MANUELS SCOLAIRES DE PHYSIQUE ET FORCES D'INERTIE

I. LES LOIS DE NEWTON

II. INTRODUCTION

III. CESSAC & TRÉHERNE

IV. SAISON ALLAIN BLUMEAU DUBOC HERCHEN MÉRAT & NIARD

V. LE MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UNE AUTOMOBILE : LE MODE DE CALCUL

VI. LE MOUVEMENT D'UN PASSAGER D'AUTOMOBILE : LE MODE DE CALCUL

VII. LE MOUVEMENT D'UN SATELLITE : LE MODE DE CALCUL

VIII. BIBLIOGRAPHIE

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, elles 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. »

« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. »

Le concept de force découle de ce principe.

Concept de force

« Une force désigne toute cause capable d'agir sur la vitesse ou sur la trajectoire 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 ont-elles été enseignées au travers des différents manuels scolaires modernes ?

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

II. INTRODUCTION

Récemment, un professeur d'auto-école a proposé cette définition de la *force centrifuge* à des candidats préparant le B.A.F.M. (Brevet d'Aptitude à la Formation de Moniteurs de conduite automobile) :

« Lorsqu'un mobile est animé d'un mouvement circulaire uniforme, il n'est soumis à aucune force ou la somme des forces qui lui sont appliquées est nulle. »

« C'est le cas d'une voiture en "roue libre" dans un virage et en négligeant la résistance de l'air, le poids de la voiture étant équilibré par la réaction du sol égale et opposée à ce poids. »

« La seule force non équilibrée est la force centripète dirigée vers le centre de courbure. »

« Pour que la somme des forces soit nulle, il faut alors considérer qu'il apparaît une force égale (en grandeur) et opposée à la force centripète. »

« Cette force est présente dans le système pendant tout le temps où s'exerce la force centripète. »

*« Cette force est donc dirigée vers l'extérieur du virage, elle porte le nom de **force centrifuge**. »*

« Puisque la force centrifuge est égale et opposée à la force centripète, on calculera sa valeur en utilisant la même expression que pour cette dernière : $F = MV^2/R$. »

Quelle bouillie ! Le physicien remarque immédiatement quelques entorses aux lois de la physique qui discréditent cette définition à tout jamais[(1)]. Mais allons plus loin, car il ne s'agit pas ici d'accabler son auteur.

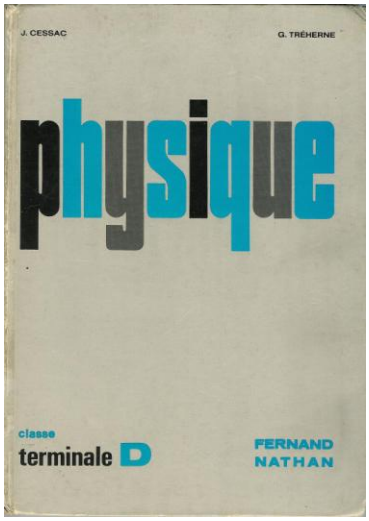
Ce qui nous intéresse ici, c'est essayer de comprendre pourquoi on assaisonne la force centrifuge à toutes les sauces ; autrement dit, c'est tenter de remonter à la source historique de ce dogme considéré comme sacré.

Les professeurs d'occasion n'ont pas pu inventer eux-mêmes pareille théorie sans s'appuyer sur des documents d'une valeur indiscutable à leurs yeux. Ce sont ces documents qui nous intéressent, et en particulier les livres de physique qui, à un moment ou à un autre, ont pu servir de référence ou de caution intellectuelle au concept de force centrifuge.

Il fallait donc partir à la recherche de ces documents, et c'est ainsi que nous avons pu mettre la main sur les principaux manuels scolaires de physique qui, après la guerre, ont forgé la culture scientifique de plusieurs générations de lycéens et étudiants. Parmi tous ces ouvrages, il y en a deux qui ont plus particulièrement retenu notre attention.

III. CESSAC & TRÉHERNE

Le plus connu de tous les manuels scolaires de physique de l'après-guerre est sans aucun doute le ''CESSAC & TRÉHERNE'' édité par Fernand Nathan, ouvrage officiel de l'éducation nationale du lendemain de la guerre jusqu'au début des années 80.



''CESSAC & TRÉHERNE'' Physique, classe de terminale D (Éditions Fernand Nathan).

Qui étaient CESSAC et TRÉHERNE ?

Jean CESSAC (1907-1987), professeur agrégé de physique au lycée LOUIS-LE-GRAND de Paris, publia son premier manuel scolaire en 1939. Devenu inspecteur général de l'instruction publique, il collabora avec Georges TRÉHERNE (1905-2002), professeur agrégé de physique au lycée JANSON DE SAILLY de Paris, à la rédaction d'un nouveau manuel de physique qui parut en 1947 chez Fernand Nathan.

Ce livre rencontra un tel succès auprès du corps enseignant qu'il fût immédiatement adopté comme ouvrage officiel des lycées publics, privilège qu'il conservera pendant plus de trois décennies, jusqu'à l'aube des années quatre-vingts.

Décliné ultérieurement en plusieurs versions (quatorze pour la seule rentrée 1966 !) afin de répondre aux exigences des programmes des différentes sections et filières modernes (physique, classes de secondes, premières et terminales littéraires ou scientifiques, mais aussi chimie…), c'est, au total, plusieurs millions d'exemplaires de cette collection qui ont été diffusés.

La plupart des physiciens, étudiants ou professeurs, pour ne pas dire la quasi-totalité ont donc eu, à un moment ou à un autre, un ''CESSAC & TRÉHERNE'' entre les mains et ont pu y puiser leur inspiration.

Une réputation justifiée…

Autant le dire tout de suite, la réputation des manuels ‘‘CESSAC & TRÉHERNE’’ est excellente, tant auprès du corps enseignant que des anciens élèves. Cette réputation est parfaitement justifiée, car on dispose aujourd’hui du recul nécessaire pour une comparaison objective avec les productions plus récentes.

Que ce soit au niveau de la description des phénomènes, de la progressivité ou de la complémentarité des notions abordées, on n’a pas fait mieux depuis. Sur ce point, les experts sont unanimes.

Plus précisément, on est frappé par la clarté des concepts, la précision des mots, l’élégance et l’équilibre des phrases, ce qui prouve que leurs auteurs maîtrisaient, non seulement les concepts scientifiques, mais également l’art de la pédagogie aussi bien que les subtilités de la langue française…

Pour autant, ce livre est-il exempt de reproches ? C’est ce que nous allons voir…

Le programme 1966

Examinons le manuel de physique destiné aux classes terminales scientifiques dans sa version conforme au programme officiel. Ce programme a été fixé par l’arrêté du 13 juin 1966 émanant du ministère de l’éducation nationale. Il prévoit cinq parties : dynamique, énergie, phénomènes périodiques, optique physique, électricité et phénomènes corpusculaires.

Le manuel dont nous disposons (dépôt légal 2e trimestre 1977) est destiné aux sections D, il diffère peu de celui des sections C autrefois baptisées ‘‘*mathélém’’* pour ‘‘mathématiques élémentaires’’, anti-chambre des classes préparatoires aux grandes écoles (‘‘*mathsup*’’ pour mathématiques supérieures, et ‘‘*mathspé*’’ pour mathématiques spéciales).

Où sont les différences entre les versions C et D ? La version D bénéficie de « *substantiels allègement dans la partie consacrée à l’électricité et aux phénomènes corpusculaires* », ainsi que le précisent les auteurs dans un avertissement placé en début de volume. Rien donc qui puisse concerner la partie qui nous intéresse, à savoir celle consacrée à la dynamique.

Le point fort du livre

L’un des aspects les plus remarquables du livre de Jean CESSAC et Georges TRÉHERNE, ce sont ces « *exercices résolus* », que l’on trouve en fin de chapitre. Judicieux ! Ainsi l’étudiant peut suivre pas à pas le raisonnement du professeur et s’imprégner des notions développées dans le cours, sans risque d’erreur.

Le cours qui nous intéresse ici est le chapitre 6 consacré à « *l'application de la relation fondamentale de la dynamique au mouvement circulaire uniforme.* » Nous le parcourons et ne trouvons rien à y redire. L'exercice résolu proposé en fin de chapitre est consacré à « *l'équilibre relatif d'un satellite sur une orbite circulaire.* »

Riche idée ! En effet, cet exemple colle parfaitement à l'actualité puisque, neuf ans auparavant, le 4 octobre 1957, l'Union Soviétique a procédé avec succès au lancement du premier engin spatial, Spoutnik. Par la suite, les expériences et les lancements vont se multiplier jusqu'à aboutir à la conquête de la Lune par les États-Unis en juillet 1969.

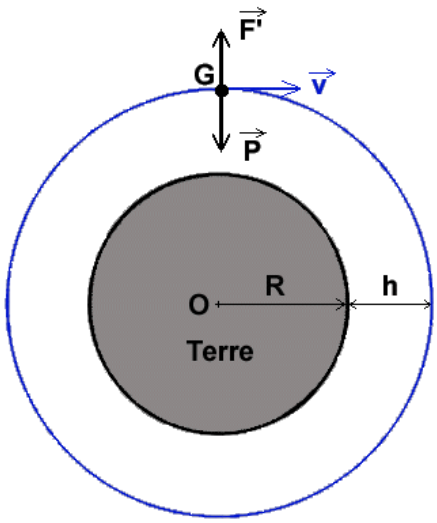
L'intérêt pédagogique de cet exercice est une description simplifiée du mouvement circulaire car, à la différence d'un véhicule terrestre, un satellite présente l'avantage de s'affranchir à la fois de la résistance au roulement et de la résistance de l'air.

Mais les différences ne s'arrêtent pas là. Une fois en orbite, le satellite voit son mouvement dépendre de l'action d'une seule force, qui se confond avec son poids, cette force agissant à distance et non par contact comme c'est le cas en automobile.

Ces différences, absolument capitales pour décrire le mouvement du satellite, comme d'ailleurs celui du cosmonaute qui se trouve à l'intérieur, vont malheureusement échapper aux auteurs, ainsi qu'on va le voir plus loin…

Un dessin incohérent

La démonstration commence page 62 par un dessin sans légende illustrant le mouvement d'un satellite en orbite circulaire autour de la Terre. Ce dessin attire immédiatement notre attention. Le voici fidèlement reproduit ci-dessous.



Dessin "CESSAC & TRÉHERNE" (© Éditions FERNAND NATHAN, Paris 1977).

Examinons ce dessin : sans aucun doute possible, il mélange deux descriptions contradictoires. Faute pédagogique majeure !

De fait, l'une de ces deux descriptions est *dynamique*, elle représente le mouvement réel du centre de gravité (G) du satellite animé d'une vitesse (V) et d'une trajectoire circulaire (cercle bleu) imposée par une force unique, l'attraction de la Terre. Cette attraction, c'est le poids (P) du satellite.

L'autre description, que l'on appelle *statique*, est purement imaginaire. Elle suppose un équilibre dans lequel le mouvement réel est ignoré. La vitesse du satellite est alors nulle, telle est l'illusion que peut donner un engin spatial géostationnaire observé depuis le sol : pour éviter qu'il ne tombe, son maintien dans l'espace nécessite en effet le recours à une force apparente (F') de module égal au poids (P) du satellite, mais de sens opposé.

Ces deux descriptions, totalement incompatibles (c'est l'une ou l'autre, mais pas les deux ensemble !), figurent pourtant bel et bien sur un seul et même dessin. L'erreur est là !

Où est l'erreur ?

Pourquoi ces deux descriptions sont-elles contradictoires ? Pour le physicien, ça saute aux yeux : le dessin est complètement absurde. En effet, si on le prend au pied de la lettre, de deux choses l'une :

- Ou bien les deux forces (P) et (F') agissent de concert, et dans ce cas elles se neutralisent. Le satellite en mouvement s'éloigne alors sur une trajectoire rectiligne. Mais dans ce cas, le cercle bleu qui figure la trajectoire circulaire est de trop.

- Ou bien le satellite décrit effectivement une trajectoire circulaire, et dans ce cas, l'une de ces deux forces (P) ou (F') est de trop, mais laquelle ? Comme il n'est pas question d'ignorer le phénomène d'attraction gravitationnelle, on en déduit que c'est la force apparente (F') qu'il faudrait supprimer. Normal : cette force n'existe pas. C.Q.F.D.

Des explications claires…

Examinons le texte de l'ouvrage et plus précisément la page 42 où, décrivant le mouvement d'un ascenseur (mais cela pourrait aussi bien s'appliquer à celui d'une automobile…), messieurs Cessac et Tréherne sont formels :

« Il importe de bien comprendre la particularité d'une force d'inertie : pour un observateur lié à la Terre, il n'y a pas de force d'inertie. » [(2)]

On ne le leur fait pas dire, et on ne saurait mieux dire ! En effet, nos éminents professeurs savaient pertinemment que les forces d'inertie sont des forces imaginaires. Ils le savaient et ils l'ont écrit.

… mais des termes erronés

Revenons au dessin illustrant le mouvement du satellite, et voyons les explications qui l'accompagnent…

Messieurs Cessac et Tréherne entament leur démonstration de la manière suivante :

« Ramenons le problème de dynamique à un problème de statique en prenant comme repère un observateur que nous supposerons dans le satellite. »

La force apparente (F') qui s'exerce sur le centre de gravité (G) du satellite est alors nommée « *force d'inertie centrifuge* » (sic) !

Que penser de ces quelques mots ? L'appellation de « *force d'inertie* » est incorrecte puisque, outre la première confusion entre dynamique et statique, elle introduit une deuxième méprise dans l'explication du phénomène. Cette fois-ci l'erreur n'est plus seulement pédagogique mais bel et bien scientifique. C'est même une double erreur !

En effet, si on prend le satellite comme référentiel, il n'y a pas de force d'inertie et il ne peut pas y en avoir car, contrairement à ce qu'il se passe pour le passager d'une voiture, le cosmonaute n'est jamais plaqué contre les parois de la cabine, étant donné qu'il subit la même attraction que le satellite lui-même ! Tout est en équilibre, rien ne bouge !

Bon sang, mais c'est bien sûr, cet équilibre, c'est l'apesanteur [(3)] !...

Et que dire du qualificatif de « *centrifuge* » qui signifie « *qui éloigne du centre* » accolé à cette force ? Il ne serait justifié que dans le cadre d'une description statique. De fait, si on supprimait son poids (P), le satellite, initialement immobile, soumis à la seule force (F'), se mettrait immédiatement en mouvement et verrait sa vitesse augmenter progressivement sur une trajectoire radiale l'éloignant du centre de la Terre.

Mais attention, cette hypothèse ne serait valable qu'en statique, et surtout pas en dynamique où, de l'aveu même des auteurs, cette fameuse « *force d'inertie centrifuge* » n'existe pas.

De fait, dans une description dynamique, si on supprimait son poids (P), le satellite serait libéré de toute force. Mais animé d'une vitesse initiale, il conserverait celle-ci sur une trajectoire rigoureusement rectiligne. Bref, il cesserait de tourner autour de la Terre, mais sans pour autant être soumis à la moindre force.

Cette fameuse force (F') n'est donc pas « *centrifuge* » au sens précis et exact du terme. Dès lors, comment la qualifier ? Les appellations correctes ne manquent pas : "*force fictive*", "*force imaginaire*", "*force apparente*", "*pseudo-force*" ou simplement "*force d'inertie*". Peu importe, pourvu que le qualificatif soit dépourvu d'ambiguïté. Et sans oublier le mode d'emploi, afin de dissiper tout malentendu une bonne fois pour toutes.

Une relation détournée

Ce n'est pas tout. La suite du raisonnement consiste à utiliser une relation tirée d'une description dynamique pour l'introduire dans une description statique.

Voyons cela : dans un premier temps, les auteurs expliquent que, puisqu'il y a équilibre, la « *force d'inertie centrifuge* » (F') est égale au poids (P) du satellite. Vrai. Cependant, l'équilibre dont il est question ici signifie que les auteurs raisonnent exclusivement en statique, mais sans le préciser : la force (F') neutralise alors le poids (P), empêchant ainsi le satellite supposé immobile de tomber en chute libre vers la Terre.

Ensuite, les auteurs affirment que [$P = MV^2/(R + h)$], mais oublient d'indiquer que cette relation n'est valable qu'en dynamique. En effet, en statique, la seule relation autorisée est [$P = Mg$] puisque, le satellite étant supposé immobile, il n'y a ni vitesse, ni rayon orbital.

Enfin, dans la dernière partie du raisonnement, nouvelle confusion avec ce retour à la statique pour affirmer que, puisque (P) = (F'), on peut en déduire que le module de la « *force d'inertie centrifuge* » est [$F' = MV^2/(R + h)$] ! La boucle est bouclée.

Que penser de ces allers-retours entre deux descriptions ? Pour l'étudiant, la confusion est totale, car il aurait fallu préciser ici qu'il ne peut s'agir que de modules de forces, c'est-à-dire de grandeurs numériques considérées dans leurs valeurs absolues, et insister sur le fait que ces égalités n'autorisent pas la transposition des relations d'une description à une autre, sous peine de disqualifier le raisonnement.

De fait, la fameuse relation [$F' = MV^2/(R + h)$] ne peut s'appliquer qu'à une description dynamique, puisque seule cette description prend en compte le mouvement réel, c'est-à-dire la vitesse (V) du satellite et sa trajectoire de rayon (R + h). Au contraire, dans une description statique, le satellite est strictement immobile. Du fait de son immobilité, sa vitesse est rigoureusement nulle, il n'y a alors ni trajectoire, ni rayon. La fameuse relation y est donc rigoureusement inapplicable.

Retenons que ces deux descriptions sont parfaitement contradictoires, et doivent donc être séparées, tant au niveau des concepts que des termes ou des relations entre grandeurs. Malheureusement, les auteurs l'ont oublié, induisant alors en erreur des millions d'étudiants qui vont croire dur comme fer à l'existence de la force centrifuge.

Il est facile de deviner la suite : plus tard, le rayon (R + h) de la trajectoire du satellite deviendra le rayon (R) du virage, la vitesse (V) du satellite deviendra celle de la voiture, etc. *In fine*, la fameuse relation [$F = MV^2/R$] sera reprise sans précaution pour exprimer la *force centrifuge*, à l'existence de laquelle tout le monde finira par croire.

Le mouvement du satellite…

Cinquante ans après, voici les descriptions correctes.

1ère description :

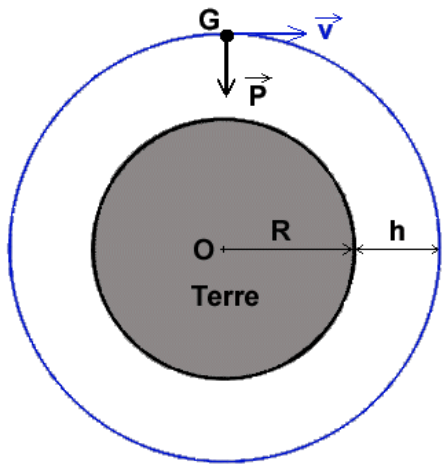
C'est une *description dynamique* du phénomène, celle expliquant le mouvement réel d'un satellite en orbite autour de la Terre.

Examinons la trajectoire du satellite : il est animé d'une vitesse (V) et décrit une trajectoire circulaire (cercle bleu) de rayon (R + h). Comment expliquer cette trajectoire ? Une force et une seule s'exerce sur son centre de gravité (G), elle est due à l'attraction (g) de la Terre, c'est son poids (P).

La relation adaptée à cette description est [$P = MV^2/(R + h)$].

En effet, la masse (M) du satellite est bien réelle, tout comme sa vitesse (V) ou le rayon de sa trajectoire (R + h), même s'il s'agit d'un satellite géostationnaire.

Cette description, dite ''dynamique'' est alors complète, il n'y a rien d'autre à ajouter. Elle est illustrée dans le dessin numéro 1.



© association adilca reproduction interdite

Dessin n° 1 : description réelle, dite ''dynamique'' de la trajectoire d'un satellite.

2ème description :

C'est une *description statique*, celle expliquant l'équilibre d'un satellite immobile dans l'espace.

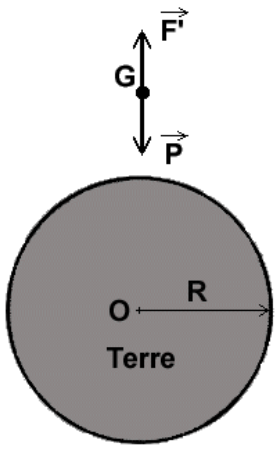
Dans cette configuration, purement hypothétique répétons-le, on supprime tout mouvement : on imagine que la Terre cesse de tourner sur elle-même, et on observe alors un satellite géostationnaire qui donne l'illusion d'être immobile dans l'espace. Cette absence totale de mouvement, c'est ce qu'en physique on nomme l'*inertie* (4).

Dans la description d'un système inerte, il n'y a ni vitesse, ni trajectoire, ni rayon orbital puisque rien ne bouge. Le cercle bleu a disparu. Le satellite ne tombe pas car il est en équilibre. Cet équilibre est dû à la présence de deux forces, d'intensités égales mais de sens opposés, qui s'exercent sur le centre de gravité (G) du satellite. L'une de ces deux forces est le poids (P) du satellite, l'autre est la fameuse force (F') nommée « *force d'inertie centrifuge* » dans cet ouvrage, mais qu'on devrait plutôt appeler ''force fictive'', ''force imaginaire'', ''force apparente'', ''pseudo-force'', ou simplement ''force d'inertie''.

La seule relation adaptée à cette description est [F' = – P = – Mg], c'est la seule que l'on peut utiliser ici.

En effet, en dehors de la masse (M) du satellite et de l'accélération gravitationnelle (g) provenant de la Terre, il n'y a pas d'autre grandeur à prendre en considération.

Cette description imaginaire, dite ''statique'' est alors complète, il n'y a rien à ajouter. Elle est illustrée dans le dessin numéro 2.



© association adilca reproduction interdite

Dessin n° 2 : description imaginaire, dite ''statique'' de l'équilibre apparent d'un satellite géostationnaire [5].

Le mouvement du cosmonaute…

Comment décrire le mouvement du cosmonaute ? Certes, il est en apesanteur dès que le satellite est sur orbite, mais l'explication diffère selon le cadre de la description…

1ère description :

C'est une description dynamique du phénomène, celle illustrant le mouvement réel du cosmonaute et ses causes.

Dans cette configuration et par définition, le cosmonaute est animé de la même vitesse (V) que le satellite et subit la même attraction (g) provenant de la Terre, il décrit donc une trajectoire circulaire de rayon (R + h) identique à celle du satellite. Il n'est donc jamais plaqué contre les parois de la cabine, c'est justement ce qui lui donne cette sensation d'apesanteur.

2ème description :

C'est une description statique, celle supposant l'équilibre d'un cosmonaute à bord d'un engin immobile dans l'espace.

Dans cette configuration, on imagine que la Terre cesse de tourner sur elle-même, et on observe le cosmonaute qui se trouve à bord d'un satellite géostationnaire, ce type de satellite donnant l'illusion d'être immobile dans l'espace.

Dans cette description, le cosmonaute a un poids (P) mais une vitesse nulle, car il est immobile dans l'espace au même titre que le satellite. Pour rester en équilibre à l'intérieur de la cabine et ne pas s'écraser contre l'une de ses parois, il doit être soumis à une force apparente (F') égale et opposée à son poids (P). Cet équilibre n'est qu'apparent, mais lui donne néanmoins la sensation d'apesanteur.

3ème description :

C'est une description du mouvement du cosmonaute avec le satellite comme référentiel. Attention ! Il s'agit là d'un référentiel relatif qui nous impose des règles strictes énoncées dans un dossier à consulter par ailleurs (voir dossier ADILCA ''*référentiels*'').

Pour respecter les limites de ce référentiel, on observe l'intérieur du satellite sur un écran de télévision diffusant les images d'une caméra embarquée.

Sur l'écran, on constate que le cosmonaute est en équilibre, comme s'il flottait dans la cabine. Attention ! C'est la seule observation possible, puisque telles sont les limites de ce référentiel.

Deux explications sont alors possibles :

- Si on néglige le phénomène de gravitation, l'équilibre du cosmonaute est l'état normal d'une masse sur laquelle ne s'exerce aucune force.

Négliger le phénomène de gravitation ? Pourquoi pas, si on veut bien considérer que, dans le référentiel satellite, la Terre n'existe pas et son attraction non plus !

- Si on considère le phénomène de gravitation (mais dans ce cas il est bien évidemment impossible de lui attribuer la moindre explication), l'équilibre du cosmonaute

est dû à l'action d'une force apparente (F') d'intensité égale à son poids (P) mais de sens opposé.

Notons la similitude de cette dernière explication avec celle qualifiée plus haut de description statique, mais répétons et soulignons aussi une différence essentielle liée aux limites de ce référentiel puisque, le satellite étant alors considéré comme un espace immobile, clos et sans fenêtre, il n'est jamais possible d'y prendre en considération son mouvement propre.

Eh oui ! Dans ce référentiel, que le satellite soit immobile, en orbite autour de la Terre ou en train de chuter à la verticale, son mouvement propre ne peut pas apparaître à l'écran, il est donc strictement impossible d'en décrire les moindres caractéristiques !

Ces descriptions, ces précautions, ces précisions paraîtront sans doute inutiles aux yeux de certains intellectuels modernes, mais nous sommes fermement convaincus qu'elles sont pédagogiquement indispensables. On ne brûle pas les étapes impunément.

Le principe de réciprocité…

Le troisième principe découvert par Isaac Newton (également appelé principe d'action réaction) énonce ceci :

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

Ce principe, souvent confondu avec le concept d'inertie, est totalement passé sous silence dans le "CESSAC & TRÉHERNE". Dommage, car son étude complète harmonieusement celle des deux premiers principes de dynamique (voir dossier ADILCA "*Isaac Newton*") et s'avère pédagogiquement indispensable pour bien fixer les idées.

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas d'un satellite en orbite autour de la Terre ?

Dans la description statique d'un satellite géostationnaire, ce principe ne s'applique pas : la Terre cessant de tourner sur elle-même, l'engin étant supposé immobile dans l'espace et maintenu en équilibre par une force imaginaire, les interactions n'existent pas. Retenons d'ailleurs cette règle générale : le principe de réciprocité ne s'applique jamais à des forces d'inertie.

Dans la description réelle, le principe s'applique parfaitement :

- La Terre attire le centre de gravité du satellite (qu'il soit géostationnaire ou non) grâce à la force de gravitation (autrement dit le poids de l'engin), c'est l'*action*.

- Réciproquement, le satellite attire le centre de gravité de la Terre avec une force d'égale intensité mais de sens opposé, c'est l'*action réciproque*.

… et ses conséquences

Action et action réciproque sont parfaitement égales, mais les conséquences pour le satellite comme pour la Terre ne le sont pas. De fait, c'est le deuxième principe de Newton qui s'applique maintenant :

« L'effet d'une force est inversement proportionnel à la masse sur laquelle elle s'exerce. »

Ce qui signifie que, aussi importante que soit la masse d'un satellite artificiel, celle-ci s'efface évidemment devant celle de la Terre.

La masse de la Terre est, rappelons-le, de :

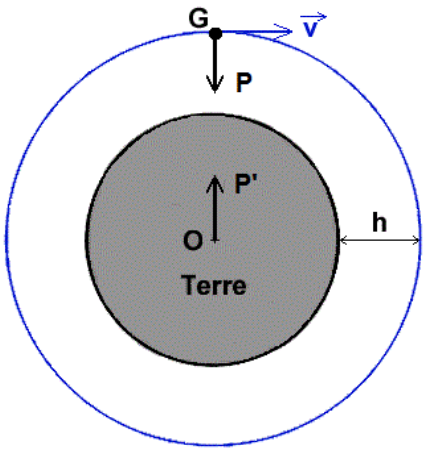
6 x 10^{27} grammes

ce qui, en développé, s'écrit avec vingt-sept zéros :

6 000 000 000 000 000 000 000 000 000 grammes,

ou, en abrégé : **6 000 Yg** (**6 000** yottagrammes).

En d'autres termes, la même force qui s'avère parfaitement capable de maintenir un satellite en orbite, ne saurait suffire pour perturber la trajectoire d'une masse telle que celle de la Terre.



© association adilca reproduction interdite

Principe de réciprocité appliqué au mouvement d'un satellite en orbite autour de la Terre :
G est le centre de gravité du satellite ;
O est le centre de gravité de la Terre ;
P est le poids de l'engin, c'est l'*action* que la Terre exerce sur le satellite pour le maintenir en orbite ;
P' est l'*action réciproque* que le satellite exerce sur la Terre.

Épilogue

Le livre de messieurs Jean Cessac et Georges Tréherne ne proposait qu'un seul dessin, alors qu'il en aurait fallu au moins deux, et même trois, au cas où l'on eût souhaité illustrer le principe de réciprocité.

Naturellement, chaque dessin aurait dû figurer avec sa propre légende, parfaitement explicite.

Malheureusement, le dessin unique et sans légende proposé par Jean Cessac et Georges Tréherne illustrait la fusion de deux descriptions contradictoires.

De la fusion des descriptions à la confusion des concepts, il n'y avait qu'un pas facile à franchir.

Ensuite, tout s'enchaîne et tout s'explique. Si nos deux professeurs agrégés se sont trompés, d'autres ont pu leur emboîter le pas en toute confiance.

Des générations d'étudiants (parmi lesquels de futurs professeurs et futurs auteurs de manuels scolaires…) ont sans doute pris le fameux dessin pour argent comptant.

Persuadés de la coexistence des forces fictives avec les forces réelles, ces étudiants devenus professeurs ont par la suite enseigné haut et fort et de bonne foi l'existence des forces d'inertie.

Relisez la pseudo-définition de la force centrifuge que nous avons reproduite ''in extenso'' en introduction à ce dossier… On sait maintenant d'où elle vient. Quelle étrange similitude avec le dessin et les explications de messieurs Cessac et Tréherne, on dirait un ''copié collé'' !

Le ''CESSAC & TRÉHERNE'' a perdu son monopole au début des années quatre-vingts. Les manuels qui l'ont remplacé ont-ils fait mieux ?

C'est ce que nous allons voir !

ASSOCIATION ADILCA

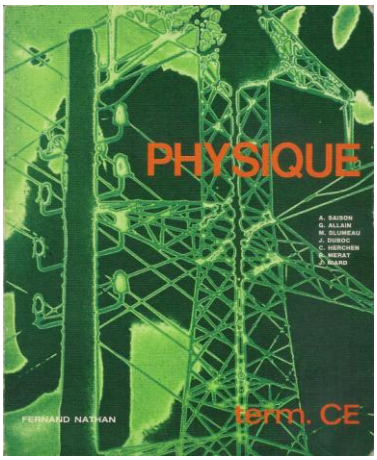
www.adilca.com

*** * ***

IV. SAISON, ALLAIN, BLUMEAU, DUBOC, HERCHEN, MÉRAT & NIARD

Pendant plus de trente ans, le ‘‘CESSAC & TRÉHERNE’’ a fait autorité en matière de pédagogie de la physique. Ouvrage officiel de l’Éducation Nationale, cet opus a profondément marqué les esprits, celui des lycéens comme celui des professeurs. Mais tout a une fin. De nouveaux manuels sont apparus à la fin des années soixante-dix pour se disputer le monopole.

Au catalogue 1980 des éditions Fernand Nathan, le fameux ‘‘CESSAC & TRÉHERNE’’ a dû céder la place au ‘‘SAISON, ALLAIN, BLUMEAU, DUBOC, HERCHEN, MÉRAT & NIARD’’.



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

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

Ce livre écrit à sept mains a-t-il révolutionné la pédagogie des forces d’inertie ? Examinons l’exemplaire destiné aux classes de terminales C et E (devenues aujourd’hui classes S). Amer constat : la dynamique, pourtant toujours au programme, et les forces réelles y sont totalement ignorées. Seule la statique et les forces imaginaires, raisonnement, illustrations et dessins à l’appui, y ont droit de cité.

Quel but les auteurs ont-ils poursuivi à travers ce choix arbitraire qu’ils ne justifient à aucun moment ? Quelle était leur intention pédagogique, s’il y en avait une ? Ont-ils saisi l’ampleur du désastre intellectuel qu’il allait provoquer ?

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 supposer 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 majeure, 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 !* »

Or l'étude des phénomènes naturels consiste justement à relativiser les perceptions et les sensations primaires des individus, afin de 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 des passagers ont donc une tout autre explication.

Le raisonnement correct

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

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

Ces forces naissent à la périphérie des pneumatiques au contact du sol, elles se transmettent ensuite au châssis, à la carrosserie et à tout ce que contient la voiture, passagers et bagages compris (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.

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. De quoi s'agit-il ?

Le principe de réciprocité

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

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

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas qui nous occupe ?

Quand la voiture accélère, le dossier du fauteuil exerce une *force de traction* sur le passager. En retour, le passager exerce une *action réciproque* sur le dossier du fauteuil, d'égale intensité mais de sens opposé. C'est cette action réciproque que le passager ressent, et non la force d'inertie. Un raisonnement identique s'applique quand la voiture freine, d'où l'intérêt de la ceinture de sécurité et du coussin gonflable de sécurité (airbag).

Attention ! le principe de réciprocité est rigoureusement inapplicable dans le cadre d'une description statique puisque les forces y sont fictives.

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 réciproque du passager s'efface devant celle des roues, de la carrosserie et du fauteuil [(6)].

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

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

Force d'inertie : la véritable définition !

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

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

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

Le bouquin à fuir…

Le ''SAISON, ALLAIN, BLUMEAU, DUBOC, HERCHEN, MÉRAT & NIARD'' est l'exemple parfait de ce qu'il ne faut pas faire.

Triste bilan d'un manuel scolaire pourtant destiné à faire autorité en matière de pédagogie ! Les professeurs qui ont rédigé cet ouvrage ont-ils jamais eu conscience de la bourde ainsi commise ? Eux seuls pourraient le dire…

Et pourquoi avoir choisi la voiture pour illustrer le concept de force imaginaire ? L'automobile n'avait pas besoin de ça. Peu importe d'ailleurs, puisque le mal est fait, et passons sur le reste du livre, les lourdeurs, les complications inutiles, les illustrations qui sèment la confusion (notamment pages 81, 83, 86…).

Bref, le bouquin à fuir…

Conclusion

Le ''CESSAC & TRÉHERNE'' avait proposé un mélange toxique de statique et de dynamique, bouillie aggravée ensuite par les affirmations sans nuance du ''SAISON, ALLAIN, BLUMEAU, DUBOC, HERCHEN, MÉRAT & NIARD''.

Ces éminents professeurs bardés de titres et de diplômes ont tout simplement confondu la force d'inertie avec l'action réciproque ! Résultat : un véritable Tchernobyl intellectuel et culturel dont on déplore les ravages encore aujourd'hui.

Quelle leçon en retirer pour l'avenir ? Nos chers, sympathiques et éminents professeurs devraient s'atteler à réparer cette erreur en admettant une bonne fois pour toutes qu'il est impossible de confondre la réalité et la fiction, de traiter sur un pied d'égalité la dynamique et la statique, de mélanger les forces réelles avec des forces imaginaires ou pire encore, de les associer, le propre de la pédagogie étant justement d'éviter les ambiguïtés.

La physique doit rester la science des raisonnements concrets. La réhabilitation des sciences physiques et du raisonnement scientifique est à ce prix. Qu'on se le dise !

(1) *La première phrase donne le ton :* « Lorsqu'un mobile est animé d'un mouvement circulaire, il n'est soumis à aucune force, ou la somme des forces qui lui sont appliquées est nulle. » *Isaac Newton énonce exactement le contraire :* « Un mobile qui n'est soumis à aucune force, ou si la somme des forces qui lui sont appliquées est nulle, est animé d'un mouvement rectiligne. » *La suite est à l'avenant : la force centripète est présentée comme une force non équilibrée. Or, il ne peut y avoir équilibre qu'en statique, pas en dynamique, sinon comment expliquer le mouvement ? La suite est du même tonneau : les forces centripète et centrifuge sont présentées comme étant égales et opposées, mais si c'était le cas, elles se neutraliseraient. Une de ces deux forces est donc de trop… En plus, la force qui réagit le mouvement circulaire des automobiles n'est pas de nature centripète. Par ailleurs, cette définition comporte deux graves lacunes : aucune mention du point d'application de ces forces (s'agirait-il du centre de gravité ?), ni du principe de réciprocité, et pour cause. L'auteur, contacté par nos soins, n'a pas souhaité s'expliquer.*

(2) *"CESSAC & TRÉHERNE" page 42 :* « Il importe de bien comprendre la particularité d'une force d'inertie : pour un observateur lié à la Terre, il n'y a pas de force d'inertie. » *C'est parfaitement exact mais, prise au pied de la lettre, cette phrase doit susciter quelques réserves. En effet, la force de Coriolis est également une force d'inertie, et c'est précisément une exception à cette règle, justement parce qu'elle ne peut se manifester qu'aux yeux d'un observateur lié à la Terre (voir dossier ADILCA "force de Coriolis"). Encore raté ! Messieurs Cessac et Tréherne étaient-ils bien inspirés lorsqu'ils ont rédigé ce chapitre ?*

(3) *Dictionnaire LAROUSSE : l'apesanteur se définit comme la* « disparition <u>apparente</u> des effets de la pesanteur, notamment à l'intérieur d'un engin spatial. » *Le qualificatif est important si on considère que le phénomène, d'où qu'il provienne, ne disparaît jamais tout à fait, même aux confins de l'Univers.*

(4) *L'inertie caractérise ce qui est inerte, c'est à dire « privé de mouvement ». Le concept de force d'inertie, trop souvent confondu avec celui de résistance au mouvement, découle de l'inertie d'un système. Autrement dit, la force d'inertie ne pourrait s'exercer qu'à la seule condition de considérer le système comme totalement inerte. Ce mode de raisonnement, qui consiste à ignorer le mouvement réel, se nomme « Statique », c'est l'œuvre du physicien français Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783).*

(5) *L'échelle de ce dessin n'est pas correcte puisqu'un satellite géostationnaire ne peut avoir qu'une seule orbite, obligatoirement située dans un plan équatorial, à environ 35 800 km d'altitude. La hauteur (h) par rapport au sol vaut alors environ 5,6 fois celle du rayon équatorial terrestre (R) dont la longueur est d'environ 6 400 km (l'orbite d'un satellite, géostationnaire ou non, peut varier de quelques dizaines de kilomètres selon l'intensité des champs gravitationnels traversés émanant, pour l'essentiel, de la Lune et du Soleil).*

(6) *L'effet d'une force est inversement proportionnel à la masse sur laquelle elle s'exerce, c'est le deuxième principe de Newton (principe de dynamique) et la relation fondamentale : [**F** = **M Y**] ou [**Y** = **F** / **M**].*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

V. LE MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UNE AUTOMOBILE : LE MODE DE CALCUL

1. Force de guidage

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

F : force de guidage, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
V : vitesse, exprimée en **$m.s^{-1}$**
R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

cohérence des unités : **F** = $kg \cdot (m.s^{-1})^2 \cdot m^{-1} = kg \cdot (m^2.s^{-2} \cdot m^{-1}) = kg.m.s^{-2}$ = **N**

Exemple 1 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes pour la maintenir sur une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$F = 1\,500 \times 20^2 / 100 = 1\,500 \times 400 / 100 = 6\,000 \text{ N}$$

Cette force s'exerce au contact du sol (voir dossier ADILCA ''*force de guidage*''), elle doit être suffisante pour s'imposer à la masse de la voiture et à tout ce qu'elle transporte. En vertu du principe de réciprocité, la voiture exerce une action réciproque sur le globe terrestre, de même intensité mais de sens opposé.

Exemple 2 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur un passager de masse 100 kilogrammes lorsqu'une voiture décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

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

Cette force provient des pneumatiques, elle se transmet à l'ensemble de la voiture et à tout ce qu'elle transporte, elle s'exerce sur le passager par contact avec la carrosserie et le fauteuil. En vertu du principe de réciprocité, le passager exerce une action réciproque sur le fauteuil et la carrosserie, de même intensité mais de sens opposé. Le passager ressent parfaitement cette action réciproque qui a été interprétée à tort comme étant une manifestation de la force centrifuge.

2. Action réciproque

$$A = -M \cdot V^2 / R$$

A : action réciproque, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
V : vitesse, exprimée en **$m.s^{-1}$**
R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

cohérence des unités : **A** = $kg \cdot (m.s^{-1})^2 \cdot m^{-1} = kg \cdot (m^2.s^{-2} \cdot m^{-1}) = kg.m.s^{-2}$ = **N**

(le signe [–] précise l'orientation spatiale de l'action réciproque)

Exemple 1 : calculons l'action réciproque que les pneumatiques exercent sur le globe terrestre lorsqu'une voiture de masse 1 500 kilogrammes décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$\mathbf{A} = -\ 1\,500 \times 20^2 / 100 = -\ 1\,500 \times 400 / 100 = -\ 6\,000\ \mathbf{N}$$

Cette action réciproque ne perturbe pas la rotation du globe terrestre 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}.

Exemple 2 : calculons l'action réciproque qu'un passager de masse 100 kilogrammes exerce sur le fauteuil et la carrosserie de la voiture lorsque celle-ci décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

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

Le passager ressent parfaitement cette action réciproque qui lui donne l'impression de peser sur le bord du fauteuil et sur la carrosserie. C'est pourquoi la carrosserie doit être suffisamment rigide, et le fauteuil, correctement fixé. L'action réciproque d'un seul passager n'affecte pas la trajectoire de la voiture en raison du rapport des masses en interaction. Calculons ce rapport : voiture (1 500 kg) *versus* passager (100 kg) = 15.

3. Accélération transversale

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

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

cohérence des unités : $\boldsymbol{\Upsilon} = kg.m.s^{-2} \,.\, kg^{-1} = \mathbf{m.s^{-2}}$

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes décrivant une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$\boldsymbol{\Upsilon} = 6\,000 / 1\,500 = 4\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

4. Force centrifuge

$$\boldsymbol{F' = -\ M \,.\, \Upsilon}$$

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

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

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

Exemple 1 : raisonnons en statique et imaginons que la voiture soit immobile. Quelle force faudrait-il exercer sur le centre de gravité de la voiture afin de créer, sur les suspensions et les pneumatiques, un effet comparable à celui observé dans la réalité lorsque la voiture est soumise à une accélération transversale de 4 mètres par seconde carrée :

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

Exemple 2 : raisonnons en statique et imaginons que la voiture soit immobile. Quelle force faudrait-il exercer sur le centre de gravité d'un passager de masse 100 kg afin de lui communiquer la même sensation que celle qu'il éprouve dans la réalité lorsque la voiture est soumise à une accélération transversale de 4 mètres par seconde carrée :

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

Cette force imaginaire, c'est la *force centrifuge* (voir dossier ADILCA "*force centrifuge*"). Mais gare aux confusions :

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

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

3. L'appellation "*force centrifuge*" est incorrecte puisqu'il n'y a ni trajectoire, ni rayon, ni centre (la voiture est immobile). Le vrai nom de cette force est force fictive, force apparente, force imaginaire, pseudo-force ou tout simplement : force d'inertie.

4. Attention à ne pas confondre la *force centrifuge* avec l'*action réciproque* : ces deux forces ont bien la même intensité, mais la ressemblance s'arrête là :

- L'action réciproque est la force réelle que le passager exerce par contact avec le fauteuil ou la carrosserie, en réponse à la force de guidage que lui transmettent la carrosserie et le fauteuil lorsque la voiture décrit une trajectoire circulaire. Une action que le passager ressent parfaitement.
- La force centrifuge est une force imaginaire qu'il est évidemment impossible d'observer ou de ressentir puisque 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, qui se définit comme le point d'application de la résultante des forces de gravitation qui s'exercent sur les différentes masses d'un ensemble non homogène, et donc comme le centre d'équilibre de cet ensemble, ne peut être, n'est le siège d'aucune interaction, exceptée gravitationnelle. Concrètement, cela signifie qu'il est impossible d'y exercer directement la moindre force.

VI. LE MOUVEMENT D'UN PASSAGER D'AUTOMOBILE : LE MODE DE CALCUL

1. Accélération ou décélération de la voiture

$$\gamma = F / M$$

γ : accélération (ou décélération), exprimée en **$m.s^{-2}$**
F : force de traction (ou force de freinage), exprimée en **N**
M : masse de la voiture, exprimée en **kg**

cohérence des unités : **F** = kg . $m.s^{-2}$ = **N**

Calculons l'accélération d'une voiture de masse 1 500 kg soumise à une force de traction de 3 000 N :

$$\gamma = 3\,000 / 1\,500 = 2\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

2. Force qui s'exerce sur un passager

$$F = M . \gamma$$

F : force de traction (ou de freinage) qui s'exerce sur un passager, exprimée en **N**
M : masse du passager, exprimée en **kg**
γ : accélération (ou décélération) de la voiture, exprimée en **$m.s^{-2}$**

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

Un passager correctement installé dans son fauteuil subit une variation de vitesse identique à celle de la voiture. Pour une accélération de 2 $m.s^{-2}$, la force de traction qui s'exerce sur un passager de masse 100 kg est :

F = 100 x 2 = 200 **N**

Cette force provient des pneumatiques des roues motrices au contact du sol, elle se transmet à l'habitacle par l'intermédiaire des roues, du châssis et de la carrosserie, elle s'exerce enfin sur le passager par contact avec le dossier du fauteuil.

3. Action réciproque

Conformément au principe de réciprocité (troisième principe de Newton), le passager exerce une action réciproque sur le dossier du fauteuil, de même intensité que la force de traction, mais de sens opposé :

$$A = - M . \gamma$$

A : action réciproque exercée par le passager, exprimée en **N**
M : masse du passager, exprimée en **kg**
γ : accélération (ou décélération) de la voiture, exprimée en **m.s^{-2}**

cohérence des unités : **A** = kg . (m.s^{-2}) = kg.m.s^{-2} = **N**

(le signe [–] précise l'orientation spatiale de l'action réciproque)

Calculons cette action réciproque pour une accélération de 2 m.s^{-2}:

A = **–** 100 x 2 = **–** 200 **N**

La force de traction (ou de freinage) doit être largement suffisante pour s'imposer à la masse de la voiture et à tout ce qu'elle transporte. Si c'est le cas, l'action réciproque exercée par un seul passager n'affecte pas l'accélération de la voiture, en raison du rapport des masses en interaction. Calculons ce rapport : voiture (1 500 kg) *versus* passager (100 kg) = 15.

Cependant, le fauteuil doit être correctement fixé à la carrosserie et suffisamment solide pour supporter cette action réciproque, par exemple quand la voiture accélère, sinon il casse.

Si le fauteuil venait à se briser, le passager serait obligé de se cramponner à une partie quelconque de l'habitacle. Dans le cas d'une camionnette équipée d'un plateau sans ridelle, le passager tomberait à terre et resterait sur place.

4. Force d'inertie

$$F' = - M . \gamma$$

F' : force d'inertie, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
γ : accélération (ou décélération), exprimée en **m.s^{-2}**

cohérence des unités : **F'** = kg . m.s^{-2} = **N**

Raisonnons en statique et imaginons que la voiture soit immobile. Quelle force faudrait-il exercer sur le centre de gravité de ce passager pour lui communiquer une sensation identique à celle qu'il éprouve dans la réalité quand la voiture accélère ?

F' = – 100 x 2 = – 200 **N**.

Cette force imaginaire, c'est la *force d'inertie* !

En s'exerçant sur le passager, la force d'inertie serait théoriquement capable de faire subir au dossier du fauteuil une contrainte équivalente à celle qu'il subit dans la réalité lorsque la voiture accélère.

Dans le cas d'une camionnette équipée d'un plateau sans ridelle, la force d'inertie serait théoriquement capable d'entraîner le passager vers l'arrière jusqu'à ce qu'il tombe à terre, le véhicule restant parfaitement immobile.

Deux scénarios de science-fiction qui, manifestement, ont eu la préférence de nos chers, sympathiques et éminents professeurs.

Mais attention à ne pas confondre la *force d'inertie* avec l'*action réciproque* : ces deux forces sont bien égales, mais c'est leur seul point commun :

- L'action réciproque est une force réelle que le passager ressent parfaitement et qu'il exerce par contact avec le dossier du fauteuil, en réponse à la force de traction quand la voiture accélère.

- La force d'inertie est une force imaginaire qu'il est impossible d'observer ou de ressentir puisque 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, qui se définit comme le point d'application de la résultante des forces de gravitation qui s'exercent sur les différentes masses d'un ensemble non homogène, et donc comme le centre d'équilibre de cet ensemble, ne peut être, n'est le siège d'aucune interaction, exceptée gravitationnelle. Concrètement, cela signifie qu'il est impossible d'y exercer la moindre force.

Ces remarques valent pour toutes les forces d'inertie, force centrifuge et force de Coriolis.

Et que penser de ces auteurs qui s'obstinent à décrire le mouvement à l'aide de forces imaginaires supposées agir sur le centre de gravité de masses immobiles ?

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***

VII. LE MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN SATELLITE : LE MODE DE CALCUL

Accélération gravitationnelle

$$\gamma = G \cdot M / R^2 = V^2 / R$$

γ : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en **$m.s^{-2}$**
G : constante de Newton (**G** = 6,7 x 10^{-11} **$m^3.kg^{-1}.s^{-2}$**)
M : masse de la Terre, exprimée en **kg** (**M** = 6 x 10^{24} **kg)**
R : rayon orbital du satellite, exprimé en **m**
V : vitesse orbitale du satellite, exprimée en **$m.s^{-1}$**

cohérence des unités :

$\gamma = (m^3.kg^{-1}.s^{-2}) \cdot kg \cdot m^{-2} = m^{+3} \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2} \cdot kg^{+1} \cdot m^{-2} = \mathbf{m.s^{-2}}$

$\gamma = (m.s^{-1})^2 \cdot m^{-1} = m^2 \cdot s^{-2} \cdot m^{-1} = \mathbf{m.s^{-2}}$

Vitesse orbitale

$$V = 2\pi \cdot R / T = (\gamma \cdot R)^{1/2}$$

V : vitesse orbitale du satellite, exprimée en **$m.s^{-1}$**
2 π : constante caractéristique du cercle, grandeur sans dimension (**2 π** = 6,28)
R : rayon orbital du satellite, exprimé en **m**
T : durée de révolution, exprimée en **s**
(satellite géostationnaire : **T** = 23 h 56 min = 86 200 **s**)
γ : accélération gravitationnelle, exprimée en **$m.s^{-2}$**

cohérence des unités :

$\mathbf{V} = m \cdot s^{-1} = \mathbf{m.s^{-1}}$

$\mathbf{V} = (m.s^{-2} \cdot m)^{1/2} = (m^2.s^{-2})^{1/2} = \mathbf{m.s^{-1}}$

[*Remarque : la puissance 1/2 correspond à une racine carrée*]

Force centripète

$$F = M \cdot \gamma$$

F : force centripète, exprimée en **N**
M : masse du satellite, exprimée en **kg**
γ : accélération gravitationnelle, exprimée en **$m.s^{-2}$**

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

APPLICATIONS NUMÉRIQUES

1. Rayon orbital d'un satellite géostationnaire

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

$$G \,.\, M \,.\, R = V^2 \,.\, R^2$$

$$G \,.\, M = V^2 \,.\, R$$

$$\mathbf{V = 2\,\pi \,.\, R / T}$$

$$V^2 = (2\,\pi \,.\, R / T)^2$$

$$G \,.\, M = (2\,\pi \,.\, R / T)^2 \,.\, R$$

$$G \,.\, M = (4\,\pi^2 \,.\, R^2 / T^2) \,.\, R$$

$$G \,.\, M = 4\,\pi^2 \,.\, R^3 / T^2$$

$$G \,.\, M \,.\, T^2 = 4\,\pi^2 \,.\, R^3$$

$$R^3 = G \,.\, M \,.\, T^2 / 4\,\pi^2$$

$$R = (G \,.\, M \,.\, T^2 / 4\,\pi^2)^{1/3}$$

$$R = (6{,}7^{+1} \times 10^{-11} \times 6^{+1} \times 10^{+24} \times 86\,200^{+2} / 39{,}5^{+1})^{1/3}$$

$$R = (40^{+1} \times 7{,}43^{+1} \times 39{,}5^{-1} \times 10^{-11} \times 10^{+24} \times 10^{+9})^{1/3}$$

$$R = (7{,}52 \times 10^{22})^{1/3}$$

$$R = (75\,200 \times 10^{18})^{1/3}$$

$$\mathbf{R} = 42{,}2 \times 10^6 \ \mathbf{m}$$

[*Remarque : la puissance 1/3 correspond à une racine cubique*]

2. Vitesse orbitale d'un satellite géostationnaire

$$\mathbf{V = 2\,\pi \,.\, R / T}$$

$$V = 2\,\pi \times 42{,}2^{+1} \times 10^{+6} / (86{,}2^{+1} \times 10^{+3})$$

$$V = 6{,}28^{+1} \times 42{,}2^{+1} \times 86{,}2^{-1} \times 10^{(+6-3)}$$

$$\mathbf{V} = 3 \times 10^3 \ \mathbf{m.s^{-1}}$$

3. Accélération gravitationnelle géostationnaire

$$\gamma = V^2 / R$$

$$\gamma = (3^{+1} \times 10^{+3})^{+2} \times (42{,}2^{+1} \times 10^{+6})^{-1}$$

$$\gamma = 9^{+1} \times 42{,}2^{-1} \times 10^{+6} \times 10^{-6}$$

$$\boldsymbol{\gamma} = 9 / 42{,}2 = 0{,}215 \ \mathbf{m.s^{-2}}$$

Cette accélération est orientée vers le centre du globe terrestre. Perpendiculaire à l'orbite du satellite, elle ne modifie pas sa vitesse mais a pour effet de courber sa trajectoire. Si cette accélération était nulle, le satellite quitterait l'orbite terrestre.

4. Force centripète géostationnaire

$$F = M \cdot \gamma$$

Calcul pour un satellite géostationnaire de masse M = 1 000 kg :

$$\mathbf{F} = 1\,000 \times 0{,}215 = 215 \ \mathbf{N}$$

Cette force correspond au poids du satellite, le poids étant inversement proportionnel au carré de la distance qui sépare les centres de gravité de deux masses en interaction. L'engin, qui pèse 10 kN ($\mathbf{g} \sim 10$ m.s^{-2}) au moment du décollage (on néglige la masse de carburant), voit donc son poids ramené à 215 N lorsqu'il évolue à 42 200 km du centre de la Terre.

5. Action réciproque

La force centripète s'exerce sur le centre de gravité du satellite pour courber sa trajectoire et le maintenir en orbite, elle est due à l'attraction terrestre, elle correspond au poids que pèse l'engin à cette distance de la Terre (215 N). Conformément au principe de réciprocité, le satellite exerce une action réciproque sur le centre de gravité du globe terrestre, de même intensité (215 N) mais de sens opposé (signe négatif).

Calculons l'accélération qui en résulte (masse du globe terrestre = 6 x 10^{24} kg) :

$$\gamma = -F / M$$

γ : accélération du globe terrestre, exprimée en **m.s^{-2}**
F : action réciproque exercée par le satellite, exprimée en **N**
M : masse du globe terrestre, exprimée en **kg**

cohérence des unités : γ = kg.m.s^{-2} . kg^{-1} = **m.s^{-2}**

$$Y' = -215 / (6 \times 10^{24})$$

$$Y' = -36 \times 10^{-24}\ m.s^{-2}$$

Ce qui, en développé, peut s'écrire :

– 0,000 000 000 000 000 000 000 036 **m.s^{-2}**

Une intensité trop faible pour perturber la trajectoire du globe terrestre.

Calculons le rapport entre l'accélération du satellite (0,215 m.s^{-2}) et celle du globe terrestre (36 x 10^{-24} m.s^{-2}) :

$$0{,}215 / (36 \times 10^{-24}) = 0{,}006 \times 10^{24}$$

Calculons le rapport des deux masses en interaction (globe terrestre = 6 x 10^{24} kg ; satellite = 1 000 kg) :

$$6 \times 10^{24} / 1\,000 = 0{,}006 \times 10^{24}$$

Conformément au deuxième principe d'Isaac Newton, le rapport des deux accélérations correspond au rapport des deux masses en interaction.

6. Force centrifuge

Raisonnons en *statique* et imaginons que le satellite soit immobile dans l'espace (telle est l'impression que donne un satellite géostationnaire quand on l'observe depuis la Terre). Il faudrait alors imaginer une force de – 215 N s'exerçant sur le centre de gravité de l'engin pour neutraliser son poids et l'empêcher de chuter à la verticale. Cette force imaginaire qui fait tant fantasmer, c'est la *force centrifuge.*

Attention à ne pas confondre la force centrifuge avec l'action réciproque :

- Bien que d'intensité égale, ces deux forces ne s'exercent pas au même point (l'*action réciproque* s'exerce sur le centre de gravité du globe terrestre, la *force centrifuge* s'exerce sur celui du satellite).

- Ces deux forces n'appartiennent pas à la même description : l'une est bien réelle, elle est dite *dynamique*, l'autre étant parfaitement imaginaire (elle est dite *statique*).

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

VIII. BIBLIOGRAPHIE

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

- CESSAC (Jean) & TRÉHERNE (Georges) : *Physique Terminale D*, éditions Fernand Nathan, Paris 1977.

- I.N.S.E.R.R. (Institut National de Sécurité Routière et de Recherches) : *Stage de préparation au B.A.F.M. (Brevet d'Aptitude à la Formation de Moniteurs de conduite automobile)*, Nevers 2008.

- LE TONNELIER DE BRETEUIL, marquise du Chastellet (Gabrielle Émilie) : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (traduction intégrale en français de l'œuvre d'Isaac Newton), Paris 1759.

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

- 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

* * *