

LA FORCE CENTRIFUGE

(désigné comme meilleur dossier du web consacré à la force centrifuge)

I. CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LA FORCE CENTRIFUGE

II. FORCE CENTRIFUGE : LE MODE DE CALCUL

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

III. FORCE CENTRIFUGE : LES DESSINS

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LA FORCE CENTRIFUGE

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 fictives ou pseudo-forces.

Pourquoi les appelle-t-on ainsi ? Parce que ces forces ne peuvent apparaître que dans le cadre de descriptions imaginaires. En réalité, ces forces n'existent pas.

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

Quelques définitions

Un *référentiel* désigne un ensemble de repères à partir desquels on peut mesurer les caractéristiques du *mouvement* d'une masse (distance parcourue, vitesse, rayon de trajectoire).

Une *force* désigne toute cause capable de modifier la *vitesse* ou la *trajectoire* d'une masse.

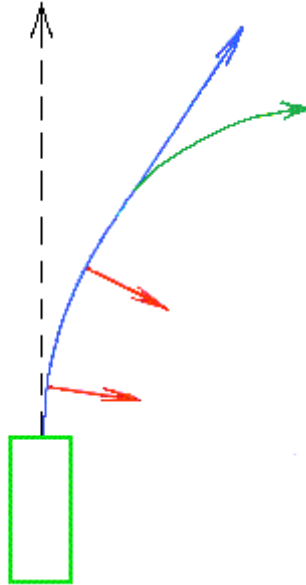
Centrifuge signifie "*qui éloigne du centre*".

Ainsi, selon cette définition, 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 franchit un virage : on constate que les trajectoires possibles sont au nombre de trois, et trois seulement, tandis que la voiture ne s'éloigne jamais sur une trajectoire radiale :

1. Le conducteur ignore le virage, 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 le virage (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 quand même. Ce qui nous ramène au scénario numéro 2.



© association adilca reproduction interdite

Les trois trajectoires possibles :

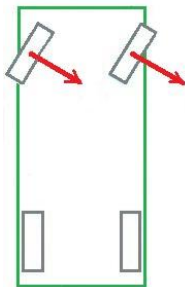
1. Le conducteur ignore le virage et continue tout droit (flèche noire pointillée).
2. Le conducteur franchit normalement le virage (flèche verte).
3. Le conducteur fait une sortie de route (flèche bleue).

La cause capable de modifier la trajectoire de la voiture est représentée en rouge.
(Attention à ne pas mélanger les forces et les trajectoires !).

... et une force unique !

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*"). Cette force est l'unique cause du mouvement circulaire.



© association adilca reproduction interdite

Remarque : la force de guidage est d'*orientation* centripète (elle est orientée vers le centre de la trajectoire), mais pas de *nature* centripète (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 mettre la voiture en mouvement, 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 force de guidage vient dévier la voiture de sa trajectoire initiale, tandis que le "cône de Lübeck" conserve une trajectoire 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 et tombe par terre. 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, on constate que l'objet glisse sur le capot et tombe par terre, comme animé d'une force apparente qui agirait sur son centre de gravité.

Cette force apparente, c'est la *force centrifuge*. 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 proviennent de deux référentiels différents :

1. Si la trajectoire du “cône de Lübeck” est observée dans un ensemble de repères liés à la Terre, la description s’inscrit dans le *référentiel Terre* qui, ici, est le référentiel absolu⁽¹⁾.
2. Si la trajectoire du “cône de Lübeck” est observée dans un ensemble de repères liés à la voiture, les repères extérieurs disparaissent. La description se limite alors au *référentiel voiture* qui, ici, est un référentiel relatif et dans lequel le mouvement du cône n’est qu’apparent⁽²⁾.

Attention : le référentiel voiture est un système isolé et indépendant qui ne permet pas la moindre référence au mouvement de la voiture. En effet, ce mouvement n’existe que par rapport à la Terre, il n’existe pas dans le référentiel voiture. C’est pourquoi le référentiel voiture doit être considéré comme immobile⁽³⁾.

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. Là où il y a la force centrifuge, il n’y a pas de 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 franchit un virage : 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 seulement 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 ont l'impression d'être plaqués contre le bord du fauteuil ou contre la portière, comme s'ils étaient animés d'une force apparente...

D'où vient cette impression ? 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.

Or ce n'est pas le cas des passagers qui, bien qu'assis 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 ceinture de sécurité 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 : la force centrifuge n'existe pas, ni dans l'habitacle, ni sur la tablette arrière, ni dans le coffre !

Force centrifuge : la définition

Ces divers raisonnements 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. l'impossibilité d'exercer une force directement sur le centre de gravité d'une masse (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 le référentiel Terre ?

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 dans un plan transversal, 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 : la force centrifuge n'existe pas, 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 l'ensemble des mouvements de la voiture, leur cause et leurs conséquences.
2. Une description imaginaire, dite "*statique*" qui considère que la voiture est 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 définition :

« 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 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. aucune force ne peut s'exercer directement sur le centre de gravité de quelque masse que ce soit, sauf le poids (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. Là où il y a la force centrifuge, il n'y a pas de mouvement. »

Remarque : la description de forces imaginaires qui pourraient s'exercer sur des voitures immobiles ne présente strictement aucun intérêt, les véhicules terrestres étant, par définition, des machines conçues pour le mouvement et destinées à satisfaire des besoins de déplacement par rapport à la Terre.

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 important et si mal interprété⁽⁴⁾ :

« *Toute force qui s'exerce sur un corps entraîne une réaction 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 force unique, 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 : de fait, lorsqu'un conducteur sollicite la force de guidage, les pneumatiques des roues directrices exercent une poussée horizontale sur le sol, avec une intensité strictement égale à celle de la force de guidage, mais de sens opposé.

Cette poussée devrait logiquement affecter le mouvement de rotation de la Terre. Heureusement, son effet reste purement théorique car, la masse de la voiture étant considérablement plus faible que celle de la Terre, la voiture n'a pas d'autre possibilité que de s'inscrire docilement sur une trajectoire circulaire, ou de glisser⁽⁵⁾. Ajoutons que les trajectoires divergentes du très grand nombre de véhicules en circulation annuleraient cet effet, si celui-ci était perceptible.

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, 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 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 $\mathbf{kg.m.s^{-2}}$), c'est une grandeur dérivée obtenue par combinaison de grandeurs fondamentales. La dimension obtenue est la définition même du *newton* (symbole \mathbf{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 \mathbf{kg}), la vitesse s'exprime en mètres par seconde (symbole $\mathbf{m.s^{-1}}$) et le rayon de la trajectoire s'exprime en mètres (symbole \mathbf{m}).

Combinons ces différentes grandeurs :

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

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

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 ?

Le document est un flyer jaune avec le titre "FORMULE DE LA FORCE CENTRIFUGE" en lettres capitales. En dessous, il est écrit "Force centrifuge = Masse du véhicule x Vitesse au carré / Rayon de virage". La formule $FC = \frac{MV^2}{R}$ est présentée en grand format avec des lettres rouges. En bas à gauche, il y a un logo "FORMATION DU CONDUCTEUR" et en bas à droite, "BEPECASER" et un encadré contenant le numéro "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 réaliser des expériences, 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 souvent été 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 :

- la relation utilisée pour en calculer l'intensité ;

- leur point d'application (l'un de ces deux vecteurs trouve son origine à la périphérie des pneumatiques, l'autre au centre de gravité) ;
- leur direction (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 $4 \times 10^{-2} \text{ N}$, 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 est strictement identique 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 circulaire de même rayon.

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 centrifuge.

Le vrai sens du mot "exister"...

La force centrifuge n'existe pas, nous venons de le démontrer. Cependant, il y a encore quelques avis contraires. Qui croire ?

Les pseudo-physiciens⁽⁶⁾ argumentent que le concept de force centrifuge figure en bonne place dans la plupart des manuels de physique (pour ne pas dire tous), ce qui suffirait à prouver son existence.

Rappelons d'abord que la *physique* désigne la science des choses naturelles, c'est une discipline axée sur l'observation, la connaissance et la maîtrise des réalités, c'est ce qui en fait une science dure, concrète et rigoureuse⁽⁷⁾.

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

Afin de saisir 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. Mais cela ne suffit pas pour prouver son *existence* au sens physique et littéral du terme.

Et pour cause : le Père Noël n'est pas un personnage historique, il n'a jamais fait partie de la réalité, 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 qu'il y a bien deux significations au mot "exister", et ces deux significations ne sont absolument pas équivalentes.

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

Conclusion

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

Il est évidemment impossible d'observer, de ressentir ou de mesurer les effets d'une force imaginaire. C'est donc à tort si ce concept a été utilisé pour décrire les phénomènes observés en automobile.

La vérité est beaucoup plus simple : la trajectoire normale d'une voiture en mouvement est rectiligne par nature. Pour dévier cette trajectoire, il faut solliciter une force transversale qu'on appelle force de guidage.

La force de guidage est une 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.

(1) *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 absolu (on dit aussi : inertiel ou galiléen) ou relatif (on dit aussi : non inertiel ou non galiléen) selon l'objet de l'étude : la Terre devient un référentiel relatif pour décrire le mouvement du Soleil ou celui des planètes du système solaire (voir dossier ADILCA "système solaire").*

(2) *Un mouvement apparent est celui que perçoit un observateur posté dans un référentiel relatif, c'est-à-dire privé de repères extérieurs et supposé immobile. Le Soleil, par exemple, semble 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").*

(3) *Par définition, tout référentiel, qu'il soit absolu ou relatif, doit être considéré comme parfaitement immobile même si en réalité il ne l'est pas, c'est l'unique condition de sa légitimité.*

(4) *Principe à l'origine de nombreuses confusions. Pour éviter toute méprise, il suffit de se rappeler que, dans une description imaginaire, les interactions n'existent pas. Ce qui revient à dire que ce principe ne peut s'appliquer qu'à des forces réelles, jamais à des forces fictives.*

(5) *L'action provient de la Terre et s'exerce sur la masse de la voiture, l'action réciproque provient de la voiture et s'exerce sur la Terre. Ces deux forces sont égales mais leur effet est inversement proportionnel 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 peut donc subir donc aucune perturbation (voir dossier ADILCA "Isaac Newton").*

(6) *Pseudo-physicien : physicien incapable de raisonner sans recourir à des pseudo-forces, le comble étant que le mouvement des automobiles est souvent donné comme preuve de leur existence.*

(7) *Pour désigner cette discipline, l'appellation de "science physique" a progressivement supplanté celle de "philosophie naturelle", en usage jusqu'au début du XVIII^e siècle.*

II. 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 et qui la maintient 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 lorsque la 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'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 : $Y = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

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 :

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

3. 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' = kg . m.s⁻² = N**

Exemple : 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 décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

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

Remarque 1 : 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 2 : le signe [-] est obligatoire, il précise l’orientation spatiale de cette force, contraire à la logique du mouvement.

Remarque 3 : attention aux interprétations erronées, l’égalité numérique des résultats (au signe près) n’autorisant pas l’interchangeabilité des descriptions, des concepts ou des raisonnements.

Remarque 4 : les différents calculs doivent s’effectuer dans l’ordre indiqué. Il est en effet impossible de calculer directement la force centrifuge sans passer par les calculs intermédiaires détaillés ci-dessus, sauf à se tromper de description et de concept.

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 : le calcul de la force de guidage et de l’accélération transversale correspondante) ;
- 4) éventuellement, transposer un *raisonnement* (ici : le passage d’une description réelle à une description imaginaire avec l’introduction du concept de force centrifuge).

Les trois premières étapes, indispensables, garantissent la traçabilité du raisonnement. La quatrième étape, facultative, n’apporte rien sinon un risque de confusion, d’où les méprises au sujet de la force centrifuge.

III. 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 : un 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 scientifique d'un dessin ?

Comment analyser un dessin

Il suffit d'examiner attentivement certains détails :

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

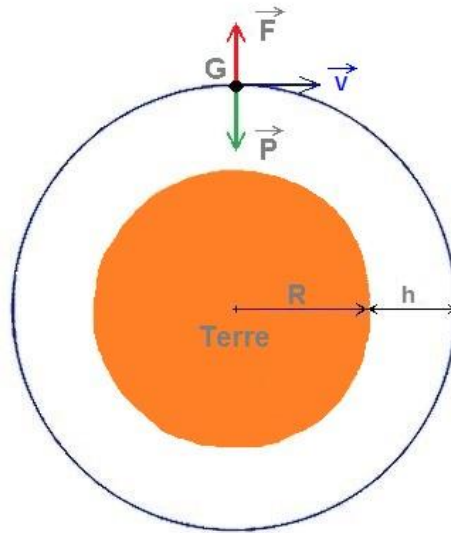
3. Le *centre de gravité* : si une seule force (autre que le poids) agit sur le centre de gravité, c'est la signature d'une description statique. En dynamique, les forces ne s'exercent jamais sur le centre de gravité (excepté le poids), mais uniquement en surface ou par contact. Statique ou dynamique,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

Des incohérences de ce genre se retrouvent dans presque tous les dessins illustrant la force centrifuge, pour ne pas dire tous. 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 "Cessac & Tréherne"). 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.

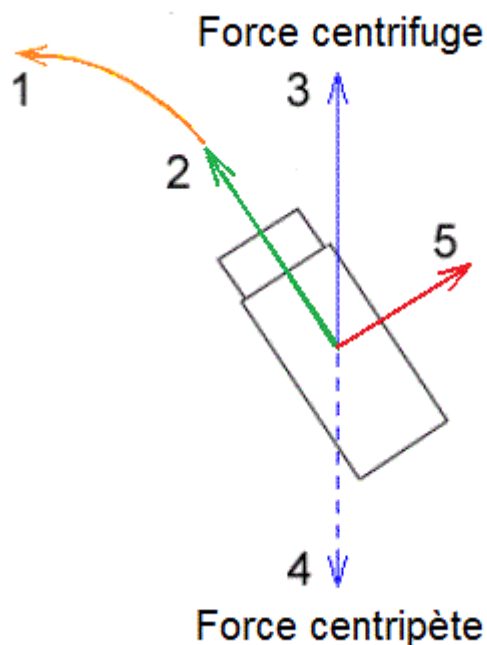
- Le vecteur "P" représente le poids du satellite, c'est la force centripète qui maintient l'engin en orbite circulaire autour de la Terre. Jusqu'ici, c'est correct.

- 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 s'annulent, donc *exit* le mouvement circulaire. Dans ce cas, le satellite n'étant plus soumis à aucune 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 formation "FIMO-FCO" destiné à des conducteurs professionnels :



© association adilca reproduction interdite

Dessin sans légende, manuel "FIMO-FCO 2010" (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 ? Mystère ! 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 sont des forces qui 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 par l'auteur du dessin comme étant cette fameuse force centrifuge, mais en réalité, il s'agit d'une trajectoire, celle que le camion aurait suivie si la force de guidage n'existait pas. Confusion entre force et trajectoire, le mystère s'épaissit...

- 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").

- De plus, orientée de cette manière, la force 4 neutralise la force 3 !

- La flèche 5 ne porte pas de nom. Dans le cadre d'une description dynamique, cette force n'existe pas, 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 agit 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. »

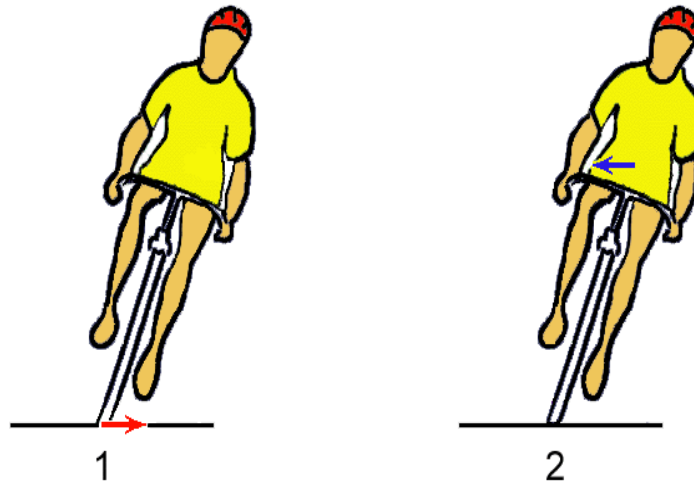
Rappelons les conditions de validité de cette définition :

1. le cycliste est immobile ;

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

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

Pour illustrer une telle 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 au contact du sol (flèche rouge).

Dessin 2 : c'est une description imaginaire (dite "*statique*") : le cycliste est immobile, il est penché mais ne tombe pas, il reste 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 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...