



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LA SCIENCE ET LE CHAT DU CHESHIRE

Il ne suffit pas de vulgariser les acquis scientifiques pour que le public les comprenne et y adhère. La perception qu'il a des institutions de la science joue un rôle clé.



Lors de son congrès annuel de 2008, l'Association américaine des centres de science et de technologie a consacré une session à la perception publique des controverses en science. Étonnés par l'imperméabilité de l'opinion à la méthode scientifique, directeurs de musées et éthiciens insistaient sur la nécessité d'orienter les centres de science vers la prise en compte des contenus controversés et des enjeux éthiques qui les structurent.

Dix ans plus tard, l'angoisse que suscite l'incompréhension des acquis scientifiques par le grand public reste d'actualité. Qu'il soit question d'écologie, d'énergie, de biotechnologies ou de sécurité des vaccins, la lente traversée des faits avérés est encore freinée par la cacophonie des énoncés pseudoscientifiques circulant dans certains médias et sur Internet.

En France, dans une tribune de *L'Express* publiée le 4 décembre dernier, 131 membres des académies des sciences, de médecine et de pharmacie ont rappelé que l'efficacité des produits homéopathiques n'a jamais été prouvée. Quelques

mois plus tôt, c'est presque autant de professionnels de santé qui dénonçaient dans *Le Figaro* les promesses fantaisistes des médecines alternatives.

Intuitivement, la vulgarisation scientifique apparaît comme le moteur premier d'une percolation du savoir vers les couches profondes de l'opinion. Mais en réalité, l'adhésion à la parole scientifique dépend de la confiance dans ceux qui la produisent.

L'adhésion au consensus scientifique dépend de la confiance dans les organismes de la science

Un rapport de l'Académie américaine des arts et des sciences publié en 2018 sur les perceptions de la science et une étude de 2017 menée par Caitlin Drummond et Baruch Fischhoff, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, défient nos idées

reçues. Ils montrent que l'adhésion des Américains aux conclusions des recherches sur les cellules souches, le Big Bang, l'évolution humaine ou le changement climatique est corrélée à l'identité politique ou religieuse des gens. Et cette polarisation est plus marquée chez ceux ayant un niveau élevé d'instruction et de culture scientifique! En revanche, elle disparaît quand les sujets abordés concernent le génie génétique ou les nanotechnologies.

C'est qu'une autre variable intervient fortement: l'adhésion au consensus scientifique dépend étroitement de la croyance en la fiabilité des organisations produisant et certifiant les savoirs. C'est ainsi, par exemple, que la remise en cause des expertises publiques encourage les traitements médicaux charlatanesques ou non homologués, en marge des disciplines instituées ou des cadres classiques de régulation du médicament.

Dans cette même veine, le dernier baromètre de la confiance politique du Cevipof (<https://bit.ly/2D2BfoL>) met en évidence que le populisme, défini par le rejet des institutions de la démocratie représentative, est une variable importante de la défiance vis-à-vis des activités scientifiques.

La confiance sociale dans la parole scientifique résulte donc d'un rapport entre un contenu et un cadre institutionnel incarnant le bien commun. On peut la lire comme une parabole du chat du Cheshire, ce malicieux personnage de Lewis Carroll qui disparaît à la fin des *Aventures d'Alice au pays des merveilles* en laissant son sourire accroché à un arbre.

Un sourire dénué de visage qui le porte évoque une image dont il est impossible de tracer les contours. De la même façon, un contenu scientifique sans l'ossature institutionnelle qui lui donne autorité incarne une simple opinion comme une autre. À l'instar d'Alice qui a «souvent vu un chat sans sourire, mais jamais un sourire sans chat», il nous faut apprendre à redessiner le visage souriant des institutions scientifiques dans un marché dérégulé de l'information où règne la confusion des légitimités. ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

NOUS AVONS UNE CONVICTION : LES RESSOURCES PÉDAGOGIQUES SONT AU SERVICE DE LA LIBERTÉ DES ENSEIGNANTS.

C'est pourquoi nous nous efforçons de comprendre les **besoins spécifiques de chacun.**

Notre mission est accomplie si nous mettons entre vos mains des solutions concrètes qui vous permettent de vous adapter à toutes les façons d'apprendre.

Ainsi, du manuel papier à nos offres numériques innovantes, nous proposons une gamme variée pour vous accompagner dans la mise en œuvre des **nouveaux programmes.**

Issues d'un travail collectif entre professeurs devenus auteurs et une communauté d'éditeurs chevronnés, ces ressources sont reconnues à la fois pour leur **qualité pédagogique** et leur **flexibilité d'usage.**

Nous sommes fiers d'être à vos côtés pour que vous trouviez chaque jour le chemin le plus adapté pour transmettre le savoir.

**NOTRE IDÉE DE
L'ENSEIGNEMENT :
LA VÔTRE.**

L'ESSENTIEL

> Au niveau de l'équateur, les vents de la stratosphère changent de direction tous les 14 mois environ.

> Ce phénomène n'est pas lié au mouvement de la Terre. Il serait dû aux orages tropicaux qui produisent des turbulences chaotiques et aléatoires dans l'atmosphère.

> Pour mieux comprendre ces oscillations, dites quasi biennales, les auteurs ont mis au point une simulation qui reproduit leur comportement dans un système simplifié.

> Ce phénomène serait aussi présent dans certaines étoiles ou à l'intérieur des planètes ayant un noyau liquide.

LES AUTEURS



LOUIS-ALEXANDRE COUSTON
postdoctorant
à l'Irphé,
à Marseille



BENJAMIN FAVIER
chargé
de recherche
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille



MICHAEL LE BARS
directeur
de recherche
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille

Vents stratosphériques Un cycle né du chaos

Dans la stratosphère, la direction des vents équatoriaux s'inverse tous les 14 mois environ. Ce cycle, qui influe sur le climat, serait dû au caractère intermittent des tempêtes tropicales. Un ordre né du chaos, confirmé par des expériences et des simulations.



La stratosphère, entre 16 et 50 kilomètres d'altitude, est une couche atmosphérique peu agitée. Elle présente néanmoins une inversion périodique du sens des vents.

En 1883, le volcan indonésien Krakatoa est entré en éruption. La puissance de celle-ci a projeté des débris dans l'atmosphère jusqu'à 30 kilomètres d'altitude. Les météorologues de l'époque ont constaté que ces poussières ont fait le tour de la Terre en deux semaines, d'est en ouest en suivant l'équateur. Ils ont ainsi découvert l'existence de vents puissants dans la stratosphère, soufflant à plus de 100 kilomètres par heure. En 1908, le météorologue allemand Arthur Berson a étudié à son tour ces vents équatoriaux grâce à des ballons. Il a eu la surprise de noter que les vents soufflaient dans le sens contraire, d'ouest en est!

Des observations et des relevés plus réguliers ont permis de résoudre cette apparente contradiction. La stratosphère est le siège d'un phénomène périodique, nommé oscillation quasi biennale. Le mouvement des masses d'air

de la stratosphère au niveau de l'équateur s'inverse tous les 14 mois et constitue un cycle complet de 28 mois, soit un peu plus de 2 ans.

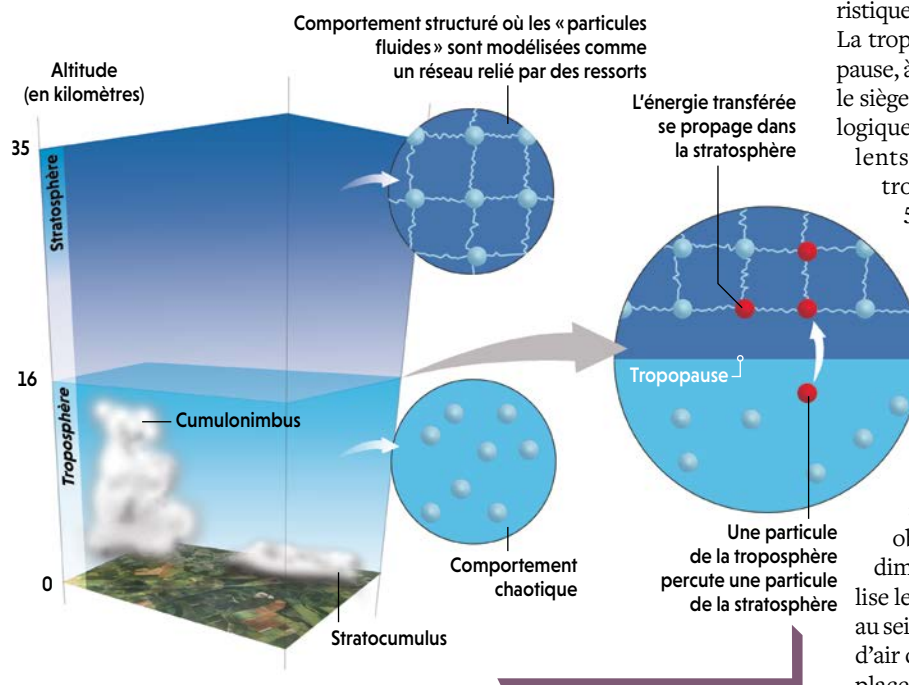
Quelle est l'origine de ce phénomène, qui est sans lien avec les cycles météorologiques annuels associés à la révolution de la Terre autour du Soleil? Le cycle atypique émergerait de processus chaotiques actifs dans l'atmosphère à plus basse altitude, en l'occurrence les tempêtes tropicales. Celles-ci provoquent des perturbations, nommées ondes atmosphériques, qui se propagent tout autour de la planète. Au-dessus de l'équateur, ces ondes forceraient l'air situé entre 16 et 35 kilomètres d'altitude à se déplacer tantôt vers l'ouest, tantôt vers l'est.

Cette explication n'est pas sans rappeler la métaphore bien connue pour illustrer le chaos déterministe où un battement d'ailes de papillon engendre un ouragan à l'autre bout du monde: de petites causes peuvent avoir de grandes conséquences.

Pour confirmer ce lien entre les tempêtes et l'oscillation quasi biennale, il était nécessaire de modéliser le phénomène. Notre équipe a ainsi développé une simulation qui reproduit ce cycle. L'enjeu est de pouvoir étudier dans les moindres détails ces oscillations et de mieux comprendre leur influence sur la dynamique de l'atmosphère terrestre dans son ensemble.

DE LA TROPOSPHÈRE VERS LA STRATOSPHERE

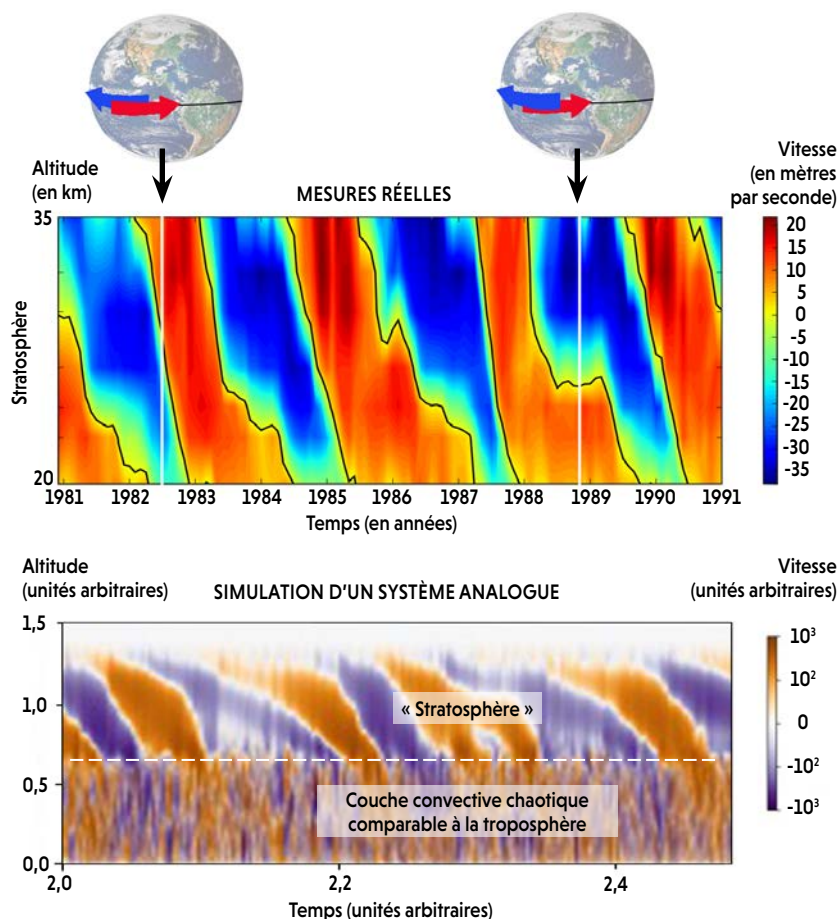
La partie basse de l'atmosphère est organisée en deux couches: la troposphère s'étend du sol jusqu'à la tropopause, à environ 16 kilomètres d'altitude, et la stratosphère commence à la tropopause et se termine à environ 50 kilomètres d'altitude. Dans la troposphère, où la température diminue avec l'altitude, l'air est moins dense en bas, ce qui rend cette couche instable, agitée et le siège des principales activités météorologiques. Les « particules fluides » d'air (en bleu) s'y déplacent de façon chaotique. À l'inverse, dans la stratosphère, la température augmente avec l'altitude et l'air s'organise en couches horizontales relativement stables. Les particules d'air y sont modélisées comme un réseau relié par des ressorts. Lorsqu'une particule d'air de la troposphère (en rouge) percute la tropopause, elle cède une partie de son énergie à la stratosphère. La perturbation se propage de proche en proche sous la forme d'ondes, qui fournissent l'énergie nécessaire au développement de l'oscillation quasi biennale.



UNE SURPRENANTE INVERSION DE DIRECTION

Indépendamment de leur changement périodique de direction, les vents stratosphériques étaient déjà une surprise pour les météorologues, qui avaient longtemps pensé que la stratosphère était plutôt calme, comparée à la troposphère. L'atmosphère se divise en couches aux caractéristiques très différentes (voir l'encadré ci-contre). La troposphère s'étend du sol jusqu'à la tropopause, à environ 16 kilomètres d'altitude. Elle est le siège de la plupart des phénomènes météorologiques, dont des tempêtes et des vents violents. La stratosphère, située entre la tropopause et la stratopause, à environ 50 kilomètres d'altitude, doit son nom au fait que l'air y est stratifié en densité (qui diminue avec l'altitude).

Les gaz à effet de serre, tel l'ozone, présents surtout dans les couches supérieures de la stratosphère, y captent l'énergie du rayonnement ultraviolet venant de l'espace et la redistribuent. En conséquence, la température de la stratosphère augmente avec l'altitude (à l'inverse de ce qu'on observe dans la troposphère) et la densité diminue. Cette répartition de densité stabilise les mouvements verticaux de masses d'air au sein de la stratosphère: chaque petit volume d'air déplacé verticalement tend à revenir à sa place sous l'action de la gravité. Du fait de



Dans la stratosphère, au-dessus de l'équateur, la direction des vents est-ouest suit un cycle de 28 mois. Les observations (*en haut*) sur une période de dix ans (1981-1991) mettent en évidence le phénomène. La simulation numérique (*en bas*) d'un système analogue et simplifié de l'atmosphère, étudié par les auteurs, met en évidence un phénomène cyclique similaire.

l'apparente quiétude de la stratosphère, les chercheurs ont longtemps négligé son influence sur la météorologie mondiale.

Les travaux d'Arthur Berson ont montré que la dynamique de la stratosphère était plus riche qu'on ne le pensait. En 1961, l'Américain Richard Reed et l'Anglais Robert Ebdon ont confirmé l'existence des oscillations quasi biennales et ont décrit avec précision ces vents stratosphériques persistant au-dessus des tropiques. Ils ont montré que l'air stratosphérique se déplace en une multitude de couches horizontales dont la vitesse varie continuellement avec l'altitude et dont la direction de propagation (vers l'est ou l'ouest) change au cours du temps (*voir la figure ci-dessus*). Les observations ont montré que c'est la couche la plus élevée, vers 35 kilomètres d'altitude (plus haut, les vents s'atténuent très vite), qui est la première à changer de sens. Par effet domino, toutes celles en dessous finissent aussi par changer de sens. Une oscillation complète des vents entre 16 et 35 kilomètres d'altitude dure environ 28 mois.

Les vents de l'oscillation quasi biennale circulent en suivant l'équateur dans une bande assez étroite qui couvre toute la ceinture tropicale. Aux latitudes supérieures à 12 degrés au nord et au sud, la force de Coriolis, due à la rotation de la Terre sur elle-même, atténue cet effet. Néanmoins, il a été montré que

l'oscillation quasi biennale influe indirectement sur l'ensemble de la météo mondiale. Elle module certains phénomènes atmosphériques aux hautes latitudes, tels que l'oscillation nord-Atlantique et les vortex polaires. Elle a aussi un rôle dans la dynamique de la couche d'ozone et dans les cycles de la mousson. Du fait de sa grande régularité, elle est considérée comme une constante stabilisatrice de l'atmosphère dans les modèles météorologiques. Cependant, il a fallu attendre les années 2000 pour qu'apparaissent les premières tentatives d'inclusion de ce phénomène dans les modèles climatiques.

Mais quelle est son origine? Au cours des années 1950, les météorologues ont d'abord considéré les effets des marées, des changements de température des sols et des océans ou encore de l'activité fluctuante du Soleil sur les vents stratosphériques. Ces pistes se sont révélées infructueuses: aucune des variabilités considérées n'engendrait l'oscillation ou n'expliquait son cycle de 28 mois. L'idée d'une force agissant à grande échelle a alors été abandonnée.

La situation s'est progressivement débloquée vers la fin des années 1960 quand de nouvelles observations et des modèles théoriques ont suggéré que la stratosphère, bien que stratifiée et stable, est en fait le siège de nombreux mouvements. Ces derniers ne sont pas turbulents: il s'agit d'ondes atmosphériques, un peu comme une version tridimensionnelle des vagues à la surface des océans. Ces ondes se propagent horizontalement (par exemple d'est en ouest), mais aussi verticalement. Les turbulences animant la troposphère (dues aux orages, tempêtes, etc.) sont une source importante d'ondes atmosphériques qui se propagent dans la stratosphère.

Le paquet d'ondes associé à une seule tempête a peu d'effets sur la dynamique stratosphérique. Mais si l'on considère l'ensemble des paquets d'ondes produits par la totalité des tempêtes, ainsi que ceux engendrés par d'autres mécanismes dont la rotation de la Terre, on obtient alors une source d'énergie suffisante pour déclencher et amplifier les vents stratosphériques. Restait à expliquer l'inversion régulière de la direction du vent.

LE RÔLE CRUCIAL DES ONDES ATMOSPHÉRIQUES

À la fin des années 1960, les Américains Richard Lindzen et James Holton ont proposé un modèle physique simple faisant le lien entre les ondes atmosphériques et l'oscillation quasi biennale. L'idée centrale est que les ondes atmosphériques ne font pas que traverser la stratosphère: elles transfèrent aussi une part de leur énergie au profit d'un déplacement moyen des masses d'air stratosphériques. Le phénomène est similaire au rôle joué par les vagues océaniques dans la migration des déchets et algues vers les ➤

> côtes. Les ondes au-dessus des tropiques se propageant vers l'est poussent l'air stratosphérique vers l'est, tandis que les ondes allant vers l'ouest poussent l'air stratosphérique vers l'ouest. On s'attend à ce que les effets se compensent et s'équilibrent du fait que, en moyenne, autant d'ondes vont vers l'est que vers l'ouest.

Mais cet équilibre est instable. Dès qu'un infime vent stratosphérique naît, les ondes allant dans la même direction que celui-ci cèdent leur énergie bien plus efficacement que les ondes allant en sens contraire, et le vent initial s'amplifie. Ainsi, si l'on part de deux paquets d'ondes de sens contraires, celui qui est dans le même sens que le vent renforce ce dernier en lui donnant son énergie, tandis que celui qui est dans le sens contraire continue de se propager dans des couches stratosphériques plus élevées où il crée un vent de sens contraire.

Les ondes transfèrent ainsi leur énergie au vent et s'amortissent d'autant. Quand on applique cet effet à un profil de vent variant selon l'altitude, on note que la plus grande partie de l'énergie est transférée avant d'atteindre la couche de la stratosphère où le vent est le plus rapide. Dès lors, le maximum relatif des vitesses de vent descend progressivement vers la tropopause. Et en arrivant à la frontière entre la troposphère et la stratosphère, le vent s'amortit du fait des turbulences troposphériques et finit par disparaître.

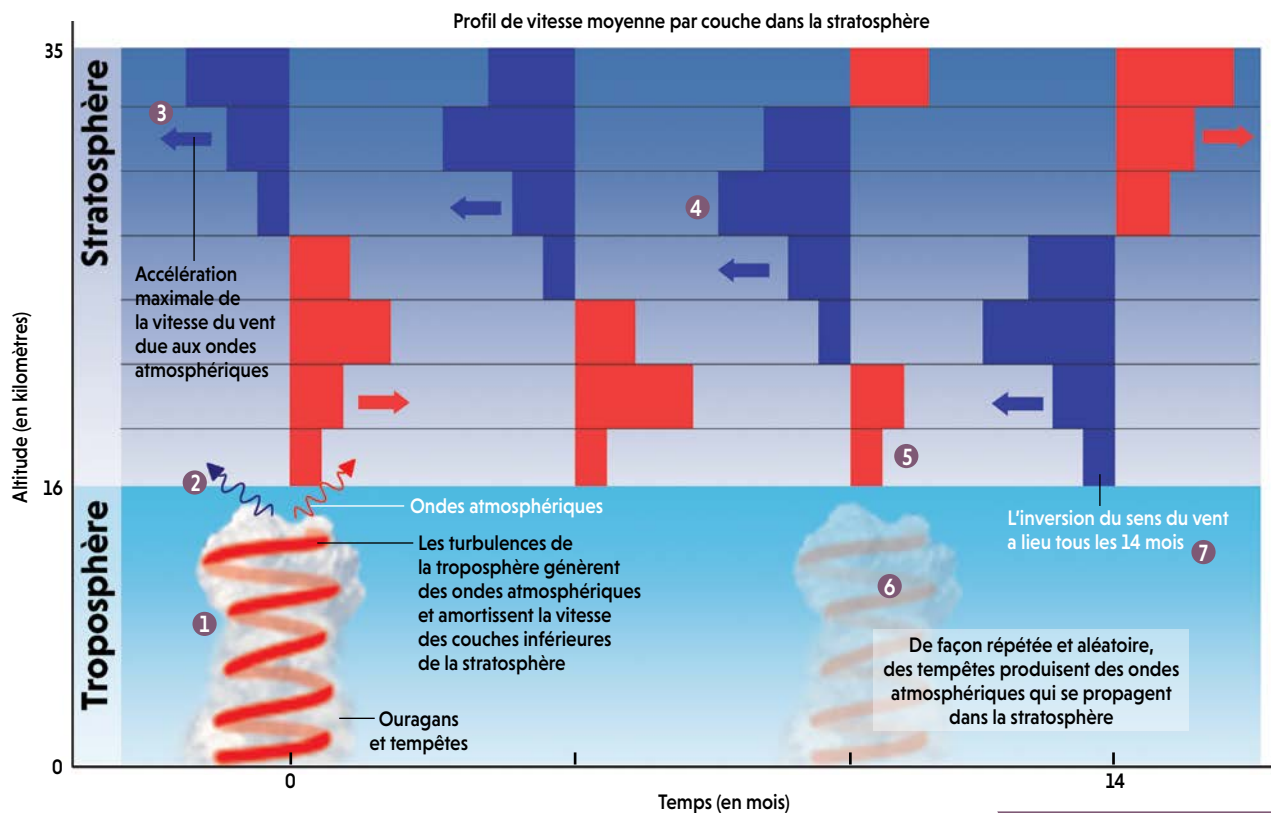
Si l'on combine l'effet d'amplification et d'amortissement près de la tropopause, on obtient une inversion cyclique de la direction des vents dans les différentes couches de la stratosphère (voir l'encadré ci-dessous).

En 1978, près de dix ans après les premières formulations théoriques, Alan Plumb et Angus

LA DYNAMIQUE DES OSCILLATIONS QUASI BIENNALES

Les tempêtes dans la troposphère (1) constituent le moteur des oscillations quasi biennales de la stratosphère. Elles produisent des turbulences qui engendrent des ondes atmosphériques se propageant vers le haut (2) dans toutes les directions (ici, en bleu vers la gauche et en rouge vers la droite). Ces ondes transfèrent leur énergie aux vents des couches horizontales de la stratosphère, qui gagnent en vitesse. Le transfert est d'autant plus efficace que les ondes se propagent dans la même direction que les vents (une onde « bleue » transfère son énergie à des vents « bleus », une onde « rouge »

donne son énergie à un vent « rouge »). Comme les ondes perdent leur énergie à mesure qu'elles gagnent en altitude, l'accélération du vent tend à être maximale dans une couche plus basse que celle où le vent est le plus fort (3). Cela donne l'impression que la couche de vitesse maximale descend au cours du temps (4). Par ailleurs, les turbulences de la troposphère amortissent les vents de la stratosphère en contact avec la tropopause (5). Malgré le caractère intermittent des tempêtes (6), l'ensemble de ces processus conduit à une inversion quasi régulière du sens des vents tous les 14 mois environ (7).



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.

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.

L'ESSENTIEL

> Certaines cytokines, des molécules libérées par le corps en cas d'inflammation (par exemple à la suite d'une infection), sont aussi produites dans le cerveau, où elles modifient son fonctionnement.

> Elles déclenchent des cascades moléculaires qui aboutissent à une baisse des neurotransmetteurs,

notamment de la sérotonine, au rôle clé dans l'humeur, et à la production de molécules neurotoxiques.

> Ainsi, des maladies chroniques associées à une inflammation, comme certains troubles intestinaux, l'obésité, le diabète ou des maladies auto-immunes, favoriseraient la survenue de dépressions.

LES AUTEURES



LUCILE CAPURON
directrice de recherche à l'Inra
au sein de l'unité Nutrineuro
(Inra), à l'université
de Bordeaux



NATHALIE CASTANON
chargée de recherche
à l'Inra dans le même
laboratoire

L'origine inflammatoire de la dépression

Lorsqu'une inflammation s'installe dans l'organisme, elle perturbe le fonctionnement du cerveau au point parfois de déclencher une dépression. On commence à comprendre par quels mécanismes.

La dépression est un problème majeur de santé publique. Cette maladie se caractérise par un ensemble de symptômes persistants (tristesse, rumination, perte d'intérêt ou de plaisir pour les choses habituellement agréables, sentiment de culpabilité ou dévalorisation de soi, problèmes de mémoire et de concentration...), associés à un certain nombre de symptômes neurovégétatifs (troubles du sommeil et de l'appétit, fatigue, diminution du tonus et de la motivation...). Tous ces symptômes ont un retentissement profond sur la vie quotidienne et le bien-être des personnes affectées.

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), cette maladie touche plus de 300 millions d'individus dans le monde et représente une des premières causes d'incapacité. À ce titre, la dépression fait partie des pathologies prioritaires visées par le Programme d'action *Comblant les lacunes en santé mentale*, lancé par l'OMS dès 2008. Cela est d'autant plus important que d'autres affections chroniques très courantes, comme les maladies métaboliques

(obésité, diabète de type 2, syndrome métabolique), auto-immunes ou cardiovasculaires, sont associées à un risque accru de dépression. À l'inverse, la présence de symptômes de dépression contribue d'ailleurs souvent à augmenter le risque de complications médicales ultérieures, favorisant ainsi la mise en place d'un cercle vicieux aux conséquences très délétères pour la santé des patients. Plus grave encore, malgré les progrès thérapeutiques réalisés au cours des dernières décennies, au moins un tiers des patients déprimés ne répondent pas aux traitements antidépresseurs standards. Il est donc crucial de mieux comprendre les bases physiopathologiques de la dépression de façon à en améliorer la prise en charge et le traitement.

Pourquoi devient-on dépressif? Différents facteurs entrent en jeu, qui peuvent être liés à des modifications survenant dans l'environnement de l'individu (événements ou stress répétés, par exemple), ou à sa personnalité, ses habitudes de vie, ses gènes ou certaines caractéristiques biologiques. Mais récemment, des recherches ont suggéré que notre système immunitaire serait aussi en partie responsable. >

