

Peut-on « SENTIR »

la force de CORIOLIS ?

Anders Persson a tout dit sur Coriolis et sa force, en un article de 17 pages publié dans la revue « La Météorologie » (8^e série - N°23 - septembre 1998).

Voir : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/47057/meteo_1998_23_36.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Il explique que sa nature physique est souvent mal comprise, ce qui peut gêner la compréhension de phénomènes atmosphériques, bien que son expression mathématique se calcule immédiatement par une méthode « purement cinématique ». Elle affecte tout mouvement par rapport à un référentiel R (par exemple la Terre solide), lui-même en rotation par rapport à un référentiel F galiléen (fixe). Pour un mobile se déplaçant à une vitesse relative V_r par rapport à R, sa vitesse absolue V_a (par rapport au référentiel fixe F) est la somme de sa vitesse relative V_r et de sa vitesse d'entraînement (due à la rotation de R par rapport à F).

$$V_a = V_r + V_e$$

Cette loi « de composition des vitesses » est triviale à établir, elle dit simplement que la vitesse d'un point en mouvement est la dérivée par rapport au temps de la position de ce point. De plus elle est très intuitive : « Les vitesses (vectorielles) s'ajoutent pour donner la vitesse totale (absolue) ». Il n'en va pas de même pour les accélérations que l'on obtient pourtant en dérivant une fois de plus l'équation précédente par rapport au temps : alors qu'une « intuition trompeuse » inviterait à dire « $A_a = A_r + A_e$ », le calcul de dérivée (très simple) montre que l'on obtient :

$$A_a = A_r + A_c + A_e \quad (1)$$

L'accélération absolue A_a (vectorielle) est aussi la force subie par le mobile rapportée à sa masse (loi fondamentale de la dynamique, parfois appelée « 2^e loi de Newton»). Elle est donc la somme de l'accélération d'entraînement et de l'accélération relative, mais aussi d'un 3^e terme A_c appelée **accélération de Coriolis** : ce terme A_c est la **force de Coriolis divisée par la masse du mobile**. Pour le mathématicien (ou le « cinématicien »), l'apparition de ce terme résulte trivialement de la dérivation de la loi de composi-

tion des vitesses : **terme croisé** entre mouvement d'entraînement (mouvement de rotation, de vecteur ω) et mouvement relatif (vecteur vitesse V_r).

Pour un solide en rotation uniforme comme la Terre (vecteur rotation ω constant au cours du temps), l'accélération de Coriolis s'écrit :

$$A_c = 2 \omega \wedge V_r$$

(\wedge : produit vectoriel – voir l'article de Persson, page 2)

Les observateurs posés sur la surface terrestre ne peuvent pas observer directement la rotation terrestre ω (les Terriens ont dû attendre Copernic pour comprendre que leur planète tournait autour de l'axe des pôles !). La vitesse de rotation est d'ailleurs très faible : 2π radians en 86 164 s (jour sidéral). Pour essayer de « sentir » la force de Coriolis, il vaut mieux prendre un référentiel R tournant beaucoup plus vite, par exemple un manège en forme de disque horizontal tournant autour d'un axe vertical, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, à la vitesse $\omega = 1$ tour en 10 secondes = $2 \pi / 10$ (vitesse angulaire presque 10000 fois plus grande que celle de la Terre).

Un observateur patineur lancé sur le manège suivant une vitesse V_r va garder une trajectoire presque rectiligne par rapport au repère F qui est alors la Terre supposée fixe (rotation de la Terre négligeable à cette échelle). On peut alors observer que, **par rapport au manège plutôt que par rapport à la Terre**, cette trajectoire est déviée vers sa droite. Sur le site de Météo-France, on trouve deux expériences de ce type documentées par des vidéos : <http://education.meteofrance.fr/lycee/activites-experimentales/la-force-de-coriolis/demonstration-experimentale-de-la-deviation-de-coriolis>

Dans son article, Anders Persson expose les limites de l'image du manège tournant pour expliquer la force de Coriolis (page 3). Il montre aussi (page 7) que Coriolis n'a pas vraiment étudié la force qui porte son nom dans le cas où le référentiel R en rotation est la planète Terre. Il l'a fait plutôt pour comprendre le mouvement de systèmes mécaniques dont l'échelle spatiale est de quelques mètres (comme un manège). Dans l'équation (1), Coriolis nomme les forces liées aux termes A_e et A_c « **forces centrifuges composées** ». La première est la force centrifuge classique, que l'on observe très facilement en se plaçant sur un manège en rotation ; à la surface terrestre son seul effet est de moduler de quelques pourcents la gravité terrestre quand on se déplace du pôle vers l'équateur. La deuxième (que l'on appelle maintenant force de Coriolis) est à la fois orthogonale et proportionnelle à la vitesse relative V_r ; plus difficile à ressentir à l'échelle humaine, elle se trouve être du même ordre de grandeur que les autres forces agissant sur l'atmosphère à l'échelle du globe, d'où sa popularité en météo.

A la surface terrestre, un observateur proche du pôle nord est comme posé sur un manège plan (tangent au pôle nord à la sphère terrestre) tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, manège un million de fois plus grand que les manèges de foire, et tournant à la vitesse $\omega = 2\pi/86\,164 = 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

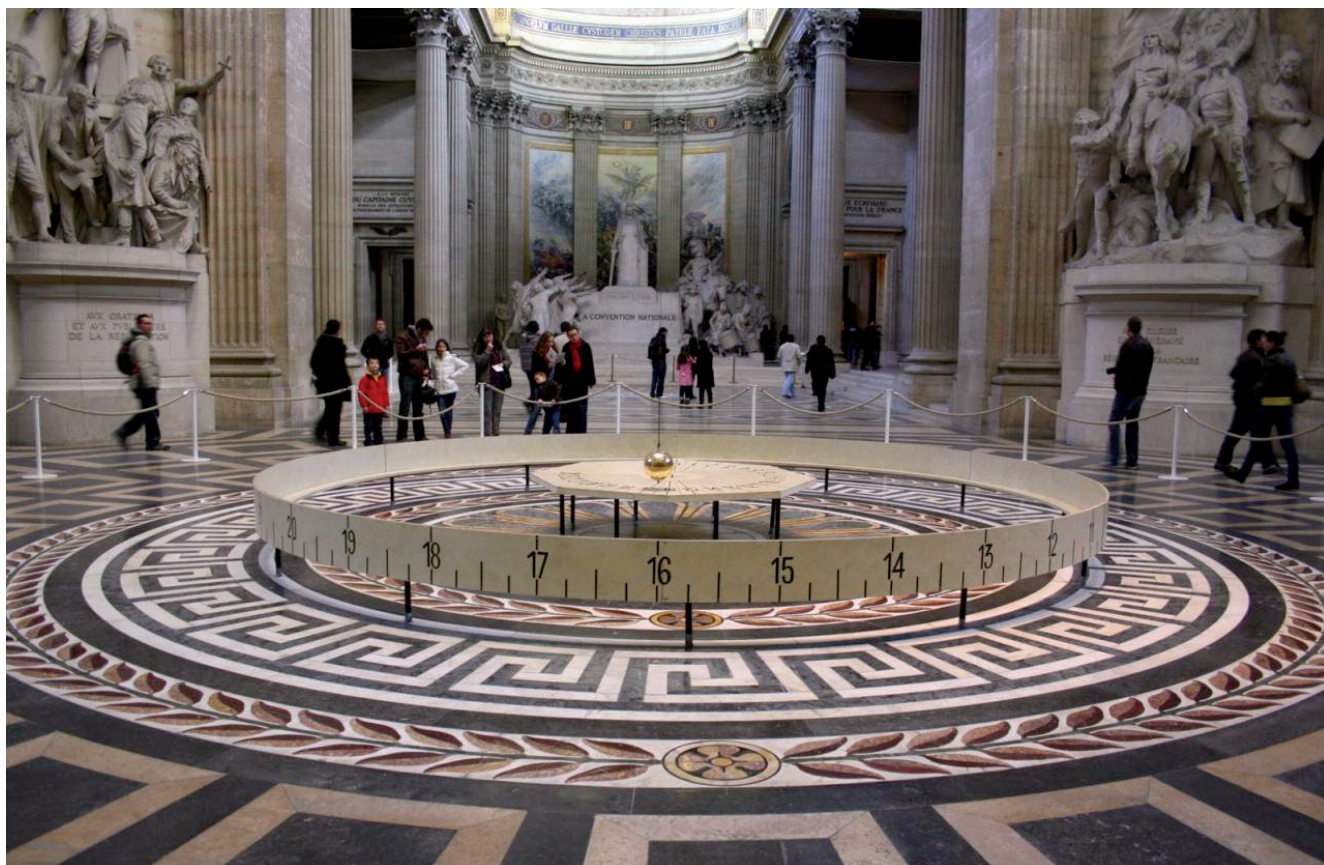
S'il est champion de pétanque, il risque néanmoins de rater (pour quelques centimètres trop à droite) un cochonnet placé à une centaine de mètres devant lui, car il ne

sent pas que le « plancher des vaches » sur lequel il se trouve est un manège tournant lentement vers sa gauche (par rapport à sa direction de tir), alors que sa boule va garder, dans le repère galiléen, une trajectoire rectiligne absolue F, car elle ne connaît que la loi de Newton. C'est Foucault qui à l'aide de son pendule (voir photo) a bien mis en évidence cette « rotation du plancher des vaches » (article de Persson, page 14). Un observateur proche du pôle sud se trouve comme posé sur un manège tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, et les observations sont inversées (déviation vers la gauche plutôt que vers la droite). A l'équateur, un mobile en mouvement horizontal est soumis à une force de Coriolis verticale qui module légèrement la pesanteur qu'il subit, mais n'induit aucune déviation horizontale. Aux latitudes intermédiaires, la force de Coriolis agit de façon intermédiaire, proportionnellement au sinus de la latitude du mobile.

Le lecteur de ce texte peut visionner la vidéo suivante qui illustre parfaitement les effets de la force de Coriolis terrestre, y compris à l'échelle d'une baignoire ou d'un évier dont l'eau s'écoule :

<https://www.youtube.com/watch?v=uDeUFRI5YEW>

JEAN PAILLEUX, JEAN COIFFIER ET PHILIPPE LARMAGNAC



Pendule de Foucault au Panthéon.