

Évolution climatique : les modèles et leurs limites

Les modèles numériques constituent un outil incontournable pour étudier l'évolution future de notre environnement. Ce sont cependant des outils imparfaits car ils combinent une base physique très forte, avec des éléments d'empirisme inévitables, qui reflètent la complexité des milieux naturels et génèrent une incertitude sur les résultats. Malgré cela, les modèles laissent très peu de doutes sur la réalité du risque climatique associé à l'augmentation des gaz à effet de serre. En revanche, les modèles doivent encore progresser pour dimensionner les mesures pratiques à prendre.

L'environnement global de notre planète constitue un système d'une grande complexité, parce qu'il associe des éléments aux comportements très différents : fluides atmosphériques et océaniques, glaciers, ou sols continentaux. Ces milieux échangent continuellement de la matière, de l'énergie ou de la quantité de mouvement au travers de processus qui peuvent être physiques, chimiques, ou biologiques.

L'utilisation de modèles numériques décrivant ce système (que nous appellerons par la suite système climatique) est devenu indispensable pour un grand nombre d'applications : qu'il s'agisse d'en prévoir le comportement à court terme, ou encore d'évaluer l'impact des activités humaines à plus long terme. Le développement des modèles répond ainsi à un besoin social important, car ils constituent souvent les seuls outils qui peuvent éclairer des décisions politiques concernant l'environnement global de notre planète. Malgré l'usage largement partagé et médiatiquement très visible des modèles, la démarche qui sous-tend leur conception n'est pas toujours bien comprise, ce qui nourrit une méfiance diffuse, et conduit à remettre en cause périodiquement le bien-fondé des alertes de la communauté scientifique, en particulier concernant le caractère inéluctable d'un changement climatique si l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre se poursuit. A la décharge de ces sceptiques, la modélisation du système climatique peut sembler au premier abord un objectif impossible, à rebours des démarches scientifiques plus traditionnelles, puisqu'il s'agit de recréer la complexité du monde réel à partir des lois fondamentales de la physique ou de la mécanique. Par ailleurs, les lois de la mécanique des fluides sont non-linéaires, elles font interagir toutes les échelles spa-

tiales et temporelles. Ainsi il est bien connu que la circulation atmosphérique n'est pas prévisible de manière déterministe au-delà de quelques jours, parce que la croissance des petites échelles vient contaminer l'ensemble de la circulation. Comment croire alors que la modélisation numérique permette de recréer de manière réaliste et utile les éléments principaux des circulations atmosphériques et océaniques sur des périodes plus longues, de l'ordre du siècle ?

Des fondements physiques solides

En fait, en dépit d'une composante imprévisible et chaotique, les écoulements atmosphériques et océaniques présentent des éléments d'organisation très forts, ce qui rend pertinente leur modélisation numérique à l'échelle du globe. Un coup d'œil à n'importe quelle image satellitaire (figure 1) montre des structures spirales de plusieurs milliers de kilomètres associées aux dépressions de moyenne latitude. Dans la région intertropicale on peut distinguer une zone de montée de l'air, située principalement près de l'équateur, qui est associée à des pluies intenses, et des zones de descente, où l'air froid et sec qui vient des couches hautes de l'atmosphère détermine au contraire d'immenses zones désertiques. Deux facteurs essentiels sont à l'origine de cette organisation à très grande échelle. Le premier est le gradient de température entre le Pôle et l'Equateur. Celui-ci résulte en premier lieu d'une différence marquée du rayonnement solaire reçu en surface, en moyenne moins intense aux Pôles qu'à l'Equateur, même si les choses ne sont pas tout à fait aussi simple car une partie du rôle des circulations

Article proposé par :

Hervé Le Treut, letreut@lmd.jussieu.fr

Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), CNRS/ENS/Ecole polytechnique/Université Pierre et Marie Curie.

atmosphériques et océaniques consiste précisément à réduire ce gradient de température en apportant continûment de la chaleur de l'équateur vers les Pôles. L'autre élément d'organisation des circulations est la rotation de la Terre, qui induit des forces de Coriolis dont on peut montrer qu'elles constituent le terme principal qui équilibre les gradients de pression, qui traduisent eux-mêmes les différents processus de chauffage dans les équations de la dynamique de l'atmosphère ou des océans. On désigne cette propriété sous le nom d'équilibre géostrophique ; l'amplitude des autres forces d'inerties est alors très inférieure à celle de la force de Coriolis. Ce quasi-équilibre caractérise les écoulements atmosphériques ou océaniques les plus courants. Les fluides géophysiques ont par ailleurs une autre propriété extrêmement importante : ils sont stratifiés, c'est-à-dire que leur densité décroît fortement avec l'altitude. Ce sont les modifications de cette stratification qui fournissent l'énergie nécessaire à la mise en route des fluides atmosphériques et océaniques. Une analyse dimensionnelle des équations de la circulation montre alors que l'écoulement s'organise à une échelle horizontale privilégiée, dite longueur de Rossby, qui est de l'ordre du millier de kilomètres dans l'atmosphère, et de la dizaine de kilomètres dans l'océan.

La dimension des grandes cellules tropicales évoquées plus haut, dont la montée détermine la position des forêts équatoriales et la descente celle des grands déserts, correspond, elle, à des contraintes un peu différentes où l'équilibre géostrophique doit s'accommoder de la conservation du moment cinétique de l'air entraîné près de l'Equateur par la rotation de la Terre. D'autres facteurs organisent les écoule-

ments géophysiques à grande échelle : dans le cas des océans la localisation près des pôles des zones où l'eau de surface est suffisamment froide et salée pour plonger jusque dans l'océan profond, joue un rôle déterminant, tout comme la forme des bassins océaniques. Les montagnes ont du côté atmosphérique un rôle similaire, quoique moindre.

Il existe ainsi des principes physiques puissants qui déterminent l'échelle des mouvements atmosphériques et océaniques, pour une stratification (ou un mode vertical) donnée – ce que confirme l'observation de ces écoulements. C'est sur cette base que les modèles atmosphériques destinés à décrire le climat global ont retenu depuis l'origine une grille de résolution dont le pas spatial est de quelques centaines de kilomètres horizontalement, contre quelques dizaines de kilomètres pour les modèles océaniques, le maillage vertical de ces modèles ayant le plus souvent une résolution de quelques centaines de mètres au mieux, dans chacun des milieux, destinée à représenter les variations et discontinuités principales de la stratification. L'existence de ces échelles spatiales caractéristiques explique que les climatologues, les atmosphériciens en particulier, aient surtout utilisé le gain en puissance de calcul des dernières décennies pour augmenter la durée des simulations, plutôt que pour améliorer la résolution géographique. La prévision du temps à échéance de quelques jours, cependant, réclame une approche inverse et un accroissement de la résolution spatiale, parce qu'il est nécessaire de prévoir finement certains écoulements orographiques tels que le Mistral, et que cela peut aussi aider à augmenter la durée de validité des prévisions.

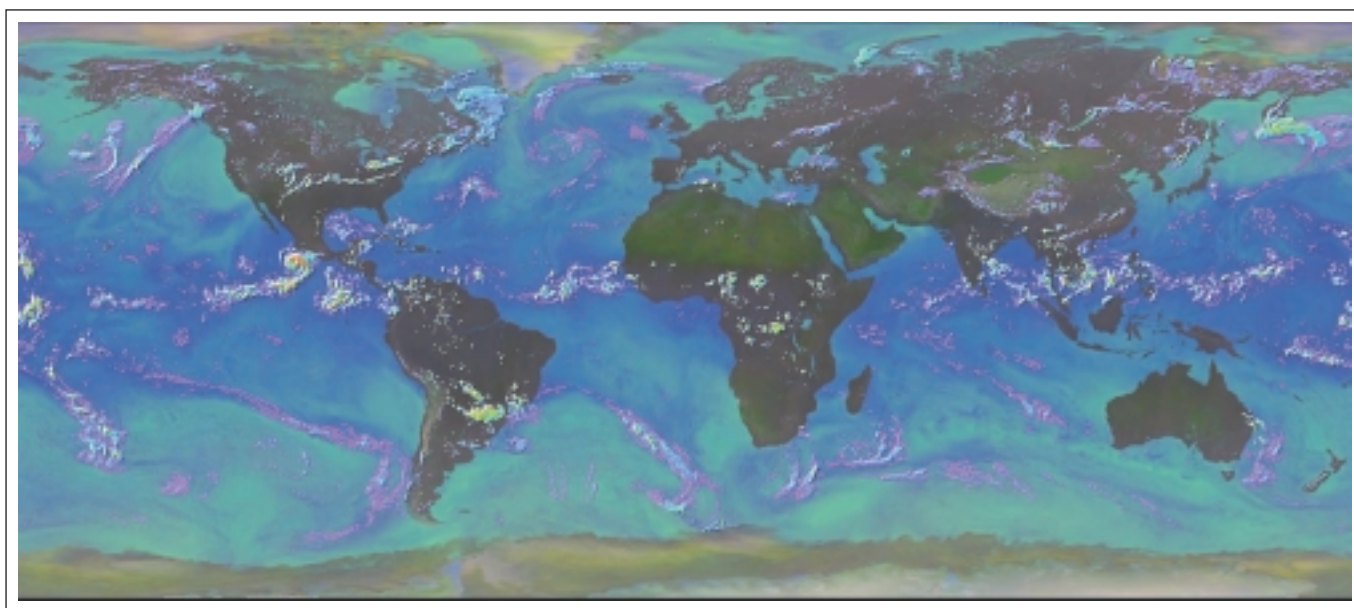


Figure 1 - Circulation atmosphérique vue au travers de l'eau condensée mesurée par un radar satellitaire. Il s'agit d'une image de synthèse réalisée par la NASA pour illustrer l'expérience TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission. Dans la troposphère, la température et le niveau de saturation en vapeur d'eau décroissent avec l'altitude : ce qui est visualisé ici correspond aux ascendances de l'air, qui conduisent à une condensation de l'eau atmosphérique.

Interactions entre échelles spatiales et paramétrisations

Les petites échelles ne jouent néanmoins pas un rôle neutre dans les écoulements atmosphériques et océaniques. Nous avons évoqué plus haut le rôle déterminant de la stratification en densité. Or l'épaisseur des deux couches de fluides est extrêmement mince : l'essentiel de la masse de l'atmosphère est concentrée dans les vingt premiers kilomètres, alors que la profondeur moyenne de l'océan est inférieure à quatre kilomètres : il en résulte que la part des circulations atmosphériques et océaniques qui contrôlent la stratification s'organise naturellement à des échelles horizontales et verticales de quelques kilomètres (pour les mouvements convectifs associés à la formation des cumulonimbus dans l'atmosphère, par exemple, ou pour les grandes cheminées de formation d'eau profonde dans l'océan). Les mouvements turbulents des couches limites de surface, du côté atmosphérique comme du côté océanique forment des tourbillons qui sont de l'ordre de la centaine de mètres. Le développement de la modélisation du climat, s'est donc effectué depuis plus de vingt ans selon une double démarche : d'une part représenter les mouvements de grande échelle de manière explicite, souvent en utilisant des équations qui filtrent certains modes instables de petite échelle (approximation hydrostatique, approximation quasi-géostrophique, filtrage des ondes de gravité) ; d'autre part représenter l'effet statistique des petites échelles sur l'écoulement – ce que l'on appelle la « paramétrisation » de ces échelles. Bien sûr cette approche suppose un découplage suffisant pour que les propriétés statistiques des petites échelles soient déterminables à partir des conditions atmosphériques ou océaniques à grande échelle – une propriété qui se révèle *a posteriori* assez bien vérifiée, mais qui constitue une limitation intrinsèque des modèles. Le développement de paramétrisations occupe ainsi une place importante dans nos disciplines. Il ne peut s'envisager sans l'observation détaillée des systèmes représentés, ce qui a entraîné la mise en place au fil des années de campagnes d'observations ciblées, par exemple de certains systèmes nuageux (stratus, cirrus, nuages convectifs de type cumulonimbus – par exemple associés à la mousson africaine, comme ce sera le cas dans la future campagne AMMA qui va occuper une part importante de la communauté française dans les années à venir), ou encore des effets du sol (végétation, relief, glace ou neige). De même des campagnes en mer importantes (POMME, dans l'Atlantique nord) ont été mises en place pour déterminer les conditions de mélange vertical dans les océans. Le développement de paramétrisations s'appuie aussi sur des approches plus théoriques et sur les résultats de modèles phénoménologiques de plus petite échelle, par exemple les modèles dits LES (Large Eddy Simulations), qui décrivent les couches limites.

Les modèles incluent aussi une représentation, elle aussi nécessairement simplifiée, des sources de chaleur : il s'agit de décrire la chaîne des processus qui permettent que l'énergie reçue du Soleil soit exactement compensée par l'énergie

émise par le système terre-océan-atmosphère. La température de surface du Soleil est de 6 000 °C environ et la longueur d'onde du rayonnement solaire s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge proche, c'est-à-dire d'environ 0,3 à 5 micromètres. La valeur de l'insolation au sommet de l'atmosphère (aux alentours de 1 370 W/m²) a été estimée dès le siècle dernier à partir des observatoires en altitude ; elle est désormais mesurée par satellite. Cette énergie solaire n'est pas absorbée dans sa totalité par la Terre : 30 % environ sont réfléchis vers l'espace, 50 % traversent l'atmosphère et chauffent le sol ou les océans, 20 % chauffent directement l'atmosphère. Pour rendre à l'espace l'énergie qu'elle reçoit du Soleil, la Terre émet elle aussi un rayonnement électromagnétique, dans le domaine infrarouge, c'est-à-dire dans une gamme spectrale allant de 5 à 100 micromètres. L'émission provient de la surface de la planète, mais aussi de certains gaz minoritaires de l'atmosphère – dits gaz « à effet de serre » – et des nuages. L'étude du transfert radiatif dans l'atmosphère constitue un problème physique assez bien compris, même s'il subsiste des incertitudes – par exemple en présence de nuages à la géométrie complexe. Le calcul des équations de transfert radiatif se fait dans les modèles au moyen de systèmes d'hypothèses consistant à intégrer le flux d'énergie sur des bandes spectrales larges, et sur l'ensemble des directions de propagations vers le haut et vers le bas. Il est alors impossible de traiter exactement le rôle radiatif des gaz qui absorbent le rayonnement dans des domaines spectraux très précis, même si les calculs des modèles climatiques sont validés par référence à des calculs détaillés qui, eux, prennent en compte toutes les raies spectrales une par une. Les équations du transfert radiatif dans l'atmosphère jouent aussi un rôle central dans l'observation satellitaire de la planète, et elles sont donc également vérifiées dans ce cadre.

Les multiples facteurs de complexité des systèmes naturels

La phase de développement des modèles atmosphériques ou océaniques que nous venons de décrire a été principalement le travail de physiciens ou de mécaniciens et elle s'est appuyée sur un corps d'équations qui sont formulées explicitement. Bien sûr, même à ce stade, l'usage des modèles a été sujet à des limitations que nous venons d'évoquer (non-linéarité, nécessité des paramétrisations). Mais depuis quelques années, la croissance considérable des moyens de calcul, a modifié les conditions d'usage et de définition des modèles, ce qui a introduit plusieurs révolutions successives, dont chacune a ouvert des domaines d'incertitude scientifique nouveaux.

La première de ces révolutions s'est produite il y a plus de 10 ans, sans être parfaitement achevée : les modèles atmosphériques et océaniques qui avaient été développés séparément ont été couplés (en association avec des modèles de la banquise), pour devenir des modèles unifiés de l'ensemble des enveloppes fluides de la planète.

Dans le même temps l'utilisation des modèles pour les études climatiques s'est clairement séparée du domaine de la prévision météorologique. Dans ce dernier cas les modèles sont intégrés à partir d'un état initial observé aussi réaliste que possible, et on cherche à ce que l'écoulement simulé soit le plus réaliste possible, tout au long de la simulation. On sait que cet exercice n'est possible que pour une durée de quelques jours. Mais si l'on continue au delà de cette échéance, l'intégration dans le temps du modèle climatique va l'amener à construire sa propre climatologie, c'est-à-dire sa propre statistique d'événements météorologiques et océaniques, que l'on caractérise par des moyennes, des variabilités à des échelles intrasaisonniers, saisonnières ou interannuelles, par la récurrence de situations extrêmes. Ce climat simulé reflète l'impact sur l'écoulement de facteurs tels que l'ensoleillement, les gaz à effet de serre ou la rotation de la Terre, mais il est indépendant des conditions atmosphériques de départ, qui sont oubliées après quelques jours de simulation ; il dépend partiellement des conditions océaniques initiales, ce qui pose un problème, car on les connaît mal.

Avec la reconnaissance de l'importance des processus chimiques et biologiques qui contrôlent la teneur atmosphérique en CO₂, en méthane, ou en aérosols, la communauté scientifique a été confrontée à un autre niveau de complexité et à une forme d'interdisciplinarité plus large. Elle a dû étendre le contenu des modèles, pour créer des « modèles du système Terre » qui incluent l'ensemble de ces processus. Cette évolution, encore inachevée, détermine un changement qualitatif dans la nature des modèles, qui deviennent nécessairement empiriques. Pour prendre un exemple, l'évolution de la photosynthèse en Amazonie dans un cas de réchauffement climatique, est déterminée par la compétition entre des centaines d'espèces végétales différentes. La modélisation ne peut plus alors s'appuyer sur des équations fondamentales.

Mais, quelles que soient les difficultés rencontrées, le travail de vingt ans de développement des modèles a désormais permis d'amener leur climatologie très près de la climatologie observée. Les modèles reproduisent non seulement des modes d'interaction complexe tels que l'oscillation couplée océan-atmosphère qui domine la variabilité tropicale (El Niño), mais aussi des climats très différents (le dernier maximum glaciaire il y a 21 000 ans, ou le climat un peu plus chaud appelé optimum climatique qui s'étend jusqu'il y a 6000 ans).

La prévision des variations climatiques futures

Il devient donc légitime d'utiliser les modèles pour essayer de simuler des scénarios concernant l'action de l'homme sur climat. Cette action peut prendre plusieurs formes (modification des propriétés du sol, émissions de poussière) mais l'effet dominant est celui des gaz à effets de serre. Ceci correspond à une réalité un peu paradoxale : la

vapeur d'eau (représentant 2 millièmes de la masse de l'atmosphère), le CO₂ (près de 10 fois moins), quelques gaz traces présents à des teneurs plus faibles encore (méthane, ozone), les nuages (condensât d'une fraction de la vapeur d'eau ne dépassant pas quelques pourcents) suffisent à produire un réchauffement de surface qui conduit la température de la planète de - 18 °C en moyenne (si elle n'était composée que d'oxygène et d'azote), à sa valeur actuelle de 15 °C. Ce réchauffement de 33 °C ne constitue d'ailleurs qu'une sous-estimation de l'effet radiatif des gaz à effet de serre : en effet l'atmosphère doit aussi maintenir une stratification verticale stable, qui limite le gradient vertical de température, et donc la température de surface. Nous sommes donc confrontés à un phénomène extrêmement sensible, que les activités humaines ont le pouvoir d'augmenter significativement, et ce, d'autant plus que certains gaz ont une durée atmosphérique très grande : le « temps de résidence » du CO₂ dans l'atmosphère (ou plus exactement, le temps de retour à un équilibre si l'on cesse d'en émettre) est de l'ordre du siècle. Le CO₂ s'accumule donc dans l'atmosphère et sa croissance est exponentielle. Un gaz comme le méthane a quant à lui une durée de vie de l'ordre de la décennie, certains fréons très stables de l'ordre du millier d'année.

Tenter d'évaluer des scénarios de changement climatique pour le futur a été entrepris depuis près de vingt ans avec des modèles et des approches de complexité croissante. Dans un premier temps les modèles étaient limités à une composante océanique très simple, une simple couche d'eau de 50 mètres, dont le temps de réchauffement donnait son inertie au système climatique. Ces modèles permettaient de prédire des variations climatiques qui dans les grandes lignes restent pertinentes. Le réchauffement est plus marqué vers les Pôles ou sur les continents, avec une valeur moyenne du réchauffement se situant dans une fourchette de 1,5 à 5 degrés Celsius. Au contraire la modification du système hydrique est plus importante dans les Tropiques, avec une tendance à l'exagération des tendances actuelles, et donc plus de pluie dans les régions humides, et plus de sécheresse dans les régions semi-arides (ce diagnostic étant à nuancer du fait du déplacement possible de ces zones sèches ou humides). Par la suite des modèles plus complexes ont été utilisés : introduction d'un océan complexe, scénarios d'augmentation progressive du CO₂ et des autres gaz à effet de serre, ces scénarios s'inspirant désormais de modèles socio-économiques (évolution de la démographie, du mode de croissance) pour établir des évolutions possibles des émissions de gaz à effet de serre. Ces résultats confirment ceux des modèles plus simples. La réponse océanique peut modifier la répartition géographique de certains processus (arrêt de la circulation Nord-Atlantique et moindre réchauffement dans cette région, augmentation des événements El Niño), mais les tendances à plus grandes échelles restent les mêmes. Il s'y ajoute une élévation du niveau de la mer de quelques dizaines de centimètres résultant de la dilatation des océans et de la fonte des glaciers de montagne.

Comprendre les différences entre modèles

Ces résultats restent néanmoins tributaires d'incertitudes assez larges, qui peuvent paraître surprenantes pour le non spécialiste. Dans son rapport 2001, le GIEC (groupeement intergouvernemental pour l'évolution du climat) prévoyait pour l'an 2100, un réchauffement de 2° à 6 °C degrés : le résultat dépendant à la fois des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ou de la sensibilité des modèles utilisés, chacun de ces deux facteurs expliquent en gros une moitié de la dispersion des résultats (figure 2). Les scénarios d'émission correspondent à une tentative, sinon de prévoir les activités humaines, du moins de décrire un certain nombre de futurs possibles – il est donc heureux qu'une incertitude subsiste, c'est celle du libre choix de nos sociétés. On peut être plus surpris que différents modèles (il en existe une quinzaine à l'échelle de la planète) donnent des résultats très différents. En fait nous avons vu plus haut que les modèles représentaient assez bien les grandes échelles horizontales, mais de manière statistique ou paramétrique les mouvements de plus petite échelle qui contrôlent la stratification verticale. Or le forçage radiatif par les gaz à effet de serre est en premier lieu une perturbation de cette stratification, avec un réchauffement des dix kilomètres les plus bas de l'atmosphère (la troposphère) et un refroidissement de la stratosphère. Il n'est donc pas étonnant que les modèles ne soient pas parfaitement adaptés à cette situation, et que selon les approches retenues pour la représentation des échelles turbulentes ou convectives, ils puissent donner des résultats d'ampleur différente. Cette situation a été analysée, et a montré que l'élément le plus sensible est l'effet de la vapeur d'eau ou celui des nuages.

Dans les modèles, l'effet de la vapeur d'eau multiplie par deux l'amplitude de la réponse climatique : c'est donc un effet considérable, qui a très vite attiré l'attention de la communauté scientifique mais aussi de certains groupes de pression. Dans un premier temps des données satellitaires ont semblé offrir une validation simple. Une mesure du rayonnement infrarouge au sommet de l'atmosphère permet de déduire un « indice d'effet de serre » qui est très bien corrélé

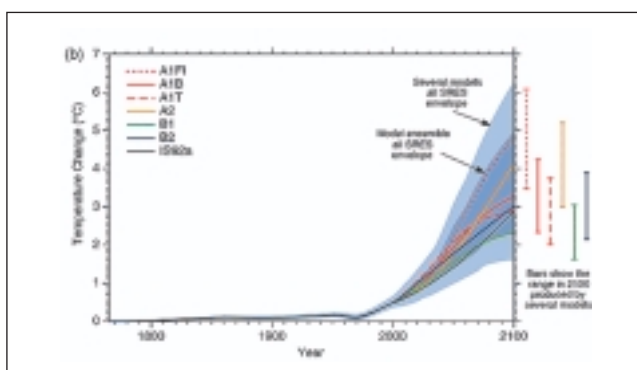


Figure 2 - Scénarios d'évolution de la température jusqu'en 2100 (Groupe Intergouvernemental pour l'Evolution du Climat, 2001). Chaque barre de couleurs renvoie à un scénario socio-économique donné, dont les conséquences climatiques sont évaluées par un ensemble de modèles.

aux valeurs de la température de surface. Après analyse plus poussée, la situation est apparue moins simple qu'anticipé. En particulier, les régions tropicales sont sèches sur de larges étendues, au dessus des déserts et des océans adjacents, où l'air est donc loin de son niveau de saturation. Dans ces régions ce ne sont pas les fluctuations de la température, mais celles de la dynamique de l'atmosphère qui contrôlent l'humidité : si le mouvement descendant qui amène l'air sec depuis les hautes couches de l'atmosphère vers ces régions désertiques tend à s'accroître, alors l'effet de serre lié à la vapeur d'eau pourrait diminuer : la possibilité d'une réaction négative a ainsi été soulevée par Richard Lindzen, du MIT. Les modèles ne confirment pas ce scénario, mais comment vérifier leur validité ? La communauté scientifique a dû entreprendre un travail fin, consistant à évaluer les modèles dans le cadre des changements climatiques observables (variations saisonnières, variations interannuelles associées à des phénomènes tels que El Nino, ou âge glaciaire). La transposition de ces situations au cas du réchauffement global est toujours indirecte, parce que les changements de circulation atmosphérique ont une localisation différente, mais dans tous les cas la présence d'une réaction positive de vapeur d'eau est nécessaire pour que les simulations soient réalistes.

Ce type de démarche doit désormais être appliqué au cas, plus complexe encore, des nuages : ces derniers réchauffent le climat par effet de serre, le refroidissent par réflexion du rayonnement solaire. A cela s'ajoute un dégagement de chaleur latente qui est le premier terme de chauffage direct de l'atmosphère, particulièrement important dans les Tropiques. L'importance relative de ces processus dépend de caractéristiques nuageuses qui peuvent varier avec le climat : hauteur, forme, microphysique (taille des gouttes ou des cristaux). La neige, la glace, de manière générale l'état des sols, constituent aussi des facteurs de modification de la réponse climatique qui restent difficiles à évaluer. Les données satellitaires qui doivent permettre une évaluation plus fine des modèles commencent déjà à exister, et d'autres le seront à bref délai : c'est ainsi que plusieurs instruments actifs (radar, lidar), et un radiomètre capable de mesurer la lumière solaire réfléchi sous plusieurs angles et plusieurs polarisations (POLDER) seront disponibles d'ici deux ans. Les données recueillies permettront d'évaluer la variation d'un grand nombre de paramètres nuageux (ou liés aux aérosols) dans le cadre de fluctuations climatiques naturelles, première étape pour en évaluer le rôle dans le cadre des changements climatiques futurs.

Conclusion : le caractère incontournable de la modélisation

En dépit de toutes ces incertitudes plusieurs facteurs montrent que l'apport des modèles ne peut être négligé. Tout d'abord, malgré la sophistication croissante des modèles la fourchette dans laquelle se situent les résultats évolue peu. De plus, aucun modèle ne se montre insensible à l'augmentation des gaz à effet de serre. Personne n'a réussi à mettre en évi-

dence de rétroaction négative suffisamment forte pour modérer efficacement la réponse climatique, dans le cadre fortement contraint par les lois de conservation de la physique que constituent les modèles. Ce résultat recevrait pourtant certainement une publicité considérable. Le modèle apparaît ainsi comme un outil de réfutation des hypothèses : dès le début du vingtième siècle un savant comme Arrhenius avait prévu un réchauffement de quelques degrés si les gaz à effet de serre continuaient à augmenter. Au fil des années, la complexité des processus réels a été prise en compte, et l'éventail des futurs possibles s'est ouvert. Mais rien n'est revenu mettre en cause la prévision initiale, et la charge de la preuve est désormais entièrement retournée : le dossier scientifique est désormais instruit suffisamment en profondeur pour que ce soit à ceux qui prétendent que le climat ne peut pas changer d'apporter des éléments à l'appui de leurs assertions.

En fait, en l'état, les modèles sont plutôt précautionneux, et n'intègrent pas tous les éléments possibles de déstabilisation du climat. Par exemple ils n'intègrent que très rarement une représentation du cycle du carbone. Deux tentatives préliminaires réalisées à l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace – Paris) et au Hadley Centre (Grande-Bretagne) ont montré que dans un climat chaud la capacité de la végétation à stocker de la matière organique se trouvait diminuée, tout comme la capacité d'absorption des océans, ce qui conduit à une augmentation plus rapide du CO₂ atmosphérique et du réchauffement, effet qui reste ignoré dans la plupart des scénarios climatiques futurs. De même les effets mal connus d'un réchauffement sur la production de méthane ne sont pas pris en compte (en particulier en cas de dégel du pergélisol, c'est-à-dire du sol qui est actuellement gelé toute l'année et emprisonne du méthane).

Dans le futur l'usage des modèles va se modifier. La question « le climat peut-il changer ? » a en grande partie reçu réponse : nous sommes déjà dans une situation où l'on ne sait pas expliquer le réchauffement des dernières décennies autrement que par l'effet de serre. L'enjeu des recherches consiste de plus en plus à aider les négociations internationales autour du problème de l'effet de serre. Par exemple, mieux apprécier l'effet comparé des différents gaz, permet de prendre des mesures plus justes pour en limi-

ter les émissions. De même nous savons que, au fur et à mesure que le climat changera, nos incertitudes sur les prévisions futures se réduiront : une description, même approchée, de cette évolution, permet de mieux adapter à la fois le calendrier et l'ampleur des mesures qui seront prises.

Il y a là un enjeu stratégique d'autant plus fort que la science peut encore évoluer rapidement. D'abord à cause de l'observation satellitaire : le nombre d'instruments qui auscultent la Terre augmente. À côté des mesures régulières, opérationnelles, il apparaît une variété importante d'instruments de recherche qui donnent accès à une palette croissante de paramètres et de processus. Par ailleurs la croissance continue des moyens de calcul nous amène désormais tout près d'un seuil qui paraissait inaccessible pour les modèles globaux il y a encore quelques années : celui où il deviendra possible d'atteindre un maillage horizontal de quelques kilomètres et donc de résoudre explicitement les échelles convectives de redistribution verticale de l'eau et de la chaleur. Cette perspective est désormais à portée de main avec le Earth Simulator japonais, actuellement le calculateur le plus rapide du monde.

Le réchauffement qui nous attend en 2100 (de 2 à 6 degrés de réchauffement en moyenne) est considérable si l'on sait que ce qui nous sépare d'un âge glaciaire est 5 degrés environ (vers le froid !). Pour stabiliser le climat, il faudrait diminuer par deux ou trois les 6 à 7 milliards de tonnes de carbone émises chaque année par les activités humaines – et donc se limiter à une émission par individu d'une demi-tonne (ce qui est le lot actuel des chinois, contre 2 à 3 pour les européens, et 6 pour les américains du Nord). Ces objectifs ne sont pas réalistes dans les conditions actuelles. Ce qui sera réalisé ne sera qu'une partie de l'effort nécessaire (ce qui reste une contribution intéressante, car susceptible de diminuer ce qui constitue le danger majeur du changement climatique à venir : sa vitesse), mais il sera négocié très durement.

Dans la démarche des modélisateurs on est ainsi passé d'une démarche purement académique destinée à bien comprendre le fonctionnement de notre environnement, à une approche plus large, nécessaire pour argumenter la prise de décisions. La complexité du monde naturel fixe des limites à cet exercice, mais elle indique aussi que nous ne serons probablement jamais en mesure de contrôler l'évolution de notre planète, si elle commence à nous échapper.

Pour en savoir plus

Hervé LE TREUT et Jean-Marc JANCOVICI, Effet de serre : allons-nous changer le climat ?, *Editions Champs, Flammarion*, 2004.