

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.