

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 : observé depuis l’hélicoptère et aussitôt lancé, le projectile adopte une trajectoire rectiligne, conformément au principe de Newton, tandis que la cible décrit en permanence un mouvement de rotation confondu avec celui de la Terre puisque que celle-ci tourne sur elle-même⁽¹⁾.

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 depuis un hélicoptère en vol stationnaire au-dessus du pôle nord, on constate que le projectile adopte cette fois une trajectoire oblique à cause de deux vecteurs vitesses perpendiculaires et de modules constants.

L’un de ces deux vecteurs 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 ; l’autre 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.

Ceci n'aurait aucune incidence sur la précision du tir si le projectile et la cible avaient des vitesses circonférentielles rigoureusement égales, 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.

L'autre "effet Coriolis"...

Le phénomène 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 une raison identique qui est la différence de vitesse circonférentielle entre les points de début et de fin de chute.

Ce phénomène, appelé "*effet Coriolis vertical*" pour le distinguer de l'"*effet Coriolis horizontal*" décrit plus haut, est inexistant pour un objet lâché à la verticale d'un pôle, dans l'axe de rotation de la Terre. En revanche, 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 le comprendre, il suffit d'observer une bille rouler sur une table. Dès que la bille arrive en bord de table, elle tombe. Cependant elle n'atteint pas le sol exactement à la verticale du bord, mais légèrement à côté, à cause de sa vitesse initiale. Et plus sa vitesse initiale est grande, plus cet écart est important.

L'effet Coriolis vertical relève d'une logique comparable. Imaginons cette même bille lâchée du haut de la tour Eiffel à Paris, mais cette fois sans vitesse initiale. 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 la 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.

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 qui n'a pas d'existence réelle.

C'est pourquoi il vaut mieux 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 le mouvement de rotation de la Terre⁽²⁾.

Ainsi, il n'y aurait pas d'effet Coriolis sur un astre qui serait dépourvu d'un mouvement de rotation sur lui-même⁽³⁾.

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 impossible d'en observer ou d'en ressentir les effets sur les rives d'un lac, et encore moins 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 divers paramètres qui influencent la trajectoire des véhicules terrestres (équilibre mécanique, 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 s'applique ainsi au problème de la trajectoire d'un projectile lancé depuis la Terre :

- ici, le référentiel absolu est le Soleil (référentiel inertiel, galiléen ou *copernicien*, 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 relatif est la Terre (référentiel non inertiel ou *non galiléen*, 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⁽⁴⁾.

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 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. »

Soulignons le caractère hypothétique de cette force, découlant de l'emploi du conditionnel ("*la force qu'il faudrait exercer...*") et les deux restrictions de validité propres à cette définition :

1. La Terre devrait cesser de tourner sur elle-même.
2. Il est impossible d'exercer la moindre force sur un projectile quelconque une fois lancé, ou sur une masse quelconque tombant en chute libre.

Il faut donc en déduire que la force de Coriolis est à ranger dans la catégorie des forces imaginaires, également appelées forces fictives ou pseudo-forces, catégorie dans laquelle on trouve également la force centrifuge et la force d'inertie (voir dossiers ADILCA "*force centrifuge*" et "*force d'inertie*").

Le plus important à retenir, c'est la particularité des forces imaginaires : elles ne résultent pas d'une interaction, contrairement aux forces réelles. De ce fait, le principe d'action réaction leur est inapplicable⁽⁵⁾.

Conclusion

Au même titre que la force centrifuge et la force d'inertie, la force de Coriolis est une force imaginaire qui n'a pas d'existence réelle.

Le phénomène étudié par Gaspard Coriolis, auquel il a donné son nom, est improprement associé au concept de force, il se résume en réalité à un simple effet causé par une illusion d'optique.

(1) *Un hélicoptère en vol stationnaire au-dessus d'un pôle est supposé indépendant du mouvement de la Terre, ce qui en fait un référentiel absolu pour observer le phénomène qui nous occupe (voir dossier ADILCA "système solaire et révolution copernicienne").*

(2) *Toutefois, il n'y aurait pas d'effet Coriolis horizontal si la Terre avait la forme d'un cylindre, pas plus que d'effet Coriolis vertical si sa forme était celle d'un disque plat.*

(3) *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).*

(4) *Rappelons que le statut d'un référentiel n'a rien d'immuable, il varie selon l'objet de l'étude. Ainsi par exemple, pour décrire le mouvement des véhicules terrestres, le référentiel Terre redevient parfaitement galiléen, précisément si on néglige l'effet Coriolis.*

(5) *Principe d'action réaction ou 3^{ème} principe de Newton : « Toute force qui s'exerce sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité mais de sens opposé. »*

FORCE DE CORIOLIS : LE MODE DE CALCUL

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 (49° de latitude nord) à la vitesse de 108 km.h⁻¹ (30 m.s⁻¹) sur une route de cap sud-nord, ou nord-sud⁽¹⁾ :

$$F = 2 M . V . \omega . \sinus \theta$$

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 : **ω = 7,27 x 10⁻⁵ rad.s⁻¹**)

θ : latitude du lieu considéré (Paris : 49° de latitude nord ; sinus 49° = 0,75)

cohérence des unités⁽²⁾ : **F = kg . m.s⁻¹ . s⁻¹ = kg.m.s⁻² = N**

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

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.

La force de Coriolis correspond donc à l'intensité de la *force de guidage* (voir 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⁽³⁾.

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

$$F = 1\,500 \times 20^2 / (35\,000 / 6,28) = 600\,000 / 5\,600 = \mathbf{110\,N}$$

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. Accélération dite « de Coriolis »

Ainsi que nous venons de l'écrire, la force de Coriolis n'engendre pas d'accélération transversale puisqu'il s'agit d'une force fictive. Mais alors, qu'appelle-t-on *accélération de Coriolis* ?

La voiture "tirant d'un côté", l'accélération dite « de Coriolis » est l'*accélération transversale* qu'elle doit subir pour annuler cet effet, si le conducteur souhaite rester dans l'axe de la route et conserver son cap initial.

Cette accélération est alors générée par la force de guidage, elle-même induite par le pivotement des roues directrices, à l'initiative du conducteur⁽³⁾.

Calculons l'accélération dite « de Coriolis », autrement dit l'accélération transversale que doit subir une voiture circulant dans les environs de Paris (49° de latitude nord) à la vitesse de 108 km.h⁻¹ (30 m.s⁻¹) sur une route de cap sud-nord, ou nord-sud, si le conducteur souhaite rester dans l'axe de la route ⁽⁴⁾ :

$$Y = 2 V \cdot \omega \cdot \sinus \theta$$

Y : accélération transversale (exprimée en **m.s⁻²**)

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

ω : vitesse de rotation du référentiel (Terre : **ω = 7,27 x 10⁻⁵ rad.s⁻¹**)

θ : latitude du lieu considéré (Paris : 49° de latitude nord ; sinus 49° = 0,75)

$$\text{cohérence des unités}^{(2)} : Y = \text{m.s}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{m.s}^{-2}$$

$$Y = 2 \times 30 \times 7,27 \times 10^{-5} \times 0,75 = 0,0033 \text{ m.s}^{-2}$$

Notons que cette accélération est d'une intensité environ trois mille fois plus faible que l'attraction exercée par la Terre (9,8 m.s⁻²), et encore environ deux fois plus faible que celle exercée par le Soleil (0,006 m.s⁻²) ⁽⁵⁾ !

3. Principe d'action réaction

Rappelons le principe d'action réaction énoncé par Isaac Newton :

« Toute force qui s'exerce sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé »

La force de Coriolis étant une force imaginaire, elle échappe au principe d'action réaction : pas de force, pas de réaction.

Dans la situation qui nous occupe, ce principe n'est donc applicable que si, et seulement si, le conducteur sollicite la *force de guidage* pour contrer l'effet Coriolis décrit plus haut.

Dans ce cas, et dans ce cas seulement, le principe d'action réaction s'applique, mais il s'applique évidemment à la force de guidage, force réelle, et certainement pas à la force de Coriolis, force imaginaire.

La force de guidage s'exerçant à la périphérie des pneumatiques au contact du sol, la réaction dont il est question ici est celle que la masse de la voiture exerce sur la Terre par le biais des pneumatiques.

Comme précisé par Isaac Newton, cette réaction est de même intensité que la force de guidage, mais de sens opposé. Elle est donc très facile à calculer, à partir de la relation suivante :

$$R = - F$$

R : réaction, exprimée en **N**

F : force, exprimée en **N**

(le signe [-] précise l'orientation spatiale de cette réaction)

Par exemple, calculons la réaction que la voiture exerce sur le globe terrestre lorsque le conducteur sollicite une force de guidage de 5 N (comme calculé plus haut) :

$$R = - 5 \text{ N}$$

À l'évidence, cette réaction est d'une intensité très faible, d'autant plus qu'elle s'exerce sur une masse énorme, celle de la Terre. Ce qui revient à dire qu'elle est insuffisante pour perturber le mouvement de rotation du globe terrestre.

En effet, le principe d'action réaction peut être vu comme un rapport de force (si l'on ose dire) entre deux masses : la masse de la voiture (1 500 kg) et celle de la Terre (6×10^{24} kg). Un rapport en faveur de la Terre, au détriment de la voiture.

4. 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 : $\omega = 7,27 \times 10^{-5}$ **rad.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 m.s⁻²**)

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

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

$$D = 2/3 \times 7,27 \times 10^{-5} \times 0,66 \times 2^{1/2} \times 320^{3/2} / 9,8^{1/2}$$

$$D = 2/3 \times 7,27 \times 10^{-5} \times 0,66 \times 1,4 \times 5\,700 / 3,13$$

$$D = 8\,075 \times 10^{-5} = \mathbf{0,08 \text{ m}}$$

Comment interpréter un tel 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) 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.

(2) 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.

(3) 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...

*(4) Si la masse de la voiture et l'intensité de l'effet Coriolis sont connus, il est facile de calculer cette accélération grâce au principe fondamental de la dynamique énoncé par Isaac Newton : $[Y = F / M]$ où **F** est l'effet Coriolis (exprimé en **N**) et **M** la masse de voiture (exprimée en **kg**).*

(5) Dans l'hémisphère nord, l'effet Coriolis et l'attraction solaire se combinent quand la voiture fait route cap plein nord au lever du soleil, quand la voiture fait route cap plein sud au coucher du soleil. Et inversement dans l'hémisphère sud. L'attraction de la Lune, 200 fois plus faible que celle du Soleil, est évidemment négligeable.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *