LA FORCE CENTRIPÈTE

I. LES LOIS DE NEWTON……..……2

II. ISAAC NEWTON ET LA FORCE CENTRIPÉTE……3

III. FORCE CENTRIPÈTE : UNE DÉFINITION UNIVERSELLE……4

IV. MOUVEMENT CIRCULAIRE DE LA TERRE……10

1. Calcul de la force de gravitation
2. Calcul de la force centripète
3. Calcul de l'accélération gravitationnelle
4. Calcul de l'action réciproque
5. Calcul de la force centrifuge

V. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN SATELLITE……15

1. Accélération gravitationnelle
2. Vitesse orbitale
3. Force centripète
4. Calcul du rayon orbital d'un satellite géostationnaire
5. Calcul de la vitesse orbitale d'un satellite géostationnaire
6. Calcul de l'accélération gravitationnelle d'un satellite géostationnaire
7. Calcul de la force centripète géostationnaire
8. Calcul de l'action réciproque
9. Calcul de la force centrifuge

VI. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UNE AUTOMOBILE……19

1. Calcul de la force de pesanteur
2. Calcul de la force de guidage
3. Calcul de l'accélération transversale
4. Calcul de l'action réciproque
5. Calcul de la force centrifuge

VII. BIBLIOGRAPHIE……..…23

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 sur laquelle s'exerce une force, répond par une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé*. »

Principe d'attraction universelle

« *Toutes les masses s'attirent mutuellement.* »

Comment ces lois s'appliquent-elles pour décrire un mouvement circulaire et quel est rôle de la force centripète dans ce cas ?

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

II. ISAAC NEWTON ET LA FORCE CENTRIPÈTE

Pendant longtemps, les hommes ont cru que la Terre était immobile et située au centre de l'univers. Tous les phénomènes naturels étaient donc interprétés à partir de ce postulat, en particulier les mouvements apparents du Soleil et des planètes observés depuis l'Antiquité, mais auxquels personne n'avait trouvé d'explication logique.

Nicolas Copernic (astronome polonais, 1473 - 1543) fut le premier à émettre une hypothèse complètement révolutionnaire : et si le centre de l'univers n'était pas la Terre mais le Soleil ?

Galileo Galilei (dit Galilée, physicien italien, 1564 - 1642), convaincu de la justesse de l'hypothèse, confirma que c'est bien la Terre qui tourne autour du Soleil, et non l'inverse. Il ne restait plus qu'à découvrir les lois de la gravitation pour expliquer enfin de manière correcte l'équilibre du système solaire.

C'est là qu'intervint la perspicacité d'Isaac Newton (1642 - 1727). Reprenant les théories de Copernic et Galilée, Newton fit la relation entre un objet qui tombe à la surface de la Terre et la course de la Lune autour de la Terre.

Il émit alors l'hypothèse qu'il s'agissait-là d'une loi générale s'appliquant partout et à tous les corps, qu'il s'agisse d'une pomme, de la Lune, de la Terre ou de n'importe quelle planète du système solaire.

Il transposa ensuite son raisonnement au mouvement de la Terre autour du Soleil : si la Terre tourne ainsi, c'est parce qu'elle est soumise en permanence à une force qui émane du Soleil. Cette force, c'est la *force centripète*.

Isaac Newton la définit ainsi :

« *Vis centripeta est, qua corpora versus punctum aliquod, tanquam ad centrum, undique trahuntur, impelluntur, vel utcunque tendunt.* »

Une phrase qu'Émilie de Breteuil a fidèlement traduite [(1)] :

« *La force centripète est celle qui fait tendre les corps vers quelque point, comme un centre, soit qu'ils soient tirés ou poussés vers ce point, ou qu'ils y tendent d'une façon quelconque.* »

Cette définition, parfaite pour expliquer le mouvement de la Terre autour du Soleil, peut-elle s'appliquer également au mouvement circulaire des automobiles ? C'est toute la question…

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

III. FORCE CENTRIPÈTE : UNE DÉFINITION UNIVERSELLE

Rappel

Le *principe d'inertie* d'Isaac Newton énonce qu'en l'absence de force, toute masse en mouvement décrit une trajectoire parfaitement rectiligne.

Toute trajectoire non rectiligne résulte donc de l'action d'une force. Le concept de force découle du principe précédent et se définit ainsi :

« Une force désigne toute cause capable d'agir sur la trajectoire d'une masse. »

Définition

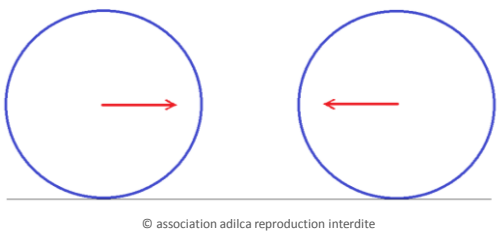
Qu'est-ce qui caractérise une force qualifiée de « *centripète* » ?

Du point de vue de l'étymologie, « *centripète* » signifie à la fois « *qui attire vers un centre* » et « *qui s'exerce sur un centre* », d'où cette définition universelle :

« La force centripète est l'attraction mutuelle qui s'exerce à distance entre deux masses, selon une droite reliant leurs deux centres de gravité. Synonymes : force de gravitation, force de pesanteur, poids. »

Le *principe d'attraction universelle* a été formulé par Isaac Newton qui, après avoir étudié le mouvement de la Lune autour de la Terre et celui de la Terre autour du Soleil, en déduisit que tous les corps s'attirent mutuellement à partir de leurs centres de gravité, avec une intensité qui est fonction du produit de leurs masses et du carré inverse de la distance qui les sépare [(2)].

Remarque : dans notre environnement proche, cette attraction est trop faible pour déplacer quelque objet que ce soit, d'une part parce qu'elle est neutralisée par la présence d'autres masses à proximité, d'autre part à cause de la pesanteur qui émane du globe terrestre.



L'attraction universelle

Deux masses quelconques posées sur une table s'attirent mutuellement à partir de leurs centres de gravité. Cette attraction est trop faible pour les faire se rapprocher l'une de l'autre, à cause de leur poids (non représenté ici) qui les maintient en contact avec la table.

Pesanteur et gravitation

La *pesanteur* et la *gravitation* sont deux manifestations identiques du principe d'attraction universelle.

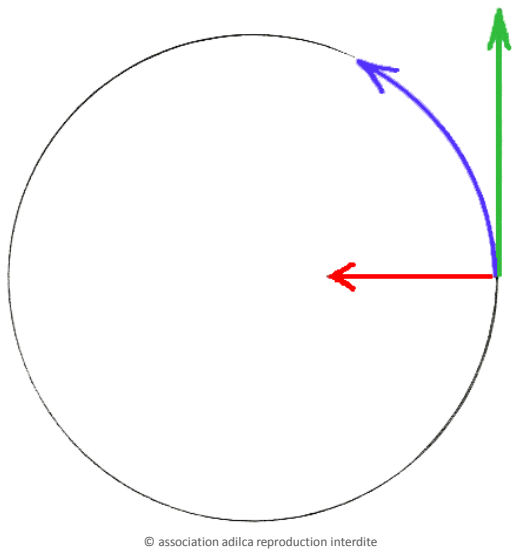
1. La phénomène de pesanteur est une manifestation de l'attraction qui s'exerce à distance entre deux masses, phénomène à l'origine de la chute des corps.

Exemples : un pendule indique la verticale, un objet lourd est difficile à lever, un objet lancé en l'air retombe au sol, tout cela à cause de l'attraction exercée par le globe terrestre. À proximité du sol, cette attraction est appelée *force de pesanteur* ou *poids* (3).

2. Le phénomène de gravitation est une manifestation de l'attraction qui s'exerce à distance entre deux corps célestes, phénomène à l'origine du mouvement circulaire des planètes et des satellites.

Exemple : le Soleil exerce une attraction sur le globe terrestre qui a pour effet de courber la trajectoire de la Terre et la maintenir en orbite. Cette attraction est appelée *force de gravitation* ou *force centripète* (4). On en déduit que :

- Si la force centripète cessait d'agir, la Terre quitterait le système solaire.
- Si la vitesse du globe terrestre était nulle, la Terre prendrait la direction du Soleil pour venir s'y fondre, comme un caillou qui tombe dans l'eau.



Mouvement circulaire de la Terre

La Terre décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) grâce à la force centripète qui émane du Soleil (flèche rouge). Si cette force cessait brusquement d'agir, la Terre conserverait sa vitesse mais quitterait immédiatement son orbite en adoptant une trajectoire rectiligne (flèche verte). Inversement, privé de vitesse, le globe terrestre chuterait immédiatement en direction du Soleil. Bien distinguer les vecteurs force (en rouge), vitesse (en vert) et trajectoire (en bleu) !

Force centripète et force centrifuge : la confusion

On présente souvent la force centripète et la force centrifuge comme deux forces indissociables, toujours égales et opposées, et agissant de concert sur la même masse [5]. Cette présentation est erronée car, si tel était le cas, ces deux forces se neutraliseraient et il n'y aurait pas de trajectoire circulaire. Cette confusion a une double origine.

1. Une première confusion provient de la mauvaise compréhension du concept de force centrifuge et de son emploi à tort et à travers. La force centrifuge étant une force imaginaire, elle ne peut apparaître que dans une description tronquée qui fait abstraction du mouvement réel. Cette description est qualifiée de ''*statique*''.

Dans l'exemple d'un Système solaire statique, il faut imaginer que la Terre cesse de tourner autour du Soleil et reste immobile dans l'espace. Soumis à l'attraction solaire, le globe terrestre prendrait alors immédiatement la direction du Soleil pour venir s'y fondre, sauf si une force imaginaire, de même intensité mais de sens opposé, venait l'en empêcher.

Cette force imaginaire, c'est la force centrifuge. Mais la description est tronquée car elle suppose que la Terre cesse de tourner autour du Soleil [6].

Résumons ce qui distingue la force centripète de la force centrifuge :

- Dans une description réelle, dite *dynamique*, la Terre tourne autour du Soleil. La force centripète est la force réelle qui émane du Soleil pour maintenir le globe terrestre en orbite sur une trajectoire circulaire.
- Dans une description imaginaire, dite *statique*, la Terre est immobile. La force centrifuge est alors la force imaginaire destinée à neutraliser le poids de la Terre pour éviter qu'elle ne tombe sur le Soleil : c'est la force qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité du globe terrestre, si celui-ci était immobile, pour compenser l'attraction solaire et le maintenir en équilibre dans l'espace.

En bref : la force centripète est souvent associée à la force centrifuge, à tort, car ces deux forces n'appartiennent pas à la même description !

2. Une seconde confusion provient de la mauvaise compréhension du principe de réciprocité d'Isaac Newton qui énonce ceci :

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

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas de la relation Soleil-Terre ?

Reprenons la description du mouvement dans le système solaire et la relation entre le Soleil et la Terre : le Soleil génère une force qui agit à distance sur le centre de gravité du globe terrestre pour le maintenir en orbite. Cette force, c'est la force centripète.

Le principe d'Isaac Newton permet de déduire qu'en retour, le globe terrestre attire le centre de gravité du Soleil avec une force de même intensité, c'est l'*action réciproque*, un phénomène qui n'a strictement aucun rapport avec le concept de force centrifuge.

Pourquoi le Soleil reste-t-il insensible à l'action réciproque exercée par la Terre ? L'explication tient à la masse du Soleil, environ 330 000 fois supérieure à celle de la Terre : le rapport des masses étant en sa faveur, le Soleil dicte sa loi, la Terre s'y soumet, telle est l'une des lois de la nature [(7)].

Résumons ce qui distingue la force centrifuge et l'action réciproque :

- La *force centrifuge* est une force imaginaire, c'est la force qu'il faudrait exercer sur le globe terrestre pour compenser l'attraction solaire et le maintenir en équilibre dans l'espace, si la Terre cessait de tourner autour du Soleil.
- L'*action réciproque* est une force réelle, c'est la force que le globe terrestre exerce sur le Soleil, en réponse à la force centripète qui le maintient en orbite.

En bref : la force centrifuge est souvent confondue avec l'action réciproque, à tort, car ces deux forces n'appartiennent pas à la même description !

Force centripète : la seule application

Les satellites artificiels sont des relais indispensables pour certaines applications : télécommunications (téléphone, télévision, internet), localisation GPS, surveillance des territoires, observations météorologiques, observations spatiales…

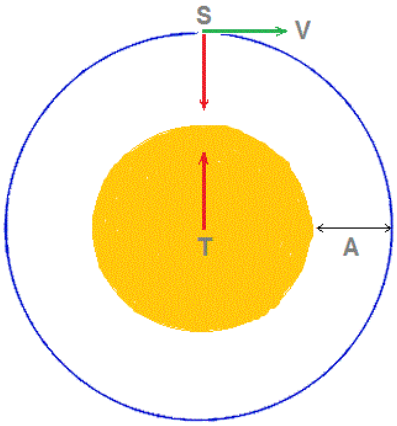
Or, sans la force centripète, ces engins ne pourraient pas se maintenir en orbite. En effet, c'est le propre poids de l'engin, autrement dit, l'attraction exercée par le globe terrestre, qui lui impose une trajectoire circulaire. C'est la seule application possible.

Par conséquent, le lancement d'un satellite consiste à asservir la force centripète grâce à un subtil équilibre entre vitesse et altitude : si la vitesse de l'engin est trop faible, il ne peut pas maintenir son altitude et retombe sur terre ; si sa vitesse est trop élevée, il gagne en altitude et se perd dans l'espace.

Dans le cas d'un satellite géostationnaire, l'équilibre est encore plus délicat. En effet, pour assurer en permanence les transmissions d'un continent ou d'un hémisphère à un autre, l'engin doit occuper une position fixe par rapport au sol.

Or, il n'existe qu'une seule orbite géostationnaire possible, située au-dessus de l'équateur ; de plus, le satellite doit l'occuper à une altitude précise et avec une vitesse telle que son déplacement angulaire soit parfaitement identique à celui du globe terrestre.

Si ces trois conditions sont réunies (orbite, altitude, vitesse), l'engin, observé depuis le sol, donne alors l'impression d'être immobile dans l'espace [(8)].



© association adilca reproduction interdite

Mouvement circulaire d'un satellite

Un satellite **S** animé d'une vitesse **V** maintient une orbite circulaire d'altitude **A** (cercle bleu) grâce à la force centripète (flèche rouge orientée vers le bas) qui émane du globe terrestre **T** (masse jaune). Si cette force n'existait pas, le satellite quitterait l'orbite terrestre sur une trajectoire rectiligne dont la direction est indiquée par le vecteur vitesse **V**. En réponse à la force centripète exercée par la Terre, la masse du satellite exerce une action réciproque sur le globe terrestre (flèche rouge orientée vers le haut).

Force centripète et automobile

Le phénomène de gravitation d'un satellite se résume donc à une interaction entre deux centres de gravité : celui du globe terrestre et celui de l'engin.

Un raisonnement identique peut-il s'appliquer à la trajectoire circulaire des véhicules terrestres ?

1. La *force centripète* devrait, si elle existait en automobile, émaner du centre de la trajectoire que décrit la voiture (quelque part dans la végétation, au milieu des rochers ou dans le vide…) et agir à distance, sans que le conducteur ait besoin d'intervenir. De toute évidence, ce n'est jamais le cas [(9)].

2. La *force centripète* devrait, si elle existait en automobile, agir sur le centre de gravité de la voiture (quelque part au milieu de l'habitacle…) afin de courber sa trajectoire, sans que le conducteur ait besoin d'intervenir. De toute évidence, ce n'est jamais le cas non plus. Conclusion partielle :

- Il n'y a absolument rien au centre de la trajectoire d'une automobile qui puisse expliquer son mouvement circulaire.

- Le centre de gravité d'une automobile n'est le siège d'aucune interaction susceptible d'expliquer son mouvement circulaire [(10)].

Ce raisonnement par l'absurde prouve que le concept de force centripète ne convient pas à la description du mouvement des véhicules terrestres.

La force de guidage

En réalité, c'est la *force de guidage* qui préside aux trajectoires circulaires d'une automobile, une force mystérieuse parce que jamais décrite nulle part, mais que tout conducteur sollicite, sans le savoir, des millions de fois au cours de sa vie d'automobiliste.

En automobile, la force de guidage se définit comme la force transversale qui s'exerce sur les pneumatiques des roues directrices au contact du sol dès que le conducteur actionne la commande de direction pour changer de cap, faute de quoi la ligne droite serait la seule direction possible (voir le dossier ADILCA ''*force de guidage*'').

Il n'y a pas d'autre interaction à prendre en compte pour expliquer le mouvement circulaire d'une automobile. Toute autre description est nulle et non avenue.

Trois différences fondamentales

Il suffit de comparer les caractéristiques de la force de guidage avec celles qui définissent la force centripète d'Isaac Newton, pour constater que :

1. La voiture ne tend jamais vers le centre de sa trajectoire, elle n'est jamais ni tirée ni poussée vers ce point, elle n'en prend jamais la direction, elle ne s'en rapproche jamais, elle est simplement déviée d'une trajectoire rectiligne.

2. La *force de guidage* n'agit pas à distance mais par contact.

3. La *force de guidage* ne s'exerce pas sur le centre de gravité de la voiture, mais à la périphérie des pneumatiques des roues directrices.

Trois raisons fondamentales qui nous permettent de conclure de manière claire, nette et définitive que la *force de guidage* et la *force centripète* sont deux forces parfaitement distinctes qui n'ont aucun point commun. C.Q.F.D.

Conclusion définitive

Le concept de force centripète, tel que défini par Isaac Newton, s'applique exclusivement au phénomène d'attraction universelle. Il permet d'expliquer tout à la fois la trajectoire circulaire de la Terre autour du Soleil, celle de la Lune autour de la Terre, et celle des satellites autour du globe terrestre.

Mais une automobile n'est pas un satellite !

Il faut se rendre à l'évidence : en automobile, il n'y a ni force centrifuge, ni force centripète !

(1) *Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil, duchesse du Chastellet, mathématicienne et physicienne française (1706 - 1749). Sa traduction de l'œuvre d'Isaac Newton fait référence encore aujourd'hui.*

(2) *C'est la distance entre les deux centres de gravité qui compte. Le centre de gravité, également appelé centre de masse, centre d'inertie ou centre d'équilibre, se définit comme le point d'application de la résultante des forces de gravitation qui agissent sur les différentes parties d'un ensemble, comme si toute la matière était concentrée en un seul point. Par exemple, dans le cas d'une bille homogène, le centre de gravité se confond avec le centre géométrique de la sphère.*

(3) *Le langage courant entretient la confusion entre poids et masse. Du point de vue de la physique, le* poids *se définit comme la force verticale que le globe terrestre exerce sur le centre de gravité d'une masse quelconque, c'est une grandeur vectorielle puisqu'elle possède une orientation spatiale. À ne pas confondre avec la* masse*, qui se définit comme une quantité de matière, grandeur scalaire puisqu'elle est dépourvue d'orientation spatiale et indépendante du lieu considéré. Conformément au Système International d'Unités (en abrégé : **SI**), la masse s'exprime en kilogrammes (symbole **kg**), et le poids en newtons (symbole **N**), le poids étant le simple produit de la masse par l'accélération gravitationnelle du lieu considéré (**N** = **kg . m.s**$^{-2}$)*

(4) *C'est pourquoi les appellations « force centripète », « force de gravitation », « force de pesanteur » et « poids » (au sens physique du terme) sont parfaitement synonymes. Malheureusement, le concept de force centripète a été abusivement utilisé pour décrire n'importe quel mouvement circulaire, alors qu'il aurait dû être réservé au seul phénomène d'attraction universelle (voir dossier ADILCA "centrifugeuse").*

(5) *Du point de vue de la sémantique, les termes centripète et centrifuge sont de parfaits antonymes, utilisés comme tels par exemple en sociologie pour qualifier les motivations qui poussent certains individus, ou groupes d'individus, à se rapprocher ou à s'éloigner les uns des autres. Ce n'est absolument pas le cas en physique : la force centrifuge n'est pas le contraire de la force centripète.*

(6) *Cette description tronquée est dite "statique", par opposition à la description réelle, dite "dynamique". Attention ! Raisonner en statique entraîne de sérieuses conséquences : ici, cela supposerait la disparition des saisons ! Sur l'origine de la confusion, voir le dossier ADILCA "manuels scolaires de physique".*

(7) *C'est la loi du plus fort, ou plutôt, du plus massique : la force centripète et son action réciproque sont égales, mais leurs effets sont inversement proportionnels à la masse sur laquelle elles s'exercent (c'est le 2ème principe de Newton). Comparons les masses : Soleil (S) = 2 x 10^{30} kg ; Terre (T) = 6 x 10^{24} kg. Le rapport S/T est donc égal à 1/3 x 10^{6}. C'est pourquoi la Terre est un satellite du Soleil et non l'inverse. Plus généralement, c'est l'inégalité entre les masses qui permet de faire la distinction entre une force et son action réciproque. Et contrairement à ce que l'on peut lire dans certains ouvrages de physique, ces deux attributions ne sont absolument pas interchangeables !*

(8) *L'orbite géostationnaire est située à environ 35 800 km d'altitude au-dessus de l'équateur, le satellite doit la parcourir à la vitesse d'environ 11 000 km.h^{-1}, de sorte que son déplacement angulaire soit parfaitement identique à celui du globe terrestre (6,28 rad en 23 h et 56 min). D'abord lancé verticalement pour l'arracher à la pesanteur terrestre, le satellite doit ensuite être dirigé vers l'est (sens de rotation de la Terre), afin de bénéficier de la vitesse circonférentielle du lieu où s'est effectué le tir (nulle aux pôles, celle-ci est d'environ 1 700 km.h^{-1} à l'équateur). Une fois dans l'espace, un satellite n'est plus freiné par la présence d'atmosphère, il conserve sa vitesse indéfiniment, mais son orbite peut varier de plusieurs kilomètres lors de la traversée de divers champs gravitationnels, comme celui qui émane de la Lune. À noter qu'il n'y aurait pas d'orbite géostationnaire possible en statique, c'est-à-dire si la Terre cessait de tourner sur elle-même.*

(9) *Animée d'une vitesse constante et soumise à une force centripète, la voiture décrirait un cercle perpétuel, comme le font les satellites qui gravitent autour de la Terre. Amenée à ralentir, la voiture décrirait alors une trajectoire en forme de spirale aboutissant à ce fameux centre...*

(10) *Une automobile est un ensemble composé de masses non homogènes : moteur, boîte de vitesses, roues, châssis, carrosserie, passagers, chargement… Avec deux personnes à bord, le centre de gravité d'une voiture de tourisme est approximativement situé entre les deux sièges avant, à la hauteur de l'assise, c'est le centre d'équilibre de l'ensemble. Cet exemple prouve que le centre de gravité est un point parfaitement immatériel et qu'il est donc strictement impossible d'y exercer la moindre force.*

IV. MOUVEMENT CIRCULAIRE DE LA TERRE

1. Calcul de la force de gravitation

$$F = G . M_1 . M_2 / D^2$$

F : force de gravitation, exprimée en **N**
G : constante de Newton (**G** = 6,7 x 10^{-11} **$m^3.kg^{-1}.s^{-2}$**)
M_1 : masse 1, exprimée en **kg**
M_2 : masse 2, exprimée en **kg**
D : distance séparant les deux centres de gravité, exprimée en **m**

cohérence des unités :

$$F = (m^3.kg^{-1}.s^{-2}) . kg^{+1} . kg^{+1} . m^{-2}$$

$$F = m^{+3} . kg^{-1} . s^{-2} . kg^{+2} . m^{-2}$$

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

Calculons la force de gravitation que le Soleil exerce sur la Terre (Soleil : 2 x 10^{30} kg ; Terre : 6 x 10^{24} kg ; distance Soleil-Terre : 150 x 10^9 m) :

$$F = 6,7^{+1} \times 10^{-11} \times 2^{+1} \times 10^{+30} \times 6^{+1} \times 10^{+24} \times (150^{+1} \times 10^{+9})^{-2}$$

$$F = 6,7^{+1} \times 2^{+1} \times 6^{+1} \times 150^{-2} \times 10^{-11} \times 10^{+30} \times 10^{+24} \times 10^{-18}$$

$$F = 80,4^{+1} \times 22\,500^{-1} \times 10^{(-11+30+24-18)}$$

$$F = 0,003\,57 \times 10^{(-11+30+24-18)}$$

$$F = 0,003\,57 \times 10^{25}$$

$$F = 36 \times 10^{21} = 36\ \mathbf{ZN}$$

Cette force provient du centre de gravité du Soleil et s'exerce sur celui de la Terre.

2. Calcul de la force centripète

$$F = M . V^2 / R$$

F : force centripète, exprimée en **N**
M : masse de la Terre, exprimée en **kg**
V : vitesse orbitale de la Terre, exprimée en **$m.s^{-1}$**
R : rayon orbital de la Terre, exprimé en **m**

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

Calculons la force centripète que délivre le Soleil pour maintenir la Terre en orbite. Caractéristiques de la Terre : masse : 6×10^{24} kg ; vitesse orbitale : 30×10^{3} m.s^{-1} ; rayon orbital : 150×10^{9} m.

$$F = 6^{+1} \times 10^{+24} \times (30^{+1} \times 10^{+3})^{+2} / (150^{+1} \times 10^{+9})$$

$$F = 6^{+1} \times 10^{+24} \times 900^{+1} \times 10^{+6} \times 150^{-1} \times 10^{-9}$$

$$F = 6^{+1} \times 900^{+1} \times 150^{-1} \times 10^{(+24+6-9)}$$

$$\mathbf{F} = 36 \times 10^{21}\ \mathbf{N} = 36\ \mathbf{ZN}$$

Remarque : Cette valeur représente en quelque sorte le « poids » de la Terre. Ce résultat étant identique à celui calculé précédemment, cela signifie que les termes force de gravitation, force centripète et poids sont parfaitement synonymes, les phénomènes ainsi désignés étant des manifestations concrètes du principe d'*attraction universelle* énoncé par Isaac Newton.

3. Calcul de l'accélération gravitationnelle

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

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

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

Calculons l'accélération gravitationnelle que le Soleil exerce sur la Terre (masse de la Terre : 6×10^{24} kg ; force centripète exercée par le Soleil : 36×10^{21} N) :

$$\Upsilon = 36^{+1} \times 10^{+21} / (6^{+1} \times 10^{+24})$$

$$\Upsilon = 36^{+1} \times 6^{-1} \times 10^{(+21-24)}$$

$$\mathbf{\Upsilon} = 6 \times 10^{-3} = 0{,}006\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

4. Calcul de l'action réciproque

La force centripète s'exerce sur le centre de gravité du globe terrestre pour courber sa trajectoire et le maintenir en orbite, elle est due à l'attraction solaire.

Conformément au principe de réciprocité (troisième principe de Newton), le centre de gravité du globe terrestre exerce une force de même intensité (36 ZN) mais de sens opposé (signe –) sur le centre de gravité du Soleil, c'est l'*action réciproque*.

Calculons l'accélération gravitationnelle que cette action réciproque exerce sur le Soleil (action réciproque de la Terre : – 36 x 10^{21} N ; masse du Soleil : 2 x 10^{30} kg) :

$$\Upsilon = -36^{+1} \times 10^{+21} / (2^{+1} \times 10^{+30})$$

$$\Upsilon = -36^{+1} \times 10^{+21} \times 2^{-1} \times 10^{-30}$$

$$\Upsilon = -18 \times 10^{(+21-30)}$$

$$\boldsymbol{\Upsilon} = -18 \times 10^{-9} = -0{,}000\,000\,018\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

Calculons le rapport entre l'accélération terrestre exercée par le Soleil (6 x 10^{-3}) et l'accélération solaire exercée par la Terre (18 x 10^{-9}) :

$$6 \times 10^{-3} / (18 \times 10^{-9}) = 1/3 \times 10^{(-3+9)} = 1/3 \times 10^{6}$$

Calculons le rapport des deux masses (Soleil : 2 x 10^{30} kg ; Terre : 6 x 10^{24} kg) :

$$2 \times 10^{30} / (6 \times 10^{24}) = 1/3 \times 10^{(30-24)} = 1/3 \times 10^{6}$$

On constate que le rapport des deux accélérations correspond exactement au rapport des deux masses en interaction, conformément au deuxième principe de Newton.

5. Calcul de la force centrifuge

Raisonnons en *statique* et imaginons que la Terre soit immobile dans l'espace (sa vitesse orbitale étant nulle, elle cesserait donc de tourner autour du Soleil). Il faudrait alors disposer d'une force s'exerçant sur le centre de gravité du globe terrestre pour compenser l'attraction solaire (6 x 10^{-3} m.s^{-2}) et le maintenir ainsi en équilibre dans l'espace.

Cette force imaginaire, c'est la *force centrifuge*, on la calcule comme suit :

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

F' : force centrifuge, exprimée en **N**
M : masse de la Terre, exprimée en **kg**
Υ : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s^{-2}**

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

$$F' = -6^{+1} \times 10^{+24} \times 6^{+1} \times 10^{-3}$$

$$F' = -6^{+1} \times 6^{+1} \times 10^{(+24-3)}$$

$$\mathbf{F'} = -36 \times 10^{21}\ \mathbf{N} = -36\ \mathbf{ZN}$$

Remarque 1 : la traçabilité du raisonnement impose d'effectuer les différents calculs dans l'ordre indiqué. Il est en effet impossible de calculer directement la valeur de la force centrifuge sans passer par les étapes intermédiaires détaillées ci-dessus, sauf à se tromper de description et de concept.

Remarque 2 : le signe [–] est obligatoire, il précise l'orientation spatiale de cette force, supposée neutraliser l'attraction solaire.

Remarque 3 : cette force est couramment appelée ''*force centrifuge*'', ce qui est un qualificatif incorrect puisqu'il n'y a ni orbite, ni rayon orbital, ni centre à fuir (la Terre étant supposée immobile, elle cesse donc de tourner autour du Soleil). Le vrai nom de cette force est : force d'inertie, force apparente, force fictive, force imaginaire ou pseudo-force.

Remarque 4 : attention aux interprétations erronées, l'égalité numérique des résultats n'autorisant pas le mélange des descriptions, des raisonnements et des concepts. L'erreur la plus courante est de confondre la *force centrifuge* avec l'*action réciproque* que la Terre exerce sur le Soleil. En effet, bien que ces deux forces aient la même intensité (– 36 ZN), elles n'ont rien en commun :

- La *force centrifuge* est supposée s'exercer sur le centre de gravité du globe terrestre, c'est une force imaginaire, la description est *statique*.

- L'*action réciproque* s'exerce sur le centre de gravité du Soleil, c'est une force réelle, la description est *dynamique*.

Remarque 5 : toute démarche scientifique passe nécessairement par quatre étapes successives :

- *observation* d'un phénomène ;

- *mesures* de grandeurs ;

- *calculs* ;

- et, en dernier lieu seulement, *raisonnement* (ici : le concept de force centrifuge). Ce passage du concret à l'abstrait, du réel à l'imaginaire, de la dynamique à la statique a souvent été court-circuité, d'où les nombreuses confusions et méprises au sujet des forces centripète et centrifuge.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***

V. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN SATELLITE

1. Accélération gravitationnelle

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

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 :

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

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

2. Vitesse orbitale

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

V : vitesse orbitale du satellite, exprimée en $m.s^{-1}$
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 :

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

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

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

3. Force centripète

$$F = M . \gamma$$

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

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

CAS PARTICULIER D'UN SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE

4. Calcul du rayon orbital d'un satellite géostationnaire

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R = (G \,.\, M \,.\, T^2 \times 39{,}5^{-1})^{1/3}$$

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

$$R = (40 \times 7\,430 \times 39{,}5^{-1} \times 10^{-11} \times 10^{+24} \times 10^{+6})^{1/3}$$

$$R = (7\,520 \times 10^{19})^{1/3}$$

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

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

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

5. Calcul de la vitesse orbitale d'un satellite géostationnaire

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

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

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

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

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

6. Calcul de l'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 dite *radiale*, c'est-à-dire 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 sur une trajectoire rectiligne.

7. Calcul de la force centripète géostationnaire

$$F = M . \gamma$$

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 à cette altitude, le poids étant une force inversement proportionnelle 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, voit son poids ramené à 215 N lorsqu'il évolue à 42 200 km du centre de la Terre, sa masse restant évidemment inchangée (on néglige la masse du carburant brûlé).

8. Calcul de l'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 (troisième principe de Newton), une force de même intensité (215 N) mais de sens opposé (signe –) s'exerce sur le centre de gravité du globe terrestre. Calculons l'accélération que cette action réciproque exerce sur le globe terrestre (masse : 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 : $\boldsymbol{\gamma} = \text{kg.m.s}^{-2} . \text{kg}^{-1} = \mathbf{m.s^{-2}}$

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

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

Ce qui s'écrit :

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

On conçoit qu'une intensité aussi faible ne peut pas 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) :

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

Le rapport des deux accélérations correspond bien au rapport des deux masses en interaction, ce qui est parfaitement conforme au deuxième principe d'Isaac Newton.

9. Calcul de la force centrifuge

Raisonnons en *statique* et imaginons que la Terre cesse de tourner sur elle-même. Dans ce cas, ce satellite géostationnaire devrait lui aussi rester immobile dans l'espace, puisque telle est l'impression qu'il donne 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 équilibrer la force de gravitation (+ 215 N, voir calcul précédent) 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 :

- Ces deux forces sont bien égales mais ne s'exercent pas sur les mêmes masses (la *force centrifuge* s'exerce sur le satellite, l'*action réciproque* s'exerce sur le globe terrestre).

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

VI. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UNE AUTOMOBILE

1. Calcul de la force de pesanteur

$$F = G \cdot M_1 \cdot M_2 / D^2$$

F : force de pesanteur, exprimée en **N**
G : constante de Newton (**G** = 6,7 x 10^{-11} **$m^3.kg^{-1}.s^{-2}$**)
M_1 : masse 1, exprimée en **kg**
M_2 : masse 2, exprimée en **kg**
D : distance séparant les deux centres de gravité, exprimée en **m**

cohérence des unités :

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

$$\mathbf{F} = m^{+3} \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2} \cdot kg^{+2} \cdot m^{-2}$$

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

Calculons la force de pesanteur que la Terre exerce sur une voiture de masse 1 500 kg (1,5 x 10^3 kg). Masse de la Terre : 6 x 10^{24} kg ; rayon terrestre : 6 400 kilomètres (6,4 x 10^6 mètres) :

$$\mathbf{F} = 6{,}7^{+1} \times 10^{-11} \times 6^{+1} \times 10^{+24} \times 1{,}5 \times 10^{+3} \times (6{,}4^{+1} \times 10^{+6})^{-2}$$

$$\mathbf{F} = 6{,}7^{+1} \times 6^{+1} \times 1{,}5 \times 10^{-11} \times 10^{+24} \times 10^{+3} \times 6{,}4^{-2} \times 10^{-12}$$

$$\mathbf{F} = 6{,}7^{+1} \times 6^{+1} \times 1{,}5 \times 10^{-11} \times 10^{+24} \times 10^{+3} \times 41^{-1} \times 10^{-12}$$

$$\mathbf{F} = 6{,}7^{+1} \times 6^{+1} \times 1{,}5 \times 41^{-1} \times 10^{(-11+24+3-12)}$$

$$\mathbf{F} = 1{,}47 \times 10^{(-11+24+3-12)}$$

$$\mathbf{F} = 1{,}47 \times 10^{4}$$

$$\mathbf{F} = 14\,700\ \mathbf{N}$$

Cette force provient du centre de gravité de la Terre et s'exerce sur celui de la voiture pour la maintenir en contact avec le sol, c'est son poids, au sens physique du terme. On obtient un résultat identique en multipliant la masse de la voiture (1 500 kg) par l'accélération gravitationnelle terrestre (9,8 $m.s^{-2}$).

Noter l'analogie entre la relation utilisée ici et celle utilisée pour calculer la force de gravitation que délivre le Soleil pour maintenir la Terre en orbite. Les termes « poids », « force de pesanteur », « force de gravitation » et « force centripète » sont donc parfaitement synonymes.

2. Calcul de la force de guidage

$$F = M . V^2 / R$$

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

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

Exemple : calculons la force de guidage qui maintient une voiture de masse 1 500 kg circulant à la vitesse de 25 $m.s^{-1}$ sur une trajectoire de 200 mètres de rayon :

$$F = 1\,500 \times (20)^2 / 200$$

$$F = 1\,500 \times 400 / 200$$

$$F = 1\,500 \times 2$$

$$\mathbf{F} = 3\,000\ \mathbf{N}$$

Remarque : la force de guidage est une force de contact qui s'exerce à la périphérie des pneumatiques au contact du sol lorsque le conducteur actionne la commande de direction. Cette force a pour effet de courber la trajectoire de la voiture. Dès que cette force cesse d'agir, la voiture retrouve une trajectoire rectiligne. Le centre de gravité n'est pour rien dans le phénomène et il n'y a pas d'autre force mise en jeu dans ce système-ci, pas plus que dans n'importe quel autre.

3. Calcul de l'accélération transversale

$$\ddot{Y} = F / M$$

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

cohérence des unités : $\ddot{Y} = kg.m.s^{-2} . kg^{-1} = \mathbf{m.s^{-2}}$

Exemple : calculons l'accélération transversale qui s'exerce sur une voiture de masse 1 500 kg lorsque celle-ci décrit une trajectoire circulaire de 200 mètres de rayon à la vitesse de 20 $m.s^{-1}$:

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

Remarque : le centre de gravité de la voiture subit cette accélération mais reste toujours parfaitement étranger à son mécanisme.

4. Calcul de l'action réciproque

Conformément au principe de réciprocité d'Isaac Newton, la voiture exerce une action réciproque sur le globe terrestre, de même intensité que la force de guidage (3 000 N), mais de sens opposé (signe –), selon la relation :

$$A = -F$$

A : action réciproque, exprimée en **N**
F : force de guidage, exprimée en **N**

Calculons l'action réciproque que la voiture exerce sur le globe terrestre, lorsque la force de guidage est égale à 3 000 N :

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

Quel peut être l'effet d'une telle force sur le globe terrestre ? Pour le savoir, calculons le rapport des masses en interaction (masse de la Terre : 6×10^{24} kg ; masse de la voiture : $1{,}5 \times 10^{3}$ kg) :

$$R = 6 \times 10^{24} / 1{,}5 \times 10^{3} = 4 \times 10^{21}$$

Ce rapport est égal à 4 suivi de 21 zéros, ce qui, en développé, s'écrit :

4 000 000 000 000 000 000 000

Un rapport à l'avantage du globe terrestre, au détriment de la voiture. C'est pourquoi la rotation du globe terrestre n'est pas affectée par l'action réciproque de la voiture.

5. Calcul de la force centrifuge

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

F' : force centrifuge, exprimée en **N**
M : masse de la voiture, exprimée en **kg**
γ : accélération, exprimée en **$m.s^{-2}$**

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

Exemple : en reprenant les données déjà obtenues, calculons la force qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité de la voiture, si celle-ci était immobile (vitesse nulle), pour créer, sur les suspensions et les pneumatiques, une compression identique à celle subie dans la réalité :

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

Remarque 1 : la traçabilité du raisonnement impose d'effectuer les différents calculs dans l'ordre indiqué. Il est en effet impossible de calculer directement la valeur de la force centrifuge sans passer par les étapes intermédiaires détaillées ci-dessus, sauf à se tromper de description et de concept.

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

Remarque 3 : cette force est couramment appelée ''*force centrifuge*'' ce qui est un qualificatif incorrect puisqu'il n'y a ni vitesse, ni rayon de trajectoire, ni centre (la voiture est immobile). Le vrai nom de cette force est : force d'inertie, force apparente, force fictive, force imaginaire ou pseudo-force.

Remarque 4 : attention aux interprétations erronées, l'égalité numérique des résultats n'autorisant pas le mélange des descriptions, des concepts ou des raisonnements. L'erreur la plus courante est de confondre la *force centrifuge*, qui s'exerce sur la voiture, avec l'*action réciproque* que la voiture exerce sur le globe terrestre. En effet, bien que ces deux forces aient la même intensité (– 3 000 N), elles n'ont rien en commun :

- La *force centrifuge* provient d'une main mystérieuse, elle est supposée s'exercer sur le centre de gravité de la voiture ; c'est une force imaginaire, la voiture est immobile, la description est *statique*.

- L'*action réciproque* provient de la voiture, elle s'exerce à la surface du globe terrestre par l'intermédiaire des pneumatiques ; c'est une force réelle, la voiture est en mouvement, la description est *dynamique*.

Rappelons que le centre de gravité de la voiture est un point virtuel qui n'est le siège d'aucune interaction, exceptée gravitationnelle. Concrètement, cela signifie qu'il est impossible d'y exercer la moindre force.

Remarque 5 : toute démarche scientifique passe nécessairement par quatre étapes successives :

- *observation* d'un phénomène ;

- *mesures* de grandeurs ;

- *calculs* ;

- et, en dernier lieu, *raisonnement* (ici : le concept de force centrifuge). Ce passage du concret à l'abstrait, du réel à l'imaginaire, de la dynamique à la statique a souvent été court-circuité, d'où les nombreuses méprises au sujet de la force centrifuge.

Cette dernière étape, facultative, n'apporte rien, si ce n'est un risque de confusion.

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

VII. BIBLIOGRAPHIE

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

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

- MITTON (Simon) et AUDOUZE (Jean) : *Encyclopédie d'Astronomie de Cambridge* (traduction française du texte original), Éditions du Fanal, Paris 1980.

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

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***