

Rotation terrestre et mouvements atmosphériques

par Olivier Talagrand
Directeur de Recherche Émérite au CNRS
Laboratoire de Météorologie Dynamique

George Hadley (1685–1768) est peu connu, du moins en France – moins connu en tout cas que son contemporain, compatriote et quasi-homonyme Edmond Halley (1656-1742), lui aussi scientifique, célèbre pour avoir annoncé le retour de la comète qui porte depuis son nom. Le principal titre de notoriété de George Hadley est d'avoir montré clairement, dans une note brève publiée en 1735 dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society*, intitulée *Concerning the Cause of the General Trade-Winds*, l'influence de la rotation terrestre sur les mouvements de l'atmosphère.



Figure 1 : Logo de l'Office britannique de recherches climatiques. Il n'existe pas de portrait connu de George Hadley. Cet organisme de recherches, créé en 1990, a été nommé en hommage à Hadley.

Les alizés (*trade winds* en anglais), ces vents qui soufflent régulièrement des Tropiques vers l'Équateur, depuis le nord-est dans l'Hémisphère Nord et le sud-est dans l'Hémisphère Sud, avaient été découverts, au moins pour ce qui est de l'Europe, par les navigateurs du XV^e siècle. Ceux-ci avaient pleinement pris conscience de leur importance pour la navigation, et tant que dura la marine à voile, les bateaux traversaient l'Atlantique d'est en ouest dans les latitudes tropicales, et d'ouest en est dans les latitudes plus élevées, où le vent est généralement dirigé vers l'est. C'est ce qui permit le célèbre 'commerce triangulaire' de l'époque de la traite des Noirs.

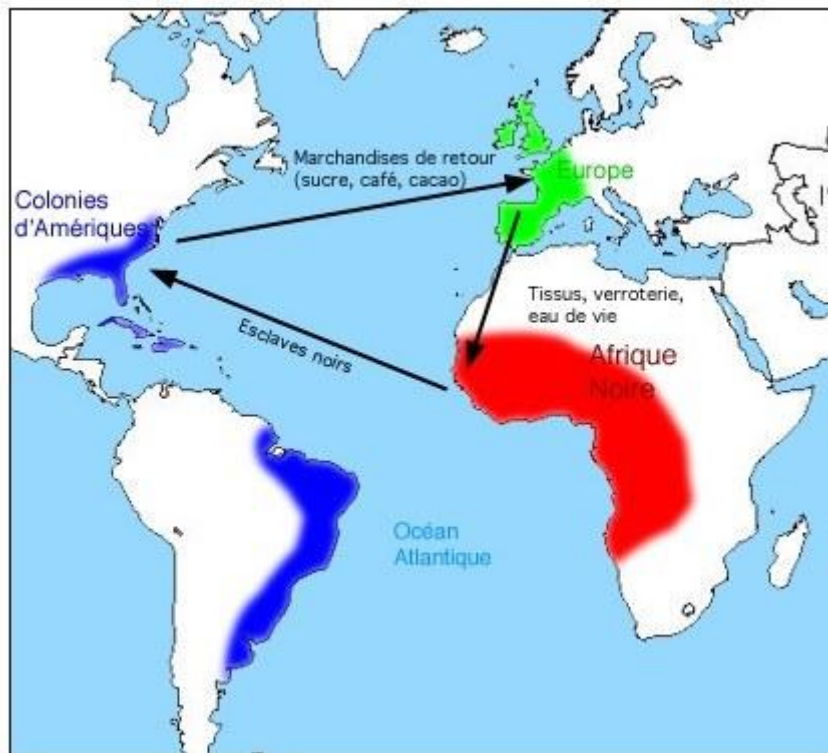


Figure 2 : Un des circuits du commerce triangulaire. De la zone rouge vers les zones bleues (Brésil, Caraïbes, Floride), la navigation se fait d'est en ouest, sous les tropiques donc poussée par les alizés, que ce soit dans l'Hémisphère Nord ou l'Hémisphère Sud (le Brésil est presque entièrement situé entre Equateur et Tropique du Capricorne, et la Floride entre Equateur et Tropique du Cancer). Des zones bleues vers la zone verte, la navigation se fait d'ouest en est, poussée par les vents dominants d'ouest au nord du Tropique du Cancer (image Académie de Rouen).

Pour ce qui est de la cause de ces alizés, Edmond Halley avait quant à lui proposé en 1686 une explication fondée sur le fait que les mouvements des couches inférieures de l'atmosphère doivent converger vers le point subsolaire¹. Cette explication fut apparemment acceptée pendant longtemps.

George Hadley commence quant à lui sa note aux *Philosophical Transactions* par ces mots :

I Think the Causes of the General Trade-Winds have not been fully explained by any of those who have wrote on that Subject.

et ajoute

for want of more particularly and distinctly considering the Share the diurnal Motion of the Earth has in the Production of them.

Si la formulation peut nous paraître ambiguë, la suite de la note est claire : ce que Hadley entend par « diurnal Motion », c'est la rotation planétaire, et non les variations diurnes de l'insolation. Il écrit ensuite que, si certains (il ne dit pas

1. Le point subsolaire est à tout instant le point le plus proche du Soleil. L'idée, là, est que l'air y est plus chaud, donc plus léger : il monte, chassé par un air plus lourd, moins chaud.

lesquels – mais il a sans doute en tête Halley cinquante ans plus tôt) ont mentionné la rotation comme une cause possible des alizés, ils n’ont pas donné d’explication claire quant à la façon dont elle peut agir en l’espèce.

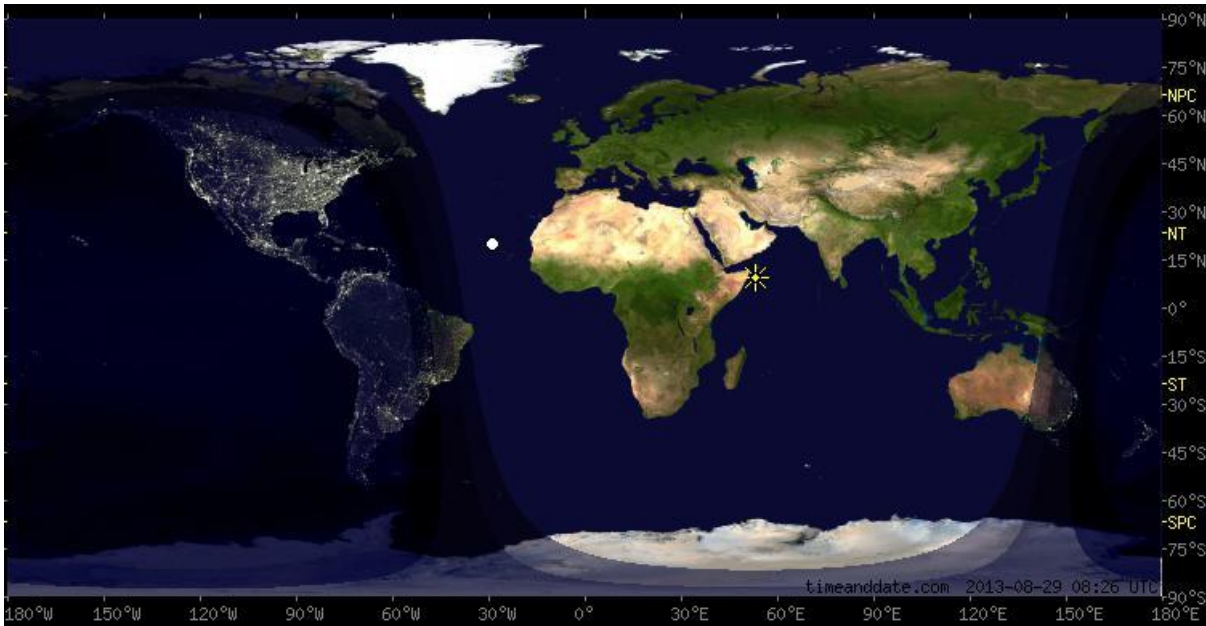


Figure 3 : Indication du point subsolaire sur une carte jour-nuit. Il figure au large de la corne nord-est de l’Afrique (fin août donc été dans l’hémisphère Nord \Rightarrow le point subsolaire est au nord de l’Equateur) (9h30 GMT \Rightarrow donc le zénith heure solaire est bien à l’est du méridien de Greenwich) (image site TimeandDate)

@@@@@@@

[...] this rarefaction will have no other Effect than to cause the Air to rush in from all parts into the Parts where 'tis most rarefied, especially from the North and South, where the Air is coolest, and not more from the East than the West, as is commonly supposed.

Il ajoute que, si l’on suivait cette seule hypothèse, on aurait le matin, dans l’hémisphère Nord, un vent de nord-ouest², et l’après-midi un vent de nord-est, ce qui ne correspond pas à l’observation. Après avoir ainsi réfuté l’explication de Halley (la convergence vers le point subsolaire ne peut pas en soi produire un mouvement général vers l’ouest), l’auteur en vient à son argument de base : si pour quelque raison, l’action du Soleil pouvait induire dans l’atmosphère un mouvement général vers l’ouest, celui-ci se propagerait par frottement à la Terre solide, et ralentirait la rotation. Ce n’est pas ce que l’on observe, et la cause des alizés est à chercher dans un processus qui ne produit pas un mouvement général de l’atmosphère vers l’ouest :

2. À un endroit subtropical donné, le matin, le point subsolaire est situé à l’est (cf. p.ex. fig 3).

it seems necessary to show how [...] the Trade-Winds may be caused, without the Production of any real general Motion of the Air westwards.

Un tel processus est à chercher dans les mouvements latitudinaux de l'air atmosphérique : l'air se déplaçant, dans l'un ou l'autre Hémisphère, vers le point subsolaire équatorial, atteindra des latitudes où la vitesse linéaire de rotation terrestre augmente, et acquerra donc par rapport à la Terre une vitesse rétrograde, opposée à la rotation terrestre³:

From which it follows, that the Air, as it moves from the Tropicks towards the Equator, having a less Velocity than the Parts of the Earth it arrives at, will have a relative Motion contrary to that of the diurnal Motion of the Earth in those Parts, which being combined with the motion towards the Equator, a N.E. Wind will be produced on this Side of the Equator, and a S.E. on the other.

Hadley donne une évaluation numérique en considérant une particule fluide partie du Tropique avec une vitesse relative nulle par rapport à la Terre en rotation. Il trouve que, lorsque la particule atteindra l'équateur :

its Velocity will be at the rate of 2083 Miles in the Space of one Revolution of the Earth.

Cette valeur, qui correspond à $38,5 \text{ ms}^{-1}$, est largement sous-estimée du point de vue de la Mécanique pure. Hadley suppose en effet que la particule conserve sa vitesse linéaire absolue, alors que la Mécanique de Newton nous dit que c'est son moment cinétique par rapport à l'axe de rotation terrestre qui est conservé en l'absence de frottement. La conservation du moment cinétique conduit à une vitesse équatoriale de $74,1 \text{ ms}^{-1}$. Quoiqu'il en soit, Hadley considère la valeur qu'il trouve comme largement supérieure aux valeurs observées (ce qui est pour l'essentiel exact), et estime, à juste titre, que le frottement de l'air sur la surface des océans et des continents doit ralentir les alizés.

@@@@@@@

Qu'advient-il de l'air qui s'est élevé au-dessus de l'Équateur ? Hadley écrit qu'il doit s'éloigner de celui-ci, puis

Being got up at a Distance from the Surface of the Earth, it will soon lose great Part of its Heat, and thereby acquire Density and Gravity sufficient to make it approach its Surface again.

3. La Terre tournant sur elle-même de l'ouest vers l'est, une particule allant moins vite que la Terre (vitesse rétrograde) apparaîtra pour un observateur terrestre comme allant de l'est vers l'ouest : d'où le fait que ces vents alizés sont dominants d'est.

Si cette subsidence⁴ se produit à une latitude assez élevée, le même argument de conservation de la « vitesse linéaire absolue »⁵ montre que l'air aura acquis une vitesse prograde par rapport à la Terre, c'est-à-dire vent d'ouest (« and thereby become a westerly wind »), en accord avec ce que l'on observe dans les latitudes moyennes.

And thus the Air will continue to circulate, and gain and lose Velocity by Turns from the surface of the Earth or the Sea, as it approaches to, or recedes from the Equator.

Et l'auteur de conclure que, sans l'assistance de la rotation terrestre, *Navigation, especially Easterly and Westerly, would be very tedious [NB: fastidieuse], and to make the whole Circuit of the Earth perhaps impracticable.*

On sait l'importance qu'avait la navigation pour les intérêts scientifiques de l'époque, et en Albion encore plus qu'ailleurs.

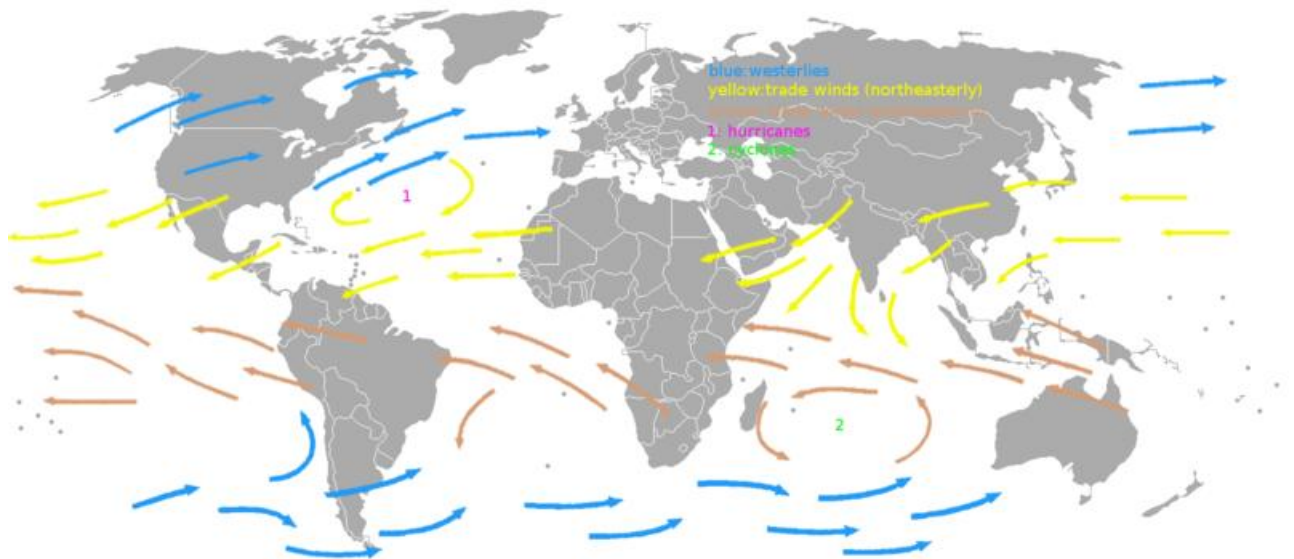


Figure 4 : Vents dominants à la surface terrestre. Vents d'ouest, en bleu, au nord du tropique du Cancer et au sud du tropique du Capricorne. Vents d'est (alizés), sous les tropiques : de nord-est dans l'hémisphère nord, de sud-est dans l'hémisphère sud (image WikkiCommons auteur KPDV).

@@@@@@

Qu'en est-il aujourd'hui, quand satellites et autres instruments nous apportent chaque jour des dizaines de millions d'observations, et que les ordinateurs simulent l'écoulement atmosphérique à une résolution qui peut

4. La subsidence est le lent affaissement vertical d'une masse d'air sur une vaste région terrestre.

5. Cet air chaud qui a quitté les zones équatoriales subsolaires, animé d'une vitesse analogue à celle de la vitesse de rotation équatoriale de la Terre, revient, plus froid, animé de la même vitesse, en des latitudes où la vitesse linéaire de rotation terrestre est moins forte : il se produit le phénomène inverse de ce qui se produit dans les latitudes tropicales.

atteindre localement quelques kilomètres ? La description donnée par Hadley reste qualitativement exacte. Dans les basses latitudes, on observe dans chaque hémisphère une cellule, dite précisément cellule de Hadley, constituée d'une ascendance à la latitude sub-solaire et d'une subsidence aux alentours de 30 degrés de latitude. La position et l'intensité de ces cellules sont très fortement modulées par le cycle saisonnier, la cellule de l'hémisphère hivernal étant beaucoup plus intense que la cellule de l'autre hémisphère (figure 5, encadré ci-dessous). Hadley était d'ailleurs parfaitement conscient des variations saisonnières, et aussi spatiales, des phénomènes qu'il étudiait. Il mentionne seulement qu'étudier ces variations

would draw this Paper into greater Length than I propose.

Il n'est pas faux de dire, à la suite de Hadley, qu'après presque 300 ans et des milliards d'observations, et en dépit de nos satellites et de nos ordinateurs, le problème n'est pas, loin de là, pleinement résolu.

Visualisation graphique des cellules de Hadley

Les figures ci-dessous donnent les lignes de courant de la circulation méridienne de l'atmosphère, sur trois périodes différentes (en haut : moyenne sur l'année ; au milieu : moyenne sur les mois de décembre-janvier-février ; en bas : moyenne sur les mois de juin-juillet-août).

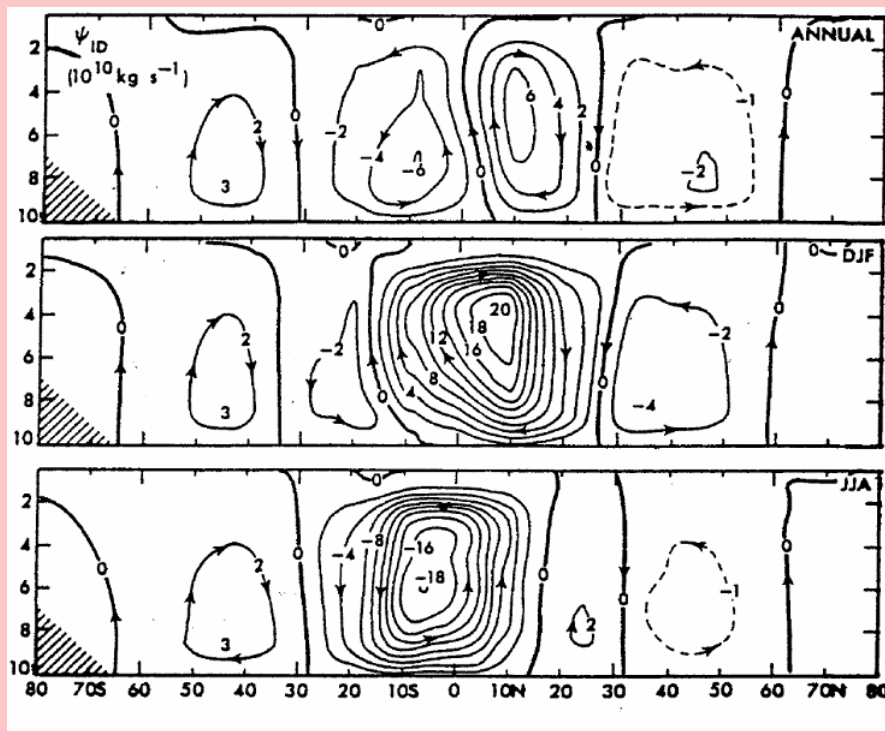


Figure 5 : Lignes de courant de la circulation méridienne de l'atmosphère terrestre, moyennée en longitude. Coordonnée

horizontale : latitude (degrés). Coordonnée verticale : pression (unité : 10^4 Pa) (l'unité portée sur les isolignes est une mesure de la fonction de courant, ce qui signifie que la vitesse du mouvement est inversement proportionnelle à l'écart entre ces isolignes) (image extraite de Peixoto and Oort, The Physics of Climate, Springer-Verlag, 1992)

Dans la partie supérieure, la moyenne est faite sur l'année. On voit dans chacun des deux hémisphères une cellule de Hadley qui s'étend jusque vers 30° de latitude (la cellule boréale, à droite du centre, est en moyenne plus intense que la cellule australe, à gauche du centre). Aux latitudes plus élevées est présente, dans chaque hémisphère, une cellule d'intensité plus faible, dite cellule de Ferrel. Elle est de sens inverse à la cellule de Hadley, et transporte donc de l'énergie vers l'Équateur (ce transport est plus que compensé par les ondes longitudinales).

Dans les parties médiane (décembre-janvier-février) et inférieure (juin-juillet-août), on observe la forte modulation saisonnière de la circulation de Hadley. On observe aussi un déplacement latitudinal avec la déclinaison du Soleil : dans le graphique médian (été austral), l'isoligne 0 se déplace vers le Sud, puisque pendant cette période le Soleil est plus zénithal dans la zone entre l'Équateur et le Tropique Sud (c'est l'inverse dans le graphique inférieur). Ceci s'accompagne d'un renforcement très marqué de la cellule correspondant à l'hémisphère hivernal, associé à un affaiblissement aussi marqué de la cellule estivale.

@@@@@@

Hadley ne pouvait probablement pas comprendre ce qui se produit aux latitudes plus élevées. Les cellules de Hadley présentent en première approximation une symétrie longitudinale. À mesure que la latitude augmente, la circulation symétrique devient instable sous l'effet de la croissance de la rotation (dont c'est la composante suivant la verticale locale qui importe) et du gradient latitudinal de température. Un nouveau type de circulation apparaît, constituée d'ondes longitudinales associées à un écoulement d'ensemble dirigé d'ouest en est (figure 6). Non seulement Hadley ne pouvait guère anticiper cette circulation, mais le fait est qu'elle reste aujourd'hui encore incomplètement comprise. Il n'existe pas de théorie explicative claire quant à la latitude où les cellules de Hadley deviennent instables. C'est largement la simulation numérique qui permet d'étudier de nombreux aspects de la circulation atmosphérique.

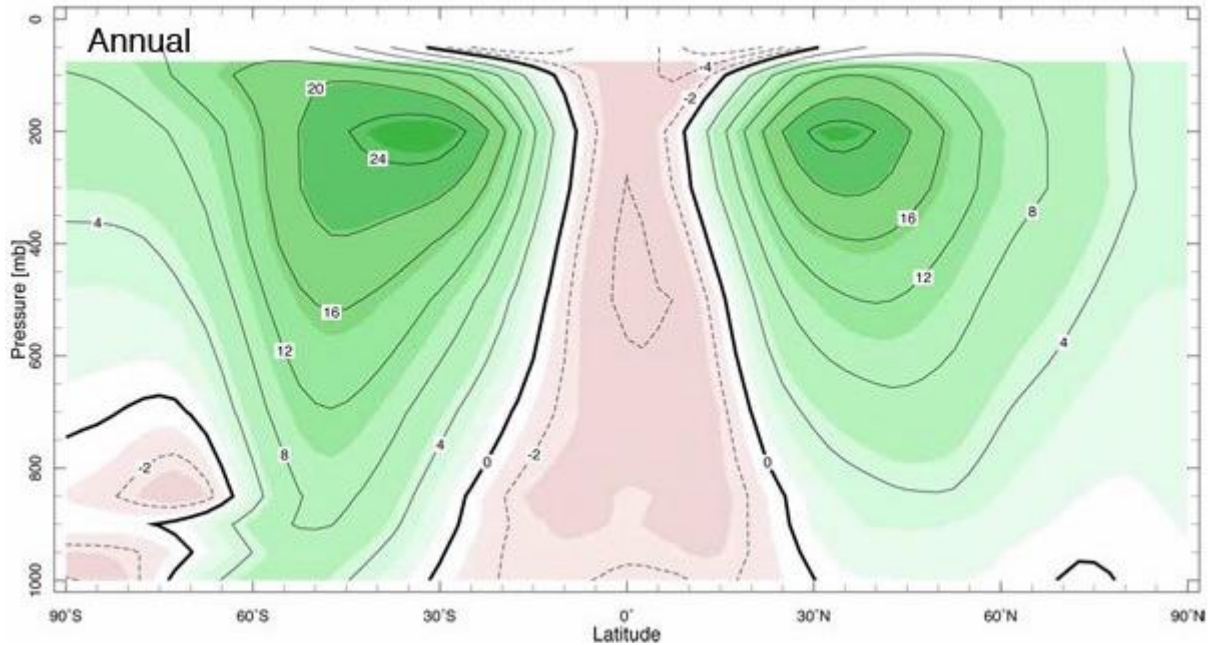


Figure 6 : Vent zonal prograde (compté positivement vers l'est) moyenné en longitude sur une année ($m.s^{-1}$). Le vent est négatif aux basses latitudes (en rose entre les deux isolignes 0, qui apparaissent à -30 et 30° de latitude), puisqu'il est dirigé d'est en ouest (cf. figure 5). Il est positif aux latitudes plus élevées (en vert), comme l'exige l'équilibre des échanges de moment cinétique entre l'atmosphère et le milieu inférieur. À cette structure moyenne annuelle s'ajoutent des variations saisonnières très marquées, avec un renforcement intense du vent dans l'hémisphère d'hiver (figure extraite de J. Marshall & R. A. Plumb *Atmosphere, Ocean and Climate Dynamics*, International Geophysics, Academic Press).

George Hadley a été le premier à dire clairement que c'est la rotation terrestre (et non le mouvement du point subsolaire à la surface de la planète, comme le pensaient Halley et d'autres) qui domine les mouvements de l'atmosphère. Il était évident pour lui, puisqu'il n'éprouve même pas le besoin de le dire explicitement, que ces mouvements devaient être analysés dans un référentiel lié aux étoiles : on suggère parfois que c'est l'expérience du pendule de Foucault, effectuée plus d'un siècle plus tard, qui a « prouvé la rotation de la Terre » – les alizés expliqués par Hadley en constituaient une preuve antérieure...

Il semble que le travail de Hadley ait été longtemps ignoré. Du point de vue de la mécanique de Newton, les effets étudiés par Hadley sont décrits par l'accélération de Coriolis (incidemment, imposer une condition de conservation de la vitesse linéaire, comme le fait Hadley, revient à sous-estimer d'un facteur 2 l'accélération de Coriolis⁶, qui est fondée sur la conservation du moment cinétique). On dit parfois que Coriolis n'a jamais su que sa « force » jouait un

6. Voir le calcul de Hadley mentionné ci-avant, où il se trompe en effet (par rapport au calcul théorique fondé sur la constance du moment cinétique) d'un facteur proche de 2.

rôle fondamental dans la circulation de l'atmosphère et des océans. Si c'est vrai, cela signifie qu'il ne connaissait pas le travail de Hadley.

@@@@@@

Bien que Hadley soit parfaitement conscient de l'importance des forces de frottement à la surface de l'océan et des continents, et qu'il fasse allusion à la nécessité d'un équilibre à long terme entre ces forces, il ne se livre pas sur ce point à une analyse précise (c'eût probablement été possible, après ce que Newton avait déjà dit). Un élément essentiel dans une telle analyse est le bilan de moment cinétique par rapport à l'axe de rotation terrestre. S'il doit exister un régime de circulation atmosphérique permanent, différent d'une rotation d'ensemble avec la Terre solide, les mouvements relatifs de l'atmosphère seront progrades dans les latitudes où le mouvement linéaire de la Terre est plus lent, c'est-à-dire dans les latitudes plus élevées, et rétrogrades dans les latitudes plus basses. C'est bien ce qu'observe Hadley. Mais la conservation globale du moment cinétique requiert alors que la circulation atmosphérique assure un transport net de moment cinétique prograde depuis les basses latitudes vers les latitudes plus élevées. C'est bien ce que montre une analyse détaillée des observations. On voit par exemple sur la figure 6 que le vent zonal est en moyenne prograde à haute altitude entre 10 et 20 degrés de latitude, et rétrograde à basse altitude⁷. Cela signifie que les branches supérieures des cellules de Hadley ont un moment cinétique plus élevé que les branches inférieures, ce qui assure un transport net de moment cinétique depuis l'Équateur.

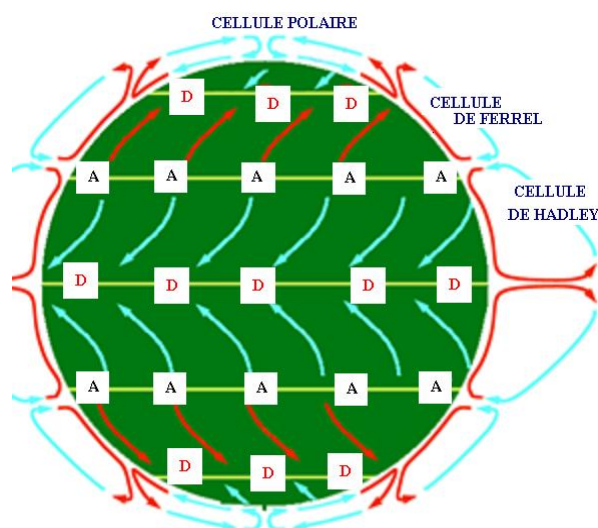


Figure 7 : Représentation schématique et vulgarisée des cellules de circulation atmosphérique. Entre les tropiques, les cellules de Hadley avec les alizés d'est en

7. Voir par exemples isolignes 10-15 (vent prograde) à 20° de latitude à 400 hPa (en altitude).

ouest. Entre les tropiques et les cercles polaires, les cellules de Ferrel avec vents d'ouest dominants.

Il faut ajouter que le moment cinétique de l'atmosphère n'est d'ailleurs pas exactement conservé. Il existe bien des échanges globaux de moment cinétique entre l'atmosphère et la Terre solide, qui ont pour conséquence de légères fluctuations de la rotation terrestre, principalement à l'échelle saisonnière. De façon plus générale, le bilan de moment cinétique est un élément essentiel de la circulation des atmosphères des différentes planètes (voir encadré ci-après).

Et sur les autres planètes ?

Toutes les planètes du Système Solaire (à l'exception de Mercure), et au moins au moins un satellite, Titan (satellite de Saturne), possèdent une atmosphère massive.

Les planètes telluriques, ou terrestres (Vénus, la Terre, Mars, auxquelles il faut ajouter ici Titan), relativement petites, denses, possèdent une enveloppe fluide mince, et reçoivent leur énergie du Soleil principalement. Elles sont toutes animées d'un mouvement de rotation plus ou moins rapide, et sont toutes le siège d'une circulation de type Hadley. Mars possède une circulation d'ensemble similaire à celle de l'atmosphère terrestre, avec cellules de Hadley dans les basses latitudes et ondes dans les latitudes moyennes. Du fait cependant d'une inertie thermique bien moindre, les effets saisonniers, et aussi diurnes, sont beaucoup plus intenses que sur la Terre.

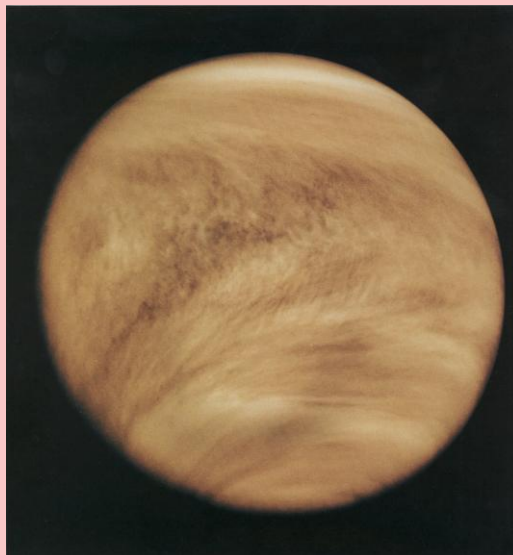


Figure 8 : Nuage de l'atmosphère de Vénus révélés par ultraviolet.
La forme en V caractéristique des nuages est dû aux vents plus rapides soufflant à l'équateur (image NASA/NSSDC, 1979).

Vénus, et à un moindre titre, Titan, qui tournent relativement lentement (leurs durées propres de rotation sont respectivement de 243 et 16 jours terrestres), présentent un curieux phénomène de super-rotation atmosphérique : l'atmosphère supérieure est animée par rapport au corps solide d'un mouvement d'ensemble dirigé dans le sens de la rotation du corps solide, avec maximum de moment cinétique à l'Équateur (dans le cas de Vénus, l'atmosphère tourne à l'Équateur 60 fois plus rapidement que la planète solide, cf. figure 8). Cette situation pose à l'évidence un problème quant à son maintien à long terme contre les effets de la viscosité, qui tend à annuler toute rotation différentielle. L'explication actuelle fait appel à une grande extension latitudinale des cellules de Hadley, due à la faible rotation de base, et à un transport latitudinal de moment cinétique vers l'Équateur, effectué par des ondes dans l'atmosphère supérieure. Le maintien de cette circulation nécessite cependant, comme sur la Terre, une vitesse rétrograde par rapport au corps solide dans les basses couches équatoriales. Une telle vitesse n'a pas à ce jour été observée directement.

Les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune), beaucoup plus grosses et moins denses, sont principalement fluides et possèdent une source d'énergie interne significative. On ne connaît que la partie visible supérieure de la circulation de leurs atmosphères. Cette partie visible, constituée de courants zonaux intenses, exclut à son niveau des transports latitudinaux significatifs d'énergie ou de moment cinétique. Il existe par ailleurs des signes indirects de circulation profonde (comme sur Saturne une super-rotation équatoriale, inexplicable sans échange avec les couches inférieures). Une circulation profonde, à des niveaux que n'atteint pas le rayonnement solaire, peut résulter de mouvements convectifs dus à la source d'énergie interne.

La circulation atmosphérique des planètes géantes est encore beaucoup moins bien comprise que celle des planètes telluriques. Et une théorie générale des mouvements d'une atmosphère, permettant d'identifier et d'anticiper les différents types de circulations possibles, reste à faire, même dans la situation relativement simple et mieux connue des planètes qui, comme les planètes telluriques du Système Solaire, possèdent une atmosphère mince chauffée par une source extérieure.

@@@@@@

Finalement, ce que Hadley n'aurait par contre pas pu anticiper, à son époque où la notion de conservation de l'énergie apparaissait à peine, est le bilan énergétique des mouvements qu'il décrivait. La circulation atmosphérique est fondamentalement la réponse de l'atmosphère au gradient latitudinal d'insolation, et son effet net est de transporter de l'énergie depuis les basses

latitudes vers les latitudes plus élevées. Dans chacune des deux cellules de Hadley des basses latitudes, le transport d'énergie résulte de ce que la branche supérieure des cellules, dirigée vers les pôles, a une énergie potentielle de gravitation supérieure à celle de la branche de retour inférieure. Aux latitudes moyennes, ce sont les différentes branches des ondes longitudinales qui assurent le transport d'énergie. Comme pour le bilan de moment cinétique, le bilan d'énergie est un élément essentiel de la circulation des atmosphères planétaires.



(septembre 2013)