



# Les modèles de climat\*

Éric Blayo, Laurent Debreu et Christine Kazantsev

Université Grenoble-Alpes et Inria

Montée du niveau des océans, modification des régimes de pluie, intensification de phénomènes météorologiques extrêmes, fonte des glaces, conséquences sur la faune et la flore : évaluer l'ampleur et les conséquences du changement climatique en cours, et déterminer l'impact de futurs choix politiques et économiques, sont des enjeux actuels majeurs. Il est nécessaire pour cela de décrire et comprendre le « fonctionnement » du climat, notamment par l'étude des climats passés et par la mise au point de modèles permettant d'effectuer des projections dans le futur. La complexité du système climatique et la diversité des questions le concernant amènent pour cela à faire appel à de nombreuses branches des mathématiques.

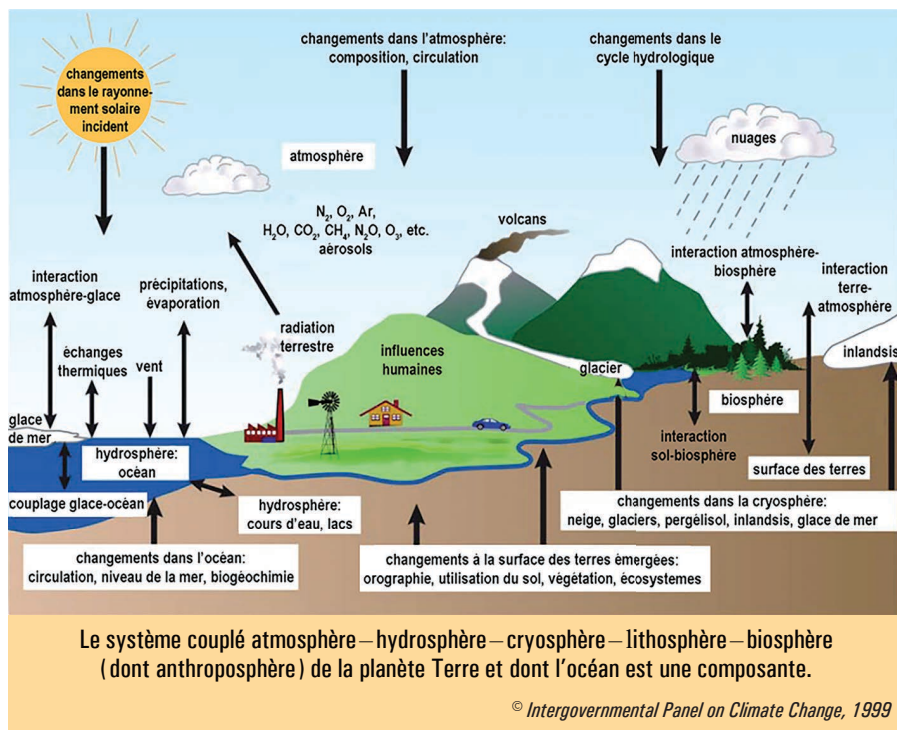
## Des mathématiques pour décrire la nature

Décrire le climat, c'est tout d'abord expliciter le fonctionnement de ses principales composantes : l'atmosphère et l'océan, bien sûr, qui sont au cœur du système, mais aussi la cryosphère (calottes polaires, banquises, glaciers, surfaces enneigées), les cours d'eau, les sols, la biosphère... Ceci est réalisé au travers de modèles, c'est-à-dire d'équations mathématiques traduisant les principes qui régissent l'évolution du système : lois de conservation (par exemple masse ou énergie), transformations chimiques, relations entre espèces... Certaines sont connues depuis les travaux de grands scientifiques du passé, comme Leonhard Euler (1707–1783), Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830), Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836), George Gabriel Stokes (1819–1903), Gustave Gaspard Coriolis (1792–1843) ou Joseph Valentin Boussinesq (1842–1929).

Aujourd'hui, les lois de comportements de l'atmosphère et de l'océan sont assez bien connues. C'est par contre moins vrai pour celles régissant la glace, la biogéochimie marine ou encore la végétation terrestre, même si la connaissance progresse sans cesse. De plus, au-delà de la description de chacun de ces « compartiments », il faut aussi expliciter leurs interactions :

\* Cet article est une version mise à jour d'un texte publié en décembre 2013 sur le site [interstices.info](http://interstices.info)

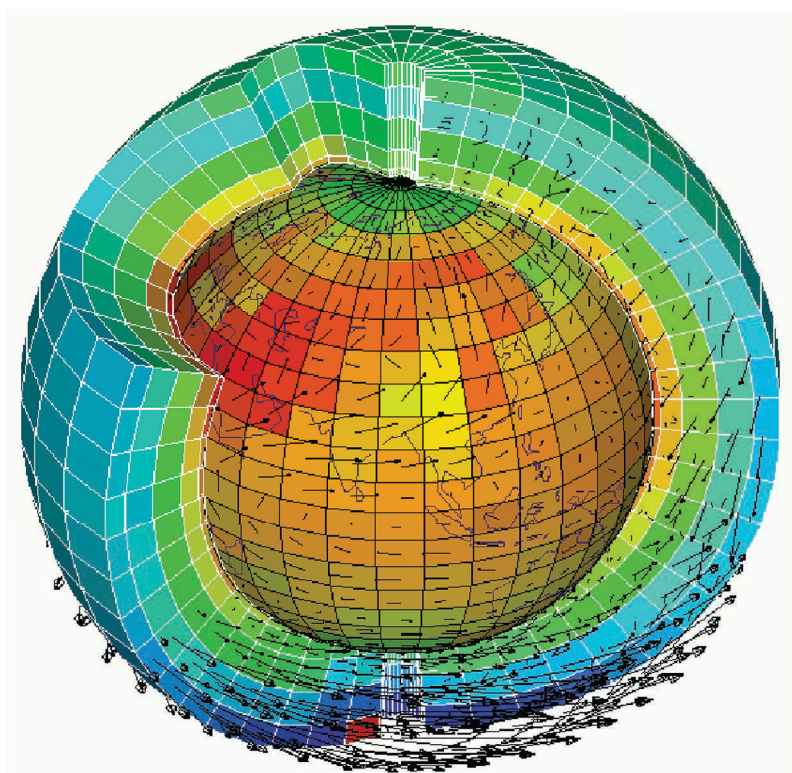
échanges d'énergie, d'eau, de carbone... Ces interactions sont souvent très complexes, et il reste encore pour beaucoup d'entre elles une grande marge d'incertitude quant à leur mise en équations.



## Le climat, un système dynamique sophistiqué à l'extrême

De nombreux modèles ont été développés pour décrire le climat. D'un point de vue mathématique, il s'agit de *systèmes dynamiques non linéaires*, domaine dont la théorie a été initiée notamment par Henri Poincaré (1854–1912). À vrai dire, on ne sait analyser les propriétés mathématiques des modèles de climat que pour des cas extrêmement simplifiés, qui n'ont que peu de choses à voir avec la réalité. Il est cependant généralement admis que le climat est un système dynamique présentant plusieurs *bassins d'attraction* (régimes d'équilibre ou de quasi-équilibre), potentiellement très différents les uns des autres, et entre lesquels des transitions abruptes seraient possibles. Le risque d'un tel basculement du régime actuel vers un autre régime inconnu est souvent évoqué lorsque l'on envisage des scénarios catastrophes, comme par exemple l'arrêt du Gulf Stream sous l'effet d'importants apports d'eau douce en mer du Labrador dus notamment à la fonte des glaces du Groenland.

Les modèles mathématiques de climat sont donc constitués de systèmes d'équations traduisant le comportement de chaque «compartiment» (atmosphère, océan...) ainsi que les interactions entre ces compartiments. La complexité de ces modèles est telle qu'il est hors de question de les résoudre de façon exacte. Par contre, on peut en chercher des solutions approchées (mais pas approximatives!) grâce aux techniques de *simulation numérique* sur ordinateur. L'idée de base consiste à définir un *maillage* de chaque composante (par exemple, découper l'atmosphère en «un grand nombre de briques» de quelques kilomètres de côté) et à approcher les équations de départ à l'intérieur de chaque maille en ne faisant plus intervenir que les quantités physiques dans les mailles voisines (on parle de *discrétisation*). Ainsi, la dérivée selon la direction  $x$  de la température au centre de la maille numéro  $i$  sera remplacée par un taux d'accroissement calculé à partir des températures dans les mailles de gauche ( $i-1$ ) et de droite ( $i+1$ ), par exemple.



La Terre maillée : maillage tridimensionnel de la composante atmosphérique d'un modèle de climat. Les couleurs représentent la température, et les flèches, le vent.

© Vincent Landrin, d'après Laurent Fairhead/LMD/CNRS

On remplace donc les équations continues initiales, très complexes, et contenant de nombreuses dérivées, par un grand système d'équations dont les inconnues sont « seulement » les variables physiques (température, vitesse, pression, concentrations chimiques...), et qui peut être résolu par ordinateur. Les mathématiques appliquées interviennent ici à plusieurs niveaux : pour faire en sorte que les solutions des équations discrétisées au sein de chaque composante soient une « bonne » approximation des solutions des équations de départ, pour coupler de façon cohérente ces composantes, ou encore pour résoudre efficacement le très grand système discrétisé.

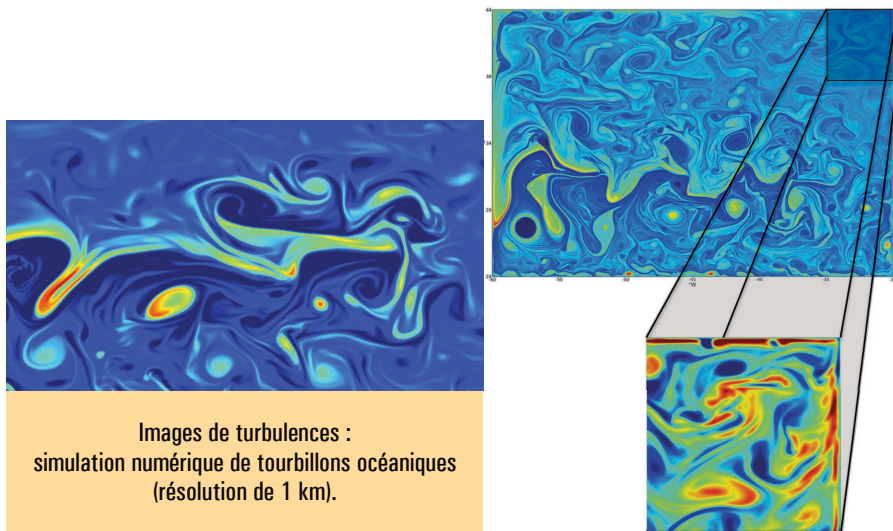
La mise en œuvre informatique de tels modèles est un véritable défi de calcul scientifique. Le comportement du système climatique, même à grande échelle, est en effet largement influencé par les phénomènes de plus petite échelle. Il est donc théoriquement nécessaire d'utiliser les modèles avec une résolution spatiale suffisamment fine. Idéalement, celle-ci devrait être de l'ordre de quelques kilomètres pour l'atmosphère, et être encore plus fine pour l'océan. Mais la taille des systèmes à résoudre, et donc le nombre d'opérations à effectuer, dépasseraient alors très largement les capacités des plus puissants supercalculateurs actuels. La résolution des modèles climatiques est donc fixée pour l'instant, et le sera encore pendant de nombreuses années, en fonction de la puissance de calcul disponible. Elle demeure à l'heure actuelle relativement faible : de l'ordre de 50 à 100 km sur l'horizontale pour l'atmosphère et l'océan, et quelques dizaines à centaines de mètres sur la verticale. Les plus fines échelles spatiales ne sont donc pas présentes dans les modèles, et leurs effets sur le climat à plus grande échelle ne peut alors qu'être simulé de façon imparfaite, au moyen de termes *ad hoc* artificiellement ajoutés aux équations.

Mais même avec cette résolution insuffisante, les modèles doivent calculer l'évolution de plusieurs dizaines (voire centaines) de millions de variables, sur des durées de plusieurs dizaines d'années, avec une fréquence de l'ordre de quelques minutes ou dizaines de minutes, ce qui représente un volume de calcul gigantesque.

## Comportement statistique du temps et projections climatiques

Au-delà de la simulation des climats passés, un intérêt majeur de ces véritables monstres numériques que sont les modèles climatiques est bien évidemment la prévision du climat futur. Il est intrinsèquement impossible de prévoir la météo au-delà d'une échéance de l'ordre de quinze jours. C'est le fameux *effet papillon*, rendu célèbre par Edward Norton Lorenz (1917–2008), qui illustre le caractère fondamentalement chaotique de la dynamique de l'atmosphère. Il en est de même d'ailleurs pour la dynamique de l'océan, sur des échéances toutefois un peu plus longues.

Cela étant dit, le comportement statistique (c'est-à-dire le climat) est, lui, tout à fait prévisible plusieurs dizaines d'années à l'avance. Dans l'idée, cela est du même ordre que prévoir précisément l'évolution de la température moyenne dans une casserole d'eau sur une cuisinière à gaz selon le réglage de la flamme, alors que l'on est incapable d'anticiper le comportement exact de chaque molécule.



Images de turbulences :  
simulation numérique de tourbillons océaniques  
(résolution de 1 km).

© Pierre-Antoine Boutier, 2014, thèse de doctorat de l'université de Grenoble

Être capable de prévoir le climat futur suppose au préalable d'être capable de reproduire le climat passé. Les modèles numériques sont donc réglés et validés en comparant leurs résultats aux observations disponibles, notamment celles, nombreuses, des décennies récentes. Une fois mis au point, ils peuvent alors fournir des projections sur les évolutions possibles du climat actuel dans les décennies, voire les siècles, à venir.

Ces études sont coordonnées au niveau international par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Créé en 1988 par l'ONU, il fournit régulièrement un rapport de synthèse sur les connaissances scientifiques concernant le changement climatique (cinq rapports ont été publiés entre 1990 et 2014, le sixième est prévu pour 2021–2022). Plusieurs « futurs possibles » des sociétés humaines (développement économique et démographique, choix énergétiques, évolution des comportements individuels) sont traduits en termes de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Les centres de recherche de par le monde (plus de vingt pour le prochain

rapport) simulent alors avec leurs différents modèles les évolutions climatiques qui en résulteraient. Une synthèse globale est ensuite réalisée afin de dégager des tendances fiables, et de quantifier les incertitudes autour de ces tendances. Cette synthèse requiert d'ailleurs une méthodologie statistique sophistiquée : comment synthétiser de manière cohérente les résultats de plusieurs dizaines de simulations climatiques ?

À l'heure actuelle, il y a globalement convergence entre ces modèles concernant l'évolution à l'échelle planétaire. Par contre, préciser les futurs changements climatiques à l'échelle d'un pays ou d'une région demeure extrêmement difficile, du fait de l'influence locale du caractère chaotique de la météorologie.

Extrêmement active à l'échelle internationale, la recherche en sciences du climat a conduit à des progrès remarquables ces dernières années. Les travaux, souvent fondamentalement pluridisciplinaires, font appel à une large palette de mathématiques : théorie des systèmes dynamiques, méthodes statistiques, analyse numérique, calcul scientifique... Pour les années à venir, de grandes questions demeurent : projections climatiques à l'échelle régionale et à échéance de dix ou vingt ans, modélisation des impacts du changement sur les espèces vivantes ou sur l'économie... La contribution de scientifiques d'horizons très divers est absolument nécessaire pour relever ces défis, et les mathématiciens ont un rôle à y jouer.

**É. B. – L. D. – C. K.**

#### Pour en savoir (un peu) plus :

***Chaos.*** Aurélien Alvarez, Étienne Ghys et Jos Leys, 120 mn, 2013, film disponible en ligne.

***Le climat à découvrir : outils et méthodes en recherche climatique.*** Sous la direction de Catherine Jeandel et Rémy Mosseri, CNRS Éditions, 2011.

***Le climat en équations.*** Éric Blayo, *Interstices*, 2013

« Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France. » [meteofrance.fr/climat-passe-et-futur](http://meteofrance.fr/climat-passe-et-futur).

« The Intergovernmental Panel on Climate Change. » <https://www.ipcc.ch> (en anglais).

