

LA FORCE CENTRIFUGE

(Le plus complet de tous les dossiers du web consacrés à la force centrifuge)

I. LES LOIS DE NEWTON

II. FORCE CENTRIFUGE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

III. FORCE CENTRIFUGE : LE MODE DE CALCUL

1. Calcul de la force de guidage
2. Calcul de l'accélération transversale
3. Calcul de l'action réciproque
4. Calcul de la force centrifuge

IV. FORCE CENTRIFUGE : LES DESSINS

V. 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.

S'agissant d'un mouvement circulaire, ces lois s'énoncent ainsi :

Principe d'inertie rectiligne

« 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 de dévier 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 dans le cas d'un véhicule terrestre qui décrit une trajectoire circulaire, et comment définir le concept de force centrifuge ?

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

II. FORCE CENTRIFUGE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

Le concept de force centrifuge est rarement livré avec son mode d'emploi : comme la force d'inertie et la force de Coriolis, la force centrifuge appartient à la catégorie des forces imaginaires, également appelées forces d'inertie, forces fictives, forces apparentes ou pseudo-forces. Pourquoi les appelle-t-on ainsi ? Ces forces relèvent de projections imaginaires, ce qui signifie qu'en réalité, elles n'existent pas.

Ce dossier est consacré à la force centrifuge, les autres forces étant traitées chacune dans un dossier spécifique (voir dossiers ADILCA “*force d'inertie*” et “*force de Coriolis*”). Mais commençons par préciser les termes utilisés.

Rappel

Un *référentiel* désigne un système de repérage grâce auquel on peut mesurer les caractéristiques du *mouvement* d'une masse, telles que : distance parcourue, vitesse, rayon de trajectoire ou variation d'altitude⁽¹⁾. Un référentiel peut être absolu ou relatif.

Conformément au *principe d'inertie* d'Isaac Newton, une masse en mouvement sur laquelle ne s'exerce aucune force décrit une *trajectoire rectiligne*. D'où cette définition : une *force* désigne toute cause capable de dévier la *trajectoire* d'une masse. On distingue deux types de forces : les forces réelles et les forces imaginaires.

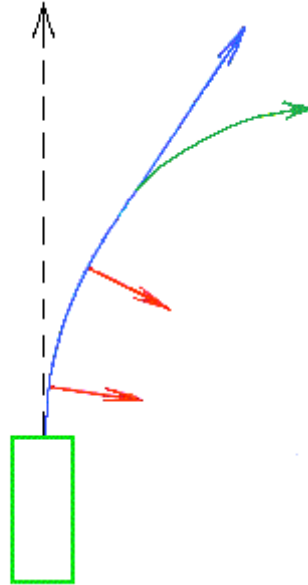
Centrifuge signifie “*qui éloigne du centre*”.

Ainsi, au sens strict du terme, une force qualifiée de centrifuge devrait pouvoir éloigner une masse quelconque d'un centre ou d'un axe de rotation sur une trajectoire *radiale*, c'est-à-dire dans la direction indiquée par le prolongement d'un rayon.

Le mouvement circulaire...

Observons le mouvement d'une voiture qui s'engage sur une trajectoire circulaire : on constate qu'il n'y a que trois possibilités, tandis que la voiture ne s'éloigne jamais sur une trajectoire radiale :

1. Le conducteur ignore le tracé de la route : livrée à elle-même, la voiture conserve une trajectoire rectiligne et continue tout droit (flèche noire pointillée), c'est la trajectoire normale d'une masse sur laquelle n'agit aucune force.
2. Le conducteur inscrit la voiture sur une trajectoire circulaire et franchit normalement la courbe (flèche verte) : c'est le cas la plupart du temps.
3. Le conducteur fait une sortie de route (flèche bleue). Cependant, la voiture a été déviée de sa trajectoire initiale, de façon incomplète, certes, mais déviée tout de même, ce qui nous ramène au scénario numéro 2.



© association adilca reproduction interdite

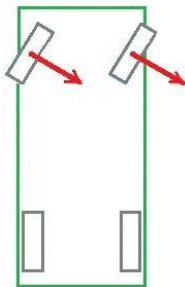
Trois trajectoires possibles, et seulement trois :

1. Le conducteur ignore la courbe, la voiture continue tout droit (flèche noire pointillée).
 2. Le conducteur négocie normalement la courbe (flèche verte).
 3. Le conducteur fait une sortie de route (flèche bleue).
- La seule force qui agit sur la voiture est représentée en rouge.
(Attention à ne pas mélanger les forces et les trajectoires !)

... mais une seule force !

Quelle est la cause du mouvement circulaire ? Où, pourquoi et comment la voiture a-t-elle été déviée de sa trajectoire initialement rectiligne ?

Quand le conducteur actionne le volant, la commande de direction fait pivoter les roues directrices. Lorsque les roues directrices pivotent, une force s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol, c'est la *force de guidage* (voir dossier ADILCA "*force de guidage*"). Il n'y a pas d'autre force à considérer dans l'étude du mouvement circulaire.



© association adilca reproduction interdite

Remarque : la force de guidage est orientée vers le centre de la trajectoire, d'où une confusion fréquente avec la force centripète, alors que ces deux forces n'ont aucun point commun (voir dossier ADILCA "*force centripète*").

L'objet posé sur le capot...

Où, pourquoi et comment la force centrifuge intervient-elle ?

Pour le comprendre, une expérience est nécessaire. Elle consiste à poser un objet quelconque sur le capot d'une voiture (par exemple un "cône de Lübeck") puis à se mettre en route, d'abord en ligne droite puis en courbe.



© association adilca reproduction interdite

L'expérience dite "du Cône de Lübeck"...

1. Si on observe la scène du haut d'une fenêtre, d'un balcon ou d'un hélicoptère en vol stationnaire, on constate que, dès que le conducteur fait pivoter les roues directrices, la voiture est déviée de sa trajectoire initiale et s'engage sur une trajectoire circulaire, tandis que le "cône de Lübeck" conserve une trajectoire parfaitement rectiligne.

L'explication est la suivante : le capot étant une surface lisse, la force de guidage ne peut se transmettre à l'objet qui conserve alors sa trajectoire initiale. L'objet en question n'est donc pas soumis à la moindre force, il est simplement livré à lui-même.

2. Si on observe le "cône de Lübeck" de l'intérieur de la voiture, par exemple par le biais d'une caméra embarquée, on constate que l'objet traverse le champ de vision avant d'être éjecté, comme s'il était animé d'une force apparente qui agirait sur son centre de gravité.

Cette force apparente, c'est la *force centrifuge*. Mais en réalité, cette force n'existe pas puisque le "cône de Lübeck" est simplement livré à lui-même.

Les deux référentiels

Pourquoi ces deux descriptions sont-elles contradictoires ? Parce qu'elles appartiennent à deux référentiels distincts :

1. Référentiel Terre : le mouvement du “cône de Lübeck” est décrit à partir d’un référentiel lié au globe terrestre, qualifié ici de référentiel absolu⁽²⁾.
2. Référentiel voiture : le mouvement du “cône de Lübeck” est décrit à partir d’un référentiel lié à l’habitacle de la voiture, qualifié ici de référentiel relatif. Dans ce cas, tous les repères extérieurs disparaissent et le mouvement du cône n’est qu’un *mouvement apparent*⁽³⁾.

En résumé : un référentiel relatif (ici la voiture) est un système isolé et indépendant qui interdit la moindre référence au mouvement réel. Autrement dit, un référentiel relatif doit être considéré comme parfaitement immobile, même si, en réalité, il ne l’est pas⁽⁴⁾.

Un principe valable pour toutes les forces d’inertie et parfaitement résumé dans cet aphorisme :

« Là où il y a un mouvement (de la voiture), il n’y a pas de force centrifuge. La force centrifuge n’apparaît qu’à condition d’ignorer le mouvement (de la voiture). »

Ce modèle d’explications va pouvoir s’appliquer à toutes les autres expériences censées prouver l’existence de la force centrifuge.

La mascotte suspendue au rétroviseur...

Installons-nous à bord d’une voiture munie d’une mascotte suspendue au rétroviseur intérieur. En ligne droite et à vitesse constante, la mascotte indique la verticale.

Observons ce qu’il se passe lorsque la voiture s’engage sur une trajectoire circulaire : de l’intérieur de l’habitacle (référentiel voiture), on constate que la mascotte s’incline sur le côté, comme animée d’une force apparente qui agirait sur son centre de gravité. Cette force apparente, c’est la force centrifuge.



© association adilca reproduction interdite

La mascotte suspendue au rétroviseur...

En réalité, dans le référentiel Terre, il n’y a pas de force centrifuge : la mascotte est simplement déviée d’une trajectoire rectiligne.

En effet, la force de guidage s'exerce d'abord sur les pneumatiques des roues directrices puis se transmet ensuite intégralement au châssis, à la carrosserie et à tous les accessoires qui y sont solidement fixés, rétroviseur compris. Cette force parvient enfin à la mascotte grâce au fil au bout duquel elle pend. D'où son inclinaison.

La force centrifuge qui, pour le passager, semble faire bouger la mascotte ne relève donc que d'une simple illusion d'optique.

Le mouvement des passagers...

À l'occasion d'un virage pris sur les chapeaux de roues, les passagers d'une voiture sont plaqués contre le bord du fauteuil ou contre la portière, comme s'ils étaient animés d'une force apparente...

D'où vient ce mouvement ? S'agit-il d'une manifestation de la force centrifuge ?

Lorsque le conducteur tourne le volant, la voiture est soumise à la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques des roues directrices ; cette force se transmet ensuite aux roues, au châssis, à la carrosserie et à tous les accessoires de la voiture.

Les objets solidement fixés à la carrosserie subissent cette force intégralement et sans retard, l'arrimage consistant justement à donner à la carrosserie les moyens de communiquer cette fameuse force à tout ce qui se trouve dans la voiture.

Mais ce n'est pas le cas des passagers qui, bien que confortablement installés dans leurs fauteuils, gardent tout de même une certaine liberté de mouvement : lorsque la voiture commence à virer, les passagers conservent une trajectoire rectiligne, tout comme la mascotte dans l'expérience précédente, et ce jusqu'à ce que le bord du fauteuil, la portière ou la carrosserie leur communique cette fameuse force de guidage.

Ce n'est donc pas la force centrifuge qui se manifeste, mais la force de guidage qui s'exerce, d'abord sur la voiture, et ensuite sur les passagers par contact avec le fauteuil, la portière ou tout autre élément de la carrosserie.

Le mouvement des bagages...

Examinons le mouvement des bagages placés dans le coffre ou des objets posés sur la tablette arrière.

L'explication est identique à celle qui concerne les passagers : lorsque la voiture vire, le mouvement des bagages placés dans le coffre ou des objets posés sur la tablette arrière n'est qu'apparent, par rapport à la voiture.

En réalité, les objets non solidement arrimés conservent une trajectoire rectiligne tant qu'une partie quelconque de la carrosserie ne peut leur communiquer la moindre force de guidage.

Conclusion : il n'y a pas de force centrifuge, ni dans l'habitacle, ni sur la tablette arrière, ni dans le coffre !

Force centrifuge : la véritable définition

Ces diverses observations nous amènent à cette définition originale et inédite de la force centrifuge :

« Dans le référentiel voiture, on appelle force centrifuge la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité des passagers et des bagages d'une voiture immobile afin de les voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité lorsque la voiture est soumise à la force de guidage. »

Soulignons les trois exigences de cette définition :

1. L'immobilité de la voiture.
2. Le caractère hypothétique de cette force, clairement affirmé par l'emploi du conditionnel : "*la force qu'il faudrait exercer...*"
3. Le point d'application de cette force (le centre de gravité) et l'impossibilité d'y exercer directement la moindre force (cette exigence seule suffirait à prouver le caractère irréel de la force centrifuge).

Cette définition précise que le référentiel dont il s'agit ici est le référentiel voiture, avec toutes les réserves que cela implique. Ce qui amène une autre question : la force centrifuge pourrait-elle apparaître dans un référentiel lié au globe terrestre ?

Le mouvement de roulis...

Observons une Citroën 2 CV en plein virage. À cause de ses suspensions molles, la voiture s'écrase sur les roues extérieures tandis que les roues intérieures sont délestées. Ce phénomène, c'est le "roulis" qu'on attribue à tort à la force centrifuge.

Pourquoi la voiture se comporte-t-elle ainsi ? Pour dévier la voiture de sa trajectoire initialement rectiligne, le conducteur a dû solliciter une force transversale qu'on appelle force de guidage. Cette force s'exerce sur les pneumatiques des roues directrices au contact du sol, mais pas sur le centre de gravité.

C'est donc la hauteur du centre de gravité qui explique le mouvement de roulis : la voiture tourne sur elle-même autour d'un axe longitudinal, comme une personne déséquilibrée par un tapis qu'on tirerait sous ses pieds.

Si la force de guidage s'exerçait directement sur le centre de gravité, il n'y aurait pas de roulis et la voiture virerait "à plat". Le mouvement de roulis n'a donc rien à voir avec la force centrifuge.

Conclusion : il n'y a pas de force centrifuge, ni à l'intérieur de la voiture, ni à l'extérieur !

Dynamique ou statique ?

Cependant, l'observation du phénomène de roulis autorise deux descriptions possibles d'un même phénomène :

1. Une description réelle, dite "*dynamique*", qui décrit la trajectoire de la voiture et son mouvement de roulis, grâce au concept de force de guidage.
2. Une description imaginaire, dite "*statique*" qui considère que la voiture est strictement immobile. Auquel cas il faudrait imaginer une force capable de créer un mouvement de roulis artificiel.

C'est ici qu'intervient le concept de force centrifuge avec cette autre définition, tout aussi originale et inédite que la précédente :

« Dans le référentiel Terre, on appelle force centrifuge la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile afin de créer sur les pneumatiques et les suspensions un effet identique à celui observé dans la réalité lorsque la voiture est soumise à la force de guidage. »

Les trois exigences précédemment énoncées restent évidemment valables :

1. L'immobilité de la voiture.
2. Le caractère hypothétique de cette force, clairement affirmé par l'emploi du conditionnel : "*la force qu'il faudrait exercer...*"
3. Le point d'application de cette force (le centre de gravité de la voiture) et l'impossibilité physique d'y exercer directement la moindre force (cette exigence seule suffirait à prouver le caractère irréel de la force centrifuge).

Et l'aphorisme également :

« Là où il y a un mouvement, il n'y a pas de force centrifuge. La force centrifuge n'apparaît qu'à condition de supprimer le mouvement. »

Remarque de bon sens : faut-il rappeler que les véhicules terrestres sont, par définition, des machines conçues pour le mouvement et destinées à satisfaire des besoins de déplacement par rapport à la Terre ?

Par conséquent, la description de forces imaginaires qui, grâce à la pensée magique, pourraient éventuellement s'exercer sur le centre de gravité de voitures immobiles ne présente strictement aucun intérêt.

Le principe de réciprocité

Pourrait-on considérer la force centrifuge comme résultant du troisième principe de Newton, également appelé principe de réciprocité ? Voici ce qu'énonce ce principe si souvent passé sous silence ou si mal interprété ⁽⁵⁾ :

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

Les expériences précédentes ont démontré que la force centrifuge est une force imaginaire et que la trajectoire circulaire de la voiture est due à l'action d'une seule force, la force de guidage. On l'a vu, la force de guidage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol, elle résulte d'une interaction entre la Terre et la voiture. Logiquement, l'action réciproque se manifeste également au niveau du sol.

Effectivement, lorsqu'un conducteur sollicite la force de guidage, les pneumatiques des roues directrices exercent une action réciproque sur le sol, d'une intensité strictement égale à celle de la force de guidage, mais de sens opposé.

Cette action réciproque consiste en une poussée horizontale qui devrait logiquement affecter le mouvement de rotation du globe terrestre. Heureusement, son effet reste purement théorique car, la masse de la voiture étant considérablement plus faible que celle du globe terrestre, la voiture n'a pas d'autre possibilité que de s'inscrire docilement sur une trajectoire circulaire, ou de glisser. Ajoutons que les trajectoires divergentes du très grand nombre de véhicules en circulation neutraliseraient cet effet, si celui-ci était perceptible ⁽⁶⁾.

Cette fameuse action réciproque existe donc bien, mais n'a strictement rien à voir avec le concept de force centrifuge.

Les sensations des passagers...

L'emploi abusif du concept de force centrifuge a fait croire aux automobilistes qu'ils pouvaient ressentir les effets d'une force imaginaire, cette pseudo-sensation étant supposée prouver son existence.

Détaillons le mécanisme du mouvement circulaire : la force de guidage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol, elle se transmet ensuite aux passagers par l'intermédiaire des roues, du châssis, de la carrosserie et des fauteuils.

Le principe de réciprocité s'applique alors : puisque les passagers sont soumis à la force de guidage provenant de la carrosserie et des fauteuils, ils exercent une *action réciproque* sur les fauteuils et la carrosserie, d'égale intensité mais de sens opposé.

Par conséquent, ce que ressentent les passagers, c'est cette *action réciproque* et non la force centrifuge. Logiquement d'ailleurs, il est évidemment impossible d'observer ou de ressentir les effets d'une force imaginaire.

La bonne formule ?

La célèbre formule magique $F = MV^2/R$ prouve-t-elle l'existence de la force centrifuge ? Vérifions d'abord qu'il s'agit-il bien d'une force.

Dans le Système International d'Unités (obligatoire en France depuis 1961), une force s'exprime en *kilogramme mètre par seconde carrée* (symbole kg.m.s^{-2}), c'est une grandeur dérivée obtenue par combinaison de grandeurs fondamentales. La dimension obtenue est la définition même du *newton* (symbole **N**), unité internationale de force.

Afin de vérifier la cohérence de cette formule, examinons la manière dont se combinent les différentes grandeurs introduites dans cette équation : la masse s'exprime en kilogramme (symbole **kg**), la vitesse s'exprime en mètres par seconde (symbole m.s^{-1}) et le rayon de la trajectoire s'exprime en mètres (symbole **m**).

Combinons ces différentes grandeurs :

$$F = M V^2 / R$$

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

Il n'y a pas de doute possible, cette formule est parfaitement cohérente, elle exprime donc bien la dimension d'une force.

Une force oui, mais laquelle ?

FORMULE DE LA FORCE CENTRIFUGE

Force centrifuge = $\frac{\text{Masse du véhicule} \times \text{Vitesse au carré}}{\text{Rayon de virage}}$

$$FC = \frac{MV^2}{R}$$

FORMATION DU CONDUCTEUR BEPECASER 54.1

© association adilca reproduction interdite

La bonne formule, mais pas la bonne force !
(Document du ministère des transports, France)

De quelle force s'agit-il ?

De quelle force s'agit-il ? Nous avons déjà démontré par ailleurs qu'il n'y avait que deux possibilités, et deux seulement :

- dans le référentiel voiture, la *force centrifuge* qui est une force apparente et qui, de toute évidence, ne peut agir que sur les passagers et les bagages, mais pas sur la voiture ;
- dans le référentiel Terre, la *force de guidage* qui est une force réelle et qui s'exerce à la fois sur la voiture et sur tout ce qu'elle contient.

Comment les distinguer ?

La réponse vient tout naturellement en examinant les différentes grandeurs introduites dans l'équation que sont la *masse* de la voiture, sa *vitesse* et le *rayon de sa trajectoire* : ces grandeurs n'existent pas dans le référentiel voiture, elles n'existent que dans le référentiel Terre !

Pour bien comprendre cette nuance de taille, essayez d'imaginer un instant ce que pourrait représenter la vitesse de la voiture ou le rayon de sa trajectoire en raisonnant exclusivement dans le référentiel voiture...

La preuve est ainsi faite, cette fameuse formule n'exprime pas la force centrifuge, mais bien la force de guidage. C'est d'elle qu'il s'agit ici, et d'elle seulement.

Calcul de la force centrifuge

Peut-on calculer l'intensité de la force centrifuge ? Oui, il est tout à fait possible de calculer l'intensité d'une force imaginaire, c'est-à-dire l'intensité d'une force qui n'existe pas, mais qu'il faudrait solliciter, si... Cependant, en ce qui concerne la force centrifuge, la démarche habituellement présentée n'est pas la bonne, voici pourquoi.

Commençons par le commencement : en science, un bon principe consiste à se demander d'où provient la valeur que l'on a sous les yeux, ce qu'elle signifie, et comment elle a été obtenue. Un principe de traçabilité, en quelque sorte.

Car, avant tout calcul, un physicien doit d'abord réaliser des expériences et pour cela, définir des repères et effectuer des mesures. C'est le cheminement le plus important. Les calculs ne viennent qu'ensuite, mais ils se basent forcément sur des mesures concrètes, des valeurs numériques dont on peut garantir l'origine et la signification, bref, des grandeurs qui existent vraiment.

Ce n'est qu'ultérieurement, par la grâce d'un raisonnement purement théorique, que le physicien pourra transposer son raisonnement à l'étude d'un phénomène imaginaire. En d'autres termes, pour arriver une force imaginaire (la force centrifuge), il faut nécessairement partir d'une force réelle (la force de guidage).

Mais l'inverse n'est pas vrai : la force de guidage peut parfaitement être étudiée seule et suffit à tout expliquer, tandis que la force centrifuge est toujours obligatoirement tributaire de la force de guidage.

Dès lors, il est strictement interdit d'évoquer la force centrifuge sans expliquer d'où elle vient, ce qu'elle représente et comment elle a été obtenue. La traçabilité du raisonnement, c'est cela.

Ce sont les détails de cette démarche, somme toute très logique, qui ont été souvent ignorés ou occultés. Pour l'illustrer, voici un exemple concret.

Un exemple concret

Considérons une voiture de masse 1 500 kg qui décrit une trajectoire circulaire de 100 m de rayon à la vitesse de 20 m.s⁻¹.

La célèbre formule, celle qui a été si souvent détournée ou utilisée à tort et à travers et dont nous avons détaillé le mode d'emploi, permet de calculer l'intensité de la force de guidage **F** qui s'est exercée sur les pneumatiques de la voiture au contact du sol :

$$F = M V^2 / R$$

$$F = 1\ 500 \times 20^2 / 100 = 6\ 000\ \text{N}$$

L'accélération transversale correspondante est :

$$Y = V^2 / R$$

$$Y = 20^2 / 100 = 4\ \text{m.s}^{-2}$$

Ce n'est qu'à partir de ce résultat qu'on peut en déduire l'intensité de la force centrifuge **F'**, cette fameuse force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité de la voiture, si celle-ci était immobile, afin de produire un effet comparable à celui observé dans la réalité. Quelle formule utiliser ? Celle-ci, et uniquement celle-ci :

$$F' = - M Y = - F$$

Le calcul est alors vite fait : pour obtenir un effet comparable à celui observé dans la réalité, il faudrait mobiliser une force de **- 6 000 N**.

Autrement dit, à une force de guidage de **6 000 N** dans une description réelle correspond une force centrifuge de **- 6 000 N** dans une description imaginaire, d'où la confusion.

En effet, les vecteurs "force de guidage" et "force centrifuge" ont le même module. Mais attention, tout les distingue :

- les relations utilisées ;
- les points d'application (l'un de ces deux vecteurs trouve son origine à la périphérie des pneumatiques, l'autre au centre de gravité) ;

- les directions (ici, le signe [-] souvent oublié est déterminant, il montre que la force centrifuge, si elle existait, devrait avoir une orientation spatiale contraire à celle de la force de guidage) ;
- et le fait que l'un de ces deux vecteurs s'applique sur une voiture en mouvement, l'autre sur une voiture immobile.

En résumé, ces deux vecteurs n'appartiennent pas à la même description.

Conclusion : l'intensité de la force centrifuge se déduit de celle de la force de guidage, jamais l'inverse. Et la formule censée prouver l'existence de la force centrifuge résulte en réalité d'une confusion avec celle utilisée pour la force de guidage.

Le capteur à inertie...

Un simple capteur à inertie (appareil encore appelé capteur d'accélération transversale) permet-il de mesurer l'intensité de la force centrifuge ?

Détaillons le principe de fonctionnement de cet appareil : une masselotte, capable de coulisser dans un tube, est maintenue au repos par deux ressorts, mais peut néanmoins se déplacer le long d'un curseur en cas d'accélération transversale, c'est le principe du dynamomètre. L'ensemble est solidement fixé à la carrosserie de la voiture.

Reprenons l'exemple de la voiture qui décrit une trajectoire circulaire de 100 m de rayon à la vitesse de 20 m.s⁻¹.

Dans ces conditions, si la masselotte a une masse de 10⁻² kg et si l'appareil est correctement étalonné, le curseur va indiquer une force transversale de 4 x 10⁻² N, c'est la force nécessaire pour courber la trajectoire de la masselotte. La relation fondamentale de la dynamique permet ensuite de calculer l'accélération transversale de la masselotte :

$$Y = F / M$$

$$Y = 4 \times 10^{-2} / 10^{-2} = 4 \text{ m.s}^{-2}$$

On remarque que cette accélération transversale a une valeur strictement égale à celle de la voiture, ce qui n'a rien d'étonnant puisque, le capteur étant solidement fixé à la carrosserie, il décrit une trajectoire identique.

Comme il n'y a pas de mouvement sans cause, on en déduit que l'accélération transversale de la masselotte provient de la force de guidage qui s'est exercée sur la voiture pour imposer une trajectoire circulaire à l'ensemble.

Autrement dit, le capteur à inertie mesure l'intensité de la force de guidage, valeur de laquelle on peut ensuite déduire celle de la force centrifuge, mais son principe de fonctionnement n'a strictement rien à voir avec le concept de force imaginaire.

Newton et la force centrifuge

À qui doit-on le concept de force centrifuge ? Dans l'ouvrage fondateur de la physique moderne (« *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* »), Isaac Newton distingue deux types de forces :

« *Materiæ vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodq;, quantum in se est, persevererat in statu quo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.* »

« *Vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.* »

Voici la traduction d'Émilie de Breteuil, physicienne française (1706 - 1749), extraite d'un ouvrage intitulé « *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* » publié à Paris en 1759 :

« *La force qui réside dans la matière (vis insita) est le pouvoir qu'elle a de résister. C'est par cette force que tout corps persévère de lui-même dans son état actuel de repos ou de mouvement en ligne droite.* »

« *La force imprimée (vis impressa) est l'action par laquelle l'état du corps est changé, soit que cet état soit le repos, ou le mouvement uniforme en ligne droite.* »

Dans sa traduction, Émilie de Breteuil a pris soin de reproduire les termes mêmes utilisés par Newton : « *vis insita* », « *vis impressa* », pour bien distinguer deux concepts. En effet, d'après le dictionnaire Gaffiot, le mot latin « *vis* » peut se traduire par « *force* », mais aussi et selon le cas, par « *vigueur, puissance, influence, violence, essence...* » Et sans doute aussi par « *pouvoir, principe...* » etc.

C'est pourquoi l'expression « *vis insita* » employée par Newton sera définitivement comprise comme désignant le « *principe d'inertie* », tandis que l'expression « *vis impressa* » sera réservée au concept de « *force* », au sens physique et littéral du terme.

À laquelle de ces deux catégories la force centrifuge appartient-elle ? L'expérience de la trajectoire circulaire montre qu'il n'existe pas de « *vis impressa* » s'exerçant dans le prolongement d'un rayon. Dès lors, ce que l'on appelle *force centrifuge* désigne une « *vis insita* », c'est-à-dire un principe, le *principe d'inertie* appliqué au mouvement circulaire.

Voici l'énoncé moderne de ce principe :

« *Une masse en mouvement sur laquelle ne s'exerce aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne.* »

Un principe qu'on devrait plutôt qualifier de « *principe d'inertie rectiligne* » pour éviter tout malentendu. Le concept de force se déduit de ce principe :

« *Une force désigne toute cause capable de dévier la trajectoire d'une masse.* »

En résumé : il n'y a pas de force centrifuge dans l'œuvre de Newton mais uniquement un principe, ce fameux *principe d'inertie* qui s'applique aussi bien au mouvement de translation qu'au mouvement de rotation.

L'inventeur de la force centrifuge

Le terme « *force centrifuge* » a été inventé par Christiaan Huygens, mathématicien et physicien néerlandais (1629 - 1695) pour décrire le rapport entre l'*inertie* d'une masse en mouvement (au sens *newtonien* du terme) et la *force* nécessaire pour courber sa trajectoire. Une appellation doublement trompeuse pour un principe qui n'est pas une force, et une force qui n'a rien de centrifuge : la « *vis centrifuga* » d'Huygens ne désigne rien d'autre que la « *vis insita* » de Newton.

Au sens moderne du terme, la force centrifuge est une *force fictive* qui relève de la *Statique*, un mode de raisonnement initié par Jean Le Rond d'Alembert, mathématicien et physicien français (1717 - 1783). L'inventeur des forces fictives, c'est lui. Se penchant sur l'œuvre de Newton et la jugeant incomplète, d'Alembert proposa de ramener les questions de dynamique à des questions de statique en postulant que tout système accéléré pouvait être décrit comme s'il était immobile, cette *inertie* (au vrai sens du terme) nécessitant l'introduction d'une *force fictive* pour expliquer un mouvement apparent. Cette force fictive est appelée *force d'inertie*, *force d'inertie centrifuge* ou, plus simplement, *force centrifuge*.

Dans un ouvrage au titre paradoxal (« *Traité de dynamique* ») publié à Paris en 1743, d'Alembert livre ainsi la clé du raisonnement :

« À chaque instant, il y aurait équilibre entre les forces agissant réellement sur un ensemble de points matériels en mouvement, et les forces d'inertie des divers points du système, si celles-ci venaient à agir. »

Le mot « *équilibre* » a pu laisser croire que ces deux forces agissaient ensemble, mais si c'était le cas, elles se neutraliseraient. Dès lors, d'Alembert aurait employé l'expression « *se détruisent* », puisque tel est le terme qu'il utilise par ailleurs. Par conséquent, sous la plume de D'Alembert, le mot « *équilibre* » doit être compris comme signifiant « *équivalence* ».

La phrase de D'Alembert est alors parfaitement claire : les deux forces sont égales et opposées mais n'agissent pas en même temps. Il y a les forces réelles d'un côté (en *dynamique*), et les forces d'inertie, de l'autre (en *statique*), les deux descriptions étant parfaitement distinctes. De plus, l'emploi du conditionnel (« *il y aurait équivalence... si celles-ci venaient à agir* ») montre bien que les forces d'inertie n'agissent pas en réalité : ce sont des *forces imaginaires*, plus pudiquement appelées *forces fictives*⁽⁷⁾.

Le rôle des professeurs

Vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le concept de force d'inertie, légitimé par les travaux de Gaspard Coriolis, ingénieur militaire français (1792 - 1843), l'inventeur de la force qui

porte son nom, voir le dossier ADILCA “*force de Coriolis*”), suscita un regain d’intérêt parmi les professeurs soucieux d’actualiser leur enseignement en période de guerre.

Quel rôle les enseignants ont-ils joué par la suite ? Il est bien évident qu’aucun professeur de physique digne de ce nom n’a jamais pu confondre le réel et l’imaginaire.

Malheureusement, la plupart de ces enseignants sont restés confinés dans des salles de cours, des amphithéâtres ou des laboratoires, ils ont donc axé leur enseignement sur ces fameux concepts irréels. Peu soucieux de pragmatisme, ils ont oublié d’en délivrer le mode d’emploi.

Le résultat est là : au fil du temps, des cours et des programmes scolaires, les descriptions imaginaires ont progressivement supplanté les descriptions réelles.

Le vrai sens du mot “exister”...

C’est sans doute la raison pour laquelle le concept de force centrifuge occupe une place centrale dans la plupart des manuels de physique (pour ne pas dire tous), tandis que les pseudo-physiciens⁽⁸⁾ s’y réfèrent dès qu’il est question de mouvement circulaire.

Ce matraquage a pu faire croire aux béotiens que la force centrifuge existait vraiment. Peut-on croire à tout ce qui est écrit dans les livres ?

Avant de répondre à cette question, souvenons-nous que la *physique* désigne d’abord et avant tout la science des phénomènes naturels, une discipline axée sur l’observation, la connaissance et la maîtrise du monde qui nous entoure⁽⁹⁾. Cependant, la physique, science dure, concrète et rigoureuse, s’accommode aussi de raisonnements abstraits, d’où le risque de malentendu.

Le malentendu à propos de la force centrifuge repose sur le véritable sens du verbe “*exister*”. D’après le dictionnaire Larousse, ce verbe s’applique à tout ce qui fait partie de la réalité, par opposition à ce qui relève exclusivement de la fiction.

Le fait que certains ouvrages de physique fassent mention de la force centrifuge ne prouve pas son *existence*, au sens physique et littéral du terme. On peut concevoir bien des abstractions sur le papier, et la plupart des concepts ainsi présentés sont parfaitement corrects, mais en science et surtout en physique, seule la réalité importe. Ne dit-on pas qu’elle dépasse la fiction ?

L’exemple de la littérature

Pour illustrer cette nuance, regardons du côté de la littérature et posons-nous cette question : les personnages qu’on trouve dans les livres existent-ils vraiment ? Voici un exemple universel : le Père Noël !

Il y a une multitude de contes pour enfants centrés autour du Père Noël, et dans ce cas, le Père Noël existe bien, dans le récit comme sur le papier. On peut y croire, mais cela ne suffit pas à prouver son *existence* au sens physique et littéral du terme.

Et pour cause : le Père Noël est un personnage imaginaire, pas un personnage historique. Personne n'a jamais pu, ni ne pourra jamais le croiser dans la rue. Autrement dit, le Père Noël n'*existe* pas, au sens physique et littéral du terme.

On en déduit que le verbe "*exister*" peut prendre deux significations qui ne sont absolument pas équivalentes. Ce qui existe dans les livres n'existe pas forcément dans la réalité, en littérature comme en physique.

Persistons et signons : le Père Noël n'existe pas, la force centrifuge non plus !

Conclusion

Qu'appelle-t-on force centrifuge ?

- En langage courant, la force centrifuge désigne le *principe d'inertie rectiligne*. Une double confusion consacrée par l'usage : un principe n'est pas une force, et l'inertie rectiligne n'a rien de centrifuge.

- Du point de vue scientifique, la force centrifuge est une *force imaginaire* qui relève de la *statique* : c'est la force qu'il faudrait exercer sur un *objet immobile* pour le voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité.

En résumé : la force centrifuge n'existe pas. C'est donc à tort si ce concept a été utilisé pour décrire les phénomènes observés en automobile. Comment alors expliquer le mouvement réel ?

La trajectoire normale d'une voiture est rectiligne par nature. Pour dévier cette trajectoire, le conducteur doit solliciter une force transversale qu'on appelle *force de guidage* : c'est la force de contact qui s'exerce à la périphérie des pneumatiques des roues directrices lorsque le conducteur actionne la commande de direction.

Tous les autres phénomènes observés en automobile ont des explications claires, logiques et rationnelles qui n'ont rien à voir avec le concept de force centrifuge.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

Notes et remarques

- (1) Un système de repérage comprend trois axes orthogonaux (longueur, largeur, hauteur) liés par une origine commune, auxquels on associe une mesure de temps (chronomètre).
- (2) La Terre est le référentiel absolu pour décrire le mouvement des véhicules terrestres puisque ceux-ci se déplacent par rapport à la Terre. Attention : un même référentiel peut être tantôt absolu (on dit aussi : inertielle ou galiléenne), tantôt relatif (on dit aussi : non inertielle ou non galiléenne) selon l'objet de l'étude. Ainsi, la Terre devient un référentiel relatif pour décrire le mouvement des planètes du système solaire puisque celles-ci se déplacent par rapport au Soleil (voir dossier ADILCA "système solaire").
- (3) Par définition, un mouvement apparent est celui que perçoit un observateur posté dans un référentiel relatif, c'est-à-dire privé de tout repère extérieur et supposé immobile. Le Soleil, par exemple, est animé d'un mouvement apparent pour qui l'observe depuis la Terre en étant persuadé que le globe terrestre est immobile (voir dossier ADILCA "référentiels").
- (4) Par convention, tout référentiel, qu'il soit absolu ou relatif, doit être considéré comme parfaitement immobile, c'est son unique raison d'être et la clé de tout raisonnement.
- (5) Dans une description imaginaire, les interactions n'existent pas : pas de force réelle, pas d'action réciproque. Autrement dit, ce principe ne s'applique jamais à des forces fictives.
- (6) La force de guidage provient du globe terrestre et s'exerce sur la voiture, l'action réciproque provient de la voiture et s'exerce sur le globe terrestre. Ces deux forces sont égales mais leurs effets sont inversement proportionnels à la masse sur laquelle elles s'exercent, c'est le deuxième principe de Newton (relation fondamentale de la dynamique $[F = M Y]$ d'où $[Y = F / M]$). Ainsi, si on compare une voiture de 2 tonnes et le globe terrestre (6×10^{24} kg), le rapport des masses est de 1 pour 3×10^{21} , soit 1 pour 3 000 milliards de milliards. La Terre ne subit donc aucune perturbation (voir dossier ADILCA "Isaac Newton").
- (7) Ne pas confondre le concept de force d'inertie de D'Alembert (raisonnement "statique" faisant intervenir une force imaginaire) avec le principe d'inertie d'Isaac Newton (raisonnement "dynamique" duquel on déduit, soit l'absence de force, soit la présence d'une force réelle). Le principe d'inertie d'Isaac Newton (également appelé "premier principe de dynamique"), énonce que « Toute masse immobile sur laquelle ne s'exerce aucune force reste parfaitement immobile. Toute masse en mouvement sur laquelle ne s'exerce aucune force conserve intégralement sa vitesse et décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. » La notion de force se déduit de ce principe et peut se définir ainsi : « Une force désigne toute cause capable d'agir sur la vitesse ou sur la trajectoire d'une masse. »
- (8) Pseudo-physicien : physicien incapable de raisonner sans recourir à des pseudo-forces, le comble étant que le mouvement des automobiles est souvent donné comme exemple.
- (9) La physique, ou "sciences physiques" est la discipline qui, à l'époque de Copernic, Galilée et Newton, était appelée "Philosophie de la nature".

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

III. FORCE CENTRIFUGE : LE MODE DE CALCUL

1. Calcul de la force de guidage :

$$F = M \cdot V^2 / R$$

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

M : masse, exprimée en **kg**

V : vitesse, exprimée en **m.s⁻¹**

R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

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

Exemple 1 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes pour la maintenir sur une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$F = 1\,500 \times 20^2 / 100 = 1\,500 \times 400 / 100 = 6\,000 \text{ N}$$

Cette force s'exerce au contact du sol. En vertu du principe de réciprocité, les pneumatiques exercent une action réciproque sur le globe terrestre, de même intensité mais de sens opposé.

Exemple 2 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur un passager de masse 100 kilogrammes lorsqu'une voiture décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$F = 100 \times 20^2 / 100 = 100 \times 400 / 100 = 400 \text{ N}$$

Cette force s'exerce sur le passager par l'intermédiaire de la carrosserie et du fauteuil. En vertu du principe de réciprocité, le passager exerce une action réciproque sur le fauteuil et la carrosserie, de même intensité mais de sens opposé. Le passager ressent parfaitement cette action réciproque qui a été interprétée à tort comme étant une manifestation de la force centrifuge.

2. Calcul de l'action réciproque :

$$A = - M \cdot V^2 / R$$

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

M : masse, exprimée en **kg**

V : vitesse, exprimée en **m.s⁻¹**

R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

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

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

Exemple 1 : calculons l'action réciproque que les pneumatiques exercent sur le globe terrestre lorsqu'une voiture de masse 1 500 kilogrammes décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$A = - 1\,500 \times 20^2 / 100 = - 1\,500 \times 400 / 100 = - 6\,000 \text{ N}$$

Le globe terrestre est insensible à cette action en raison du rapport des masses en interaction. Calculons ce rapport : globe terrestre (6×10^{24} kg) *versus* voiture ($1,5 \times 10^3$ kg) = 4×10^{21} .

Exemple 2 : calculons l'action réciproque qu'un passager de masse 100 kilogrammes exerce sur le fauteuil et la carrosserie de la voiture lorsque celle-ci décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$A = - 100 \times 20^2 / 100 = - 100 \times 400 / 100 = - 400 \text{ N}$$

Le passager ressent parfaitement cette action réciproque qui lui donne l'impression de peser sur le bord du fauteuil ou de la carrosserie. C'est pourquoi la carrosserie doit être suffisamment rigide, et le fauteuil suffisamment bien fixé. La voiture reste insensible à cette action en raison du rapport des masses en interaction. Calculons ce rapport : voiture (1 500 kg) *versus* passager (100 kg) = 15.

3. Calcul de l'accélération transversale :

$$Y = F / M$$

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes décrivant une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$Y = 6\,000 / 1\,500 = 4 \text{ m.s}^{-2}$$

4. Calcul de la force centrifuge :

$$F' = - M \cdot Y$$

F' : force centrifuge, exprimée en **N**

M : masse, exprimée en **kg**

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

cohérence des unités : $F' = \text{kg} \cdot \text{m.s}^{-2} = \text{N}$

(le signe [-] précise son orientation spatiale, contraire à la logique du mouvement)

Exemple 1 : calculons la force, dite "*force centrifuge*", qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile afin de créer, sur les suspensions et les pneumatiques, un effet comparable à celui observé dans la réalité lorsque la voiture est soumise à une accélération transversale de 4 mètres par seconde carrée :

$$F' = - 1\,500 \times 4 = - 6\,000 \text{ N}$$

Exemple 2 : calculons la force, dite “*force centrifuge*”, qu’il faudrait exercer sur le centre de gravité d’un passager de masse 100 kg installé à bord d’une voiture immobile afin de lui communiquer la même sensation que celle qu’il éprouve dans la réalité lorsque la voiture est soumise à une accélération transversale de 4 mètres par seconde carrée :

$$F' = - 100 \times 4 = - 400 \text{ N}$$

Remarque 1 : le signe [-] est obligatoire, il précise l’orientation spatiale de cette force, contraire à la logique du mouvement.

Remarque 2 : cette force est couramment nommée “*force centrifuge*”, ce qui est une appellation incorrecte puisqu’il n’y a ni trajectoire, ni rayon, ni centre (la voiture est immobile). Le vrai nom de cette force est : force imaginaire, force fictive ou pseudo-force.

Remarque 3 : attention à ne pas confondre la *force centrifuge* avec l’*action réciproque* : ces deux forces sont bien égales, mais la ressemblance s’arrête là :

- l’action réciproque est une force réelle que le passager ressent parfaitement et qu’il exerce par contact avec le fauteuil ou la carrosserie, en réponse à la force de guidage quand la voiture décrit une trajectoire circulaire.
- la force centrifuge est une force imaginaire qu’il est impossible de ressentir : c’est la force qu’il faudrait exercer sur le centre de gravité du passager, si la voiture était immobile.

Remarque 4 : la *traçabilité du raisonnement* impose d’effectuer les différents calculs dans l’ordre indiqué. Il est en effet impossible de calculer directement la force centrifuge sans passer par les étapes intermédiaires détaillées ci-dessus.

Remarque 5 : toute démarche scientifique passe par quatre étapes successives :

- 1) observer un *phénomène* (ici, une voiture qui décrit une trajectoire circulaire) ;
- 2) mesurer des *grandeurs* (ici : la masse de la voiture, sa vitesse et le rayon de sa trajectoire) ;
- 3) effectuer des *calculs* (ici : la force de guidage et l’accélération transversale) ;
- 4) éventuellement, transposer un *raisonnement* (ici : une question de dynamique ramenée à une question de statique, autrement dit une description réelle transformée en une description imaginaire, avec l’introduction du concept de force centrifuge).

Les trois premières étapes sont obligatoires, elles garantissent la traçabilité du raisonnement. La quatrième étape, facultative, n’apporte rien si ce n’est un risque de confusion entre réalité et fiction, d’où les nombreuses méprises au sujet de la force centrifuge.

IV. FORCE CENTRIFUGE : LES DESSINS

La force centrifuge n'existe pas, mais le concept imaginaire fait toujours recette dès qu'il s'agit de mouvement circulaire.

Plus grave, n'importe quel professeur vacciné à la force centrifuge se sent obligé de prendre l'automobile comme exemple pour faire partager ses certitudes. Et quoi de plus efficace qu'un beau dessin pour y parvenir ?

C'est bien là le problème : un beau dessin marque les esprits, mieux qu'une démonstration, mais il n'est pas forcément bon. C'est une évidence : tout croquis à vocation scientifique devrait être parfaitement juste, jusque dans les moindres détails. Sinon, il est toxique et contagieux.

Précisément, peut-on faire confiance aux dessins illustrant la force centrifuge ? Ne sont-ils pas révélateurs de ces confusions, comme autant d'aveux signés ? Sur quels critères peut-on juger de la valeur d'un dessin ?

Comment analyser un dessin

Un dessin pédagogique doit respecter certaines conditions :

1. La *légende* : elle doit préciser clairement si la description est dynamique ou statique. Dans une description dynamique, le véhicule est en mouvement, les forces sont réelles. Dans une description statique, le véhicule est immobile, les forces sont donc imaginaires. Attention : pas de mélange possible.

2. La présence d'un *vecteur vitesse* ou d'une *flèche trajectoire* : c'est la signature d'une description dynamique, ce qui exclut d'emblée la force centrifuge. En effet, là où il y a un mouvement, il n'y a pas de force centrifuge.

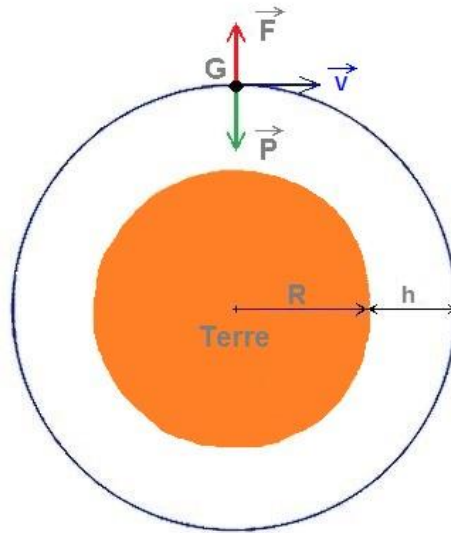
3. Le *centre de gravité* : si une seule force (autre que le poids) agit sur le centre de gravité, c'est la signature d'une description statique. En dynamique, les forces ne s'exercent jamais sur le centre de gravité (excepté le poids), mais uniquement en surface ou par contact. Statique ou dynamique, c'est l'une ou l'autre, mais pas les deux à la fois.

4. Le *nombre de forces* et leur disposition : deux forces égales et opposées agissant sur une même masse se neutralisent. De toutes manières, que la description soit statique ou dynamique, une seule force suffit pour expliquer un phénomène. Si le dessin en comprend deux ou trois, c'est une ou deux en trop.

Deux dessins toxiques

Presque tous les dessins censés illustrer la force centrifuge, pour ne pas dire tous, sont truffés d'incohérences. En voici deux exemples.

Premier exemple, ce dessin extrait d'un manuel de physique destiné à des lycéens de classes terminales :



Dessin sans légende, Physique "CESSAC & TRÉHERNE" Terminale D, page 62.
(© Éditions FERNAND NATHAN, Paris 1977).

Ce dessin est censé illustrer le mouvement d'un satellite "G" gravitant autour de la Terre (voir dossier ADILCA "*manuels scolaires*"). Pourquoi ce dessin est-il incohérent ?

- La présence d'un vecteur vitesse "v" et d'une trajectoire circulaire (cercle noir) prouve sans ambiguïté qu'il s'agit là d'une description dynamique, autrement dit que la force centrifuge n'a rien à y faire.

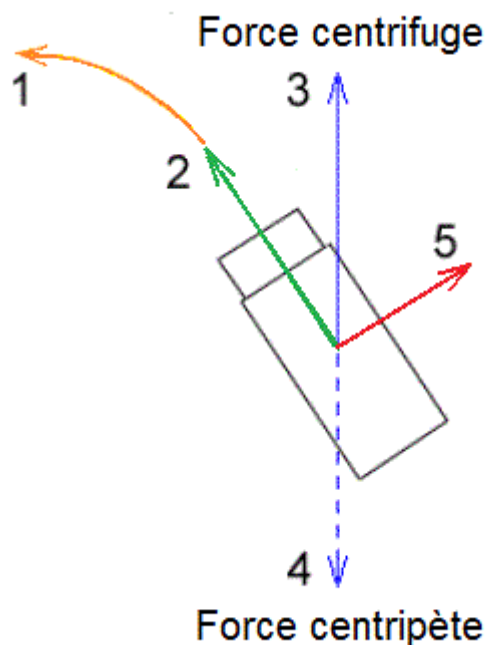
- Le vecteur "P" représente le poids du satellite, c'est la force centripète qui maintient l'engin en orbite circulaire autour de la Terre. Jusqu'ici, c'est correct.

- Le poids "P" agit sur le centre de gravité du satellite, mais la force centrifuge "F" aussi, prouve qu'il s'agit là d'une force imaginaire sortie d'une description statique. Mêlant dynamique et statique, le dessin devient incohérent.

- Allons plus loin dans la logique de ce dessin : Les deux forces "P" et "F" étant de même module mais de sens contraire, elles se neutralisent, donc *exit* le mouvement circulaire. Dans ce cas, le satellite n'étant plus soumis à la moindre force, il abandonnerait son orbite circulaire pour s'éloigner progressivement de la Terre sur une trajectoire rectiligne dont la direction est indiquée par "v". Une illustration contradictoire, c'est le moins qu'on puisse dire.

- Poursuivons la logique jusqu'au bout : pour maintenir une trajectoire circulaire, une de ces deux forces est manifestement de trop. Comme il n'est pas question d'ignorer le poids "P" du satellite, on en déduit que c'est la force centrifuge "F" qu'il faut supprimer. Parfaitement logique, puisque la force centrifuge n'existe pas. C.Q.F.D !

Deuxième exemple, ce dessin extrait d'un manuel de sécurité routière destiné à des conducteurs professionnels :



© association adilca reproduction interdite

Dessin sans légende, livret "FIMO-FCOS 2006" (éditions ENPC), page 21.
Seuls les numéros ont été rajoutés pour faciliter la "compréhension" du dessin.

Que faut-il penser de ce dessin ?

- La flèche 1 représente de toute évidence la trajectoire circulaire que va suivre le camion. On en déduit que le dessin propose une description dynamique, précision essentielle pour la suite car, dans une telle description, la force centrifuge n'existe pas. Cette remarque seule suffirait à disqualifier le dessin.

- Que représente la flèche 2 ? Si c'est une force, il ne peut s'agir que de la force de traction, mais que vient-elle faire ici, sinon compliquer la description ?

- On remarque ensuite que les flèches 3, 4 et 5 agissent sur le centre de gravité du camion. Comme aucune force ne peut s'exercer sur le centre de gravité, excepté le poids, il ne peut s'agir que de forces imaginaires.

- La flèche 3 est désignée comme étant cette fameuse force centrifuge. En réalité, il ne s'agit pas d'une force mais d'une trajectoire, celle que le camion aurait suivie si la force de guidage n'existait pas. Confusion entre force et trajectoire.

- La flèche 4 représente une force qui n'existe pas. De toute façon, il n'y a pas de force centripète en automobile (voir dossier ADILCA "force centripète").

- Pire : les forces 3 et 4 étant égales et opposées, elles se neutralisent !

- La flèche 5 ne porte pas de nom. Dans le cadre d'une description dynamique, cette force n'existe pas non plus, elle n'a donc rien à faire ici. L'auteur l'utilise néanmoins dans une improbable addition vectorielle avec la flèche 2, addition de laquelle résulte ce qu'il croit pouvoir nommer *force centrifuge* (flèche 3).

- Le comble : la seule force qui permettrait d'expliquer enfin la trajectoire circulaire du camion ne figure nulle part !

- Si le dessin proposait une description statique, la flèche 5 représenterait en effet la force centrifuge, mais attention, cette force serait alors la seule et unique à devoir figurer sur le dessin. Autrement dit, dans le cadre d'une description statique, il faudrait supprimer toutes les autres flèches et préciser dans la légende que la seule force figurant sur le dessin (cette fameuse force centrifuge) est une force imaginaire qui ne peut agir que sur un véhicule immobile.

Mais, quelle que soit l'explication, un seul dessin ne suffirait pas. En effet, il faudrait en ajouter un second pour la description dynamique faisant intervenir la force de guidage (voir dossier ADILCA "*force de guidage*"), ceci afin d'éviter toute confusion et expliquer (enfin !) l'origine du mouvement circulaire. Dans le cadre d'une démarche éducative, ce serait la moindre des choses. On en est loin.

Ce qu'il faut penser de ce dessin ? Incontestablement, il mérite la médaille d'or. Doit-on blâmer son auteur ? Non. Ses professeurs ? Oui.

Force centrifuge : la définition illustrée

Comment dessiner correctement une force imaginaire ? Reprenons la définition de la force centrifuge précédemment énoncée et appliquons-la au mouvement d'un cycliste qui décrit une trajectoire circulaire :

« On appelle force centrifuge la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'un cycliste immobile (on néglige la masse de la bicyclette) afin de le maintenir en équilibre malgré son inclinaison par rapport à la verticale. »

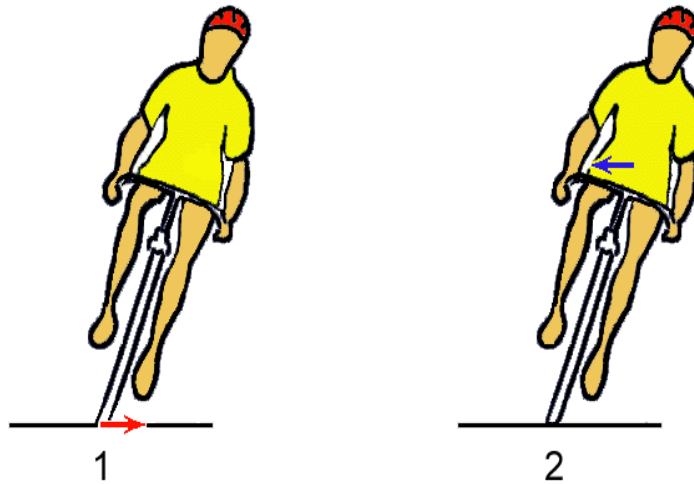
Rappelons les conditions de validité de cette définition :

1. le cycliste est parfaitement immobile ;

2. le qualificatif d'imaginaire qui caractérise cette force, ainsi que l'emploi du conditionnel qui souligne son caractère hypothétique : "*la force qu'il faudrait exercer...*" ;

3. l'impossibilité d'exercer directement la moindre force sur le centre de gravité d'une quelconque masse.

Pour illustrer cette définition, deux dessins sont nécessaires :



Pourquoi deux dessins ? Un seul suffirait pour expliquer le mouvement du cycliste, mais si l'on tient absolument à dessiner cette fameuse force centrifuge, il en faut un second. Naturellement, afin de dissiper tout malentendu, chaque dessin exige sa propre légende :

Dessin 1 : c'est la description réelle (dite "*dynamique*") : le cycliste est en mouvement, il décrit une trajectoire circulaire, il a été dévié d'une trajectoire rectiligne grâce à la *force de guidage* qui s'exerce sur les pneumatiques de la bicyclette au contact du sol (flèche rouge). Il n'y a rien à ajouter.

Dessin 2 : c'est une description imaginaire (dite "*statique*") : cette fois le cycliste est parfaitement immobile, il est penché mais ne tombe pas. C'est un vrai miracle : il se maintient en équilibre grâce à une force imaginaire qui agit sur son centre de gravité (flèche bleue). Cette force imaginaire qui fait tant fantasmer, c'est la *force centrifuge*.

Conclusion

La plupart des dessins censés illustrer le concept de force centrifuge sont truffés d'incohérences : absence de légende, mélange toxique de statique et de dynamique, centre de gravité surchargé, inflation de vecteurs, etc.

Entraînez-vous à déceler ces anomalies qui défient la logique et discréditent leurs auteurs, c'est un excellent exercice de bonne santé intellectuelle.

Enfin, lorsqu'un professeur s'échine à parler de force centrifuge, aussi sympathique et compétent soit-il, demandez-lui simplement de la dessiner. En examinant le dessin, vous saurez tout de suite s'il y a une erreur...

V. BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA (ouvrage collectif édité à compte d'auteurs) : *Guide des Lois Physiques de l'Automobile*, Paris 2010.
- CESSAC (Jean) & TRÉHERNE (Georges) : *Physique Terminale D*, éditions Fernand Nathan, Paris 1977.
- ENPC (auteur inconnu) : *Livret FIMO-FCOS*, éditions ENPC, Saint-Herblain 2006.
- GAFFIOT (Félix) : *Dictionnaire latin-français*, éditions Hachette, Paris 1934.
- HUYGENS (Christiaan) : *Œuvres complètes*, La Haye 1929.
- LE ROND D'ALEMBERT (Jean) : *Traité de dynamique*, Paris 1743.
- LE TONNELIER DE BRETEUIL (Gabrielle Émilie, marquise du Chastellet) : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (traduction française intégrale de « *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* » d'Isaac Newton), Paris 1759.
- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *