

> magnétique à sa surface, est un autre exemple de phénomène multiéchelles. Il s'agit d'une oscillation assez régulière émergeant de la dynamique complexe et rapide de sa zone convective. Les bandes de Jupiter constituent un autre exemple frappant d'organisation à grande échelle au sein d'un écoulement turbulent : l'énergie est injectée à petite échelle par les tempêtes atmosphériques et les colonnes convectives du manteau liquide. De tels systèmes constituent un défi pour la compréhension physique et la modélisation, puisqu'il faut appréhender le système dans son ensemble, depuis ses plus petites composantes jusqu'aux plus grandes, et depuis ses fluctuations les plus rapides jusqu'aux variations les plus lentes.

Dans le cas de l'oscillation quasi biennale, ce sont les tempêtes tropicales, d'une durée de quelques heures à quelques jours et s'étendant sur quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres, qui émettent des ondes dans la stratosphère avec des périodes allant de dix minutes à quelques heures, et des tailles de quelques

kilomètres à quelques centaines de kilomètres. Ensuite, ces ondes créent spontanément un écoulement global est-ouest de toute la bande équatoriale de la stratosphère, donc sur plus de 40 000 kilomètres, qui s'inverse régulièrement.

Un point important est que les modèles globaux de circulation atmosphérique (GCM pour *Global Circulation Models*), utilisés pour étudier le climat, ne décrivent pas avec précision les tempêtes et ondes, « détails » trop petits et trop rapides pour leurs capacités de résolution (voir l'encadré ci-dessous). De façon imagée, cela reviendrait à essayer de modéliser le mouvement d'un enfant sur une balançoire en suivant l'action de chacune des cellules musculaires ! Ce degré de détail n'est pas nécessaire pour comprendre le balancement : il suffit de modéliser l'action globale du corps par une force agissant sur la balançoire. De même, dans les GCM, les effets des tempêtes et des ondes sont paramétrisés, c'est-à-dire non pas complètement modélisés, mais introduits sous forme de forçages avec des paramètres *ad hoc*, dont les

L'ÉVOLUTION DU CLIMAT ET LES PROBLÈMES MULTIÉCHELLES

Malgré de nombreuses avancées techniques, prévoir la météo pour les jours qui viennent reste une tâche ardue. Prédire quel sera le climat de la Terre pour les cent prochaines années l'est encore plus.

Pour décrire et déterminer l'évolution du climat, il faut étudier un modèle aux équations très complexes, dont la résolution n'est possible que par des calculs numériques.

Dans de tels calculs, l'atmosphère de la Terre (ainsi que l'océan pour les modèles les plus évolués) est divisée en petits volumes centrés autour de points interconnectés (on parle de discrétisation, voir la figure ci-contre) qui contiennent chacun des informations sur la température, l'humidité, la vitesse du vent, etc. Plus les volumes sont petits, plus le modèle sera précis et prédictif. Même problème pour l'évolution temporelle

du système : le temps est découpé en courts intervalles qui séparent deux états successifs du modèle. Plus ce pas de temps est petit, meilleur sera le modèle. Il n'est cependant pas possible d'utiliser un nombre arbitrairement grand de points d'espace et de temps pour avoir le résultat le plus précis possible, car cela exigerait de trop importantes ressources de calcul.

Même en utilisant les meilleures infrastructures de calcul numérique, qui utilisent des milliers de processeurs simultanément, les modèles les plus performants sont limités à un point de calcul tous les 100 kilomètres environ selon la direction horizontale, et tous les kilomètres en moyenne selon la verticale. L'état du système est évalué quelques fois par jour au mieux, ce afin de pouvoir considérer plusieurs dizaines, voire centaines, d'années. Il est donc impossible dans ces simulations de prédire des variations de température ou de vitesse à des échelles inférieures à la centaine de kilomètres, ou sur des temps inférieurs à l'heure.

Dès lors, les petits mouvements rapides de l'air ne sont pas simulés directement, alors qu'ils influent sur la circulation atmosphérique à grande échelle. Ils sont donc pris en compte dans les

équations par des termes qui miment leur action, en apportant par exemple une accélération virtuelle aux vents aux grandes échelles, qui sont, eux, explicitement résolus par le modèle.

Savoir quelle accélération ajouter correspond au travail de « paramétrisation ». Celui-ci est essentiel pour la prédiction climatique, mais aussi dans d'autres domaines de la physique où l'on modélise l'effet d'une multitude de petites structures rapides sur l'évolution d'une grande structure plus lente (on parle

alors de problème « multiéchelles »). Une bonne paramétrisation nécessite une connaissance complète de la physique sous-jacente, d'où l'intérêt des modèles théoriques, des expériences de laboratoire, et des simulations plus localisées et plus idéalisées que les modèles climatiques complets. Les oscillations quasi biennales offrent un exemple de problème multiéchelles dans l'atmosphère dont la compréhension est cruciale pour améliorer les modèles climatiques.



Dans les simulations numériques du climat, on discrétise l'atmosphère, qui est ainsi découpée en petites cellules où les variables climatiques (température, pression, etc.) sont supposées uniformes. On calcule ensuite l'évolution temporelle de ces grandeurs, régie par les équations du modèle utilisé.

valeurs sont ajustées pour reproduire correctement les observations et les données actuelles.

Le problème est que, contrairement aux mouvements du corps sur la balançoire, qui sont *a priori* assez réguliers, puisque produits dans le but explicite de se balancer, les tempêtes sont chaotiques. Leur caractère fluctuant n'est pris en compte que de façon simplifiée dans les GCM, et ces approximations influent beaucoup sur la précision des modèles et sur leur caractère prédictif.

Ainsi, aucun GCM n'avait prédit la perturbation nette du cycle de l'oscillation quasi biennale enregistrée en 2016 et observée par l'équipe de Scott Osprey, de l'université d'Oxford. Première déviation dans les cycles des oscillations quasi biennales depuis plus de 60 ans, elle serait peut-être liée au réchauffement climatique et donc à une irrégularité du forçage des ondes.

L'OSCILLATION QUASI BIENNALE SIMULÉE

Au regard de l'influence de l'oscillation quasi biennale sur la météorologie planétaire et l'apparition de cette perturbation non anticipée, il est nécessaire de poursuivre notre étude du phénomène pour mieux comprendre sa variabilité. À l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphé), à Marseille, notre équipe a réalisé une première étape en développant des simulations numériques de longue durée d'un système complet. Celui-ci s'organise spontanément en une couche convective turbulente en contact avec une couche stratifiée, et engendre des ondes internes de gravité dans cette dernière. Notre modèle s'appuie sur une description physique la plus généraliste possible d'une configuration simple: une boîte rectangulaire, chauffée par le bas et refroidie par le haut, avec des mouvements fluides décrits par des équations génériques de la mécanique des fluides, en l'occurrence les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible.

L'originalité de notre système provient d'un coefficient de dilatation thermique non constant, c'est-à-dire d'une relation non monotone entre les variations de masse volumique du fluide et les variations de sa température. Dans un modèle classique, la densité d'un fluide diminue lorsque sa température augmente, et donc ce fluide chauffé par le bas (respectivement refroidi par le haut) se met à monter (respectivement à descendre): le fluide dans son intégralité se met à produire des mouvements de convection sur toute sa hauteur. Dans notre modèle, nous avons considéré qu'au-dessous d'une température de référence, cette propriété s'inverse, et donc que le fluide est de moins en moins dense quand la température diminue. Cela peut paraître surprenant, mais c'est le cas de l'eau entre 0 °C et 4 °C (ce qui explique pourquoi le fond des lacs est

souvent à 4 °C)! En conséquence, en dessous de cette température de référence, notre fluide chauffé par en bas et refroidi par en haut est stratifié, comme la stratosphère. En poursuivant nos simulations sur des temps suffisamment longs, un écoulement moyen s'inversant lentement apparaît alors spontanément, au-dessus de la couche convective complètement chaotique (voir la figure page 29).

Pour l'instant, du fait des limites dans la puissance de calcul de nos ordinateurs, notre modèle est limité à deux dimensions et sa description physique simple n'inclut pas les complexités d'une atmosphère réelle. Cependant, il vient compléter les modèles théoriques, expérimentaux et de type GCM décrits précédemment, en relevant pour la première fois le défi d'appréhender l'ensemble des échelles spatio-temporelles et toutes les interactions dans un système complet. Il offre ainsi la possibilité de comprendre la physique globale des écoulements de type oscillation quasi biennale (QBO).

La simplicité de notre modèle présente aussi l'avantage de démontrer le caractère générique du mécanisme menant des fluctuations turbulentes aux petites échelles à un écoulement organisé à grande échelle: ainsi, l'existence d'une couche convective adjacente à une couche stratifiée stable semble suffire à l'apparition d'une QBO! Or une telle organisation à deux couches existe *a priori* dans de nombreuses atmosphères planétaires, et en particulier dans les géantes gazeuses. Et de fait, des renversements de type QBO ont aussi été observés sur Jupiter avec une période de 4 ans et sur Saturne avec une période de 15 ans. Même si la source de ces écoulements reste hors d'atteinte des observations actuelles, tout laisse à croire qu'il s'agit là aussi d'ondes excitées par la convection.

DE LA TERRE AUX ÉTOILES

L'intérieur des étoiles est aussi constitué d'une zone convective au-dessus (pour les étoiles de type solaire) ou au-dessous (pour les étoiles plus massives) d'une zone radiative, stratifiée et stable. Plus spéculatif: le noyau en fer liquide de la Terre pourrait lui aussi comporter une couche stratifiée stable, au-dessus de la couche convective engendrant le champ magnétique. La présence d'ondes a déjà été détectée dans les fluctuations du champ magnétique, et nul doute qu'une QBO dans le noyau devrait également avoir une signature observable.

Notre modèle générique constitue un outil unique qui montre que des écoulements de type QBO peuvent intervenir dans de multiples contextes planétaires et stellaires. S'il est encore extrêmement simplifié aujourd'hui, il permettra à terme d'en étudier les caractéristiques, les perturbations et les conséquences spécifiques aux contextes atmosphériques, stellaires et planétaires. ■

BIBLIOGRAPHIE

L.-A. Coustou et al., **Order out of chaos : slowly reversing mean flows emerge from turbulently generated internal waves**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, 244505, 2018.

B. Semin et al., **Nonlinear saturation of the large scale flow in a laboratory model of the quasibiennial oscillation**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, 134502, 2018.

S. Osprey et al., **An unexpected disruption of the atmospheric quasi-biennial oscillation**, *Science*, vol. 353, pp. 1424-1427, 2016.

R. A. Plum et A. D. McEwan, **The instability of a forced standing wave in a viscous stratified fluid : a laboratory analogue of the quasi-biennial oscillation**, *J. Atmospheric Sci.*, vol. 35(10), pp. 1827-1839, 1978.

R. S. Lindzen et J. R. Holton, **A theory of the quasi-biennial oscillation**, *J. Atmos. Sci.*, vol. 25, pp. 1095-1107, 1968.