

## **LES MANUELS SCOLAIRES DE PHYSIQUE**

### **I. INTRODUCTION**

### **II. CESSAC & TRÉHERNE**

### **III. SAISON ALLAIN BLUMEAU DUBOC HERCHEN MÉRAT & NIARD**

### **IV. LE MOUVEMENT D'UN SATELLITE : LE MODE DE CALCUL**

### **V. LE MOUVEMENT D'UN PASSAGER D'AUTOMOBILE : LE MODE DE CALCUL**

**ASSOCIATION ADILCA [www.adilca.com](http://www.adilca.com) \* \* \***

## I. INTRODUCTION

Récemment, un professeur d'auto-école a proposé cette définition de la force centrifuge à des candidats préparant le BAFM :

*« 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 ! Entre autres incohérences, le physicien remarque immédiatement que deux forces égales et opposées se neutralisent, mais alors *quid* de la trajectoire circulaire de la voiture ? Bref, ce bricolage ne vaut pas un clou. Mais passons, car il ne s'agit pas ici d'accabler son auteur.

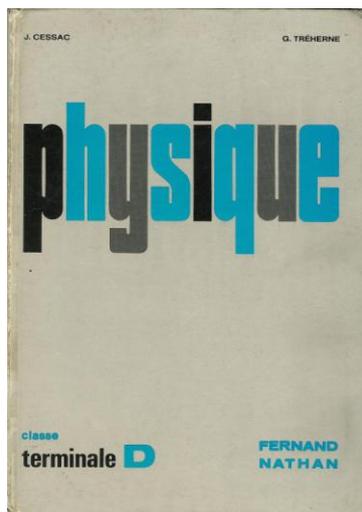
Ce qui nous intéresse ici, c'est remonter à la cause historique de ces erreurs à répétition, autrement dit, chercher à savoir pourquoi on assaisonne la force centrifuge à toutes les sauces...

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 différents manuels scolaires 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 générations de lycéens et étudiants. Parmi ces ouvrages, deux ont particulièrement retenu notre attention.

## II. 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, 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 qui parut en 1947 chez Fernand Nathan.

Cet ouvrage 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, ils 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, il n'y a pas photo.

Que ce soit au niveau de la description des phénomènes, la progressivité ou 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 de 1966. 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 2<sup>e</sup> 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*" (mathématiques supérieures) et "*mathspé*" (mathématiques spéciales).

Où sont les différences entre les versions C et D ? La version D bénéficie de « *substantiels allègements 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* », qu'on trouve en fin de chapitre. 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 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 Américains en juillet 1969.

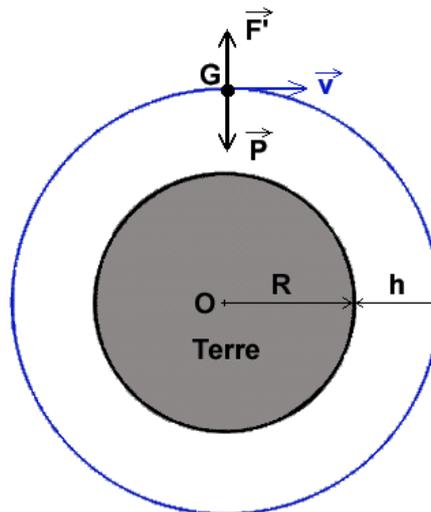
L'intérêt pédagogique de cet exemple est une description simplifiée du mouvement circulaire d'une masse car, contrairement à un véhicule terrestre, un satellite présente l'avantage de s'affranchir à la fois de la résistance au roulement et de la résistance de l'air.

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).

Détaillons ce dessin : sans aucun doute possible, il mêle deux descriptions incompatibles. L'erreur est là !

En effet, 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 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 alors le recours à une force apparente (F') de module égal au poids (P) du satellite, mais de sens opposé.

Ces deux descriptions, pourtant incompatibles, figurent bel et bien sur un seul et même dessin. Faute pédagogique majeure !

### Où est l'erreur ?

Pourquoi ces deux descriptions sont-elles incompatibles ? 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') existent vraiment, 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 de gravitation, 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. »<sup>(1)</sup>*

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 car elle introduit une première confusion entre description dynamique, description statique et référentiel relatif, mais aussi une deuxième méprise entre force agissant à distance et force de contact. 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<sup>(2)</sup> !...

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 : en effet, 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.

En effet, 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, 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 ne manquent pas : « *force apparente* », « *force imaginaire* », « *force fictive* », « *pseudo-force* », etc. Peu importe, pourvu que le qualificatif soit dépourvu d'ambiguïté. Et sans oublier le mode d'emploi, afin de dissiper le 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.

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. L'équilibre dont il est question ici signifie que les auteurs raisonnent 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 cette relation n'est valable qu'en dynamique. 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, retour à la statique avec la dernière partie du raisonnement qui affirme que, puisque ( $P = F'$ ), on peut en déduire que le module de la « *force d'inertie centrifuge* » est [ $F' = MV^2/(R + h)$ ] !

Que penser de ces allers-retours entre les deux descriptions ? Pour l'étudiant, ils prêtent à confusion. Afin d'éviter toute ambiguïté, il faudrait 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.

En effet, la fameuse relation [ $F' = MV^2/(R + h)$ ] ne peut s'appliquer qu'à une description dynamique, car 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 complètement inapplicable.

Retenons que les deux descriptions sont parfaitement contradictoires, et donc bien distinctes, tant au niveau des concepts que des termes ou des relations entre grandeurs. Malheureusement, les auteurs ont oublié de le préciser, 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.

### 1<sup>ère</sup> description :

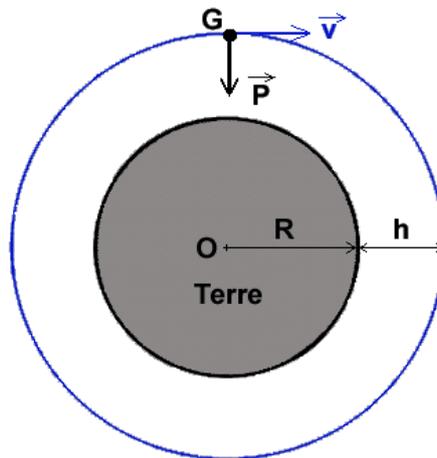
C'est une *description dynamique* du phénomène, celle expliquant le mouvement réel d'un satellite en orbite autour de la Terre.

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.

### 2<sup>ème</sup> description :

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

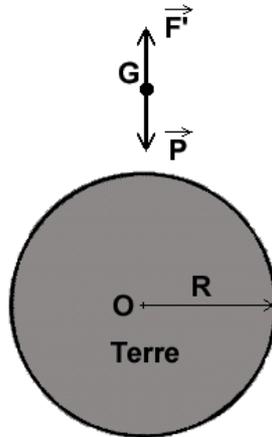
Dans cette configuration, purement hypothétique répétons-le, on supprime tout mouvement : on imagine que la Terre cesse de tourner sur elle-même, et on observe alors un satellite géostationnaire qui donne l'illusion d'être immobile dans l'espace.

Dans cette description, il n'y a ni vitesse, ni trajectoire circulaire, ni rayon orbital. 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'intensité égale mais de sens opposé, qui s'exercent sur le centre de gravité (G) du satellite. L'une de ces deux forces est le poids (P), l'autre est la fameuse force (F') nommée « *force d'inertie centrifuge* » dans cet ouvrage, mais qu'on devrait plutôt appeler "force apparente", "force fictive" ou "pseudo-force".

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 d'un satellite géostationnaire<sup>(3)</sup>.

### **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...

#### **1<sup>ère</sup> 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 ce qui lui donne cette sensation d'apesanteur.

### **2<sup>ème</sup> 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 des 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.

### **3<sup>ème</sup> 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, car 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 : en effet, comme tout référentiel relatif, le satellite doit être considéré comme un espace immobile, clos et sans fenêtre, il n'est donc 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 fictives.

Dans la description réelle, le principe s'applique comme suit :

- 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 et pour la Terre ne le sont pas. En effet, 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 :

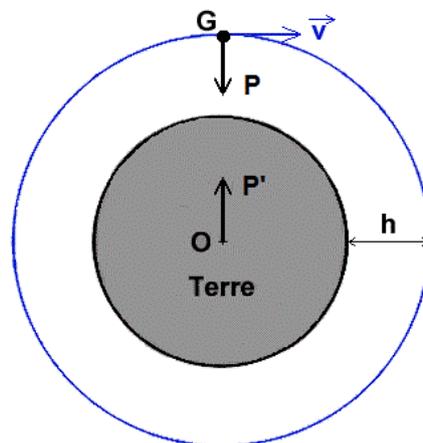
**6 000** yottagrammes (en abrégé : **6 000 Yg**), soit :

$$6 \times 10^{27} \text{ g}$$

ce qui, en développé, s'écrit :

**6 000 000 000 000 000 000 000 000 000** grammes.

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 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.

## Epilogue

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 eut 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 illustre 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**

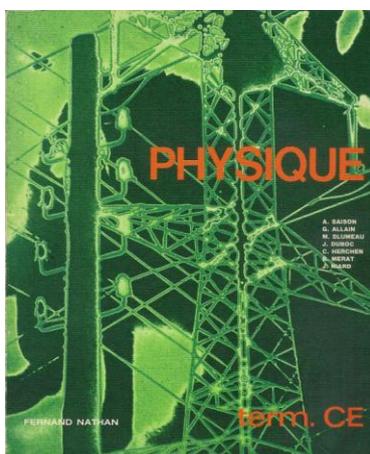
[www.adilca.com](http://www.adilca.com)

\* \* \*

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

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. 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 penser qu'ils étaient rompus à la traque des fautes pédagogiques...

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

## Des affirmations erronées

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

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

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

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

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

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

Les sensations du passager ont donc une tout autre explication.

## Le raisonnement correct

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

En réalité, le passager ne peut ressentir que des 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, bagages (voir les dossiers ADILCA "*force d'inertie*", "*force centrifuge*", "*couple moteur & force de traction*", "*force de freinage*", "*force de guidage*", etc.), elles parviennent enfin au passager par l'intermédiaire du fauteuil et de son dossier.

C'est donc le dossier du fauteuil qui vient s'appliquer sur le passager pour lui communiquer une force de traction, et non le contraire ! En réponse, le passager exerce une *action réciproque* 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 ?

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 en cas de freinage, d'où l'intérêt de la ceinture de sécurité et du coussin gonflable (airbag).

Notons que, dans une description imaginaire, ce principe est inapplicable puisque les interactions n'existent pas.

Autre confusion à éviter : la force qui fait varier la vitesse et son action réciproque sont bien égales mais leurs effets ne sont pas identiques, puisque l'action réciproque du passager s'efface devant celle des roues, de la carrosserie et du fauteuil<sup>(4)</sup>.

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 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 entre force d'inertie et action réciproque. Un exploit qui laissera des traces.

### **Force d'inertie : la véritable définition !**

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

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

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

### **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” a 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 enfin et une bonne fois pour toutes qu'il est impossible de confondre le réel et l'imaginaire, de traiter sur un pied d'égalité la dynamique et la statique, de mélanger des forces réelles avec des forces fictives ou pire encore, de les associer, le propre de la pédagogie étant justement d'éviter les ambiguïtés.

La physique doit rester la science des phénomènes concrets. La réhabilitation des sciences physiques et du raisonnement scientifique dans l'esprit du grand public est à ce prix. Qu'on se le dise !

(1) "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. » *Prise au pied de la lettre, cette phrase doit également susciter quelques réserves. En effet, il n'y a que trois forces d'inertie dont la force de Coriolis qui est précisément une exception à cette règle puisqu'elle ne peut se manifester qu'aux yeux d'un observateur lié à la Terre (voir dossier ADILCA "force de Coriolis"). Messieurs Cessac et Tréherne avaient-ils les pieds sur terre lorsqu'ils ont rédigé ce chapitre ?*

(2) *D'après le dictionnaire LAROUSSE, l'apesanteur (ou impesanteur) se définit comme la « disparition apparente des effets de la pesanteur terrestre, notamment à l'intérieur d'un engin spatial. » Le qualificatif est important si on considère que le phénomène de pesanteur, d'où qu'il provienne, ne disparaît jamais tout à fait, même aux confins de l'univers.*

(3) *L'échelle de ce dessin n'est pas correcte. En effet, un rapide calcul montre qu'un satellite géostationnaire ne peut avoir qu'une seule orbite, obligatoirement située dans un plan équatorial, à environ 35 800 kilomètres 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 kilomètres.*

*Remarque : l'orbite d'un satellite (géostationnaire ou non) peut varier de quelques dizaines de kilomètres lors de la traversée de champs gravitationnels. Ces champs émanent, pour l'essentiel, de la Lune et du Soleil. C'est pourquoi la trajectoire de n'importe quel engin spatial doit être contrôlée et ajustée en permanence.*

(4) *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](http://www.adilca.com)

\* \* \*

#### IV. LE MOUVEMENT D'UN SATELLITE : LE MODE DE CALCUL

##### Accélération gravitationnelle

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

**Y** : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en **m.s<sup>-2</sup>**

**G** : constante de Newton (**G** = 6,7 x 10<sup>-11</sup> **m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-2</sup>**)

**M** : masse de la Terre, exprimée en **kg** (**M** = 6 x 10<sup>24</sup> **kg**)

**R** : rayon orbital du satellite, exprimé en **m**

**V** : vitesse orbitale du satellite, exprimée en **m.s<sup>-1</sup>**

cohérence des unités :

$$Y = (m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}) \cdot kg \cdot m^{-2} = m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2} \cdot kg^1 \cdot m^{-2} = m \cdot s^{-2}$$

$$Y = (m \cdot s^{-1})^2 \cdot m^{-1} = m^2 \cdot s^{-2} \cdot m^{-1} = m \cdot s^{-2}$$

##### Vitesse orbitale

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

**V** : vitesse orbitale du satellite, exprimée en **m.s<sup>-1</sup>**

**2π** : constante caractéristique du cercle, grandeur sans dimension (**2π** = 6,28)

**R** : rayon orbital du satellite, exprimé en **m**

**T** : durée de révolution, exprimée en **s**  
(satellite géostationnaire : **T** = 23 h 56 min = 86 160 **s**)

**Y** : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s<sup>-2</sup>**

cohérence des unités :

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

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

##### Force centripète

$$F = M \cdot Y$$

**F** : force centripète, exprimée en **N**

**M** : masse du satellite, exprimée en **kg**

**Y** : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s<sup>-2</sup>**

cohérence des unités : **F** = kg . m.s<sup>-2</sup> = **N**

## Application numérique

### 1. Orbite d'un satellite géostationnaire

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

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

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

$$V = 2\pi \cdot R / T$$

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

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

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

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

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

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

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

$$R = (6,7 \times 10^{-11} \times 6 \times 10^{24} \times 86\,160^2 / 39,5)^{1/3}$$

$$R = (40 \times 10^{13} \times 7,4 \times 10^9 / 39,5)^{1/3}$$

$$R = (7,5 \times 10^{22})^{1/3}$$

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

### 2. Vitesse d'un satellite géostationnaire

$$V = 2\pi \cdot R / T$$

$$V = 2\pi \times 42,2 \times 10^6 / 86\,160$$

$$V = 6,28 \times 42,2 \times 10^6 / (86,2 \times 10^3)$$

$$V = 6,28 \times 42,2 \times 10^3 / 86,2$$

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

### 3. Accélération gravitationnelle géostationnaire

$$Y = V^2 / R$$

$$Y = (3 \times 10^3)^2 / (42,2 \times 10^6)$$

$$Y = 9 \times 10^6 / (42,2 \times 10^6)$$

$$Y = 9 / 42,2 = 0,215 \text{ m.s}^{-2}$$

### 4. Force centripète géostationnaire

$$F = M \cdot Y$$

Calcul pour un satellite géostationnaire de masse  $M = 1\ 000 \text{ kg}$  :

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

### 5. Principe de réciprocité

La force centripète s'exerce sur le centre de gravité du satellite pour courber sa trajectoire et le maintenir sur une orbite géostationnaire, elle est due à l'attraction terrestre, c'est le poids que pèse l'engin à cette distance de la Terre (215 N).

Conformément au principe de réciprocité (troisième principe de Newton), une force de même intensité (215 N) mais de sens opposé s'exerce sur le centre de gravité de la Terre, une intensité trop faible pour perturber la trajectoire du globe terrestre.

### 6. Force centrifuge

Raisonnons en statique et imaginons que le satellite soit immobile dans l'espace (c'est l'illusion que donne un satellite géostationnaire observé depuis la Terre). Il faudrait alors imaginer une force de  $- 215 \text{ N}$  s'exerçant sur le centre de gravité de l'engin pour neutraliser son poids, le maintenir en équilibre 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'égale intensité, ces deux forces ne s'exercent pas au même point et n'appartiennent pas à la même description : l'une est parfaitement imaginaire, l'autre est bien réelle.

**ASSOCIATION ADILCA [www.adilca.com](http://www.adilca.com) \* \* \***

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

### 1. Accélération de la voiture

$$Y = F / M$$

**Y** : accélération, exprimée en **m.s<sup>-2</sup>**

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

**M** : masse de la voiture, exprimée en **kg**

cohérence des unités : **F = kg . m.s<sup>-2</sup> = N**

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

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

### 2. Force de traction qui s'exerce sur le passager

$$F = M . Y$$

Un passager correctement installé dans son fauteuil subit une accélération identique à celle de la voiture. Pour une accélération de 2 m.s<sup>-2</sup>, la force de traction qui s'exerce sur un passager de masse 100 kg est :

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

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

### 3. Principe de réciprocité

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 (200 N) mais de sens opposé.

Conclusion : le fauteuil doit être correctement fixé et suffisamment solide pour supporter cette action quand la voiture accélère, sinon il casse. Le passager serait alors obligé de se cramponner à une partie quelconque de l'habitacle ou, dans le cas d'une camionnette équipée d'un plateau sans ridelle, tomber par terre et rester sur place.

#### 4. Force d'inertie

Raisonnons en statique et imaginons que la voiture est 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 ?

La réponse est évidente : – 200 N.

Cette force imaginaire, c'est la *force d'inertie*. En s'exerçant sur le passager, elle 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 par 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 la ressemblance s'arrête là :

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

Conclusion : entre réalité et fiction, trois différences qui changent tout !

**ASSOCIATION ADILCA**

[www.adilca.com](http://www.adilca.com)

\* \* \*