elaborate representations of the complexity of the Earth. These models have been developed and tested in an international context since the 1980s. Using a common physical and mathematical formalism, models today all can simulate the principal traits of climates, ranging from present-day climate, to the climate of 6,000 years ago when the Sahara was green, or to the climate of 21,000 years ago when ice covered much of North America and Europe. We describe how the climate science community alerted the broader world community to the risks of anthropogenic climate change, leading to the establishment of IPCC. We describe the workings of this new and so far unique framework of interaction between scientists and decision-makers. We conclude with a reminder of what has been explained and what needs to be improved in climate models: if all models agree on the diagnostics of the risks we are facing, new scientific advances are necessary to address the challenges of climate change for human societies.

très long âge interglaciaire qui a permis à nos civilisations de se développer, les activités humaines l'ont modifiée de manière drastique en quelques décennies, et cet effet ne cesse de s'accroître.

Si l'effet de serre joue un rôle majeur dans l'action de l'homme sur son environnement, c'est parce qu'il a un rôle démultiplicateur exceptionnel. Les gaz à effet de serre ne constituent qu'une toute petite fraction (moins de 1%) de la masse de l'atmosphère, mais ils jouent un rôle crucial. Sans leur absorption et ré-émission de rayonnement de chaleur (l'infrarouge), la température

de surface de la planète serait de -18°C en moyenne, contre 15°C maintenant (en fait près de 16°C , si l'on tient compte des évolutions récentes). Cet effet de réchauffement peut s'expliquer de manière simple, même si la réalité est un peu plus complexe : grâce aux gaz à effet de serre, l'atmosphère empêche la Terre, continuellement chauffée par le soleil, de se refroidir librement, en absorbant et en renvoyant vers le bas une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface. Parmi ces gaz, certains (la vapeur d'eau, ou encore l'ozone) ont un cycle atmosphérique rapide et ne sont modifiables que de manière indirecte par les activités humaines. Mais d'autres, tel le dioxyde de carbone (que je nommerai par la suite par sa formule chimique CO_2) ont un temps de résidence atmosphérique très long : après 100 ans la moitié du CO_2 émis dans l'atmosphère s'y trouve encore. Or ces émissions ne cessent de croître. Les émissions liées à la combustion du pétrole, du charbon et du gaz naturel sont passées de moins de 2 milliards de tonnes de carbone par an dans les années 1950, à plus de 8 milliards (donc près de 30 milliards de tonnes de CO_2) en 2008. Il faut y ajouter la part de la déforestation, plus difficile à estimer, de l'ordre de 20% des émissions liées à l'usage de l'énergie.

L'essentiel de la croissance des émissions de gaz à effet de serre s'est donc produit après la deuxième guerre mondiale, et c'est dans cette période que nous avons dépassé le seuil - toujours difficile à définir avec précision - où ces émissions, de largement négligeables qu'elles étaient au début, ont commencé à constituer un problème environnemental majeur. La teneur atmosphérique en CO_2 était restée comprise entre 270 et 280 ppm (parties par million en unité de volume, donc cm^3 de CO_2 par mètre cube d'air) durant les 10 000 dernières années. Depuis 1900 quand elle était proche de 290 ppm, elle a augmenté brutalement pour atteindre 385 ppm en 2009 ; et elle continue de croître, à un rythme qu'accélère désormais la croissance des pays émergents. Les conséquences climatiques de l'augmentation des gaz à effet de serre sont elles-mêmes décalées de quelques années, voire quelques décennies, par rapport à l'augmentation des gaz à effet de serre, car il faut que l'océan prenne le temps de se réchauffer. Les changements climatiques résultant des gaz à effet de serre n'ont donc commencé à devenir discernables que dans les années 80 ou 90, et c'est un problème qui est surtout important par les menaces qu'il pose sur notre futur.

L'action humaine sur notre environnement ne s'arrête pas aux émissions de CO_2 . D'abord, nous injectons dans l'atmosphère d'autres gaz à effet de serre (méthane, oxyde nitreux aussi appelé protoxyde d'azote, fréons ou CFC, HCFC). Alors que le CO_2 est essentiellement le résultat de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel, à quoi il faut ajouter les effets des cimenteries et surtout ceux de la déforestation, de nouveaux secteurs économiques interviennent dans l'émission des autres gaz : agriculture, déchetteries, ... qui élargissent encore le cercle des acteurs qui devront être pris en compte pour tenter de stabiliser le climat. Ensuite, nous émettons aussi des polluants à caractère toxique, des poussières, nous modifions la réflectivité des sols... Face à ces actions multiples, les gaz à effet de serre jouent toutefois un rôle très spécifique du fait de leur très long temps de résidence dans l'atmosphère : nous avons cité une «demi-vie» de 100 ans pour le CO_2 , ce même chiffre (voire beaucoup plus) est à retenir pour l'oxyde nitreux ou certains fréons, tandis qu'il est plutôt de l'ordre de 10 ans pour le méthane. Dans tous les cas, cela implique de considérer les variations climatiques à l'échelle des prochaines générations. L'atmosphère a aussi le temps de mélanger les gaz à l'échelle de la planète : leur effet global appelle cette fois des solidarités de type international.

Modèles et principes physiques : le rôle d'une validation ouverte

Le rôle climatique des gaz à effet de serre peut s'évaluer à partir de quelques chiffres simples, appliqués aux variations de la température de surface moyenne de la planète. Bien sûr cette température moyenne est le résultat de processus nombreux, en particulier des processus convectifs par lesquels la chaleur de l'air en surface se redistribue verticalement. Mais elle constitue un ordre de grandeur utile. L'effet radiatif des gaz à effet de serre déjà injectés dans l'atmosphère par les émissions atmosphériques humaines est de l'ordre de 3 watts par mètre carré (Wm^{-2}). Il s'agit d'un chiffre qui peut paraître faible comparé aux 150 Wm^{-2} que l'on attribue à l'effet de serre naturel (ou aux 240 Wm^{-2} du rayonnement solaire moyen absorbé par le système Terre) mais c'est en fait beaucoup.

Les températures à la surface et dans les couches basses de l'atmosphère de la planète, qui varient entre -50°C à $+50^{\circ}\text{C}$, ont une moyenne globale à la surface proche

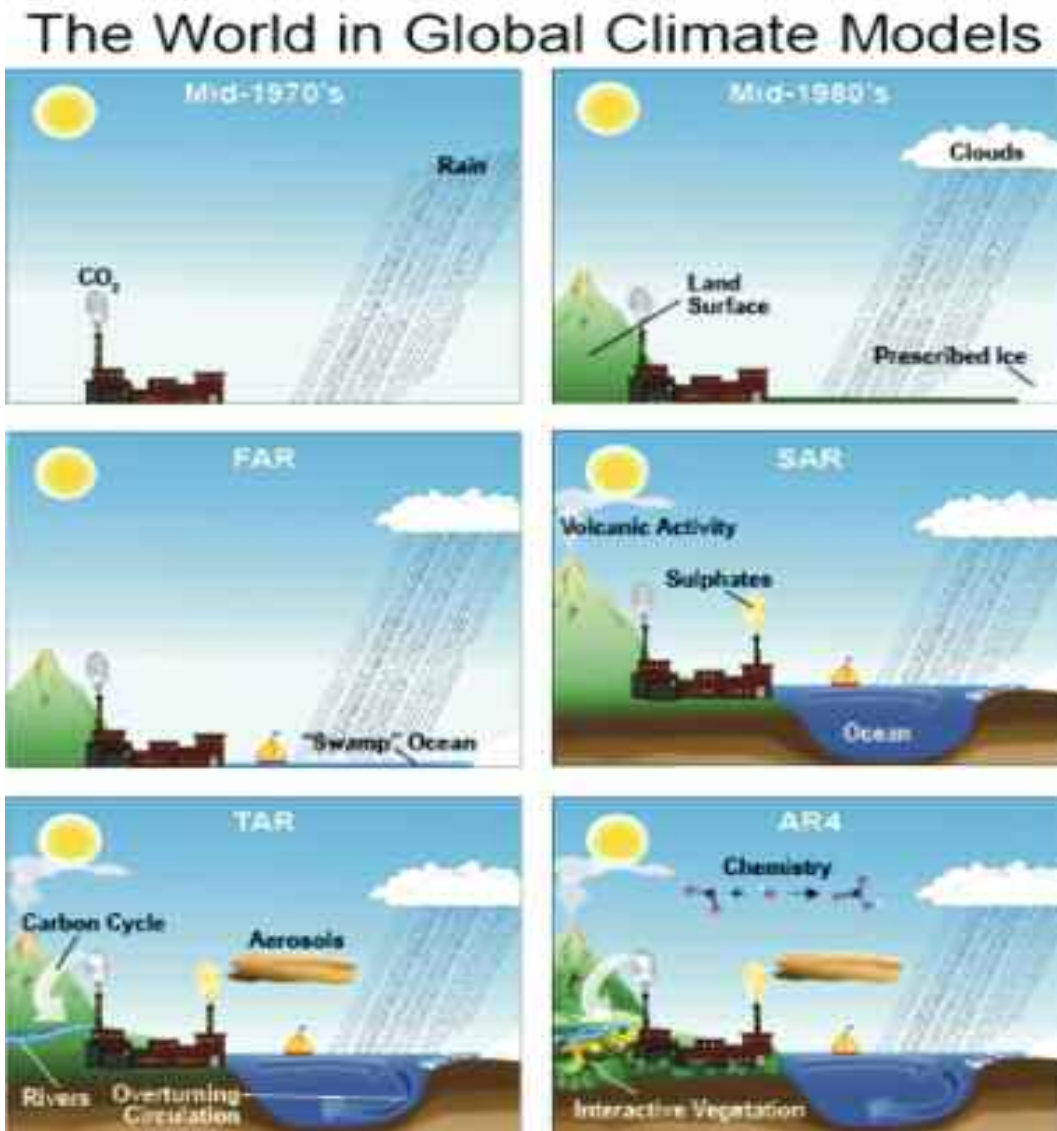


Figure 1 : Evolution de la modélisation du climat à l'échelle du globe. Améliorations successives du réalisme et de la complexité des modèles

Ces schémas sont indicatifs, puisque les différentes équipes de modélisations ont pu choisir des stratégies de développement différentes. Mais de manière générale les progrès ont été à peu près les suivants :

Années 1970 : Premiers modèles de circulation générale de l'atmosphère. Prise en compte d'éventuelles variations de l'irradiance solaire et de l'évolution de la concentration atmosphérique de CO₂. Modélisation sommaire des précipitations.

Années 1980 : Prise en compte des propriétés des surfaces émergées; couverture de glace prescrite. Modélisation sommaire de la nébulosité.

Premier rapport (AR1=FAR) du GIEC : Océan «marécage» c'est-à-dire prise en compte des échanges de chaleur et d'eau entre l'océan et l'atmosphère, mais sans structure verticale de l'océan ni courants océaniques.

Deuxième rapport (AR2=SAR) du GIEC : Prise en compte de l'activité volcanique ainsi que des sulfates issus des émissions anthropiques de SO₂. Représentation encore sommaire des processus thermiques et dynamiques de l'océan en 3 dimensions.

Troisième rapport (AR3=TAR, 2001) du GIEC : Prise en compte du cycle de carbone, des flux d'eau des rivières, des propriétés des aérosols anthropiques; représentation plus avancée de la circulation tridimensionnelle des océans.

Quatrième rapport (AR4, 2007) du GIEC : Prise en compte de la chimie atmosphérique. Prise en compte des interactions entre la végétation, le climat, et les propriétés des surfaces émergées.

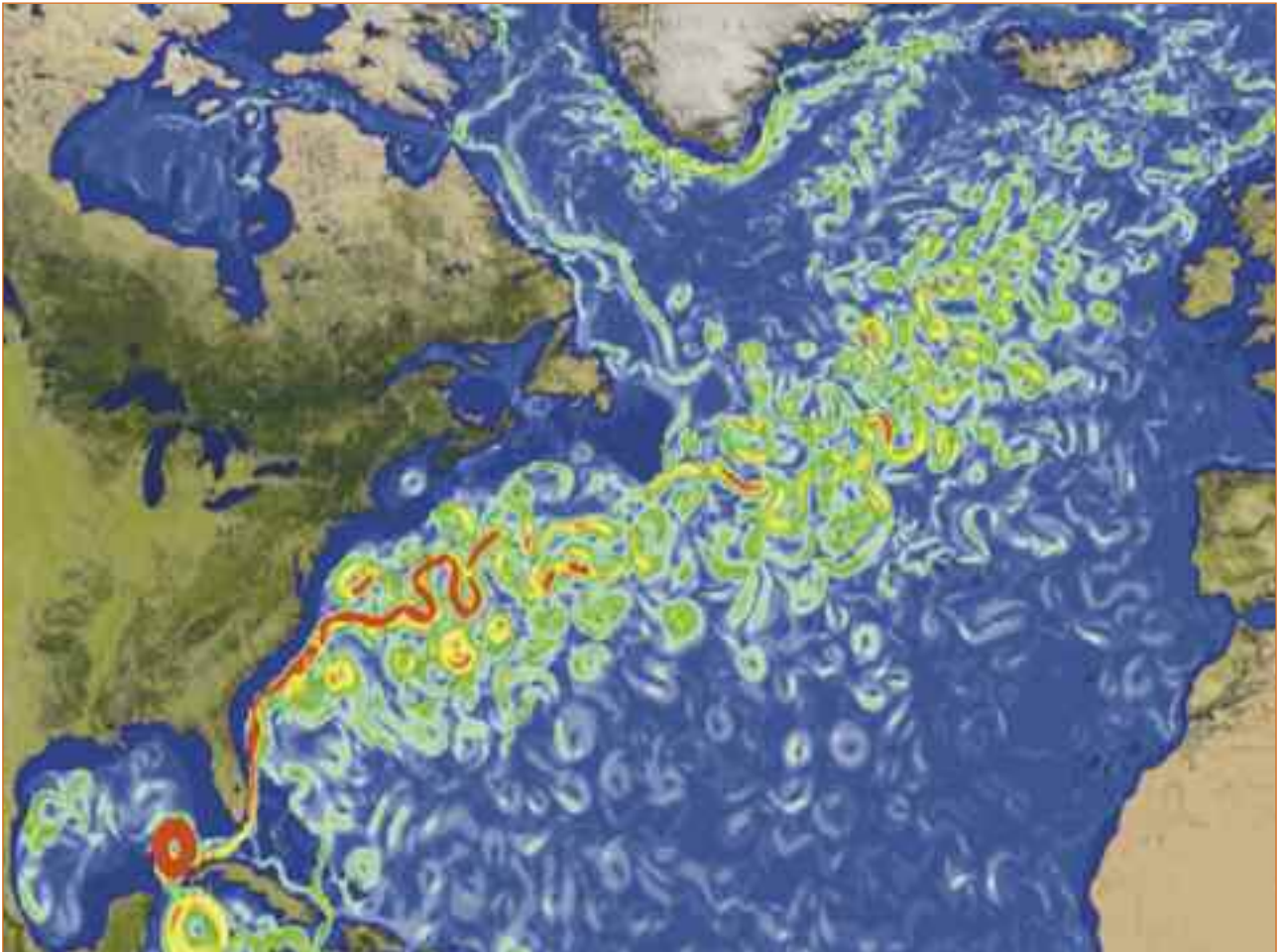


Figure 2 : Les tourbillons : un élément essentiel des écoulements atmosphériques ou océaniques. Ici, une représentation des tourbillons de l'Atlantique, qui compliquent la modélisation du rôle du Gulf Stream, à partir d'un modèle japonais de haute résolution. L'interaction entre mouvements océaniques et atmosphériques se situant à des échelles différentes constitue l'une des difficultés toujours présentes auxquelles sont confrontés les modèles.

de +15°C (ou 288 Kelvin sur l'échelle absolue). La perturbation croissante du cycle énergétique, déjà supérieure à 1%, est donc susceptible de modifier cette température globale de plusieurs degrés, ce que confirment des modèles plus complexes. Or on sait que les températures globales ont fluctué de quelques dixièmes de degrés au cours des derniers siècles et millénaires, et qu'il faut remonter à la dernière grande déglaciation pour trouver un réchauffement de 5 à 6 degrés. Il ne s'agit là que d'ordre de grandeurs, et les modèles que nous décrivons plus loin permettront de cerner ces problèmes avec plus de précision. Mais ces quelques chiffres illustrent simplement le fait que nous sommes indéniablement face à un phénomène nouveau, qui va bien sûr se superposer à la variabilité naturelle du climat, mais qui va progressivement la dominer.

Comment donc mieux évaluer l'importance de ces évolutions, comment les anticiper, comment s'y adapter ? Le seul recours est la modélisation numérique, basée sur les équations de la mécanique des fluides et de la conservation d'énergie, bref sur les lois de la nature. Elle permet de créer des «planètes numériques», images nécessairement imparfaites mais toujours plus proches de la planète réelle. Ces modèles ont commencé à exister dans les années 60 aux Etats-Unis, comme des représentations de la circulation générale de l'atmosphère fondées sur la résolution des équations de la mécanique des fluides, et ils se sont ensuite étendus (figures 1 à 4) aux océans, aux glaces de mer, à des processus complexes mais essentiels : rôle des nuages, de la végétation, du relief montagneux. Le développement d'un modèle réclame une équipe de plusieurs

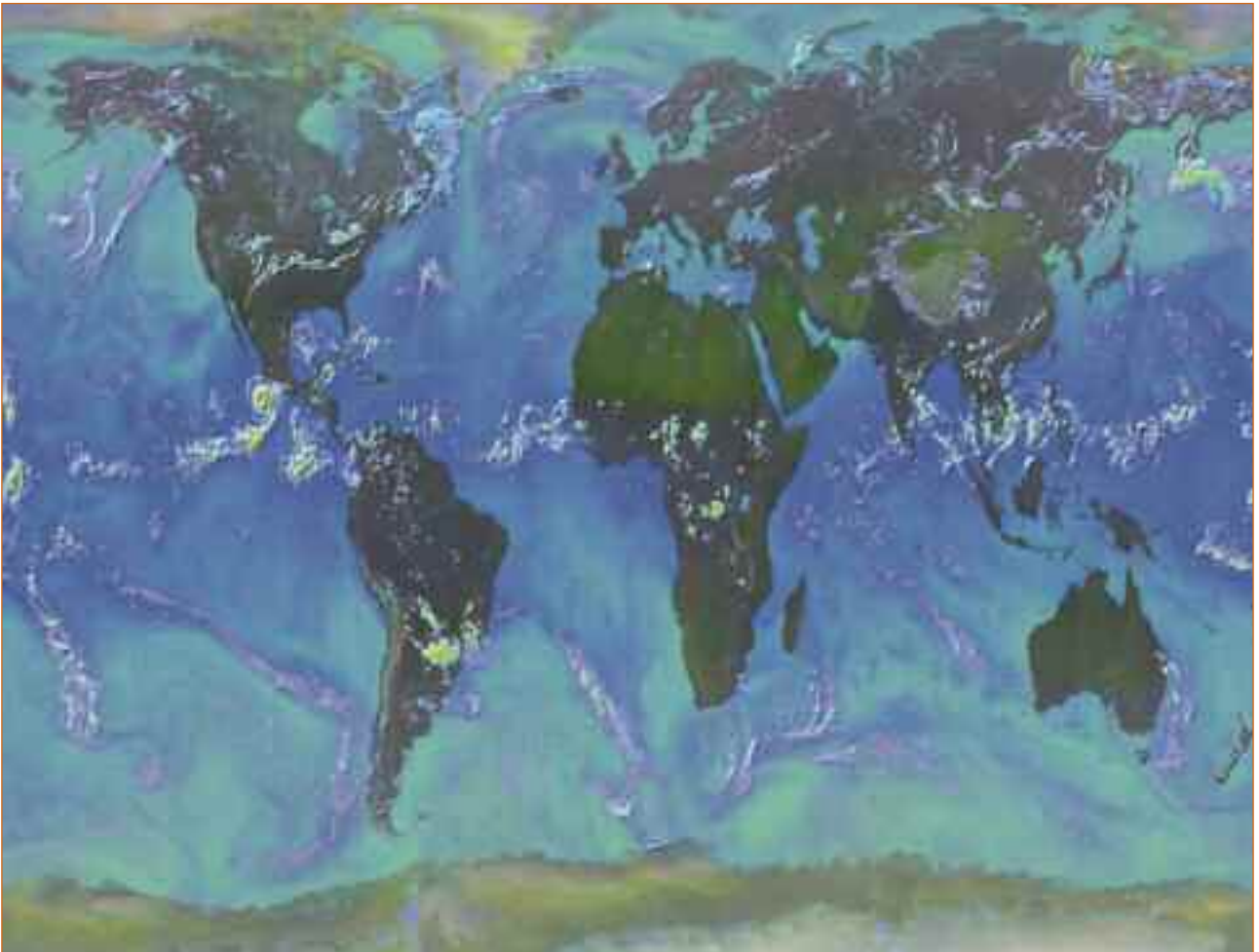


Figure 3 : Le cycle hydrologique et le bilan radiatif de la planète. L'eau, sous forme de vapeur ou de nuages, constitue aussi une source importante de difficultés. Les nuages, par exemple, jouent le rôle majeur dans la réflexion du rayonnement solaire incident, mais ils contribuent aussi à l'effet de serre. Cette représentation en fausses couleurs, associée à la mission TRMM de la NASA, est une synthèse d'images radar, surtout sensible à la pluie. On y voit clairement les nuages à fort développement vertical. Ces nuages de sommet froid bloquent sensiblement le rayonnement infrarouge thermique émis vers l'espace par la planète. Au moment correspondant à la carte, cet effet est important aussi bien dans les zones équatoriale et tropicales (le front intertropical, un cyclone tropical au sud-ouest du Mexique), qu'aux latitudes moyennes et sub-polaires (systèmes dépressionnaires et cirrus).

dizaines de chercheurs travaillant ensemble pendant une décennie au moins, et il existe une quinzaine ou une vingtaine d'équipes à l'échelle mondiale. Chaque modèle constitue une petite planète, qui vit, crée son climat, climat que l'on peut bien sûr confronter au climat de la planète réelle.

La floraison de modèles très nombreux, dans les années 80 (il en existe une vingtaine), a suscité une réaction de la communauté scientifique qui a senti le besoin d'organiser une évaluation rigoureuse. C'est un scientifique américain, Larry Gates, qui a pris l'initiative de construire un laboratoire consacré

à la documentation des modèles, et à leur comparaison précise dans des conditions contrôlées. Ce laboratoire, financé par le Department of Energy, situé au Lawrence Livermore National Laboratory dans les environs de San Francisco, a constamment placé son activité sous l'égide et le contrôle du Programme mondial de recherche sur le climat. Le premier programme porté par ce laboratoire, le Programme AMIP (*Atmospheric Model Intercomparison Programme*), initié en 1990 et toujours actif, a été suivi de plusieurs autres. Le projet CMIP-5 (*Coupled Model Intercomparison Project n°5*) est actuellement en train de coordonner les simulations

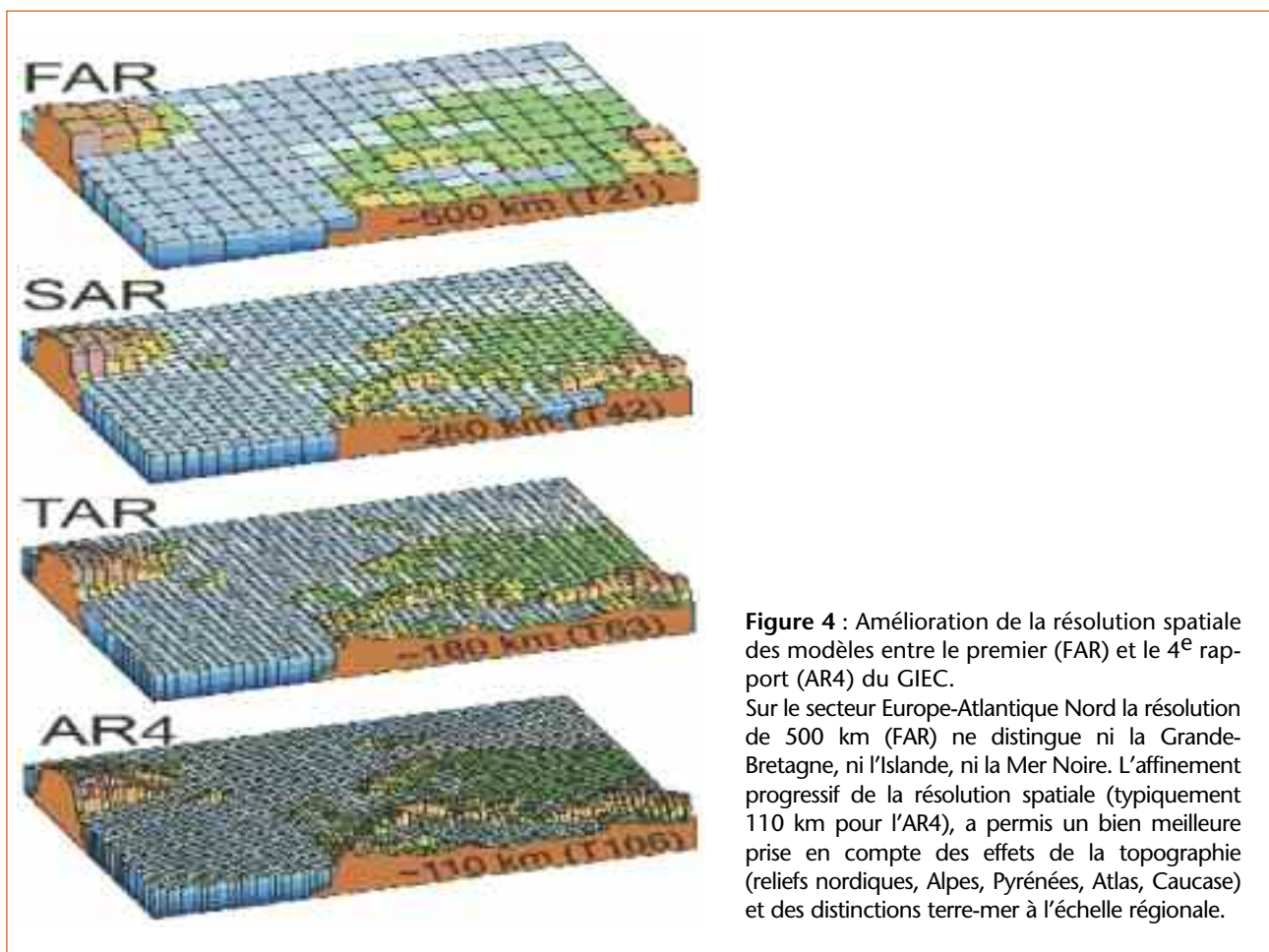
LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

qui fourniront sans doute une partie importante de la matière du prochain rapport du GIEC, en 2013. L'originalité de ces projets a été de confier l'analyse des résultats à d'autres scientifiques, spécialistes des données observées, dont l'expertise pouvait correspondre soit à un paramètre précis (par exemple le moment cinétique de l'atmosphère), soit à une région donnée (par exemple la zone de mousson indienne). Des centaines de projets d'évaluation ont permis d'élever de manière considérable le niveau de la modélisation. Ils n'ont pas permis de dégager un modèle ou un ensemble de modèles qui soient uniformément meilleurs, mais de préciser le niveau de confiance qui peut leur être accordé : **les modèles actuels sont tous capables de simuler, avec un même formalisme mathématique et physique inchangé, les grands traits de climats aussi variés que le climat actuel, celui d'il y a 6 000 ans quand le Sahara était vert, ou d'il y a 21 000 quand les glaces recouvraient l'Amérique du Nord et l'Europe.** On sait par contre que leur capacité à préciser les chan-

gements climatiques à l'échelle locale ou régionale reste très insuffisante.

Les conditions d'un diagnostic partagé

Ce que l'on peut savoir des climats futurs s'appuie donc sur les éléments de consensus d'un ensemble de modèles, soumis à différents scénarios d'augmentation des gaz à effet de serre d'une part, d'évolution des pollutions particulières réfléchissant le rayonnement solaire d'autre part. Comment définir au mieux ce consensus ? Les scientifiques engagés dans l'étude du système climatique ont vu croître au fil des années la préoccupation publique et politique autour de l'effet de serre. L'alerte sur ces problèmes est venue de la communauté scientifique elle-même, et donc, collectivement, les scientifiques ont souhaité ce lien renforcé entre leurs travaux et des préoccupations publiques qu'il leur paraissait nécessaire et urgent de développer. En même temps, cette situation, nouvelle à bien des



égards, pose des problèmes parfois difficiles, parce que le travail scientifique a ses règles, son rythme. La prise de conscience autour des enjeux environnementaux a obligé beaucoup de chercheurs à se situer rapidement dans un contexte qui dépasse celui de la science stricto sensu. La plus grande force de la communauté scientifique, durant les dernières décennies, a probablement été d'accompagner ces évolutions, précisément en tant que communauté, fortement organisée au niveau international. Elle le doit à quelques scientifiques, qui ont eu la vision nécessaire pour anticiper dès les années 80 les débats à venir. Ils ont permis de s'y préparer en mettant en place, à côté des grands programmes internationaux de recherche (le Programme mondial de recherche sur le climat, ou le Programme international géosphère-biosphère) une instance de médiation exceptionnelle : le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat : le GIEC (IPCC en anglais), chargé de faire une sorte d'audit régulier des résultats de la communauté scientifique.

Sa mission est souvent mal comprise – comme est inexacte cette notion de « membre du GIEC » qui est accolée à ceux qui ont participé aux rapports. Le travail réalisé dans le cadre du GIEC, bénévole, est presque exclusivement consacré à l'écriture. La structure du GIEC est très légère. Emanation des Nations-Unis, il reçoit sa mission d'une assemblée plénière où les différents gouvernements sont représentés. Mais la structure principale qui conduit l'activité est un bureau très restreint : le président, actuellement le professeur indien Rajendra Pachauri, trois vice-présidents, les bureaux de chacun des trois groupes mentionnés plus haut, et deux co-présidents d'une équipe spéciale chargée de surveiller la méthodologie des inventaires nationaux de gaz à effet de serre. La France y a toujours été représentée, d'abord par Michel Petit puis par Jean Jouzel, mais ce privilège n'est partagé que par un petit nombre de pays. Si un nombre de personnes aussi réduit est parvenu à mettre en œuvre un exercice d'expertise aussi large, touchant des milliers de scientifiques, c'est bien parce que ces scientifiques constituent une communauté nombreuse, vivante (c'est-à-dire traversée de débats multiples) et organisée.

L'existence d'une recherche fondamentale forte, déjà bien structurée au plan international, bénéficie du support de sociétés savantes, qui ont leurs journaux et

leurs critères de publication. Nous avons cité le Programme mondial de recherche climatique (porteur d'AMIP et de CMIP) ou le Programme international géosphère-biosphère, qui continue une tradition de coopération internationale commencée au XIX^e siècle avec la création de ce qui est devenu l'Organisation météorologique mondiale. Ces programmes ont créé une communauté scientifique internationale, qui est une communauté ouverte, sans frontières précises, mais que l'on peut définir par les savoirs et outils qu'elle crée et maintient. Par exemple : systèmes d'observation de la Terre, au sol, par avion, ballons ou satellites ; systèmes de prévisions météorologiques, de prévisions de l'état de la mer ou des risques de crues, à toutes échelles de temps. Cette liste très incomplète montre que le changement climatique, très loin s'en faut, n'est pas le seul thème de recherche de la communauté « des climatologues ». Mais l'existence et l'organisation de cette communauté constituent une nécessité absolue pour qu'une entreprise telle que le GIEC soit possible. D'abord parce que le GIEC s'appuie de manière exclusive sur des articles publiés dans ses revues à comité de lecture, avant une date précise. La désignation des rédacteurs du GIEC suit aussi une double logique de reconnaissance scientifique et de proposition par les différents gouvernements. La structure du travail provoque automatiquement une sorte de démultiplication du nombre d'acteurs. Chaque groupe, en interaction avec le bureau et l'assemblée générale, précise la commande et définit le plan de son rapport, généralement sous forme d'une dizaine de chapitres. Chaque chapitre est confié à une équipe d'une dizaine de rédacteurs « principaux », dont deux sont chargés d'assurer la coordination du travail. Ces quelques trois cents auteurs, qui seront les signataires des différentes parties du rapport, demandent aussi la contribution de « contributeurs » qui sont invités à fournir des éléments : un paragraphe, une figure, le résumé d'une étude. Par ailleurs d'un cycle de rapports à l'autre, le renouvellement des auteurs est important, pour permettre à de jeunes scientifiques de s'y impliquer.

Le rapport est rédigé selon un protocole très strict, qui est destiné à minimiser les risques d'erreurs, mais aussi à garantir l'implication la plus large de la communauté scientifique, au-delà même des auteurs qui participent directement à l'écriture des rapports. Le texte initial est proposé à l'ensemble de la communauté scientifique,

puis à des experts gouvernementaux ; et tous les commentaires ou toutes les critiques qui en résultent sont soit pris en compte dans le texte, soit écartés, mais toujours sur la base d'un avis motivé, rendu public. Le GIEC a aussi mis en place des « éditeurs », des scientifiques dont le seul rôle, pour chaque chapitre est de vérifier le respect de l'ensemble de ces règles. Cette phase ouverte de critiques et de modifications du texte est essentielle car elle garantit qu'aucune source importante d'information (publiée) ne peut finalement être ignorée au cours des quatre itérations successives du rapport.

Un diagnostic solide mais insuffisant

Avec le recul de plus de 20 ans que nous avons maintenant, il est clair que l'attitude consensuelle et respectueuse des faits de la communauté scientifique donne aussi toute sa force au message qu'elle a porté. Le premier rapport du GIEC, écrit en 1990, reste essentiellement valable. Bien sûr, nous en savons plus, en partie d'ailleurs parce que le climat lui-même a évolué. Nous savons aussi situer les évolutions à venir dans le cadre de variations naturelles dont l'étude a aussi beaucoup progressé. Nous avons par exemple pu étudier de manière assez précise comment le climat a réagi à la réduction, à la suite de l'éruption du Mont Pinatubo en 1991, de l'énergie solaire absorbée par le système Terre. Nous savons aussi que depuis 30 ans, l'énergie envoyée par le Soleil vers la Terre a varié de 0,1% avec le cycle de 11 ans des taches solaires – une valeur faible par rapport à l'effet attendu des gaz à effet de serre, si elle n'est pas relayée par des processus amplificateurs dont l'existence fait encore débat. Notre connaissance des grands cycles biogéochimiques, et en particulier celui du carbone, a considérablement avancé. Le suivi satellitaire d'un très grand nombre de paramètres est devenu possible. Mais ce qui a été écrit il y a 20 ans reste vrai en majeure partie. Et en se limitant à ce qui était connu avec un haut niveau de certitude, la communauté scientifique a délivré un message suffisamment solide pour traverser les années, et suffisamment fort aussi pour fournir la justification d'une action politique de grande ampleur, décidée dès le premier sommet de la Terre à Rio en 1992, même si elle reste largement à concrétiser. Les deux derniers rapports, ceux de 2001 et 2007, ont évalué de manière plus précise les résultats des modèles en réponse à un ensemble de scénarios d'émission des gaz à effet de serre : ces scénarios cor-

respondent à des futurs possibles si aucune mesure politique forte n'est prise.

Les résultats en sont désormais bien connus. Le réchauffement simulé en 2100 s'inscrit dans une fourchette qui va de 2°C à 6°C environ, une fourchette large qui s'explique par une double incertitude sur la science et sur les émissions de CO₂ à venir, mais qui correspond dans tous les cas à des évolutions très fortes. Ce réchauffement à venir est plus intense dans les régions de hautes latitudes, en particulier en Arctique (ce qui commence à se vérifier clairement au niveau des tendances observées), ainsi que sur les continents. La structure des changements de précipitations suit une logique latitudinale, commune à tous les modèles, et qui commence, elle aussi, à se vérifier : dans un climat plus chaud, il pleut plus dans la région équatoriale, déjà la plus humide, moins dans les régions subtropicales qui ont tendance à se désertifier, et plus à nos latitudes. Aux hautes latitudes, les précipitations augmentent à nouveau. Il s'agit là d'une amplification des contrastes géographiques actuels. Elle dessine le contour de zones de risque, de zones vulnérables, mais qui restent très difficiles à ancrer géographiquement. A l'échelle d'une région, voire d'un continent, la dispersion des modèles reste la règle, ce qui correspond très souvent à l'incapacité de décider l'évolution future des systèmes de moussons, ou d'El Niño. Enfin dans tous les cas, la montée du niveau de la mer ajoute ses effets à ces évolutions.

Si ces évolutions sont désormais bien connues, et ont fourni le matériau même sur lequel s'est appuyée la conférence de Copenhague, l'impact des incertitudes qui demeurent est moins souvent mis en avant. Comment s'adapter à un changement en partie inévitable (quel que soit le respect des objectifs affichés à Copenhague), mais dont les contours sont aussi difficiles à déterminer localement ? La recherche des années à venir devra combler l'écart qui sépare encore une recherche orientée vers l'alerte climatique, d'une recherche qui aide à la prise de décision, au niveau local en particulier. Deux évolutions se dessinent :

(1) On peut d'abord espérer une amélioration de la qualité des prévisions numériques à venir. Trois facteurs peuvent y contribuer : l'amélioration de la résolution spatiale des modèles, une meilleure com-

préhension de certains processus clefs (nuages, par exemple, grâce à des campagnes ou des instruments satellitaires dédiés), mais aussi le réchauffement de la planète lui-même, qui lèvera, en se développant, certaines des incertitudes rémanentes.

(2) L'étude de la vulnérabilité des systèmes sociaux ou écologiques aux aléas climatiques, qui permet d'affiner la nature des risques et de mieux dessiner les stratégies de développement les moins risquées. Ces études sont nombreuses, désormais, et ce sont elles qui ont conduit à considérer 2°C comme le niveau de réchauffement que la communauté internationale cherche à ne pas dépasser. Ce sera difficile : cette valeur sera atteinte vers 2050 si rien n'est fait, et il faut anticiper les évolutions d'un gros bateau comme notre planète plusieurs décennies à l'avance.

C'est, bien sûr, aux politiques et aux citoyens de prendre les décisions nécessaires dans un contexte où les incertitudes liées au changement climatique sont multipliées par celles qui affectent les problèmes de ressources énergétiques, d'alimentation mondiale, de ressources en eau potable... Mais ce sera aussi le rôle de la science dans les années qui viennent, de progresser à un point qui permette de mieux éclairer ces choix difficiles.

Hervé Le Treut

*Directeur de l'Institut Pierre-Simon-Laplace,
Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie
et à l'Ecole polytechnique*

