

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.

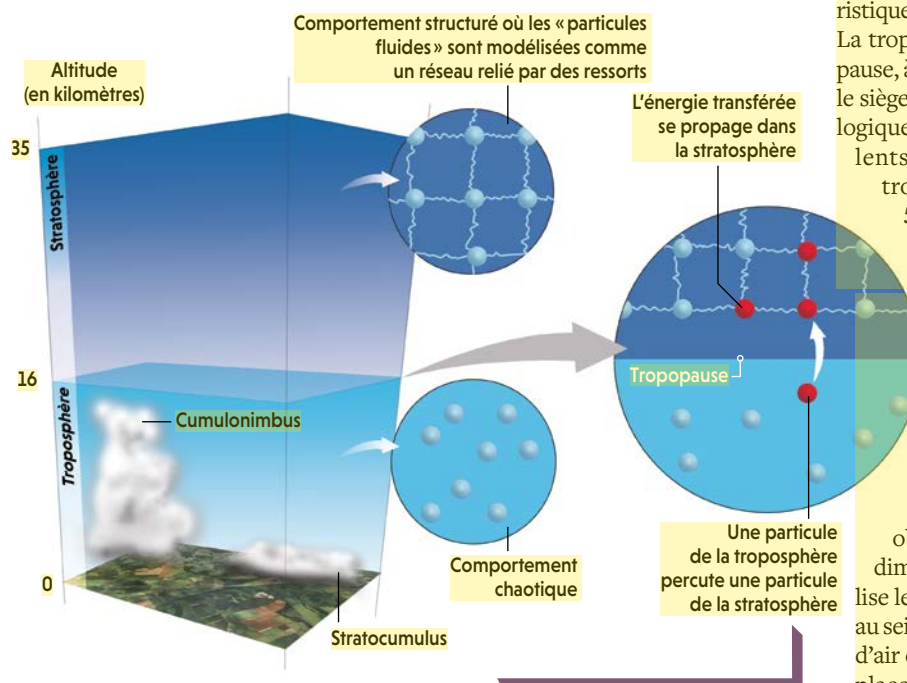
Quelle est l'origine de ce phénomène, qui est sans lien avec les cycles météorologiques annuels associés à la révolution de la Terre autour du Soleil ? Le cycle atypique émergerait de processus chaotiques actifs dans l'atmosphère à plus basse altitude, en l'occurrence les tempêtes tropicales. Celles-ci 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

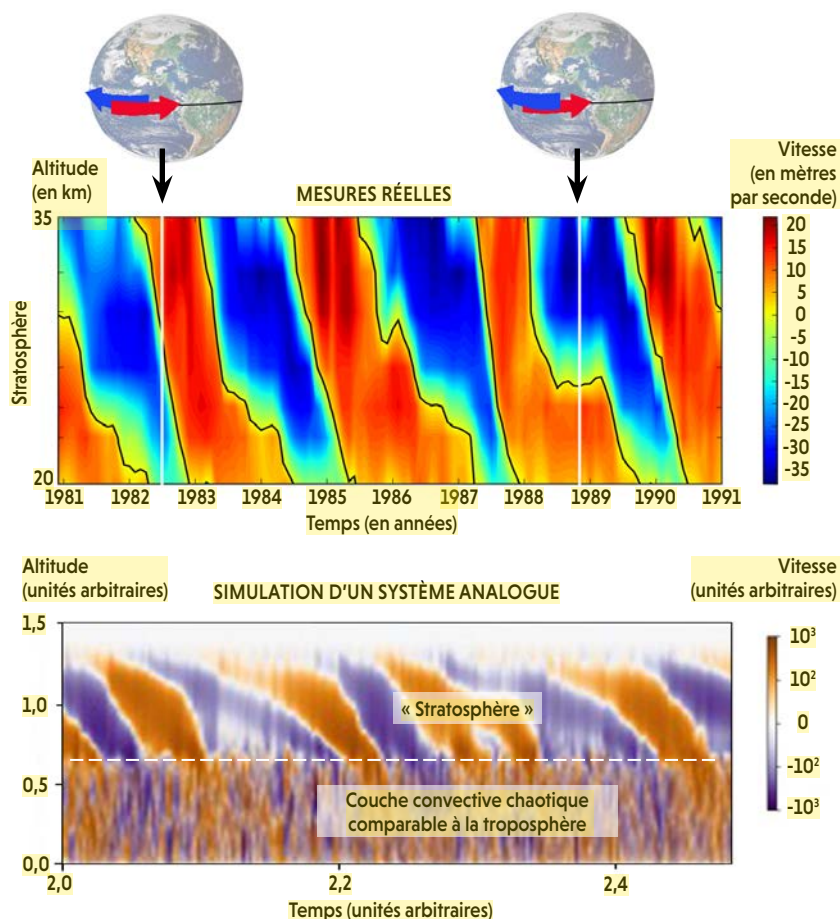
La partie basse de l'atmosphère est organisée en deux couches : la troposphère s'étend du sol jusqu'à la tropopause, à environ 16 kilomètres d'altitude, et la stratosphère commence à la tropopause et se termine à environ 50 kilomètres d'altitude. Dans la troposphère, où la température diminue avec l'altitude, 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 (dus 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 ➤