

LA FORCE D'INERTIE

I. CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LA FORCE D'INERTIE

II. FORCE D'INERTIE : LE MODE DE CALCUL

1. Calcul d'une accélération ou décélération
2. Calcul d'une force de traction ou de freinage
3. Calcul de l'action réciproque
4. Calcul de la force d'inertie

III. FORCE D'INERTIE : LES MANUELS SCOLAIRES

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LA FORCE D'INERTIE

La *force d'inertie* est, avec la force centrifuge et la force de Coriolis, l'une des trois forces fictives utilisées par les physiciens dans le cadre de descriptions imaginaires.

Qu'est-ce qu'une force fictive ? Qu'est-ce qu'une description imaginaire ? Qu'appelle-t-on force d'inertie ? D'où provient-elle et comment agit-elle ? Cette force existe-t-elle vraiment ? Voici quelques éléments de réponses.

Rappel

Un *référentiel* désigne un ensemble de repères à partir desquels on mesure les caractéristiques du mouvement d'une masse (distance parcourue, vitesse, trajectoire). Il y a deux référentiels possibles : le référentiel absolu et le référentiel relatif.

Une *force* désigne toute cause capable de modifier la vitesse ou la trajectoire d'une masse. On distingue deux types de forces : les forces réelles et les forces imaginaires.

Définition

Inertie vient de "*inerte*". La force d'inertie se définit comme la force délivrée par un objet inerte. Comment un objet inerte pourrait-il délivrer la moindre force ? Cette définition semble paradoxale... En réalité, tout s'explique quand on sait que la force d'inertie est une force imaginaire, ainsi que nous allons le voir.

Un phénomène facile à observer

Considérons un camion immobile, stationné sur un terrain plat, avec un ballon posé au milieu de la benne. Mettons le camion en mouvement et observons la scène du haut d'une fenêtre ou d'un balcon par exemple : dès que le camion démarre, le ballon donne l'impression de rouler vers l'arrière de la benne, comme s'il était soumis à une force apparente.

Cette force apparente, c'est la *force d'inertie*. Mais attention : le mouvement du ballon relève d'une illusion d'optique. En effet, un repère au sol permet de vérifier qu'en réalité le ballon ne s'est pas déplacé, il a seulement été rattrapé puis heurté par la ridelle arrière.

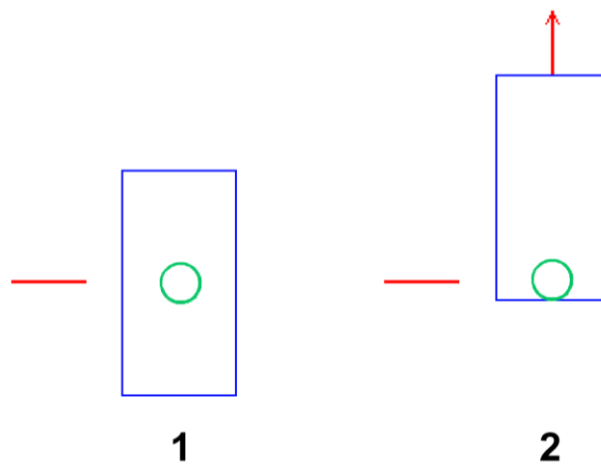
Explication : la seule force sollicitée dans cette expérience est la force de traction provenant du moteur.

Cette force s'exerce sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol. Elle se transmet ensuite aux roues, au châssis, à la carrosserie et à la benne ainsi qu'à tout ce qu'elle contient, ballon compris.

Le point de contact entre la benne et le ballon étant une surface trop faible pour communiquer la force nécessaire à l'accélération du ballon, celui-ci reste immobile par rapport à la Terre tandis que le camion démarre⁽¹⁾.

Et c'est justement parce que le ballon reste immobile, totalement insensible au mouvement du camion, donc complètement inerte, qu'il donne l'illusion de bouger, d'où le nom donné à cette force.

En réalité, dans cette expérience, la seule et unique force sollicitée, la seule et unique force qui existe vraiment est la force de traction qui s'est exercée sur les roues motrices du camion au contact du sol. Il n'y a pas eu d'autre force mise en jeu dans cette description.



© association adilca reproduction interdite

Expérience vue de dessus :

1. Un ballon est posé au milieu de la benne d'un camion immobile.
2. Quand le camion démarre, on a l'impression que le ballon se déplace vers l'arrière de la benne. Un repère au sol (trait rouge) permet de vérifier qu'en réalité le ballon n'a pas bougé.

Les deux référentiels

Ces deux observations sont contradictoires parce qu'il convient de faire la distinction entre deux référentiels :

1. Si la trajectoire du ballon est observée dans un ensemble de repères liés au globe terrestre, la description s'inscrit dans le *référentiel Terre* qui, ici, est le référentiel absolu⁽²⁾.
2. Si la trajectoire du ballon est observée dans un ensemble de repères liés au camion, les repères extérieurs disparaissent. La description se limite alors au *référentiel camion*, qui, ici, est un référentiel relatif et dans lequel le mouvement du ballon n'est qu'apparent⁽³⁾.

Pourquoi le référentiel camion est-il qualifié de relatif ?

Ce référentiel est un système isolé et indépendant qui ne permet pas la moindre référence au mouvement du camion. En effet, ce mouvement n'existe que par rapport à la Terre, il n'existe pas dans le référentiel camion. C'est pourquoi le référentiel camion doit être considéré comme immobile⁽⁴⁾.

Cette distinction entre deux référentiels va pouvoir servir de modèle pour toutes les autres expériences censées prouver l'existence de la force d'inertie, on peut la résumer par cet aphorisme :

« Quand il y a un mouvement (du véhicule), il n'y a pas de force d'inertie. La force d'inertie n'apparaît que si le mouvement (du véhicule) disparaît. »

La mascotte suspendue au rétroviseur...

Installons-nous à bord d'une voiture et observons 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 accélère ou freine : de l'intérieur de l'habitacle (référentiel voiture), on constate que la mascotte s'incline, comme animée d'une force apparente qui agirait sur son centre de gravité. Cette force apparente, c'est la force d'inertie.



© association adilca reproduction interdite

La mascotte suspendue au rétroviseur...

En réalité, dans le référentiel Terre, il n'y a pas de force d'inertie : la mascotte reste simplement inerte. En effet, la force de traction ou de freinage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol, 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 d'inertie 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'une vive accélération, les passagers d'une voiture ont l'impression d'être collés au siège. Lors d'un freinage brusque ou d'une collision, ils ont l'impression d'être projetés en avant ou plaqués contre la ceinture de sécurité, comme s'ils étaient animés d'une force apparente...

S'agit-il d'une manifestation de la force d'inertie ?

Lorsque le conducteur sollicite l'accélérateur ou le frein, la voiture est soumise à une force qui s'exerce à la périphérie des pneumatiques au contact du sol. 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 accélère ou freine, les passagers conservent leur vitesse, et ce jusqu'à ce que le fauteuil, la ceinture de sécurité ou la carrosserie leur communique cette fameuse force.

Ce n'est donc pas la force d'inertie qui se manifeste, mais la force de traction ou de freinage.

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 accélère ou freine, 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 leur vitesse initiale tant qu'une partie quelconque de la carrosserie ne peut leur communiquer la moindre force de traction ou de freinage.

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

Force d'inertie : la véritable définition !

Ces différentes explications nous amènent à cette définition originale et inédite de la force d'inertie :

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

Insistons sur les trois exigences de cette définition :

1. l'immobilité de la voiture ;

2. le caractère hypothétique de cette fameuse 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, excepté le poids (cette exigence seule suffirait à prouver le caractère irréel de la force d'inertie).

Trois bonnes raisons pour affirmer de façon claire, nette et définitive que la force d'inertie n'existe pas.

Le mouvement de tangage...

Observons une Citroën 2 CV qui accélère ou freine brutalement. À cause de ses suspensions molles, la voiture s'écrase sur les roues arrière ou avant tandis que les deux autres roues sont délestées. Ce phénomène, c'est le “tangage” qu'on attribue à tort à la force d'inertie.

Pourquoi la voiture se comporte-t-elle ainsi ? Pour accélérer ou ralentir la voiture, le conducteur a dû solliciter la force qui s'exerce sur les pneumatiques 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 tangage : la voiture tourne sur elle-même autour d'un axe transversal, comme une personne déséquilibrée par un tapis qu'on tirerait sous ses pieds.

Si la force de traction ou de freinage s'exerçait directement sur le centre de gravité, il n'y aurait pas de tangage.

Ce mouvement n'a donc rien à voir avec la force d'inertie.

Statique ou dynamique ?

L'observation du phénomène de tangage autorise deux descriptions possibles d'un même phénomène :

1. Une description réelle, dite “*dynamique*”, qui décrit le mouvement de la voiture et de tout ce qu'elle contient, ainsi que leur cause.

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 tangage artificiel.

C'est là qu'intervient le concept de force d'inertie avec cette définition, tout aussi originale et inédite que la précédente :

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

Les trois exigences précédemment énoncées restent évidemment valables :

1. l'immobilité de la voiture ;
2. le caractère hypothétique de cette force, clairement affirmé par l'emploi du conditionnel : “*la force qu'il faudrait exercer...*” ;
3. 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 irréal de la force d'inertie).

Et l'aphorisme également :

« Là où il y a un mouvement, il n'y a pas de force d'inertie. La force d'inertie n'apparaît que si le mouvement disparaît. »

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

Le troisième principe de Newton

Une erreur fréquente consiste à présenter la force d'inertie comme étant l'action réciproque de la force de traction ou de freinage. Que dit le troisième principe de Newton ? C'est le principe de réciprocité⁽⁵⁾ :

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

Ce principe est sans doute le plus mal compris de tous ceux jamais énoncés par Isaac Newton ! En effet, l'action réciproque associée à une quelconque force ne peut exister et se manifester que dans le cadre d'une description unique à partir d'un référentiel commun.

Cela signifie que, puisque la force de traction et de freinage s'exercent au contact du sol, l'action réciproque associée à ces deux forces se manifeste également au niveau du sol.

De fait, quand un véhicule terrestre accélère ou freine, les pneumatiques prennent appui sur le sol en exerçant une poussée horizontale qui serait parfaitement capable de perturber la rotation de la Terre, si ce n'était la masse de la Terre elle-même, bien trop grande par rapport à celle du véhicule pour que son mouvement en soit affecté⁽⁶⁾.

Bref, le principe de réciprocité n'a strictement rien à voir avec le concept de force imaginaire, et la force d'inertie n'est pas, ne peut pas être, n'est jamais l'action réciproque d'une quelconque force.

Les sensations des passagers...

Une littérature abondante a fait croire aux automobilistes qu'ils pouvaient ressentir les effets de la force d'inertie, cette pseudo-sensation apportant ainsi la preuve de son existence.

Détaillons le mécanisme du mouvement : la force de traction (ou de freinage) 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 traction (ou de freinage), 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 d'inertie.

Tout cela est finalement très logique car il est évidemment impossible d'observer ou de ressentir les effets d'une force imaginaire.

Calcul de la force d'inertie

Peut-on calculer l'intensité de la force d'inertie ? 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 d'inertie, la démarche habituellement proposée n'est pas la bonne, voici pourquoi.

Commençons par le commencement : en science, un bon principe consiste à se demander d'où vient la valeur qu'on a sous les yeux, ce qu'elle représente, 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.

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.

Car il n'y a pas, il ne peut pas y avoir de force imaginaire sans force réelle. Mais l'inverse n'est pas vrai : la force de traction ou de freinage peuvent parfaitement être étudiées seules et suffisent à tout expliquer, tandis que la force d'inertie est toujours obligatoirement tributaire d'une force de traction ou de freinage.

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

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

Un exemple concret

Prenons l'exemple d'une voiture de masse 1 500 kg qui accélère de 0 à 20 m.s⁻¹ en 10 secondes. Calculons d'abord l'intensité de l'accélération supposée constante :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{V} / \mathbf{T}$$

$$\mathbf{Y} = 20 / 10 = 2 \text{ m.s}^{-2}$$

La relation fondamentale de la dynamique permet ensuite de calculer l'intensité de la force de traction **F** qui s'est exercée sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol :

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \mathbf{Y}$$

$$\mathbf{F} = 1\,500 \times 2 = 3\,000 \text{ N}$$

Ce n'est qu'à partir de ce résultat qu'on peut enfin calculer l'intensité de la force d'inertie **F'**, cette fameuse force qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité de la voiture, si celle-ci était immobile, pour produire un effet comparable à celui observé dans la réalité quand la voiture est soumise à la force de traction ou de freinage.

On utilise alors cette relation, et uniquement celle-ci :

$$\mathbf{F}' = - \mathbf{M} \mathbf{Y} = - \mathbf{F}$$

Autrement dit, le calcul est très vite fait : à une force réelle de **3 000 N** dans une description dynamique correspond une force imaginaire de **- 3 000 N** dans une description statique. D'où la confusion.

En effet, les vecteurs "force réelle" et "force imaginaire" ont le même module, mais tout les distingue :

- 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 d'inertie, si elle existait, devrait avoir une orientation spatiale contraire à celle de la force de traction ou de freinage) ;
- 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. Et gare aux mélanges. Ainsi, la grandeur censée prouver l'existence de la force d'inertie résulte d'une confusion avec la force de traction ou de freinage !

Le capteur à inertie...

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

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 ou décélération, c'est le principe du dynamomètre. L'ensemble est solidement fixé à la carrosserie de la voiture.

Reprenons l'exemple de la voiture qui accélère de 0 à 20 m.s⁻¹ en 10 secondes. 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 de 2 x 10⁻² N, c'est la force qui agit sur la masselotte pour faire varier sa vitesse.

La relation fondamentale de la dynamique permet ensuite de calculer l'accélération de la masselotte :

$$Y = F / M$$

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

On remarque que cette accélération est strictement identique à celle de la voiture, ce qui est logique puisque, le capteur étant solidement fixé à la carrosserie, il subit une accélération identique.

Comme il n'y a pas de mouvement sans cause, on en déduit que cette accélération provient de la force de traction qui s'est exercée sur la voiture pour faire varier la vitesse de l'ensemble.

Autrement dit, le capteur à inertie mesure l'intensité d'une force de traction ou de freinage, mais son principe de fonctionnement n'a strictement rien à voir avec le concept de force d'inertie.

L'inventeur de la force d'inertie

L'affaire est entendue, la force d'inertie n'existe pas. Mais alors, d'où vient la méprise ? En réalité, les mécanismes de la confusion sont anciens, complexes, et culturels.

Commençons par le commencement. L'idée de ramener les descriptions réelles à de simples problèmes de statique revient à Jean Le Rond d'Alembert, mathématicien et physicien français (1717-1783), surtout connu pour être l'un des rédacteurs de l'Encyclopédie⁽⁷⁾. L'inventeur des forces d'inertie, c'est lui.

Se penchant sur le premier principe de Newton (principe d'inertie⁽⁸⁾), d'Alembert conçut d'inverser le raisonnement en considérant que tout système accéléré pouvait être décrit comme étant immobile, cette inertie (au vrai sens du terme) nécessitant l'introduction d'une force pour expliquer un mouvement apparent, etc. Une démarche qui, finalement, aurait pu lui valoir le sobriquet de "*d'À l'envers*", mais qu'importe, Descartes était vengé⁽⁹⁾ !

Logique purement théorique mais parfaitement conforme à la tradition intellectuelle française qui, contrairement à la culture anglo-saxonne, préfère l'abstraction plutôt que la réalité, le concept plutôt que son application, la théorie plutôt que la pratique...

Le rôle des professeurs

Le concept est une chose, l'engouement qu'il peut susciter en est une autre. Quel rôle les professeurs ont-ils joué dans la mystification ?

Même s'il est bien évident qu'aucun professeur de physique digne de ce nom n'a jamais pu confondre l'origine d'un phénomène et ses effets, la cause d'un mouvement et ses conséquences, le réel et l'imaginaire, toute démarche scientifique consistant justement à chercher des explications parfois contre-intuitives à des observations qui ne sont logiques qu'en apparence, le résultat est là.

Le raisonnement de D'Alembert, relayé quelques années plus tard par celui de Gaspard Coriolis (l'inventeur de la force qui porte son nom, voir le dossier ADILCA "*force de Coriolis*"), rencontra un vif succès auprès du corps enseignant.

Et comme la plupart des professeurs de physique sont 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, déconnectés de la réalité, ils ont oublié d'en délivrer le mode d'emploi.

Au fil du temps et des cours, les descriptions imaginaires ont progressivement supplanté les descriptions réelles.

Conclusion

Le concept de force d'inertie a été utilisé à tort et travers pour décrire n'importe quel mouvement de variation de vitesse, hélas sans aucune précaution quant à son mode d'emploi.

La force d'inertie n'apparaît qu'en statique ou dans un référentiel relatif, elle n'a pas d'existence réelle, pas plus que la force centrifuge et la force de Coriolis (voir les dossiers ADILCA "*force centrifuge*" et "*force de Coriolis*").

La force d'inertie est une force imaginaire qui ne sert qu'à expliquer un mouvement apparent, et à condition d'ignorer le mouvement réel.

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

La vérité est autrement plus logique : pour accélérer une voiture, il suffit d'une seule force qu'on appelle force de traction. Pour la freiner, il suffit d'une seule autre force qu'on appelle force de freinage.

La force de traction et la force de freinage sont des forces de contact qui s'exercent à la périphérie des pneumatiques de la voiture, selon que le conducteur appuie sur l'accélérateur ou sur la commande de frein.

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 d'inertie.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

NOTES

(1) *En réalité, le ballon ne glisse pas mais tourne sur lui-même, acquérant ainsi une énergie cinétique de rotation. Si le camion stoppe brutalement, cette énergie accumulée peut suffire pour entraîner le ballon vers la ridelle arrière. Dans le cadre de cette expérience, c'est ce qu'on appelle un artéfact.*

(2) *La Terre est le référentiel absolu pour décrire le mouvement des véhicules terrestres puisque ceux-ci se déplacent par rapport à la Terre. Attention : un même référentiel peut être 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 le dossier ADILCA "système solaire").*

(3) *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 le dossier ADILCA "référentiels").*

(4) *Par définition, un référentiel relatif (ici le camion) doit être considéré comme parfaitement immobile, même si en réalité il ne l'est pas, c'est l'unique critère de sa légitimité et la clé du raisonnement.*

(5) *Le principe de réciprocité ne peut s'appliquer qu'à des forces réelles, jamais à des forces fictives. En effet, dans une description imaginaire, les interactions n'existent pas. Autrement dit, la force d'inertie, la force centrifuge et la force de Coriolis ne sont pas concernées par ce principe.*

(6) *L'égalité de la force de traction et de l'action réciproque ne signifie pas que leurs effets soient identiques. En effet, selon le principe de dynamique (deuxième loi de Newton), une force produit une accélération inversement proportionnelle à la masse sur laquelle elle s'exerce (relation fondamentale $[F = M Y]$ d'où $[Y = F / M]$). Dans l'exemple donné, la force de traction s'exerce sur le camion, l'action réciproque s'exerce sur le globe terrestre. Entre un camion de 10 tonnes et la Terre (6×10^{24} kg), le rapport des masses est de 1 pour 6×10^{20} , soit 1 pour 600 milliards de milliards, à l'avantage de la Terre, au détriment du camion.*

(7) *Le titre complet de cet ouvrage est "Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers", ouvrage gigantesque visant à faire le point des connaissances de l'époque, le premier du genre publié en France (1772). Dans ce domaine-là également, les Anglais avaient tiré les premiers : un ouvrage similaire intitulé "Cyclopaedia", rédigé à l'initiative d'Ephraim Chambers, circulait déjà en Angleterre depuis 1732.*

(8) *Ne pas confondre le concept d'inertie de D'Alembert (raisonnement imaginaire, dit "statique") avec le principe d'inertie d'Isaac Newton (raisonnement réel, dit "dynamique"). Le principe d'inertie de Newton (premier principe), énonce que : « Toute masse immobile sur laquelle ne s'exerce aucune force reste immobile. Toute masse en mouvement sur laquelle ne s'exerce aucune force décrit une trajectoire rectiligne et conserve sa vitesse. » La notion de force se déduit de ce principe et peut se définir ainsi : « Une force désigne toute cause capable d'agir sur la trajectoire ou la vitesse d'une masse. » (voir le dossier ADILCA "Isaac Newton").*

(9) *La rivalité franco-anglaise de l'époque ne s'est pas limitée aux seuls domaines de l'industrie et du commerce, elle s'est manifestée également au travers des sciences et du raisonnement scientifique. Ainsi, pour expliquer le mouvement des planètes du système solaire, René Descartes, mathématicien et philosophe français (1596-1650), avait supposé l'existence d'un fluide ("éther") agissant comme un courant d'air, hypothèse définitivement balayée par Newton.*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

II. FORCE D'INERTIE : LE MODE DE CALCUL

1. Calcul d'une accélération ou décélération :

$$Y = \Delta V / T$$

Y : accélération ou décélération, exprimée en **m.s⁻²**
V : variation de vitesse, exprimée en **m.s⁻¹**
T : temps, exprimé en **s**
cohérence des unités : **Y = m.s⁻¹ . s⁻¹ = m.s⁻²**

Exemple : calculons l'accélération d'une voiture dont la vitesse varie de 0 à 30 mètres par seconde en 15 secondes :

$$Y = 30 / 15 = 2 \text{ m.s}^{-2}$$

2. Calcul de la force de traction ou de freinage :

$$F = M . Y$$

F : force de traction ou de freinage, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
Y : accélération ou décélération, exprimée en **m.s⁻²**
cohérence des unités : **F = kg . m.s⁻² = kg.m.s⁻² = N**

Exemple 1 : calculons la force de traction qui s'exerce sur les pneumatiques des roues motrices d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes lorsque celle-ci est soumise à une accélération de 2 mètres par seconde carrée :

$$F = 1\,500 \times 2 = 3\,000 \text{ N}$$

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

Exemple 2 : calculons la force de traction qui s'exerce sur un passager de masse 100 kilogrammes lorsque la voiture est soumise à une accélération de 2 mètres par seconde carrée :

$$F = 100 \times 2 = 200 \text{ N}$$

Cette force s'exerce sur le passager par l'intermédiaire du dossier du fauteuil. En vertu du principe de réciprocité, le passager exerce une action réciproque sur le dossier du fauteuil, d'égale intensité mais de sens opposé. Cette action réciproque est parfaitement ressentie par le passager, elle a été interprétée à tort comme étant une manifestation de la force d'inertie.

3. Calcul de l'action réciproque :

$$A = - F$$

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

F : force de traction ou de freinage, exprimée en **N**

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

Exemple 1 : calculons l'action réciproque que les pneumatiques des roues motrices d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes exercent sur le globe terrestre lorsque la force de traction est égale à 3 000 N :

$$A = - 3\ 000\ \text{N}$$

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

Exemple 2 : calculons l'action réciproque qu'un passager de masse 100 kilogrammes exerce sur le fauteuil et la carrosserie d'une voiture lorsque la force de traction à laquelle il est soumis est égale à 200 N :

$$A = - 200\ \text{N}$$

Le passager ressent parfaitement cette action réciproque qui lui donne l'impression de peser sur le fauteuil. La carrosserie doit être suffisamment rigide et le fauteuil suffisamment bien fixé pour résister à cette action.

4. Calcul de la force d'inertie :

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

F' : force d'inertie, exprimée en **N**

M : masse, exprimée en **kg**

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

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

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

Exemple 1 : calculons la force, dite "*force d'inertie*", qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile, tous freins bloqués, pour créer, sur les suspensions et les pneumatiques, un effet comparable à celui observé dans la réalité lorsque l'accélération est égale à 2 mètres par seconde carrée :

$$F' = - 1\ 500 \times 2 = - 3\ 000\ \text{N}$$

Exemple 2 : calculons la force, dite “*force d’inertie*”, 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 une sensation identique à celle qu’il éprouve dans la réalité lorsque l’accélération est égale à 2 mètres par seconde carrée :

$$F' = - 100 \times 2 = - 200 \text{ N}$$

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

Remarque 2 : cette force, dite “*force d’inertie*”, est une force purement imaginaire puisque la voiture est immobile et le reste. Pour lever toute ambiguïté, il est préférable de la qualifier de force imaginaire, force fictive ou pseudo-force.

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

- l’action réciproque est une force réelle que le passager ressent parfaitement et qu’il exerce par contact avec le dossier du fauteuil, en réponse à la force de traction quand la voiture accélère.
- la force d’inertie est une force imaginaire qu’il est impossible de ressentir : c’est la force qu’il faudrait exercer sur le centre de gravité du passager, si la voiture était immobile.

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

Remarque 5 : une démarche scientifique doit passer par quatre étapes :

- 1) observer un *phénomène* (ici, une voiture qui accélère ou qui ralentit) ;
- 2) mesurer des *grandeurs* (ici : la masse de la voiture et la variation de vitesse couplée au temps) ;
- 3) effectuer des *calculs* (ici : calcul d’une force de traction ou de freinage) ;
- 4) éventuellement, transposer un *raisonnement* (ici : passage d’une description réelle à une description imaginaire avec l’introduction du concept de force d’inertie).

Les trois premières étapes sont obligatoires, elles 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 d’inertie.

III. FORCE D'INERTIE : LES MANUELS SCOLAIRES

La *force d'inertie* est, avec la force centrifuge et la force de Coriolis, l'une des trois forces fictives utilisées par les physiciens dans le cadre de descriptions imaginaires. Apparemment distinctes, ces trois forces sont issues d'une seule et même théorie :

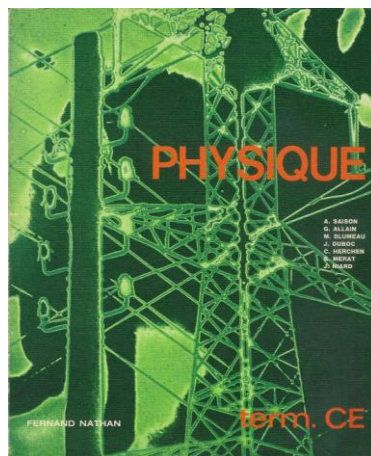
- la *force centrifuge*, dite aussi « *force d'inertie centrifuge* » est un cas particulier du concept d'inertie appliqué au mouvement d'une masse qui décrit une trajectoire circulaire (voir le dossier ADILCA "*force centrifuge*").

- la *force de Coriolis*, dite aussi « *force d'inertie de Coriolis* » est un cas particulier du concept d'inertie appliqué au mouvement d'une masse qui se déplace à la surface de la Terre (voir le dossier ADILCA "*force de Coriolis*"). La force de Coriolis ne figurant pas au programme de l'enseignement secondaire, nous ne l'aborderons pas ici.

Comment les manuels scolaires ont-ils traité le concept de force imaginaire ?

1. LA FORCE D'INERTIE

L'un des ouvrages les plus dogmatiques dans le genre est sans doute le "SAISON, ALLAIN, BLUMEAU, DUBOC, HERCHEN, MÉRAT & NIARD", livre de physique pour classes terminales C et E paru aux éditions Fernand Nathan en 1980.



"SAISON, ALLAIN, BLUMEAU, DUBOC, HERCHEN, MÉRAT & NIARD"
Physique, classes terminales C et E (Éditions Fernand Nathan).

Qui sont les auteurs ? Jean DUBOC était maître de recherche au CNRS. Micheline BLUMEAU et Claude HERCHEN enseignaient dans des lycées expérimentaux. Jean NIARD enseignait dans un lycée technique. Gilbert ALLAIN et Robert MÉRAT étaient inspecteurs pédagogiques et André SAISON, inspecteur général de l'éducation nationale.

Les phrases litigieuses

Voici comment ce livre, écrit à sept mains, évoque la force d'inertie :

- page 81, à propos du passager d'une voiture qui accélère : « *Il ressent la force d'inertie puisqu'elle l'applique contre le dossier.* »

- page 82 : « *Cette force d'inertie est d'ailleurs ressentie par le passager puisqu'elle l'applique contre le dossier du fauteuil.* »

- page 83, dans le cas d'une voiture qui freine : « *Il ressent la force d'inertie puisqu'elle le propulse vers le pare-brise.* »

Répétée trois fois, cette phrase a forcément été écrite, relue, validée et cautionnée par les auteurs qui, rappelons-le, étaient au nombre de sept...

Plus surprenant encore, parmi ces sept professeurs, il y avait trois inspecteurs de l'enseignement dont on peut penser qu'ils étaient rompus à la traque des fautes pédagogiques...

Il ne faut donc pas s'étonner si cette série d'affirmations a pu convaincre les jeunes lycéens de l'existence d'une force imaginaire.

Des affirmations erronées

Circuler en voiture est une situation banale. En associant une expérience vécue à un concept imaginaire, nos sept éminents professeurs ont réalisé un véritable tour de passe-passe digne d'un camelot de foire.

Une faute pédagogique, car il n'y avait pas de phrase plus perverse pour convaincre les jeunes lycéens de l'existence d'une force imaginaire.

C'est exactement comme si, évoquant le système solaire, les auteurs du livre avaient écrit :

« *Levez les yeux vers le ciel, jeunes gens ! Vous voyez bien que c'est le Soleil qui tourne autour de la Terre !* »

L'étude des phénomènes naturels consiste justement à relativiser les perceptions et les sensations pour leur substituer un esprit de logique et de raisonnement. C'est ainsi que l'humanité est passée de l'obscurantisme à la science.

Pourquoi ces affirmations sont-elles erronées ? La force d'inertie est une force imaginaire, par conséquent il est absolument impossible d'en observer ou d'en ressentir les effets.

Les sensations du passager ont donc une tout autre explication.

Le raisonnement correct

D'où viennent ces sensations éprouvées par le passager quand la voiture accélère, décélère ou décrit une trajectoire circulaire ?

En réalité, le passager ne peut ressentir que des phénomènes provenant de forces qui s'exercent véritablement sur la voiture, à savoir : la *force de traction*, la *force de retenue*, la *force de freinage* ou la *force de guidage*. Car il n'y en a que quatre, il n'en existe pas d'autre !

Ces forces naissent à la périphérie des pneumatiques au contact du sol, elles se transmettent ensuite à la carrosserie de la voiture et à tout ce qu'elle contient (voir les dossiers ADILCA "*force d'inertie*", "*force centrifuge*", "*couple moteur & force de traction*", "*force de freinage*", "*force de guidage*", etc.), elles parviennent enfin au passager par l'intermédiaire du fauteuil et de son dossier.

C'est donc le dossier du fauteuil qui vient s'appliquer sur le passager pour lui communiquer une accélération, et non le contraire !

En réponse, le passager exerce une *action réciproque* sur le dossier, un phénomène qui n'a rien à voir avec la force d'inertie. De quoi s'agit-il ?

Le principe de réciprocité

Le troisième principe de Newton, ou *principe de réciprocité*, énonce ceci :

« Toute masse sur laquelle s'exerce une force entraîne une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé. »

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas qui nous occupe ? Dans une description statique faisant intervenir la force d'inertie, ce principe est inapplicable puisque, la description étant imaginaire, les interactions n'existent pas.

Par contre, dans une description dynamique, le principe de réciprocité s'applique : le dossier du fauteuil exerce une *action* sur le passager. En retour, le passager exerce une *action réciproque* sur le dossier du fauteuil, d'égale intensité mais de sens opposé. C'est cette action réciproque que le passager ressent, et non la force d'inertie.

Autre confusion à éviter : la force de traction et l'action réciproque sont bien égales mais cela ne signifie pas que leurs effets soient identiques, puisque l'action du passager s'efface devant celle des roues motrices^(*). C'est là tout l'intérêt de l'automobile, avec des moteurs plus puissants que le corps humain et des fauteuils solidement fixés aux carrosseries. Essayons d'imaginer ce qu'il se passerait si ce n'était pas le cas...

En résumé : en seulement trois petites phrases, nos sept éminents professeurs ont introduit une confusion entre force d'inertie et action réciproque. Un exploit qui laissera des traces.

Force d'inertie : la véritable définition !

La réalité du mouvement est donc celle-ci : la force de traction se transmet au passager par l'intermédiaire du fauteuil. Le passager exerce alors une action réciproque sur le fauteuil. Tout est dit.

Et la force d'inertie dans tout ça ? Voici la définition correcte :

“On appelle force d'inertie la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité du passager d'une voiture immobile pour le voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité lorsque la voiture accélère ou freine.”

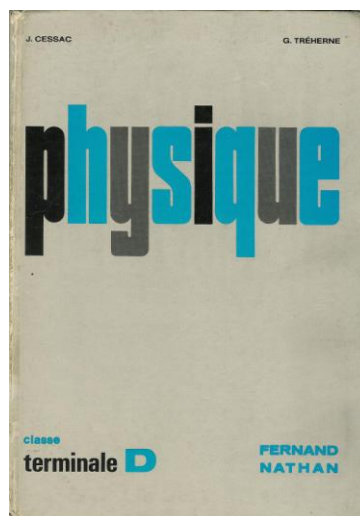
Conclusion

Ces précisions paraîtront sans doute excessives aux yeux des pédagogues modernes, mais nous les jugeons indispensables quand on s'adresse à des étudiants.

De toute évidence, les auteurs de ce manuel ne se sont guère embarrassés de ce genre de principes. D'ailleurs, ils n'ont jamais mentionné la moindre force réelle. Nos sept éminents professeurs en ignoraient-ils l'existence ? Eux seuls pourraient le dire...

2. LA FORCE D'INERTIE CENTRIFUGE

Le concept de « *force d'inertie centrifuge* » a été introduit en 1966 dans le “CESSAC & TRÉHERNE”, livre de physique pour classe terminale D paru aux éditions Fernand Nathan, ouvrage officiel de l'éducation nationale jusqu'à l'aube des années quatre-vingts.



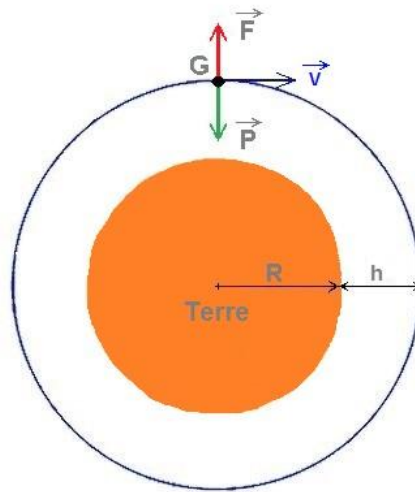
“CESSAC & TRÉHERNE”
Physique, classe terminale D (Éditions Fernand Nathan).

Qui sont les auteurs ?

Jean CESSAC, professeur agrégé de physique en 1933, publia son premier manuel scolaire en 1939. Devenu inspecteur général de l'instruction publique, il collabora avec Georges TRÉHERNE, professeur agrégé de physique au lycée JANSON DE SAILLY de Paris, à la rédaction d'un nouveau manuel de physique destiné aux classes terminales. Le premier opus d'une longue série parut en 1947, édité par Fernand Nathan.

Un dessin incohérent

La « *force d'inertie centrifuge* » apparaît à la page 62 dans un dessin unique et sans légende illustrant le mouvement d'un satellite en orbite circulaire autour de la Terre. Ce dessin, le voici fidèlement reproduit avec l'autorisation de l'éditeur.



Dessin "CESSAC & TRÉHERNE" (© Éditions Fernand Nathan, Paris 1977).

Détaillons ce dessin : le centre de gravité (G) du satellite est animé d'une vitesse (V) et d'une trajectoire circulaire (cercle noir) imposée par l'attraction de la Terre. Cette attraction, c'est le poids (P) du satellite.

Jusqu'ici, tout est normal et si la description en restait là, le mouvement du satellite serait parfaitement logique.

Hélas, nos deux éminents professeurs ont cru bon d'affubler le dessin d'une force supplémentaire (F), dénommée « *force d'inertie centrifuge* », dont on se demande ce qu'elle vient faire là, sinon compliquer le dessin et le rendre incompréhensible.

Deux interprétations possibles

Pourquoi ce dessin est-il incohérent ? Envisageons deux interprétations possibles :

1. Première interprétation : les deux forces (P) et (F) sont d'égale intensité mais de sens opposé, autrement dit, ces deux forces se neutralisent. Dans ce cas, c'est comme si le satellite n'était plus soumis à la moindre force, il devrait donc décrire une trajectoire rectiligne. Autrement dit, le satellite devrait quitter l'orbite terrestre et s'éloigner de la Terre dans la direction indiquée par (V). Mais alors, comment expliquer la trajectoire circulaire (cercle noir) figurant sur le dessin ?

2. Seconde interprétation : le satellite décrit la fameuse trajectoire circulaire (cercle noir) figurant sur le dessin, mais dans ce cas, l'une de ces deux forces (P) ou (F) est de trop. Une force en trop, oui mais laquelle ? Comme il n'est pas question d'ignorer le phénomène de gravitation, on en déduit que c'est cette fameuse « *force d'inertie centrifuge* » (F) qu'il faudrait supprimer. Une preuve supplémentaire que cette force n'existe pas.

De toute évidence, ces deux interprétations sont contradictoires, elles s'excluent mutuellement. De fait, il n'est pas possible de les faire cohabiter. Le dessin unique et sans légende présenté tel quel dans le fameux "CESSAC & TRÉHERNE" est donc bien complètement incohérent.

Réflexion faite, il aurait fallu deux dessins bien distincts accompagnés de deux légendes parfaitement explicites pour éviter toute confusion dans l'esprit des jeunes lecteurs comme dans celui des futurs professeurs (voir le dossier ADILCA "Cessac & Tréherne").

Conclusion

Les manuels scolaires ont été rédigés par d'éminents professeurs auxquels les lecteurs ont accordé une confiance aveugle. Mais ces ouvrages ne sont pas irréprochables quand il s'agit de la force d'inertie.

En effet, certains de ces ouvrages contiennent des aberrations qui ont pu contaminer les esprits et court-circuiter tout raisonnement logique.

Conclusion : méfiez-vous de ce que vous lisez ici ou là. Méfiez-vous des affirmations péremptoires. Méfiez-vous du raisonnement et des dessins de vos professeurs, aussi sympathiques et compétents soient-ils !

(*) *Deuxième principe de Newton déjà évoqué* : « L'accélération produite par une force est inversement proportionnelle à la masse sur laquelle elle s'exerce. » *Relation fondamentale* $[F = M Y]$ d'où $[Y = F / M]$.