

LA FORCE DE CORIOLIS

Avez-vous déjà essayé de jouer au “tir au pigeon” à l’occasion d’une fête foraine ? Atteindre une cible immobile n’est déjà pas chose facile, alors si la cible est en mouvement...

Imaginez la même chose à l’échelle du globe terrestre, avec par exemple un projectile tiré depuis un hélicoptère en vol stationnaire au-dessus du pôle nord (à travers le cockpit, le pilote pourrait voir la Terre tourner sous ses pieds...), ce projectile visant une cible immobile située à l’équateur...

Bien poser le problème...

Le problème se pose ainsi : aussitôt lancé, le projectile adopte une trajectoire rectiligne (principe de Newton, si on suppose que le tir est observé à partir du Soleil), tandis que la cible, bien qu’immobile, décrit en permanence un mouvement de rotation confondu avec celui de la Terre puisque que celle-ci tourne sur elle-même.

Vu de la Terre cette fois, le projectile paraît dévié de sa trajectoire normale comme s’il subissait l’action d’une force. C’est cela la force de Coriolis.

De Paris à l’équateur...

Quelle serait la trajectoire du projectile si, au lieu d’être lancé depuis un hélicoptère au pôle nord, il était lancé depuis le sol à Paris ?

La Terre ayant une forme sphérique et tournant sur elle-même, tout point de la surface du globe est animé d’une vitesse circonférentielle proportionnelle à la distance le séparant de l’axe de rotation de la Terre, autrement dit : inversement proportionnelle à sa latitude.

Cette vitesse, évidemment nulle aux pôles (latitude 90°), atteint 300 m.s^{-1} à Paris (49° de latitude nord) et 464 m.s^{-1} à l’équateur (latitude 0).

Si on observe le tir à partir du Soleil, si on néglige la gravitation et la résistance de l’air, on constate que le projectile décrit une trajectoire rectiligne munie de deux vecteurs vitesses perpendiculaires et de modules constants.

L’un de ces deux vecteurs correspond à la vitesse du projectile proprement dite, il est orienté vers le sud, c’est-à-dire vers la cible située à l’équateur ; l’autre correspond à la vitesse circonférentielle du lieu où s’est effectué le tir, il est orienté vers l’est, c’est-à-dire dans le sens de rotation de la Terre.

Ceci n'aurait aucune incidence sur la précision du tir si le projectile et la cible avaient des vitesses circonférentielles rigoureusement égales ⁽¹⁾, or ce n'est précisément pas le cas. Au contraire même, puisque cette différence s'accroît au fur et à mesure que le projectile se rapproche de sa cible. Tout se passe donc comme si la cible se dérobait devant le projectile.

Vu de la Terre cette fois, le projectile paraît dévié de sa trajectoire normale, comme s'il subissait l'action d'une force. C'est cela la force de Coriolis.

Qui était Coriolis ?

Gaspard Coriolis (1792-1843) était un ingénieur militaire français.

Son œuvre majeure a consisté à régler les problèmes d'artillerie et de balistique qui, au début du XIXe siècle, devenaient plus ardues avec les progrès des tirs à longue distance (plusieurs dizaines de kilomètres).

Ces problèmes ne se posaient pas à l'époque de Newton, 150 ans plus tôt et ne se posent plus aujourd'hui avec les bombes à guidage laser.

Force ou effet ?

La force de Coriolis est une force apparente. Comme toutes les forces apparentes (il n'y en a que trois : la force d'inertie, la force centrifuge et la force de Coriolis !), c'est une force fictive qui n'a pas d'existence réelle.

C'est pourquoi les physiciens préfèrent parler d'"*effet Coriolis*" plutôt que de force, afin de bien distinguer l'effet et la cause. L'effet Coriolis, d'ailleurs prédit par Newton dans son traité paru à Londres en 1687 ("*Principes...*"), n'est pas dû à une force, il ne s'explique que par la forme sphérique de la Terre et son mouvement de rotation.

Ainsi, il n'y aurait pas d'effet Coriolis sur un astre qui serait dépourvu d'un mouvement de rotation sur lui-même ⁽²⁾.

L'autre "effet Coriolis"...

L'effet Coriolis affecte non seulement la trajectoire des projectiles, mais aussi celle des objets qui tombent en chute libre à la surface de la Terre, pour la même raison qui est la différence de vitesse circonférentielle entre les points de début et de fin de chute.

Cet effet, appelé "*effet Coriolis vertical*" pour le distinguer de l'"*effet Coriolis horizontal*" décrit plus haut, est évidemment inexistant aux pôles puisque la vitesse

circonférentielle de la surface de la Terre y est nulle. Il est maximal à l'équateur. Entre le pôle et l'équateur, il dépend de la latitude du lieu et de la hauteur de chute.

Pour comprendre ce phénomène, il suffit de réaliser une expérience très simple qui consiste à faire rouler une bille sur une table. Dès que la bille arrive au bord de la table, elle tombe. Cependant elle n'atteint pas le sol exactement à la verticale du bord de la table, mais légèrement à côté, à cause de sa vitesse initiale.

Et plus sa vitesse initiale est grande, plus cet écart est important.

Imaginons maintenant cette même bille lâchée sans vitesse initiale du haut de la tour Eiffel à Paris. On néglige la résistance de l'air et les turbulences, autrement dit on raisonne comme si la bille tombait dans un vide parfait.

En raison de la sphéricité de la Terre et de son mouvement de rotation, la vitesse circonférentielle du sommet de la tour Eiffel est de $0,015 \text{ m.s}^{-1}$ supérieure à celle du pied.

Ce vecteur vitesse étant perpendiculaire à la trajectoire de chute, tout se passe comme si la bille tombait avec une vitesse horizontale nulle au début de la chute, mais en accroissement constant au fur et à mesure qu'elle se rapproche du sol.

Pour l'observateur, la bille décrit une trajectoire qui s'incurve au fil de sa chute, comme si elle subissait l'action d'une force transversale. Elle atteint donc le sol, non pas exactement à la verticale du point où on l'a lâchée, mais légèrement à côté.

Étant donné le sens de rotation de la Terre, cette déviation est orientée vers l'est.

Un effet négligeable...

Une série de calculs montre qu'une masse quelconque lâchée du haut de la tour Eiffel à Paris (320 mètres de hauteur, 8 secondes de chute) n'est déviée par l'effet Coriolis que de moins d'une dizaine de centimètres lorsqu'elle arrive au sol (on néglige la résistance de l'air et les turbulences) !

On en déduit que l'effet Coriolis, qu'il soit horizontal ou vertical, est négligeable sur une faible distance ou sur une courte durée.

Quelques idées reçues sur l'effet Coriolis...

Les marées sont des oscillations permanentes des masses liquides dues à l'attraction de la Lune et du Soleil. Néanmoins, ces phénomènes ne sont perceptibles qu'à grande échelle et sur d'immenses étendues, il est donc absolument impossible d'en observer ou d'en ressentir les effets sur les rives d'un lac ou au bord d'une piscine.

De même, l'effet Coriolis est bien trop faible pour jouer un rôle quelconque dans l'écoulement de l'eau d'une baignoire ou d'un lavabo : il faudrait un immense lac rond de plusieurs kilomètres carrés de surface, muni d'une bonde centrale en forme d'entonnoir, pour qu'il se manifeste de manière sensible.

L'effet Coriolis n'affecte pas non plus le mouvement des automobiles, son intensité étant sans commune mesure avec les différents paramètres qui influencent la trajectoire des véhicules terrestres (tracé de la route, dévers, vent traversier...).

Et même si on considère les voitures de rallyes qui décollent du sol au passage des bosses, leurs sauts sont d'une portée trop courte et d'une durée bien trop brève pour être affectés en quoi que ce soit par l'effet Coriolis.

Il n'y a pas d'effet Coriolis en automobile ! Qu'on se le dise !

Encore une histoire de référentiel !...

La théorie des référentiels (lire le dossier ADILCA "système solaire") s'applique ainsi au problème de la trajectoire d'un projectile lancé depuis la Terre :

- ici, le référentiel général est le Soleil (référentiel absolu, inertielle, galiléenne ou *copernicienne*, du nom de Nicolas Copernic qui, le premier, formula la théorie héliocentrique), référentiel à partir duquel on peut observer à la fois le mouvement de rotation de la Terre et la trajectoire réelle du projectile ;

- ici, le référentiel restreint est la Terre (référentiel relatif, non inertielle ou *non galiléenne*, du nom de Galiléo Galilée qui, le premier, souleva le problème du référentiel dans la description d'un mouvement), référentiel à partir duquel on observe uniquement la trajectoire du projectile, comme si la Terre avait cessé de tourner sur elle-même.

Dans le référentiel copernicien, la force de Coriolis n'existe pas. L'effet Coriolis ne peut se manifester que dans un référentiel restreint (le plus souvent : la Terre), ce qui interdit alors toute description du mouvement de rotation du référentiel, les deux descriptions ne pouvant se superposer.

Force de Coriolis : la véritable définition !

Ce qui précède nous amène à cette définition originale et inédite de la force de Coriolis :

"On appelle force de Coriolis la force transversale qu'il faudrait exercer sur un projectile quelconque, ou sur une masse quelconque tombant en chute libre, si la Terre cessait de tourner sur elle-même, ceci afin d'obtenir une déviation de trajectoire identique à celle qu'il (elle) donne l'illusion de décrire lorsqu'on l'observe depuis la Terre."

Effet Coriolis : l'ordre de grandeur...

1. Effet Coriolis horizontal

Calculons l'intensité de l'effet Coriolis qui s'exerce sur une voiture de masse 1 500 kg circulant dans les environs de Paris à la vitesse de 108 km.h⁻¹ (30 m.s⁻¹) sur une trajectoire orientée sud-nord, ou nord-sud⁽³⁾ :

$$F = 2 M \cdot V \cdot \omega \cdot \sin \theta$$

F : effet Coriolis (exprimé en **N**)

M : masse de la voiture (exprimée en kg)

V : vitesse de la voiture (exprimée en m.s⁻¹)

ω : vitesse de rotation du référentiel (Terre : $\omega = 7,27 \times 10^{-5}$ rad.s⁻¹)

θ : latitude du lieu considéré (Paris : 49° de latitude nord ; $\sin 49^\circ = 0,75$)

cohérence des unités⁽⁴⁾ : $F = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \mathbf{N}$

$$F = 2 \times 1\,500 \times 30 \times 7,27 \times 10^{-5} \times 0,75 = \mathbf{5\,N}$$

Comment interpréter ce résultat ? En automobile, un effet aussi faible ne peut se manifester que si les conditions suivantes sont réunies :

- la chaussée est plane, sans dévers, elle décrit un tracé parfaitement rectiligne, orienté sud-nord, ou nord-sud ;
- il n'y a pas le moindre vent traversier ;
- la carrosserie de la voiture est en parfait état, dépourvue d'accessoires, et les vitres sont complètement fermées ;
- les trains avant et arrière ne souffrent d'aucun défaut de parallélisme, ni d'aucun défaut d'alignement ;
- les quatre pneumatiques ont le même degré d'usure, la même pression intérieure, et supportent une charge rigoureusement identique.

Des conditions évidemment impossibles à réunir !

Mais si tel était le cas, l'effet Coriolis étant perpendiculaire à la trajectoire, la voiture donnerait l'impression de "*tirer à droite*" dans l'hémisphère nord, de "*tirer à gauche*" dans l'hémisphère sud.

Attention ! Il s'agit d'un effet et non d'une force. Autrement dit, la voiture ne serait soumise à aucune accélération transversale. Le conducteur ne ressentirait donc rien de

particulier, si ce n'est une impression visuelle : il constaterait simplement que, livrée à elle-même, la voiture s'écarte progressivement de la trajectoire idéale.

L'effet Coriolis correspond donc à l'intensité de la *force de guidage* (lire le dossier ADILCA "*force de guidage*") que devrait solliciter le conducteur pour maintenir la voiture dans l'axe de la route, si cet effet était perceptible⁽⁵⁾.

Indépendant de la longitude, l'effet Coriolis est proportionnel à la latitude : il serait de **4 N** si, toutes conditions égales par ailleurs (masse, vitesse, trajectoire), la voiture circulait dans les environs d'Athènes ou de Lisbonne (38° de latitude nord), et de **6 N** dans les environs d'Helsinki ou d'Oslo (60° de latitude nord).

Pour apprécier l'ordre de grandeur du phénomène Coriolis, calculons l'intensité de la force de guidage que devrait solliciter le conducteur d'une voiture de masse 1 500 kg souhaitant faire un tour complet du boulevard périphérique de Paris (35 km) à la vitesse de 70 km.h⁻¹ (20 m.s⁻¹), en supposant que ce boulevard soit constitué d'une chaussée plane, sans dévers, au tracé parfaitement circulaire :

$$F = M \cdot V^2 / R = M \cdot V^2 / [C / (2 \pi)]$$

F : force de guidage (exprimée en **N**)

M : masse de la voiture (exprimée en kg)

V : vitesse de la voiture (exprimée en m.s⁻¹)

R : rayon de trajectoire (exprimé en m)

C : circonférence du boulevard périphérique de Paris (exprimée en m)

cohérence des unités⁽⁴⁾ : $F = \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

$$F = 1\,500 \times 20^2 / (35\,000 / 6,28) = \mathbf{110\,N}$$

Une force dont personne n'a conscience, mais dont l'intensité est pourtant plus de 20 fois supérieure à celle de l'effet Coriolis calculé précédemment !

2. Effet Coriolis vertical

Calculons la déviation de trajectoire causée par l'effet Coriolis sur un objet tombant en chute libre du haut de la tour Eiffel à Paris :

$$D = 2/3 \omega \cdot \cosinus \theta \cdot (2h^3 / g)^{1/2}$$

D : déviation de trajectoire due à l'effet Coriolis (exprimée en **m**)

ω : vitesse de rotation du référentiel (Terre : $\omega = 7,27 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

θ : latitude du lieu considéré (Paris : 49° de latitude nord ; $\cosinus 49^\circ = 0,66$)

h : hauteur de chute (tour Eiffel : 320 m)

g : accélération gravitationnelle au lieu considéré (Paris : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

cohérence des unités ⁽⁴⁾ : $D = s^{-1} \cdot (m^{+3} \cdot m^{-1} \cdot s^{+2})^{1/2} = s^{-1} \cdot (m^{+2} \cdot s^{+2})^{1/2} = s^{-1} \cdot (m^{+1} \cdot s^{+1}) = m$

$$D = 2/3 \times 7,27 \times 10^{-5} \times 0,66 \times (2 \times 320^3 / 9,8)^{1/2} = \mathbf{0,08 \text{ m}}$$

Comment interpréter ce résultat ? La déviation de trajectoire attribuée à l'effet Coriolis ne peut se manifester que si les conditions suivantes sont réunies :

- l'objet a une masse parfaitement homogène, une forme rigoureusement sphérique et une surface extérieure parfaitement lisse ;
- l'objet, au cours de sa chute, glisse dans l'air, sans rouler ni générer la moindre résistance ou turbulence aérodynamique ;
- il n'y a pas le moindre vent traversier...

Des conditions évidemment impossibles à réunir !

En réalité, diverses expériences menées dans des conditions atmosphériques idéales ont montré que la localisation exacte du point de contact au sol d'une bille d'acier après une telle chute n'est précise qu'à $\pm 0,15$ mètre près.

L'incertitude liée aux conditions d'expériences a donc une influence en moyenne 3 fois supérieure à celle de l'effet Coriolis !

(1) *Ce serait le cas si, au lieu d'être sphérique, la Terre avait la forme d'un cylindre.*

(2) *Un tel astre n'existe pas : toutes les planètes du Système solaire tournent sur elles-mêmes, leurs satellites également, c'est la "rotation sidérale" qui se caractérise par une période (Terre : 23 h 56 min, Lune : environ 27 jours terrestres).*

(3) *L'effet Coriolis horizontal se manifeste toujours du même côté, quel que soit le sens de circulation de la voiture, il ne s'inverse qu'au changement d'hémisphère.*

(4) *Les mesures d'angles, les rapports trigonométriques, les coefficients, etc. sont des grandeurs sans dimension qui n'affectent pas les unités avec lesquelles elles se combinent.*

(5) *La force de guidage étant destinée à compenser l'effet Coriolis, le conducteur devrait donc braquer le volant du côté opposé, autrement dit vers la gauche dans l'hémisphère nord, vers la droite dans l'hémisphère sud...*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *