

LA FORCE CENTRIPÈTE

I. LES LOIS DE NEWTON

II. FORCE CENTRIPÈTE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

III. FORCE CENTRIPÈTE : LE MODE DE CALCUL

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

IV. BIBLIOGRAPHIE

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. LES LOIS DE NEWTON

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

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

Principe d'inertie

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

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

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

Le concept de force découle de ce principe.

Concept de force

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

Principe de réciprocité

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

Comment ces lois 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 circulaire, énonce que le déplacement en ligne droite est la règle, une masse en mouvement ne pouvant être déviée d'une trajectoire rectiligne que par l'action d'une force. Le concept de force découle du principe précédent et se définit ainsi :

« Une force désigne toute cause capable de dévier la trajectoire d'une masse. »

En langage courant, centripète peut signifier “*qui rapproche d'un centre*” ou “*qui attire un centre*”. De quels centres s'agit-il et où doit-on les situer ?

Les deux centres

1. S'agissant d'une masse décrivant une trajectoire circulaire, le centre en question est, bien sûr, celui du *cercle* que décrit cette masse.

Remarque : dans le cas du virage en automobile, l'action d'une force qualifiée de *centripète* devrait, selon cette définition, émaner du centre de la trajectoire (quelque part dans l'herbe, ou au milieu des rochers, ou dans le vide...) et se traduire par une décroissance continue de la longueur du rayon jusqu'à la valeur zéro, la voiture décrivant alors une trajectoire en forme de spirale menant à ce fameux centre. De toute évidence, ce n'est jamais le cas.

2. Dans une autre acception qui dépasse le cadre du mouvement circulaire, le centre en question est le *centre d'équilibre*, également appelé *centre de gravité*, point virtuel très utile pour la description de certains phénomènes. Ainsi par exemple, le phénomène de pesanteur se résume à une attraction qui s'exerce sur un centre de gravité. Cette attraction suppose l'existence d'une cause située à distance.

Remarque : dans le cas du virage en automobile, une force qualifiée de *centripète* devrait s'exercer sur le centre de gravité de la voiture (quelque part au milieu de l'habitacle...). De toute évidence, ce n'est jamais le cas : aucune force ne s'exerce directement sur le centre de gravité de quelque véhicule que ce soit, excepté le poids⁽¹⁾.

Force centripète : la véritable définition

Quelle est la définition exacte et précise de ce concept que les physiciens nomment *force centripète* ?

Reportons-nous au texte même rédigé par Isaac Newton et publié à Londres en 1687 (« *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* ») :

« *Vis centripeta est qua corpus versus punctum aliquod tanquam ad centrum trahitur, impellitur, vel utcunq; tendit.* »

Voici la traduction d'Émilie de Breteuil ⁽²⁾, extraite d'un ouvrage publié à Paris en 1759 (« *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* ») :

« *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.* »

Plus simplement, cette définition peut se reformuler ainsi :

« *On appelle force centripète, toute force qui agit à distance pour rapprocher deux masses.* »

Les deux forces centripètes

L'observation montre qu'il n'existe que deux forces qui répondent à cette définition : la *force électromagnétique* et la *force de gravitation*.

1. La force électromagnétique : elle est à l'origine des réactions chimiques. Cette force agit à distance en permettant à un atome lourd de capturer un ou plusieurs atomes plus légers pour constituer une molécule.

Ainsi par exemple, lorsque des atomes d'oxygène et d'hydrogène se trouvent à proximité les uns des autres, chaque atome d'oxygène attire et capture deux atomes d'hydrogène pour former une molécule d'eau.

2. La force de gravitation : elle est à l'origine du phénomène d'*attraction universelle*. Cette force agit à distance en exerçant une attirance mutuelle entre deux masses.

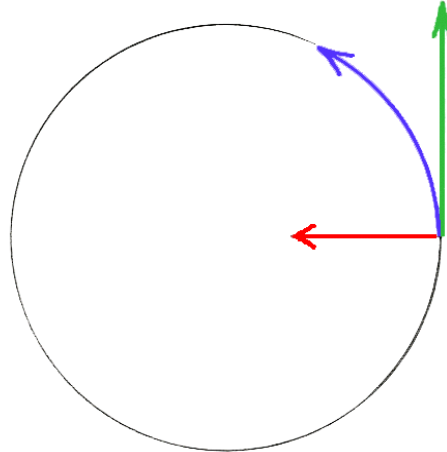
On peut le vérifier facilement, par exemple en lançant un caillou en l'air : le caillou est progressivement dévié de sa trajectoire initiale par une force qui l'attire vers le centre de la Terre ⁽³⁾. À proximité du sol, cette force est communément désignée sous le terme de *poids*.

De la même manière, la force de gravitation est à l'origine du mouvement circulaire des planètes. Ainsi s'explique la rotation de la Terre autour du Soleil : le Soleil délivre une force qui maintient la Terre en orbite.

On en déduit que :

- Si la force de gravitation n'existait pas, la Terre quitterait le système solaire.

- Si la vitesse orbitale de la Terre était nulle, le globe terrestre prendrait immédiatement la direction du Soleil pour venir s'y fondre, justifiant ainsi le nom de *force centripète* donné à la force de gravitation⁽⁴⁾.



© 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 exercée par le Soleil (flèche rouge). Si cette force n'existait pas, la Terre quitterait le système solaire sur une trajectoire rectiligne (flèche verte). Ne pas mélanger les vecteurs force, vitesse et trajectoire !

Exprimer la force centripète

La force centripète s'exprime grâce à la relation découverte par Isaac Newton pour décrire la rotation de la Lune autour de la Terre, puis celle de la Terre autour du Soleil :

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

Remarque : cette relation exprime uniquement la *force centripète* ou, par analogie de raisonnement, la *force de guidage*, mais certainement pas la force centrifuge (voir les dossiers ADILCA "*force centrifuge*" et "*force de guidage*").

Force centripète et force centrifuge : les deux confusions

On présente souvent la force centripète et la force centrifuge comme deux forces opposées mais indissociables. Ce raisonnement simpliste repose sur deux confusions, voici lesquelles.

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. De quoi s'agit-il ?

Dans ce genre de description, dite "*statique*", il faut imaginer que la Terre cesse de tourner autour du Soleil et reste immobile dans l'espace. Soumise à l'attraction solaire, la Terre 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 force centripète est une *force réelle* qui agit seule : c'est la force qui émane du Soleil pour maintenir le globe terrestre en orbite sur une trajectoire circulaire.
- Dans une *description statique*, la force centrifuge est une *force imaginaire* destinée à neutraliser la force de gravitation : 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 deuxième confusion provient de la mauvaise compréhension du troisième principe de Newton, le fameux principe de réciprocité :

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

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

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 et qui maintient le globe terrestre sur une trajectoire circulaire. Cette force, c'est la *force centripète*, elle s'exerce sur le centre d'équilibre de la Terre.

Le principe de réciprocité énoncé par Newton permet de déduire que le globe terrestre attire également le Soleil, avec une force de même intensité. Cette force, c'est l'*action réciproque*, elle s'exerce sur le centre d'équilibre du Soleil.

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, puisque telle est l'une des lois de la Nature⁽⁶⁾...

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

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

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

Trois différences fondamentales

Revenons sur Terre : la *force de guidage*, cette force mystérieuse qui permet de conserver la maîtrise de la trajectoire d'un véhicule terrestre, cette force que tout conducteur sollicite des millions de fois au cours de sa vie d'automobiliste (voir le dossier ADILCA "*force de guidage*"), peut-elle être qualifiée de *force centripète* ?

Examinons 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, c'est une banale force de contact.

3. La *force de guidage* ne s'exerce pas sur le centre d'équilibre 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

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

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

Notes et remarques

(1) *La masse est une quantité de matière. Le poids est une force. Le poids qui s'exerce sur une masse est, par convention, la résultante de toutes les forces de gravitation qui s'exercent séparément sur chacun des différents atomes qui composent cette masse. Le centre d'équilibre, couramment appelé centre de gravité, est le point d'application de cette résultante.*

(2) *Émilie de Breteuil (1706-1749), de son nom complet : Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil, marquise du Chastellet, femme de lettres, érudite et polyglotte, mathématicienne et physicienne française. Sa traduction intégrale de l'œuvre d'Isaac Newton, publiée en 1759 à titre posthume, fait autorité encore aujourd'hui.*

(3) *L'Univers se définit comme l'espace dans lequel se répartit la matière, et toute matière engendre une attraction. Une masse lancée à très grande vitesse (dite vitesse de libération) peut ne jamais retomber au sol. Il n'en reste pas moins que sa trajectoire sera affectée par cette attraction, d'où qu'elle provienne et aussi faible soit-elle. La vitesse de libération à la surface de la Terre est d'environ $40\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.*

(4) *Le concept de force centripète est utilisé abusivement pour décrire n'importe quel mouvement circulaire alors qu'il devrait être réservé au seul phénomène de gravitation (voir dossier ADILCA "centrifugeuse et mouvement circulaire").*

(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) *La force centripète et l'action réciproque sont égales mais leurs effets ne le sont pas : ceux-ci sont inversement proportionnels à la masse sur laquelle elles s'exercent (c'est le 2^{ème} principe de dynamique énoncé par Isaac Newton, voir dossier ADILCA "Issac Newton"). Comparons les masses : Soleil (S) = $2 \times 10^{30}\text{ kg}$; Terre (T) = $6 \times 10^{24}\text{ kg}$. 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. Un raisonnement identique s'applique si on compare la masse d'un véhicule terrestre avec celle de la Terre.*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

III. FORCE CENTRIPÈTE : LE MODE DE CALCUL

1. Calcul de la force centripète

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

R : rayon orbital, 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 centripète qui maintient la Terre en orbite autour du Soleil. Caractéristiques de la Terre et de son mouvement : masse 6×10^{24} kg ; vitesse orbitale $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($30 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ; rayon orbital $150 \times 10^6 \text{ km}$ ($150 \times 10^9 \text{ m}$).

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

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

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

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

Remarque : une seule force suffit pour expliquer la rotation de la Terre autour du Soleil, c'est la force centripète, autrement dit, l'attraction solaire. Cette force s'exerce sur le centre d'équilibre du globe terrestre, ce qui a pour effet de courber sa trajectoire. Il n'y a pas d'autre force mise en jeu dans ce système-ci, pas plus que dans n'importe quel autre.

2. Calcul de l'action réciproque

Conformément au principe de réciprocité d'Isaac Newton, la Terre exerce une action réciproque sur le centre d'équilibre du Soleil, de même intensité que la force centripète qui la maintient en orbite, mais de sens opposé, selon la relation :

$$A = - F$$

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

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

Exemple : calculons l'action réciproque que la Terre exerce sur le Soleil, la force centripète qui maintient le globe terrestre en orbite étant de 36 ZN :

$$A = - 36 \text{ ZN}$$

Le Soleil n'est pas affecté par cette attraction en raison de sa masse.

3. Calcul de l'accélération gravitationnelle :

$$Y = F / M$$

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

Exemple 1 : calculons l'accélération gravitationnelle que le Soleil exerce sur la Terre pour lui imposer une trajectoire circulaire. Caractéristiques de la Terre : masse 6×10^{24} kg ; force centripète exercée par le Soleil 36×10^{21} N.

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

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

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

Exemple 2 : conformément au principe de réciprocité, calculons l'accélération gravitationnelle que la Terre exerce sur le Soleil. Caractéristiques du Soleil : masse 2×10^{30} kg ; action réciproque exercée par la Terre – 36×10^{21} N.

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

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

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

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

Remarque : cette accélération est environ 333 000 fois plus faible que celle qui s'exerce sur la Terre, ce qui, en accord avec le deuxième principe d'Isaac Newton, correspond parfaitement au rapport des deux masses en interaction.

4. Calcul de la force centrifuge :

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

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

Exemple : calculons la force qu'il faudrait exercer sur le centre d'équilibre de la Terre, si celle-ci était immobile (vitesse orbitale nulle), pour compenser l'attraction du Soleil et la maintenir en équilibre dans l'espace :

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

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

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

Remarque 1 : cette force est couramment appelée “*force centrifuge*” ce qui est un qualificatif incorrect puisqu’il n’y a ni vitesse, ni rayon orbital, ni centre (la Terre est immobile et reste en équilibre dans l’espace). Le vrai nom de cette force est : force imaginaire, force fictive, ou pseudo-force.

Remarque 2 : le signe [-] est obligatoire, il précise l’orientation spatiale de cette force, supposée équilibrer l’attraction solaire.

Remarque 3 : 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 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 d’équilibre de la Terre, c’est une force imaginaire, la description est *statique*.
- L’*action réciproque* s’exerce sur le centre d’équilibre du Soleil, c’est une force réelle, la description est *dynamique*.

Remarque 4 : la traçabilité du raisonnement impose d’effectuer les calculs dans l’ordre indiqué. Il est en effet impossible de calculer la force centrifuge sans passer par les étapes intermédiaires détaillées ci-dessus, sauf à se tromper de description et de concept.

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 a souvent été court-circuité, d’où les nombreuses confusions et méprises au sujet de la force centrifuge.

IV. 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*, Éditions du Fanal, Paris 1980.

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

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *