

LA FORCE D'INERTIE

I. LES LOIS DE NEWTON.....	2
II. FORCE D'INERTIE : LA VÉRITABLE DÉFINITION.....	3
III. FORCE D'INERTIE ET PRINCIPE DE RÉCIPROCITÉ.....	9
IV. FORCE D'INERTIE : LA BONNE FORMULE.....	12
V. QUI A « INVENTÉ » LA FORCE D'INERTIE ?.....	15
VI. LA FORCE D'INERTIE DANS LES MANUELS SCOLAIRES...	19
VII. FORCE D'INERTIE : LE MODE DE CALCUL.....	25
VIII. BIBLIOGRAPHIE.....	28

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.

Ces lois s'énoncent ainsi :

Principe d'inertie

« *Une masse immobile sur laquelle n'agit aucune force, reste parfaitement immobile.* »

« *Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, conserve intégralement sa vitesse.* »

Le concept de force découle de ce principe.

Concept de force

« *Une force désigne toute cause capable de faire varier la vitesse d'une masse.* »

Principe de réciprocité

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

Comment ces lois s'appliquent-elles pour décrire le mouvement d'un véhicule terrestre, et comment définir le concept de force d'inertie ?

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

II. FORCE D'INERTIE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

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

Rappel

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

Conformément au *principe d'inertie* d'Isaac Newton, une masse sur laquelle ne s'exerce aucune force reste immobile ou garde une vitesse constante. D'où cette définition : une *force* désigne toute cause capable d'accélérer ou décélérer une masse. On distingue deux types de forces : les forces réelles et les forces imaginaires.

Précision

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 purement imaginaire, ainsi que nous allons le voir.

Un phénomène facile à observer

Considérons un camion immobile, garé sur un terrain plat, avec un ballon posé au milieu de la benne. Observons la scène du haut d'une fenêtre ou d'un balcon : dès que le camion démarre, le ballon donne l'impression de rouler vers l'arrière de la benne, comme s'il était animé d'une force apparente.

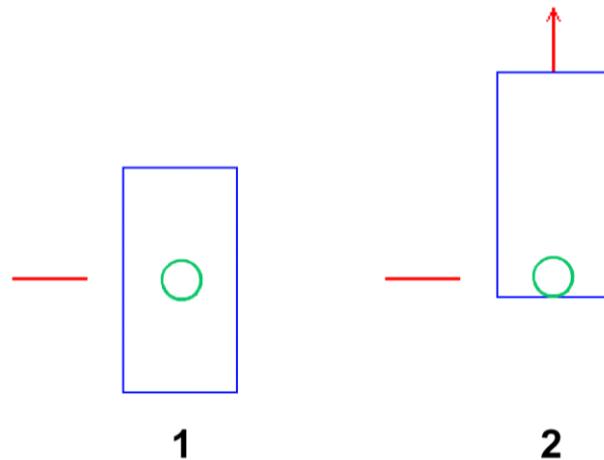
Cette force apparente, c'est la *force d'inertie*. Mais attention : le mouvement du ballon relève d'une illusion d'optique. En effet, un repère au sol permet de vérifier qu'en réalité le ballon ne s'est pas déplacé, il a simplement été rattrapé puis heurté par la ridelle arrière du camion.

Explication : la seule force sollicitée dans cette expérience est la force de traction. Cette force s'exerce d'abord sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol, puis se transmet ensuite au châssis, à la carrosserie, à la benne et à tout ce qu'elle contient.

Or, le point de contact entre la benne et le ballon étant d'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⁽²⁾.

Et c'est justement parce que le ballon reste immobile, insensible au mouvement du camion, et 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, la seule et unique cause du mouvement est la *force de traction* qui s'est exercée sur les roues motrices du camion au contact du sol. Il n'y a pas d'autre force à considérer 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 descriptions sont contradictoires parce qu'elles appartiennent à deux référentiels distincts :

1. Référentiel « Terre » : le mouvement du ballon est décrit à partir d'un système de repères lié au globe terrestre. Ce référentiel est ici qualifié d'*absolu* puisque, par définition, les véhicules terrestres se déplacent par rapport à la Terre⁽³⁾.
2. Référentiel « camion » : le mouvement du ballon est décrit à partir d'un système de repères lié à la benne du camion. Ce référentiel est ici qualifié de *relatif* car, les repères terrestres ayant disparu, le mouvement du camion n'apparaît plus. Pour éviter toute confusion, le mouvement du ballon est alors appelé *mouvement apparent*⁽⁴⁾.

D'où cette règle pour ne pas se tromper : un référentiel relatif (ici le camion) doit être considéré comme parfaitement immobile, alors qu'en réalité, il ne l'est pas⁽⁵⁾. Une règle d'or qu'on peut résumer par cet aphorisme :

« Quand on étudie le mouvement (d'un véhicule), il n'y a pas de force d'inertie. La force d'inertie n'apparaît qu'à condition d'ignorer le mouvement (du véhicule). »

Ce raisonnement va servir de modèle pour toutes les autres expériences censées prouver l'existence de la force d'inertie.

La mascotte suspendue au rétroviseur...

Installons-nous à bord d'une voiture et observons le mouvement d'une 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'une accélération ou d'un freinage, la mascotte s'incline vers l'arrière ou vers l'avant, comme si elle était animée par une force qui agirait sur son centre de gravité. Cette force apparente, c'est la force d'inertie.

En réalité, dans le référentiel « Terre », il n'y a pas de force d'inertie : la mascotte conserve simplement sa vitesse initiale, jusqu'à ce que la force de traction ou de freinage provenant 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 sur 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.



La mascotte suspendue au rétroviseur...

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 : lorsque la voiture accélère ou freine, le mouvement des bagages placés dans le coffre, ou celui 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 leur communique pas la moindre force de traction ou de freinage.

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

Le mouvement des passagers...

Lors d'un freinage puissant, les passagers d'une voiture ont l'impression d'être projetés en avant et 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 ?

Détaillons le mouvement : lorsque le conducteur sollicite les freins, la voiture est soumise à une force qui s'exerce à la périphérie des pneumatiques au contact du sol, c'est la force de freinage. Cette force se transmet ensuite 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 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 : au moment où la voiture ralentit, ils conservent leur vitesse initiale, tout comme la mascotte dans l'expérience précédente, et ce jusqu'à ce que les fauteuils et les ceintures de sécurité leur communiquent cette force.

Le mouvement des passagers n'est donc pas dû à la force d'inertie, mais à la force de freinage qui s'exerce, d'abord sur la voiture, et ensuite sur les passagers, par le biais des fauteuils et des ceintures de sécurité.

Le mouvement de tangage...

Observons une Citroën 2 CV lors d'un freinage brusque. À cause de ses suspensions molles, la voiture s'écrase sur ses roues avant tandis que les roues arrière 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 faire varier la vitesse de la voiture, le conducteur a dû solliciter la force de freinage qui s'exerce sur les pneumatiques 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 freinage* forme un *couple*, au sens physique du terme : 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 freinage s'exerçait directement sur le centre de gravité, il n'y aurait pas de tangage. Le mouvement de tangage n'a donc strictement rien à voir avec la force d'inertie.

Conclusion : il n'y a pas de force d'inertie, ni à l'intérieur de la voiture, ni à l'extérieur.

Force d'inertie : la véritable définition !

Ces différentes expériences 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 fondamentales 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. 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 d'inertie)⁽⁶⁾.

Cette définition précise bien que le référentiel dont il s'agit 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 d'inertie ?

Statique ou dynamique ?

L'observation du mouvement de tangage de la Citroën 2 CV autorise deux descriptions possibles du phénomène :

1. Une description réelle, dite “*dynamique*”, qui décrit le mouvement de la voiture, sa décélération et son tangage, grâce au concept de force de freinage.
2. Une description imaginaire, dite “*statique*” qui considère que la voiture est immobile. Auquel cas il faut imaginer une force longitudinale agissant sur son centre de gravité, capable de créer un tangage artificiel.

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

« *En Statique, on appelle force d'inertie la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile (tous freins serrés) 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. 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 d'inertie).

... et l'aphorisme également :

« *Quand on décrit un mouvement, il n'y a pas de force d'inertie. La force d'inertie apparaît uniquement si on supprime tout mouvement.* »

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

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) *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 artefact.*

(3) *Attention : 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, référentiel absolu pour décrire le mouvement des véhicules terrestres puisque ceux-ci se déplacent par rapport à la Terre (c'est leur unique finalité), est un référentiel relatif pour décrire le mouvement des planètes du système solaire puisque celles-ci se déplacent par rapport au Soleil.*

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

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

(6) *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 D'INERTIE 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 (1^{er} principe) et le concept de force (2^{ème} principe). Voici ce qu'énonce ce principe :

« Toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque 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 :

- Ne pas confondre l'action réciproque avec la force d'inertie : ces deux forces n'appartiennent pas à la même description.
- Par définition, le principe de réciprocité ne s'applique pas aux forces imaginaires (force d'inertie, force centrifuge, force de Coriolis).
- Action et réaction sont deux forces réelles, dites « de contact » qui partagent le même point d'application.
- L'action et la réaction sont égales et opposées mais ne sont pas interchangeables. L'action est attribuée au corps le plus massique parce que c'est lui qui dicte sa loi au plus léger.
- Bien qu'égales et opposées, l'action et la réaction ne s'annulent pas. En effet, l'accélération créée par une force dépend de la masse sur laquelle elle s'exerce, c'est l'une des conséquences du principe fondamental de la dynamique ^(*).

L'application du principe

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas qui nous occupe ? Les forces de traction ou de freinage qui font varier le mouvement de la voiture s'exercent au contact du sol. Logiquement, l'action réciproque se manifeste également au niveau du sol.

De fait, quand un véhicule terrestre accélère ou freine, les pneumatiques prennent appui sur le sol et exercent une poussée horizontale sur la chaussée, d'égale intensité à la force de traction ou de freinage, mais de sens opposé. Cette poussée serait

théoriquement capable de perturber la rotation du globe terrestre, si ce n'était la masse de la Terre elle-même, bien trop grande pour que son mouvement en soit affecté (*).

Le principe de réciprocité s'applique donc parfaitement, mais 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 réussi à faire croire aux automobilistes qu'ils pouvaient ressentir les effets de la force d'inertie, cette pseudo-sensation apportant ainsi la preuve de son existence. Comment expliquer cette sensation ?

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 du châssis, de la carrosserie et des fauteuils.

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

Par conséquent, ce que ressentent les passagers, c'est bien 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.

(*) *L'égalité entre une force et son action réciproque ne signifie pas que leurs effets soient identiques : selon le principe fondamental de la dynamique (deuxième loi de Newton), l'accélération produite par une force est inversement proportionnelle à la masse sur laquelle elle s'exerce (relation $\mathbf{Y} = \mathbf{F} / \mathbf{M}$). Dans notre exemple, 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. D'une manière plus générale, c'est le rapport des masses en interaction qui permet de faire la distinction entre une action (sollicitation d'une force) et une réaction (action réciproque).*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

IV. FORCE D'INERTIE : LA BONNE FORMULE

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 provient la valeur qu'on a sous les yeux et comment elle a été obtenue. Un principe de traçabilité, en quelque sorte.

En effet, 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 données 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 n'explique rien par elle-même, elle est toujours obligatoirement tributaire d'une force réelle.

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 véritablement 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 sont trop 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.

Cet énoncé repose sur des grandeurs physiques qu'il a fallu mesurer sur le terrain : la *masse* de la voiture, sa *vitesse* et le *temps*. Les calculs viennent ensuite, à commencer par l'intensité de l'accélération :

$$Y = V / T$$

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

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

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

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

Ce n'est qu'une fois ce résultat obtenu qu'on peut enfin changer de description et calculer l'intensité de la force d'inertie \mathbf{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 lorsque la voiture est soumise à la force de traction ou de freinage. On utilise alors cette relation, et uniquement celle-ci :

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

Le calcul est 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 orientation (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).
- 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 : l'une est réelle, l'autre est imaginaire. 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 également appelé dynamomètre, accéléromètre ou capteur d'accélération-décélération) permet-il de mesurer l'intensité de la force d'inertie ?

Détaillons le principe de fonctionnement de cet appareil : une masselotte pouvant coulisser librement 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 de décélération, c'est le principe du dynamomètre. Le corps de l'appareil est solidement fixé à la carrosserie de la voiture.

Reprendons 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 la valeur de cette accélération est strictement égale à celle de la voiture, ce qui est logique puisque, le capteur étant solidement fixé à la carrosserie, il subit une variation de vitesse 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 qui provient du sol et qui s'exerce sur la masselotte, mais son principe de fonctionnement n'a strictement rien à voir avec le concept de force d'inertie.

Contrairement à ce que son nom laisse supposer, le capteur à inertie ne prouve donc pas l'existence de la force d'inertie, c'est d'ailleurs parfaitement logique puisqu'il est évidemment impossible de démontrer l'existence d'une force imaginaire.

D'où vient alors cet entêtement à évoquer la force d'inertie à propos de tout et de n'importe quoi ? Erreur de traduction de termes latins ? Mélange de référentiels ? Mélange de dynamique et de Statique ? En réalité, les mécanismes de la confusion sont anciens, complexes, et culturels...

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

V. QUI A « INVENTÉ » LA FORCE D'INERTIE ?

D'où vient le concept de force d'inertie et qui en est l'auteur ? La plus ancienne mention de la *force d'inertie* en langue française est sans doute cette définition qui figure dans le dictionnaire de Pierre Richelet édité en 1732 :

« *Monsieur Newton appelle force d'inertie, un principe passif par lequel les corps perdurent dans leur mouvement, ou dans leur repos.* »

Force ou principe, ce n'est pas du tout le même concept, mais la définition de Richelet est suffisamment claire et précise pour lever toute ambiguïté : ce que l'on appelle communément *force d'inertie* désigne en réalité le *principe d'inertie*, un principe général qui décrit le comportement de toute masse livrée à elle-même, donc en l'absence de force. Ce principe, c'est Isaac Newton qui l'a découvert.

Newton et la force d'inertie

Pour saisir cette nuance entre force et principe, reportons-nous au texte original tel qu'il a été rédigé par Isaac Newton et publié dans son ouvrage « *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* »⁽¹⁾ :

« *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 dans un ouvrage publié en 1759 (« *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* »)⁽²⁾ :

« *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 qu'Émilie de Breteuil, pressentant sans doute le risque de confusion, a pris soin d'insérer dans sa traduction les termes mêmes employés par Newton : « *vis insita* », « *vis impressa* », comme pour bien distinguer deux concepts : l'un est un *principe*, l'autre est une *force*.

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 mot peut prendre plusieurs significations selon le contexte.

De fait, le dictionnaire Gaffiot de 1934 (la référence du genre) nous apprend que le mot latin « *vis* » peut se traduire, selon le cas, par « *force, vigueur, puissance, influence, violence, essence...* » Félix Gaffiot, brillant latiniste, s'est cantonné à l'étude des auteurs latins classiques. Nul doute que s'il s'était penché sur les écrits de Newton, il aurait traduit « *vis insita* » par « *principe d'inertie* », comme Richelet deux siècles auparavant.

Voilà sans doute l'origine du grand malentendu à propos de la force d'inertie : un seul mot latin mais deux sens possibles, puis une traduction littérale prise au pied de la lettre. Cependant, la conclusion reste toujours la même : il n'y a pas de force d'inertie dans l'œuvre de Newton, seulement un principe.

L'inventeur de la force d'inertie

Du point de vue scientifique et au sens moderne du terme, le concept de *force d'inertie* date de l'avènement de la *Statique*, une branche de la physique théorisée par Jean Le Rond d'Alembert, mathématicien et physicien français. 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 baptisée *force d'inertie*.

Pour comprendre le raisonnement, citons d'Alembert lui-même :

« *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 en même temps 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* ».

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

D'ailleurs, l'emploi du conditionnel (« *il y aurait équilibre... 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.

Le rôle des professeurs

Vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le concept de force d'inertie, légitimé par les travaux de Gaspard Coriolis, ingénieur militaire français (1792 - 1843), inventeur de la force qui porte son nom, suscita un regain d'intérêt parmi les professeurs soucieux d'actualiser leur enseignement en période de guerre (voir le dossier ADILCA "force de Coriolis").

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 sont restés confinés dans des salles de cours, des amphithéâtres ou des laboratoires. Tout naturellement, ils ont axé leur enseignement sur des concepts imaginaires en oubliant d'en délivrer le mode d'emploi.

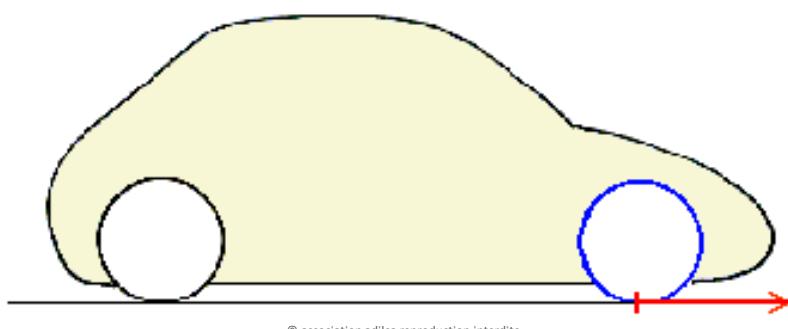
Le résultat est là : au fil du temps, des cours et des programmes scolaires, les descriptions fictives ont progressivement supplanté les descriptions réelles.

Conclusion

Le concept de force d'inertie, souvent confondu avec le *principe d'inertie* d'Isaac Newton, a été utilisé à tort et à travers, sans précaution quant à son mode d'emploi⁽³⁾.

La force d'inertie est une force imaginaire qui apparaît uniquement dans un référentiel relatif ou en Statique, mais qui n'a pas d'existence réelle. C'est donc à tort si ce concept a été utilisé pour décrire le mouvement des automobiles.

La réalité est celle-ci : c'est la force de traction qui permet d'accélérer une voiture, c'est la force de freinage qui permet de la ralentir. Ces forces s'exercent sur les pneumatiques de la voiture au contact du sol, selon que le conducteur appuie sur l'accélérateur ou sur le frein. Il n'y a rien d'autre à ajouter (voir les dossiers ADILCA "couple moteur & force de traction" et "force de freinage").



© association adilca reproduction interdite

Force de traction (roues avant motrices).

La rotation des roues motrices sollicite la réaction du sol pour mettre la voiture en mouvement.
Freiner consiste à exploiter le phénomène inverse.

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.

(1) *Traduction du titre : « Principes mathématiques de philosophie naturelle » (le latin était la langue des érudits de l'époque). La philosophie naturelle désigne ce que l'on appelle aujourd'hui les sciences physiques.*

(2) *Émilie de Breteuil (1706-1749), de son nom complet : Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil, marquise du Chastellet, est une femme de lettres, érudite et polyglotte, mathématicienne et physicienne française. Sa traduction intégrale de l'œuvre d'Isaac Newton fait autorité encore aujourd'hui.*

(3) *Ne pas confondre le concept de force d'inertie de D'Alembert (raisonnement "statique" faisant intervenir une force imaginaire) avec le principe d'inertie d'Isaac Newton (raisonnement "dynamique" duquel on déduit, soit l'absence de force, soit l'action d'une force réelle). Le principe d'inertie de Newton (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. Toute masse en mouvement sur laquelle ne s'exerce aucune force 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 trajectoire ou sur la vitesse d'une masse ».*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

VI. LA FORCE D'INERTIE DANS 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 :

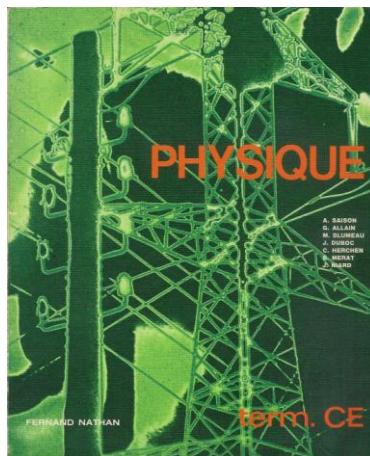
- La *force centrifuge*, dite aussi « *force d'inertie centrifuge* » procède d'un raisonnement statique appliqué à un mouvement circulaire (voir le dossier ADILCA “*force centrifuge*”).

- La *force de Coriolis*, dite aussi « *force d'inertie de Coriolis* » procède d'un raisonnement statique appliqué à un mouvement aérien observé depuis la surface de la Terre. La force de Coriolis ne figurant pas au programme de l'enseignement secondaire, nous ne l'aborderons pas ici (voir le dossier ADILCA “*force de Coriolis*”).

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, à propos du passager 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 et validée 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, et non le contraire !* »

L'étude des phénomènes naturels consiste justement à relativiser les perceptions et les sensations primaires 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 ?

Un passager ne peut ressentir que les forces réelles qui s'exercent 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 au châssis, à la carrosserie et à tout ce que contient la voiture, elles parviennent enfin au passager par l'intermédiaire du fauteuil.

Quand la voiture accélère, c'est donc le dossier du fauteuil qui vient s'appliquer sur le passager pour lui communiquer une force, et non le contraire !

En réponse, le passager exerce une pression sur le dossier du fauteuil, un phénomène qui n'a absolument rien à voir avec la force d'inertie.

Le principe de réciprocité

Le troisième principe de Newton, ou *principe de réciprocité*, s'applique alors :

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

En effet, quand la voiture accélère, le dossier du fauteuil exerce une *force de traction* sur le passager. Cela signifie qu'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.

Le même raisonnement s'applique quand la voiture ralentit : le passager est soumis à la *force de freinage* qui lui parvient par le plancher, l'assise du siège ou la ceinture de sécurité, tandis que lui-même exerce une action réciproque d'égale intensité mais de sens opposé sur ces mêmes éléments.

Autre confusion à éviter : la force qui fait varier la vitesse et son action réciproque sont bien égales mais leurs effets ne le sont pas, puisque l'action du passager s'efface devant celle des roues, de la carrosserie et du fauteuil^(*).

C'est là tout l'intérêt de l'automobile, avec des moteurs et des freins plus puissants que le corps humain, ainsi que des fauteuils et des ceintures solidement fixés aux carrosseries. Essayons d'imaginer ce qu'il se passerait si ce n'était pas le cas...

Résumons : en seulement trois petites phrases assassines, nos sept éminents professeurs ont introduit une confusion entre force d'inertie et action réciproque !

Force d'inertie : la véritable définition !

La réalité du mouvement est donc celle-ci : les forces de traction ou de freinage se transmettent au passager par l'intermédiaire de la carrosserie et du fauteuil. Le passager exerce alors une action réciproque sur ces mêmes éléments. Tout est dit.

Et la force d'inertie dans tout ça ? En voici la définition :

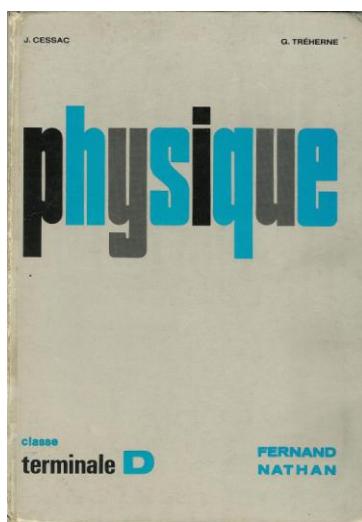
« On appelle force d'inertie la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité du passager d'une voiture immobile pour le voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité lorsque la voiture accélère ou freine. »

Bilan

Triste bilan d'un manuel scolaire pourtant destiné à faire autorité en matière de pédagogie : nos sept éminents professeurs bardés de titres et de diplômes ont tout simplement confondu la force d'inertie avec l'action réciproque ! Ont-ils jamais eu conscience de la bourde ainsi commise ? 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.



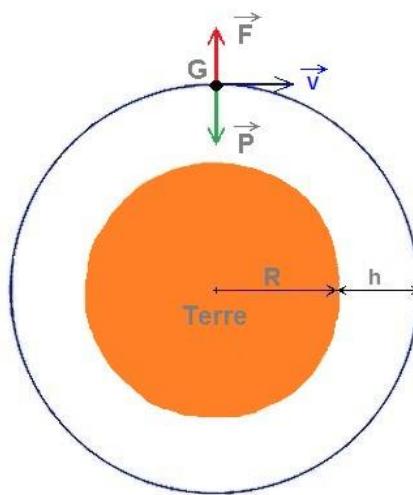
“CESSAC & TRÉHERNE”
Physique, classe terminale D (Éditions Fernand Nathan).

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 en noir et blanc, unique et sans légende, illustrant le mouvement d'un satellite en orbite autour de la Terre. Ce dessin, le voici reproduit avec l'autorisation de l'éditeur (la couleur en plus) :



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, ce qui signifie qu'elles 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 alors quitter l'orbite terrestre pour s'éloigner de la Terre dans la direction indiquée par (V). Mais dans ce cas, comment expliquer cette trajectoire circulaire qui figure sur le dessin (cercle noir) ?

2. Seconde interprétation : le satellite décrit la fameuse trajectoire circulaire figurant sur le dessin (cercle noir), 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 faut supprimer. Une preuve supplémentaire que cette force n'existe pas. Et la preuve est dans le dessin !

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

Comment éviter cette ambiguïté ? Il aurait suffi de deux dessins bien distincts, chacun accompagné d'une légende parfaitement explicite, afin d'éviter toute confusion dans l'esprit des jeunes lecteurs, comme d'ailleurs dans celui des futurs professeurs (voir le dossier ADILCA “*manuels scolaires de physique*”).

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.

Lycéens et étudiants, méfiez-vous de ce que vous lisez ici ou là. N'hésitez pas à remettre en question les raisonnements et les 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* $[F = M \cdot Y]$ d'où $[Y = F / M]$.

VII. 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 :

$$F = M \cdot Y$$

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 :

$$\mathbf{A} = - \mathbf{F}$$

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

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

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

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 :

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

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

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 :

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

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

4. Calcul de la force d'inertie :

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

Y : accélération ou décélération, exprimée en **m.s⁻²**
cohérence des unités : $\mathbf{F}' = \text{kg} \cdot \text{m.s}^{-2} = \text{N}$

(le signe $-$ précise l'orientation spatiale, contraire à la logique du mouvement)

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 :

$$F' = -1500 \times 2 = -3000 \text{ N}$$

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 : 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 d’inertie 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, 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 fictive, force apparente, force imaginaire ou pseudo-force.

Remarque 4 : 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 la force réelle que le passager exerce par contact avec le dossier du fauteuil, en réponse à la force de traction que lui communique le fauteuil 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.

Insistons sur l’usage du conditionnel, qui prouve bien 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 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 sa vitesse couplée au temps) ;
- 3) effectuer des *calculs* (ici : le calcul de la force de traction ou de freinage) ;
- 4) éventuellement, transposer un *raisonnement* (ici : une question de dynamique ramenée à une question de statique avec la suppression des forces réelles et l’introduction du concept de force d’inertie).

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.
- GAFFIOT (Félix) : *Dictionnaire latin-français*, éditions Hachette, Paris 1934.
- LE ROND D'ALEMBERT (Jean) : *Traité de dynamique*, Paris 1743.
- LE TONNELIER DE BRETEUIL, marquise du Chastellet (Gabrielle Émilie) : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Paris 1759 (traduction intégrale en français de l'ouvrage d'Isaac Newton).
- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.
- RICHELET (César-Pierre) : *Dictionnaire de la langue françoise ancienne et moderne*, Amsterdam 1732.
- SAISON (André), ALLAIN (Gilbert), BLUMEAU (Micheline), DUBOC (Jean), HERCHEN (Claude), MÉRAT (Robert) & NIARD (Jean) : *Physique terminale CE*, éditions Fernand Nathan, Paris 1980.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *