

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

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, qui sont les véritables causes du mouvement, et les forces fictives (également appelées forces apparentes, forces imaginaires, ou pseudo-forces), qui interviennent uniquement dans le cadre de descriptions 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.

Une description réelle...

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.

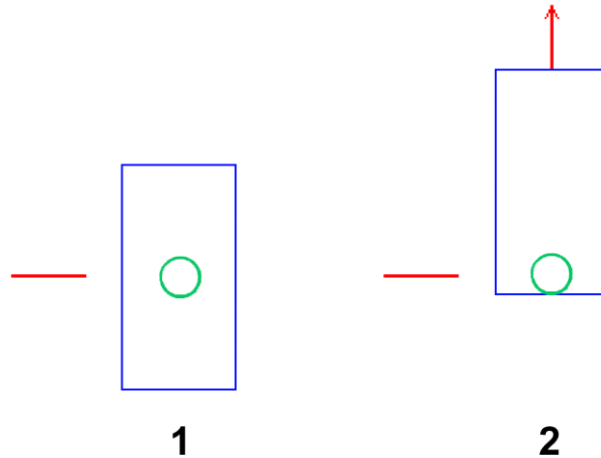
Cette force apparente, c'est la *force d'inertie*. Mais attention : le mouvement du ballon relève d'une illusion d'optique. En effet, un repère au sol permet de vérifier qu'en réalité le ballon ne s'est pas déplacé, il a seulement été rattrapé puis heurté par la ridelle arrière.

Explication : la seule force sollicitée dans cette expérience est la force de traction provenant du moteur. Cette force s'exerce d'abord 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 donc 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. La force d'inertie est bien une force imaginaire.



© 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.

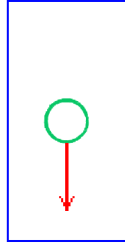
Une description imaginaire...

Imaginons maintenant que le ballon bouge tout seul, sans que personne ne le touche, et sans pour autant que le camion démarre. C'est évidemment impossible.

Mais fermons les yeux un instant et imaginons que l'expérience précédente se déroule sans le moindre repère visuel par rapport au sol. Dans une telle description, purement imaginaire bien sûr, la force de traction délivrée par le camion n'existe plus.

Il faut alors expliquer le mouvement du ballon sans s'occuper du camion, c'est-à-dire en faisant totalement abstraction de son déplacement propre. Oui ! Il faut raisonner comme si le camion n'avait pas bougé.

Bel effort d'imagination ! Les physiciens adorent ce genre d'exercice ⁽²⁾. C'est donc ça la force d'inertie : une force fictive servant à expliquer un mouvement qui ne se manifeste que dans le cadre d'une description imaginaire. Dans la réalité, la force d'inertie n'existe pas.



© association adilca reproduction interdite

La force d'inertie est une force imaginaire : elle serait théoriquement capable de faire bouger le ballon, tandis que le camion resterait parfaitement immobile.

La mascotte suspendue au rétroviseur...

Voici une autre expérience facile à réaliser et très souvent interprétée à tort comme apportant la preuve de l'existence de la force d'inertie.

Il suffit de suspendre une mascotte ou un pendule quelconque au rétroviseur intérieur d'une voiture. En ligne droite et à vitesse constante, la mascotte n'est soumise qu'à la seule force de gravitation, elle reste donc strictement immobile et indique une verticale parfaite.

Mais lors des variations de vitesse ou de trajectoires, la mascotte s'incline. D'où vient ce mouvement ? Voici l'explication correcte.

Détaillons ce qu'il se passe au démarrage : de l'intérieur de la voiture, on constate que la mascotte s'incline vers l'arrière, on a l'impression qu'elle est animée d'une force apparente, ce terme soulignant bien qu'il s'agit là d'une observation valable uniquement dans le référentiel voiture.

Mais en réalité, dans le référentiel Terre, la mascotte n'a aucune raison de bouger si aucune force ne s'exerce sur elle. Elle reste donc immobile, complètement inerte, tout comme le ballon dans la benne du camion, et ce jusqu'au moment où l'accélération de la voiture lui est transmise. D'où vient cette accélération et comment est-elle transmise ?

L'accélération de la voiture provient de la force de traction qui s'exerce sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol. Cette force est transmise ensuite au reste de la voiture et à tout ce qu'elle contient par l'intermédiaire des roues, du châssis et de la carrosserie. Elle parvient enfin à la mascotte grâce au rétroviseur et à la ficelle au bout de laquelle elle pend. D'où son inclinaison.

Cette force apparente, c'est la force d'inertie. Elle semble faire bouger la mascotte, mais cette observation ne relève que d'une simple illusion d'optique. En réalité, cette force n'existe pas et un repère au sol permettrait de vérifier que, dans la phase d'inclinaison de la mascotte, il n'y a aucun déplacement par rapport à la Terre. Ce n'est qu'une fois l'inclinaison stabilisée que la mascotte se déplace vraiment et prend de la vitesse, grâce la force de traction que lui transmet la ficelle.

Le même phénomène se reproduit au freinage, et ces explications permettent de mieux comprendre ce que peuvent ressentir les passagers.

L'effet "ceinture de sécurité"...

Lors d'un freinage puissant ou d'une collision, tout passager de voiture a l'impression d'être plaqué contre la ceinture de sécurité, comme animé d'une force apparente.

Cette force apparente, c'est la force d'inertie, bien sûr, mais il ne s'agit là encore, que d'une impression.

En réalité, cette force n'existe pas plus dans cette expérience-là que dans toutes les autres. Alors d'où vient cette impression ? Voici l'explication correcte.

Lorsque le conducteur appuie sur la pédale de freins, la voiture est soumise à la force de freinage qui s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol. Cette force se transmet ensuite aux roues, au châssis, à la carrosserie et à tous ses accessoires.

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 de freinage.

Or ce n'est pas le cas des passagers qui, bien qu'assis sur leurs sièges, gardent tout de même une certaine liberté de mouvement.

Lorsque la voiture commence à ralentir, les passagers conservent donc leur vitesse initiale, tout comme la mascotte dans l'expérience précédente, et ce jusqu'à ce que les ceintures de sécurité leur communiquent cette fameuse force de freinage.

Dans cet exemple, les ceintures de sécurité jouent pour les passagers le même rôle que la ficelle pour la mascotte.

Les passagers d'une voiture ne sont donc jamais projetés en avant, ils sont simplement freinés par la carrosserie et les ceintures de sécurité... ou par le tableau de bord et le pare-brise, s'ils ont oublié de boucler leurs ceintures de sécurité.

Les sensations qu'ils éprouvent viennent donc uniquement de la force de freinage que leur communique la voiture. La force d'inertie étant une force imaginaire, il est bien évidemment impossible d'en observer ou d'en ressentir les effets.

Le mouvement des bagages...

Et les bagages dans le coffre ou les objets posés sur la tablette arrière ?

L'explication est identique à celle qui concerne les passagers : lors d'un freinage ou d'une collision, le mouvement des bagages dans le coffre ou des objets posés sur la tablette arrière n'est qu'apparent.

En réalité, ces objets ne sont jamais projetés en avant, ils conservent simplement leur vitesse initiale s'ils n'ont pas été solidement fixés à la carrosserie, et tant qu'une partie quelconque de la carrosserie ne peut leur communiquer la moindre force de freinage.

Action et réaction : le troisième principe de Newton

Une autre erreur fréquente consiste à présenter la force d'inertie comme étant la réaction (au sens *newtonien* du terme) associée à la force de traction ou de freinage.

Que dit le troisième principe de Newton ? C'est le principe d'action réaction ⁽³⁾ : *“Toute force qui s'exerce sur une masse entraîne une réaction 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, la réaction associée à une quelconque force ne peut exister et ne peut se manifester que dans le cadre d'une description unique, et à partir d'un référentiel commun. Là encore, tout mélange est rigoureusement proscrit.

Logiquement, la force de traction ou de freinage s'exerçant au contact du sol, les réactions associées à ces deux forces ne peuvent se manifester qu'au niveau du sol, elles aussi, et nulle part ailleurs.

De fait, cette fameuse réaction existe bien. En effet, quand un véhicule terrestre accélère ou freine, les pneumatiques prennent appui sur le sol : ils exercent alors 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 ⁽⁴⁾.

Autrement dit, le principe d'action réaction 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 la réaction à une quelconque force.

Choisir le bon référentiel !...

Ces diverses réflexions nous ramènent à la théorie des référentiels, et on peut résumer ainsi les expériences précédentes :

- les unes sont observées dans un référentiel absolu (ici la Terre) et décrivent un mouvement réel ;

- les autres sont observées dans un référentiel relatif (ici le véhicule) et décrivent un mouvement apparent.

Bien évidemment, ces deux référentiels sont parfaitement distincts, il n'est donc pas question de les confondre, et encore moins de les mélanger (voir le dossier ADILCA "référentiels"). Or malheureusement, c'est une erreur fréquente.

Choisir la bonne description !...

Pour être complet, précisons enfin que, dans un référentiel absolu (ici, la Terre), la description peut être "dynamique" ou "statique" :

- dans une description "dynamique", la voiture est en mouvement, sa masse est accélérée ou décélérée grâce à la force de traction ou de freinage qui s'exercent à la périphérie des pneumatiques ;

- dans une description "statique", la voiture est immobile ; on imagine alors une force supposée s'exercer sur le centre de gravité et capable de comprimer les pneumatiques et les suspensions avec un effet comparable à celui que l'on observe dans la réalité lorsque la voiture est accélérée ou décélérée.

Bien évidemment, ces deux descriptions sont totalement contradictoires, il n'est donc pas question de les superposer (voir le dossier ADILCA "statique et dynamique"). Or malheureusement, c'est une confusion classique.

Force d'inertie : la véritable définition !

Ce qui précède nous amène à ces deux définitions originales et inédites 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."

"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."

Insistons sur les trois exigences de ces définitions :

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 s'exerce et ne peut s'exercer sur le centre de gravité de quelque masse que ce soit, excepté le poids (cette exigence seule suffirait à prouver le caractère irréal de la force d'inertie).

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

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... Les physiciens adorent ce genre d'exercice !

Cependant, en ce qui concerne la force d'inertie, la démarche habituelle 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, 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.

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. Bref, il est interdit de parler de force d'inertie sans parler de force de traction ou de freinage, 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 :

$$Y = V / T$$

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

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 :

$$F = M Y$$

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

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 :

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

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 !

Bref, ces deux vecteurs n'appartiennent pas du tout 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) 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 n'a rien d'étonnant puisque le capteur étant solidement fixé à la carrosserie, il subit la même accélération.

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 de la force de traction, et 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⁽⁵⁾. L'inventeur des forces d'inertie, c'est lui.

Se penchant sur l'œuvre de Newton et la jugeant incomplète, d'Alembert conçut d'inverser le raisonnement en considérant que tout corps accéléré pouvait être décrit comme étant immobile, son état d'inertie le rendant capable de générer une force, etc. Une démarche qui, finalement, aurait pu lui valoir le sobriquet de "*d'À l'envers*", mais qu'importe, Descartes était vengé⁽⁶⁾ !

Prodigieuse acrobatie mentale mais sans grand intérêt pour le domaine qui nous occupe. Logique purement imaginaire, déclinée à tort et à travers, adaptée à toutes les sauces, processus 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 pédagogique 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, non seulement auprès des intellectuels français, mais aussi du corps enseignant, à un point tel qu'on peut même parler d'une certaine fascination.

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.

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

Les manuels scolaires de physique...

Que doit-on penser des manuels scolaires de physique ?

Il suffit de jeter un coup d'œil sur les productions modernes, tous niveaux confondus (collèges, lycées, enseignement supérieur) pour constater l'ampleur du phénomène. Le moins que l'on puisse dire, c'est que ces manuels font la part belle aux descriptions imaginaires.

Cependant, l'honnêteté, la bonne foi ou les bonnes intentions des auteurs ne sont pas en cause. En effet, la plupart de ces ouvrages ayant été rédigés par des théoriciens et non par des hommes de terrain, il est tout à fait logique d'y retrouver les descriptions des uns au détriment de celles des autres (voir le dossier ADILCA "*Cessac et Tréherne*").

Ajoutons que, lorsqu'il s'agit de rédiger un manuel de physique, le concept de force d'inertie est très pratique puisqu'il s'agit d'un concept générique global capable de s'adapter à nombre de phénomènes.

Au contraire, la description d'un mouvement réel exige beaucoup plus de minutie, au sens étymologique du terme, et relève plutôt de l'ouvrage spécialisé : les forces qui s'exercent sur une voiture, par exemple, ne sont pas exactement les mêmes que celles qui s'exercent sur un bateau, un avion ou un satellite, il est donc long et délicat de les recenser et de les exposer en détail.

... et ceux qui les ont lus !

Comment les lycéens et étudiants ont-ils assimilé ces nuances ?

La pédagogie, c'est l'art de comprendre ce qu'il se passe dans la tête des élèves. Ici, les connaissances sophistiquées, l'honnêteté et les bonnes intentions ne peuvent plus suffire.

Hélas, le système a toujours fonctionné en circuit fermé : à travers les examens, les professeurs n'ont validé que les connaissances jugées fondamentales, dans les limites de leurs compétences et de leurs connaissances.

Mettons-nous à la place des élèves : quand le discours des professeurs et celui des manuels scolaires se conjuguent pour seriner en boucle le dogme obligatoire, il est bien difficile d'échapper à l'endoctrinement. Oui, même en science, c'est possible !

Le résultat est là : dans l'esprit des physiciens en herbe, les descriptions imaginaires ont supplanté les descriptions réelles.

Conclusion

La force d'inertie est, avec la force centrifuge et la force de Coriolis (voir les dossiers ADILCA "*force centrifuge*" et "*force de Coriolis*"), l'une des trois forces fictives (appelées également forces apparentes ou pseudo-forces) qui sont utilisées par les physiciens dans le cadre de descriptions purement imaginaires.

Mais aucune de ces trois forces n'existe réellement. Il est donc strictement impossible d'en observer, d'en ressentir ou d'en mesurer les effets. Qu'on se le dise !

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

NOTES

Note (1) page 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.*

Note (2) page 2 : *Contrairement à ce qu'on pourrait penser, cette manipulation est courante en physique : on dit alors que le camion est devenu un "référentiel non inertiel", ou "référentiel non galiléen" (nous préférons l'appellation de "référentiel relatif" qui en montre bien les limites...). Ça signifie concrètement qu'il est désormais interdit de décrire son mouvement propre. Bref, il faut faire comme si le camion était immobile !*

Note (3) page 5 : *Attention ! Le principe d'action réaction 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.*

Note (4) page 5 : *Attention aux interprétations erronées ! L'égalité de l'action et de la réaction ne signifie pas que leurs effets sont identiques. En effet, selon le principe fondamental de la dynamique, une force produit une accélération inversement proportionnelle à la masse sur laquelle elle s'exerce (relation $[F = M Y]$ ou inversement $[Y = F / M]$). Dans l'exemple donné, l'action s'exerce sur la masse du camion, et la réaction sur celle du 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.*

Note (5) page 9 : *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.*

Note (6) page 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

* * *

FORCE D'INERTIE : LE MODE DE CALCUL

1. Accélération :

$$Y = \Delta V / T$$

Y : accélération, 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. 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 au contact du sol et qui est capable de communiquer une accélération de 2 mètres par seconde carrée à une voiture de masse 1 500 kilogrammes :

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

Exemple 2 : calculons la force de freinage qui s'exerce au contact du sol et qui est capable de communiquer une décélération de 2 mètres par seconde carrée à une voiture de masse 1 500 kilogrammes :

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

3. Force d'inertie :

$$F' = - M . Y$$

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'** = kg . m.s⁻² = **N**

Exemple : 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 la vitesse de la voiture varie de 0 à 30 mètres par seconde en 15 secondes :

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

Remarque 1 : cette force, dite “*force d’inertie*”, n’a pas d’existence réelle 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 2 : le signe [-] est obligatoire, il précise l’orientation spatiale de cette force, contraire à la logique du mouvement.

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

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

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 : masse de la voiture et 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, indispensables, garantissent la traçabilité du raisonnement. La quatrième étape, facultative, n’apporte rien sinon un risque de confusion, d’où les méprises au sujet de la force d’inertie.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

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. En réalité, ces trois forces découlent d'un seul et même principe :

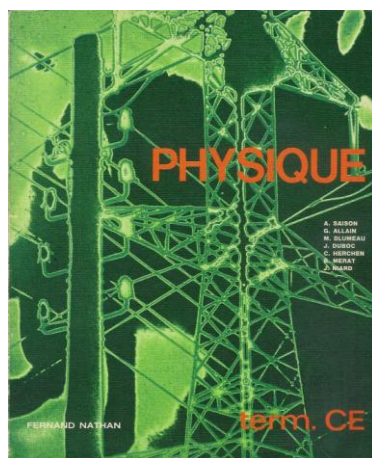
- la *force centrifuge*, dite aussi « *force d'inertie centrifuge* » est un cas particulier du principe d'inertie appliqué au mouvement d'une masse qui décrit une trajectoire circulaire (voir le dossier ADILCA "*force centrifuge*").

- la *force de Coriolis*, dite aussi « *force d'inertie de Coriolis* » est un cas particulier du principe 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.

Imagine-t-on un professeur de physique affirmer que le Soleil tourne autour de la Terre puisqu'il suffit de lever les yeux vers le ciel pour le constater ?

Au contraire, l'histoire de la physique a toujours consisté 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, il est donc absolument impossible d'en observer ou d'en ressentir les effets. Les sensations du passager ont donc une 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 forces réelles, en l'occurrence celles 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 ! C'est donc la force de traction que le passager ressent et non la force d'inertie.

Le principe d'action réaction

Le principe d'*action réaction*, ou troisième principe de Newton, énonce que « *Toute masse sur laquelle s'exerce une force entraîne une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé.* » Comment ce principe s'applique-t-il dans ce cas ?

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, voici comment s'applique ce principe : le dossier exerce une *action* sur le passager. En retour, le passager exerce une *réaction* sur le dossier, d'égale intensité mais de sens opposé.

Attention : l'égalité de l'action et de la réaction ne signifie pas que leurs effets sont identiques : ici, la réaction du passager s'efface devant l'action des roues motrices. C'est bien pour cela qu'on a inventé l'automobile, avec des moteurs plus puissants que les muscles et des fauteuils solidement fixés à la carrosserie. Essayons d'imaginer ce qu'il se passerait si ce n'était pas le cas...

En résumé, en trois petites phrases seulement, nos sept éminents professeurs ont introduit une triple confusion entre force d'inertie, force de traction et réaction du passager. Un exploit.

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 réaction 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

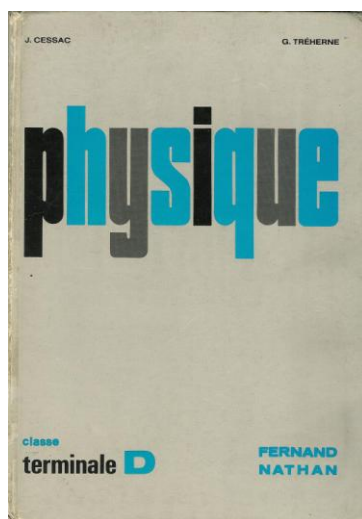
Ces précisions paraîtront sans doute excessives aux yeux des pédagogues modernes, mais nous les jugeons indispensables quand on s'adresse à des étudiants.

À l'évidence, les auteurs de ce manuel ne se sont guère encombrés de ce genre de principes, ces nuances ne figurant nulle part dans le texte.

D'ailleurs, aucune des quatre forces réelles n'y est jamais décrite, ni même mentionnée. 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.



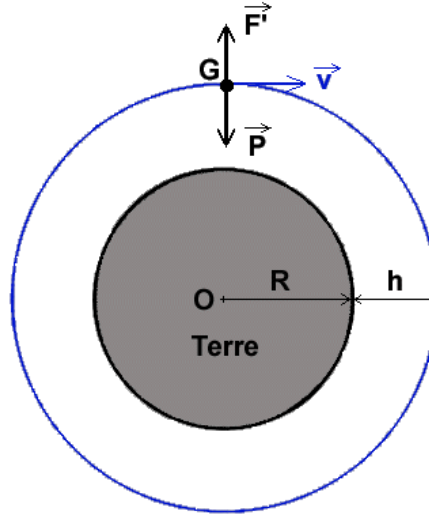
"CESSAC & TRÉHERNE"

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 bleu) 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 bleu) figurant sur le dessin ?

2. Seconde interprétation : le satellite décrit la fameuse trajectoire circulaire (cercle bleu) 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 et deux légendes parfaitement explicites pour lever toute ambiguïté et 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, ainsi qu'on vient de le voir, 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 !

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *