

MODÉLISATION DU CLIMAT

Encyclopædia Universalis

Frédéric Hourdin et Hélène Guillemot

22 novembre 2021

Les modèles de climat, élaborés depuis le milieu des années 1950, sont des programmes informatiques exécutés sur des ordinateurs pour produire des simulations numériques de l'évolution de l'état de l'atmosphère. Ces modèles, dits aussi "de circulation générale", sont fondés, d'une part, sur des formes approchées des équations qui régissent la circulation de l'atmosphère au-dessus de la surface du globe – ce que les spécialistes appellent le cœur dynamique du modèle – et, d'autre part, sur des représentations (appelées paramétrisations du modèle), parfois plus empiriques, des autres processus affectant l'atmosphère : absorption de l'énergie provenant du Soleil, nuages, pluie, évapotranspiration des végétaux, etc. Les modèles de circulation générale servent quotidiennement pour prédire la situation météorologique des jours suivants, mais aussi, sur de plus longues échelles de temps, pour simuler une météorologie qui se déroulerait sur plusieurs décennies, siècles, voire millénaires. Les simulations longues sont analysées en termes statistiques (cycle annuel des températures ou des pluies, régimes de temps, événements extrêmes...), cette vision statistique définissant le climat par rapport à la météorologie. Les simulations numériques permettent à la fois de comprendre les mécanismes du climat et d'anticiper ses changements futurs. Les modèles qui les produisent, rebaptisés "modèles de climat" puis "modèles du système Terre" (car intégrant davantage de processus et d'éléments), sont constamment améliorés et confrontés aux observations par la communauté des sciences du climat. Leur rôle central dans l'alerte sur le réchauffement global et l'anticipation des changements climatiques les a plongés au cœur de l'arène politique.

1 À l'origine des modèles de climat

La modélisation par ordinateur – ou modélisation numérique – du climat est née au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, presque en même temps que les premiers ordinateurs et que la prévision numérique du temps. Mais elle se fonde sur des connaissances scientifiques bien plus anciennes sur la circulation de l'atmosphère et les phénomènes météorologiques.

Les débuts de la météorologie et de la climatologie modernes

Une météorologie descriptive se développe dès le XVII^e siècle notamment grâce à l'invention de nombreux instruments (thermomètre, baromètre, anémomètre...). Ferdinand II de Médicis (1610-1670), grand-duc de Toscane, met en place le premier réseau d'observatoires, avec des stations instrumentées dans onze villes dont Pise, Florence, Paris et Varsovie. À bord des navires de commerce sillonnant les mers, on recense les vents et les courants marins, et l'astronome Edmond Halley (1656-1742) publie des cartes du monde où figurent les alizés de l'Atlantique comme les vents de mousson du Pacifique. Halley imagine l'organisation de la circulation atmosphérique en cellules intertropicales (l'air chaud monte près de l'équateur et redescend dans chaque hémisphère) et George Hadley (1685-1768) montre le rôle de la rotation de la Terre dans la déviation vers l'ouest des alizés – sans doute un des premiers "modèles" explicatifs de la circulation globale de l'atmosphère. C'est au XIX^e siècle que progressent rapidement, quoique indépendamment,

les trois “branches” de la météorologie : la branche empirique, qui est fondée sur le recueil et le traitement de données d’observation ; la branche théorique, qui cherche les explications des mouvements de l’atmosphère dans les lois de la physique ; la branche pratique, qui vise à prédire le temps. Sur le front des observations, l’invention, en 1817, des lignes isothermes par Alexander von Humboldt (1769-1859) a un impact majeur sur les représentations graphiques en météorologie. Mesures et représentations cartographiques sont standardisées sous l’impulsion de l’Organisation météorologique internationale (OMI) initiée en 1873, tandis que de nouvelles méthodes statistiques permettent de traiter l’afflux de données. À la fin du XIX^e siècle, presque tous les pays développés disposent d’un service dévolu à la collecte des données climatiques et au calcul de moyennes ; la climatologie a acquis le statut de science statistique et empirique proche de la géographie, enseignée à l’université. Sur le front de la théorie, physiciens et mathématiciens cherchent à interpréter les principaux phénomènes météorologiques à partir des lois de la physique et appliquent la théorie des fluides en mouvement à la Terre en rotation pour expliquer les vents et les courants : c’est la “météorologie dynamique”. Le troisième front, celui de la prévision, n’utilise ni les explications de la météorologie dynamique ni l’accumulation de données climatiques, mais il bénéficie de l’invention du télégraphe électrique (1837). Après qu’une violente tempête eut détruit le 14 novembre 1854 la flotte française en mer Noire au cours de la guerre de Crimée, l’astronome Urbain Le Verrier (1811-1877), mandaté par Napoléon III, met en place un réseau européen de stations météorologiques reliées par le télégraphe pour la transmission des observations. En France, à partir de 1863, le service météorologique produit quotidiennement des cartes figurant les pressions, températures et directions des vents, et permettant, par extrapolation, de prévoir l’évolution des perturbations et des tempêtes – une prévision cependant jugée peu scientifique.

Le calcul du temps avant l’ordinateur

Au tournant du XX^e siècle, des savants cherchent à fonder la prévision du temps sur les lois régissant la circulation atmosphérique. Selon le Norvégien Wilhelm Bjerknes (1862-1951), on doit pouvoir prédire un état de l’atmosphère à partir de son état précédent en le calculant grâce aux lois de la dynamique. Inspiré par cet objectif, l’ingénieur anglais Lewis F. Richardson (1881-1953) formule les équations gouvernant les mouvements de l’air et tente – par de fastidieux calculs réalisés à la main – une prévision pionnière au-dessus de l’Europe à partir d’un “état initial” fourni par des observations. D’autres avancées théoriques décisives ont lieu pendant la première moitié du XX^e siècle. Le Suédois Carl-Gustaf Rossby (1898-1957) cherche à formuler des théories calculables : simplifiant radicalement le système d’équations, il imagine un modèle dont les solutions décrivent les mouvements de l’atmosphère aux latitudes moyennes. Installé aux États-Unis, Rossby met en place des enseignements de météorologie dans plusieurs universités. La Seconde Guerre mondiale suscite des progrès rapides en météorologie, domaine stratégique pour l’aviation. Des ballons-sondes sont envoyés à partir de stations basées dans l’océan Atlantique, apportant une moisson d’informations sur la haute atmosphère, tandis que l’US Navy forme des milliers de météorologues.

Les premiers modèles numériques du temps et du climat

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, le mathématicien américain John von Neumann (1903-1957), qui a conçu les premiers calculateurs et les a utilisés pour mettre au point la bombe A puis la bombe H, est aussi l’initiateur de la météorologie numérique. Convaincu que les calculs de dynamique de l’atmosphère constituent une application stratégique des nouveaux ordinateurs, il fonde en 1946 le Numerical Meteorology Project rassemblant à Princeton les meilleurs météorologues, parmi lesquels Rossby et Julie G. Charney (1917-1981). Ce dernier va concevoir le premier modèle de prévision du temps, qui ne décrit que les mouvements atmosphériques horizontaux de grande échelle. En 1953, il parvient à réaliser une prédiction à vingtquatre heures sur le territoire des États-Unis. Les prévisions opérationnelles débutent dès 1955 avec le modèle de Charney, qui fonctionnera près de dix ans, avant d’être remplacé par des modèles plus complets s’étendant au globe entier.

Durant ces années 1950, les mêmes scientifiques du groupe de Princeton s'intéressent aussi à la simulation des grandes structures de la circulation atmosphérique à l'échelle du globe. Ils développent des modèles fondés sur les mêmes principes physiques, mais couvrant l'ensemble de la planète, qu'on appellera modèles de circulation générale. Dès 1955, Norman A. Phillips (1923-2019) réalise la première "expérience numérique" avec un modèle où l'atmosphère globale est assimilée à un cylindre à deux couches : ce modèle permet de réaliser une première simulation de 130 jours qui reproduit les principaux vents et permet ainsi de calculer le transport et les transformations de l'énergie dans l'atmosphère. Durant les années 1960 et 1970, les modèles globaux adoptent la géométrie sphérique de la Terre et se dotent de représentations du rayonnement, des précipitations, des nuages... Deux pionniers de cette aventure scientifique, l'Allemand Klaus Hasselmann et l'Américano-Japonais Syukuro Manabe, ont reçu le prix Nobel de physique en 2021 pour leurs contributions majeures à la modélisation physique du climat dans les années 1960 et "pour en avoir quantifié la variabilité et prédit de façon fiable le réchauffement climatique". Ils ont partagé ce prix avec l'Italien Giorgio Parisi qui lui a été récompensé "pour la découverte de l'interaction du désordre et des fluctuations dans les systèmes physiques, de l'échelle atomique à l'échelle planétaire".

2 Anatomie des modèles de circulation générale

Les modèles de circulation générale (MCG ou GCM en anglais), utilisés tant pour la prévision météorologique que pour l'étude du climat, restent dans leur structure et leur principe très proches de ceux des travaux pionniers évoqués ci-dessus. Ils se sont cependant constamment enrichis au fil du temps, en améliorant la représentation des processus et en en intégrant de nouveaux, avec comme objectif d'être capable de représenter de mieux en mieux, avec un seul modèle, tous les phénomènes météorologiques ou climatiques observés. Il existe bien sûr bien d'autres modèles en sciences du climat – depuis des modèles à très haute résolution détaillant localement le comportement individuel des nuages, jusqu'à des modèles réduisant les grands équilibres climatiques globaux à quelques lois couplées entre elles. Mais les modèles de circulation générale décrits ici jouent un rôle privilégié, car ils visent à intégrer l'ensemble des processus potentiellement importants pour la météorologie ou le climat, depuis l'échelle globale jusqu'à la description (au travers de paramétrisations) des gouttes d'eau dans les nuages. Ils sont souvent appelés aujourd'hui modèles climatiques globaux en conservant le même acronyme MCG.

Le cœur dynamique des modèles

L'objectif premier de ces modèles est de simuler la circulation générale atmosphérique, c'est-à-dire les mouvements de l'air à grande échelle : alizés, circulation de Hadley, anticyclones, tempêtes. Ils sont fondés sur les équations de la mécanique des fluides (équations de Navier-Stokes), les mêmes équations qui décrivent l'écoulement de l'air autour d'une aile d'avion. En pratique, on utilise une version légèrement modifiée de ces équations, les "équations primitives de la météorologie", tirant profit de la faible épaisseur de l'atmosphère (99 sont situés sous l'altitude de 30 km) comparée au rayon de la planète (6 350 km). Ces équations (dites aux dérivées partielles), qui décrivent l'évolution du fluide atmosphérique (l'air) en tout point de l'espace et du temps, restent cependant très compliquées mathématiquement. Il faudra attendre l'arrivée des ordinateurs pour envisager de les utiliser pour calculer l'évolution de l'atmosphère (hormis la tentative de Richardson). Les ordinateurs ne pouvant pas effectuer des calculs en un nombre de points infinis, il faut faire des approximations. Deux grandes familles de méthodes existent pour ce faire : les méthodes "spectrales", qu'on ne détaille pas ici ; les méthodes "en points de grille", fondées sur un découpage spatial. On calcule les valeurs des variables tous les 100 kilomètres horizontalement, par exemple ; le découpage vertical est plus fin, avec des couches de 10 mètres à 1 kilomètre d'épaisseur, car les grandeurs météorologiques varient beaucoup plus vite verticalement qu'horizontalement. Comme on l'a fait pour l'espace, on "discrétise" aussi le temps, c'est-à-dire qu'on le divise en intervalles. On doit alors transformer les équations primitives, pour passer du monde continu du fluide au monde

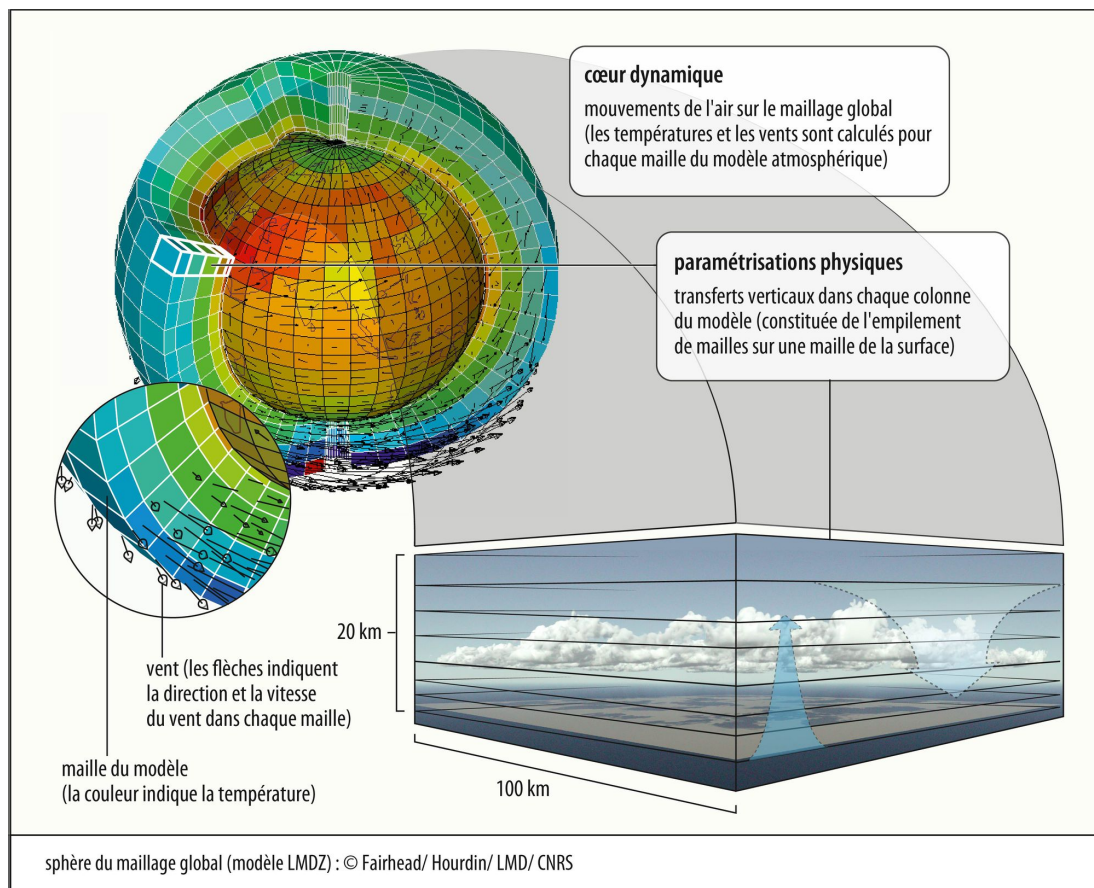


FIGURE 1 – Modèles climatiques : cœur dynamique et paramétrisations physiques
 Cette sphère surmontée de “cubes” illustre le maillage de l’atmosphère utilisé dans les modèles numériques climatiques. Ici, l’échelle n’est pas respectée puisque l’atmosphère ne s’étend que jusqu’à quelques dizaines de kilomètres d’altitude, à comparer avec les 6 350 km du rayon de la Terre. Les mailles sont en réalité très aplaties et une colonne du modèle (en bas de la figure) ressemble plutôt à un « mille-feuille » (on parle souvent de couches ou de niveaux). Un modèle de climat est constitué de deux parties. La première, appelée cœur dynamique, calcule la circulation de l’atmosphère entre mailles adjacentes dans les trois directions de l’espace. La seconde représente les autres processus (turbulence, nuages, rayonnement. . .) intervenant dans le fonctionnement du climat et regroupés sous le nom de paramétrisations. Les distributions statistiques de ces processus sont supposées homogènes horizontalement dans les mailles et leurs paramétrisations se traduisent par des échanges verticaux entre les couches d’une même colonne.

discontinu ou “discret” du maillage du modèle, et vérifier mathématiquement que les solutions des équations “discrétisées” sont pertinentes. En pratique, pour réaliser des simulations numériques, il faut introduire dans le modèle les conditions initiales, c’est-à-dire les valeurs de la température, de la pression, de l’humidité, de la direction et de la vitesse du vent en tous les points de la grille (ou maillage) du modèle au démarrage de la simulation. Le modèle va ensuite calculer, à des “pas de temps” successifs (quelques minutes pour les modèles globaux), les valeurs de ces variables pour chaque maille. La partie du modèle qui résout les équations de la dynamique de l’atmosphère est appelée cœur dynamique.

Le rayonnement, moteur de la circulation atmosphérique

Si on initialise une simulation numérique avec le seul cœur dynamique, l’atmosphère reste au repos, tournant à la même vitesse que la planète. Il manque le moteur de la circulation atmosphérique : les contrastes de température créés par l’absorption du rayonnement du Soleil, qui diffèrent selon la saison, la latitude et l’heure de la journée. Ainsi, le fait que la Terre soit davantage chauffée près de l’équateur que vers les pôles engendre “un appel d’air” vers l’équateur, qui, combiné aux effets de la rotation de la planète, crée la circulation de l’atmosphère dont Halley puis Hadley avaient compris qu’elle expliquait la direction des alizés sur les océans tropicaux. La partie du modèle numérique qui permet de calculer ce chauffage par le rayonnement est fondée sur les équations dites du transfert radiatif. Celles-ci décrivent comment le rayonnement provenant du Soleil est peu à peu absorbé par les gaz de l’atmosphère et dévié dans d’autres directions – par ces mêmes gaz (à l’origine du bleu du ciel) ou par les nuages – puis absorbé par la surface terrestre et en partie réfléchi. L’atmosphère et la surface de la Terre chauffées par le Soleil émettent elles aussi du rayonnement : c’est le rayonnement infrarouge responsable de l’effet de serre. À l’échelle microscopique, la mécanique quantique décrit l’interaction des molécules de gaz avec des photons (particules de lumière ultraviolette, visible ou infrarouge) au travers de millions de transitions entre les niveaux d’énergie des molécules. La caractérisation de ces transitions s’enrichit au fil des décennies sur la base d’expériences de laboratoires ou de calculs numériques. Là aussi, le calcul du transfert radiatif ne pourra être qu’approché dans le modèle : en plus de la discrétisation spatiale, il faudra réduire considérablement la complexité du spectre d’absorption des gaz ou les effets directionnels de la diffusion.

Représentation des mouvements atmosphériques sous-maille

Le cœur dynamique du modèle ne peut pas rendre compte des mouvements d’air d’échelle plus petite que la dimension horizontale de la maille (phénomènes dits sous-maille). Or ces mouvements de petite échelle sont très importants pour la météorologie ou le climat. Près du sol, la turbulence de l’air (celle des rafales de vent) va mélanger l’air et influencer sur ses échanges avec la surface terrestre. Le modèle devra calculer l’intensité moyenne des mouvements turbulents à un instant donné dans chaque maille, à partir des variables météorologiques disponibles sur le maillage. Des théories physiques permettent de calculer l’intensité de ce mélange turbulent : la turbulence est d’autant plus importante que le vent est fort, qu’il rencontre des obstacles et que la surface est chaude. La “décomposition de Reynolds” sépare dans les équations de la mécanique des fluides l’écoulement à grande échelle – qu’on représente explicitement avec le cœur dynamique du modèle – et les mouvements turbulents – traités comme une “perturbation” par rapport à cet écoulement. Cette décomposition sert de base pour le calcul des transferts turbulents d’énergie et de quantité de mouvement (pour le vent) entre la surface et l’atmosphère ou entre deux couches adjacentes du modèle. Des mouvements de l’air sous-maille à plus haute altitude doivent également être modélisés. Quand la surface se réchauffe trop, l’atmosphère devient instable et engendre des mouvements verticaux intenses dits convectifs. Ainsi, les ascendances thermiques créées les jours de beau temps sur les continents se développent sur une hauteur de 1 à 3 kilomètres avec des vitesses de quelques mètres par seconde. Au cœur des cumulonimbus, nuages d’orage qui se développent sur quinze kilomètres d’épaisseur environ, on trouve des vitesses verticales de plusieurs dizaines de mètres par seconde. Enfin, les ondes créées lors du passage de l’air au-dessus des reliefs ou sur des

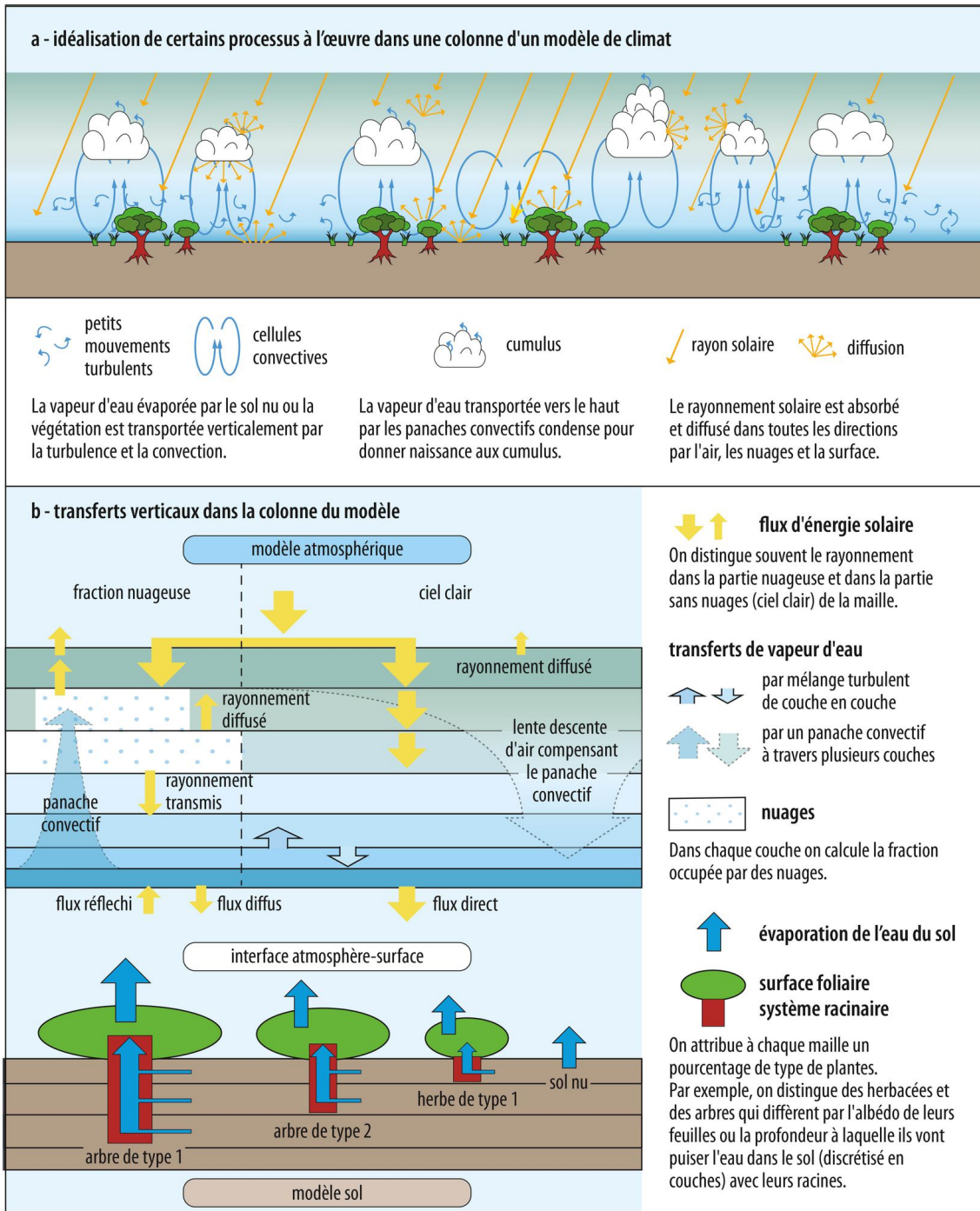


FIGURE 2 – Les paramétrisations des modèles de climat

Après avoir idéalisé (en a) certains processus du climat, on cherche à les représenter (en b) dans un modèle climatique. L'exemple pris ici illustre une journée avec des cumulus de beau temps sur un continent. La figure b traduit, sous forme de paramétrisations, les transferts verticaux d'eau et d'énergie solaire dans une colonne du modèle atmosphérique (haut de la figure b) et du modèle de sol (bas de la figure b). Les paramétrisations du modèle sont actives tout le temps et dans toutes les colonnes du modèle. Mais, selon les valeurs des variables atmosphériques transmises par le cœur dynamique (force du vent, température, humidité...), les processus décrits par les paramétrisations seront plus ou moins importants en fonction des colonnes (produisant ou non des cumulus, de la convection, de l'évaporation, de la pluie...).

tempêtes se propagent dans la haute atmosphère et contrôlent ainsi, à distance, une bonne partie de la circulation dans la stratosphère.

Le découpage entre cœur dynamique et paramétrisations

Comme d'autres modèles numériques en physique, les modèles de circulation générale résultent d'un enchaînement d'étapes pour passer des phénomènes observables à des solutions calculables sur un ordinateur. Le modélisateur doit d'abord construire une description de ces phénomènes fondée sur des théories reliant les grandeurs physiques entre elles. Par exemple, en se basant sur les équations de la mécanique des fluides, il cherche à calculer l'augmentation à un endroit donné de la température sous l'effet de l'arrivée d'une masse d'air plus chaude. Cette masse d'air est réchauffée simultanément par l'absorption du rayonnement solaire (théorie du transfert radiatif) et parce que la surface sur laquelle elle circule est plus chaude que l'air (conduction juste au-dessus de la surface puis transport par la turbulence de petite échelle). La numérisation de ces équations et leur codage informatique permettent de calculer des solutions approchées de l'ensemble de ces équations couplées entre elles. Une caractéristique spécifique des modèles de climat est le découpage conceptuel entre deux mondes : d'un côté, le cœur dynamique, qui calcule les mouvements du fluide à grande échelle ; de l'autre, un ensemble de sous-modèles appelés "paramétrisations". Ces dernières incluent notamment la représentation du transfert radiatif et les mouvements de petite échelle qu'on vient d'évoquer. Il faudra représenter également au travers de ces paramétrisations physiques la création des nuages ou de la pluie avec les changements de phase de l'eau, l'organisation de ces nuages (qui va conditionner fortement leur interaction avec le rayonnement) ou encore le stockage de chaleur et d'eau dans le sol (qui va conditionner en retour l'évaporation et la température de la surface terrestre). Alors que le cœur dynamique du modèle calcule l'évolution des variables dans une maille à un instant donné en tenant compte des mailles voisines dans les trois directions de l'espace, les paramétrisations physiques ont en commun de ne calculer que des transferts verticaux à l'intérieur d'une colonne de mailles, sans tenir compte des colonnes voisines. Ce découpage entre cœur dynamique et paramétrisations est pertinent quand on considère la météorologie ou le climat à des échelles horizontales supérieures à quelques dizaines de kilomètres et correspond à une caractéristique essentielle de la compréhension du climat par les physiciens. En pratique, le modèle traite la dynamique et chacune des paramétrisations de façon séquentielle. Si on suit par exemple de l'eau évaporée en surface ou des particules émises par les voitures, le modèle calcule le transport vertical de ces éléments par la turbulence, ce qui modifie de proche en proche les valeurs de leur concentration dans les couches de la colonne atmosphérique, puis il calcule leur transport (horizontal et vertical) à grande échelle dans le cœur dynamique, puis à nouveau le transport turbulent et tous les autres processus paramétrisés au pas de temps suivant, et ainsi de suite. On effectue un cycle de l'ensemble de ces calculs typiquement toutes les 10 à 30 minutes dans un modèle global de climat.

3 Des modèles pour prévoir et comprendre

Les modèles de circulation générale sont utilisés aussi bien pour prévoir le temps à l'échéance de quelques jours que pour simuler numériquement le climat. Ils jouent aussi un rôle central dans la compréhension des mécanismes climatiques et de leurs interactions. Afin de prévoir ou de comprendre le climat, on recourt aux modèles pour réaliser des simulations numériques calculant l'évolution de la situation météorologique observée sur quelques jours ou bien l'évolution d'une météorologie possible sur des périodes beaucoup plus longues. Ces simulations sont constamment évaluées en les comparant aux données d'observation.

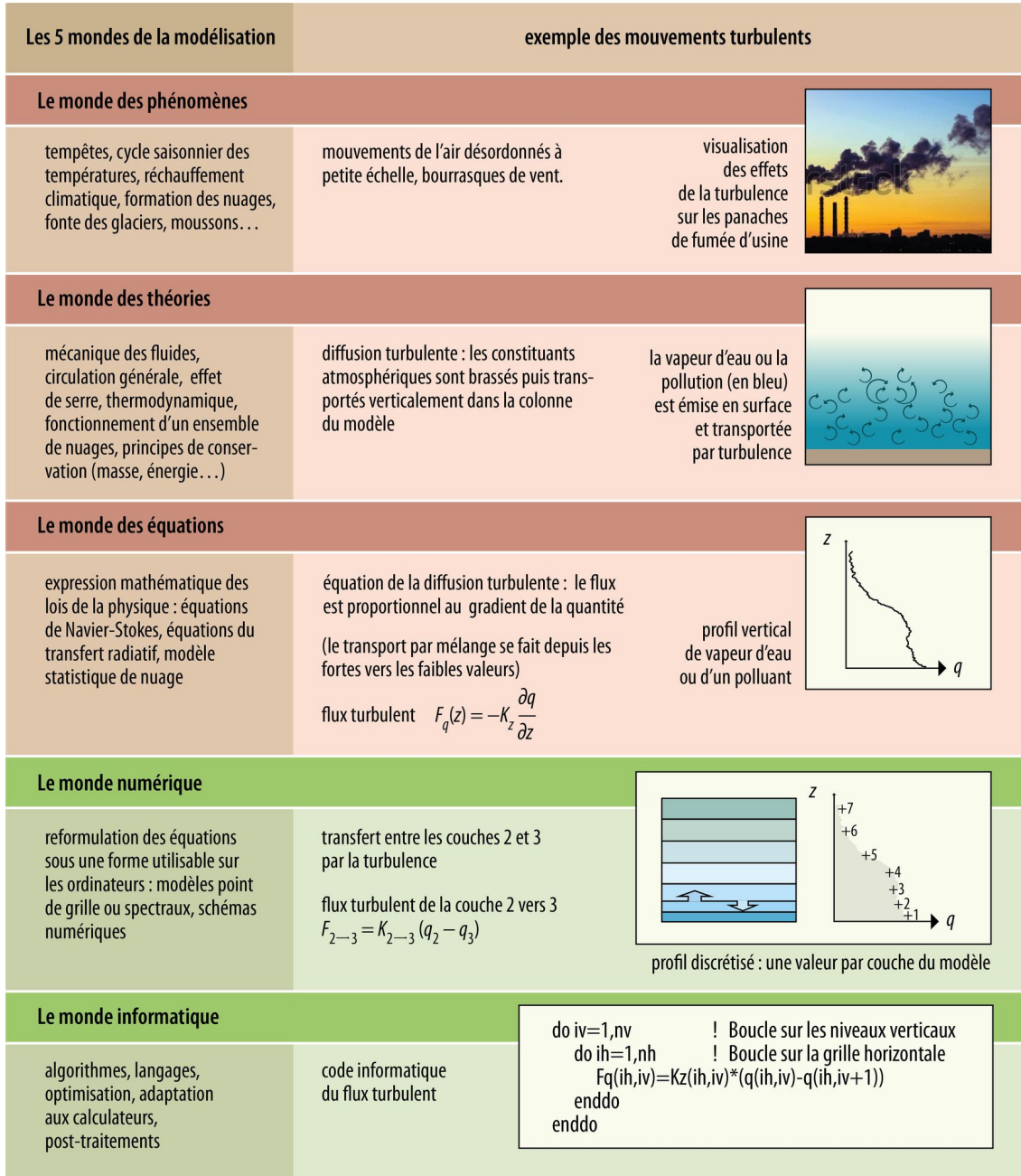


FIGURE 3 – Les cinq mondes de la modélisation numérique

Pouvant se représenter comme un parcours à travers cinq mondes, la modélisation numérique part du monde des phénomènes observables à partir desquels on développe des théories physiques (monde des théories) qui sont ensuite traduites sous forme mathématique (monde des équations). Ces équations mathématiques (dites aux dérivées partielles) sont difficiles à résoudre. Avec l'arrivée des ordinateurs, on a pu les transformer en un grand nombre d'opérations plus simples (monde numérique) et en calculer les solutions approchées (monde informatique). On illustre ici l'enchaînement de ces mondes pour un processus particulier : le transport vertical (vapeur d'eau ou polluant, par exemple) par des mouvements turbulents de petite échelle. Ces derniers induisent un transfert des couches les plus basses (plus humides ou plus polluées) vers les couches supérieures. Ce flux turbulent, $F_q(z)$, se traduit dans le monde numérique par un transfert de la quantité (q) d'un constituant entre deux couches adjacentes. On illustre enfin le codage informatique d'une telle formule. Le coefficient K , présent dans cette formule du flux turbulent, est d'autant plus important que la turbulence atmosphérique est forte.

Des simulations numériques pour la prévision météorologique et l'étude du climat

Les modèles de circulation générale “tournent” sur de puissants ordinateurs pour réaliser des simulations numériques. En plus du codage traduisant informatiquement les équations discrétisées du modèle, il faut spécifier des valeurs numériques pour chaque maille. On précise, d’une part, les conditions initiales, à savoir une valeur numérique pour chacune des variables atmosphériques et de surface à un instant initial. On impose, d’autre part, des grandeurs qui ne dépendent pas de l’état de l’atmosphère (appelées conditions aux limites) : l’altitude de la surface, sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire (albédo), la hauteur typique des obstacles pour la turbulence... Si le modèle n’est pas couplé à un modèle d’océan (qui calcule l’évolution des processus océaniques), on intégrera aussi dans les conditions aux limites les températures de surface des océans et leur évolution jour après jour. Ces simulations numériques sont utilisées aussi bien pour la prévision météorologique que pour l’étude du climat : seule la façon de les utiliser diffère. Pour les prévisions météorologiques, un soin très important est apporté à la définition de l’état initial et les simulations représentent au maximum une quinzaine de jours. On sait en effet qu’au-delà de cet horizon les prévisions divergent : une perturbation même infime des conditions initiales aboutira à une situation météorologique complètement différente localement. En pratique, les conditions initiales des prévisions météorologiques sont obtenues par des techniques mathématiques d’assimilation des données qui permettent de corriger la prévision du jour précédent par toutes les observations disponibles depuis vingt-quatre heures. Pour étudier le climat, on réalise des simulations sur une échelle de temps beaucoup plus longue que cet horizon de prévisibilité, allant de plusieurs années jusqu’à des milliers d’années. On ne se soucie plus alors de l’état initial, et il ne s’agit plus de prédire le temps qu’il fera tel jour sur telle région. On dira que le modèle est en accord avec le climat observé s’il le reproduit de façon statistique : le cumul des pluies sur l’année, une bonne saisonnalité des températures, un bon contraste entre des étés plus ou moins chauds et pluvieux, etc.

Ainsi, deux simulations partant d’un état initial très proche suivront une histoire météorologique différente (en donnant des prévisions météorologiques non semblables) tout en simulant le même climat.

Des modèles pour une meilleure compréhension du climat

Les modèles numériques sont essentiels pour comprendre le fonctionnement de la météorologie et du climat. On peut expliquer certains éléments observés de la circulation atmosphérique sur la base de théories physiques, mais seule la modélisation permet de vérifier si tel mécanisme est effectivement la bonne explication d’un phénomène climatique observé, une fois prises en compte les interactions entre tous les phénomènes impliqués (ce que l’on appelle communément le système climatique). En confrontant les résultats de simulations avec les observations, on peut vérifier si le modèle permet de reproduire ces dernières, auquel cas on peut penser que les ingrédients qu’on croit essentiels ont effectivement été intégrés. La chose n’est cependant pas aussi simple qu’il y paraît. Les composantes du modèle interagissent et rétroagissent entre elles (comme les processus du climat réel) si bien qu’il est difficile d’attribuer les propriétés du climat simulé à des éléments précis du modèle. Une grande partie de la recherche en modélisation consiste à trouver des stratégies pour contourner les difficultés inhérentes à cette intrication des processus climatiques. Grâce aux modèles, on peut formuler des hypothèses et les tester. Par exemple, la circulation de la mousson indienne est affectée par la forme particulière de différents massifs montagneux. Pour tester ces effets, on peut aplanir le relief sur une région particulière et regarder la modification du climat simulé. Cette approche dans laquelle on modifie les paramètres ou les conditions aux limites des simulations numériques pour comprendre un phénomène est souvent appelée “expérimentation numérique”. On peut aussi pousser l’idéalisations de la modélisation. Avec un modèle où la surface de la Terre est une grande piscine d’eau immobile, on retrouve certaines caractéristiques essentielles de la circulation atmosphérique telles que les cellules de Hadley ou les trains de dépression des moyennes latitudes. Les équipes de modélisation développent ainsi une “hiérarchie” de modèles,

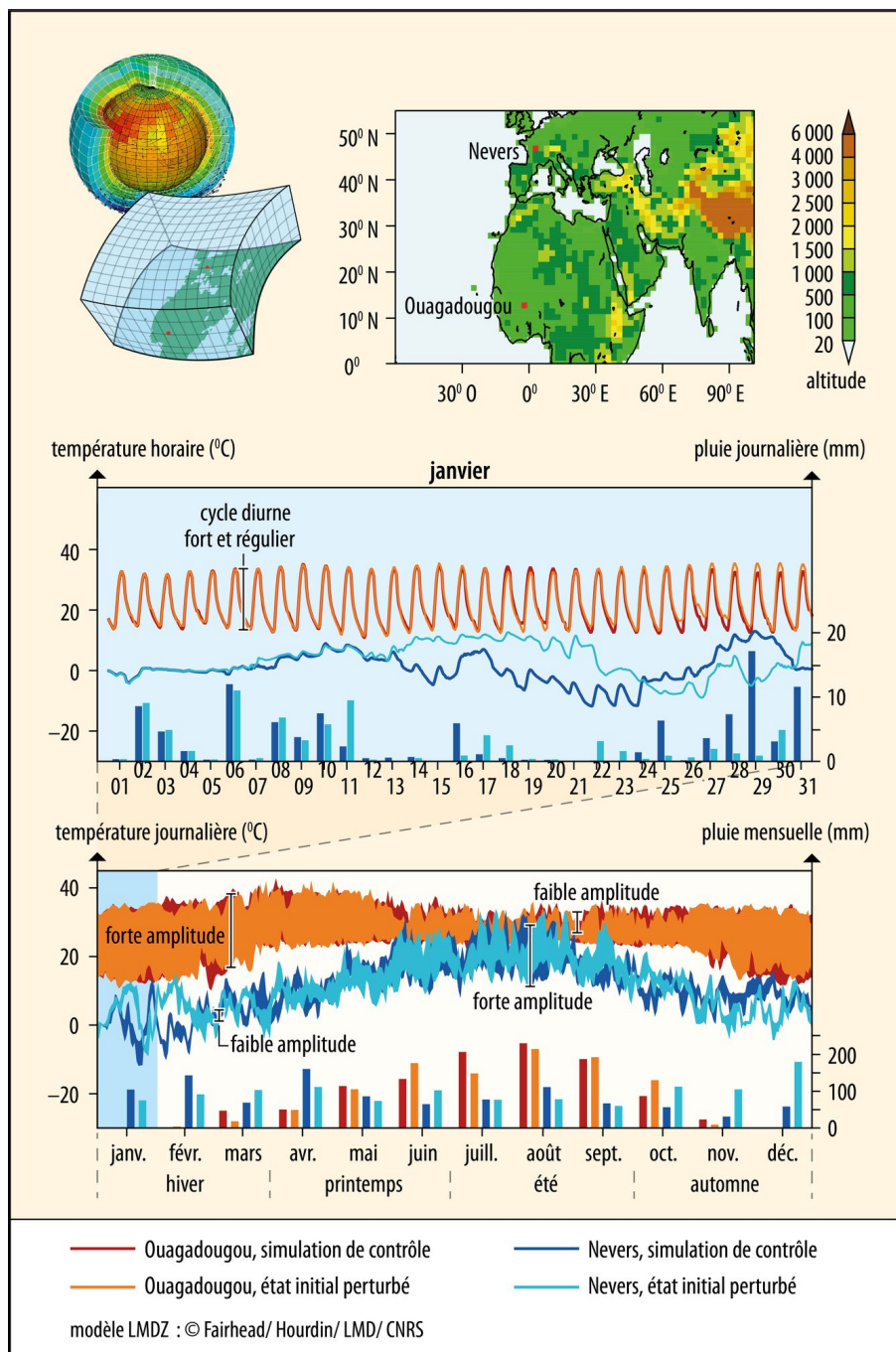


FIGURE 4 – Météorologie et climat

Ces graphiques représentent les températures (courbes) et les cumuls de précipitation (barres) dans deux mailles d'un modèle de circulation générale atmosphérique (modèle LMDZ du CNRS) qui comprennent l'une la ville de Nevers (France), l'autre Ouagadougou (Burkina Faso), à l'échelle d'un mois (en haut) et d'une année (en bas). Pour chacune de ces zones géographiques, deux simulations ont été réalisées et ne diffèrent que par leur état initial. La première (simulation de contrôle) utilise un état du 1er janvier d'une simulation climatique. Pour la seconde (état initial perturbé), la température de départ a été modifiée aléatoirement de moins d'un dixième de degré dans toutes les mailles du modèle. C'est en lançant une simulation avec des données ainsi tronquées qu'Edward Lorenz a découvert l'extrême sensibilité des équations de la météorologie aux conditions initiales (souvent appelée effet papillon). À Nevers, à l'échelle du mois, les températures et les pluies sont presque superposées pendant les neuf premiers jours de janvier mais s'écartent ensuite pour donner deux situations météorologiques différentes. À l'échelle de l'année, les simulations reproduisent bien le climat contrasté de ces deux régions : une température moyenne relativement constante à Ouagadougou, avec un cycle diurne de plus faible amplitude pendant l'été du fait de l'humification des sols par les pluies de moussons ; un fort cycle saisonnier des températures, avec un cycle diurne plus fort l'été, du fait du plus fort ensoleillement, pour Nevers. Pour cette dernière ville, on a donc deux trajectoires météorologiques différentes mais qui représentent bien le même climat.

du plus complet (le modèle de circulation générale) au plus idéalisé. On peut de cette façon abstraire de la modélisation certaines complexités du monde réel pour séparer différents niveaux de compréhension du système climatique.

Des modèles sous le feu des observations

Les modèles de circulation générale sont mis à l'épreuve des observations quotidiennement et partout sur le globe au travers des prévisions météorologiques. Mais la qualité de ces prévisions dépend surtout de celle de l'état initial et ne renseigne que partiellement sur la capacité des modèles à simuler le climat. L'évaluation des simulations climatiques est d'une nature différente : comme ces simulations ne reproduisent pas l'histoire du temps observé au jour le jour, mais une autre histoire possible, il faut les comparer aux observations de façon statistique et sur de longues périodes de temps (plusieurs années à dizaines d'années). De nombreux efforts sont déployés au niveau international pour observer le climat à toutes les échelles de temps et d'espace, et développer des stratégies pour comparer les simulations et les observations. Des réseaux d'observation au sol en continu, des mesures aériennes (par ballons-sondes ou sur des avions de ligne équipés d'instruments) ainsi que des réseaux de bouées sur les océans ont été progressivement mis en place. Des campagnes de terrain sont régulièrement organisées pour étudier un processus spécifique, motivées souvent en partie par le développement ou l'amélioration des modèles. Pour confronter le climat simulé aux observations à l'échelle du globe, on utilise aussi de façon massive l'observation depuis les satellites. À partir de mesures satellitaires du rayonnement émis ou réfléchi par l'atmosphère à différentes fréquences, on peut évaluer la composition, la température et l'humidité de l'atmosphère, les pluies, la quantité de nuages et leurs interactions avec le rayonnement, mais aussi la force et la direction du vent grâce aux irisations à la surface de la mer.

La communauté des sciences du climat a accompli un travail considérable pour concevoir les instruments et les stratégies d'observation (ce qui mobilise davantage de moyens que le développement des modèles) et pour recueillir les données et les traiter en vue de produire des "climatologies" (c'est-à-dire à savoir des données statistiques en tout point du globe, comme le cycle saisonnier moyen des températures ou des pluies, la variabilité de ces mêmes variables d'une année sur l'autre, etc.). Pour mettre leurs modèles à l'épreuve, les chercheurs exploitent aussi un autre type de données : les archives des climats passés comme les carottes de glace, les sédiments, les pollens, les cernes d'arbres, etc. En les analysant, les paléoclimatologues parviennent à reconstituer et dater les grands traits des climats passés (température, précipitations, englacement). Ces archives climatiques permettent de tester la capacité des modèles à reproduire ces climats anciens. Les observations sont utilisées également pour ajuster ou calibrer les modèles – on parle souvent de "tuning". Les paramétrisations résument en effet les processus atmosphériques sous forme d'un jeu de fonctions ou d'équations inspirées de la physique. Ces équations dépendent d'un certain nombre de paramètres : par exemple, une taille unique des gouttes d'eau dans les nuages, ou un paramètre contrôlant un mécanisme de formation de ces gouttes dans un modèle plus sophistiqué. Longtemps considéré comme un aspect technique secondaire, le tuning est maintenant reconnu comme un élément essentiel de la modélisation nécessitant de nouvelles recherches. Il profite aujourd'hui des avancées de certaines méthodes d'apprentissage machine.

4 Modéliser le système climatique

Les modèles de circulation générale ont contribué à instaurer une vision globale du climat. Bénéficiant de l'augmentation de la puissance des ordinateurs et pour répondre à l'importance croissante de la question du réchauffement global, ils se sont progressivement complexifiés, intégrant de plus en plus de composantes du système climatique.

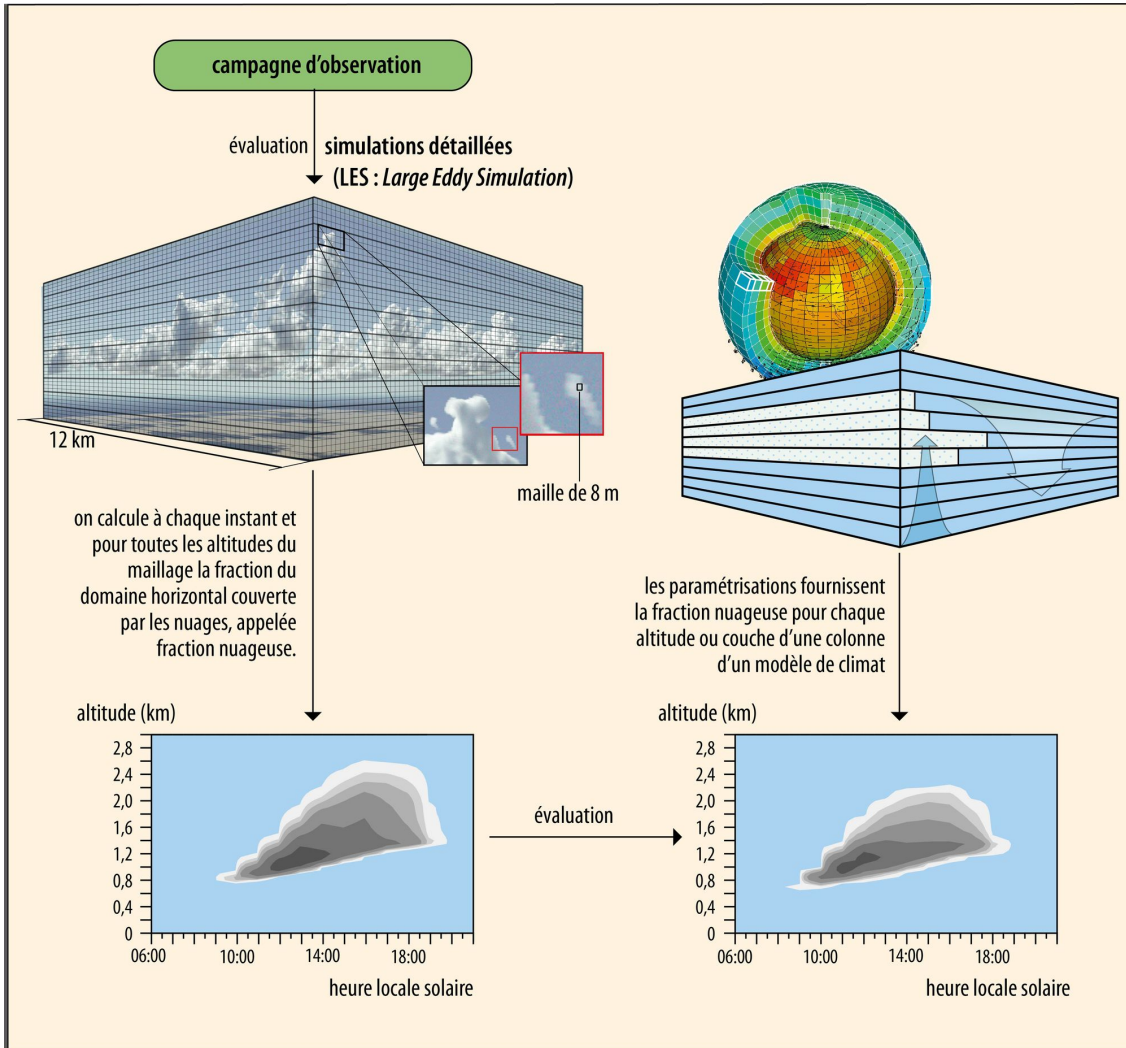


FIGURE 5 – **Évaluation des paramétrisations par une étude de terrain**

Une approche classique pour évaluer les paramétrisations consiste à réaliser des simulations très détaillées sur quelques heures du phénomène à étudier (ici l'évolution des nuages au cours d'une journée), en lien avec une campagne de terrain. Les observations recueillies lors de cette campagne servent à valider la simulation détaillée. On montre, à gauche, une simulation détaillée à 8 mètres de résolution d'une scène de cumulus de beau temps. En utilisant les mêmes conditions initiales et les mêmes conditions aux limites, on réalise parallèlement une simulation de la même scène en activant les paramétrisations du modèle global de climat dans une unique colonne (à droite). Dans cet exemple, la simulation détaillée (réalisée avec le modèle mesoNH du CNRS et de Météo-France ; image produite par le logiciel HighTune : RenDeRer) a tourné 24 heures sur 4 000 processeurs et les paramétrisations quelques secondes sur un seul processeur. En comparant les deux figures du bas, représentant l'évolution de la couverture nuageuse moyenne au cours de la journée en fonction de l'altitude, on voit que les paramétrisations (ici issues du modèle LMDZ du CNRS) rendent bien compte du phénomène (les nuages s'élèvent cependant un peu moins haut avec les paramétrisations).

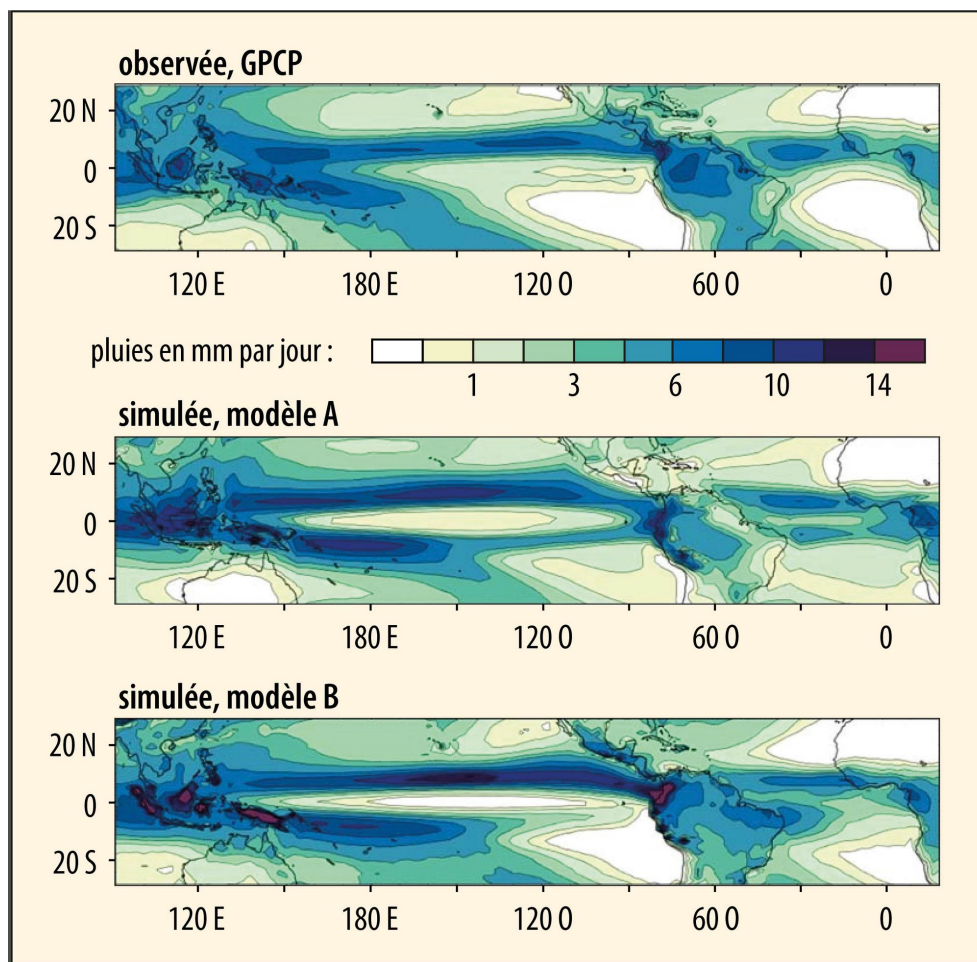


FIGURE 6 – Comparaison entre observations et simulations de modèle

Les cartes proposées ici représentent les précipitations moyennes sur la partie intertropicale du globe (en mm de pluie par jour) et pour une période de vingt ans. La première (en haut) a été élaborée à partir d'observations satellitaires et de données issues des stations météorologiques. Les deux autres sont des simulations issues d'un modèle couplé atmosphère-océan (modèle IPSL-CM du CNRS). Cette figure illustre la capacité des modèles à représenter les grandes structures du climat sur la base de la seule physique. On reconnaît, dans ces simulations, les régions de fortes pluies localisées sur les océans proches de l'équateur ainsi que dans certaines zones des continents, associées aux grandes forêts tropicales. On note aussi l'absence de pluie sur le Sahel. Les scientifiques utilisent ce type de figures pour identifier les forces et faiblesses d'un modèle climatique et documenter ses améliorations au fil des versions successives.

Les modèles, facteurs d'unification et de globalisation du climat

Avec l'essor de la modélisation, les mots "climat" et "climatologie" ont changé de sens. Autrefois proche de la géographie physique, la climatologie consistait surtout à étudier des climats régionaux (tempéré, semi-aride, méditerranéen...) en lien avec d'autres domaines comme l'agriculture ou l'urbanisation. La modélisation basée sur les théories physiques a modifié tout cela, contribuant puissamment à la globalisation du climat de la planète, désormais considéré au singulier. Le terme "climatologues" désigne dès lors des physiciens plus souvent que des géographes. Autant que la modélisation numérique, les infrastructures matérielles et les facteurs institutionnels et politiques ont joué un rôle essentiel pour la globalisation du climat. Des réseaux d'observation quadrillant le globe, une communauté scientifique organisée internationalement, des institutions et des programmes de recherche mondiaux ont contribué à promouvoir une conception planétaire du climat dès les années 1950. Le gouvernement et l'armée des États-Unis durant la guerre froide ont largement subventionné les programmes d'exploration planétaire. Dans les années 1970, les préoccupations environnementales, d'abord centrées sur des pollutions locales, ont acquis une dimension globale. Enfin, à partir de la fin des années 1980, la montée d'un multilatéralisme onusien a porté la création en 1988 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ; en anglais, IPCC pour Intergovernmental Panel on Climate Change) puis de la Convention des Nations unies sur le changement climatique, adoptée en 1992 lors de la conférence de Rio. Les rapports du GIEC, rédigés tous les cinq à six ans, reposent en grande partie sur des projections climatiques réalisées avec des modèles de climat couplant atmosphère et océan.

Les modèles couplés

Même s'ils sont restés très proches dans leurs principes des premières versions des années 1970, les modèles de circulation générale ont beaucoup évolué. L'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs a été utilisé pour affiner leur résolution spatiale (diminution de la dimension des mailles) et surtout pour les complexifier. Les années 1990 voient l'arrivée à maturité des modèles dits couplés, connectant deux modèles de circulation générale : un pour l'atmosphère et l'autre pour l'océan (dont les modèles sont très proches conceptuellement des modèles atmosphériques). Ces deux modèles interagissent entre eux à la surface de la mer : à un instant donné, le modèle d'atmosphère communique à l'océan la pluie, les flux de rayonnement solaire et thermique ou une force d'entraînement de l'eau par le vent (tension de vent). L'océan, quant à lui, renvoie, après un pas de temps d'intégration (typiquement une heure), la température de surface qui permet de calculer les flux turbulents et infrarouges d'énergie ou encore l'évaporation. En parallèle, les modèles de surfaces continentales se sophistiquent. Les premiers modèles de climat recouraient à une représentation du sol assez schématique, l'assimilant à un réservoir d'eau : l'eau de pluie s'accumulait ou s'évaporait. Le réservoir pouvait déborder, l'excès d'eau étant perdu en ruissellement vers les rivières jusqu'à la mer. Quand le réservoir s'asséchait, on limitait l'évaporation (par rapport à celle d'une surface d'eau libre) avec un coefficient dépendant de la hauteur d'eau restante. Dans les modèles actuels, on prend en compte la végétation en définissant des types de plantes (herbacées, arbres à feuilles caduques ou persistantes), chaque maille horizontale se voyant attribuer un pourcentage de chaque espèce végétale. À chaque type de végétation, on associe des propriétés comme l'albédo, la hauteur de la plante, la capacité à puiser l'eau par son système racinaire. La couverture foliaire, par laquelle s'évapore l'eau puisée sous la surface, a été d'abord imposée (en lui donnant une certaine valeur dans le modèle) puis elle est devenue une variable, le modèle calculant alors la croissance d'une feuille sur la base de bilans d'eau, d'énergie et de carbone. En se complexifiant, les paramétrisations représentant les surfaces continentales peuvent s'extraire du modèle atmosphérique pour devenir des modèles à part entière. Ces modèles de surfaces continentales sont utilisés soit seuls, pour étudier des problèmes concernant l'hydrologie ou la végétation, soit couplés au modèle atmosphérique.

Des modèles de plus en plus complets et complexes

Les modèles couplés de climat ont continué à s'enrichir pour prendre en compte, notamment, les couplages du climat avec la composition chimique de l'atmosphère. Les calculs du transfert radiatif dans les premiers modèles de climat supposaient que les constituants atmosphériques étaient bien mélangés – sauf l'eau, pour laquelle il est tenu compte des variations spatiales et temporelles des différentes phases, et l'ozone présent principalement dans la haute atmosphère. Des modèles plus précis ont ensuite intégré les variations d'autres constituants de l'atmosphère comme le dioxyde de carbone (CO_2), les chlorofluorocarbures (CFC), le méthane et les aérosols (poussières soulevées par le vent sur les déserts, sels en suspension au-dessus de la mer, produits de pollution). Ces autres constituants peuvent être imposés en fonction de l'altitude, de la position géographique et de la saison. On les considère alors comme des conditions aux limites supplémentaires qui doivent être spécifiées en tout point du maillage atmosphérique. Dans d'autres configurations, les concentrations des mêmes constituants pourront être calculées au même titre que les variables météorologiques. Pour cela, il est nécessaire d'ajouter dans le cœur dynamique du modèle des équations représentant le transport des espèces concernées et d'adjoindre des réactions chimiques et microphysiques de ces espèces dans les modules atmosphérique, océanique et continental du modèle. Une étape importante du développement des modèles, en lien avec l'étude du réchauffement global, a été l'introduction du cycle du carbone. Le CO_2 interagit en effet fortement avec la biogéochimie de l'océan et celle de la biosphère continentale, elles-mêmes très dépendantes du climat. Pour tenir compte des interactions et rétroactions du CO_2 , il a donc fallu développer des modèles incluant ce cycle du carbone (auparavant, l'évolution de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère était seulement imposée). Le même problème se pose pour les autres constituants contribuant au changement climatique (méthane, aérosols). C'est avec l'arrivée, au début des années 2000, de ces modèles incluant le cycle du carbone que des scientifiques ont commencé à parler de “modèles du système Terre”.

Des équipes pluridisciplinaires pour élaborer les modèles climatiques

La complexification progressive des modèles s'est accompagnée d'un élargissement des compétences et des domaines de recherche des équipes scientifiques qui les développent. Celles-ci doivent cumuler des connaissances en physique classique, en mécanique des fluides, en méthodes numériques, en chimie. Mais connaître les lois de la thermodynamique qui régissent la condensation de la vapeur d'eau en goutte d'eau ne suffit pas à comprendre un nuage. Des recherches sur la compréhension systémique des nuages, des couverts végétaux ou des couplages à la surface de l'océan ont été nécessaires pour proposer de nouvelles paramétrisations résumant l'effet de ces processus. Les équipes doivent bien sûr avoir aussi des compétences fortes en informatique. Si les modèles de circulation avec des maillages grossiers peuvent fonctionner sur des ordinateurs portables, les simulations des climats futurs aux maillages beaucoup plus fins tournent plusieurs mois sur les supercalculateurs les plus puissants. Les codes informatiques doivent être sans cesse optimisés pour les nouvelles architectures des ordinateurs. Après l'époque des supercalculateurs vectoriels, il a fallu s'adapter aux calculs parallèles, où le même modèle est découpé en sous-domaines, les calculs étant effectués séparément par domaine sur des processeurs différents communiquant entre eux. L'adaptation des codes aux nouvelles architectures informatiques développées par exemple sur la base des processeurs très rapides des cartes graphiques (Graphics Processing Unit ou GPU) constitue désormais un défi majeur. Plusieurs équipes aux compétences et thématiques différentes, comptant chacune plusieurs dizaines de chercheurs et ingénieurs, travaillent ensemble dans un même groupe de modélisation, certains sous-modèles ou développements informatiques pouvant être partagés entre plusieurs groupes. Une trentaine de groupes seulement dans le monde ont la capacité de développer ce type de modèles.

5 Des modèles utilisés pour simuler le changement climatique

Le mécanisme de l'effet de serre a été étudié par des savants tels que Joseph Fourier (1768-1830), John Tyndall (1820-1893) et Svante Arrhenius (1859-1927). Lié à la capacité de certains constituants atmosphériques (principalement H₂O et CO₂) à limiter l'émission de rayonnement infrarouge vers l'espace, donc le refroidissement de la Terre et de son atmosphère, l'effet de serre se traduit par une élévation de la température à la surface de la Terre de plusieurs dizaines de degrés, contribuant à établir les conditions propices à la vie. À la fin des années 1950, des scientifiques ont montré que les émissions de CO₂ liées aux activités humaines pouvaient provoquer un réchauffement de la planète en amplifiant l'effet de serre naturel. Les modèles de climat ont simulé ce changement climatique global dès les années 1970 (le rapport de Charney de 1979 marquant une étape importante dans cette alerte) avant que des observations des climats passés et présents en confirment la réalité. Depuis les années 1990, les rapports du GIEC sont alimentés par des projections de climats futurs orchestrées à l'échelle mondiale. Ces simulations confèrent aux modèles un rôle central dans le problème du changement climatique. Les débats autour de la confiance dans les modèles, de leur amélioration et de leurs forces et limites sont donc importants dans la perspective d'une réponse socialement partagée au défi climatique.

Les projections du changement climatique

Les modèles numériques couplant atmosphère, océan et surfaces continentales sont les seuls outils permettant d'anticiper les changements climatiques. Pour réaliser ces projections de climat futur, on fait démarrer les simulations avant l'ère industrielle (classiquement en 1850). Comme les observations de cette époque sont très insuffisantes pour définir l'état initial, on réalise des simulations sur plusieurs milliers d'années sans modifier la concentration de CO₂ supposée rester à sa valeur préindustrielle, pour laisser le temps notamment à l'océan profond de s'équilibrer. Une fois que le modèle a atteint un "état de régime", on démarre des reconstructions historiques en modifiant la concentration du CO₂ et des autres constituants ou en imposant les émissions et en simulant leur concentration. La capacité des modèles à reproduire l'évolution des températures du XX^e siècle à partir de la seule spécification du changement de composition en CO₂ et autres composants est un des éléments majeurs de confiance dans les projections. Les projections de climat futur sont des prolongations de ces reconstructions historiques, dans lesquelles les évolutions possibles des émissions de gaz à effet de serre – appelées "scénarios" – sont issues de calculs réalisés par un autre type de modèles, dits socio-économiques ou intégrés. Pour produire des scénarios d'émission de gaz à effet de serre, ces modèles intègrent des représentations globales et simplifiées de l'évolution économique, sociale, démographique et technologique de la planète, et comportent une part de rétroaction avec le système climatique. Les projections de climat futur réalisées par tous les modèles de climat dans le monde en partant de ces scénarios sont au cœur des rapports du GIEC.

L'intercomparaison de modèles climatiques

La nature approchée des paramétrisations et la variété des choix physiques et numériques possibles (dont la taille de la maille) constituent des sources importantes d'incertitudes pour les simulations climatiques. Pour pouvoir documenter la part d'incertitude associée à ces choix, la communauté des sciences du climat a très tôt organisé des exercices de comparaisons de modèles visant à harmoniser le protocole des simulations : mêmes conditions aux limites, mêmes évolutions des gaz à effet de serre, même période simulée. Ne subsistent alors que les différences liées aux choix de modélisation. Un premier projet baptisé AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), projet d'intercomparaison de modèles pour l'atmosphère, a été lancé par des scientifiques américains en 1990, réunissant presque tous les modèles de circulation générale d'alors. Il n'a pas permis de déterminer les meilleurs modèles ou les meilleures paramétrisations et il est clair désormais qu'il n'existe pas une seule bonne façon de représenter les processus atmosphériques.

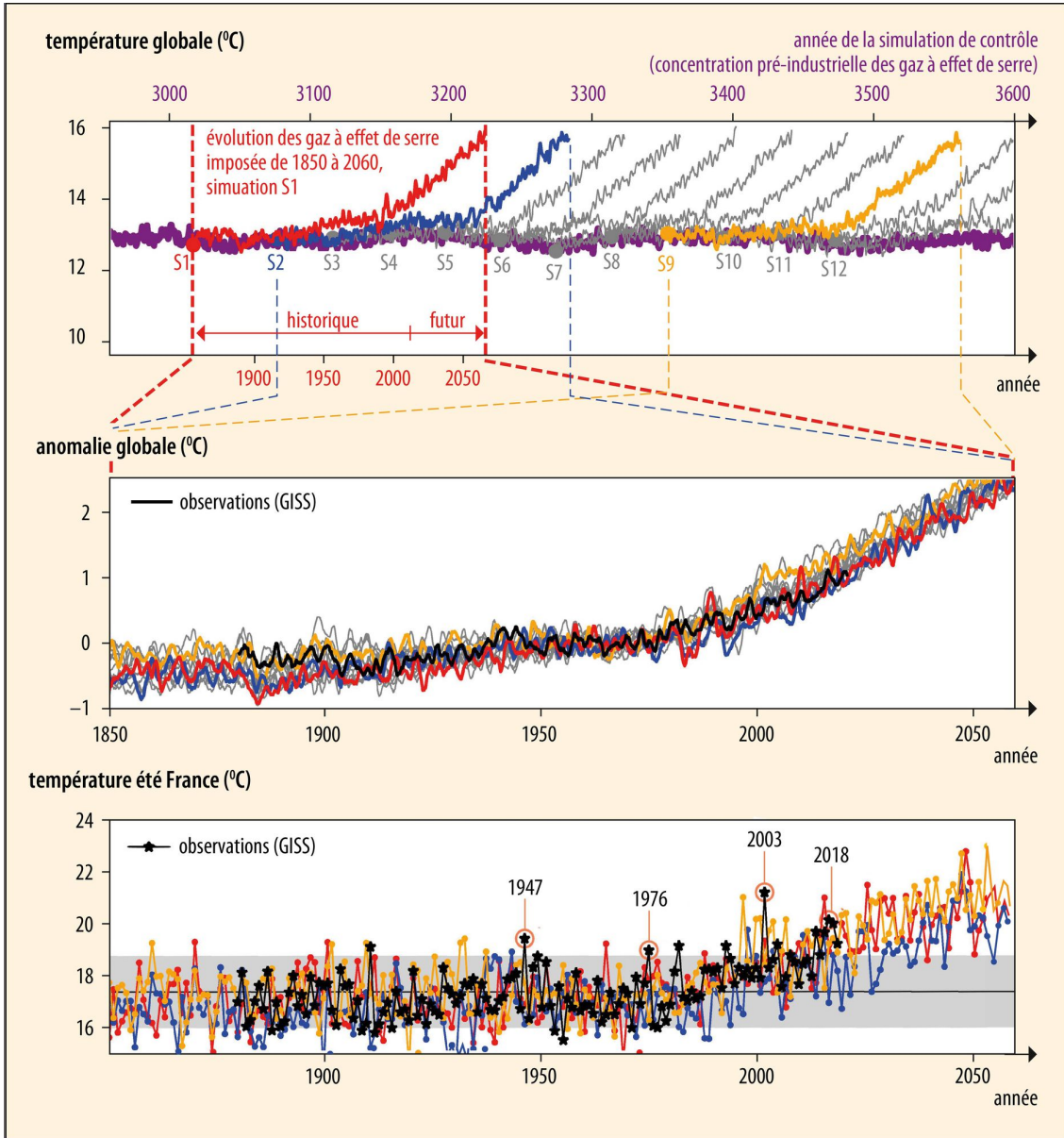


FIGURE 7 – Utilisation de modèles climatiques pour l'étude du réchauffement global
 À partir d'un modèle climatique couplé (ici le modèle IPSL-CM du CNRS), une première simulation de plusieurs milliers d'années, dite de contrôle (courbe mauve sur la figure du haut), est réalisée en imposant les concentrations des gaz à effet de serre et aérosols à leur valeur préindustrielle (avant 1850). On effectue ensuite des simulations dites « historiques » (courbes S1, S2... ; figure du haut) en partant de la simulation de contrôle à une date quelconque et en imposant toujours la même augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (celle de la période 1850-2015). Dans la figure centrale, l'axe des temps a été modifié pour comparer la température globale issue des différentes simulations à celle provenant d'observations (courbe noire). En réalité, on compare les écarts à la moyenne des températures, ceux-ci étant mieux connus que les valeurs de la température. La figure du bas concerne la température moyenne d'été en France métropolitaine obtenue pour trois simulations (S1, S2 et S9) et comparée à la température observée (courbe noire). On voit que la plage de température entre étés froids (autour de 16 °C) et chauds (autour de 18,4 °C), raisonnablement reproduite par le modèle, se décale progressivement vers le chaud à partir des années 1980, là aussi avec un relativement bon accord entre modèles et observations. Les années indiquées sur ce dernier graphique correspondent à des étés particulièrement chauds.

L'intercomparaison de modèles n'en est que plus importante et les projets similaires se sont multipliés. Le projet d'intercomparaison des modèles couplés océan-atmosphère (CMIP pour Coupled Model Intercomparison Project) coordonne désormais l'ensemble de ces comparaisons en proposant un protocole très précis, partagé par les grands groupes de modélisation, pour la réalisation de simulations du climat. Le projet CMIP orchestre en particulier les simulations du climat futur à partir de scénarios issus de modèles intégrés comportant différentes hypothèses sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Ces simulations CMIP sont réalisées en amont de la rédaction des rapports du GIEC, les deux exercices étant synchronisés depuis 2005. Ainsi coordonnées et standardisées, les simulations constituent des "ensembles multimodèles" où tous les résultats sont alignés et peuvent être comparés, donnant à la fois une projection moyenne et une indication sur la part de l'incertitude des climats simulés due aux différentes approches de modélisation ou aux différentes configurations retenues par les groupes. Ces exercices d'intercomparaison ont transformé la façon de travailler des climatologues, en renforçant la coordination des équipes, en encourageant une certaine standardisation des pratiques et en élargissant considérablement la communauté des utilisateurs. Les simulations CMIP sont en effet en libre accès pour les scientifiques de toutes les disciplines, qui peuvent les utiliser pour leurs propres recherches sans que les groupes de modélisation soient nécessairement impliqués.

Confiance et controverses dans les modélisations

Grâce à leur capacité de nous projeter dans le futur du climat, les modèles numériques se sont retrouvés aux avant-postes de l'alerte climatique. L'ampleur de ces enjeux leur confère une autorité considérable, tout en les exposant aux critiques. L'expertise du GIEC étant supposée conduire les responsables politiques à prendre des mesures pour lutter contre le changement climatique, les modèles ont subi les attaques de ceux qui étaient opposés à de telles mesures. Aux motivations politiques se mêlaient des mises en cause ou des doutes d'ordre plus scientifique ou épistémique, visant la validation, les incertitudes et, plus généralement, la fiabilité et la légitimité scientifiques des modèles. Les projections du climat futur posent un défi particulier. Rien ne garantit a priori qu'un modèle qui reproduit bien les caractéristiques du climat actuel soit également performant pour prévoir le climat de demain. En effet, pour bien simuler les principaux éléments du climat actuel, on peut négliger certains facteurs qui, jugés secondaires aujourd'hui, peuvent devenir essentiels dans les processus contrôlant l'amplitude du réchauffement à venir. Cette difficulté peut justifier l'ajout de nouvelles composantes au modèle : il est souvent impossible de quantifier l'importance d'un processus pour le climat, ou l'amplitude du réchauffement qu'il provoque, tant que son influence n'a pas été testée au sein du système climatique, en tenant compte des couplages entre tous les processus atmosphériques. Mais cette tendance nourrit un débat dans la communauté scientifique. Certains chercheurs déplorent une course à la complexification des modèles, encouragée par des logiques d'instruments et de financements, au détriment d'efforts plus orientés vers la compréhension et la paramétrisation de processus climatiques essentiels (nuages, convection), encore insuffisamment élucidés, et dont le rôle sur le changement climatique est primordial.

Plusieurs stratégies permettent cependant de renforcer la confiance dans la capacité des modèles basés sur la physique à prévoir un climat différent de celui que l'on connaît. La première a déjà été mentionnée : c'est la démonstration que ces modèles permettent de reproduire une évolution du climat semblable à celle observée au cours du XX^e siècle en réponse à l'augmentation des gaz à effet de serre. Dans les années 1980, les simulations ont prédit le réchauffement en cours alors qu'il n'était encore qu'à peine perceptible dans les observations. On teste aussi la capacité des modèles à reproduire les climats du passé (périodes glaciaires, Sahara vert, transitions abruptes) en utilisant des données paléoclimatiques : cernes d'arbres, mesures isotopiques dans des carottes de glace et dans les sédiments, etc. Enfin, depuis le début des années 1970, on utilise les mêmes modèles pour simuler, assez fidèlement, le climat sur d'autres planètes du système solaire pour lesquelles de nombreuses données ont été obtenues grâce en particulier à l'exploration spatiale. La confiance accordée aux modèles numériques du climat et aux simulations qui en résultent représente donc des enjeux essentiels. Elle repose, on l'a vu, sur plusieurs piliers : le fondement des modèles sur

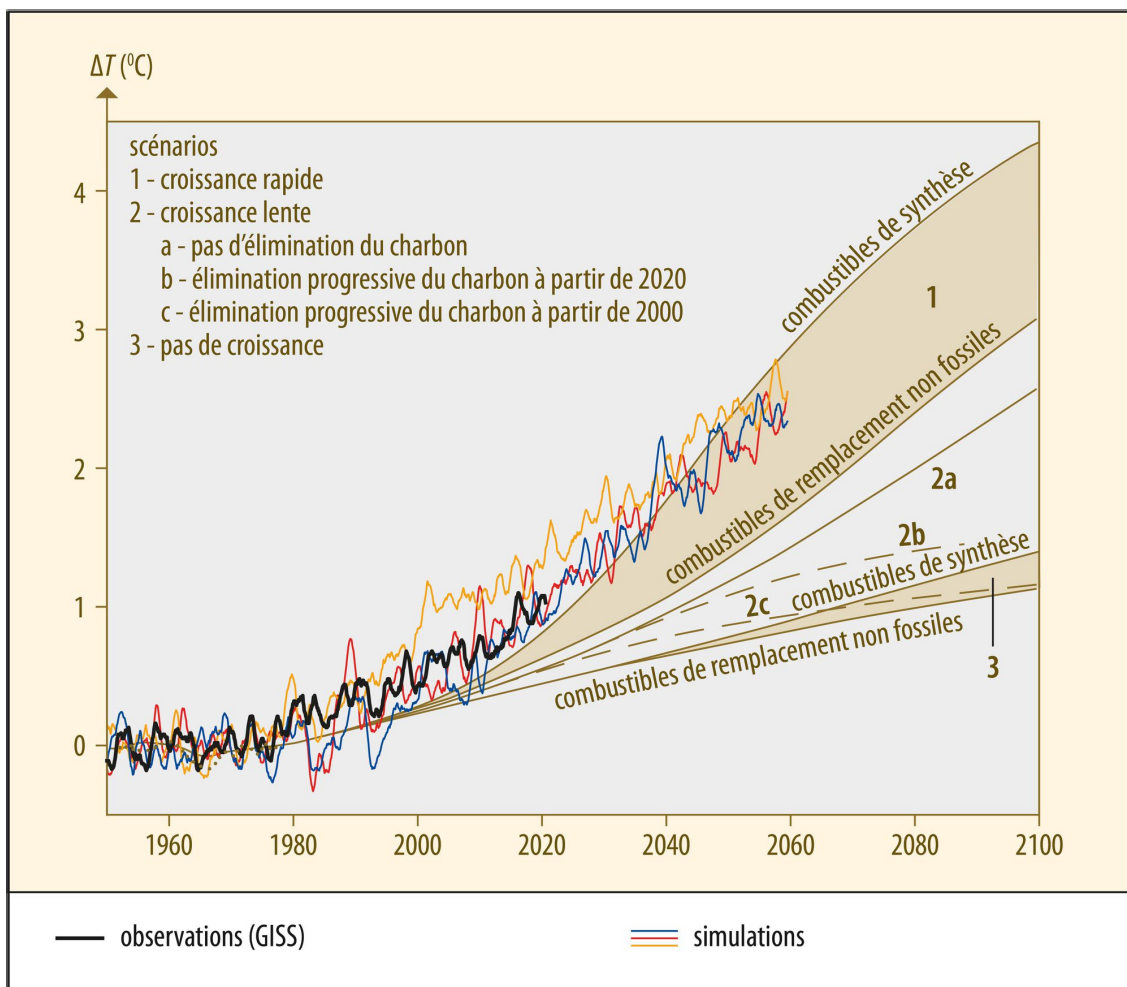


FIGURE 8 – Le réchauffement global prévu dès les années 1980

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

des théories physiques éprouvées ; leur évaluation par les données d'observation des climats passés et présents ; l'intercomparaison des modèles qui permet d'en éprouver la robustesse en quantifiant l'incertitude liée aux différents choix de modélisation ; et, enfin, la compréhension physique des processus impliqués dans les phénomènes climatiques observés et simulés.

Des simulations globales aux conséquences locales

Les modèles de climat ont permis de répondre à la question de la responsabilité des activités humaines dans le réchauffement global. Ils ont imputé ce réchauffement principalement à l'augmentation de la concentration du CO₂, grâce à des simulations dites d'“attribution” orchestrées via CMIP et consistant à rejouer l'histoire du climat depuis l'ère préindustrielle avec différents types de perturbations : les gaz à effet de serre, qui expliquent le réchauffement observé ; les aérosols, qui ont contribué à masquer une partie du réchauffement ; la répartition des forêts et des terres agricoles, qui ont pu moduler la réponse localement. Cette mission d'alerte globale étant accomplie, il faut désormais préciser l'importance de ces changements et leurs manifestations à échelle régionale ou locale, notamment pour anticiper de nécessaires adaptations. Cet infléchissement des recherches interroge les limites de la modélisation du climat. Les modèles globaux qui prévoient la trajectoire du réchauffement global sont utilisés avec des mailles de l'ordre d'une centaine de kilomètres. Est-ce suffisant pour en étudier les conséquences locales ou pour bien décrire un climat régional particulier ? Répondre à cette question et proposer des solutions en cas de réponse négative (utilisation des méthodes de correction d'erreurs et de descente d'échelle, estimation de l'incertitude associée à ces approches) constituent des champs de recherche importants. D'autres difficultés sont à souligner : plus l'échelle se réduit, plus il est malaisé de distinguer les changements climatiques d'origine humaine de la variabilité naturelle du climat. Par ailleurs, leurs impacts sont difficiles à dissocier d'autres problèmes, parfois plus graves, qui relèvent d'autres types de causalités : ainsi les conséquences de catastrophes – inondations, sécheresses, etc. – peuvent être considérées comme imputables au changement climatique, mais aussi à la vulnérabilité des populations et à l'incurie des politiques. Sur ces questions, les modèles de climat ne sont plus hégémoniques car ils ne peuvent pas prendre en charge la complexité des interactions entre éléments naturels, humains et sociaux, souvent difficilement modélisables. D'autres types de connaissances, d'outils et d'expertises sont nécessaires pour étudier et anticiper les conséquences du changement climatique, avec des approches tenant compte de la pluralité des facteurs, notamment socio-économiques, et des spécificités des terrains : des connaissances qui relèvent de la géographie, mais aussi des sciences humaines et sociales.

Le devenir des modèles

Par leur rôle d'alerte sur le réchauffement global, les modèles de climat ont été projetés sous le feu de l'actualité. Le poids des enjeux environnementaux et politiques exacerbe les débats au sein de la communauté scientifique. Certains considèrent que les progrès de la modélisation sont trop lents, que trop d'erreurs systématiques persistent dans les modèles (erreurs de quelques degrés sur la température des océans tropicaux, pluies trop prononcées au sud de l'équateur...). En réponse, les uns proposent de réunir les forces pour bâtir un modèle unique à partir de zéro, quand d'autres soulignent l'importance de garder une diversité d'approches à cause de la complexité du système climatique. Certains pensent que la solution pourrait venir de l'utilisation de modèles avec des mailles extrêmement fines. Mais cette approche, selon d'autres, interdit les grands ensembles de simulations qui sont nécessaires pour explorer la variabilité du climat. Certains prônent au contraire l'usage de modèles moins détaillés, plus économes en énergie. D'autres, enfin, proposent de remplacer tout ou partie du modèle par des algorithmes d'apprentissage machine. . . Les débats sont très vifs également sur les bonnes approches pour l'étude du climat régional. La pression autour des modèles est d'autant plus forte que les simulations de climat sont de plus en plus utilisées tandis que les équipes de recherche qui développent de nouvelles paramétrisations restent réduites. Mais ces enjeux constituent en même temps, pour ces scientifiques, une stimulation puissante qui les incite à explorer de nouvelles voies de recherche.

— Frédéric HOURDIN, Hélène GUILLEMOT
POUR CITER L'ARTICLE : Hélène GUILLEMOT, Frédéric HOURDIN, “MODÉLISATION
DU CLIMAT”, Encyclopædia Universalis, [https://www.universalis.fr/encyclopedie/modelisation-
du-climat/](https://www.universalis.fr/encyclopedie/modelisation-du-climat/)

BIBLIOGRAPHIE

1. P. N. EDWARDS, *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, MIT Press, Cambridge, 2010
2. H. GUILLEMOT, “Comment évaluer un modèle de climat ? Circulations et dialogues entre simulations et observations dans les pratiques des modélisateurs”, in *Revue d’anthropologie des connaissances*, vol. 3, no 2, pp. 273-293, 2009 (<https://doi.org/10.3917/rac.007.0273>)
3. F. HOURDIN et al., “The art and science of climate model tuning”, in *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no 3, pp. 589-602, 2017 (<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00135.1>)
4. C. JEANDEL et R. MOSSERI dir, *Le Climat à découvert. Outils et méthodes en recherche climatique*, CNRS éd., Paris, 2011 H. LE TREUT, *Nouveau climat sur la Terre. Comprendre, prédire, réagir*, Flammarion, Paris, 2009