LA FORCE CENTRIFUGE

I. LES LOIS DE NEWTON……2

II. FORCE CENTRIFUGE : LA VÉRITABLE DÉFINITION…….....3

III. FORCE CENTRIFUGE ET PRINCIPE DE RÉCIPROCITÉ…..12

IV. FORCE CENTRIFUGE ET FORMULE F = MV²/R……..14

V. QUI A « INVENTÉ » LA FORCE CENTRIFUGE ?.....20

VI. FORCE CENTRIFUGE : LES DESSINS…….....24

VII. FORCE CENTRIFUGE : LE MODE DE CALCUL……..……30

VIII. BIBLIOGRAPHIE……..34

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, conserve sa vitesse et décrit une trajectoire rectiligne.* »

Le concept de force découle de ce principe.

Concept de force

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

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 d'inertie, également appelées forces fictives, forces apparentes ou pseudo-forces. Pourquoi les appelle-t-on ainsi ? Parce que 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*''). Commençons par préciser les termes utilisés.

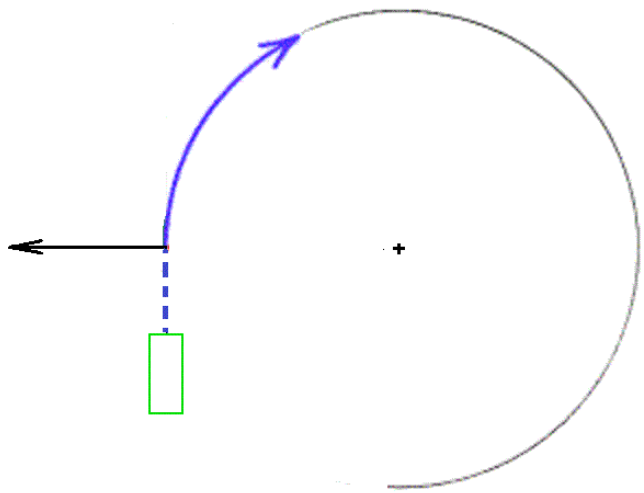
Rappel

Un *référentiel* désigne tout corps auquel est lié un système de repères permettant de mesurer les caractéristiques du *mouvement* d'une masse, telles que : distance parcourue, vitesse, rayon de trajectoire ou variation d'altitude[(1)].

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 une trajectoire.

Centrifuge signifie ''*qui éloigne du centre*'', ''*qui fuit le centre*''.

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



© association adilca reproduction interdite

Lorsqu'une voiture s'engage sur une trajectoire circulaire (flèche bleue), une force qualifiée de centrifuge devrait agir dans le prolongement du rayon de la courbe (flèche noire). Un phénomène jamais observé.

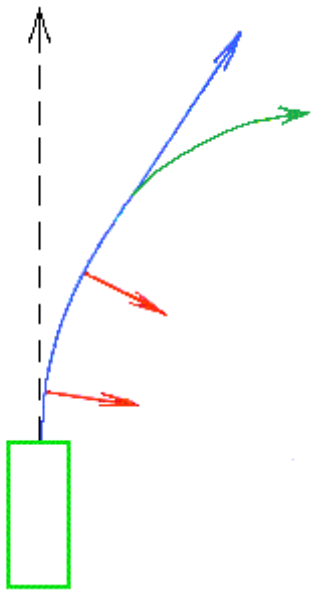
La trajectoire circulaire…

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 n'emprunte jamais la direction indiquée par le prolongement d'un rayon :

1. Si la commande de direction est inopérante, la voiture est livrée à elle-même, elle conserve une trajectoire rectiligne et continue sur sa lancée (flèche noire pointillée), c'est le comportement naturel d'une masse sur laquelle n'agit aucune force.

2. Si la voiture franchit normalement la courbe (flèche verte), c'est la preuve qu'une force s'est exercée sur la voiture pour la dévier de sa trajectoire initiale.

3. Si la voiture fait une sortie de route (flèche bleue), c'est la preuve qu'elle 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 possibilités, et trois seulement :
1. Flèche noire pointillée : la voiture file tout droit si la direction est inopérante.
2. Flèche verte : la voiture franchit normalement la courbe.
3. Flèche bleue : la voiture fait une sortie de route.

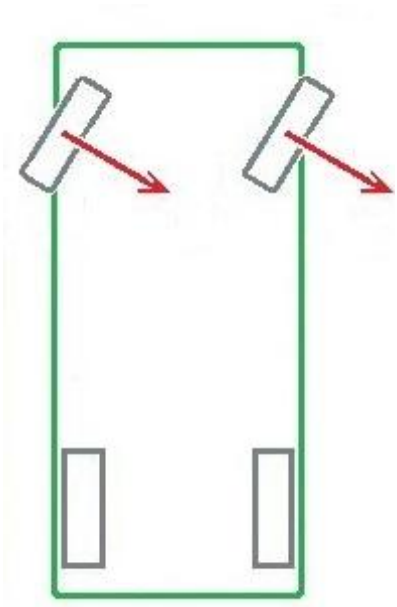
Constat 2 et 3 : il a fallu une force (flèche rouge) pour dévier la voiture de sa trajectoire initiale.
(Attention à ne pas mélanger force et trajectoire !)

Cette expérience valide le *principe d'inertie rectiligne* d'Isaac Newton : la voiture conserve sa vitesse et sa trajectoire si elle est livrée à elle-même, autrement dit, si elle n'est soumise à aucune force, et certainement pas à cause d'une quelconque force, centrifuge ou autre.

… et sa cause

L'expérience précédente valide également le fait que la trajectoire circulaire de la voiture est due à une force. Où, pourquoi et comment cette force s'exerce-t-elle ?

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*. Il n'y a pas d'autre force à considérer dans l'étude du mouvement circulaire des véhicules terrestres.



© association adilca reproduction interdite

La force de guidage s'exerce à la périphérie des roues directrices au contact du sol.

Remarque : la force de guidage est une force de contact, souvent confondue avec la *force centripète*, à tort : la force de guidage n'agit pas à distance et ne s'exerce pas sur le centre de gravité de la voiture (voir dossier ADILCA ''*force centripète*'').

L'objet posé sur le capot...

La force centrifuge : où, pourquoi et comment se manifeste-t-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.

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 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.

© association adilca reproduction interdite

L’expérience dite ‘‘du Cône de Lübeck’’…

Les deux référentiels

Ces deux descriptions sont contradictoires parce qu’elles appartiennent à deux référentiels distincts :

1. Référentiel « Terre » : le mouvement du ‘‘cône de Lübeck’’ est décrit à partir d’un système de repères lié au globe terrestre. Ce référentiel est ici qualifié d’*absolu* puisque les véhicules terrestres se déplacent par rapport à la Terre[(2)].

2. Référentiel « voiture » : le mouvement du ‘‘cône de Lübeck’’ est décrit à partir d’un système de repères lié à l’habitacle de la voiture. Ce référentiel est ici qualifié de *relatif* car, les repères terrestres ayant disparu, le mouvement de la voiture n’apparaît plus. Pour éviter toute confusion, le mouvement du cône est alors appelé *mouvement apparent*[(3)].

D'où cette règle pour ne pas se tromper : un référentiel relatif (ici la voiture) doit être considéré comme parfaitement immobile, alors qu'en réalité, il ne l'est pas [(4)].

Une règle d'or qu'on peut résumer par cet aphorisme :

« Quand on étudie le mouvement (de la voiture), il n'y a pas de force centrifuge. La force centrifuge n'apparaît qu'à condition d'ignorer le mouvement réel (de la voiture). »

Ce raisonnement va pouvoir s'appliquer à toutes les autres expériences censées prouver l'existence de la force centrifuge.

Le mouvement de la mascotte...

Installons-nous à bord d'une voiture et observons le mouvement d'une mascotte suspendue au rétroviseur.

La mascotte suspendue au rétroviseur…

Dans le référentiel « voiture », tant que la route est horizontale, rectiligne et parcourue à vitesse constante, la mascotte reste immobile et indique la verticale. Mais, à l'occasion d'un virage, la mascotte s'incline sur le côté, comme si elle était animée par une force qui agirait sur son centre de gravité. Cette force apparente, c'est la force centrifuge.

En réalité, dans le référentiel « Terre », il n'y a pas de force centrifuge : la mascotte conserve simplement une trajectoire rectiligne, jusqu'à ce que la force de guidage des pneumatiques se transmette au châssis, à la carrosserie et à tous les accessoires qui y sont solidement fixés, rétroviseur compris.

Cette force parvient enfin à dévier la trajectoire de 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 bagages…

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

L'explication est identique à celle qui concerne la mascotte suspendue au rétroviseur : 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.

C'est clair, net et définitif : il n'y a pas de force centrifuge, ni dans l'habitacle, ni sur la tablette arrière, ni dans le coffre.

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 la carrosserie, comme s'ils étaient animés d'une force apparente… S'agit-il d'une manifestation de la force centrifuge ?

Détaillons le mouvement : 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 au châssis, à la carrosserie et à tout ce qu'elle contient.

Les objets solidement fixés à la carrosserie subissent cette force intégralement et sans retard, l'arrimage servant justement à transmettre cette fameuse force à tout ce qui se trouve à l'intérieur de la voiture.

Mais tel n'est pas le cas des passagers qui, confortablement installés dans leurs fauteuils, gardent une certaine liberté de mouvement : lorsque la voiture commence à virer, ils conservent une trajectoire rectiligne, tout comme la mascotte dans l'expérience précédente, et ce jusqu'à ce que la carrosserie, les portières et les fauteuils leur communiquent 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 les fauteuils, les portières ou tout autre élément de la carrosserie.

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 initiale, le conducteur a dû solliciter la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques des roues directrices au contact du sol, mais pas sur le centre de gravité.

La distance entre le sol et le centre de gravité apparaît alors comme un *bras de levier* avec lequel la *force* de guidage forme un *couple,* au sens physique du terme : 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 strictement 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.

Force centrifuge : la véritable définition

Ces diverses expériences 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'absence de mouvement : la voiture est immobile.

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 des passagers et des bagages) et l'impossibilité d'y exercer directement la moindre force (cette exigence seule suffirait à prouver le caractère irréel de la force centrifuge) [5].

Cette définition précise bien que le référentiel dont il est question ici est le référentiel « voiture », avec toutes les réserves que cela implique. Ce qui soulève une question : existe-t-il une autre définition de la force centrifuge ?

Dynamique ou statique ?

Poursuivons le raisonnement. L'observation du mouvement de roulis de la Citroën 2 CV autorise deux descriptions possibles du 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 immobile. Dans ce cas, il faut imaginer une force transversale agissant sur son centre de gravité pour créer un mouvement de roulis artificiel.

Cette force imaginaire, c'est la force centrifuge, avec cette autre définition tout aussi originale et inédite que la précédente :

« En Statique, 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'absence de mouvement : la voiture est immobile.

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 :

« Quand on décrit un mouvement, il n'y a pas de force centrifuge. La force centrifuge apparaît uniquement si on supprime 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 déplacements 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.

Notes et remarques

(1) *Un système de repères comprend trois axes orthogonaux (longueur, largeur, hauteur) dont l'origine est commune (point zéro), auxquels on associe une mesure de temps (chronomètre).*

(2) *Un même référentiel peut être tantôt absolu (on dit aussi : inertiel ou galiléen), tantôt relatif (on dit aussi : non inertiel ou non galiléen) selon l'objet de l'étude. Ainsi la Terre est le référentiel absolu pour décrire le mouvement des véhicules terrestres puisque ceux-ci se déplacent par rapport au globe terrestre (c'est leur unique finalité) tandis qu'elle devient un référentiel relatif lorsqu'il s'agit de décrire le mouvement des planètes du système solaire puisque celles-ci se déplacent par rapport au Soleil.*

(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 dossiers ADILCA "système solaire" et "référentiels").*

(4) *D'une manière générale et par définition, tout référentiel, qu'il soit absolu ou relatif, doit être considéré comme parfaitement isolé, indépendant et immobile, c'est son unique raison d'être et la clé de tout raisonnement. Attention à ne jamais associer, permuter ou mélanger deux référentiels, et encore moins les descriptions qui en découlent !*

(5) *Le centre de gravité, également appelé centre d'équilibre, centre d'inertie ou centre de masse, est un point virtuel qui se définit comme le point d'application de la résultante de toutes les forces de gravitation qui agissent sur les différentes masses d'un ensemble non homogène, comme si toute la matière était concentrée en ce seul point. Une voiture est constituée de différentes masses : moteur, transmission, roues, châssis, carrosserie, passagers, chargement, etc. Avec deux personnes à bord, le centre de gravité d'une voiture de tourisme est approximativement situé entre les deux sièges avant, à la hauteur de l'assise, c'est le centre d'équilibre de l'ensemble. L'exemple de la bicyclette montre que ce point est parfaitement immatériel et qu'il est donc strictement impossible d'y exercer la moindre force.*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***

III. FORCE CENTRIFUGE ET PRINCIPE DE RÉCIPROCITÉ

Le principe de réciprocité, ou principe d'action-réaction, est le troisième principe formulé par Isaac Newton dans son ouvrage intitulé « *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* ».

Ce principe complète harmonieusement les deux premières lois du mouvement, le principe d'inertie rectiligne (1er principe) et le concept de force (2ème principe). Voici ce qu'énonce ce principe :

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

Les interprétations erronées

Ce principe, outre qu'il est totalement absent des manuels scolaires de physique, a souvent été interprété de travers :

- La réaction est sont souvent confondue avec la force d'inertie, alors que ces deux forces sont totalement distinctes, justement par le fait qu'elles n'appartiennent pas à la même description et qu'on ne peut donc pas les mélanger (voir dossiers ADILCA ''*force centripète*'' et ''*force d'inertie*'').

- Dans le cas qui nous occupe (l'étude du mouvement circulaire des véhicules terrestres) l'action et la réaction sont deux forces sont bien réelles, dites « de contact » qui partagent le même point d'application.

- La réaction est parfaitement égale et rigoureusement opposée à l'action, mais il est faux de dire que ces deux forces s'annulent. En effet, l'accélération créé par une force dépend de la masse sur laquelle elle s'exerce, c'est l'une des conséquences du principe fondamental de la dynamique (*).

- La réaction est le résultat d'une interaction entre deux masses. Or, dans le cas d'une force imaginaire, il n'y a pas d'interaction puisque ce type de force est le résultat d'une construction mentale purement hypothétique. La force centrifuge échappe donc au principe de réciprocité.

L'application du principe de réciprocité

Comment alors appliquer le principe de réciprocité dans le cas de la trajectoire circulaire d'une automobile ?

Les expériences précédentes ont démontré que la trajectoire circulaire de la voiture est due à l'action d'une seule force, la force de guidage. Or, la force de guidage s'exerce

sur les pneumatiques au contact du sol, elle résulte d'une interaction entre la Terre et la voiture. En toute logique, l'action réciproque se manifeste également au contact 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.

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.

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

Les sensations des passagers…

L'emploi abusif du concept de force centrifuge a réussi à faire 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 intégralement dans toute sa splendeur : puisque les passagers sont soumis à la force de guidage que leur transmettent la carrosserie et les fauteuils, ils exercent évidemment en retour une *action réciproque* d'égale intensité mais de sens opposé sur les fauteuils, la carrosserie, le châssis, les roues et les pneumatiques.

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

(*) *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 (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 x 10^{24} kg), le rapport des masses est de 1 pour 3 x 10^{21}, soit 1 pour 3 000 milliards de milliards (3 000 trillions). La Terre ne subit donc aucune perturbation. D'une manière plus générale, c'est le rapport des masses en interaction qui permet de faire la distinction entre une force et son action réciproque*

IV. FORCE CENTRIFUGE ET FORMULE F = MV²/R

La célèbre relation **F = MV²/R** est souvent présentée comme une formule magique destinée à prouver l'existence de la force centrifuge. Qu'en est-il réellement ? Quel est le mode d'emploi de cette formule et que révèle-t-il ?

Première précaution valable pour toutes les relations utilisées en physique : vérifier que la formule est parfaitement cohérente.

Ici, la dimension recherchée est celle 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 ensuite 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 :

$$\mathbf{F = M\,V^2 / R}$$

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

Il n'y a plus aucune doute possible, cette formule est parfaitement correcte, elle exprime bien la dimension d'une force. Une force oui, mais laquelle ?

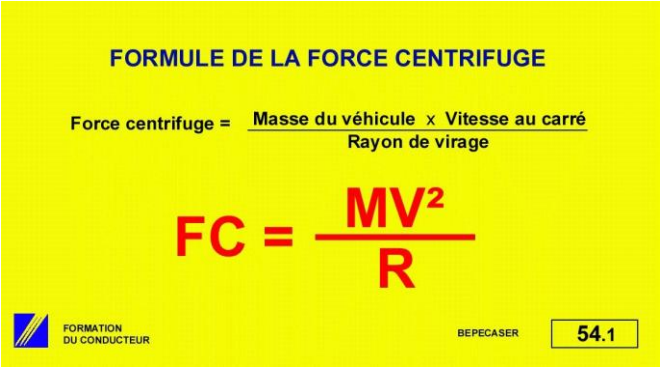
De quelle force s'agit-il ?

Quelle est la force exprimée par cette formule ? Nous avons déjà démontré par ailleurs qu'il n'y avait que trois possibilités, et trois seulement :

- Dans le référentiel « Terre », la *force de guidage*, une force réelle qui provient des pneumatiques au contact du sol, et qui s'exerce tout à la fois sur la voiture, ses passagers et leurs bagages.

- Dans le référentiel « voiture », la *force centrifuge*, une force imaginaire qui, si elle existait, devrait s'exercer sur le centre de gravité des passagers et des bagages placés à l'intérieur d'une voiture immobile.

- En Statique, la *force centrifuge*, une force imaginaire qui, si elle existait, devrait s'exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile.



© association adilca reproduction interdite

Une formule correcte certes, mais qui n'exprime pas la bonne force !
(Document du ministère des transports, France)

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 que dans le référentiel « Terre », elles n'existent pas dans le référentiel « voiture » ou en Statique (voir dossiers ADILCA "*référentiels*" et "*statique & dynamique*").

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

Aucun doute possible, cette fameuse formule n'exprime pas, n'a jamais exprimé et ne pourra jamais exprimer la force centrifuge, mais bien et uniquement la *force de guidage*. C'est d'elle dont il s'agit ici, et d'elle seulement.

La preuve mathématique

Allons plus loin et reprenons la célèbre formule magique, celle qu'on a utilisée un peu partout à tort et à travers :

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

Nous l'avons déjà dit, cette formule n'exprime pas, n'a jamais exprimé et ne pourra jamais exprimer la force centrifuge. La question est maintenant de savoir si on peut le démontrer mathématiquement.

Rappelons ce qu'est la force centrifuge :

« La force centrifuge est 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. »

Raisonner avec la force centrifuge suppose donc que la voiture soit immobile.

Et quand la voiture est immobile, sa vitesse est évidemment nulle, égale à zéro. Si on tente alors d'appliquer la fameuse formule, on obtient le résultat suivant :

$$\forall\ \mathbf{M},\ \ \forall\ \mathbf{R} \neq \mathbf{0},\ \ \text{pour } \mathbf{V} = \mathbf{0},\ \ \mathbf{F} = \mathbf{M\,V^2 / R} = \mathbf{0 / R} = \mathbf{0}\ !$$

Zéro, le symbole du néant, de ce qui n'existe pas. Sans parler du rayon de la trajectoire, qui n'existe pas non plus puisque la voiture est immobile, mais qu'on a considéré ici, faute de mieux, comme un réel non nul. Bref, dans le référentiel « voiture » ou en Statique, cette formule est rigoureusement inapplicable. C.Q.F.D.

C'est évident : il n'y a pas, il ne peut pas y avoir de rayon de trajectoire sans mouvement, donc sans vitesse, et la vitesse de la voiture ne peut exister que dans le référentiel « Terre », donc uniquement dans le cadre d'une description dynamique.

La célèbre formule magique **F = MV²/R** s'applique donc si, et uniquement si, on considère une masse (**M**) animée d'une vitesse (**V**) et décrivant une trajectoire circulaire de rayon (**R**).

Autrement dit, cette formule se rapporte bien uniquement à une description dynamique, et non à une description statique, elle exprime donc bien la *force de guidage*, et non la force centrifuge.

Un principe de traçabilité

Néanmoins, 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, l'égalité numérique est trompeuse, ce qui signifie que la démarche habituellement présentée n'est pas la bonne, et 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 mesurer des grandeurs. C'est le cheminement le plus important. Les calculs ne viennent qu'ensuite, mais ils se basent forcément sur des valeurs concrètes 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 pour tout expliquer, tandis que la force centrifuge n'explique absolument rien par elle-même puisqu'elle est toujours obligatoirement tributaire de la force de guidage.

Dès lors, il n'est pas question de se jeter sur la première formule venue sans se préoccuper de savoir d'où elle vient, ce qu'elle exprime et comment elle a été obtenue. La véritable traçabilité du raisonnement, c'est cela.

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

Un exemple concret

Considérons une voiture de masse 2 000 kg (1 600 kg à vide + quatre passagers de masse 100 kg chacun) qui décrit une trajectoire circulaire de 100 m de rayon à la vitesse de 20 $m.s^{-1}$.

Cet énoncé repose sur des grandeurs physiques qu'il a fallu mesurer sur le terrain : la *masse* de la voiture, celle des passagers, le *rayon de la trajectoire* décrite par la voiture et sa *vitesse*.

Le calcul vient ensuite, il consiste à combiner ces grandeurs dans la relation *ad hoc* pour connaître l'intensité de la force de guidage **F** qui s'est exercée sur les pneumatiques de la voiture au contact du sol :

$$\mathbf{F = M\,V^2 / R}$$

$$\mathbf{F} = 2\,000 \times 20^2 / 100 = 8\,000\ \mathbf{N}$$

Un autre calcul donne l'accélération transversale correspondante :

$$\mathbf{\Upsilon = V^2 / R}$$

$$\mathbf{\Upsilon} = 20^2 / 100 = 4\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

Ce n'est qu'à partir de ce résultat qu'on peut alors transposer le raisonnement, c'est à dire changer de description et en déduire l'intensité de la force centrifuge **F'**, cette fameuse force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile, afin de produire sur les suspensions et les pneumatiques un effet comparable à celui observé dans la réalité. Mais 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 **– 8 000 N**.

Autrement dit, à une force de guidage de **8 000 N** dans une description réelle correspond une force centrifuge de **– 8 000 N** dans une description imaginaire, d'où la confusion puisque ces deux forces ont la même intensité.

Mais attention, tout les distingue :

- Les relations utilisées.
- Leurs points d'application (l'une de ces deux forces s'exerce sur les pneumatiques, l'autre s'exerce sur le centre de gravité).
- Leur orientation (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).
- Le fait que l'une de ces deux forces s'exerce sur une voiture en mouvement, l'autre sur une voiture immobile.
- La description réelle a été transposée dans l'imaginaire. Autrement dit, les deux concepts ne sont pas interchangeables, et ce malgré l'égalité numérique.

Résultat : l'intensité de la force centrifuge se déduit de celle de la force de guidage, jamais l'inverse. Et la formule censée exprimer la force centrifuge résulte d'une confusion avec celle utilisée pour la force de guidage.

Le capteur à inertie…

Un simple capteur à inertie (appareil également appelé capteur d'accélération, accéléromètre ou dynamomètre) 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 et peut se déplacer le long d'un curseur dès qu'elle est soumise à une accélération. Le corps de l'appareil 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, la masselotte décrit la même trajectoire que la voiture, et à la même vitesse.

Si, par exemple, la masselotte a une masse de 10^{-2} kg et si l'appareil est correctement étalonné, le curseur va indiquer une force transversale de 4×10^{-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 :

$$\mathbf{\gamma = F / M}$$

$$\mathbf{\gamma} = 4 \times 10^{-2} / 10^{-2} = 4\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

On remarque que cette accélération transversale a une valeur strictement égale à celle de la voiture, ce qui n'a rien d'étonnant puisque, l'appareil étant solidement fixé à la carrosserie, il a la même vitesse et 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 et à tout ce qu'elle contient, appareil compris, de manière à imposer une trajectoire circulaire à l'ensemble.

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

(*) *Une dimension est une grandeur physique qui s'exprime avec une unité spécifique appartenant au Système International d'Unités (symbole **SI**). Par exemple, une longueur est une dimension qui s'exprime en mètres (symbole **m**) ; une surface est une dimension qui s'exprime en mètres-carrés (symbole **m²**) ; un volume est une dimension qui s'exprime en mètres-cubes (symbole **m³**), etc. Il est strictement interdit de combiner des unités n'appartenant pas au Système International, sauf à délivrer un résultat absurde (voir dossier ADILCA "définitions et unités").*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***

V. QUI A « INVENTÉ » LA FORCE CENTRIFUGE ?

Newton et la force centrifuge

À qui doit-on le concept de force centrifuge ? Qui le premier a utilisé le concept de force centrifuge ? S'agit-il d'Isaac Newton ?

Dans l'ouvrage fondateur de la physique moderne (« *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* »), dont Isaac Newton est l'auteur, nulle trace de force centrifuge. Cependant, Newton généralise et distingue deux types de forces :

« *Materiæ vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodque, quantum in se est, perseverat in statu suo 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 proposée par Émilie de Breteuil, physicienne française (1706 - 1749), traduction extraite de son 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.* »

On remarque que, dans sa traduction, Émilie de Breteuil a pris soin d'insérer les mêmes termes latins que ceux utilisés par Newton : « *vis insita* », « *vis impressa* », pour bien souligner la différence de nature entre les deux concepts.

Sage précaution en effet, car la difficulté du texte original réside précisément dans le sens à donner au mot « *vis* » : comme c'est souvent le cas en latin, un même terme peut prendre plusieurs significations qui dépendent du contexte.

De fait, le dictionnaire Gaffiot de 1934 (la référence du genre) confirme que 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 en voiture montre bien qu'il n'existe pas de « *vis impressa* » s'exerçant dans le prolongement d'un rayon. Dès lors, ce que l'on appelle communément *force centrifuge* ne peut désigner qu'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 n'agit aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne.* »

Un principe qu'on pourrait qualifier de « *principe d'inertie rectiligne* » pour éviter tout malentendu. Mais attention : un principe n'est pas une force ! Dès lors le concept de force n'apparaît que comme une conséquence de ce principe :

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

En automobile, cette force, c'est la force de guidage !

En résumé : il n'y a pas de force centrifuge dans l'œuvre de Newton mais uniquement un principe, le fameux *principe d'inertie rectiligne*, point de départ incontournable dans la description de tout mouvement circulaire quel qu'il soit.

Une appellation non contrôlée

L'appellation « *force centrifuge* » a été inventée par Christiaan Huygens, mathématicien néerlandais (1629 - 1695), pour désigner la « *tendance* » (sic) d'une masse animée d'un mouvement circulaire à s'éloigner de son centre de rotation, sans plus de précision.

Une appellation trompeuse qu'Isaac Newton rectifiera par la suite : cette « *tendance* », appelée « *vis centrifuga* » par Huygens, est définitivement rebaptisée « *vis insita* » par Newton [(1)].

L'inventeur des forces d'inertie

Au sens moderne du terme, la force *centrifuge* est une force d'*inertie* 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 d'inertie, 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, autrement dit : cette *absence de mouvement*) nécessitant l'introduction d'une *force fictive* pour expliquer un mouvement apparent ou un équilibre imaginaire.

Cette force fictive, d'Alembert l'a nommée *force d'inertie.* Appliquée au mouvement circulaire, c'est la *force d'inertie centrifuge* ou, plus simplement, *force centrifuge*.

En une seule et courte phrase, d'Alembert a livré la clé de son 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, égales et opposées, agissaient ensemble et de concert sur la même masse. Or, si c'était le cas, elles se neutraliseraient et d'Alembert aurait alors 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 « *égalité numérique* ».

La phrase de D'Alembert est alors parfaitement claire : les deux forces sont bien égales et opposées mais n'agissent pas en même temps. Il y a les forces réelles d'un côté (*dynamique* = mouvement), et les forces d'inertie de l'autre (*statique* = immobilité), les deux descriptions étant mathématiquement égales mais physiquement distinctes.

D'ailleurs, l'emploi du conditionnel (« *il y aurait équivalence… si celles-ci venaient à agir* ») dissipe tout malentendu et démontre que les forces d'inertie sont des forces imaginaires qui n'existent pas dans la réalité [(2)].

Le rôle des professeurs

Vers le milieu du XIXème 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 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 la réalité et la fiction.

Malheureusement, la plupart de ces enseignants étant restés confinés dans des salles de cours, des amphithéâtres ou des laboratoires, ils ont axé leur enseignement sur ces fameux concepts imaginaires. 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 fictives ont progressivement supplanté les descriptions réelles.

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 s'y réfèrent dès qu'il est question de mouvement circulaire [(3)].

Conclusion

Qu'appelle-t-on force centrifuge ?

- En langage courant, la force centrifuge désigne en réalité 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.

- D'un point de vue scientifique, la force centrifuge est une *force fictive* qui permet d'expliquer, soit un *mouvement apparent* décrit à partir d'un *référentiel relatif*, soit un *équilibre imaginaire* décrit en *Statique*.

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 courber cette trajectoire, le conducteur doit solliciter une force transversale qu'on appelle *force de guidage* : c'est la force qui s'exerce à la périphérie des pneumatiques des roues directrices au contact du sol lorsque le conducteur actionne la commande de direction.

Tous les autres phénomènes observés en automobile, tels que le mouvement des bagages ou les sensations des passagers, etc., ont des explications claires, logiques et rationnelles qui n'ont rien à voir avec le concept de force centrifuge.

(1) *Christiaan Huygens ne propose ni définition des termes utilisés, ni explication du phénomène, mais une étude sur la corrélation entre vitesse, rayon orbital et gravité. Quatorze ans plus tard, Isaac Newton comblera cette lacune avec le principe d'inertie appliqué au mouvement circulaire, auquel il associera le concept de force centripète (voir dossier ADILCA "force centripète"). La théorie est alors complète : exit la « force centrifuge » de Huygens !*

(2) *Ne pas confondre le* <u>*concept de force d'inertie*</u> *de D'Alembert (raisonnement "statique" faisant intervenir une force imaginaire) avec le* <u>*principe d'inertie*</u> *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. »

(3) *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.*

VI. 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 correct. C'est une évidence : tout croquis à vocation pédagogique devrait être exempt d'ambiguïté ou d'incohérence, 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 ? Et sur quels critères peut-on juger de la valeur d'un dessin ?

Comment analyser un dessin

Un dessin à vocation pédagogique devrait respecter certains critères :

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

2. La présence d'un *vecteur-vitesse* ou d'une *flèche trajectoire* : c'est la preuve que la description est dynamique, celle d'un mouvement, 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.

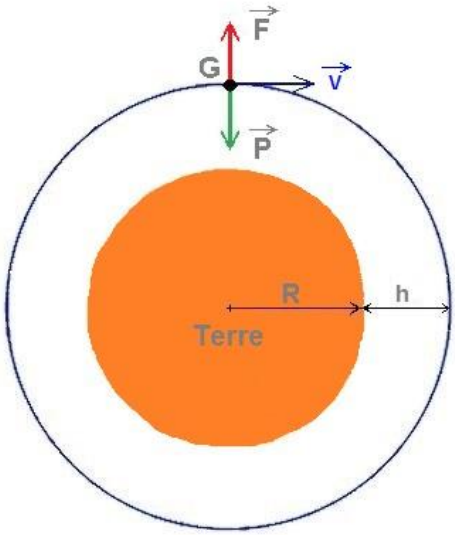
3. Le *centre de gravité* : une force représentée comme agissant sur le centre de gravité est nulle et non avenue puisque le centre de gravité n'est le siège d'aucune interaction, exceptée gravitationnelle. De fait, les forces réelles ne s'exercent jamais sur le centre de gravité, mais uniquement en surface et par contact.

4. Le *nombre de forces* et leur disposition : deux forces égales et opposées ayant le même point d'application 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 probablement 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 "CESSAC & TRÉHERNE" Physique 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.

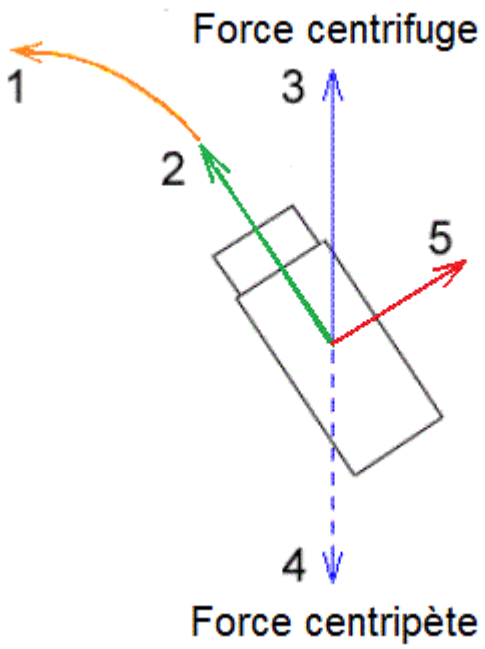
- Le poids "P" agit sur le centre de gravité du satellite, mais la force centrifuge "F" aussi, preuve qu'il s'agit là d'une force imaginaire sortie d'une description statique. Mêlant dynamique et statique, le dessin devient incohérent.

- 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. Si tel était le cas, le satellite n'étant plus soumis à la moindre force, il quitterait son orbite pour s'éloigner progressivement de la Terre sur une trajectoire rectiligne, dans

la direction indiquée par ‘‘v’’. Il finirait par se perdre dans l’espace. Pour un dessin censé décrire le mouvement circulaire d’un satellite en orbite autour de la Terre, c’est le comble.

- 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’’ (éditions ENPC 2006), 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 la trajectoire circulaire que le camion est supposé décrire. On en déduit que le dessin propose une description dynamique. Or, 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 s’agit probablement d’un *vecteur-vitesse*, mais que vient-il faire ici, sinon compliquer la description ?

- On remarque ensuite que les flèches 3, 4 et 5 agissent sur le centre de gravité du camion. Ce sont donc des forces imaginaires puisqu'aucune force réelle ne peut s'exercer sur le centre de gravité de quelque masse que ce soit, excepté le poids.

- 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 était inopérante. Confusion entre force et trajectoire.

- La flèche 4 pourrait, à la rigueur, représenter la résistance au roulement, celle qui finirait par arrêter le camion si celui-ci était livré à lui-même... Mais l'auteur, qui ne doute de rien, l'a nommée *force centripète*, une force supposée égale et opposée à la force centrifuge. Rappelons au passage qu'il n'y a pas de force centripète en automobile (voir dossier ADILCA "*force centripète*").

- La flèche 5 ne porte pas de nom. Dans le cadre d'une description dynamique, cette force n'existe pas non plus, mais 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). Impossible de faire l'impasse sur le dogme sacré !

- Les forces 3 (force centrifuge) et 4 (force centripète) étant égales et opposées, elles se neutralisent : la savante démonstration s'écroule comme un château de cartes !

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

- Si le dessin devait proposer 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 ce cas, et dans ce cas seulement, il faudrait supprimer toutes les autres flèches, tout en précisant dans la légende que le camion est parfaitement immobile et qu'il est soumis à une force purement imaginaire. Mais pour des conducteurs professionnels, quel serait l'intérêt ?

De toutes manières, pour une explication complète, un seul dessin ne suffirait pas. En effet, il faudrait en ajouter un second pour la description dynamique faisant intervenir la force de guidage, ceci afin d'expliquer (enfin !) l'origine du mouvement circulaire. Dans le cadre d'une démarche éducative, ce serait la moindre des choses. On en est loin.

Que faut-il 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 :

« En statique, 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. »

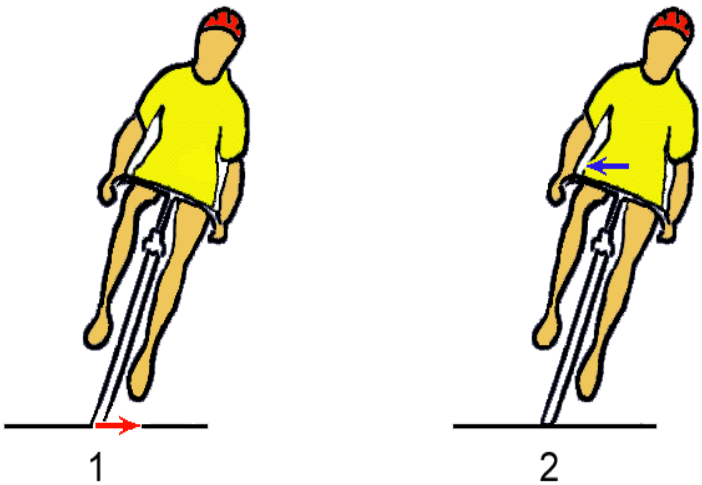
Rappelons les conditions de validité de cette définition :

1. Il n'y a pas de mouvement : 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 de quelque masse que ce soit.

Pour illustrer cette définition, deux dessins sont nécessaires :



© association adilca reproduction interdite

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-ci, 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

Le concept de force centrifuge, utilisé à tort et à travers, a fini par convaincre le *vulgum pecus* de l'existence d'une force imaginaire.

Les sensations éprouvées en voiture sont si banales que chacun les interprète à la lumière du dogme obligatoire et partage volontiers ses certitudes, notamment à grand renfort de dessins.

Résultat : la plupart des dessins censés illustrer le concept de force centrifuge sont truffés d'erreurs ou d'incohérences.

Or, il suffit d'examiner attentivement un dessin pour détecter rapidement ce qui cloche :

- absence de légende (ça met la puce à l'oreille),
- mélange toxique de statique et de dynamique,
- logique du mouvement bafouée,
- centre de gravité surchargé,
- inflation de vecteurs,
- confusion entre force, vitesse et trajectoire,
- opérations vectorielles contre nature, 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 et en posant les bonnes questions, vous saurez tout de suite s'il y a une erreur...

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***

VII. FORCE CENTRIFUGE : LE MODE DE CALCUL

1. Calcul de la force de guidage :

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

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** = kg . $(m.s^{-1})^2$. m^{-1} = kg . ($m^2.s^{-2}$. m^{-1}) = $kg.m.s^{-2}$ = **N**

Exemple 1 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques d'une voiture de masse totale 2 000 kilogrammes pour la maintenir sur une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$F = 2\,000 \times 20^2 / 100 = 2\,000 \times 400 / 100 = 8\,000 \text{ N}$$

Cette force s'exerce au contact du sol. En vertu du principe de réciprocité, les pneumatiques exercent une action réciproque à la surface du 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 par contact sur le passager par l'intermédiaire des roues, de la carrosserie et du fauteuil. En vertu du principe de réciprocité, le passager exerce une action réciproque par contact avec 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 :

$$A = - M . V^2 / R$$

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** = kg . $(m.s^{-1})^2$. m^{-1} = kg . ($m^2.s^{-2}$. m^{-1}) = $kg.m.s^{-2}$ = **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 2 000 kilogrammes décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$\mathbf{A} = -\ 2\ 000 \times 20^2 / 100 = -\ 2\ 000 \times 400 / 100 = -\ 8\ 000\ \mathbf{N}$$

Le globe terrestre reste parfaitement insensible à cette action en raison du rapport des masses en interaction. Calculons ce rapport pour une voiture de 2 tonnes : globe terrestre (6×10^{24} kg) *versus* voiture (2×10^3 kg) = 3×10^{21} (3 suivi de 21 zéros).

Exemple 2 : calculons l'action réciproque que chaque 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 :

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

Le passager ressent parfaitement cette action réciproque qui lui donne l'impression de peser sur le bord du fauteuil et de la carrosserie. C'est pourquoi la carrosserie doit être suffisamment rigide, et le fauteuil suffisamment bien fixé. *In fine*, l'action réciproque des passagers s'exerce à la surface du sol, par l'intermédiaire de la carrosserie, du châssis, des roues et des pneumatiques.

3. Calcul de l'accélération transversale :

$$\mathbf{\Upsilon = F / M}$$

Υ : accélération transversale, exprimée en **m.s^{-2}**
F : force de guidage, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
cohérence des unités : **Υ** = kg.m.s^{-2} . kg^{-1} = **m.s^{-2}**

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une voiture de masse 2 000 kilogrammes décrivant une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$\mathbf{\Upsilon} = 8\ 000 / 2\ 000 = 4\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

4. Calcul de la force centrifuge :

$$\mathbf{F' = -\ M\ .\ \Upsilon}$$

F' : force centrifuge, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
Υ : accélération transversale, exprimée en **m.s^{-2}**
cohérence des unités : **F'** = kg . m.s^{-2} = **N**

Remarque : dans cette relation, le signe [–] est indispensable, il précise l'orientation spatiale de la force centrifuge, qui est 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 :

$$\mathbf{F'} = -\ 2\ 000 \times 4 = -\ 8\ 000\ \mathbf{N}$$

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 :

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

Remarque 1 : la *traçabilité du raisonnement* impose d'effectuer les différents calculs dans l'ordre indiqué. Il est en effet impossible de calculer directement la valeur de la force centrifuge sans passer par les étapes intermédiaires détaillées ci-dessus.

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

Remarque 3 : 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 d'inertie, force fictive, force apparente, force imaginaire ou pseudo-force.

Remarque 4 : 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 de contact, c'est une force réelle que le passager exerce sur le fauteuil et la carrosserie, en réponse à la force de guidage que lui transmettent la carrosserie et le fauteuil lorsque la voiture décrit une trajectoire circulaire. Une action que le passager ressent parfaitement.

- 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.

Insistons sur l'usage du conditionnel, qui démontre le caractère hypothétique de cette force (''*la force qu'il faudrait exercer…*''). Ajoutons que le centre de gravité n'est qu'un centre d'équilibre, il n'est le siège d'aucune interaction, exceptée gravitationnelle. Concrètement, cela signifie qu'il est impossible d'y exercer la moindre force.

Remarque 5 : toute démarche scientifique passe obligatoirement 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 la suppression du concept de force de guidage et l'introduction du concept de force centrifuge).

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA (ouvrage collectif édité à compte d'auteurs) : *Guide des Lois Physiques de l'Automobile*, Paris 2002.

- 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 (traduction française du texte original en latin).

- 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,* Paris 1759 (traduction française intégrale de « *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* » d'Isaac Newton).

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

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***