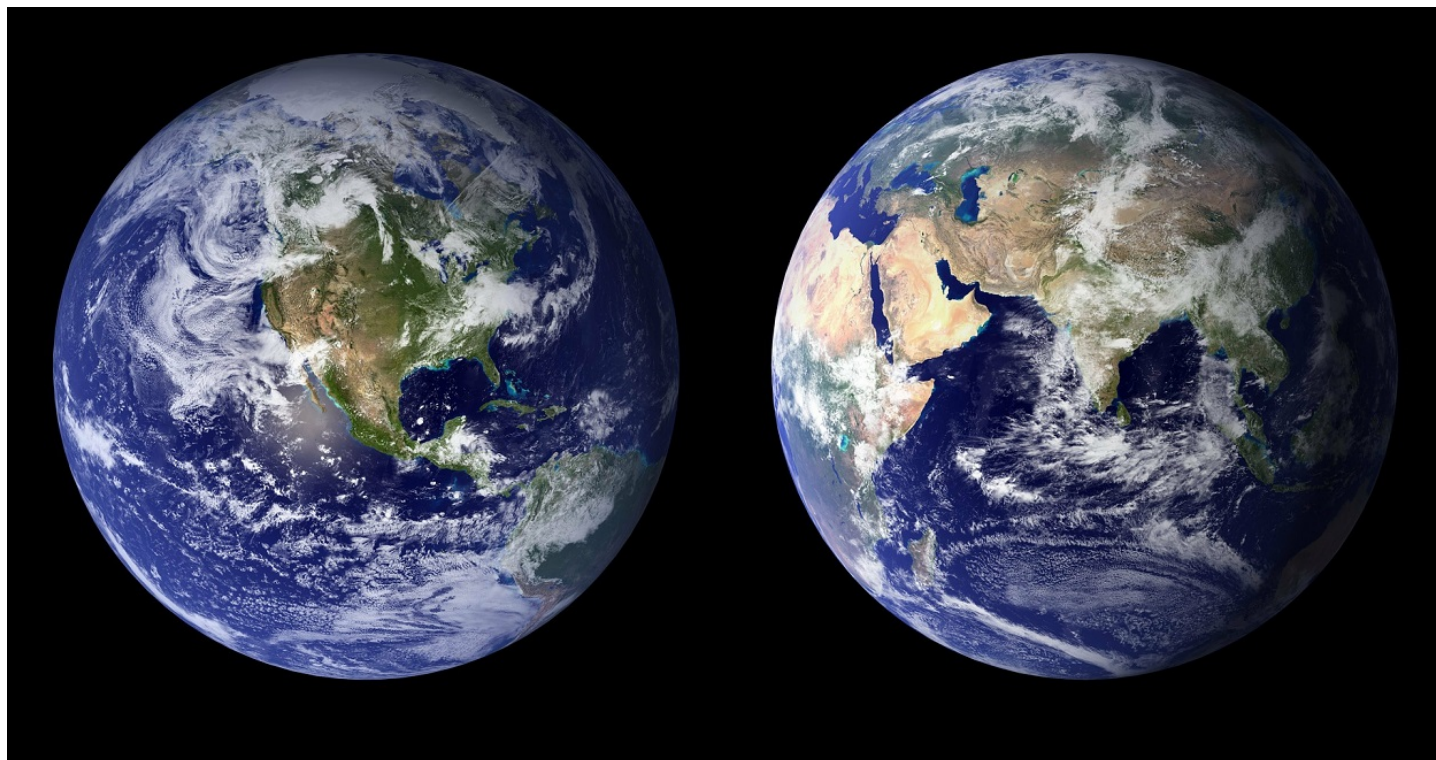


La circulation atmosphérique : son organisation

Auteur :

MOREAU René, Professeur émérite à Grenoble-INP, Laboratoire SIMaP (Science et Ingénierie des Matériaux et des Procédés), membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies

12-05-2021



L'unique moteur de la circulation atmosphérique est l'ensoleillement. Sous les contraintes de la gravité, de la poussée d'Archimède et de la force de Coriolis due à la rotation de la Terre, les différences de température entre l'équateur et les pôles font circuler l'air tout autour de la Terre. Cette circulation globale, impulsée dans les régions tropicales par les vents alizés, possède une organisation bien définie dans chaque hémisphère : trois cellules convectives dans les plans méridiens sont associées à cinq vents le long de parallèles, le faible courant d'est équatorial au voisinage de l'équateur et à faible altitude, et dans chaque hémisphère deux vents d'ouest, le jet stream polaire à une latitude proche de $\pm 60^\circ$ et en haute altitude, ainsi que le jet stream subtropical, moins rapide que le premier, situé à des latitudes voisines de $\pm 30^\circ$ et, lui aussi, en haute altitude. Dans leur mouvement, ces masses d'air transportent et redistribuent à la fois la chaleur transmise par les continents et l'humidité produite par évaporation au-dessus des océans.

1. Première boucle : la cellule de Hadley

Dans la région équatoriale surchauffée, qui voit le soleil au zénith, l'air est allégé. Comme la fumée sortant d'une cheminée, il s'élève vers le haut de la troposphère (lire [L'atmosphère et l'enveloppe gazeuse de la Terre](#)) et aspire l'air situé tout autour, engendrant ainsi des vents qui convergent vers l'équateur. Puisque la Terre tourne, ceux-ci sont affectés par la **force de Coriolis**. **L'air venant du nord est dévié vers la droite, celui venant du sud l'est vers la gauche.** La convergence de ces vents alizés au voisinage du sol ou de la mer engendre **le courant d'est équatorial**, vent régulier, relativement lent puisque sa vitesse est de l'ordre de 20 km/h, mais qui fut suffisant pour pousser les goélettes de Christophe Colomb d'Espagne vers les Antilles et le Venezuela. On trouvera plus de précisions sur cette **zone de convergence intertropicale** dans l'article « [Le rôle clé des alizés](#) » sur ce site.

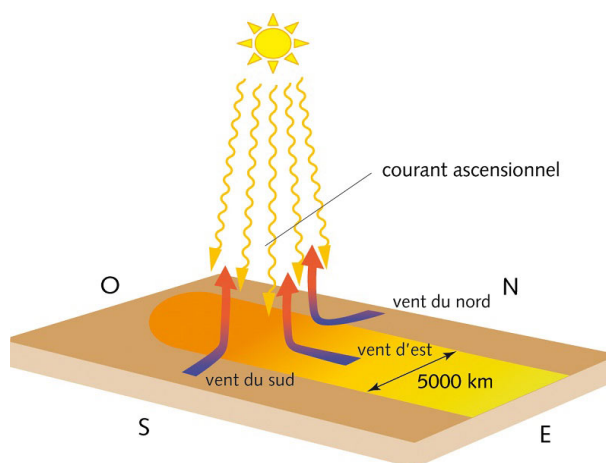


Figure 1. Illustration du mécanisme moteur des vents alizés, de leur convergence vers l'équateur pendant les équinoxes, et du mouvement ascensionnel résultant de l'allègement de l'air surchauffé, d'après L'air et l'eau, 2013. [© EDP sciences].

Le courant ascendant des alizés se charge en humidité lors de son passage au-dessus des océans. En traversant la troposphère il se refroidit et s'assèche par condensation dans les hautes altitudes, et il perd progressivement sa quantité de mouvement dans sa lutte contre la gravité. Il ne parvient pas à dépasser l'altitude de la tropopause, très stable, qui recouvre la troposphère comme une sorte de couvercle. Toutefois, à cette altitude voisine de 15 km, son débit massique doit être conservé. Ceci n'est possible que si **sa trajectoire se courbe** sous la forme de **vents horizontaux orientés, soit vers le nord, soit vers le sud**, selon l'hémisphère, formant ainsi deux cellules convectives. George Hadley[1] (1685-1768), avocat anglais et météorologiste amateur des années 1730, bien antérieures aux travaux de Gustave-Gaspard Coriolis[2] (1792-1843), pensait que ces courants de haute altitude étaient dirigés suivant les méridiens et atteignaient les régions polaires où, refroidis et alourdis, ils pouvaient plonger vers le sol. Il n'en est rien puisque, bien avant qu'ils atteignent les pôles, la force de Coriolis a pour effet de tordre leurs trajectoires, systématiquement vers l'est, dans l'hémisphère nord comme dans l'hémisphère sud. Cette pseudo-force (lire [Le rôle clé des alizés](#)) les empêche donc de demeurer dans les plans méridiens et impose une circulation atmosphérique en hélice au sein de cette cellule de Hadley illustrée sur la figure 2. L'influence de **la rotation terrestre limite ainsi l'étendue de cette cellule de Hadley à des latitudes voisines de $\pm 30^\circ$** .

2. Plus au nord : cellules polaires et cellules de Ferrel

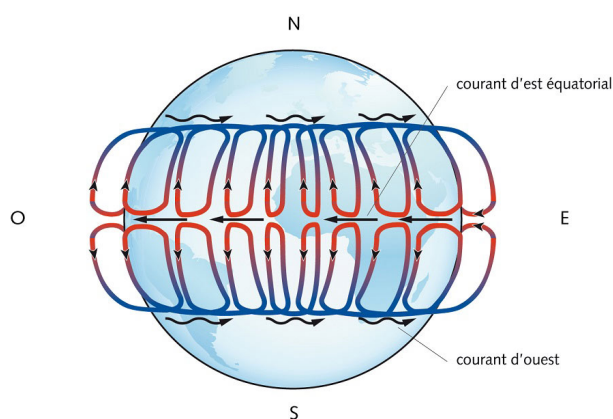


Figure 2. Allure en hélice des courants de la cellule de Hadley dans sa position lors des équinoxes. Le courant d'est équatorial, lent et stable, est représenté par des flèches droites. Le courant d'ouest ou jet stream, plus rapide et plus instable, est représenté par des flèches ondulées. D'après L'air et l'eau, 2013. [© EDP sciences]

Au-dessus des régions polaires une circulation convective analogue à celle de la cellule de Hadley est imposée par la chute de l'air froid, asséché et alourdi, qui arrive du haut de la troposphère, plus mince à cette latitude (environ 7 à 8 km) qu'aux latitudes tropicales (environ 15 km). Or la force de Coriolis est maximale près des pôles, où l'axe de la rotation terrestre est dirigé suivant la verticale ; en conséquence, son influence est nettement plus grande que sur la cellule de Hadley, située au voisinage de l'équateur où l'axe de rotation est au contraire presque horizontal. C'est pourquoi la circulation convective au voisinage des pôles demeure contenue entre ceux-ci et les parallèles à $\pm 60^\circ$. Ainsi, entre les latitudes extrêmes de la **cellule de Hadley** ($\pm 30^\circ$) et de

la **cellule polaire** ($\pm 60^\circ$), entraînée par leurs mouvements respectifs, apparaît la cellule (figure 2) découverte par le météorologue américain William Ferrel[3] (1817-1891), qui porte désormais son nom.

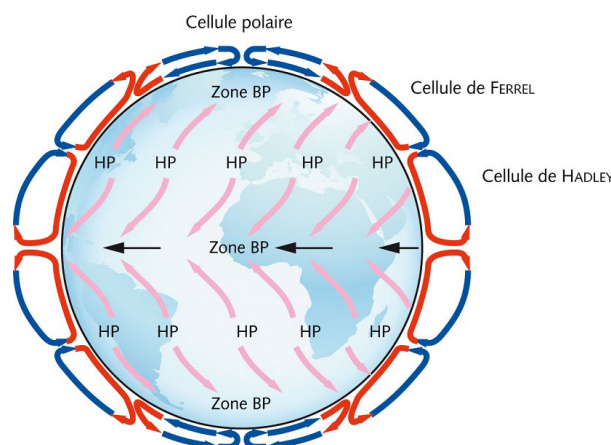


Figure 3. Représentation synthétique de la circulation atmosphérique globale. BP : région en dépression relative, HP : région en haute pression où s'installe le jet stream subtropical. Les flèches roses incurvées montrent la déviation des vents due à la force de Coriolis, vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud. La troposphère n'est pas représentée à l'échelle du globe terrestre, de façon à montrer son épaisseur, presque deux fois plus grande vers l'équateur (12 à 15 km) que près des pôles (7 à 8 km) sous l'effet de la convection. D'après René Moreau, *L'air et l'eau*, EDP Sciences, collection Grenoble sciences, 2013

Dans chaque hémisphère, on peut noter la présence de **deux régions où l'air plonge vers le sol** après s'être refroidi et asséché en altitude. Près des pôles, cette arrivée d'air sec conduit à la formation des **déserts arctiques et antarctiques**. Entre les cellules de Hadley et de Ferrel, elle engendre la **ceinture de déserts** situés **entre les tropiques et les régions tempérées** : déserts du sud des Etats-Unis, Sahara et désert de Gobi dans l'hémisphère nord, désert d'Australie et hauts plateaux andins dans l'hémisphère sud. Au contraire, les **zones d'ascendance**, situées **près de l'équateur** pour l'une et **entre la cellule polaire et la cellule de Ferrel** pour l'autre, sont soumises à **de fortes précipitations**. En effet, dans l'air chargé d'humidité au niveau de la mer, qui se refroidit et se détend en s'élevant vers les hautes altitudes où la température et la pression diminuent fortement, la condensation forme des gouttes assez lourdes pour amener des pluies. Celles-ci sont fréquentes et abondantes, ce qui explique à la fois la végétation luxuriante autour de l'équateur et la fertilité des sols aux latitudes tempérées.

3. Les jet streams

Dans chaque hémisphère, au-dessous de la tropopause (à une altitude de l'ordre de 8 à 10 km au-dessus du niveau moyen des mers), de part et d'autre des cellules de Ferrel et à haute altitude, apparaissent des vents d'ouest qui circulent tout autour de la planète en oscillant au voisinage d'une latitude moyenne. Fraction importante de la circulation atmosphérique, ces vents sont souvent désignés par leur nom anglais, les **jet streams** (Figure 4) ; ils sont plus rarement appelés rubans thermiques ou courants jets. Ils ont été découverts par le météorologue japonais Oishi Wasaburo en 1920 et décrits dans un rapport[4] écrit en esperanto de façon à ce qu'il soit accessible à un grand nombre de lecteurs.

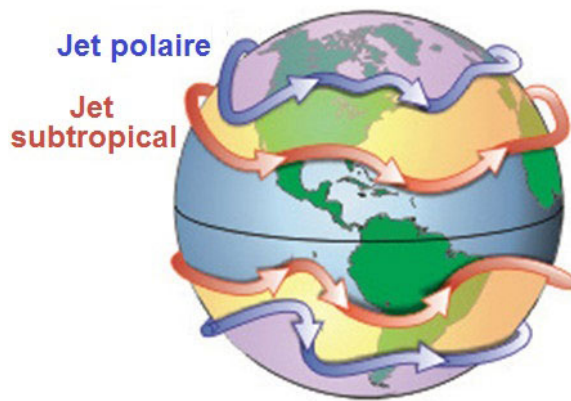


Figure 4. Allure typique des jet streams autour du globe terrestre, circulant d'ouest en est, de part et d'autre de la cellule de Ferrel (couleur jaune). Le jet stream polaire (couleur bleue) est le plus rapide (sa vitesse peut atteindre 300 km/h) et le plus instable des deux. Il est évité par les vols transatlantiques vers l'ouest, au contraire recherché par les vols vers l'est. La vitesse du jet stream subropical ne dépasse jamais 100km/h. [© NOAA]

Ces vents d'ouest en est sont engendrés par la force de Coriolis dans les régions étroites marquées à la fois par une forte différence de température entre l'air chaud situé au sud et l'air froid situé au nord, et par de fortes différences de pression. Le mécanisme qui les crée est expliqué dans l'article plus détaillé [Les jet streams](#). Contrairement au lent courant d'est équatorial, le *jet stream* polaire est **très rapide**, (vitesse entre 100 et 300 km/h), et **très turbulent**, tandis que le *jet stream* des régions tropicales est encore lent (50 à 100 km/h) et plus stable. Cette différence de vitesse entre eux et par rapport au lent vent d'est équatorial provient d'un mécanisme subtil, lié à la force de Coriolis, qui ne fut compris qu'à la fin du 19^e siècle par William Ferrel. La grande vitesse du *jet stream* polaire et la vitesse plus modérée du *jet stream* tropical résultent de la conservation d'une grandeur mécanique tout à fait spécifique aux milieux tournants, le **moment cinétique** ([Les lois de la dynamique](#)). Cette grandeur mécanique est le produit de la vitesse absolue du vent, somme de la vitesse de la Terre et de la vitesse relative du vent par rapport à la Terre, par la distance à l'axe de la Terre. En bref, à cette altitude où le frottement sur le sol est négligeable, une grande vitesse du vent est nécessaire aux latitudes les plus élevées pour compenser la plus faible distance à l'axe de rotation de la Terre.

Cet article ne présente que l'état moyen de la circulation atmosphérique, en insistant sur son organisation remarquable. En raison des déplacements saisonniers du zénith, de l'alternance entre les océans sources d'évaporation intense et les continents plus secs, mais aussi de ses propres instabilités, cette circulation atmosphérique est par ailleurs soumise à de **fortes fluctuations** dont la description fait l'objet d'articles complémentaires : [Le rôle clé des alizés](#) et [Les jet streams](#).

4. Messages à retenir

L'air des régions tropicales, chauffé par le rayonnement solaire et ainsi allégé, s'élève vers le haut de la troposphère. Ce faisant, il aspire les vents alizés qui convergent du nord et du sud vers l'équateur en créant le **courant d'est équatorial** et une ascendance qui entraîne la formation de la **cellule de Hadley** dans les plans méridiens.

La rotation de la Terre, modélisée par la force de Coriolis, limite l'étendue de la cellule de Hadley à des latitudes voisines de 30° au nord comme au sud. Dans la partie la plus haute de la troposphère l'air est détourné vers l'est, ce qui engendre dans chaque hémisphère un **jet stream subropical** relativement lent (moins de 100 km/h).

Entre les pôles et les parallèles à $\pm 60^\circ$, les différences de température imposent une circulation analogue à celle de la cellule de Hadley, ce qui entraîne la formation des **cellules polaires** où les vents au voisinage du sol sont orientés du pôle vers les régions tempérées.

Entre chaque cellule de Hadley et la cellule polaire du même hémisphère, apparaît par continuité la **cellule de Ferrel** où le vent dominant au niveau du sol est orienté en direction du pôle le plus proche.

Au sommet de la troposphère la transition entre cellule de Ferrel et cellule polaire est nettement plus influencée par la force de

Coriolis que celle entre cellule de Hadley et cellule de Ferrel. Ceci donne lieu aux **jets streams polaires**, orientés eux aussi vers l'est. Ces jet streams sont rapides (de 100 à 300 km/h) et leurs trajectoires sont assez instables.

Références et notes

- [1] George Hadley, *Concerning the cause of the general trade winds*, Philosophical Transactions of the Royal Society, 1735, vol. 39, p. 58-62
- [2] Gaspard Gustave Coriolis, *Théorie mathématique des effets du jeu de billard*, Carilian-Goeury, 1835
- [3] William Ferrel, *An essay on the winds and the currents of the oceans*, Nashville Journal of Medicine and Surgery, n°4, 1856
- [4] Oishi Wasaburo, *Raporto de la Aerologia Observatorio de Tateno*, Aerological Observatory Report 1, Central Meteorological Observatory, Japan, 1926 (*en Esperanto*)

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur** : MOREAU René (2021), La circulation atmosphérique : son organisation, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=219>

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
