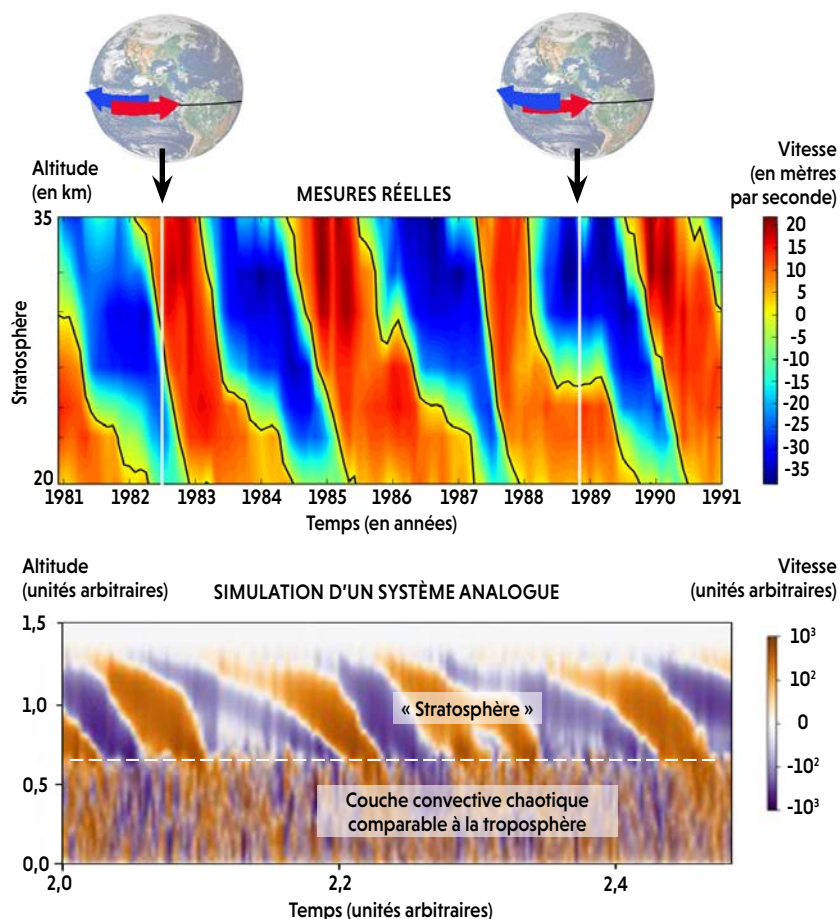




Dans la stratosphère, au-dessus de l'équateur, la direction des vents est-ouest suit un cycle de 28 mois. Les observations (*en haut*) sur une période de dix ans (1981-1991) mettent en évidence le phénomène. La simulation numérique (*en bas*) d'un système analogue et simplifié de l'atmosphère, étudié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

