



CLIMAT

Modéliser pour comprendre et anticiper

ÉDITO

p. 1

LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

- Comment mettre l'atmosphère dans des petits cubes ? p. 2
- Comment mettre l'océan dans des petits cubes ? p. 4
- Comment représente-t-on les surfaces continentales dans les modèles de climat ? p. 6
- Quel est le rôle de la cryosphère dans l'équilibre climatique et sa modélisation ? p. 8
- Qu'est-ce qu'un forçage climatique ? p. 10
- Pourquoi le climat varie-t-il ? p. 12
- Comment mettre en œuvre les nombreux calculs requis par les modèles de climat ? p. 14

LES MODÈLES, OUTILS DE COMPRÉHENSION DU CLIMAT OBSERVÉ

- Quelles sont les méthodes d'évaluation et de validation des modèles climatiques ? p. 16
- Qu'apprend-on des paléoclimats ? p. 18
- Si le climat du dernier millénaire m'était conté ? p. 20
- Peut-on détecter et attribuer les changements climatiques observés au cours du dernier siècle ? p. 22

- Comment peut-on avoir confiance dans les résultats de modèles imparfaits ? p. 24
- Comment affiner les scénarios climatiques globaux sur l'Europe, la Méditerranée ou la France ? p. 26

LES MODÈLES, OUTILS DE PRÉVISION

- Quels sont les fondements de la prévisibilité climatique ? p. 28
- Que nous disent les modèles quant au climat des décennies à venir ? p. 30
- Comment décrire les événements extrêmes et leur évolution future ? p. 32
- Le cycle du carbone peut-il devenir fou ? p. 34

ZOOM SUR 4 MÉTIERS

- Physicienne du climat p. 36
- Ingénieur de recherche en calcul numérique haute performance pour le climat p. 37
- Ingénieur de recherche en développement et déploiement d'applications p. 38
- Passeur de connaissances p. 39

GLOSSAIRE

p. 40

Observer, formuler des hypothèses, conceptualiser, comprendre... au delà des socles classiques de la recherche, les sciences du climat ont aussi la difficile tâche d'anticiper l'avenir. Dans ce cadre, les rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) sont des rendez-vous importants. Ils permettent de synthétiser les connaissances sur la variabilité observée du système climatique mais aussi de présenter les futurs possibles selon différents scénarios socio-économiques. La modélisation du système climatique est l'un des piliers de cette œuvre collective à laquelle contribuent des chercheurs d'horizons et d'expertises très variés du fait de la complexité et de la diversité des processus physiques, dynamiques, chimiques et biologiques mis en jeu. Les simulations numériques requises mobilisent les supercalculateurs les plus puissants et génèrent des quantités considérables de données qui sont ensuite utilisées par diverses communautés pour des études sur les impacts climatiques.

Le programme mondial de recherche sur le climat assure la coordination au niveau international par l'organisation périodique d'exercices de comparaison de modèles (CMIP) qui servent de support scientifique aux rapports du GIEC. Au niveau national, la coordination repose sur le projet MISSTERRE soutenu par le programme inter organisme LEFE et par les centres de calcul du GENCI et de Météo-France. MISSTERRE rassemble les laboratoires de modélisation du Cerfacs, du CNRM-GAME et de l'IPSL et leurs partenaires du LGGE et de Louvain-la-Neuve en Belgique. Il offre un cadre de partage et d'échange pour le développement et l'évaluation des modèles climatiques français, la réalisation des simulations des climats passés et futurs, leurs analyses et interprétations. Écrit dans ce cadre, ce livret présente, de manière accessible à un large public, les fondamentaux et les limites de la modélisation du climat ainsi que les conclusions majeures tirées de l'analyse des simulations produites au cours de la 5^{ème} édition de CMIP par les équipes françaises. Son écriture sous forme de sujets-questions repose sur la contribution d'une quarantaine de chercheurs reflétant la nature intrinsèquement multidisciplinaire des sciences du Climat. S'y ajoutent quelques portraits de chercheurs qui illustrent la diversité de la communauté MISSTERRE. Cet ouvrage insiste sur la participation essentielle des organismes de recherche au plan national et souligne l'importance de poursuivre des recherches pour améliorer la compréhension du système climatique et des effets de l'influence de l'homme sur son évolution passée et future.



COMMENT METTRE L'ATMOSPHÈRE DANS DES PETITS CUBES ?

CONTRIBUTEURS

Michel Déqué
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Frédéric Hourdin
LMD/IPSL

Bien que soumise à des lois physiques très complexes, on peut représenter la dynamique de l'atmosphère en la découpant en « cubes ». Ensuite, à l'aide d'ordinateurs puissants, on peut simuler son évolution et la façon dont elle interagit avec les autres composantes climatiques.

Les lois de la physique gouvernant l'atmosphère sont connues depuis longtemps (découvertes par Pascal, Newton...), mais il est impossible de les résoudre de façon exacte. Il faut attendre l'arrivée des ordinateurs, après la deuxième guerre mondiale, pour les calculer numériquement et passer d'une approche plutôt descriptive à une approche plus prédictive. La résolution numérique des équations consiste à diviser le milieu continu qu'est l'atmosphère en un grand nombre de petits volumes

dans lesquels les variables caractéristiques interagissent entre elles suivant les lois physiques qui les gouvernent. Le découpage volumique, ou maillage, se fait à la fois sur la verticale (découpage en tranches entre le sol et une altitude d'environ 30 km) et sur l'horizontale. Le problème est délicat car il n'existe pas de méthode satisfaisante pour peigner une sphère. Par exemple, le découpage selon les latitudes et longitudes, utilisé dans le **modèle numérique*** de climat de l'IPSL

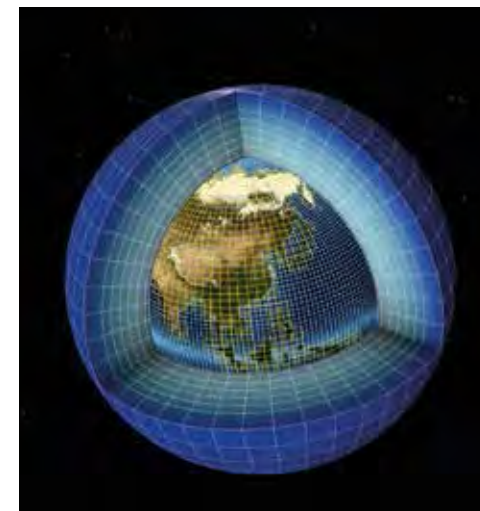
Les réanalyses atmosphériques

Les réanalyses atmosphériques sont des simulations climatiques dans lesquelles les observations de toute nature (stations météo, ballons-sondes, satellites...) sont intégrées dans le modèle et le contraignent à reproduire au mieux l'évolution temporelle observée des variables météorologiques. Les réanalyses permettent d'obtenir une estimation de grande qualité de la variabilité climatique sur le siècle dernier sur l'ensemble de la planète. Leur pertinence s'est améliorée notablement avec la prise en compte des produits satellites depuis les années 1980.

nécessite des traitements particuliers aux pôles où les mailles deviennent très déformées. Ce problème est évité dans le modèle CNRM-Cerfacs en passant dans une base finie de fonctions continues sur la sphère (méthode dite spectrale), mais d'autres inconvénients subsistent. La résolution numérique nécessite aussi un découpage en temps de l'évolution des variables (vent, température, humidité...) qui est calculée de manière discrète (par exemple toutes les 30 mn).

Une fois le problème ramené à une suite finie de calculs, des opérations sont appliquées pour faire évoluer les variables d'un petit volume (typiquement de l'ordre de 200 km x 200 km x 1 km pour un modèle climatique) d'un pas de temps à l'autre. On distingue deux étapes : la partie « dynamique » qui consiste à transporter les variables dans l'espace au gré des vents (équations de Navier

Stokes) et la partie « physique ». Celle-ci traite, entre autres, le chauffage de l'atmosphère par le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge réémis par la Terre, dont la répartition respective met en mouvement l'atmosphère dans le modèle comme dans le monde réel. Il faut enfin représenter, au travers de « paramétrisations » les processus qui se déroulent à une échelle plus petite que celle des volumes du maillage (tourbillons, nuages, orages...) et peuvent avoir un effet à plus grande échelle. Ces paramétrisations, basées sur des lois physiques, s'appuient sur de nombreuses mesures de terrain ou sur des modélisations plus fines d'un processus particulier, leur conférant ainsi un caractère empirique. Deux modèles français qui diffèrent par leur physique et leur maillage, participent aux grands exercices coordonnés de simulations du climat passé et de projections climatiques. Le modèle CNRM-CM5 est très proche de celui utilisé en météorologie par Météo-France. En mode clima-



Une erreur classique

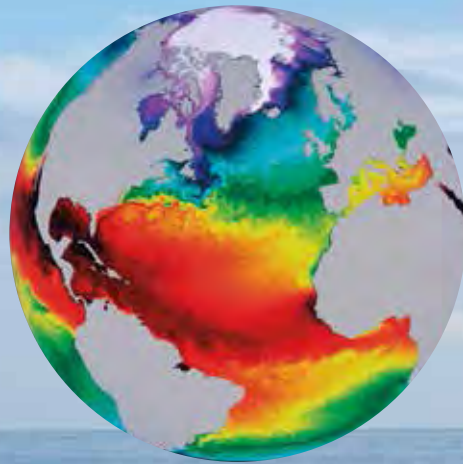
« Les nuages n'existent pas dans les modèles ! »

Même si les nuages ne peuvent pas être représentés individuellement car ils sont souvent plus petits que le maillage, la représentation de leur comportement collectif au travers de paramétrisations est au contraire un point clé de la modélisation du climat.

tique, le modèle simule des centaines d'années et on cherche à reproduire les climats moyens et la statistique des entités météorologiques (tempêtes, vagues de chaleur...), alors qu'en prévision du temps, on cherche à prévoir la séquence temporelle de ces entités sur une dizaine de jours d'échéance. Le modèle de l'IPSL, pour sa part, est décliné aussi dans des versions adaptées à d'autres planètes du système solaire. Le fait que les mêmes modèles soient capables de simuler à la fois la météo sur Terre et des climats aussi extrêmes que le désert glacé de Mars ou la fournaise vénusienne associée à de très fortes concentrations de CO₂, est un élément important de la confiance dans la pertinence de la physique représentée dans ces modèles, et dans les résultats des projections climatiques futures.

*MODÈLE NUMÉRIQUE :

Un modèle numérique est une représentation d'un milieu par un jeu d'équations dont la solution nécessite l'utilisation d'un ordinateur.



COMMENT METTRE L'OcéAN DANS DES PETITS CUBES ?

◀ Température de surface de la mer simulée par le modèle d'océan NEMO à ~10km de résolution.

CONTRIBUTEURS

Olivier Marti
LSCE/ IPSL
Anne-Marie Tréguier
LPO/CNRS

Un modèle d'océan est une représentation simplifiée des processus physiques et biogéochimiques qui se déroulent en son sein et aux interfaces avec les autres milieux (atmosphère, continents...). Il repose sur des lois physiques mises en équations puis résolues par des programmes informatiques.

Tout comme pour l'atmosphère (p. 2), on procède en trois étapes pour construire un modèle d'océan. La première, celle de la modélisation physique, consiste à poser les équations qui décrivent l'évolution dans le temps des variables à simuler (température, salinité, courant, concentration en nitrates, carbone...). On utilise les lois physiques très générales de Navier-Stokes qui permettent de décrire les mouvements de la majorité des fluides (comme l'atmosphère). Ces équations sont ensuite simplifiées pour tenir compte des propriétés intrinsèques de l'océan associées en par-

ticulier à sa forte densité : l'eau de mer est considérée comme quasi-incompressible ; l'océan est traité comme une couche très mince à la surface du globe ; sa densité varie au plus de quelques pour cent sur tout le globe... Des équations supplémentaires décrivent l'évolution des processus chimiques (dissolution du dioxyde de carbone par exemple) et la biologie marine.

Il faut ensuite **discrétiser*** les équations continues du modèle physique pour obtenir le modèle numérique. Cette étape consiste à découper l'océan selon un maillage en trois dimensions,



Les flotteurs ARGO

Le programme ARGO a révolutionné l'observation de l'océan. Depuis les années 2000, l'océan mondial est parsemé de flotteurs, des tubes d'acier d'environ 1,5 m de long qui dérivent à 1 000 m de profondeur pendant 10 jours, puis remontent à la surface, à la manière de sous-marins miniatures, pour envoyer par satellite les observations de température et de salinité de l'océan qu'ils ont collectées le long de leur chemin, avant de replonger et recommencer un cycle. Le réseau de 3 500 flotteurs, maintenu en partenariat par 30 nations, permet de suivre en temps réel le contenu de chaleur et la salinité de l'océan mondial.

▶ Récupération d'une bouée Marisonde lors de la campagne Hymex en Méditerranée

chaque maille représentant un cube, ou plutôt un parallélogramme, avec un côté de quelques km à plusieurs centaines de km, et une épaisseur allant de 1 à 500 m. Les méthodes mathématiques appliquées permettent alors d'écrire les équations discrètes qui relient entre elles les variables de chaque maille du modèle. Cependant, tel l'atmosphère, l'océan réel n'est pas un empilement de cubes : à l'intérieur de chaque cube du maillage, il existe en réalité des phénomènes que la maille ne « voit » pas (vagues, ondes, mélange turbulent, présence de petites montagnes sous-marines...). La représentation de « phénomènes sous maille » ou paramétrisation (p. 2) est nécessaire pour prendre en compte la variété des processus océaniques ; elle est aujourd'hui la source principale d'incertitudes et d'erreurs dans les modèles d'océan.

La dernière étape est la modélisation informa-

tique, c'est-à-dire la traduction des équations discrètes en code ou langage informatique compréhensible par les ordinateurs. En fait, modèles d'océan et d'atmosphère sont très semblables et diffèrent principalement par la densité des fluides (1 000 fois plus grande dans l'océan que l'atmosphère) et la présence des continents, véritables murs pour les océans.

Partant d'un état initial observé (compilant l'ensemble des systèmes de mesure tels les satellites, les flotteurs ARGO...), le code informatique calcule périodiquement les valeurs des variables à l'intérieur de chaque maille, avec une période ou



« pas de temps », de l'ordre de plusieurs minutes. Plus la grille est fine et les équations prises en compte complexes, plus le nombre de calculs à effectuer à chaque pas de temps est élevé. La résolution choisie (la taille de chaque cube, et donc le nombre de cubes nécessaires pour couvrir le globe) est un compromis entre le coût de calcul en terme de nombre d'opérations et la précision recherchée, qui dépend des phénomènes physiques que l'on souhaite étudier. De tels calculs

Une erreur classique

« L'océan profond est inerte. »

L'océan profond est très lent mais pas inerte. Une particule d'eau partie au large du Groenland vers 3 000 m de profondeur peut voyager près de 1 000 ans avant de faire surface dans le Pacifique Nord. Ces courants profonds transportent de la chaleur et du CO₂, et sont à l'origine de variations lentes du climat.

nécessitent l'usage de supercalculateurs. Pour l'étude du climat, le modèle d'océan est couplé à d'autres modèles qui représentent la glace de mer, l'atmosphère, les surfaces continentales, les calottes polaires...

La comparaison des résultats du modèle avec les observations océaniques est la clef d'un processus constant d'amélioration du modèle, pour lequel collaborent physiciens, mathématiciens et informaticiens.

En France, le laboratoire du LOCEAN est l'initiateur du développement du

modèle européen NEMO. Ce modèle est utilisé pour des études régionales (Méditerranée...) et pour simuler l'océan global et sa variabilité (p. 12, 28).



*DISCRÉTISER :

Rendre discret, séparé, discontinu afin de dégager des valeurs individuelles à partir de quelque chose de continu. Cette opération amène au maillage numérique.

1.3

LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

COMMENT REPRÉSENTE-T-ON LES SURFACES CONTINENTALES DANS LES MODÈLES DE CLIMAT ?

CONTRIBUTEURS

Bertrand Decharme
CNRM-GAME / Météo-France CNRS
Julien Boé
SUC/CERFACS-CNRS

Les continents représentent environ 30 % de la surface de la Terre et échangent de l'énergie, de la quantité de mouvement et de l'eau avec l'atmosphère et l'océan via les fleuves. Ces échanges dépendent du relief et de la végétation.

Ils sont essentiels à la modélisation du climat global.

Les modèles de surface représentent les échanges d'eau, de quantité de mouvement et d'énergie entre les continents et les autres composantes du système climatique, en fonction du type de paysage (forêt, cultures, pâturages, désert, neige...) et de ses caractéristiques physiques (topographie, albédo, émissivité, rugosité). Les grands processus intrinsèques aux surfaces continentales sont bien connus. On peut donc les mettre sous forme d'équations mathématiques et les traduire en langage informatique comme pour l'atmosphère et l'océan (p. 2-5).

Les modèles de surface résolvent en premier lieu le bilan d'énergie à l'interface continent-atmosphère. Celui-ci se calcule comme la différence entre la quantité de chaleur absorbée par les continents et celle renvoyée à l'atmosphère. Ce bilan dépend des rayonnements solaire et infrarouge incidents et des flux turbulents liés aux caractéristiques locales de la surface (type de végétation, **évapotranspiration***...) qui vont moduler la fraction d'énergie absorbée par le sol et celle réfléchi vers l'atmosphère. À ce titre, le paramètre d'albédo qui régit la proportion du rayonnement

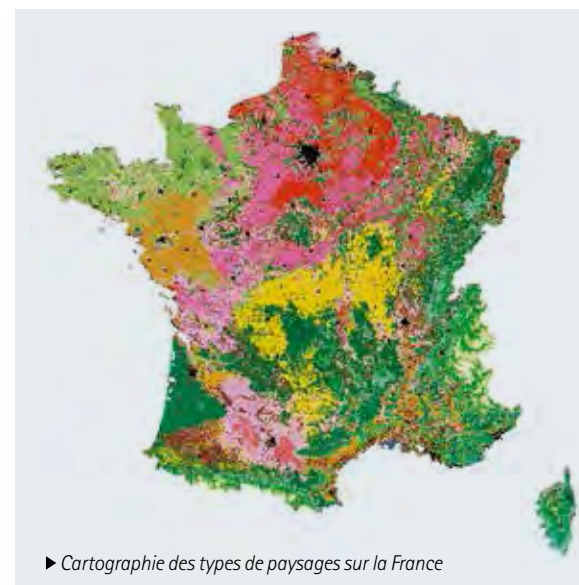
Rétroaction surface continentale-atmosphère

Les surfaces continentales et l'atmosphère s'influencent réciproquement. Par exemple, dans certaines zones comme le pourtour méditerranéen, le réchauffement climatique entraîne une diminution des précipitations, conduisant à un assèchement des sols. Ces sols plus secs induisent une diminution de l'évapotranspiration, qui se traduit par une amplification en surface du réchauffement climatique initial. En effet, l'évapotranspiration tend à refroidir le sol, comme pour l'eau sur la peau. On parle ici de rétroaction positive.

solaire réfléchi vers l'espace par la surface, est essentiel et varie très fortement d'un type de paysage à un autre. Une surface enneigée réfléchira jusqu'à 85 % du rayonnement incident contre seulement 10 % pour une forêt ou 30 % pour un désert. Dans les modèles, une valeur d'albédo est affectée à chaque paysage et peut varier dans le temps en fonction, par exemple, de l'âge du manteau neigeux ou du cycle saisonnier de la végétation.

Les caractéristiques physiques des surfaces continentales vont aussi moduler les échanges de quantité de mouvement avec l'atmosphère via les frottements qu'induit la présence de montagne et de végétation sur la fine couche limite atmosphérique qui la surplombe. Enfin, les modèles de surface prennent également en compte

le cycle hydrologique continental. Une partie des précipitations alimente les réserves en eau du sol localement alors qu'une fraction est renvoyée dans l'atmosphère par évapotranspiration, et une autre ruisselle jusqu'aux océans. Comme pour le bilan d'énergie, le bilan d'eau va être influencé par les caractéristiques physiques des divers paysages et en particulier la topographie qui permet de canaliser l'eau de pluie vers les rivières ou la présence de végétation qui tend à augmenter l'évapotranspiration continentale au détriment de son écoulement vers les océans. Cet écoulement des fleuves est lui aussi représenté dans les modèles et permet d'évaluer indirectement la qualité des simulations en se comparant aux débits des fleuves observés. Les modèles de surface utilisés dans les deux modèles climatiques français se nomment ORCHIDEE pour l'IPSL et SURFEX pour le CNRM-Cerfacs. Pour



► Cartographie des types de paysages sur la France

Une erreur classique

« Il a beaucoup plu au printemps, cela a dû remplir les nappes phréatiques ! »

En France, les pluies du printemps sont essentiellement absorbées par la végétation qui revit à ce moment-là. Ce sont surtout les pluies d'hiver qui remplissent les nappes phréatiques.

le climat actuel, ils prennent en compte différents types de paysages, déterminés grâce à des observations locales et à des images satellites. Il y a peu, la maturité des modèles de surface était telle que ces cartes de paysage étaient fixes dans le temps, en dehors de leur cycle saisonnier moyen. Récemment, des travaux de compilation de sources d'information diverses ont permis de représenter l'évolution de la localisation des cultures, des pâturages et des forêts au cours du XX^e siècle. Ces données permettent de suivre la chronologie de l'anthropisation et d'évaluer son impact sur le climat. De même, des scénarios d'évolution d'utilisation des terres ont été introduits dans les projections climatiques (p. 30) afin d'intégrer ce forçage anthropique très important (p. 10).



*EVAPOTRANSPIRATION :

Phénomène physique qui décrit les échanges d'eau liés à la transpiration des végétaux, l'évaporation directe de l'eau du sol et la sublimation de la neige et de la glace.



QUEL EST LE RÔLE DE LA CRYOSPHERE DANS L'ÉQUILIBRE CLIMATIQUE ET SA MODÉLISATION ?

CONTRIBUTEURS

Sylvie Charbit
LSCE/IPSL

David Salas y Mélia
CNRM-GAME/Météo-France CNRS

La cryosphère englobe les compartiments du système climatique où l'eau est sous forme solide (neige, glace ou sol gelé). Elle est présente sur les continents (calottes glaciaires, glaciers, pergélisol), sur l'eau (glace de mer, de lac, de rivière) ou dans les deux milieux (manteau neigeux).

À la fois témoins et acteurs des changements climatiques, les composantes de la cryosphère interagissent avec l'océan et l'atmosphère sur des échelles de temps allant de la saison à des centaines de milliers d'années pour la succession des cycles glaciaires-interglaciaires. En règle générale, elles amplifient les variations climatiques via une multitude de processus. La cryosphère stocke environ 77 % de l'eau douce terrestre, essentiellement dans les calottes glaciaires antarctique et groenlandaise. Ainsi, les changements de volume de ces glaces agissent directement sur le niveau global des océans. D'importants progrès ont été réalisés dans la compréhension du comportement des calottes glaciaires grâce au développement de modèles numériques de calottes, notamment en France. En simulant les processus responsables de l'écoulement de la glace, ces modèles permettent de décrire l'évolution de la géométrie de ces énormes complexes glaciaires. Sous l'effet de la gravité, la glace produite par compaction du manteau neigeux s'écoule du centre de

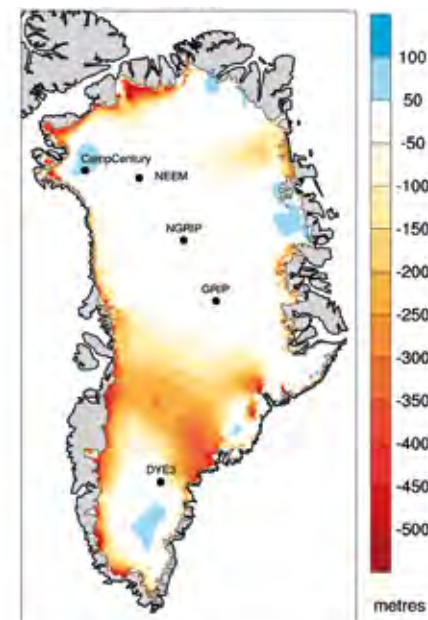


Le niveau marin

Les variations du niveau marin global résultent de causes multiples affectant le volume et la masse des océans. Les changements récents dépendent de deux facteurs reliés essentiellement au réchauffement climatique : la dilatation thermique de l'océan et les variations de masse d'eau dues à la fonte des glaciers et calottes. Si depuis les années 1970, la dilatation thermique domine les variations du niveau global, d'ici 2 100 la contribution de la fonte de la calotte groenlandaise pourrait fortement augmenter.

la calotte vers les bords, ainsi que par glissement sur le socle rocheux. Dans certaines conditions, de véritables fleuves de glace peuvent se former alimentant les plates-formes de glace flottant sur la mer. La déstabilisation de ces plates-formes peut conduire à la production de beaucoup d'icebergs. La représentation la plus fine possible de ces processus constitue des défis multiples pour leur modélisation et leur insertion dans les modèles de climat français. Il s'agit de développer les procédures de couplage entre les modèles océan-atmosphère (résolution typique 100 km, p. 2-5) et les modèles tridimensionnels de calottes glaciaires (quelques km), et de représenter la circulation océanique sous les plates-formes de glace. La communauté française s'est mobilisée pour représenter ces processus dans de nouveaux outils numériques, ce qui devrait permettre l'introduction très prochaine de modèles de calotte dans les modèles de climat de l'IPSL et du CNRM-Cerfacs. Sinon, de toutes les composantes de la cryosphère, c'est le

manteau neigeux continental qui occupe saisonnièrement la plus grande surface : dans l'hémisphère nord, il s'étend sur près de 50 millions de km² en janvier, modulant fortement les échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère via son fort albedo. La neige est aussi le meilleur isolant thermique naturel, limitant ainsi le refroidissement du sol. Les modèles détaillés de manteau neigeux ont désormais la maturité nécessaire pour être utilisés en modélisation climatique globale. La neige est aussi présente sur la banquise arctique et antarctique pendant la plus grande partie de l'année. Par temps froid, elle limite la croissance de la glace sous-jacente en limitant ses pertes énergétiques. Lorsque la couche de



► Changement d'altitude (m) en 2300 simulé par le modèle de calotte GRISLI à 5 km de résolution forcé par CNRM-CM5

Une erreur classique

« La banquise et les icebergs, c'est la même chose ! »

La banquise est produite par la congélation de l'eau de mer tandis que les icebergs se détachent des calottes glaciaires issues de l'accumulation de la neige : ces deux entités ont donc des formes et des tailles très différentes dans l'océan !

neige a complètement fondu, la glace se couvre de mares de fonte dont la capacité à absorber les rayons du soleil est bien plus importante que la glace nue. Les deux modèles de banquise LIM et GELATO inclus respectivement dans les modèles climatiques de l'IPSL et du CNRM-Cerfacs représentent de mieux en mieux ces phénomènes complexes. Toutefois, tout comme les modèles des autres laboratoires, ils peinent encore à reproduire la fonte rapide de la banquise arctique observée depuis une dizaine d'années. Les **pergélisols*** occupent quant à eux environ 20 millions de km². Les modèles de climat français commencent à modéliser correctement leur extension, et pourraient prochainement permettre d'estimer le recul du pergélisol dû au réchauffement climatique. Ce processus devrait s'accompagner d'un destockage de carbone significatif au delà de 2 100.



*PERGÉLISOL :

Le pergélisol correspond à un sol gelé en permanence surmonté d'une couche active qui peut fondre en été. Il est notamment abondant en Sibérie et Alaska.

1.5

LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

QU'EST-CE QU'UN FORÇAGE CLIMATIQUE ?

CONTRIBUTEURS

David Saint-Martin
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Olivier Boucher
LMD/IPSL

Le système climatique est directement influencé par certains facteurs qui lui sont extérieurs et que l'on désigne sous le terme de forçages externes. On distingue classiquement les forçages naturels, tels que ceux dus au Soleil et au volcanisme, des forçages anthropiques (gaz à effet de serre notamment).

Un état d'équilibre du système climatique à l'échelle globale se caractérise, sur une période de temps suffisamment longue, par la stabilité des principales variables statistiques de ce système (température, niveau des mers...). Le principe de conservation de l'énergie impose que cet état corresponde à un équilibre entre l'énergie reçue par le Soleil et l'énergie rayonnée par la Terre vers l'espace.

Le terme de forçage climatique (ou **forçage radiatif***) désigne une perturbation d'origine extérieure au système climatique qui impacte son

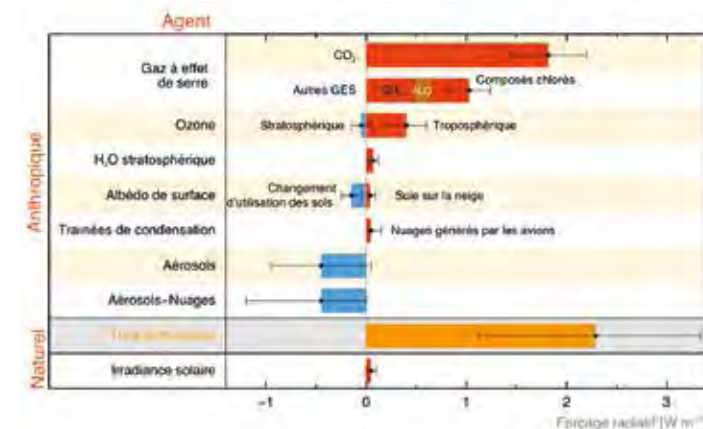
bilan énergétique. Une telle perturbation peut être associée à des variations de la concentration atmosphérique d'espèces radiativement actives, à des modifications du flux d'énergie solaire arrivant au sommet de l'atmosphère, ou encore à des variations d'autres agents pouvant affecter le bilan radiatif de la planète (par exemple les éruptions volcaniques). Une telle perturbation conduit alors le système climatique vers un nouvel état d'équilibre suivant des constantes de temps propres aux mécanismes d'ajustement mis en jeu (p. 20).

Les scénarios d'émission

Plusieurs scénarios d'évolution future des forçages anthropiques ont été proposés, correspondant à différentes hypothèses d'évolution de nos sociétés, en termes économique, démographique et technologique. Ces scénarios couvrent le siècle en cours (jusqu'en 2100) et permettent d'estimer les émissions des principales espèces chimiques. La connaissance de ces émissions est nécessaire pour simuler le climat du futur à partir de modèles et estimer le champs des possibles en fonction des scénarios considérés.

On distingue classiquement les forçages naturels (solaire et volcanique) des forçages anthropiques. La perturbation d'origine solaire (ou forçage solaire) provient principalement de la variation dans le temps de l'activité solaire ainsi que des variations astronomiques de l'orbite terrestre. Le forçage volcanique résulte de l'émission dans l'atmosphère durant les éruptions volcaniques d'importantes quantités de poussières et de gaz qui contribuent à rendre l'atmosphère moins transparente au rayonnement solaire (effet parasol conduisant à un refroidissement). L'origine des forçages anthropiques réside principale-

ment dans l'émission par l'Homme de différentes espèces chimiques qui modifient la composition de l'atmosphère. Les plus connus sont les gaz à effet de serre (GES) parmi lesquels le dioxyde de carbone et le méthane. Ces gaz se caractérisent par leur capacité à absorber puis ré-émettre l'énergie rayonnée par la surface terrestre essentiellement dans les longueurs d'onde de l'infrarouge. Ils contribuent ainsi à réchauffer l'atmosphère et la surface terrestre. Les GES sont présents naturellement dans l'atmosphère et sont tout à fait essentiels puisque la température moyenne à la surface du globe serait d'environ -19°C si l'atmosphère en était totalement dépourvue. Cependant, les activités humaines ont considérablement augmenté les concentrations atmosphériques de ces gaz induisant un effet de serre additionnel auquel on attribue une grande partie du réchauffement récent (p. 22). Les émissions de GES ne sont cependant pas les seules perturbations du système climatique engendrées par les activités humaines. Les émissions d'aérosols (petites particules liquides ou



► Forçages radiatifs sur le climat en 2011

Une erreur classique

« Le réchauffement climatique suit les variations locales du forçage radiatif. »

La réponse climatique sur une région donnée ne dépend pas uniquement du forçage radiatif local mais des variations sur toute la planète, notamment de l'ajustement grande échelle des vents dominants.

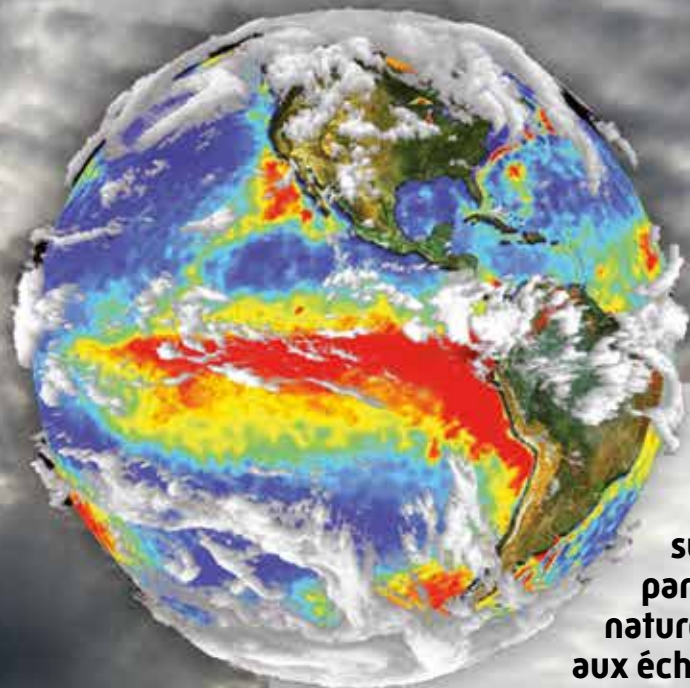
solides en suspension dans l'air) perturbent également de manière significative le bilan radiatif et tendent plutôt à refroidir la planète. Les modifications de l'utilisation des sols (cultures, pâtures, déforestation, p. 6) ou encore l'amincissement de la couche d'ozone contribuent eux aussi à la modification du bilan radiatif terrestre et constituent autant d'autres forçages anthropiques. Dans le cadre de la réalisation de simulations climatiques passées et futures pour l'exercice d'intercomparaison CMIP5 (p. 17), l'IPSL a élaboré des scénarios de forçages par les aérosols qui ont ensuite été utilisés conjointement par les deux modèles français, CNRM-Cerfacs et IPSL. Ces scénarios de forçages prennent en compte un grand nombre de processus, notamment en chimie de l'atmosphère.



*FORÇAGE RADIATIF :

Il est exprimé en unité d'énergie par seconde et par unité de surface (W/m^2). Positif il induit un réchauffement du système climatique; négatif, il induit un refroidissement.

► Anomalie de température de surface de la mer et de couverture nuageuse durant El Niño.
© R. Houser, Washington University.



LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

POURQUOI LE CLIMAT VARIE-T-IL ?

Les variations climatiques aux impacts profonds sur les sociétés et les écosystèmes correspondent à la superposition d'une variabilité induite par les forçages externes, et d'une autre de nature interne, d'amplitude très importante aux échelles saisonnière à décennale.

CONTRIBUTEURS

Eric Guilyardi
LOCEAN/IPSL
Guillaume Gastineau
LOCEAN/IPSL

De la même façon que la météo change au cours d'une semaine, le climat varie aussi, mais sur des échelles de temps plus longues. La palette de ces variations est large, à la fois dans le temps (d'une saison à l'autre, d'une année à l'autre, d'une dizaine, centaine jusqu'à milliers d'années à l'autre) et dans l'espace (local, régional, continental, global). Par exemple, aux échelles courtes, les précipitations fluctuent souvent avec une période privilégiée autour de 30 à 60 jours dans les océans

Indien et Pacifique avec des impacts locaux forts (oscillation dite de Madden-Julian). Aux échelles plus longues, l'alternance des ères glaciaires et interglaciaires se caractérise par des temps typiques de l'ordre de 100 000 ans avec des impacts globaux (différence de température globale autour de 5°C) et régionaux (présence de calottes de glace sur une grande partie de l'Amérique et Europe du Nord) très importants. Les variations du climat autour d'un état de référence ont des origines aussi bien externes, c'est-à-dire liées à un

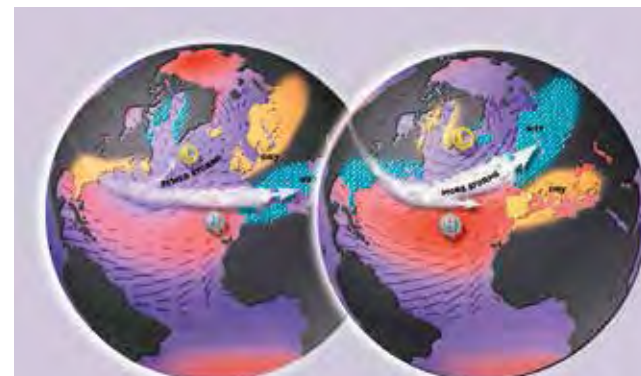
La décennie 2000

Depuis le début des années 2000, la température moyenne de surface se réchauffe moins vite que lors des décennies précédentes, même si les différences régionales restent marquées, et si en moyenne sur 2000-2009, la température globale est la plus chaude depuis 1850. Le ralentissement du réchauffement depuis une dizaine d'années s'explique, en partie, par les modes de variabilité interne qui privilégient un réchauffement marqué de l'océan profond au détriment de la surface, en particulier dans le Pacifique. On s'attend donc à ce que le changement de phase des modes décennaux, dans quelques années, vienne au contraire amplifier le réchauffement de surface d'origine humaine.

forçage naturel (par exemple solaire pour les cycles glaciaires) ou anthropique (p. 10), qu'internes, essentiellement liées aux échanges d'énergie, de quantité de mouvement et de masse au sein ou entre les composantes du système climatique.

Ainsi, les échanges océan-atmosphère au niveau des tropiques expliquent par exemple le phénomène El Niño, une anomalie climatique de nature interne, qui a lieu dans le Pacifique tous les 2 à 7 ans et qui a des répercussions globales pendant plus d'une année. Sur l'Europe, une grande part des variations climatiques sur des périodes allant de 10 jours à une décennie s'expliquent par l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) ; la rigueur de l'hiver 2009-2010 lui est par exemple attribuée. La **variabilité**

interne* climatique se caractérise par une organisation spatiale de grande échelle et est souvent référencée par l'expression « mode ». Ainsi le mode NAO doit son origine à la dynamique propre de l'atmosphère et contrôle les trajectoires privilégiées des dépressions et des anticyclones traversant l'Atlantique Nord et qui affectent l'Europe. Des modes de variabilité de plus basse fréquence (de quelques années à plusieurs décennies), sont aussi observés à la surface des océans Atlantique (Oscillation Atlantique Multidécennale-AMO) et Pacifique même si le manque d'observations rend leur compréhension encore parcellaire. Ces variations semblent mettre en jeu la circulation lente de l'océan, liée au transport de masses d'eaux de différentes origines. Les signatures continentales des modes de variabilité décennaux sont fortes ; leur prévisibilité est de première importance mais reste un défi (p. 28). Par exemple, l'AMO est fortement liée aux grandes périodes de sécheresse dans le Sahel, mais aussi à la probabilité d'occurrence des cyclones tropicaux dans les Caraïbes.



► Représentation schématique des deux phases de la NAO

Une erreur classique

« Le climat se refroidit depuis 10 ans, les climatologues sont perdus ! »

Cette affirmation repose sur la confusion classique entre forçage externe et réponse climatique. En effet celle-ci est fortement modulée par la variabilité interne et la « pause » actuelle lui est clairement attribuée par les scientifiques.

Les modes de variabilité interne interagissent entre eux (par exemple l'AMO joue légèrement sur les phases de la NAO en été) et sont aussi influencés par les forçages externes. Ainsi détecter une modification du climat demande un travail précis d'attribution des causes et des effets (p. 22) basé sur la compréhension de ces modes de variabilité. De même, pour se projeter dans les décennies à venir (p. 28), il est essentiel de comprendre comment les variations internes du climat modulent la tendance liée aux gaz à effet de serre. En effet ces variations naturelles peuvent momentanément masquer l'effet anthropique, en particulier aux échelles régionales. Les scientifiques français travaillent à élucider ces questions fondamentales.

*VARIABILITÉ INTERNE :

Variation intrinsèque au système climatique due au couplage entre sous-systèmes (atmosphère, océan...) aux propriétés physiques, dynamiques et chimiques très différentes.

COMMENT METTRE EN ŒUVRE LES NOMBREUX CALCULS REQUIS PAR LES MODÈLES DE CLIMAT ?

CONTRIBUTEURS

Marie-Alice Foujols
IPSL
Eric Maïsonnave
SUC/CERFACS-CNRS

Les modèles de climat se basent sur des programmes informatiques qui calculent, heure après heure, région après région, l'ensemble des variables d'état des différentes composantes du système climatique. La période simulée peut aller du mois à quelques milliers d'années.

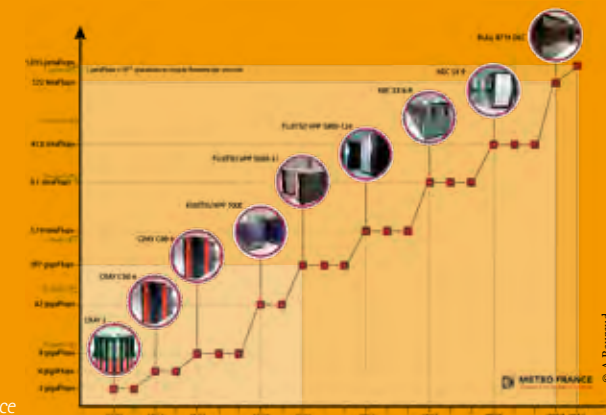
Les modèles décrivant les calculs à effectuer pour une simulation climatique sont composés de nombreux sous-programmes représentant en tout plusieurs centaines de milliers de lignes de code. Le globe terrestre est découpé en mailles et pour chaque point du maillage (latitude, longitude, altitude ou profondeur), pas de temps par pas de temps, ces programmes calculent les différentes variables d'état (température, pression...) de chacune des composantes du système climatique (atmosphère, surfaces continentales, océan, glace de mer, biogéochimie, chimie atmosphérique...) suivant les équations décrivant leur évolution (p. 2-5). Les calculateurs actuels, composés

d'un grand nombre de processeurs (cœurs de calcul) travaillant en parallèle, permettent de simuler ainsi l'évolution du climat sur des périodes allant de quelques mois à plusieurs milliers d'années. Chaque cœur se charge d'un sous-ensemble des calculs, en général d'un sous-domaine du globe terrestre. On parle de parallélisation des calculs. La chaîne de modélisation se décline en plusieurs étapes : le calcul proprement dit et leurs post-traitements systématiques. Ces derniers consistent à regrouper des fichiers « résultats » produits par le modèle, à moyenniser temporellement certaines variables (par exemple par mois), à réaliser des cartes et des graphiques d'évolution

Les ressources informatiques nécessaires : leur histoire et leur avenir

Si les codes de climat deviennent de plus en plus complexes et à haute résolution, c'est aussi grâce à l'amélioration des performances des supercalculateurs. Ainsi les "opérations à virgule flottante par seconde" (FLOPS), qui sont une unité de mesure de la vitesse d'un ordinateur scientifique ne cessent d'augmenter. Les vitesses des ordinateurs étaient en MégaFLOPS (10^6 FLOPS) en 1980, en GigaFLOPS (10^9 FLOPS) en 1990, en TéraFLOPS (10^{12} FLOPS) en 2000 et maintenant elles se chiffrent en PétaFLOPS (10^{15} FLOPS). Associé à ces puissances de calculs les besoins de stockage sont également colossaux et se comptent en Peta-octets de nos jours.

► Évolution de la puissance de calcul des supercalculateurs de Météo-France



temporelle de paramètres clés et à assurer un suivi en ligne via internet des simulations. Les études climatiques nécessitent souvent de modéliser le climat sur de nombreuses années afin de comprendre les mécanismes physiques qui gouvernent sa variabilité et d'estimer ses propriétés statistiques. Ainsi, avec les moyens de calcul actuels, la réalisation d'une simulation de 2000 ans avec un maillage de l'ordre de 100 km prend quasiment une année entière. L'accroissement futur des moyens de calcul permettra, à condition que les indispensables modifications soient faites dans nos codes, soit d'effectuer ces simulations plus rapidement, soit de prendre en compte plus précisément certains phénomènes physiques ou d'en introduire de nouveaux (évolution de la calotte glaciaire, hauteur des vagues... p. 8), soit d'affiner le maillage (typiquement 20 km au lieu de 100 km actuellement), soit de mieux estimer l'incertitude des résultats en multipliant les simulations effectuées. Le choix entre ces différentes options se fait en fonction du domaine d'intérêt (changement climatique,

prévision saisonnière à décennale, étude de processus...). Dans chaque cas, un compromis est cependant nécessaire pour choisir le niveau de détail du climat simulé en fonction des ressources informatiques disponibles. Une machine NEC SX-9 de 3 nœuds de 16 processeurs de calcul, financée par Grand Équipement National de Calcul Intensif (GENCI) et maintenue par le Très Grand Centre de Calcul (TGCC), était dédiée à l'IPSL entre avril 2009 et décembre 2012 pour produire les simulations de CMIP5 (p. 17). Des simulations complémentaires ont été réalisées sur les autres calculateurs disponibles au TGCC (machine Bull) et à l'Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique (IDRIS, machine IBM). À Toulouse, 16 processeurs de NEC SX-8 de Météo-France ont été utilisés pendant 2 ans par les équipes du CNRM et du CERFACS. Dans le même temps, 2,4 Po de données ont été produites (2 Po* IPSL et 420 To* Météo-France), dont 301 To (250 To IPSL et 51 To Météo-France) ont été mises à disposition des autres groupes de

recherche internationaux grâce à l'installation de nœuds de distribution dans les différents centres de calcul (IPSL, Météo-France, TGCC, IDRIS).

Une erreur classique

« Les codes climat ne sont pas parallélisés. »

Les algorithmes des modèles de climat s'améliorent sans cesse et utilisent de plus en plus de processeurs en parallèle. Certains maillages possèdent des particularités essentielles pour l'utilisation de milliers de processeurs, par exemple les icosaèdres (ballon de football).

*TÉRA ET PÉTA OCTETS (To ET Po) :

A - Z Un octet est une suite de 8 chiffres binaires (0 ou 1) qui permettent de coder une information. Le préfixe Téra et Péta donne l'ordre de grandeur et correspond à 10^{12} et 10^{15} respectivement.



QUELLES SONT LES MÉTHODES D'ÉVALUATION ET DE VALIDATION DES MODÈLES CLIMATIQUES ?

CONTRIBUTEURS

Aurore Voldoire
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Pascale Braconnot
LSCE/IPSL

Les exigences sur la qualité des simulations climatiques ne cessent de croître. De nombreuses observations, tests théoriques et prévisions rétrospectives permettent de vérifier si les grandes caractéristiques climatiques, ainsi que les mécanismes et processus mis en jeu, sont bien représentés.

L'évaluation de la capacité des modèles à représenter les différentes caractéristiques du climat consiste à confronter les résultats d'une simulation aux différentes observations disponibles. Les méthodes utilisées vont de simples comparaisons de cartes de moyenne et de variabilité (température, pluies...) à des estimations plus sophistiquées de l'accord modèles-données, faisant appel à des méthodes statistiques complexes. Ces méthodes plus avancées permettent de donner une mesure objective, en tenant compte notamment des incertitudes à la fois sur les observations et sur les simulations, en particulier celles liées à un échantillonnage temporel limité. Chaque composante d'un modèle de climat (océan, atmosphère, glace de mer, végétation... p. 2-9) est d'abord validée séparément avant d'être intégrée au système complet. Cette première étape permet de juger des performances intrinsèques de chaque élément. Le système complet, ou couplé, est ensuite évalué sur divers aspects : représentation du climat moyen (répartition des nuages, principaux vents,

Observer le climat

Les observations aident à la compréhension du climat, de son évolution et de sa variabilité mais aussi à développer et valider les modèles. L'acquisition d'observations qui couvrent de larges régions sur les plus longues périodes possibles et le développement de nouveaux systèmes observationnels pérennes constituent un socle pour les sciences du climat. Le développement des paramétrisations se basent sur des observations pointues obtenues lors de campagnes de mesures dédiées où de multiples moyens sont déployés simultanément sur une région donnée (avions, bateaux, bouées, mesures sol, ballons, satellites).

température...), capacité à reproduire les caractéristiques saisonnières du climat dans chaque région (aptitude à simuler les moussons tropicales, l'englacement de l'Arctique en hiver...), mais aussi capacité à simuler la variabilité interannuelle à décennale observée dans l'océan, l'atmosphère. Pour illustration, les modèles actuels sont ainsi capables de simuler et même de prévoir jusqu'à 6 mois à l'avance, l'émergence de températures de surface de la mer anor-

malement chaudes dans le Pacifique, phénomène connu et observé sous le nom d'El Niño (p. 12). En revanche, les modèles de climat ont en général beaucoup de difficulté à représenter de façon satisfaisante les nuages dans l'atmosphère, et en particulier les nuages bas qui ont une extension verticale faible. Or, il est bien établi maintenant que les incertitudes sur l'évolution du climat au XXI^e siècle sont principalement liées à la représentation même des processus nuageux (p. 24) et que l'effort doit être porté, entre autres, sur ce sujet. La communauté française a beaucoup œuvré ces dernières années pour améliorer la représentation des nuages. Par ailleurs, de nouvelles techniques de validation utilisant les données satellites, essentielles aux études climatiques, ont été proposées afin d'échantillonner les caractéristiques des nuages simulés dans un modèle de manière correcte. Les capacités des modèles à représenter les tendances récentes du climat observé (réchauffement global au XX^e siècle de 0.74°C, hausse du niveau des mers de 17 cm) font aussi partie des critères de validation. Les simulations paléocli-

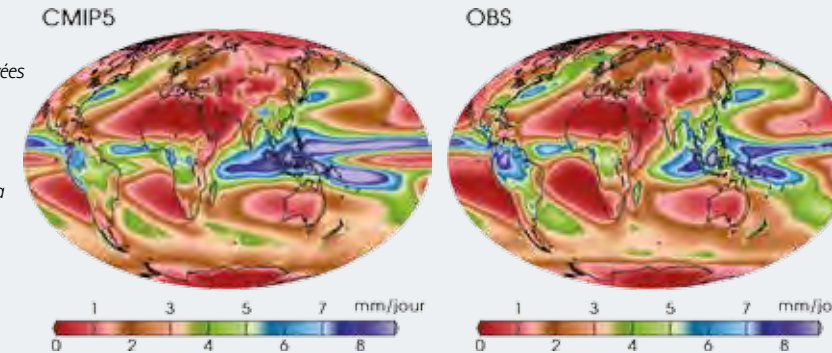
Une erreur classique

« Il existe un modèle de climat meilleur que les autres. »

Suivant les critères choisis, l'ordre de mérite des modèles diffère. Ainsi certains modèles reproduisent bien le climat européen, d'autres sont plus performants pour représenter les systèmes de moussons tropicales.

matiques sont également appelées à la rescousse pour vérifier que l'on peut avoir confiance dans la sensibilité des modèles pour produire un changement de climat important, tel qu'estimé à partir des enregistrements climatiques (carottes de glace, sédimentaire...) lorsque les forçages externes évoluent (p. 10, 18). Les modèles français (IPSL et CNRM-Cerfacs) qui ont participé au dernier exercice international de comparaison de simulations de climat actuels, passés et futurs (CMIP5*) ont été évalués intensivement par les équipes françaises pendant environ 2 années. Ces modèles ont ensuite été examinés de façon indépendante par des équipes du monde entier qui analysent l'ensemble des simulations CMIP5 disponibles (p. 38). Chacune de ces études se focalise sur un aspect particulier du système climatique et permet de brosser une évaluation objective et multifacette de nos modèles.

► Précipitations moyennes annuelles observées (à droite) et simulées par l'ensemble des modèles CMIP5 (à gauche) sur la période 1979-1999.



*CMIP5

Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 : projet international proposant un protocole commun pour réaliser des simulations climatiques et mettre à disposition les résultats.



QU'APPREND-ON DES PALÉOCLIMATS ?

► Photographie d'une carotte de glace du forage NEEM, au nord-ouest du Groenland.



© Les Défis du CEA

Les archives paléoclimatiques montrent que la Terre a connu des climats variés, parfois très différents de l'actuel. Les modéliser permet d'évaluer les modèles utilisés pour les projections futures et, par-delà, d'améliorer notre compréhension des changements climatiques.

Le climat du Quaternaire (les 2,6 derniers millions d'années) a oscillé entre des périodes chaudes, les interglaciaires, où les calottes glaciaires sont limitées à celles du Groenland et de l'Antarctique, comme aujourd'hui, et de longues périodes glaciaires, pendant lesquelles d'énormes calottes se forment aussi aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord. Avant le Quaternaire, ont eu lieu des extrêmes encore plus chauds, comme l'Eocène, marqué par l'absence totale de calottes glaciaires polaires, ou encore plus froids, comme les épisodes de « Terre boule de neige ». La diversité des climats du passé offre de nombreuses

possibilités d'évaluer les outils et connaissances actuels dans des contextes très différents de la période récente. Même si aucune période n'est un analogue parfait au possible climat futur, la modélisation des climats du passé est le seul moyen de tester notre connaissance du fonctionnement du système climatique. Elle permet également, par l'étude de l'impact d'un facteur ou d'un processus, de mieux comprendre les changements climatiques observés, d'aider à l'interprétation des reconstructions et à l'anticipation du climat futur dans la mesure où les scénarios prévus pour les prochaines centaines d'années nous emmènent, en termes de forçages du système climatique (p. 10), vers des territoires inconnus pendant le Quaternaire. On modélise les paléoclimats en imposant aux



Le climat il y a 21 000 ans, dernier maximum glaciaire

Le « Dernier Maximum Glaciaire » est l'épisode le plus récent de maximum global de volume des glaces et correspond à un minimum de concentration en gaz à effet de serre. Le projet PMIP a encouragé la synthèse de reconstructions paléoclimatiques pour cet extrême froid pour faciliter la comparaison modèles-données. Simuler des refroidissements aussi forts que reconstruits reste un défi, surtout pour les latitudes extratropicales. Comprendre la concentration atmosphérique en CO₂ en est un autre qui résiste aux paléoclimatologues depuis plusieurs décennies.

► Vue d'artiste de la terre aujourd'hui et il y a 21 000 ans ainsi que sa modélisation

© Climat d'Hier à demain, CNRS éditions (2000) et Cité des Sciences et de l'Industrie.



© D. Sviringidouze

modèles les conditions aux limites (par exemple : distribution océans-continent, relief continental et marin, p. 2-9) et les forçages (configuration de l'orbite terrestre, composition atmosphérique, éruptions volcaniques, p. 10) appropriés à la période étudiée. Le modèle est un outil d'expérimentation numérique qui permet non seulement d'analyser des différences entre deux périodes mais aussi de réaliser des expériences complémentaires pour isoler les rôles respectifs des forçages et de certains processus. Comme pour le climat futur, l'impact direct d'un forçage peut être amplifié ou inhibé par des rétroactions au

sein du système climatique. Un ensemble d'expériences menées avec le modèle de l'IPSL a ainsi permis de montrer l'importance des rétroactions de l'océan et de la végétation dans l'amplification de la mousson africaine il y a 6000 ans, lorsque la végétation couvrait en partie le sud du Sahara. Quantifier ces rétroactions, les comparer à ce qui est simulé pour des scénarios futurs et utiliser les reconstructions paléoclimatiques pour évaluer leur représentation dans les modèles constitue un des exemples de ce que peut apporter la modélisation des paléoclimats. Une comparaison pertinente aux reconstructions est donc un en-

Une erreur classique

« Le dernier interglaciaire est un analogue du climat futur. »

Il n'existe pas d'analogue passé parfait aux conditions prévues pour le futur, car on ne se retrouve pas dans les mêmes conditions de forçages et de configuration des continents. Il faut donc se concentrer sur les mécanismes des changements climatiques observés.

jeu majeur qui nécessite le développement d'outils adéquats, les plus intéressants étant ceux permettant de directement simuler les **indicateurs paléoclimatiques*** mesurés (par exemple la végétation, les isotopes de l'eau ou du carbone).

L'exercice CMIP5 (p. 17) est le premier pour lequel à l'échelle internationale des simulations des climats passés et futurs ont été réalisées avec les mêmes modèles. Ceci a été possible, dans une grande mesure, grâce au projet PMIP (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project) auquel la communauté de modélisation française a beaucoup apporté, tant pour l'organisation que pour les simulations et les analyses. Un prochain défi sera d'évaluer les capacités des modèles à simuler des changements climatiques aussi rapides que ceux existant dans les enregistrements paléoclimatiques de l'Atlantique Nord par exemple.



*INDICATEUR PALÉOCLIMATIQUE (EN ANGLAIS « PROXY »)

A - Z Variables (isotopes de l'eau...) sensibles au climat et mesurables dans des archives (cernes d'arbres, carottes de glaces...) documentant les climats passés.

► "Les chasseurs dans la neige"
(Bruegel, 1565)

© Autriche, Vienne,
Kunsthistorisches Museum

2.3

LES MODÈLES, OUTILS DE COMPRÉHENSION DU CLIMAT OBSERVÉ

SI LE CLIMAT DU DERNIER MILLÉNAIRE M'ÉTAIT CONTÉ ?

Le climat a varié entre le moyen âge et la période moderne. Déterminer quels sont les mécanismes à l'origine de la période chaude au début du dernier millénaire, et de la période relativement froide durant la seconde moitié, est un défi. Les modèles de climat sont des outils précieux dans ce cadre.

CONTRIBUTEURS

Myriam Khodri
LOCEAN/IPSL
Pascal Yiou
LSCE/IPSL

Reconstruire les variations de température à l'échelle de la planète sur le dernier millénaire est un défi relevé par des dizaines d'équipes de climatologues à travers le monde. Il correspond à deux motivations principales : comprendre comment le système climatique a réagi aux variations solaires et aux éruptions volcaniques enregistrées sur les derniers 1000 ans, et placer le réchauffement planétaire depuis le début du XX^e siècle dans une perspective multiséculaire.

Peu de mesures de température fiables existent avant le XX^e siècle (et aucune avant l'invention du thermomètre par Galilée vers 1650). On combine alors des indicateurs historiques, biologiques, physiques ou géochimiques du climat, pour obtenir un ensemble de reconstructions pour le dernier millénaire, de l'échelle régionale à l'échelle hémisphérique.

Ces reconstructions de température mettent en évidence des phases multiséculaires chaudes sur l'hémisphère Nord au cours du Moyen Âge

La complexité de l'irradiance solaire

L'énergie totale reçue du Soleil a peu varié (de l'ordre de 0.1 %) entre les périodes de maximum et de minimum d'activité. En revanche, d'après certaines mesures satellites, la distribution spectrale de l'énergie, en particulier dans l'ultraviolet, peut avoir des variations beaucoup plus intenses (~8 %), ce qui pourrait avoir un fort effet sur la production d'ozone stratosphérique (au delà de 10 km d'altitude) notamment. Les climatologues travaillent pour inclure cet effet dans les modèles.

(l'Optimum Climatique Médiéval, de 1000 à 1450) qui contrastent avec des périodes plus froides (le Petit Âge de Glace, de 1450 à 1800). Les chroniques recueillies par les historiens témoignent également, sur ces deux périodes, d'événements extrêmes (vagues de chaleur, vagues de froid ou tempêtes) qui ont eu des conséquences désastreuses sur les sociétés. Comme pour les températures, il n'y a pas de mesure directe des variations de l'activité solaire

et volcanique pour les siècles passés. Pour le Soleil, une estimation est obtenue via les isotopes cosmogéniques* ¹⁰Be ou ¹⁴C présents dans des glaces polaires et cernes d'arbres, et dont la production dépend de l'activité du Soleil. En revanche, les éruptions volcaniques sont déduites des couches de soufre observées dans les carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique.

Pour comprendre les relations entre l'évolution de la température moyenne, l'occurrence des extrêmes climatiques et les forçages naturels du climat sur le dernier millénaire, l'IPSL et le CNRM-Cerfacs ont mis en place des expériences numériques du climat. Des simulations ont été effectuées avec plusieurs scénarios d'amplitude des forçages solaire et volcanique (p. 10) pour estimer l'incertitude associée aux perturbations et à leurs réponses.

Un résultat important, également vérifié par d'autres groupes de recherche, suggère que l'amplitude des variations du forçage solaire qu'il faut introduire dans les modèles pour arriver à reproduire correctement l'alternance de l'optimum médiéval et du Petit Âge de Glace doit être deux fois supérieure aux meilleures estimations observa-

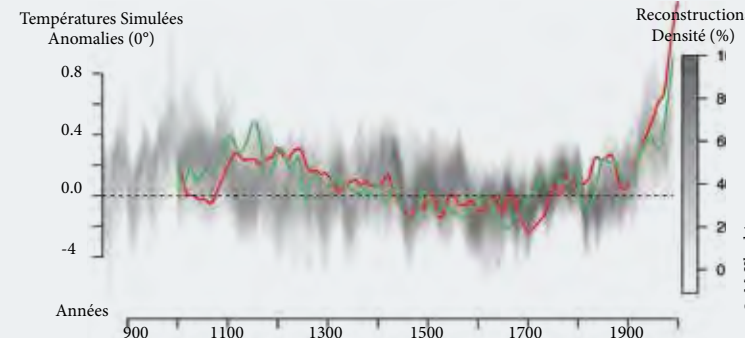
Une erreur classique

« Le Groenland était-il vert durant l'optimum médiéval ? »

Lorsque le viking Eric le Rouge est arrivé au Groenland vers 985, il l'a baptisé "terre verte" afin d'attirer ses compatriotes. Si les côtes groenlandaises étaient certes vertes comme aujourd'hui, une énorme calotte recouvrait déjà l'île à cette époque.

tionnelles. Deux hypothèses sont avancées pour expliquer cette discordance : la représentation du forçage solaire dans les modèles de climat est trop imparfaite ou la variabilité interne du climat (p. 12) a joué un rôle majeur. Le principal acteur à ces échelles de temps est la circulation océanique de retournement en Atlantique Nord, qui amène de grandes quantités de chaleur aux hautes latitudes, et qui pourrait posséder sa propre variabilité centennale à millénaire. Du fait de sa grande inertie et de sa structure très grande échelle, elle pourrait expliquer une part importante des variations observées au cours du dernier millénaire. Par ailleurs, il a été montré que les éruptions volcaniques tropicales injectent des poussières et du soufre dans les hautes couches de l'atmosphère, qui, via l'effet parasol (p. 10) ont affecté le climat planétaire pendant une dizaine d'années pour les événements les plus intenses du dernier millénaire.

► Évolution des températures de l'hémisphère Nord simulée par les modèles français en réponse à différents scénarios de forçages naturels et estimée par les proxies (zone grisée).



*COSMOGÉNIQUE :

Cet adjectif se rapporte souvent aux isotopes formés par des réactions entre les rayons cosmiques et la haute atmosphère. Ces rayons cosmiques sont modulés par l'activité solaire.

PEUT-ON DÉTECTER ET ATTRIBUER LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES OBSERVÉS AU COURS DU DERNIER SIÈCLE ?

CONTRIBUTEURS

Aurélien Ribes
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Laurent Terray
SUC/CERFACS-CNRS

Les résultats récents confirment que l'essentiel du réchauffement global observé au cours des 60 dernières années est une conséquence des activités humaines. La quantification de l'effet refroidissant lié aux émissions d'aérosols d'origine anthropique demeure cependant plus incertaine.

Les quelque 150 ans d'observations climatiques à l'échelle globale nous indiquent-ils déjà un changement en cours ? Et si oui, quelles sont les causes de ces changements ? Ces deux questions clés sont au cœur des recherches menées sur le thème de la « détection » et de « l'attribution » des changements climatiques (D&A). Il s'agit d'analyser le passé climatique récent afin de déterminer les contributions respectives des forçages externes d'origine naturelle (en particulier les variations du rayonnement solaire ou les grandes éruptions volcaniques, p. 10), et anthropique (tels que les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre – GES – ou d'aérosols). Ces questions ont

été déjà largement abordées dans les rapports successifs du **GIEC*** ; celui de 2007, en particulier, concluait que « l'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX^e siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques ».

Dans le cadre de CMIP5 (p. 17), de nombreux centres de recherche, dont deux français, ont réalisé de nouvelles simulations afin d'évaluer encore plus précisément les contributions respectives des facteurs naturels et anthropiques. Le climat du siècle dernier est ainsi rejoué, en

La statistique en D&A

La D&A repose sur des outils statistiques permettant de déterminer quelles combinaisons de forçages sont susceptibles d'expliquer les changements observés. Classiquement, on estime, à partir des observations, l'amplitude de la réponse à chacun des forçages en se basant sur la distribution spatio-temporelle de cette réponse. Les techniques les plus utilisées sont des variantes de la régression linéaire multiple. Leur application en climat pose cependant quelques problèmes mathématiques originaux qui sont l'objet de recherche.

prenant en compte soit de l'ensemble des forçages connus, soit uniquement les forçages naturels, c'est-à-dire en supprimant toute perturbation anthropique (Fig.), soit encore le seul forçage GES. De telles simulations numériques permettent de réaliser ainsi des « expériences » impossibles à mettre en œuvre dans le monde réel, cette impossibilité constituant une origi-

nalité importante des sciences du climat parmi les sciences physiques. Ces ensembles de simulations fournissent aussi d'autres informations utiles, telle l'importance de la variabilité interne, et éventuellement sa capacité à amplifier ou à masquer tout ou partie du changement d'origine externe, pendant une période donnée (p. 12). La confrontation des simulations aux observations fournit des indications sur le réalisme des modèles. Enfin, la confrontation des résultats produits par différents modèles renseigne sur les incertitudes associées à l'estimation de chacune des réponses aux différents forçages.

Les simulations CMIP5 réalisées en préparation au rapport du GIEC de 2013/2014 ont permis de confirmer la prépondérance des forçages anthropiques pour expliquer les variations de la température globale observée à la fin du XX^e siècle. Elles suggèrent également que les aérosols anthropiques ont contribué à masquer en partie le réchauffement induit par les GES, mais dans des proportions encore assez incertaines. Il s'agit

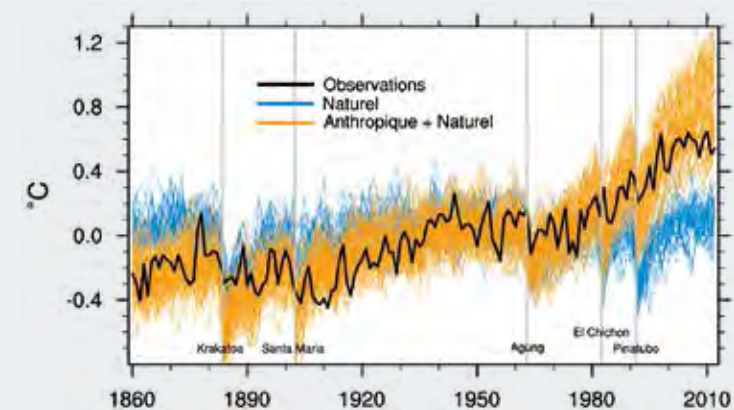
Une erreur classique

« Les activités humaines perturbent le climat seulement via l'augmentation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre. »

Plusieurs autres activités ont un impact, en particulier l'émission d'aérosols, la déforestation, l'extension des cultures, qui sont aussi pris en compte dans les modèles.

là d'une incertitude clé dans l'estimation, à partir des observations, de la sensibilité climatique (p. 25). Ces simulations ont également permis de généraliser les études de D&A à d'autres variables que les températures (précipitation, pression atmosphérique...), à d'autres échelles spatiales (un continent au lieu de la planète), à d'autres caractéristiques que les valeurs moyennes (événements extrêmes tels que vagues de chaleur, précipitations intenses...). La contribution de la communauté française n'échappe pas à cette diversification, avec par exemple des travaux sur les changements d'évapotranspiration sur continents (p. 7) et de salinité dans l'océan. Ces derniers montrent une diminution de concentration en sel dans le Pacifique tropical alors que celle-ci augmente dans l'Atlantique, en particulier dans son bassin tropical Nord.

► Évolution de l'anomalie de température globale sur la période 1860-2012 dans les observations et dans des simulations historiques prenant en compte soit l'ensemble des forçages connus, soit uniquement les forçages naturels.



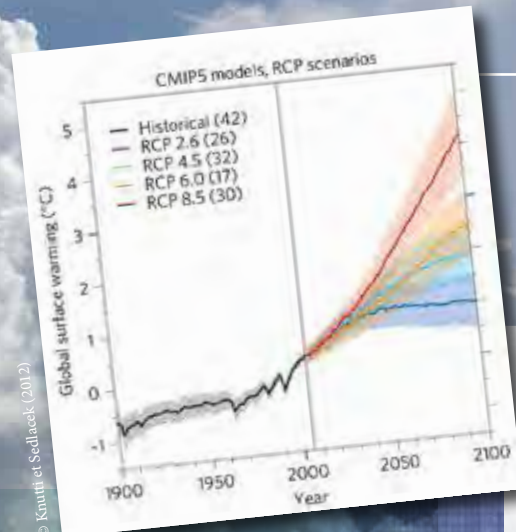
*GIEC :

Groupes d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat créé en 1988 par les Nations Unies. Il a pour mission d'évaluer l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique d'origine humaine et ses conséquences.



LES MODÈLES, OUTILS DE COMPRÉHENSION DU CLIMAT OBSERVÉ

COMMENT PEUT-ON AVOIR CONFIANCE DANS LES RÉSULTATS DE MODÈLES IMPARFAITS ?



© Knutti et Sedlacek (2012)

CONTRIBUTEURS

Serge PLANTON
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Sandrine BONY
LMD/IPSL

Les incertitudes de la modélisation limitent notre capacité de compréhension des climats passés et d'anticipation des climats futurs. Mais la connaissance de ces incertitudes permet de faire progresser cette compréhension et de renforcer la confiance que l'on peut avoir dans certains aspects des projections.

Une des principales sources d'incertitude* des modèles climatiques concerne leurs données d'entrée. En effet, les équations résolues numériquement par les modèles font intervenir des paramètres associés à la représentation de processus physiques ou dynamiques (parfois chimiques) de petite échelle, dits sous maille (p. 2). Ces paramètres ont généralement un sens physique et peuvent être mesurables (pouvoir réfléchissant d'une surface d'un type

donné...) ou bien résultent d'un ajustement empirique (coefficients décrivant un processus de mélange...). Dans les deux cas, leurs valeurs sont connues avec plus ou moins de précision. Dans les incertitudes liées aux données d'entrée, il faut aussi prendre en compte les conditions initiales pour les modèles utilisés en mode prédictif (p. 28). Une deuxième source d'incertitude résulte de la représentation imparfaite du monde réel à partir d'un ensemble d'équations,



La sensibilité climatique

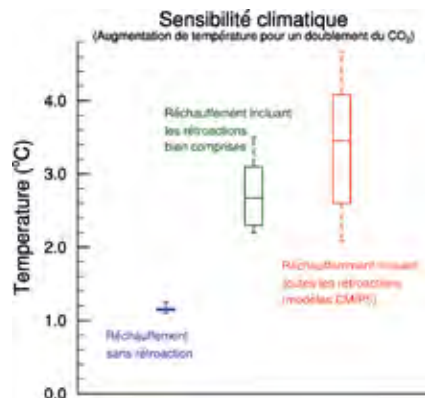
Quel serait le réchauffement à la surface de la Terre pour un doublement de la concentration atmosphérique en gaz carbonique ? En l'absence d'eau dans l'atmosphère, la Terre ne se réchaufferait que de 1°C environ. La seule prise en compte des mécanismes de rétroaction liés à la présence d'eau dans l'atmosphère bien compris physiquement et simulés de façon robuste, conduit à une estimation du réchauffement de 2 à 3,5°C. Mais, surtout à cause de l'incertitude sur la réponse des nuages bas au réchauffement climatique, les estimations finales des modèles varient dans une fourchette plus large de 2 à 4,5°C. (Fig.)

du traitement numérique de ces équations et de l'absence de représentation de certains processus potentiellement importants, qu'ils soient connus (dégazage de méthane lié à la fonte du pergélisol par exemple) ou inconnus. Cette deuxième source d'incertitude est donc directement liée à la structure des modèles.

L'impact de ces incertitudes sur les résultats des modèles climatiques peut s'estimer de différentes façons. L'une d'elles consiste à comparer les simulations réalisées selon un protocole commun par un grand nombre de groupes de modélisation. Cette approche est très largement développée au niveau international au travers, par exemple, de projets de comparaisons de modèles (CMIP, p. 17) auxquels les équipes françaises ont contribué. Une autre consiste à faire varier, pour un modèle et de manière aléatoire, des paramètres dans des limites fixées le plus souvent

par des observations, et à estimer le champ des possibles associés.

Une première base de la confiance des scientifiques dans les projections du climat futur vient de la capacité des modèles à reproduire d'une part les processus fondamentaux de l'atmosphère et de l'océan (interaction des gaz avec le rayonnement, lois de conservation de la masse et de l'énergie...), et d'autre part les variations du climat passé (p. 20). Une autre source de confiance provient de la compréhension des phénomènes physico-chimiques régissant la variabilité interne au système climatique et la réponse du climat à différents facteurs qu'ils soient naturels (Soleil,



Stevens and Bony (2013)

► Sensibilité climatique en fonction des différentes rétroactions prises en compte.

volcans...) ou d'origine humaine (gaz à effet de serre, aérosols...). Cette compréhension s'appuie en particulier sur l'analyse de la robustesse des résultats au travers d'une hiérarchie de modèles de différents niveaux de complexité et en changeant les paramètres d'entrée des modèles. Il importe cependant de noter que le constat de

Une erreur classique

« Comment peut-on croire les modèles qui ignorent les observations ? »

Les observations ne sont pas directement utiles aux projections du climat à long terme mais elles sont utilisées pour les prévisions climatiques à courtes échéances (saisonniers à décennales), pour évaluer la capacité des modèles à reproduire les climats passés et certains mécanismes de variabilité du climat, ou étalonner certains paramètres.

fortes incertitudes sur certains aspects des projections climatiques n'a rien d'incompatible avec une confiance élevée sur d'autres aspects. Le niveau de confiance dans les résultats est ainsi modulé selon les variables (températures plus fiables que les précipitations par exemple), les régions concernées (régions de mousson plus difficiles à simuler...), mais aussi selon les processus physiques (confiance assez faible sur les effets des aérosols ou la représentation des nuages de type cirrus...). L'analyse de la confiance que l'on peut accorder aux résultats de modèles imparfaits est au cœur du travail d'étude des projections climatiques.

*INCERTITUDE :

Connaissance incomplète résultant d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu. Elle peut être représentée quantitativement ou par un jugement d'experts.



COMMENT AFFINER LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES GLOBAUX SUR L'EUROPE, LA MÉDITERRANÉE OU LA FRANCE ?

CONTRIBUTEURS

Samuel Somot
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Robert Vautard
LSCE/IPSL

Des projections climatiques à très haute résolution spatiale (de l'ordre de 10 km) sont possibles aujourd'hui grâce aux « modèles régionaux de climat ».
Ils affinent la représentation des phénomènes locaux et des événements extrêmes et leurs possibles changements futurs.

Les modèles couvrant toute la planète simulent l'évolution du système climatique terrestre et son énergétique globale sous l'effet de forçages externes (p. 10) et de sa variabilité interne (p. 12). Cependant, leur coût numérique étant très élevé, ils ne représentent, le climat de la Terre qu'aujourd'hui sur des mailles de l'ordre de 100 à 200 km (p. 2-9) et de fait, de nombreuses caractéristiques qui peuvent s'avérer essentielles sont grossièrement prises en compte. Par exemple, la topographie ne reflète pas bien le relief varié du Sud de la France et forme un ensemble montagneux contigu des Alpes aux Pyrénées dans les modèles globaux. En conséquence, ces modèles ne peuvent, par construction, simuler des épisodes de Mistral, vent local dû à l'accélération du flux par le couloir rhodanien, qui est quasi absent. Ce type de modèle ne reproduit pas bien non plus les pluies torrentielles d'automne dans le Sud-Est de la France (les événements cévenols) et les orages en été.

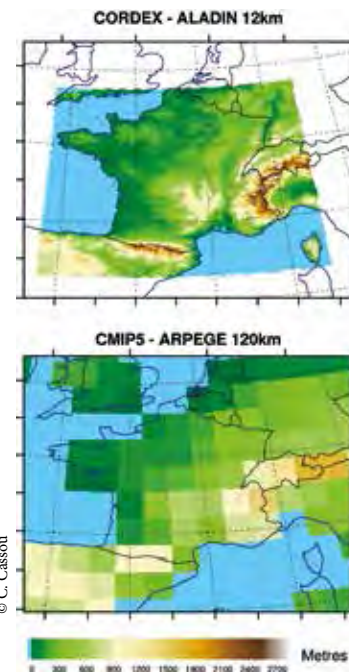
L'exercice international CORDEX

En parallèle de l'exercice CMIP5, il existe un exercice international d'intercomparaison des méthodes de régionalisation visant à coordonner la communauté et délivrer des informations robustes aux utilisateurs des scénarios régionalisés. Appelé CORDEX (<http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>), il se déroule sur 13 zones pré-définies à 50 km de résolution. La communauté française s'implique fortement avec 4 modèles (ALADIN, ARPEGE, LMDZ et WRF) et 5 zones (Afrique, Méditerranée, Amérique du Sud, Amérique du Nord et Europe).

l'Europe. Au cours des 20 dernières années, la communauté française a développé plusieurs MRCs et est pionnière dans les modèles régionaux dits couplés intégrant atmosphère, continent, fleuve et océan.

Les terrains de jeu favoris des modélisateurs régionaux sont les zones de montagnes, les îles, les zones côtières complexes et les régions où se produisent des événements extrêmes (tempêtes, précipitations intenses). La zone euro-méditerranéenne regroupe toutes ces caractéristiques en plus d'être une zone fortement peuplée et particulièrement vulnérable au changement climatique. Elle a donc été choisie depuis plus de 10 ans par la communauté française, comme cas d'étude naturel pour la régionalisation du climat.

Pour affiner spatialement les scénarios de changement climatique, il faut donc augmenter la résolution du maillage. On parle de régionalisation et on utilise souvent pour cela des modèles régionaux de climat (MRCs). Ils sont très semblables aux modèles globaux par les équations qu'ils résolvent mais ils représentent le système climatique plus finement sur une sous-partie du globe, prenant mieux en compte les conditions aux limites (relief, nature de la végétation...). La puissance des supercalculateurs est donc mise essentiellement au service de la résolution spatiale dans ce cas. Les MRCs atteignent aujourd'hui 12 km de résolution sur des zones aussi grandes que



La **valeur ajoutée*** des MRCs y a été démontrée pour les pluies intenses en automne, les vents forts terrestres et maritimes, les dépressions méditerranéennes et les courants océaniques.

Les scénarios régionalisés obtenus permettent aujourd'hui de caractériser le changement climatique et ses impacts sur de nombreux écosystèmes naturels et secteurs socio-économiques à l'échelle de la France et de l'Europe. Mais au-delà, de nombreux défis sont encore devant nous :

► *Contraste entre le relief typique d'un modèle régional versus global*

Une erreur classique

« Grâce à leur résolution plus fine, les MRCs sont plus fiables que les modèles globaux. »

Ce n'est pas toujours le cas ; la valeur ajoutée des MRCs dépend de la zone d'intérêt ou du phénomène étudié mais aussi des défauts dans les conditions de grande échelle imposées à ses frontières.

- améliorer la capacité des modèles à simuler les événements extrêmes régionaux afin d'en établir des scénarios plus robustes ;
- mieux quantifier les incertitudes des projections régionales avec les ensembles de simulations produites dans les exercices internationaux d'intercomparaison de type CORDEX ;
- développer la prochaine génération des MRCs pour atteindre les échelles kilométriques (1-5 km) ;
- ajouter de nouvelles composantes interactives aux modèles régionaux de climat : lacs, villes, chimie atmosphérique, aérosols naturels et biogéochimie par exemple ;
- extraire des résultats de la recherche, des services climatiques utiles à la société et aux décideurs politiques et économiques.



*VALEUR AJOUTÉE :

En climat régional, la valeur ajoutée représente l'information supplémentaire qu'apporte un modèle régional par rapport au modèle global qui le force.



LES MODÈLES, OUTILS DE PRÉVISION

QUELS SONT LES FONDEMENTS DE LA PRÉVISIBILITÉ CLIMATIQUE ?

Les modèles climatiques permettent de comprendre les fluctuations passées et d'anticiper celles du futur à long terme. Ils sont aussi des outils de prévision des écarts ou anomalies climatiques par rapport à la normale, à un horizon variant du mois à la décennie. La prévisibilité mesure la capacité à prévoir en fonction des échéances.

CONTRIBUTEURS

Christophe Cassou
SUC/CERFACS-CNRS
Didier Swingedouw
LSCE/IPSL

La prévisibilité météorologique repose sur la connaissance de l'état de l'atmosphère au démarrage de la prévision (température, vent...) et de l'évolution de cet état, dit initial, selon un modèle représentant la physique de l'atmosphère. Elle est réduite à une dizaine de jours de par la nature **chaotique*** de l'atmosphère : on parle d'effet papillon. La prévisibilité saisonnière repose, en grande partie, sur la connaissance initiale des composantes lentes du système climatique

(océan, humidité des sols, banquise.) et de leurs évolutions que l'on estime grâce aux modèles couplés. Au-delà de quelques décennies, les modifications des forçages externes (concentration des gaz à effet de serre -GES-, rayonnement solaire... p. 10) sont les principales sources de prévisibilité. Aux incertitudes des modèles couplés de climat viennent ainsi s'ajouter celles liées aux émissions futures de GES dues aux activités humaines ; on parle alors de projections climatiques



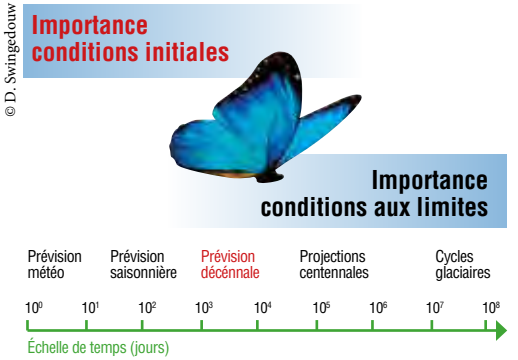
Forces et faiblesses de la prévision climatique

La prévisibilité saisonnière (~ 3 à 6 mois d'échéance) est plus forte aux latitudes tropicales en lien avec l'occurrence des événements El Niño (p. 12), qu'aux moyennes latitudes. Sur l'Europe, elle est marginale. La prévisibilité décennale est grande en Atlantique jusqu'à ~8-10 ans d'échéance alors qu'elle est limitée dans le Pacifique (~ 2 à 3 ans). Cela s'explique essentiellement par les différences de circulation océanique entre les bassins.

(p. 30) et non de prévisions. La prévisibilité décennale se situe entre l'échelle saisonnière et les projections : on cherche à prévoir à la fois la réponse du système climatique aux forçages et sa modulation par la variabilité interne des composantes lentes. Véritable "mémoire", elles peuvent alors influencer la météorologie de régions environnantes de manière persistante (p. 12). La prévisibilité est évaluée en « rejouant » des prévisions d'un grand nombre de situations passées. Ainsi, des prévisions saisonnières et décennales ont été réalisées *a posteriori* sur les 50 dernières années. Sur cette période, on dispose d'observations permettant d'initialiser les modèles et de vérifier s'ils parviennent à prévoir des évolutions climatiques qui ont été constatées. Ce sont des bancs d'essai essentiels pour cerner les limites des modèles et le niveau de confiance des prévisions qui

comportent par définition une part d'incertitude qu'il est important de quantifier. Cette incertitude est associée à l'impossibilité de définir parfaitement l'état initial de la prévision (couverture spatiale incomplète des systèmes d'observation...), aux limitations inhérentes à la modélisation (incapacité de décrire toutes les interactions d'échelles entre les processus physiques...), aux moyens de calcul, et à l'impossibilité d'anticiper de manière parfaite l'évolution des forçages externes futurs.

Les groupes français de modélisation sont mobilisés sur les questions de prévisibilité du mois à la décennie prochaine. La prévision décennale, sujet de recherche coordonné au plan international, fait pour la première fois l'objet d'un chapitre dans le 5^{ème} rapport du GIEC. La communauté française est représentée dans ce cadre par deux systèmes de prévision. Elle a montré qu'en intégrant de manière simple des observations de température et de salinité océaniques dans l'état initial des modèles, ceux-ci parviennent notamment à bien prévoir l'évolution de l'Océan



► Schéma montrant l'importance relative des conditions initiales et aux limites pour le climat selon les échelles de temps.

Une erreur classique

« Comment peut-on prévoir le climat des 10 à 100 prochaines années alors que l'on n'arrive pas à prévoir le temps au-delà de quelques jours ? »

Ce paradoxe provient de la confusion entre météorologie (temps qu'il fait en un lieu et moment donné) et climatologie (aspects statistiques de la météorologie).

Nord-Atlantique, ce qui n'est pas le cas dans les simulations non initialisées. La valeur ajoutée de l'initialisation confirme le rôle important de la variabilité interne, telle l'Oscillation Atlantique Multidécennale (p. 12), qui est alors phasée avec la réalité.

Il existe deux pistes pour améliorer la qualité des prévisions : la première consiste à perfectionner la description de l'état initial du système climatique et son intégration dans les modèles. La seconde vise à améliorer les modèles eux-mêmes pour faire en sorte que la qualité des prévisions effectuées s'approche de la limite théorique de prévisibilité.

*CHAOTIQUE :

Propriété d'un système dynamique pour lequel de petites différences dans l'instant initial du système peuvent conduire à des états futurs distincts.

► Photos comparatives d'un glacier au Spitzberg en 1928 et 2009.

3.2

LES MODÈLES, OUTILS DE PRÉVISION

QUE NOUS DISENT LES MODÈLES QUANT AU CLIMAT DES DÉCENNIES À VENIR ?

Les modèles simulent de façon robuste un réchauffement global pour les décennies à venir, dont l'amplitude et l'effet sur les pluies demeurent cependant incertains en particulier aux échelles régionales. Ils simulent à terme une disparition de la banquise arctique en été et une augmentation du niveau marin.

CONTRIBUTEURS

Hervé DOUVILLE
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Jean-Louis DUFRESNE
LMD/IPSL

Dans le cadre du programme mondial de recherche sur le climat, les principaux centres de modélisation climatique, dont en France ceux de Paris (IPSL) et Toulouse (CNRM-Cerfacs), ont réalisé un ensemble de simulations, inédit par sa taille et sa nature, permettant d'évaluer les modèles, de comprendre certains changements climatiques constatés dans les observations et surtout d'anticiper l'évolution du climat au cours des prochaines décennies. Ces simulations

confortent la plupart des résultats publiés dans les précédents rapports du GIEC (p. 22), mais permettent d'affiner la compréhension des mécanismes et des incertitudes. Relativement aux valeurs attendues en moyenne globale (p. 24), la plupart des modèles s'accordent sur une amplification continentale (rétroaction de la neige et de l'humidité du sol) et arctique (retrait de la banquise) du réchauffement en surface, et sur un renforcement des risques de canicules (p. 32).

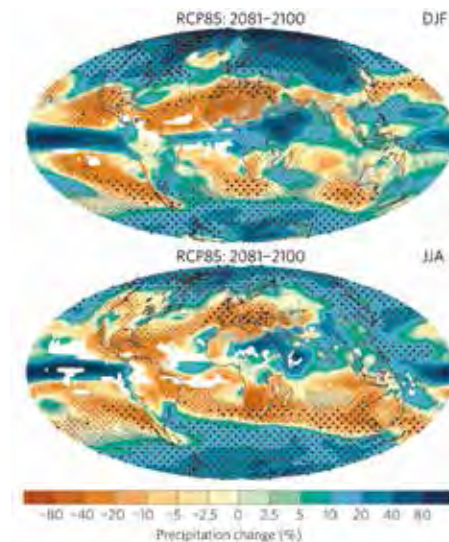
La relation de Clausius-Clapeyron

Elle indique que la quantité maximale d'eau sous forme vapeur augmente avec la température. Observations et modèles suggèrent que le réchauffement global se fait à humidité relative quasi-constante, c'est-à-dire que le contenu effectif en vapeur d'eau augmente en moyenne de 7 % par °C. Cette croissance pourrait être atteinte (voire dépassée) pour les fortes pluies. Par contre, l'évolution de la moyenne des précipitations est aussi contrainte par d'autres facteurs (énergétique) et atteint seulement 2 % par °C.

Les changements prévus en précipitation sont hétérogènes et plus incertains. Les modèles simulent une augmentation des précipitations annuelles aux hautes latitudes et une diminution dans les régions subtropicales, en accord avec les tendances observées au cours des dernières décennies. Ces changements s'expliquent à la fois par des effets physiques (exemple : plus l'atmosphère est chaude, plus elle peut contenir de vapeur selon la relation de Clausius-Clapeyron, ce qui représente par ailleurs une première rétroaction positive qui amplifie le réchauffement global) et dynamiques (modification de la circulation atmosphérique). De fortes incertitudes subsistent sur l'évolution des précipitations moyennes et extrêmes sous les tropiques et l'évolution des risques de sécheresse. Si l'aridification semble inéluctable dans les climats de type méditerranéen, la réponse des sécheresses estivales aux moyennes latitudes varie cependant largement d'un modèle à l'autre. La France métro-

politaine devrait se réchauffer un peu plus que la moyenne globale et pourrait voir ses précipitations changer de façon différentes selon les régions et les saisons, comme par exemple une augmentation des pluies dans le nord en hiver et une diminution en été dans le sud.

En Arctique, toutes les **projections*** simulent une disparition progressive de la banquise en été, dès 2030 selon les scénarios les plus extrêmes. La réduction de la couverture neigeuse et de la banquise constitue une autre rétroaction positive pour le réchauffement global. Les estimations d'élévation du niveau marin ont été revues à la hausse pour le futur, notamment à cause de la fonte accélérée des calottes antarctique et groenlandaise, détectable dans les observations récentes et jusqu'alors mal représentée dans les modèles. Cette élévation pourrait atteindre ~ 1 m à la fin du siècle pour un



► Changement de précipitation sur 2081-2100 par rapport à 1986-2005 simulé par des modèles de l'ensemble CMIP5 selon le scénario RCP8.5 pour la saison d'hiver (haut) et été (bas).

Une erreur classique

« La température globale est un paramètre dans les modèles climatiques. »

La température globale estimée par les modèles n'est pas une variable intrinsèque du modèle en tant que telle. Elle correspond à la moyenne spatiale de la température calculée en chaque point de grille et intègre par construction les spécificités climatiques régionales.

scénario d'émission médian, mais l'incertitude reste cependant forte. De nombreuses recherches en cours dans la communauté française (p. 8) devraient permettre d'affiner les estimations dans les années à venir, pour le niveau de la mer comme pour de nombreuses autres variables climatiques.

Enfin, au-delà des incertitudes intrinsèques aux modèles, en particulier celles liées aux nuages, l'amplitude des changements simulés à l'horizon du siècle dépend largement du scénario d'émission de gaz à effet de serre considéré (p. 24), tandis que les changements anticipés au cours des prochaines décennies sont du même ordre de grandeur que les variations naturelles du climat (p. 12). On essaye de les prévoir *via* l'initialisation de certaines composantes du système, en particulier l'océan (p. 28).

*PROJECTION :

Simulation climatique visant à estimer la réponse du système climatique à divers scénarios de forçages externes (émission de gaz à effet de serre, aérosols, etc.)

COMMENT DÉCRIRE LES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES ET LEUR ÉVOLUTION FUTURE ?

CONTRIBUTEURS

Julien CATTIAUX
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Mathieu VRAC
LSCE/IPSL

Les événements extrêmes sont une vitrine d'un état climatique. Ils traduisent les fluctuations les plus exceptionnelles de sa variabilité et s'accompagnent des impacts sociétaux et environnementaux les plus importants. Évaluer leur probabilité d'occurrence en climat futur est un défi.

La notion de climat peut se décliner en une diversité d'événements météorologiques, depuis les plus courants, voire « clichés » (un crachin breton, une journée ensoleillée à Montpellier...), jusqu'aux plus rares et extrêmes, généralement associés aux impacts socio-économiques et environnementaux les plus forts. La canicule européenne de l'été 2003 fournit une illustration particulièrement frappante de ces derniers, avec des températures extrêmement élevées et des conséquences dramatiques : forte mortalité, perte de production énergétique, pollution urbaine, incendies... Ainsi, une question majeure liée au chan-

gement climatique actuel est de savoir comment seront modifiés les événements extrêmes à la fois dans leur intensité mais aussi leur occurrence. Les projections fournies par les modèles de climat apportent des éléments de réponse. Le terme d'extrême climatique couvre un large spectre de variables et d'échelles spatio-temporelles : des précipitations localement intenses pendant quelques heures aux années extrêmement chaudes et/ou sèches à l'échelle d'un pays ou d'un continent. La valeur dite « extrême » prend également différentes formes : elle peut être définie comme le dépassement d'un seuil

Pourquoi ce froid ces jours-ci alors qu'on parle de réchauffement ?

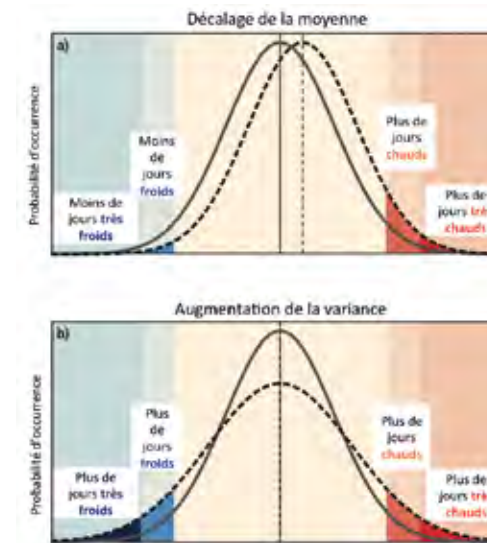
Les tendances au réchauffement d'origine anthropique sont petites devant la variabilité spatio-temporelle des températures. Une évolution à long terme n'empêche en rien des fluctuations prononcées aux échelles de temps courtes (typiquement d'une année sur l'autre) et d'une région à l'autre. Records de froid ponctuels et réchauffement global ne sont pas incompatibles ; ce dernier se traduit simplement par une plus grande probabilité de battre des records chauds que de records froids au cours du XXI^e siècle, ce qui a déjà été observé depuis les dernières années.

donné (par exemple le centile* 95 ou 99 % de la variable d'intérêt), ou comme la valeur maximale observée sur une période de temps donnée (par exemple le maximum de précipitation journalière sur un an). Dans les deux cas, et quelque soit la variable et l'échelle mises en jeu, l'étude des extrêmes repose principalement sur des analyses statistiques basées sur des distributions de probabilités spécifiques. En contexte de changement climatique, on cherche alors à évaluer comment des caractéristiques d'extrêmes telles que le temps de retour de l'événement, son amplitude, son étendue géographique, sont modifiées.

Étant par définition rares, la détection de tendances dans les extrêmes requiert des analyses sur des périodes de temps aussi longues que possible (typiquement un siècle) ; elle est difficile car les jeux de données disponibles sont souvent restreints (quelques dizaines d'années). Pour l'étude d'événements à fine échelle spatiale (par exemple précipitations très intenses, cyclones tropicaux),

il est souvent nécessaire de « régionaliser » les simulations des modèles de climat (p. 26). Tant pour l'étude des tendances passées que pour les projections futures, il est particulièrement important de quantifier les incertitudes concernant les conclusions fournies en termes d'extrêmes. L'analyse des projections climatiques issues des modèles pour le siècle à venir montre que le réchauffement moyen s'accompagne d'une augmentation (diminution) de

fréquence et d'amplitude des extrêmes chauds (froids). À titre d'exemple, en Europe, les modèles



► Effets de changements de distribution sur les extrêmes : changement de moyenne (haut), de variance (bas).

Une erreur classique

« Jamais vu de telles inondations !
La faute au réchauffement ! »

Un événement extrême isolé ne peut être imputé au changement climatique d'origine anthropique. Néanmoins des outils statistiques permettent d'évaluer comment ce dernier a modifié sa probabilité d'occurrence.

de l'IPSL et du CNRM-Cerfacs suggèrent que d'ici 2100, respectivement 40 % et 20 % des jours d'été seront plus chauds que le 99^{ème} centile présent (contre 1 % par définition actuellement). Cette modification ne saurait être interprétée comme le résultat d'un simple décalage vers le chaud des distributions de température, le comportement des extrêmes étant également affecté par d'éventuelles modifications de forme de ces distributions (par exemple de variance) sur lesquelles les projections climatiques restent incertaines. Côté hydrologie, les modèles suggèrent également une intensification des extrêmes (augmentation du nombre de jours secs, diminution du temps de retour des épisodes de pluie intense), avec des disparités géographiques néanmoins importantes.

*CENTILE :

Le 10^{ème} (resp. 90^{ème}) centile de température est la température sous laquelle se trouvent 10 % (resp. 90 %) des observations de température.



LE CYCLE DU CARBONE PEUT-IL DEVENIR FOU ?

CONTRIBUTEURS

Christine Delire et Roland Sférian
CNRM-GAME/Météo-France CNRS
Laurent Bopp
LSCE/IPSL

Jusqu'à présent la biosphère terrestre et les océans ont absorbé environ la moitié de nos émissions de CO₂ limitant ainsi leurs effets sur le climat. Cependant le réchauffement global pourrait réduire l'efficacité de ces puits de carbone amplifiant de fait l'effet de la perturbation anthropique.

La concentration atmosphérique de CO₂ a crû de 40 % au cours de la période industrielle, passant de 278 ppm (soit 0.278 % du volume de l'atmosphère) en 1750 à 392 ppm en 2012. Cette augmentation est liée à l'activité humaine, en particulier à l'utilisation de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz). Mais seule la moitié de ces émissions de carbone s'accumule dans l'atmosphère, l'autre moitié étant absorbée par les puits naturels de l'océan et de la biosphère terrestre. L'océan absorbe du carbone à cause du déséquilibre entre les pressions partielles de CO₂ de part et d'autre de l'interface air-mer. Pour la

biosphère terrestre, les processus en jeu sont débattus, mais la fertilisation des plantes par l'augmentation du CO₂ pourrait jouer un rôle clé. Ces puits de carbone, qui aujourd'hui limitent l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère et donc le réchauffement climatique, sont fragiles. Dans des conditions défavorables (sécheresse intense, canicule...), la croissance des plantes est ralentie et l'absorption de carbone diminue. Ces conditions seront beaucoup plus probables dans le futur (p. 30-33). De plus, la respiration des plantes et la décomposition du carbone du sol ont tendance à augmenter avec la température. Lors des deux



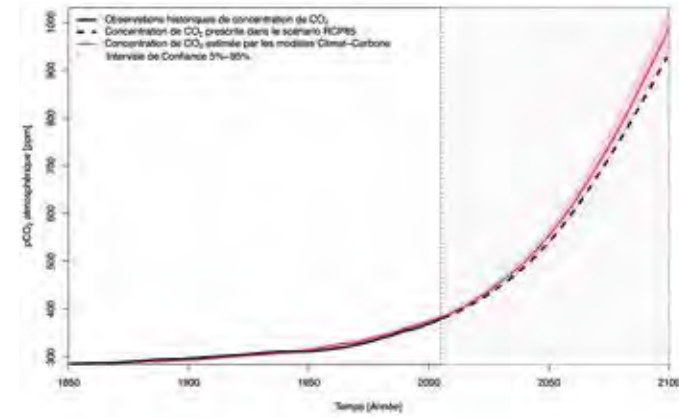
L'acidification des océans

L'océan absorbe une part importante des nos émissions de carbone. Le revers de la médaille, c'est que le CO₂ est un acide et que son absorption modifie de fait la chimie de l'eau de mer. Des mesures ont montré que le pH de surface de l'océan avait déjà perdu 0,1 unité au XX^e siècle, et on estime qu'il pourrait encore baisser de 0,3 d'ici 2100. Des expériences ont montré qu'une baisse de pH pouvait être dommageable pour les espèces calcifiantes comme les bivalves ou les coraux. Ces organismes construisent leurs coquilles ou squelettes en carbonate de calcium en utilisant les ions carbonates, dont la concentration diminue quand le pH est réduit.

du carbone décrite ci-dessus. En effet, la perte d'efficacité des puits due au réchauffement augmente la concentration du CO₂ atmosphérique et donc le réchauffement induit, ce qui diminue plus encore l'action des puits de carbone. Une incertitude subsiste cependant sur l'amplitude même de la rétroaction. Les études récentes suggèrent que la quantité de CO₂ atmosphérique additionnelle résultant de cette rétroaction pourrait atteindre jusqu'à plusieurs dizaines de ppm à la fin du siècle en fonction du modèle utilisé. Cette rétroaction pourrait conduire à un réchauffement additionnel de 0,5°C en 2 100.

Il faut rappeler toutefois que la génération actuelle de modèles de climat ne prend pas ou très mal en compte certains processus qui pourraient modifier fortement l'estimation de ce couplage climat-carbone. Aux hautes latitudes par exemple, d'importantes quantités de carbone se sont accumulées au cours de l'histoire de la Terre dans le sol aujourd'hui gelé en permanence (pergélisol, p. 9). La décomposition microbienne dans ces zones

sécheresses intenses de 2005 et 2010, l'Amazonie qui est un **puits de carbone*** important, a vu son absorption nette de carbone diminuer fortement. Pour l'océan, plusieurs processus pourraient limiter l'absorption de carbone anthropique : l'augmentation des températures diminue la solubilité du CO₂ et l'augmentation de la stratification verticale liée au réchauffement des eaux de surface limite la pénétration du carbone dans l'océan profond. Les premières simulations représentant le cycle du carbone dans l'océan, l'atmosphère et les surfaces terrestres au sein même des modèles climatiques datent du début des années 2000. Elles mettent en évidence la rétroaction positive entre climat et cycle



► Évolution du CO₂ atmosphérique observé de 1850 à 2006 puis projeté selon le scénario RCP8.5 jusqu'en 2100 et simulé par les modèles climat-carbone.

Une erreur classique

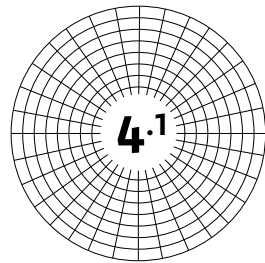
« Pour stabiliser le CO₂ dans l'atmosphère, il suffit de stabiliser les émissions ! »

Ne pas confondre concentration et émissions. Pour que le CO₂ atmosphérique se stabilise, il faudrait que les puits de carbone compensent entièrement les émissions anthropiques. Mais comme l'intensité des puits de carbone dépend de la concentration en CO₂ atmosphérique, la réduction des émissions anthropiques et le ralentissement de la croissance du CO₂ va rendre les puits moins efficaces. A terme, stabiliser le CO₂ atmosphérique nécessite de mettre totalement fin aux émissions anthropiques.

est très peu efficace à cause de la courte saison de croissance, si bien que de grandes quantités de carbone y sont piégées. En cas de réchauffement, ces sols vont progressivement dégeler, accélérant la décomposition microbienne et l'émission de carbone vers l'atmosphère. Selon que cette décomposition se fait dans une zone inondée ou non, elle libère du CO₂ ou du CH₄, un gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le CO₂ mais à durée de résidence dans l'atmosphère plus courte.

*PUITS DE CARBONE :

Absorption additionnelle de carbone atmosphérique par les océans et la biosphère relativement aux flux de carbone équilibrés obtenus sans perturbation anthropique.



ZOOM SUR 4 MÉTIERS

PHYSICIENNE DU CLIMAT

→ En quoi consiste votre métier ?

Mon métier consiste à comprendre les processus turbulents et convectifs dans l'atmosphère à l'origine de la formation des nuages et de les traduire en équations pour représenter l'effet collectif des nuages sur la température, l'humidité et les vents simulés par les modèles de climat. Pour ce faire, je réalise des simulations de situations locales observées, telles que les cumulus d'alizés, les orages ou lignes de grain tropicales, qui m'aident à construire les paramétrisations des modèles grande échelle qui simulent le climat

actuel et son évolution future. Il s'agit d'élaborer des schémas conceptuels simples mais suffisamment réalistes pour rendre compte du rôle des nuages dans le système climatique complet.

Que préférez-vous dans votre métier ?

J'aime travailler avec des gens d'expertises différentes autour d'un même objectif. Pour améliorer la représentation des nuages dans les modèles de climat, j'interagis avec les chercheurs qui étudient spécifiquement les processus nuageux à l'aide d'observations et de modèles à mailles

très fines résolvant ces processus. Je travaille aussi avec ceux qui développent le contenu numérique des modèles et réalisent des simulations climatiques sur des supercalculateurs, et enfin avec ceux étudiant la variabilité climatique. C'est très enrichissant de confronter les points de vue des uns et des autres. C'est un métier où j'apprends chaque jour.

► Carte des vents du 10 mars 2009 à 18 h Evreux. Gravure sur photographie, épreuves pigmentaires © J. Salmon



Bio Express

| Catherine Rio |

Après une formation d'ingénieur en mécanique des fluides numérique, je me suis spécialisée en géophysique. J'ai effectué ma thèse au Laboratoire de Météorologie Dynamique sur la représentation des nuages dans les modèles de climat. Après trois années de postdoctorat, à Toulouse et New-York, j'ai obtenu un poste de chercheur au CNRS.

Quel conseil pourriez-vous donner à un jeune qui voudrait faire votre métier aujourd'hui ?

Si les défis le stimulent, s'il est curieux et persévérant, qualité indispensable du chercheur, je lui dirais de foncer. Le nombre de personnes utilisant les modèles de climat est en constante augmentation faisant peser de plus en plus de pression sur les personnes qui les développent en amont comme moi. On a besoin de renfort, d'enthousiasme, d'idées innovantes. Bien sûr la compétition pour décrocher un poste de chercheur est très ardue, mais ce n'est pas une raison suffisante pour se laisser aller au découragement et se détourner de la recherche scientifique qui procure de grandes satisfactions.

Bio Express

| Sophie Valcke |

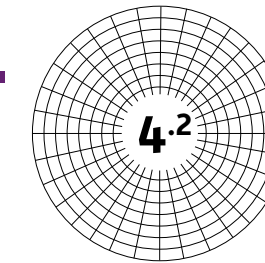
Après un doctorat en océanographie à Grenoble, j'ai réalisé un postdoctorat en climat en Colombie-Britannique au Canada. Depuis 1997, je dirige le développement du logiciel OASIS en tant qu'ingénieur au Cerfacs ce qui me permet de participer à plusieurs projets nationaux et Européens.

→ Pourquoi votre métier est-il important pour la modélisation du climat ?

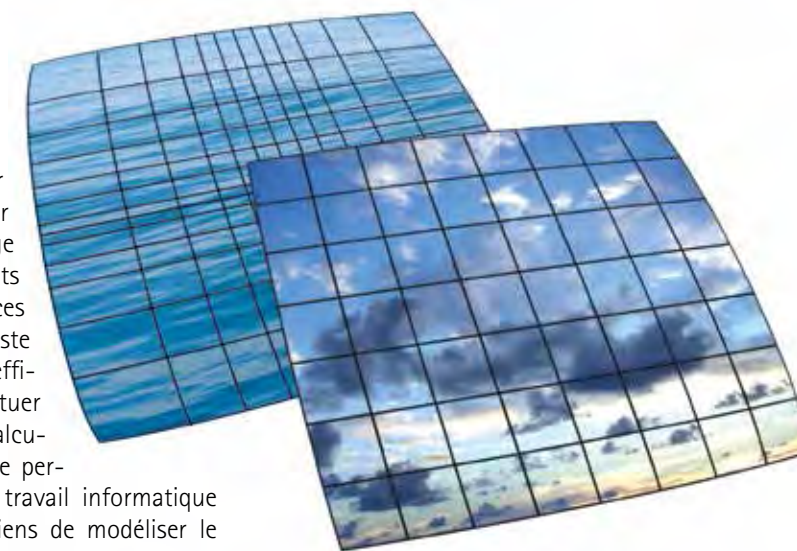
Pour modéliser le climat, on résout « numériquement » des équations qui représentent la physique et la dynamique de l'atmosphère, de l'océan et des autres composantes du système climatique (surface continentale, banquise, glaciers, etc.). On écrit des programmes informatiques qui donnent une solution approchée de ces équations en chacun des petits cubes du modèle. Ces programmes sont habituellement développés par des groupes différents pour chacune des composantes. Il faut donc les « coupler » et leur permettre d'échanger des variables physiques pour réaliser un modèle complet de climat. Par exemple, l'atmosphère doit connaître la température de surface de la

ZOOM SUR 4 MÉTIERS

INGÉNIEUR DE RECHERCHE EN CALCUL NUMÉRIQUE HAUTE PERFORMANCE POUR LE CLIMAT



mer calculée par l'océan et celui-ci a besoin, en entrée, de flux de chaleur, de vent etc. produits par l'atmosphère. Mon métier consiste ainsi à développer des logiciels de couplage permettant aux différents programmes d'échanger ces données. Tout le défi consiste à ce qu'ils soient le plus efficaces possible pour effectuer ces calculs sur des supercalculateurs avec la plus haute performance possible. Mon travail informatique permet donc aux physiciens de modéliser le climat de façon globale et efficace !



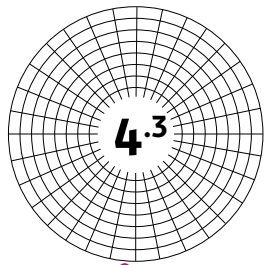
Quels aspects de votre métier vous plaisent particulièrement ?

Le logiciel que je développe, OASIS, est utilisé par plusieurs groupes de recherche en Europe et à travers le monde. Comme la science du climat, ainsi que les plateformes de calcul, progressent constamment, les besoins de ces groupes sont en perpétuelle évolution. Cette ouverture internationale et ce renouvellement

permanent rendent mon métier exigeant et passionnant.

Quel conseil donneriez-vous à un jeune qui voudrait faire votre métier ?

Faire des maths, de la physique, de l'informatique et du calcul numérique : cela donne accès à des métiers passionnants, permettant à la fois une bonne autonomie et un travail de groupe enrichissant.



ZOOM SUR 4 MÉTIERS

4.3 INGÉNIEUR DE RECHERCHE EN DÉVELOPPEMENT ET DÉPLOIEMENT D'APPLICATIONS



→ En quoi consiste votre métier ?

Je conçois et je développe des logiciels utiles pour la préparation, l'exécution et la sauvegarde simulations climatiques. Je m'occupe également des logiciels permettant de gérer, distribuer et réutiliser les données résultantes de ces simulations appelées « sorties ». Ces simulations, réalisées sur des super-calculateurs, en produisent des quantités considérables (de l'ordre du péta-octet soit un million de milliards d'octets, annuellement, p. 15). Dans le cadre de grands exercices internationaux comme CMIP5, un des axes fort de mon métier est de permettre à toute la communauté internationale de pouvoir appréhender le plus efficacement possible,

cette montagne de sorties sans se perdre dans le surplus d'informations. Tout le défi est ainsi de faire le pont entre les technologies de l'information, des infrastructures informatiques à même de prendre en charge des péta-octets de données et des chercheurs aux questionnements et expertises scientifiques très variés.

Que préférez-vous dans votre métier ?

Aussi loin que je puisse me souvenir, j'ai toujours été attiré par l'informatique et la technologie en général. Également sensible très tôt aux problématiques environnementales, le cadre professionnel de mon métier est de ce fait très stimulant. La nécessité d'apprendre et d'évoluer en

Bio Express

| Sébastien Denvil |

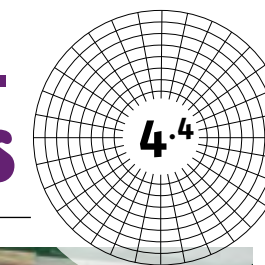
J'ai grandi à Paris où j'ai fait des études universitaires en mathématiques appliquées et en informatique. À l'issue de mon stage sur un sujet en lien avec le climat, j'ai été embauché à l'IPSL en 2002. Je m'occupe à présent de l'environnement de contrôle des simulations climatiques et de la gestion des données produites.

► Machine Curie (BULL)
© CEA/Cadarn

permanence au contact de technologies et de problématiques scientifiques de pointe comble ainsi le passionné de sciences et de technologies que je suis.

Quel conseil pourriez-vous donner à un jeune qui voudrait faire votre métier aujourd'hui ?

Le domaine du calcul intensif est en plein essor. La modélisation du système climatique permet l'accès à des infrastructures de recherche aujourd'hui à la pointe (super-calculateurs, centre de données). Dirigez vous vers des filières donnant un poids important aux mathématiques appliquées et à l'informatique, cela vous donnera les bases nécessaires pour démarrer dans ce métier. Et rien de tel que de faire des stages dans des laboratoires de sciences de l'environnement !



ZOOM SUR 4 MÉTIERS

4.4 PASSEUR DE CONNAISSANCES

Bio Express

| Valérie Masson-Delmotte |

J'ai vécu mon enfance en Lorraine puis fait des études d'ingénieure en région parisienne. En cherchant un stage et une thèse sur un sujet lié au climat, j'ai eu la chance d'être accueillie au CEA, pour un doctorat sur la modélisation de climats passés, puis d'y être embauchée, pour travailler sur les carottes de glace.

Visite de Valérie Masson-Delmotte
dans l'école primaire Damesme (Paris 13) © CEA

→ Pourquoi votre métier est-il important pour la modélisation du climat ?

Je suis paléoclimatologue, c'est-à-dire que j'étudie les variations passées du climat, avant qu'il n'y ait des mesures météorologiques. Pour cela, il faut trouver des informations précises sur le climat, à partir des indices laissés dans des milieux naturels (coraux, sédiments, cernes d'arbres...), qu'on appelle les archives du climat. Dans mon cas, j'utilise les informations issues de l'analyse des glaces du Groenland et de l'Antarctique pour estimer les changements de températures polaires, au cours des derniers siècles, mais aussi lors des grands changements glaciaires-interglaciaires, et pour comprendre les mécanismes menant à ces changements.



Quels aspects de votre métier vous plaisent particulièrement ?

J'apprécie de travailler avec des collègues du monde entier, qui mettent leurs efforts en commun pour mieux connaître et comprendre le fonctionnement du système climatique à partir des études des climats passés, mais aussi des changements en cours et de la modélisation des possibles évolutions futures. J'ai aussi eu la chance de pouvoir passer deux étés sur l'inlandsis du Groenland, pour extraire de nouvelles carottes de glace. Un autre volet de mon métier que j'aime porte sur le partage des connaissances : comme on apprend l'histoire des civilisations, je pense qu'il est important qu'on connaisse l'histoire du climat de notre planète, mais aussi les

bases physiques de la « machine » climatique. Je suis souvent invitée dans des conférences grand public et je mène des actions auprès des milieux scolaires, associatifs et médiatiques. La vulgarisation scientifique est une composante essentielle du métier de chercheur.

Quel conseil donneriez-vous à un jeune qui voudrait faire votre métier ?

Il ne faut pas hésiter à prendre contact dans les laboratoires de recherche via le web, solliciter les techniciens, ingénieurs ou chercheurs, et assister à des conférences grand public et portes ouvertes pour découvrir les différents métiers de la recherche scientifique.

GLOSSAIRE

ALADIN : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational. Modèle d'atmosphère régional développé par un consortium d'instituts Européens.

ARPEGE : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle. Modèle d'atmosphère global développé au CNRM-GAME.

CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project phase 5.

CORDEX : Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

GELATO : Global Experimental Leads and ice for Atmosphere and Ocean. Modèle de glace de mer développé au CNRM-GAME.

GIEC (IPCC en anglais) : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

LATMOS : Laboratoires Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (CNRS, UVSQ, UPMC).

LEFE : Les Enveloppes Fluides et l'Environnement: Action interorganisme sur projets coordonnée et gérée par l'INSU.

LIM : Louvain-la-Neuve sea-Ice Model. Modèle de glace de mer développé en Belgique et au LOCEAN intégré dans NEMO.

LMDZ : Modèle d'atmosphère global développé au LMD.

MISSTERRE : Modélisation Intégrée du Système TERRE. Projet de coordination de la modélisation climatique en France soutenu par le programme LEFE de l'INSU.

MRC : Modèle Régional de Climat.

NEMO : Nucleus for European Modelling of the Ocean. Modèle d'océan développé par un consortium d'instituts Européens.

OASIS : Ocean Atmosphere Sea Ice Soil. Coupleur de modèles numériques développé au CERFACS.

PMIP : Paleoclimate Modelling Intercomparison Project

SURFEX : SURFace Externalisée. Modèle de surface développé au CNRM-GAME.

ORCHIDEE : ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems Environment. Modèle de surface continentale développé à l'IPSL.

WRF : Weather Research & Forecasting Model. Modèle d'atmosphère régional développé par un consortium international.

NOMS D'INSTITUTS

(les tutelles apparaissent entre parenthèses)

CCRT : Centre de Calcul Recherche et Technologie (CEA).

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives.

CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique.

CNRM-GAME : Centre National de Recherches Météorologiques - Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique (Météo-France, CNRS).

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique.

GENCI : Grand Équipement National de Calcul Intensif.

IDRIS : Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique (CNRS).

IRD : Institut pour la Recherche pour le Développement.

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers (CNRS).

IPSL : Institut Pierre-Simon Laplace, fédération de 6 laboratoires de recherche dont le LMD, LOCEAN, LATMOS et le LSCE.

LGGE : Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (CNRS, Université Joseph Fourier de Grenoble).

LOCEAN : Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques (CNRS, IRD, UPMC, Muséum nationale d'histoire naturelle).

LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS, X, UPMC, ENS).

LPO : Laboratoire de Physique des Océans (CNRS, Ifremer, UBO, IRD).

LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CNRS, CEA, UVSQ).

SUC-CERFACS : Sciences de L'Univers au CERFACS (CNRS).

TGCC : Très Grand Centre de Calcul (CEA).

UBO : Université de Bretagne Occidentale.

UPMC : Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

UVSQ : Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

Remerciements :

Le comité de rédaction tient à remercier tous les auteurs des fiches qui ont largement contribué à la réussite de ce projet ; Céline Colombo pour son écoute, son enthousiasme et son professionnalisme ; les personnels des laboratoires et tous ceux qui ont contribué à la réalisation des simulations et à la publication des données dans le cadre de l'exercice CMIP5 ; les personnels des centres de calcul ; Marie Aizpuru et Valéria Medina-Ambiado du service de communication de la délégation Midi-Pyrénées du CNRS, ainsi que l'INSU. Les heures de calcul ont été fournies par GENCI et Météo-France et les simulations ont tourné sur les centres de calcul de Météo-France, du CCRT/TGCC et à l'IDRIS.

Coordination et édition : Christophe Cassou, Didier Swingedouw, Aurore Voldoire - Conception Graphique : Céline Colombo - Comité de rédaction : Pascale Braconnot, Christophe Cassou, Serge Planton, Didier Swingedouw, Laurent Terray, Aurore Voldoire - Impression : Escoubiac Imprimeur, Graulhet (France).

CLIMAT

modéliser pour comprendre et anticiper

La modélisation a révolutionné les sciences du climat les propulsant d'une approche essentiellement descriptive et théorique vers une recherche où il est désormais possible de rejouer le passé pour mieux le comprendre mais aussi de se projeter dans le futur. Une coordination internationale s'est mise en place dans le cadre d'exercices de comparaison de modèles qui structurent un certain nombre d'axes de recherche et qui fournissent les résultats de simulations à de larges communautés scientifiques pour des applications très diverses.

Cet ouvrage, écrit par une quarantaine de chercheurs et réalisé dans le cadre du projet national MISSTERRE qui rassemble les laboratoires français de modélisation climatique, documente, sous la forme d'une vingtaine de sujets courts et de manière accessible les fondamentaux de la modélisation climatique. Il insiste sur les principales conclusions issues des plus récentes simulations. Il traite également de l'évaluation des modèles et des incertitudes associées à leurs résultats tout en commentant des « erreurs classiques » que l'on peut entendre ou lire à leurs propos.

