

boîtes. À titre d'exemple, la nouvelle simulation de la NOAA compte 200 millions de boîtes; les boîtes proches de la surface de la Terre couvrent un carré de 13 kilomètres de côté et s'élèvent sur 50 mètres. D'autres boîtes s'empilent au-dessus, de plus en plus grandes à mesure qu'on s'éloigne du sol, atteignant 700 mètres de haut dans la stratosphère. Le modèle prédit l'évolution de l'atmosphère dans chaque boîte toutes les 20 secondes.

Une fois assemblées, les boîtes dessinent une photographie du temps à venir. Pour fournir une prévision à cinq jours, un modèle a besoin de calculer quelque 23 000 fois d'affiliée des centaines d'équations; exécuter ces opérations sur un superordinateur doté de 1 500 cœurs de calcul prend à peu près 40 minutes.

En pratique, les météorologues doivent trouver le point d'équilibre entre une excellente résolution et un temps de calcul contenu. Par exemple, même les modèles à cinq jours écartent certains paramètres comme les petits nuages, les orages et les effets de site engendrés par les littoraux, les montagnes ou d'autres types de terrains remarquables. Prendre en compte ces phénomènes exigerait de resserrer la taille des boîtes jusqu'à une résolution de six kilomètres, ce qui se traduirait par un temps de calcul de plus de cinq heures. Or le météorologue de votre région ne peut pas attendre aussi longtemps pour livrer son bulletin.

À l'inverse, pour établir des prévisions à quatre semaines qui incluent toute la richesse

pixelisée à basse résolution et vous aurez une idée d'une prévision à trois ou quatre semaines: on distingue le tableau général (les grandes zones de chaleur et pluie), mais les détails comme un orage nous échappent.

Malgré cela, la compréhension des phénomènes physiques globaux, les algorithmes et la puissance de calcul se sont suffisamment améliorés pour produire une photographie à basse résolution acceptable pour les météorologistes.

UNE COMBINAISON DE PLUSIEURS MODÈLES

Chaque semaine, les sept centres qui contribuent à SubX créent leurs propres prévisions sur 32 à 45 jours, incorporant plusieurs milliers d'observations (températures et humidité du sol, température et vitesse des courants océaniques...) de plus que ce qu'ils incluraient dans une perspective de sept jours. Les groupes envoient ensuite leurs résultats à une base de données centrale hébergée par l'Institut international de recherche sur le climat et la société, à l'université Columbia. Puis SubX combine les données sur les ordinateurs de l'université George-Mason. L'équipe SubX est la seule qui intègre plusieurs modèles dans une prévision saisonnière rendue publique. Ces modèles diffèrent notamment par les méthodes numériques employées, les équations de la physique – rayonnement, nuages... – et la méthodologie pour créer les conditions initiales à partir des données observées. Une dizaine d'autres groupes dans le monde, tels que le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, produisent des prévisions saisonnières fondées, elles, sur des modèles uniques.

Quel genre de prévision produit SubX? Notre modèle crée des cartes de températures et de précipitation où figurent les zones prévues pour être plus chaudes ou plus froides, plus humides ou plus sèches, que la moyenne historique. Réunir les résultats de sept modèles nous fournit des prévisions meilleures que chaque modèle pris séparément, à la fois parce que nous moyennons les données de chacun et parce que nous tirons parti du meilleur de chacun. Par exemple, chaque modèle doit estimer l'état nuageux dans chaque boîte, et ils le font tous de façon légèrement différente. La combinaison des modèles crée une meilleure évaluation. En termes de qualité de prévision pour la météo aux États-Unis, SubX surpasse ses meilleurs modèles pris individuellement 60% du temps pour la température et 81% du temps pour les précipitations.

Les scientifiques de SubX explorent les moyens de mieux associer les modèles, et nous cherchons également à les améliorer en les testant sur des données anciennes. >



Une prévision à 5 jours nécessite de calculer 23000 fois des centaines d'équations

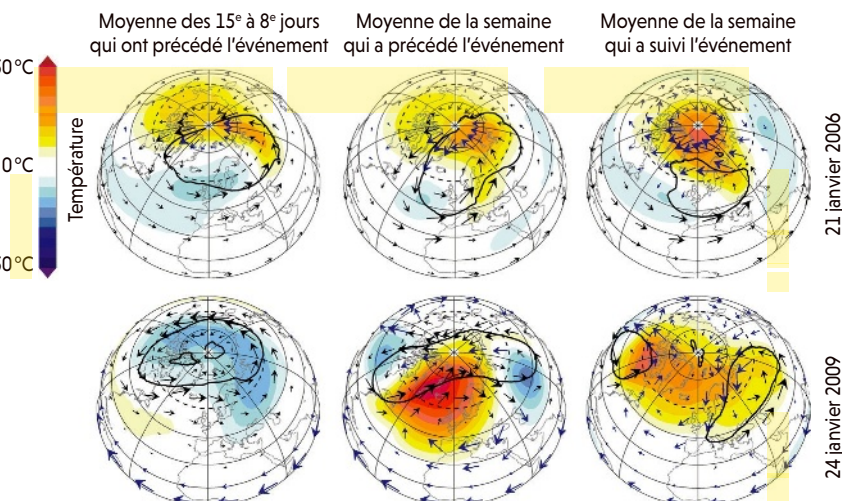
des phénomènes atmosphériques à grande échelle (dont l'oscillation OMJ), il faut agrandir les boîtes et réduire leur nombre (typiquement, leur nombre passe de 200 millions à 2 ou 10 millions, selon les modèles). Élargir les boîtes à une taille de 50 ou 100 kilomètres nous permet de conserver un temps d'exécution du programme de 40 minutes, en perdant des détails toutefois. Songez à une photo

LES PRÉVISIONS SUBSAISON- NIÈRES EN EUROPE

Prévoir le temps au-delà de dix jours, jusqu'à trois à quatre semaines en avance, représente une nouvelle frontière pour la prévision météorologique. De quels phénomènes atmosphériques faut-il tenir compte pour prévoir le temps en Europe à cet horizon temporel ? D'abord de l'oscillation nord-atlantique (ONA), qui mesure la différence de pression entre l'Islande et les Açores. Sa phase positive, qui se produit environ 30 % du temps, conduit à des vagues pluvieuses sur l'Europe du Nord et un temps sec sur l'Europe du Sud. La phase négative engendre l'inverse. En cas d'ONA particulièrement négative, les hivers seront froids et les étés chauds. Une autre source d'aléa pour la météo du continent est l'oscillation de Madden-Julian (OMJ), qui se caractérise par une progression lente vers l'est de zones de pluies tropicales le long de l'Équateur. La présence de l'OMJ sur l'océan Indien est souvent suivie par une phase positive de l'ONA, dix à quinze jours plus tard, et peut donc moduler le temps qu'il fera en Europe les semaines suivantes.

Les vents stratosphériques influencent aussi le temps à un mois. Moins d'une fois par an, la température de la stratosphère au-dessus du pôle Nord augmente fortement (jusqu'à 30 °C) et les vents qui y soufflent faiblissent, voire changent de direction. Ce phénomène spectaculaire qui peut être prévu par les modèles météorologiques jusqu'à trois semaines en avance est souvent suivi d'une phase négative de l'ONA et de temps froid sur une partie de l'Europe. D'autres sources de prévisibilité pour l'Europe incluent la température et l'humidité du sol, la température de surface de l'océan, l'étendue de la couche glaciaire arctique, la couverture neigeuse...

L'ensemble de ces facteurs sont pris en compte au Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), où je travaille. Situé à Reading, en Grande-Bretagne, ce centre est un organisme intergouvernemental comprenant la plupart des pays européens. Il a été un des pionniers dans les prévisions à un mois. Au début des années 2000, il était avec l'Agence météorologique japonaise le seul centre météorologique diffusant des prévisions subsaisonniers. Aujourd'hui, plus



Deux événements de réchauffement stratosphérique soudain survenus l'un le 21 janvier 2006 (en haut) et l'autre le 24 janvier 2009 (en bas). Dans le premier, le vortex polaire (ligne noire épaisse) – les vents de haute altitude en Arctique – s'est déplacé, tandis qu'il s'est scindé en deux dans le second.

d'une douzaine d'instituts météorologiques dans le monde produisent des prévisions à quatre semaines, dont quatre en Europe (le CEPMMT, l'Office météorologique anglais, un centre en Italie et un à Météo-France).

Comment sont produites les prévisions au CEPMMT ? À l'aide d'une simulation numérique d'une grande complexité, qui comprend, outre un modèle de la circulation atmosphérique, des sous-modèles représentant des composants du système terrestre : l'océan, les glaces, le sol...

Nous prévoyons l'oscillation OMJ plus de 5 semaines à l'avance

L'atmosphère est un système chaotique : des petites différences dans les conditions initiales peuvent conduire à des prévisions très différentes à trois ou quatre semaines. C'est pourquoi les prévisions sont réalisées en faisant tourner le modèle de multiples fois (51 fois au CEPMMT et entre 4 et 50 fois dans la plupart des autres centres météorologiques), chaque fois avec des conditions initiales légèrement différentes afin d'estimer l'impact des erreurs dans la génération des conditions initiales. Au CEPMMT, ces 51 calculs conduisent à 51 scénarios de temps possibles. Si, par exemple, 40 d'entre eux indiquent un temps sec sur la France dans quatre semaines, alors la probabilité de temps sec sera estimée à 80 %. Les prévisions à cette échelle de temps sont toujours probabilistes. Nous avons prévu d'étendre ce nombre de réalisations à une centaine, ce qui donnera des prévisions beaucoup plus précises de la probabilité d'événements rares.

La prévision subsaisonnaire a progressé considérablement ces dernières années : nos prévisions à quatre semaines sont aujourd'hui aussi fiables que les prévisions à trois semaines d'il y a quinze ans. En particulier, nous sommes

maintenant capables de prévoir l'OMJ plus de cinq semaines à l'avance au lieu de seulement deux semaines au début des années 2000. Par rapport à d'autres centres météorologiques, les prévisions subsaisonniers du CEPMMT figurent souvent parmi les plus fiables. Ces succès sont dus à des améliorations de notre modèle numérique et à l'utilisation de nouvelles observations pour l'initialiser.

Même s'il y a toujours un peu de compétition entre les différents centres météorologiques internationaux, l'heure est plutôt à la collaboration. Pour preuve, l'Organisation météorologique mondiale a lancé il y a plusieurs années un projet que je codirige avec un collègue américain afin d'améliorer la prévision subsaisonnaire. Ce projet a permis de créer une base de données agrégeant les prévisions réalisées par onze centres internationaux sur une longue période. Semblable dans l'esprit à celle livrée par SubX, notre base s'en distingue par le fait qu'elle est dédiée uniquement à la recherche et ne contient pas les prévisions les plus récentes. Cependant elle contient plus de modèles et plus d'information par modèle. En tout, cela représente plus de 100 téraoctets de données. À ce jour plus de 150 articles exploitant cette base de données ont été publiés, qui permettent d'avoir une idée plus précise de la qualité de nos prévisions, et surtout d'identifier les principales limitations de nos modèles numériques. À l'aide de ces comparaisons, nous avons compris par exemple la nécessité de modéliser plus finement la stratosphère pour améliorer les prévisions subsaisonniers.

Ces prévisions devraient continuer à progresser dans les années à venir grâce à des modèles toujours plus complexes (ajout de modèles de chimie, de végétation...) qui devraient inclure de nouveaux effets atmosphériques (l'impact de la poussière volcanique, de l'ozone...) et opérer à des résolutions plus fines. L'utilisation de modèles d'intelligence artificielle pour, par exemple, mieux interpréter les résultats des modèles, devrait également conduire à de meilleures prévisions à quatre semaines.

FRÉDÉRIC VITART

chercheur au CEPMMT (ECMWF en anglais), à Reading, Royaume-Uni