

## Vent-Force de Coriolis

### Questions :

- 1) Expliquer le sens de rotation des vents autour d'une dépression ou d'un anticyclone.
- 2) Expliquer pourquoi l'air chaud monte.
- 3) Expliquer simplement le sens d'enroulement des masses nuageuses dans l'hémisphère nord. Autour de quelles zones ces masses s'enroulent-elles ?
- 4) Expliquer l'allure en spirale de ces enroulements.
- 5) Définir le qualificatif « géostrophique ».
- 6) Expliquer pourquoi, autour d'un centre dépressionnaire, les isobares sont des courbes fermées sur elles-mêmes.
- 7) Expliquer brièvement pourquoi la force de Coriolis n'est habituellement pas impliquée dans l'écoulement des fluides à l'échelle humaine (lavabo, wc, etc.).

### Document A – (site <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/force-de-coriolis.xml>)

Dans toute la suite,  $\vec{\Omega}$  sera le vecteur rotation de la Terre autour de son axe, orienté du pôle Sud vers le pôle Nord, valant  $2\pi / (24 \times 3600) = 7.27 \cdot 10^{-5} \text{ rad} / \text{s}$  (1 tour  $-2\pi$  rad- par jour  $-24\text{h}$  de 3600s).

### **DEVIATION VERS LA DROITE (HEMISPHERE NORD)**

Le phénomène de déviation vers la droite (vers la gauche dans l'hémisphère Sud, mais on se placera au Nord dans toute la suite) est sans doute la cause des effets les plus connus dus à la force de Coriolis. Il est notamment à l'origine du sens d'enroulement des nuages autour des anticyclones et dépressions, comme on va le voir plus loin. L'idée de base est simple : pour un objet lancé horizontalement à vitesse constante  $\vec{V}$ , par exemple un obus, la force de Coriolis est perpendiculaire à  $\vec{V}$  et orientée vers la droite vue du l'obus (il suffit de construire le produit vectoriel par la règle de la main droite pour s'en convaincre).

Cet effet est loin d'être négligeable dans certains cas. Car l'accélération résultant de la force de Coriolis vaut  $\vec{F}_c = 2m\vec{V} \wedge \vec{\Omega}$ , soit, en intégrant deux fois, une correction au mouvement rectiligne de l'ordre de  $V\Omega t^2$ , où  $t$  est le temps de vol. Si  $d$  est la longueur de la trajectoire,  $t = d/V$  et on obtient une déviation vers la droite de l'ordre  $\Omega d^2 / V$ . Pour des valeurs de balistique classiques ( $V = 1000 \text{ km/h}$ ,  $d = 10 \text{ km}$ ), on trouve quelques dizaines de mètres. Ainsi, pendant la bataille des îles Falkland (hémisphère Sud) durant la Première Guerre Mondiale, les canons anglais, réglés pour corriger la force de Coriolis à l'Hémisphère Nord, ont tiré des obus une centaine de mètres à gauche de leur cible ! Sans rentrer dans les détails, le phénomène de déviation vers la droite est aussi à l'origine du fonctionnement du pendule de Foucault, et prend part à la formation des méandres des fleuves. C'est encore lui qui est

responsable du sens d'enroulement des nuages autour des dépressions (voir ci-après), et lui toujours qui a créé le mythe tenace du tourbillon dans le lavabo (voir plus loin).

## MOUVEMENTS DES MASSES D'AIR

### FORCES EN PRESENCE

Avant de commencer l'étude du mouvement des masses d'air, il faut faire le bilan des forces en présence dans le référentiel terrestre pour une quantité d'air de masse  $dm$  et de volume  $dV$  : ces forces sont, en première approximation, au nombre de deux. Ce sont la force de Coriolis et la force de pression.

La force de Coriolis, nous l'avons vu, vaut  $\vec{F}_C = 2m\vec{v}_R \wedge \vec{\Omega}$  elle courbe la trajectoire vers la droite à l'Hémisphère Nord. Quelle est la forme mathématique des forces de pression ? Même sans savoir exactement ce qu'est la pression, tout le monde a l'intuition qu'une haute pression « pousse » tandis qu'une basse pression « aspire ». Les forces de pression sont donc dirigées des hautes vers les basses pressions. Pour bien comprendre ceci, on peut faire l'analogie suivante : la pression en un point peut être comparée à l'altitude d'un point, et la force de pression serait alors l'analogie de la pesanteur. De même qu'une bille sur un plan incliné subit une force qui la fait descendre selon la ligne de plus grande pente vers les basses altitudes, une masse d'air, de volume  $dV$ , descend vers les faibles pressions selon la ligne de plus grande « baisse de pression ». Ceci s'écrit mathématiquement sous la forme  $\overline{df} = -dV \cdot \overline{grad} p$ , où  $\overline{grad} p$  représente la direction où varie la pression (en quelque sorte une « ligne de pente de pression »).

### ANTICYCLONES ET DEPRESSIONS

Comment sont réparties les valeurs de la pression à la surface de la Terre ? La pression de l'air dépend, entre autres, de sa température. L'air chaud monte, créant ainsi une dépression au niveau du sol. A l'inverse, l'air froid descend et engendre une surpression au niveau du sol. Il existe donc des points où la pression est minimale, c'est-à-dire que, tout autour de ce point, la pression est supérieure (un peu comme un trou dans notre analogie avec l'altitude). Un tel point est appelé dépression. Au contraire, un point où la pression est maximale (une « colline » de pression) est appelé anticyclone.

### MOUVEMENT DE L'AIR

#### DE L'ANTICYCLONE VERS LA DEPRESSION

D'après notre analogie pour comprendre la force de pression, l'air, s'il était soumis à cette seule force, « descendrait » en ligne droite de l'anticyclone vers la dépression. Mais dès que l'air est mis en mouvement, il s'y applique une force de Coriolis dirigée vers la droite, ce qui dévie la trajectoire des masses d'air qui ont tendance à contourner la dépression dans le sens contraire des aiguilles d'une montre au lieu de s'y engouffrer directement.

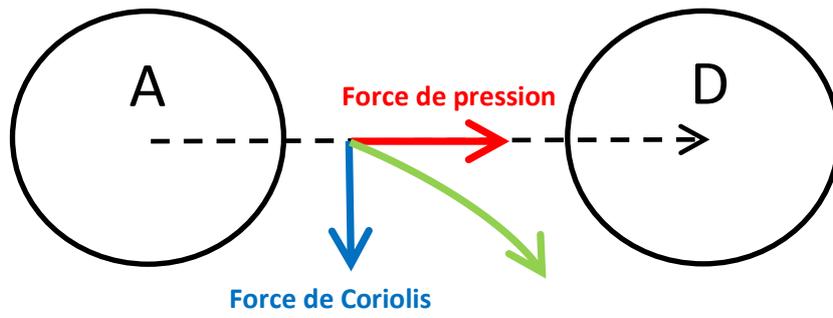


Figure 1 : En pointillés, la trajectoire sans force de Coriolis. La véritable trajectoire est en vert

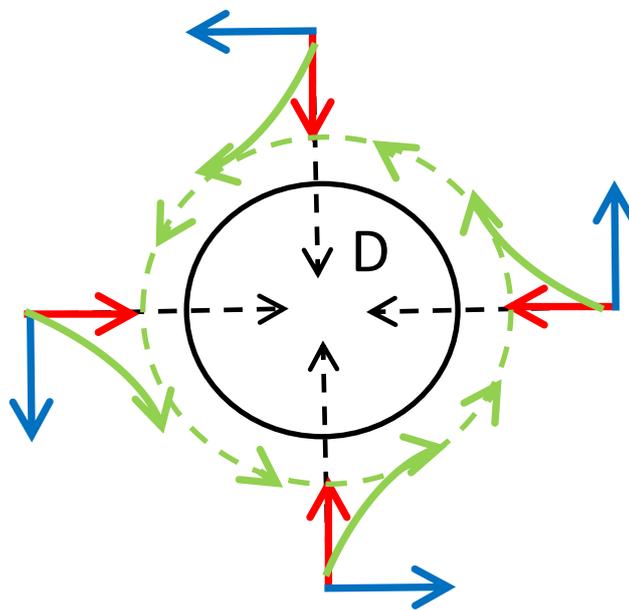


Figure 2 : Enroulement autour d'une dépression



Figure 3 : Dépression au-dessus de l'Islande

## VENT GEOSTROPHIQUE

Lorsque la force de Coriolis équilibre la force de pression, le vent n'est soumis à aucune force (au total) et a un mouvement rectiligne uniforme. Un tel vent est dit géostrophique ; on montre alors qu'il suit les lignes de pression constante, appelées isobares.

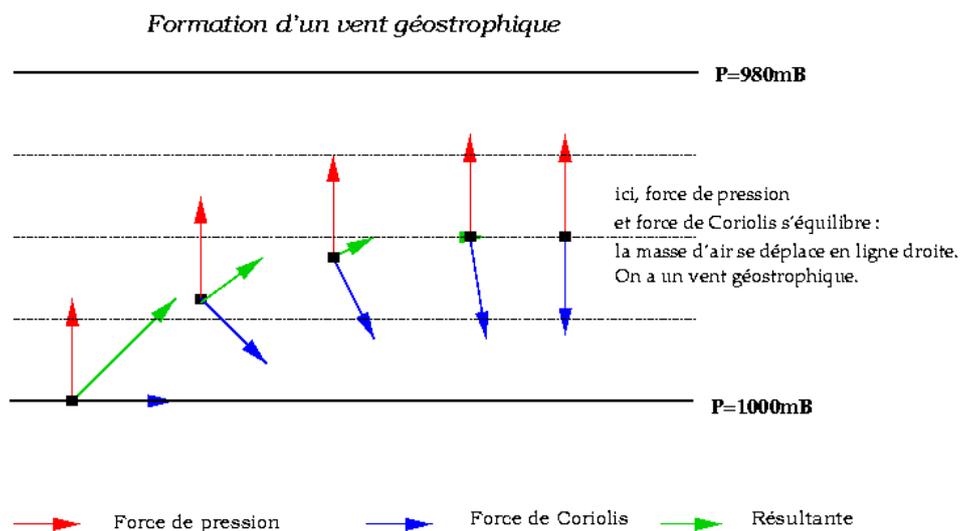


Figure 4 : Vent géostrophique

Mais en réalité, les isobares sont rarement rectilignes, mais plutôt des courbes fermées autour de la dépression. Si de l'air suit une isobare, il s'ajoute alors une force centrifuge (ou « force d'inertie d'entraînement ») due à la rotation de l'air autour du centre. Le bilan des forces montre alors que les masses d'air prennent une trajectoire circulaire dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (dans l'hémisphère Nord) autour du centre dépressionnaire.

## ROLE DES FORCES DE FRICTIONS

Pour obtenir les trajectoires circulaires le long des isobares, nous avons supposé que les masses d'air sont soumises uniquement à la force de Coriolis, à la force centrifuge et aux forces de pression. Mais il existe une quatrième force que nous devons prendre en compte pour une description plus complète : il s'agit des forces de frottement ou de friction. En effet l'air est un fluide légèrement visqueux, ce qui se traduit par une force s'opposant au mouvement au voisinage de la zone de friction avec la terre, donc à basse altitude. Ainsi, à une hauteur inférieure à 1 ou 2 kilomètres, les vents sont ralentis par le contact avec le sol. Cette force est d'autant plus grande que le sol est irrégulier : elle est petite au-dessus des océans mais importante au-dessus des forêts, par exemple.



Figure 5 : Enroulement des nuages

Sans les forces de friction, le vent aurait tendance à tourner en cercle autour du centre de dépression, comme on l'a vu plus haut. Mais, en prenant en compte les frottements à la surface de la Terre, les vents de surface sont ralentis et la force de Coriolis, proportionnelle à la vitesse, diminue. La force de pression devient dominante, et ainsi l'air a un mouvement en spirale vers le centre de la dépression.

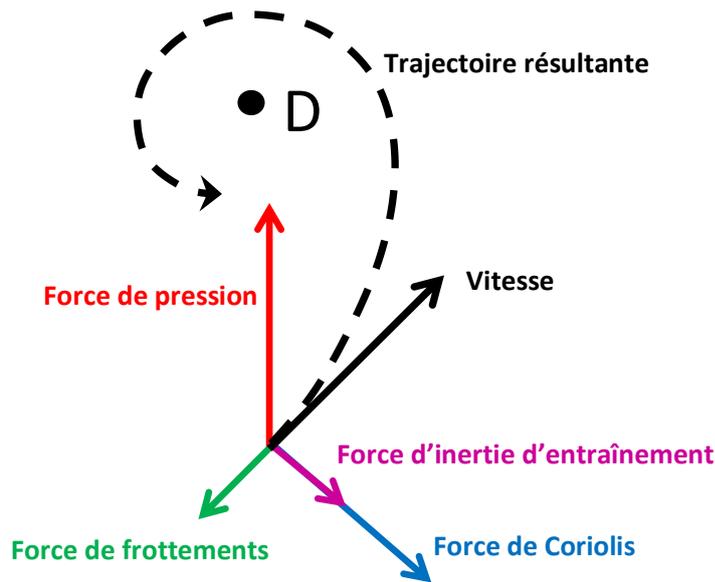


Figure 6 : Impact des forces de friction

De même, les vents s'éloignent du centre pour un anticyclone. Les frottements entraînent donc une convergence des vents vers le centre pour une dépression (respectivement une divergence du centre pour un anticyclone) pour les vents de surface. Comme les masses d'air ne peuvent pas être aspirées par le centre (il faut bien qu'on retrouve cette masse quelque part), elles s'échappent en montant, provoquant des mouvements d'air à l'origine des vents et pluies que l'on retrouve dans la dépression.

## LE MYTHE DU LAVABO

Nous avons tous entendu un jour cette histoire fabuleuse concernant les lavabos qui se vident. D'après cette histoire, le tourbillon qui se forme au-dessus du siphon tournerait dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud, dans le sens contraire dans l'hémisphère Nord. Certains chanceux qui ont pu changer d'hémisphère prétendent même avoir pu observer cet effet... L'explication viendrait de la force de Coriolis !

Hémisphère Nord

Hémisphère Sud

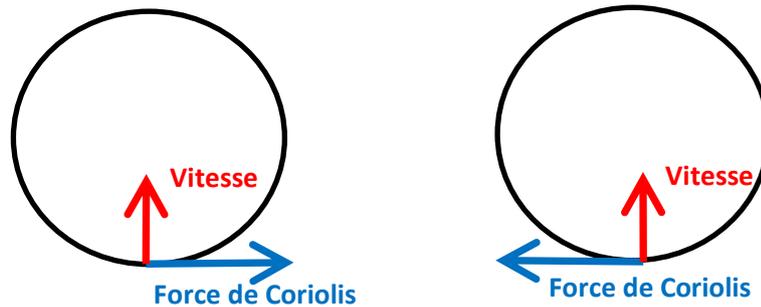


Figure 7 : Base physique du mythe du lavabo

En fait on retrouverait le même mécanisme que pour les cyclones. Mais il y a une différence majeure entre les deux phénomènes : leur échelle !

Pour comprendre ce qui se passe dans un lavabo, nous allons essayer de calculer un ordre de grandeur de la force de Coriolis, et la comparer aux autres forces en présence. L'écoulement dans un lavabo a une vitesse faible, de l'ordre de 0,1 m/s. La force de Coriolis par unité de masse a alors, sous nos latitudes, une intensité de l'ordre de  $F_c = 10^{-5} \text{N.kg}^{-1}$ . Nous allons à présent comparer cette force à celle introduite par une différence de pente entre deux parois du lavabo, comme sur la figure ci-dessous.

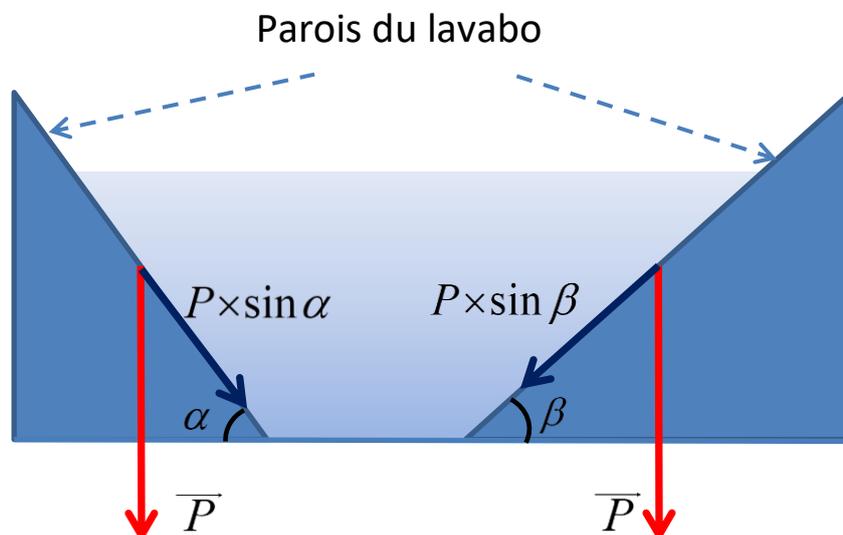


Figure 8 : Force liée à la forme du lavabo

On considère deux particules de même masse de part et d'autre du siphon. La force qui pousse la particule vers le fond (l'équivalent de la force de pression pour le cyclone) est la projection de son poids sur la paroi. On obtient :

$$P_1 = P \times \sin \alpha$$

$$P_1 = P \times \sin \beta$$

Pour avoir  $P_2 - P_1$  de l'ordre de la force de Coriolis, il suffit d'avoir  $P_2 - P_1 = 10^{-5}$ , soit  $\alpha - \beta = 10^{-6} \text{ rad}$ , ce qui correspond pour une baignoire d'un mètre à un écart de  $1 \mu\text{m}$  !!! Autant dire que la moindre irrégularité de surface entraîne une force supérieure à la force de Coriolis, autorisant ainsi le tourbillon à tourner dans le sens qu'il veut (ce sens dépendant essentiellement de ce que l'eau n'est jamais totalement au repos, mais a un sens de rotation privilégié qui sera amplifié par le tourbillon).

Par contre, si on considère un très grand récipient, avec de l'eau initialement bien au repos, alors on peut mettre en évidence l'existence d'un sens de rotation privilégié suivant l'hémisphère. Des physiciens ont réalisés des expériences le démontrant. On pourra par exemple consulter :

- Arsher Shapiro, *Bath tub vortex*, Nature, 196, 1080-1081, 1962, [doi:10.1038/1961080b0](https://doi.org/10.1038/1961080b0), pour l'hémisphère Nord.
- Lloyd Trefeten et al., *The bath tube vortex in the southern hemisphere*, Nature, 207, 1084-1085, 1965, (doi:10.1038/2071084a0) pour l'hémisphère Sud.