

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 >

▷ 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 40000 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.