

COMMENT L'ORDRE ÉMERGE DANS LES SYSTÈMES MULTIÉCHELLES

Il est assez aisé de prédire quel sera l'écoulement dans votre tasse de café lorsque vous y tournez une cuillère afin de mélanger le sucre, car tout se passe à la même échelle spatiale, de l'ordre du centimètre. Il en est de même de certains phénomènes atmosphériques se développant sur plusieurs milliers de kilomètres. C'est le cas de la « cellule de Hadley », proposée par le météorologue anglais George Hadley en 1735 : du fait d'un

ensoleillement plus intense à l'équateur qu'aux pôles, la différence de température entraîne un écoulement d'air à très grande échelle. Tous les effets impliqués dans le phénomène agissent à des échelles spatiales similaires, de l'ordre de la taille de la planète. C'est pourquoi la cellule de Hadley et la tasse sont simples à modéliser.

Mais ce n'est pas toujours le cas. Il est par exemple beaucoup plus difficile de prédire quel sera l'écoulement global dans une piscine olympique si 100 personnes se mettent à nager chacune à son rythme. Chaque nageur introduit une part d'aléatoire et il existe une différence d'échelle entre les mouvements engendrés par ses jambes et ses bras, de l'ordre du centimètre ou du mètre, et la taille de la piscine.

De même, une partie de la circulation atmosphérique

(ou océanique pour les océans, stellaire pour les étoiles, etc.) à grande échelle doit son origine à la présence d'une multitude de petits mouvements rapides et aléatoires (vagues, tourbillons, turbulences) souvent très difficiles, voire impossibles, à observer directement.

La physique qui décrit l'action collective de ces petits mouvements permettant d'engendrer un écoulement à l'échelle d'une planète ou d'une étoile est souvent complexe. En général, l'action collective de ces petites fluctuations ne permet pas de faire émerger un mouvement d'ensemble si elles sont complètement désordonnées.

Il faut qu'un mécanisme mette de l'ordre dans tout ce capharnaüm ! Pour l'oscillation quasi biennale, les perturbations sont les ondes qui se déplacent dans la

stratosphère, et le métronome du désordre est le vent global lui-même, qui fait le tour de la planète au niveau de l'équateur. Il suffit que ce vent global émerge, aussi faible soit-il, pour que les perturbations initialement aléatoires s'organisent et cèdent leur énergie au vent global et l'amplifient.

Le problème est complexe : il est très difficile de comprendre et prédire la physique du cercle vertueux permettant aux grandes échelles de se nourrir des petites échelles. Cela fait systématiquement appel à des interactions non linéaires impliquant des échelles spatiales allant du mètre jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. C'est pourtant un mécanisme fondamental qui s'applique à de nombreux systèmes, de l'atmosphère terrestre jusqu'à l'intérieur des étoiles.

McEwan, de l'université de Melbourne, en Australie, ont reproduit en laboratoire le mécanisme d'oscillation quasi biennale. L'expérience, revue et améliorée en 2018 par Benoît Semin, de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues, utilisait une cuve cylindrique remplie d'eau, très salée en bas et de moins en moins salée vers le haut pour reproduire la stratification stable de la stratosphère. Une membrane flexible collée en bas de la cuve vibrait pour produire des ondes similaires aux ondes atmosphériques. Ce dispositif de taille décimétrique reproduisait « à l'échelle » les ingrédients principaux du modèle théorique de l'oscillation quasi biennale. Les paquets d'ondes étaient émis en sens opposés avec une période typique de 15 à 30 secondes (correspondant à quelques dizaines de minutes dans la « vraie » stratosphère). Ils renforçaient

chacun un écoulement dans le sens correspondant, dont le renversement s'effectuait sur une durée beaucoup plus longue, à l'échelle d'une heure environ (correspondant aux 28 mois de la « vraie » oscillation quasi biennale).

Cette expérience a confirmé que le modèle théorique décrivait correctement le processus à l'origine de l'oscillation quasi biennale. Cependant, les chercheurs sont loin de pouvoir prédire avec précision quand des vents stratosphériques vont s'inverser à l'horizon de plusieurs années, voire des décennies. En effet, à quelques exceptions près, les modèles théoriques négligent ce qui constitue la richesse et la complexité de l'oscillation quasi biennale : le fait que les ondes sont produites grâce à un processus turbulent et intermittent, celui des tempêtes. La régularité de l'oscillation quasi biennale n'est pas parfaitement métronomique et des anomalies aujourd'hui imprévisibles se cachent derrière l'intermittence des tempêtes.

L'oscillation quasi biennale influe sur les moussons et la couche d'ozone

LE CHAOS DES TEMPÊTES

L'oscillation quasi biennale illustre parfaitement la complexité des interactions qui régissent la dynamique de l'atmosphère terrestre. De façon plus générale, elle appartient à la classe de phénomènes physiques dits multi-échelles, dans lesquels une organisation globale du système se met en place spontanément dans un écoulement turbulent, donc désorganisé et très fluctuant jusqu'aux plus petites échelles d'espace et de temps (voir l'encadré ci-dessus). Le cycle de 11 ans du Soleil, entre des périodes de forte et de faible activité >