



Questions / Réponses
2027-03

La déviation de la circulation atmosphérique par effet Coriolis

Question

La Terre tournant dans le même sens au Nord qu'au Sud, je ne vois pas pourquoi la force de Coriolis a des effets opposés selon l'hémisphère...et du coup, pourquoi dans l'hémisphère Nord, les alizés ne vont-ils pas vers l'Est puisque la force de Coriolis détourne les vents vers la droite ?

Réponse

Les masses d'air « bougent », pour des raisons essentiellement thermiques : échauffées (légères...), elles « montent » ; et refroidies (plus denses), elles « descendent », créant des zones de hautes et de basses pressions. Ce différentiel de pression induit leur écoulement entre deux points : plus précisément, elles s'écouleront des hautes pressions vers les basses pressions, c'est un fait, mais leur trajectoire ne sera qu'exceptionnellement rectiligne, perpendiculaire aux isobares ce que signalent souvent les cartes météo.

Il n'y a donc pas qu'une « force de pression » qui s'exerce sur ces masses. Il faut prendre en compte notamment que la Terre tourne autour d'elle-même, sur son axe de rotation, d'Ouest en Est, et que cela crée d'autres « forces » ou « effets » sur les masses d'air. Parmi ces « forces » ou « effets », la force « dite » de Coriolis (du nom de son découvreur, Gaspard de Coriolis).

La force « dite » de Coriolis n'est pas, cependant, une « vraie » force physique, c'est-à-dire une force liée à une interaction physique entre deux particules, mais juste une « astuce de calcul » liée au fait que l'on étudie un mouvement dans un référentiel tournant : lorsqu'on étudie un mouvement, il faut définir des positions et des vitesses. Pour cela, il faut savoir par rapport à quoi on définit ces grandeurs. Par exemple, une personne qui se promène dans le sens de la marche dans un train lancé à 150 km/h a une vitesse de 5 km/h par rapport au train, mais de 155 km/h par rapport au sol. Compte-tenu du mouvement de la Terre autour du Soleil, sa vitesse sera aussi 30 km/s par rapport au Soleil, etc. ... Toute étude de mouvement commence donc par le choix du référentiel et donc d'un repère, c'est-à-dire un point origine et 3 axes permettant de repérer tout point. Pour le problème du train, un référentiel possible est le train, avec comme point d'origine le wagon-bar..., et comme axes celui du train, plus un axe horizontal perpendiculaire au train, et la verticale. Il faut bien insister sur le fait que le choix du référentiel ne changera pas les conclusions physiques (par exemple, si un calcul dans un premier référentiel conduit à prédire une collision entre deux corps demain matin, on obtiendra la même prévision dans tout autre référentiel).

Cela dit, pour faire simple et revenir à votre question..., si la Terre tourne sur elle-même, cet effet de Coriolis dû au mouvement rotationnel de la Terre sera différent selon qu'on est dans l'hémisphère nord (boréal) ou dans l'hémisphère sud « austral ».

→ Puisqu'il s'agit de rotation, il faut d'abord la caractériser.

Pour cela, on indique l'axe de rotation, ensuite le sens, et enfin la valeur de la vitesse angulaire, par exemple « 500 tours par minute ». Tout ceci peut se résumer en un vecteur, le vecteur rotation. Il s'agit d'un vecteur qui contient toute l'information nécessaire pour caractériser la rotation d'une particule. Sa direction indique l'axe de rotation, son sens est tel que la rotation se fait dans le sens contraire des aiguilles d'une montre quand il pointe vers l'observateur. Sa norme, enfin, est proportionnelle à la vitesse angulaire, mesurée en rad/s ($6,28 \text{ rad/s} = \text{un tour/s}$). Par exemple, la rotation d'une roue de voiture tournant à 10 tours par seconde

sera décrite par un vecteur rotation horizontal, dirigé vers la gauche de la marche de la voiture, et de norme 62,8.

- Puisqu'on parle de rotation et de vecteur, il convient de rappeler ce qu'est un produit vectoriel : si on dispose de deux vecteurs (A et B), on peut en construire un 3^e (V) qui sera leur produit vectoriel, et qui est perpendiculaire à la fois à A et à B. Les physiciens ont un « truc » pour déterminer la direction de ce vecteur : la « règle de la main droite ». Le pouce représente A, l'index... B et A x B est donnée par la direction du majeur. Vous allez vous tordre un peu les doigts en essayant, mais que voulez-vous : c'est un truc de physicien... et dans tous les cas, vous ne devez utiliser que la main droite !

La Terre tournant sur elle-même dévie tout corps effectuant une chute libre : il ne peut chuter à la verticale de là où il a été lâché. Une bille lâchée du sommet de la Tour Eiffel (300 m) arrivera au sol à 8 cm plus à l'Est de la verticale. L'effet de la rotation de la Terre dans un sens anti-horaire (Ouest vers Est) induit donc une déviation de la bille vers l'Est de quelques centimètres, à une latitude de 48°N (Paris) et pour une hauteur de 300 m. Peut-on expliquer cette déviation (physiquement parlant) ?

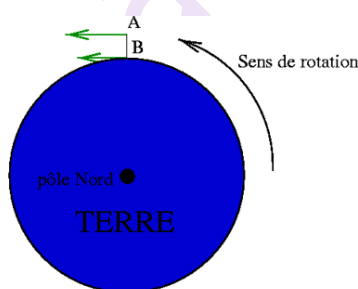
- La vitesse de la bille est pratiquement verticale, l'effet (« la force ») de Coriolis ($F_c = 2m\mathbf{V}_{R'} \times \boldsymbol{\Omega}$, avec $\mathbf{V}_{R'}$ vitesse de la bille dans le référentiel R' en rotation par rapport à un référentiel R et $\boldsymbol{\Omega}$ le vecteur rotation de la Terre autour de son axe) est donc dirigée vers l'Est (faire le produit vectoriel par la méthode de la main droite : vitesse de la bille selon le pouce, axe Nord-Sud de la Terre selon l'index, « force de Coriolis » selon le majeur, bien orientée vers l'Est). C'est cette force qui dévie légèrement V vers l'Est.

Pour un calcul plus quantitatif, on est confronté à une difficulté mathématique : pour calculer V, on a besoin de connaître l'accélération, donc les forces, mais celle de Coriolis dépend de V... Pour s'en sortir, on dit, en première approximation, que l'effet de Coriolis est très petit devant la gravitation (environ 100.000 fois plus petit !) et le mouvement est purement vertical : $V = gt$. Puis de là, on calcule la force de Coriolis résultante et une nouvelle expression de la vitesse corrigée. Et ainsi de suite : nouvelle vitesse, nouvelle force...

En pratique, il suffit de calculer la première correction. Cela donne : $F_c = 2m\mathbf{V}_{R'} \times \boldsymbol{\Omega}$ d'où une première expression de la force de Coriolis $F_c = 2gt \times \boldsymbol{\Omega}$, puis en intégrant, une vitesse vers l'Est qui vaut $V_{\text{est}} = gt^2 \times \Omega$; en intégrant de nouveau, on trouve la déviation $\Delta x = (1/3)t^3 g \times \Omega$ où t est le temps de chute $t = \sqrt{2h/g}$.

Soit, au final, la déviation en fonction de la hauteur : $\Delta x = 2 \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{h^3}{g}} \Omega \cos(\lambda)$ où λ est la latitude du lieu.

Ce qui donne bien 8 cm pour la Tour Eiffel.... Avec une déviation vers l'Est. A vous de refaire la même chose à partir du sommet de l'Opéra de Sydney et de calculer la distance de déviation de la bille... vers l'ouest !



Sur le schéma, la Terre est vue de dessus, au-dessus du pôle Nord. D'où son sens de rotation anti-horaire. La bille, lâchée du point A, qui a une vitesse d'entraînement supérieure à celle du point B, atterrira à gauche et donc à l'Est de B.

Nous sommes donc dans l'hémisphère Nord.

- ⇒ toute particule se déplaçant horizontalement à vitesse constante V, par exemple un nuage qui se déplace d'une zone de haute pression vers une zone de basses pressions, l'effet de Coriolis sera perpendiculaire à V et orientée vers la droite vue du nuage (il suffit de construire le produit vectoriel par la règle de la main droite pour s'en convaincre) !

- ⇒ Au total..., l'effet de Coriolis agit sur la circulation atmosphérique en déviant la trajectoire des particules d'air. Dans l'hémisphère nord, elles quittent les hautes pressions (anticyclone) en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, et rentrent dans les dépressions dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Inversement pour l'hémisphère sud.

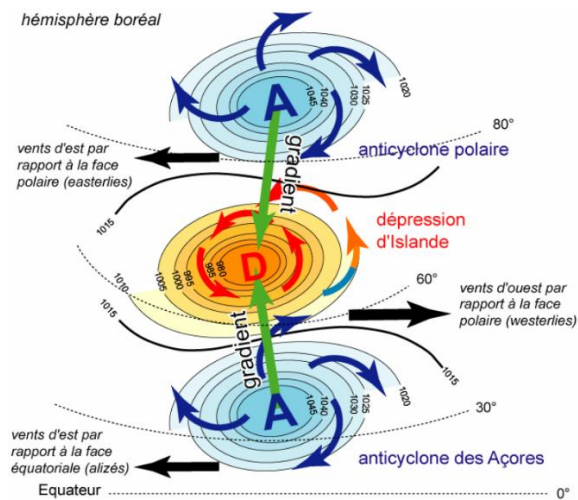
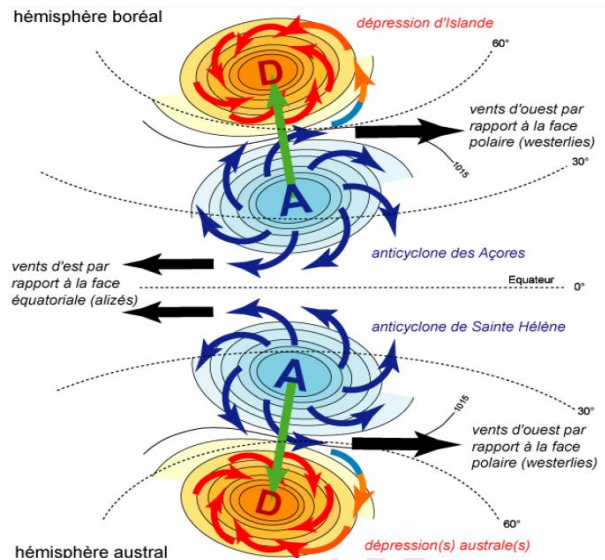


Schéma général de la circulation atmosphérique dans l'hémisphère boréal



Résultantes de la circulation entre les anticyclones subtropicaux et les dépressions subpolaires

Retenez surtout...

- 1/ le déplacement des nuages selon les différentiels de pression atmosphérique.
- 2/ l'effet inverse, selon les hémisphères, de Coriolis sur les trajectoires des nuages.
- 3/ le fait qu'il y a plusieurs cellules convectives dans la basse atmosphère ce qui complique la circulation atmosphérique (mais le principe reste le même).
- 4/ que l'effet de Coriolis n'est pas cité en tant que tel dans les capacités exigibles du programme de Bcpst ! mais peut se retrouver dans un sujet de type Ens..., et entre dans les connaissances supposées acquises à l'Agrégation.