

LA FORCE DE CORIOLIS

I. LES LOIS DE NEWTON

II. FORCE DE CORIOLIS : LA VÉRITABLE DÉFINITION

II. FORCE DE CORIOLIS : LE MODE DE CALCUL

- 1. Effet Coriolis horizontal**
- 2. Accélération dite « de Coriolis »**
 - 3. Action réciproque**
 - 4. Effet Coriolis vertical**

III. BIBLIOGRAPHIE

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. LES LOIS DE NEWTON

Les lois générales du mouvement ont été découvertes et formulées par le mathématicien et physicien anglais Isaac Newton (1642 - 1727).

Ces lois sont universelles et permettent de décrire n'importe quelle forme de mouvement, elles s'énoncent ainsi :

Principe d'inertie

« Une masse immobile sur laquelle n'agit aucune force, reste parfaitement immobile. »

« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, conserve intégralement sa vitesse. »

« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. »

Le concept de force découle de ce principe.

Concept de force

« Une force désigne toute cause capable d'agir sur la vitesse ou sur la trajectoire d'une masse. »

Principe de réciprocité

« Toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé. »

Comment ces lois s'appliquent-elles pour décrire le mouvement d'une masse, et comment définir le concept de force de Coriolis ?

II. FORCE DE CORIOLIS : LA VÉRITABLE DÉFINITION

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...

Problème

Le problème se pose ainsi : observé depuis l’hélicoptère et aussitôt lancé, le projectile adopte une trajectoire rectiligne, conformément au *principe d’inertie* d’Isaac 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.

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 téléguidées.

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 par rapport au Soleil, on constate que le projectile adopte cette fois une trajectoire oblique à cause de deux vecteurs vitesses perpendiculaires et de modules constants⁽¹⁾.

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, imaginons de lâcher une bille du sommet de la tour Eiffel à Paris (320 mètres de hauteur). On néglige la résistance de l'air et les turbulences, autrement dit, on raisonne comme si la bille tombait dans un vide parfait.

Une fois lâchée, la bille tombe à la verticale, mais en direction d'un point qui se dérobe au fil de la chute. En effet, en raison de la sphéricité de la Terre et de sa rotation, la vitesse circonférentielle du pied de la tour Eiffel est d'environ $0,015 \text{ m.s}^{-1}$ inférieure à celle de son sommet⁽²⁾.

Pour l'observateur lié à la Terre, la bille donne l'illusion d'une trajectoire qui s'incurve au fil de la chute, comme si elle subissait l'action d'une force transversale : elle atteint 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.

Cette force transversale, c'est la force dite « de Coriolis ». En réalité, cette force n'existe pas puisque la bille est simplement livrée à elle-même.

Force ou effet ?

La trajectoire du projectile ou celle de l'objet qui tombe en chute libre n'est pas due à une force (Gaspard Coriolis lui-même n'emploie jamais ce terme), elle ne s'explique que par le mouvement de rotation du globe terrestre⁽³⁾.

Autrement dit, pour un observateur lié à la Terre, l'*effet Coriolis*, qu'il soit horizontal ou vertical, se résume à une simple illusion perceptive.

En résumé : il n'y aurait pas d'effet Coriolis si la Terre cessait de tourner sur elle-même⁽⁴⁾.

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 vertical que de moins d'une dizaine de centimètres lorsqu'elle arrive au sol (on néglige la résistance de l'air et les turbulences).

En résumé : 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.

Concernant le mouvement des automobiles, l'intensité de l'effet Coriolis est 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 l'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 trop brève pour être perturbés par l'effet Coriolis.

En résumé : l'effet Coriolis n'affecte pas le mouvement des automobiles.

Une question 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 également appelé *inertiel* ou *galiléen*, du nom de Galiléo Galiléi, le premier qui souleva le problème du référentiel dans la description d'un mouvement), 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 également appelé *non inertiel* ou *non galiléen*), référentiel à partir duquel on observe uniquement la trajectoire du projectile, comme si la Terre avait cessé de tourner sur elle-même⁽⁵⁾.

Dans le référentiel héliocentrique, la force de Coriolis n'existe pas. La force de Coriolis apparaît uniquement à partir d'un référentiel relatif (le plus souvent : la Terre), ce qui interdit alors toute description du mouvement de rotation de ce 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 le centre de gravité d'un projectile quelconque, ou sur celui d'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 n'y a pas d'interaction possible sur un centre de gravité, excepté gravitationnelle.

En résumé : la force dite « de Coriolis » appartient à la catégorie des forces fictives, également appelées forces d'inertie, forces imaginaires, forces apparentes ou pseudo-forces, catégorie à laquelle appartiennent également la force centrifuge et la force d'inertie (voir dossiers ADILCA "force centrifuge" et "force d'inertie").

Soulignons l'une des particularités des forces fictives : du fait qu'elles ne résultent pas d'une interaction, le principe de réciprocité leur est inapplicable⁽⁶⁾.

Conclusion

Au même titre que la force centrifuge et la force d'inertie, la force de Coriolis est une force imaginaire. Autrement dit, c'est une force qui n'existe pas.

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 une banale illusion perceptive.

(1) *L'hélicoptère est alors considéré comme un référentiel absolu pour observer le phénomène qui nous occupe (voir dossiers ADILCA "référentiels" et "système solaire et révolution copernicienne").*

(2) *Cette différence atteindrait $0,023 \text{ m.s}^{-1}$ si la tour Eiffel était située en zone équatoriale. Elle est due au fait que le pied de la tour Eiffel étant plus proche de l'axe de rotation de la Terre que son sommet, il décrit une circonférence plus courte dans le même laps de temps. Une différence négligeable pour toute construction jusqu'à une centaine de mètres de hauteur.*

(3) *Le terme de force suppose une interaction, c'est-à-dire une cause et un point d'application, deux conditions que ne remplit pas la force dite « de Coriolis ». À défaut, celle-ci est supposée s'exercer sur le centre de gravité de la masse en question, dans le cadre d'une projection purement imaginaire.*

(4) *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). Toutefois, il n'y aurait pas d'effet Coriolis horizontal sur une planète ayant la forme d'un cylindre, pas plus que d'effet Coriolis vertical si sa forme était celle d'un disque plat.*

(5) *Rappelons que le statut d'un référentiel n'a rien d'immuable, il dépend de 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.*

(6) *Principe de réciprocité ou 3^{ème} principe de Newton : « Toute masse sur laquelle s'exerce une force, répond par une action réciproque d'égale intensité mais de sens opposé. »*

III. FORCE DE CORIOLIS : LE MODE DE CALCUL

1. Effet Coriolis horizontal

Calculons l'intensité de l'effet Coriolis horizontal 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 horizontal (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)

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

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

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 de la voiture ne souffrent d'aucun défaut de parallélisme, ni d'aucun défaut d'alignement.
- Les quatre pneumatiques de la voiture 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 horizontal 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 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 horizontal est proportionnel à la latitude : toutes conditions égales par ailleurs (masse, vitesse, trajectoire), il serait de **4 N** si 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⁾ : $F = \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

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

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 imaginaire. 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 (voir dossier ADILCA "*force de guidage*").

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⁾ :

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

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 environ deux fois plus faible que l'attraction exercée par le Soleil (0,006 m.s⁻²), et environ trois mille fois plus faible que celle exercée par la Terre (9,8 m.s⁻²) ⁽⁵⁾.

3. Action réciproque

Rappelons le principe de réciprocité énoncé par Isaac Newton :

« Toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé »

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

Dans la situation qui nous occupe, ce principe n'est donc applicable que si, et seulement si, le conducteur sollicite la *force de guidage* afin de contrer l'effet Coriolis horizontal décrit plus haut (voir dossier ADILCA "force de guidage").

Dans ce cas, et dans ce cas seulement, le principe de réciprocité 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, l'action réciproque 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, l'action réciproque 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 :

$$A = - F$$

A : action réciproque, exprimée en **N**

F : force de guidage, exprimée en **N**

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

Calculons l'action réciproque que la voiture exerce sur le globe terrestre par le biais des pneumatiques lorsque le conducteur sollicite une force de guidage de 5 N (comme calculé plus haut) :

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

À l'évidence, cette action réciproque 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 de réciprocité peut être vu comme un rapport de force (si l'on ose dire) entre deux masses : celle 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 vertical 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 vertical (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⁾ : $D = s^{-1} \cdot (m^{+3} \cdot m^{-1} \cdot s^{+2})^{1/2} = s^{-1} \cdot (m^{+2} \cdot s^{+2})^{1/2} = s^{-1} \cdot (m^{+1} \cdot s^{+1}) = m$

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

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

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

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

Comment interpréter un tel résultat ? La déviation de trajectoire attribuée à l'effet Coriolis vertical 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 une colonne d'air parfaitement stable, sans générer la moindre turbulence aérodynamique.
- Il n'y a pas le moindre vent traversier...

Des conditions évidemment impossibles à réunir !

Dès lors, il semble illusoire de vouloir mettre en évidence l'effet Coriolis vertical à l'aide d'expérimentations concrètes.

(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 horizontal, 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 horizontal 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 horizontal 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

* * *

III. BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA : *Les Lois Physiques de l'Automobile* (dossiers thématiques), Paris 2015.

- CORIOLIS (Gaspard) : *Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps*, Journal de l'École Royale Polytechnique, 24^{ème} cahier, 1835.

- LE TONNELIER DE BRETEUIL, marquise du Chastellet (Gabrielle Émilie) : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (traduction française de l'œuvre d'Isaac Newton), Paris 1759.

- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *