

LA FORCE CENTRIPÈTE

I. LES LOIS DE NEWTON

II. FORCE CENTRIPÈTE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

III. MOUVEMENT CIRCULAIRE DE LA TERRE

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

IV. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE

1. Calcul du rayon orbital
2. Calcul de la vitesse orbitale
3. Calcul de l'accélération gravitationnelle
4. Calcul de la force centripète
5. Calcul de l'action réciproque
6. Calcul de la force centrifuge

V. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UNE AUTOMOBILE

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

VI. BIBLIOGRAPHIE

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. LES LOIS DE NEWTON

Les lois générales du mouvement ont été découvertes et formulées par le mathématicien et physicien anglais Isaac Newton (1642 - 1727).

Ces lois sont universelles et permettent de décrire n'importe quelle forme de mouvement, elles s'énoncent ainsi :

Principe d'inertie

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

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

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

Le concept de force découle de ce principe.

Concept de force

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

Principe de réciprocité

« Toute masse 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 le mouvement d'une masse, et comment définir le concept de force centripète ?

II. FORCE CENTRIPÈTE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

Rappel

Le *principe d'inertie* d'Isaac Newton appliqué au mouvement, énonce qu'en l'absence de force, la trajectoire rectiligne est la règle.

Une 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 de courber la trajectoire d'une masse. »

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

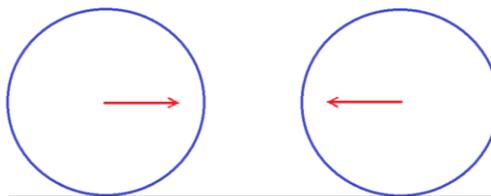
Définition

« Centripète » signifie à la fois « qui émane d'un centre » et « qui agit sur un centre », d'où cette définition :

« On appelle force centripète la force qui agit à distance sur le centre de gravité d'une masse pour courber sa trajectoire. »

Le concept de force centripète découle du *principe d'attraction universelle* d'Isaac Newton, qui postule 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⁽¹⁾.

Remarque : dans notre environnement, cette attraction est trop faible pour déplacer des objets, d'une part parce qu'elle est en partie neutralisée par les autres masses à proximité, d'autre part à cause du puissant champ de pesanteur qui émane du globe terrestre.



© association adilca reproduction interdite

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.

Attraction universelle et force centripète

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

1. La pesanteur résulte de l'attraction qui s'exerce à distance entre deux centres de gravité, phénomène à l'origine de la chute des corps.

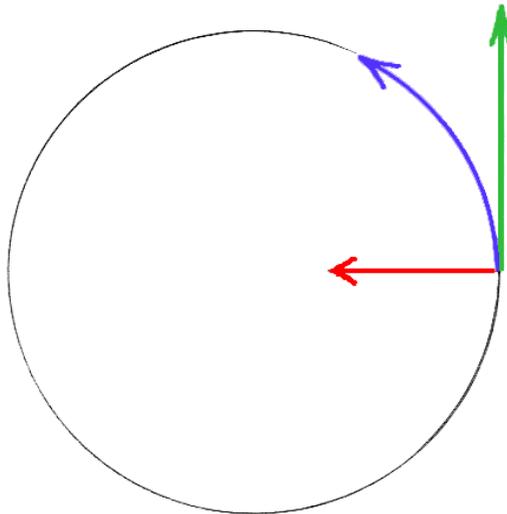
Exemple : un objet quelconque lancé en l'air finit par retomber au sol à cause de l'attraction exercée par le globe terrestre. À proximité du sol, cette force est désignée par le terme de *poids*⁽²⁾.

2. La gravitation résulte de l'attraction qui s'exerce à distance entre deux centres de gravité, phénomène à l'origine du mouvement circulaire des planètes⁽³⁾.

Exemple : le Soleil exerce une attraction qui courbe la trajectoire de la Terre. Cette attraction est appelée *force de gravitation* ou *force centripète*.

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 immédiatement la direction du Soleil pour venir s'y fondre, comme un caillou qui tombe dans l'eau.



© association adilca reproduction interdite

Représentation schématique de la rotation de la Terre autour du Soleil

La Terre décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) à cause de la force centripète qui émane du Soleil (flèche rouge). Si cette force cessait d'agir, la Terre adopterait une trajectoire rectiligne (flèche verte). Inversement, privé de vitesse, le globe terrestre chuterait en direction du Soleil. Bien distinguer les vecteurs force, vitesse et trajectoire !

Force centripète et force centrifuge : la confusion

On présente souvent la force centripète et la force centrifuge comme deux forces indissociables, égales et opposées, agissant de concert sur la même masse ⁽⁴⁾. C'est absurde car, si tel était le cas, ces deux forces se neutraliseraient. D'où vient la confusion ?

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 ⁽⁵⁾.

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

- Dans une *description 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 statique*, la Terre est immobile. La force centrifuge est une force imaginaire destinée à neutraliser le poids de la Terre : c'est la force qu'il faudrait exercer sur le 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 et la force centrifuge 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 300 000 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⁽⁶⁾.

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

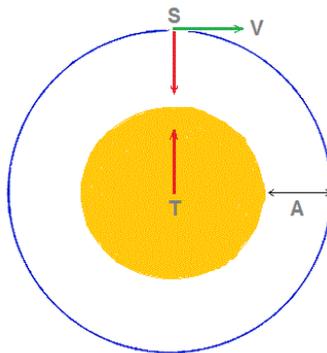
- La *force centrifuge* est une force imaginaire, c'est la force qu'il faudrait exercer sur le globe terrestre pour compenser l'attraction solaire et le maintenir en équilibre dans l'espace, si la Terre cessait de tourner autour du Soleil.
- L'*action réciproque* est une force réelle, c'est la force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

En bref : la force centrifuge et l'action réciproque n'appartiennent pas à la même description !

Force centripète : l'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 sa trajectoire circulaire.



© association adilca reproduction interdite

Satellite et force centripète

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 provient du globe terrestre **T**. La flèche rouge orientée vers le haut représente l'action réciproque que la masse du satellite exerce sur le centre de gravité du globe terrestre.

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.

Plus délicat est le lancement d'un satellite géostationnaire. 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 sa vitesse doit être 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⁽⁷⁾.

Force centripète et automobile

Le phénomène de gravitation d'un satellite se résume donc à l'action de la force centripète qui émane du centre de gravité du globe terrestre et qui agit sur celui de l'engin pour courber sa trajectoire.

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

1. Comme c'est le cas pour un satellite, 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⁽⁸⁾.

2. Comme c'est le cas pour un satellite, 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. De toute évidence, ce n'est jamais le cas non plus⁽⁹⁾.

Le raisonnement est sans appel :

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

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

La force de guidage

En réalité, ce n'est évidemment pas la force centripète qui préside aux trajectoires circulaires d'une automobile, mais la *force de guidage*, cette force mystérieuse que tout conducteur sollicite, sans le savoir, des millions de fois au cours de sa vie d'automobiliste.

En automobile, la force de guidage est la force transversale qui s'exerce sur les pneumatiques des roues directrices au contact du sol lorsque le conducteur actionne la commande de direction, tout simplement (voir le dossier ADILCA "*force de guidage*").

Il n'y a pas d'autre phénomène à considérer dans cette description.

Trois différences fondamentales

Résumons point par point les caractéristiques de la force de guidage :

1. La voiture n'est jamais, ni tirée, ni poussée vers le centre de sa trajectoire, elle ne tend nullement vers ce point, 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* n'est pas de nature centripète. C.Q.F.D.

Conclusion

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 !

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

Notes et remarques

(1) Le centre de gravité, ou centre de masse, ou centre d'équilibre, se définit comme le point d'application de la résultante de toutes les 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.

(2) 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 qui s'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. Contrairement au poids, la masse est une grandeur scalaire puisqu'elle est indépendante du lieu considéré et dépourvue d'orientation spatiale. Dans tous les calculs de physique et conformément au Système International d'Unités (en abrégé : **SI**), la masse doit s'exprimer en kilogrammes (symbole **kg**), et le poids en newtons (symbole **N**). Du point de vue de la combinaison des grandeurs et pour garantir la cohérence des unités, le poids est le simple produit de la masse par l'accélération gravitationnelle du lieu considéré ($\mathbf{N} = \mathbf{kg} \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-2}$).

(3) C'est pourquoi les appellations « force centripète », « force de gravitation » 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 de gravitation (voir dossier ADILCA "centrifugeuse").

(4) Du strict point de vue de la sémantique, les adjectifs centripète et centrifuge sont de parfaits antonymes, utilisés comme tels par exemple en sociologie pour qualifier les motivations qui poussent des individus, ou des 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 l'inverse de la force centripète.

(5) 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".

(6) 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 2^{ème} principe de Newton). Comparons les masses : Soleil (S) = 2×10^{30} kg ; Terre (T) = 6×10^{24} kg. Le rapport S/T est donc égal à $1/3 \times 10^6$. C'est pourquoi la Terre est un satellite du Soleil et non l'inverse. Plus généralement, c'est l'inégalité des masses qui permet de faire la distinction entre force et action réciproque.

(7) 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 $11\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, de sorte que son déplacement angulaire soit parfaitement identique à celui du globe terrestre (6,28 rad en 23 h et 56 min). Pour l'arracher à la pesanteur terrestre, le satellite doit être lancé verticalement, puis dirigé vers l'est (sens de rotation de la Terre), afin de bénéficier de la vitesse circonférentielle du globe terrestre (nulle aux pôles, celle-ci est d'environ $1\,700 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ à l'équateur). Une fois parvenu dans l'espace, le satellite n'est plus freiné par la présence d'atmosphère, il peut alors conserver sa vitesse indéfiniment. Néanmoins, son orbite peut varier de plusieurs dizaines de kilomètres lors de la traversée de divers champs gravitationnels, comme par exemple 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.

(8) 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.

(9) 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, ou centre de masse, 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 directement la moindre force.

III. MOUVEMENT CIRCULAIRE DE LA TERRE

1. Force de gravitation

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

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

G : constante de Newton ($G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

M₁ : masse 1, exprimée en **kg**

M₂ : masse 2, exprimée en **kg**

D : distance séparant les deux centres de masse, exprimée en **m**

cohérence des unités :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Force centripète

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

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 : $F = \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}) = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

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.

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

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

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

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

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. Accélération gravitationnelle

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

Y : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s⁻²**

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

M : masse, exprimée en **kg**

cohérence des unités : **Y** = kg.m.s⁻² . kg⁻¹ = **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) :

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

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

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

4. 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 : -36×10^{21} N ; masse du Soleil : 2×10^{30} kg) :

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

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

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

$$Y = -18 \times 10^{-9} = -0,000\ 000\ 018 \text{ m.s}^{-2}$$

Calculons le rapport entre cette accélération et celle que le Soleil exerce sur la Terre ($6 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-2}$) :

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

Calculons le rapport des deux masses (Soleil : 2×10^{30} kg ; Terre : 6×10^{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 au rapport des deux masses en interaction, conformément au deuxième principe d'Isaac Newton.

5. Force centrifuge

Raisonnons en *statique* et imaginons que la Terre soit immobile dans l'espace (sa vitesse orbitale étant nulle, elle cesserait 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 ($6 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-2}$) et le maintenir en équilibre dans l'espace.

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

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

F' : force centrifuge, exprimée en **N**

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

Y : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s⁻²**

cohérence des unités : **F'** = kg . m.s⁻² = **N**

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

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

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

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 est supposée immobile, elle cesse 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

* * *

IV. A. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN SATELLITE

1. Accélération gravitationnelle

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

Y : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en **m.s⁻²**

G : constante de Newton (**G** = 6,7 x 10⁻¹¹ **m³.kg⁻¹.s⁻²**)

M : masse de la Terre, exprimée en **kg** (**M** = 6 x 10²⁴ **kg**)

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

V : vitesse orbitale du satellite, exprimée en **m.s⁻¹**

cohérence des unités :

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

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

2. Vitesse orbitale

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

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**)

Y : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s⁻²**

cohérence des unités :

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

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

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

3. 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⁻²**

cohérence des unités : **F** = kg . m.s⁻² = **N**

IV. B. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE

1. Rayon orbital d'un satellite géostationnaire

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Vitesse orbitale d'un satellite géostationnaire

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

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

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

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

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

3. Accélération gravitationnelle géostationnaire

$$Y = V^2 / R$$

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

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

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

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.

4. Force centripète géostationnaire

$$F = M \cdot Y$$

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

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

Cette force correspond au poids du satellite, 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 ($g \sim 10 \text{ m.s}^{-2}$) au moment du décollage (on néglige la masse de carburant), voit son poids ramené à 215 N lorsqu'il évolue à $42\ 200 \text{ km}$ du centre de la Terre.

5. Action réciproque

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

Conformément au principe de réciprocité (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 du globe terrestre (masse = $6 \times 10^{24} \text{ kg}$) :

$$Y = -F / M$$

Y : 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

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

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

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

Ce qui s'écrit :

$$- 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 036 \text{ m.s}^{-2}$$

On conçoit qu'une intensité aussi faible ne peut pas perturber la trajectoire du globe terrestre.

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

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

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

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

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

6. Force centrifuge

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

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

- Bien que d'intensité égale, ces deux forces ne s'exercent pas au même point (l'*action réciproque* s'exerce sur le centre de gravité du globe terrestre, la *force centrifuge* s'exerce sur celui du satellite).
- Ces deux forces n'appartiennent pas à la même description : l'une est bien réelle, elle est dite *dynamique*, l'autre étant parfaitement imaginaire (elle est dite *statique*).

V. MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UNE AUTOMOBILE

1. Force de guidage

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

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 : $F = \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}) = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

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 :

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

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

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

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

Remarque : la force de guidage est une force de contact, elle s'exerce à la périphérie des pneumatiques au contact du sol, elle a pour effet de courber la trajectoire de la voiture. Dès que cette force cesse d'agir, la voiture retrouve une trajectoire rectiligne. Il n'y a pas d'autre force mise en jeu dans ce système-ci, pas plus que dans n'importe quel autre.

2. Accélération transversale

$$Y = F / M$$

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 : $Y = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

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 :

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

Remarque : le centre de gravité de la voiture reste toujours parfaitement étranger à tous ces phénomènes.

3. Action réciproque

Conformément au principe de réciprocité d'Isaac Newton, la voiture exerce une action réciproque à la périphérie du 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 :

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

Remarque : en raison du rapport des masses en interaction, la rotation du globe terrestre n'est pas affectée par l'action réciproque de la voiture.

Calculons ce rapport : Terre = 6×10^{24} kg ; voiture = $1,5 \times 10^3$ kg ; rapport = 4×10^{21}

Autrement dit, un rapport de 4 suivi de 21 zéros, ce qui s'écrit :

4 000 000 000 000 000 000 000

Un rapport à l'avantage du globe terrestre, au détriment de la voiture.

4. Force centrifuge

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

F' : force centrifuge, exprimée en **N**

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

Y : accélération, exprimée en **m.s⁻²**

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

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* 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* est supposée s'exercer sur le centre de gravité de la voiture, c'est une force imaginaire, la description est *statique*.
- L'*action réciproque* s'exerce à la surface du globe terrestre, c'est une force réelle, 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 confusions et méprises au sujet de la force centrifuge.

Cette dernière étape, facultative, n'apporte rien sinon un risque de confusion.

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

VI. BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA (ouvrage collectif édité à compte d'auteurs) : *Guide des Lois Physiques de l'Automobile*, Paris 2010.
- 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

* * *