

CENTRIFUGEUSE, FORCES CENTRIFUGE ET CENTRIPÈTE

I. LES LOIS DE NEWTON

II. FORCES CENTRIFUGE ET CENTRIPÈTE

III. LE MOUVEMENT DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL

IV. LE MOUVEMENT DE LA CENTRIFUGEUSE

(mouvement de l'eau et du linge)

V. LE MOUVEMENT D'UNE BILLE AUTOUR D'UN AXE

(mouvement d'une bille suspendue par un fil et entraînée par un axe en rotation)

VI. CONCLUSION GÉNÉRALE

VII. LE MOUVEMENT DE LA TERRE : LE MODE DE CALCUL

(force centrifuge *versus* force centripète)

VIII. LE MOUVEMENT DE LA CENTRIFUGEUSE : LE MODE DE CALCUL

IX. LE MOUVEMENT DE LA BILLE : LE MODE DE CALCUL

(force centrifuge *versus* composante horizontale)

X. 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.

S'agissant d'un mouvement circulaire, ces lois s'énoncent ainsi :

Principe d'inertie rectiligne

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

Concept de force

« Une force désigne toute cause capable d'accélérer une masse, ou capable de courber sa trajectoire. »

Principe de réciprocité

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

Principe d'attraction universelle

« Toutes les masses s'attirent mutuellement. »

Ces lois suffisent pour décrire n'importe quel mouvement circulaire :

- Mouvement de la Terre autour du Soleil.
- Mouvement d'une centrifugeuse.
- Mouvement d'une bille qui tourne autour d'un axe.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

II. FORCES CENTRIFUGE ET CENTRIPÈTE

Des lois universelles

Les lois du mouvement, découvertes et formulées par le physicien anglais Isaac Newton, sont des lois *universelles* : elles s'appliquent de la même façon à l'équilibre du système solaire, à la centrifugeuse, à la bille qui tourne autour d'un axe, ou à n'importe quel autre phénomène, c'est là tout le génie d'Isaac Newton de l'avoir découvert.

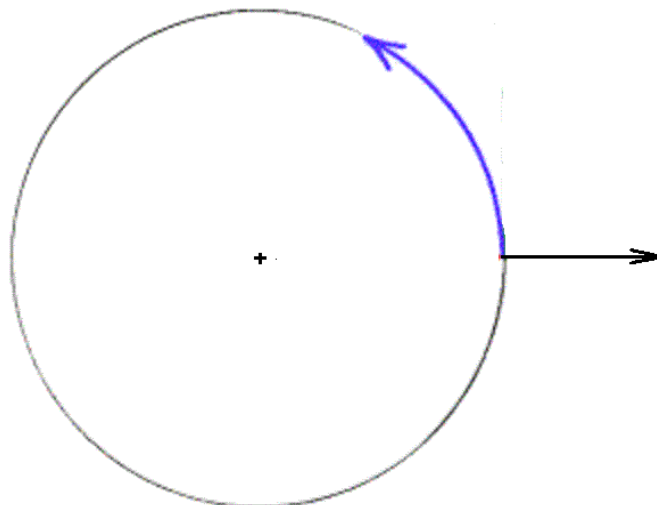
La première loi de Newton, c'est le principe d'inertie rectiligne qui énonce que la trajectoire naturelle d'un corps en mouvement est de nature rectiligne. Cette trajectoire ne peut être déviée que par l'action d'une force.

Le concept de force découle du principe précédent : une force désigne toute cause capable d'accélérer une masse (mouvement rectiligne) ou de courber sa trajectoire (mouvement circulaire). Une force peut agir à distance ou par contact.

La force centrifuge

Quelles sont les caractéristiques d'une force dite *centrifuge* ? Centrifuge signifie "*qui éloigne du centre*", autrement dit, "*qui fuit le centre*".

Une force qualifiée de centrifuge devrait donc pouvoir accélérer une masse sur une trajectoire radiale, dans la direction indiquée par le prolongement d'un rayon.



© association adilca reproduction interdite

La force centrifuge

Lorsqu'une masse décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue), une force qualifiée de centrifuge devrait agir dans la direction indiquée par le prolongement d'un rayon (flèche noire). Un mouvement jamais observé.

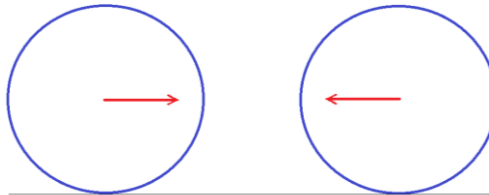
La force centripète

Quelles sont les caractéristiques d'une force dite *centripète* ? Centripète signifie à la fois "qui émane d'un centre" et "qui agit sur un centre".

« La force centripète désigne 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.

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.

L'étude détaillée des différentes formes de mouvements circulaires (mouvement de la Terre autour du Soleil, mouvement de la centrifugeuse, mouvement d'une bille qui tourne autour d'un axe, etc.) va aboutir à ce constat : il existe un principe d'inertie rectiligne, il existe une force centripète mais il n'existe pas de force centrifuge.

ASSOCIATION ADILCA

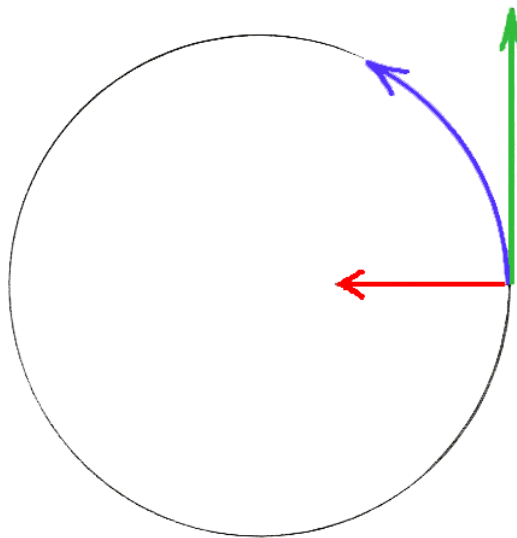
www.adilca.com

* * *

III. LE MOUVEMENT DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL

Appliquons le principe d'inertie rectiligne d'Isaac Newton à l'étude du mouvement de la Terre. Notre planète tourne autour du Soleil à la vitesse de 30 kilomètres par seconde sur une trajectoire circulaire de 150 millions de kilomètres de rayon. Cette trajectoire n'étant pas rectiligne, elle est due à l'action d'une force

Cette force qui maintient la Terre en orbite, c'est la force centripète, elle provient de la masse du Soleil, elle agit à distance sur le centre de gravité du globe terrestre pour courber sa trajectoire.



© association adilca reproduction interdite

Représentation schématique du mouvement de la Terre

La Terre décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) à cause de la force centripète qui émane du Soleil (flèche rouge). Si cette force cessait brusquement d'agir, la Terre adopterait immédiatement une trajectoire rectiligne (flèche verte). Inversement, privé de vitesse, le globe terrestre serait avalé par le Soleil. Dans cette description, il y a une force centripète mais pas de force centrifuge. Attention, pas de mélange entre force, vitesse et trajectoire !

Modifier les lois de l'Univers...

Imaginons que les lois de l'Univers soient complètement modifiées. Que se passerait-il si la Terre avait une vitesse nulle ou cessait brusquement d'obéir à l'attraction du Soleil ?

- Dépourvue de vitesse mais soumise à la force centripète, la Terre prendrait immédiatement la direction du Soleil pour venir s'y fondre, comme un caillou qui tombe dans l'eau^(*).

- Insensible à l'attraction du Soleil, donc libérée de toute force, la Terre livrée à elle-même conserverait sa vitesse mais quitterait le système solaire sur une trajectoire rectiligne perpendiculaire au rayon de son orbite initiale (**).

Insistons sur ce point : si la Terre devait s'éloigner du Soleil, ce serait en l'absence de force centripète et non pas à cause d'une quelconque force centrifuge.

Le troisième principe de Newton

Le principe de réciprocité d'Isaac Newton 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 du système solaire ? Le Soleil attire le centre de gravité de la Terre, la Terre attire donc le centre de gravité du Soleil, avec une force de même intensité mais de sens opposé, c'est l'*action réciproque*, un phénomène qui n'a strictement rien à voir avec le concept de force centrifuge.

Pourquoi la Terre seule infléchit-elle sa trajectoire ? L'effet d'une force est inversement proportionnel à la masse sur laquelle elle s'exerce, c'est encore un autre principe d'Isaac Newton. La Terre étant 330 000 fois moins massique que le Soleil, elle ne peut que subir son influence (***) .

Conclusion

En conclusion : la force centripète existe, mais pas la force centrifuge.

(*) Dans cette hypothèse, le "voyage" durerait une soixantaine de jours. L'accélération, très faible au départ (quelques millimètres par seconde carrée seulement), augmenterait sans cesse jusqu'à atteindre la valeur de 275 m.s^{-2} à proximité du Soleil. Bien avant cela, le rayonnement solaire, toujours plus intense, aurait très vite anéanti toute forme de vie à la surface de la Terre.

(**) L'espace étant caractérisé par l'absence d'atmosphère, la Terre ne serait pas « freinée » par la résistance de l'air, elle conserverait donc cette vitesse indéfiniment et finirait par quitter le système solaire au bout d'une dizaine d'années. Privé de la lumière et de la chaleur du Soleil, le globe terrestre se refroidirait progressivement jusqu'à rendre toute vie impossible.

(***) C'est le principe fondamental de la dynamique qui s'applique ainsi : $[F = M Y]$ d'où $[Y = F / M]$. Masse du Soleil (S) : $2 \times 10^{30} \text{ kg}$; masse de la Terre (T) : $6 \times 10^{24} \text{ kg}$; rapport S / T : $0,33 \times 10^6$.

IV. LE MOUVEMENT D'UNE CENTRIFUGEUSE

Tout le monde connaît le principe de la centrifugeuse qui trouve son application dans le lave-linge ou l'essoreuse de la maison. La centrifugeuse prouve-t-elle l'existence de la force centrifuge ?

Comment fonctionne une centrifugeuse ?

Une centrifugeuse se compose d'un moteur électrique et d'un tambour, sorte de cylindre creux dont la surface est percée d'orifices destinés à laisser passer l'eau. Une fois entraîné par le moteur électrique, le tambour est animé d'un mouvement de rotation.

Dès qu'il se met à tourner, le tambour entraîne le linge mouillé placé à l'intérieur, l'obligeant ainsi à décrire une trajectoire circulaire.

Conformément au principe d'inertie rectiligne d'Isaac Newton, le linge en mouvement devrait adopter une trajectoire rectiligne. S'il décrit une trajectoire circulaire, c'est parce qu'il est soumis en permanence à la *force de contact* exercée par le tambour.

À noter que cette force de contact est la seule force supplémentaire introduite dans le système quand celui-ci se met à tourner (on néglige la résistance de l'air).

Cette force est orientée vers l'axe de rotation du tambour, elle agit sur le linge par contact (d'où son nom) et non à distance sur son centre de gravité, elle ne peut donc pas être qualifiée de *centripète* (voir dossier ADILCA "*force centripète*").

Aucune force centripète ou centrifuge n'agit donc sur le linge, à quelque moment que ce soit.

L'évacuation de l'eau

De quelle manière l'eau quitte-t-elle le tambour ? Le linge, poreux par nature, ne peut retenir les molécules d'eau qui vont le traverser et venir au contact du tambour.

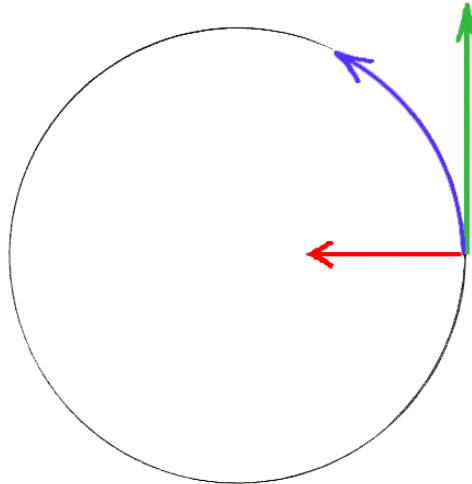
On a déjà dit que le tambour est un cylindre percé d'orifices. À leur hauteur, la *force de contact* du tambour n'agit plus, les molécules d'eau sont donc livrées à elles-mêmes, elles conservent leur vitesse tout en s'échappant sur une trajectoire rectiligne perpendiculaire au rayon du tambour.

Pour être précis, la trajectoire des molécules d'eau livrées à elles-mêmes n'est parfaitement rectiligne qu'au moment précis où celles-ci quittent le tambour, cette

trajectoire étant ensuite influencée par l'action combinée de deux forces : la résistance de l'air et la force de gravitation.

Par conséquent, si l'eau quitte le tambour c'est par défaut de force de contact, et non pas à cause de la force centrifuge.

Aucune force centripète ou centrifuge n'agit donc sur les molécules d'eau à quelque moment que ce soit, pas plus à l'intérieur du tambour qu'à l'extérieur.



© association adilca reproduction interdite

Principe de la centrifugeuse

Le linge mouillé décrit un cercle (flèche bleue) grâce à la force de contact exercée par le tambour (flèche rouge). Libérée de cette force, l'eau conserve sa vitesse mais adopte immédiatement une trajectoire rectiligne perpendiculaire au rayon du tambour (flèche verte). Il n'y a ni force centripète, ni force centrifuge. Attention à ne pas confondre les vecteurs force, vitesse et trajectoire !

Conclusion

La centrifugeuse existe, mais pas la force centrifuge !

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

V. LE MOUVEMENT D'UNE BILLE AUTOUR D'UN AXE

Quelques “pseudo-physiciens” ⁽¹⁾, sans doute soucieux de venir au secours du concept de force centrifuge, ont cru pouvoir prouver l'existence d'une force imaginaire en décrivant le mouvement de rotation d'une bille autour d'un axe...

Le recours abusif au concept de force centrifuge relève de la manipulation ou de l'incompétence. En effet, la force centrifuge étant une force imaginaire, il est évidemment impossible d'utiliser ce concept pour la description de quelque mouvement circulaire que ce soit : centrifugeuse, bille retenue par un fil, manège de fête foraine, véhicule, planète, etc. Si on n'y parvient pas, c'est qu'il y a un « loup » quelque part.

Description du dispositif

Imaginons un dispositif composé d'un moteur électrique entraînant un axe vertical avec, à l'extrémité de l'axe, un fil retenant une bille. Au repos, une seule force agit sur la bille, c'est son poids. La bille reste immobile car son poids est compensé par la tension du fil. Le système est donc en équilibre.

Le système en rotation

Mettons le moteur en marche. Dès que le système se met à tourner, la condition d'équilibre n'est plus respectée. Négligeons la phase d'accélération ⁽²⁾ et observons le dispositif lorsque la vitesse de rotation est stabilisée : la bille s'est éloignée de l'axe, elle décrit une trajectoire circulaire dans un plan horizontal, tandis que le fil qui la retient forme un angle par rapport à la verticale.

Les forces en présence

Selon le principe d'inertie rectiligne d'Isaac Newton, la bille en mouvement devrait décrire une trajectoire rectiligne. Si elle ne le fait pas, c'est parce qu'elle est soumise en permanence à une force qui lui impose cette trajectoire circulaire.

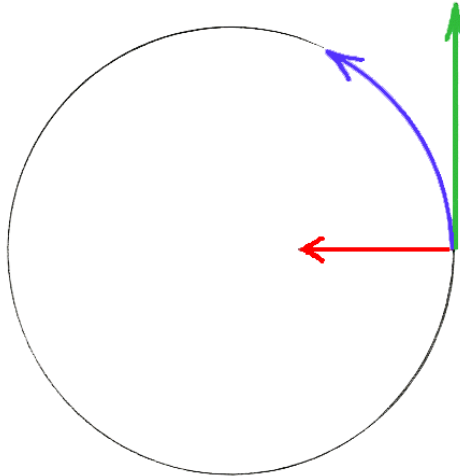
La force en question est une *force de contact*, c'est la composante horizontale de la force de traction qui s'exerce sur la bille par l'intermédiaire du fil. Bien qu'orientée vers l'axe de rotation, cette composante n'est pas *centripète* pour autant ⁽³⁾.

Notons au passage que, contrairement à une erreur largement répandue, le système n'est plus en équilibre, sinon comment expliquer le mouvement circulaire ?

En effet, à la différence de la situation observée au repos, l'équilibre est rompu puisqu'il y a désormais deux forces qui interviennent dans le système : l'une est verticale, c'est la force de sustentation de la bille, d'intensité égale et opposée à son poids ; l'autre

est horizontale, c'est la composante qui maintient la bille en rotation. La tension du fil est égale à la résultante (autrement dit : à la somme vectorielle) de ces deux forces⁽⁴⁾.

La description est complète ainsi ! La seule force qui explique le mouvement de rotation est une banale force de contact ! Il n'y a pas besoin de rajouter quoi que ce soit d'autre : il n'y a ni force centripète, ni force centrifuge.



© association adilca reproduction interdite

Bille qui tourne autour d'un axe (dispositif vu de dessus)

La bille décrit un cercle (flèche bleue) grâce à la composante horizontale (flèche rouge) de la force de contact délivrée par l'axe de rotation et transmise par le fil (l'axe et le fil n'apparaissent pas sur le dessin). Si le fil casse, la bille livrée à elle-même conserve sa vitesse mais adopte immédiatement une trajectoire rectiligne tangente au cercle initial (flèche verte), comme l'eau de la centrifugeuse et comme le ferait la Terre si elle était libérée de l'attraction solaire. Ne pas mélanger force, vitesse et trajectoire !

Calcul de la composante horizontale

Quelle relation doit-on utiliser pour calculer l'intensité de cette composante ? Celle-ci et uniquement celle-ci, à partir de grandeurs réelles mesurées pendant l'expérience :

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{V}^2 / \mathbf{R}$$

Pour garantir la validité de la relation, la masse **M** de la bille doit s'exprimer en kilogrammes (symbole **kg**). La vitesse **V** de la bille, calculée à partir de la circonférence du cercle décrit par la bille et du nombre de tours effectués en un laps de temps donné, doit s'exprimer en mètres par seconde (symbole **m.s⁻¹**). Le rayon **R** de la trajectoire de la bille doit s'exprimer en mètres (symbole **m**).

Le résultat s'exprime alors en newtons (symbole **N**). La cohérence des unités se vérifie ainsi :

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

Le troisième principe de Newton

Le principe de réciprocité d'Isaac Newton, souvent ignoré ou mal compris, énonce que toute force qui s'exerce sur une masse entraîne une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé.

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas du dispositif ci-dessus ? De manière très simple et très logique : puisque l'axe entraîne la bille par l'intermédiaire du fil, la réciproque est vraie : la bille exerce une traction sur le fil, et donc sur l'axe. L'intensité de cette traction est égale à la somme vectorielle du poids de la bille et de la composante horizontale qui lui impose une trajectoire circulaire.

Si la bille conserve son mouvement de rotation tandis que l'axe reste insensible à cette traction, c'est soit parce que l'axe et le moteur forment une masse considérablement plus lourde que la bille, soit parce que le dispositif est solidement fixé à la Terre⁽⁵⁾.

On conçoit d'ailleurs que, si tel n'était pas le cas, l'axe et son moteur seraient entraînés et renversés par le mouvement de la bille.

Une description "statique"

Imaginons maintenant le même dispositif avec cette fois un observateur privé de repères extérieurs, placé sur l'axe et tournant en même temps que lui. Cet observateur n'aurait alors plus aucune perception du mouvement de rotation, cela l'obligerait à raisonner en statique, autrement dit, à raisonner comme si la bille cessait de tourner...

Raisonnement débile ? Pas du tout ! L'humanité a raisonné ainsi pendant des siècles, jusqu'à l'avènement de Copernic, Galilée et Newton. En effet, le raisonnement de l'époque consistait à décrire le mouvement du Soleil et des planètes en partant du postulat que la Terre était immobile.

Le plus surprenant, c'est que ce mode de raisonnement perdure encore aujourd'hui. Pour faire sérieux, on l'a affublé de qualificatifs dont on oublie généralement de préciser le sens et la portée : on dit qu'on raisonne dans le cadre d'un *référentiel relatif, non-inertiel* ou *non-galiléen*, etc. Bref, il suffirait de préciser qu'on raisonne en *statique*, ça reviendrait strictement au même !

Quant au mode d'emploi, attention danger ! Nous militons pour une mise en garde systématique qui permettrait de distinguer les descriptions et donc d'interdire les mélanges contre nature. En effet, un raisonnement est dit "*statique*" par opposition à un raisonnement "*dynamique*", c'est l'un ou l'autre, mais pas les deux en même temps (voir dossier ADILCA "*statique & dynamique*").

Si on raisonne en statique, qu'est-ce que ça change ? Le mouvement disparaît, la bille est immobile, comme sur une photographie. Dès lors, comment expliquer l'angle que forme le fil avec la verticale ? C'est là qu'intervient la *force centrifuge*, la mal nommée : pour maintenir la bille en équilibre et expliquer l'angle que forme le fil avec la verticale, il

faut imaginer une force fictive s'exerçant horizontalement sur le centre de gravité de la bille, mais orientée dans une direction opposée à celle de l'axe. Cette force, c'est la force centrifuge. Une force qui porte mal son nom puisque, l'axe et la bille étant immobiles, il n'y a plus de trajectoire circulaire, donc plus de centre⁽⁶⁾.

Ajoutons qu'ici, le troisième principe de Newton est rigoureusement inapplicable : il n'y a pas d'interaction lorsqu'il s'agit d'une force imaginaire.

Calcul de la force centrifuge

Quelle relation doit-on utiliser pour calculer l'intensité de la force centrifuge ? Celle-ci et uniquement celle-ci, à partir des seules grandeurs disponibles en statique :

$$\mathbf{F}' = - \mathbf{P} \cdot \text{tangente } \alpha$$

Pour garantir la validité de la relation, le poids \mathbf{P} de la bille doit s'exprimer en newtons (symbole \mathbf{N}). L'angle α d'inclinaison du fil par rapport à la verticale, mesuré à partir d'une photographie (le mouvement est absent puisqu'on raisonne en statique), peut s'exprimer indifféremment en degrés ou en radians. La tangente trigonométrique de l'angle α est le rapport \mathbf{F}' / \mathbf{P} . Le signe $[-]$ permet de préciser l'orientation spatiale de cette force, contraire à la logique du mouvement. Le résultat s'exprime alors en newtons (symbole \mathbf{N}). La cohérence des unités se vérifie ainsi (les grandeurs trigonométriques n'ont pas de dimension) :

$$\mathbf{F}' = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \mathbf{N}$$

Égalité = danger !

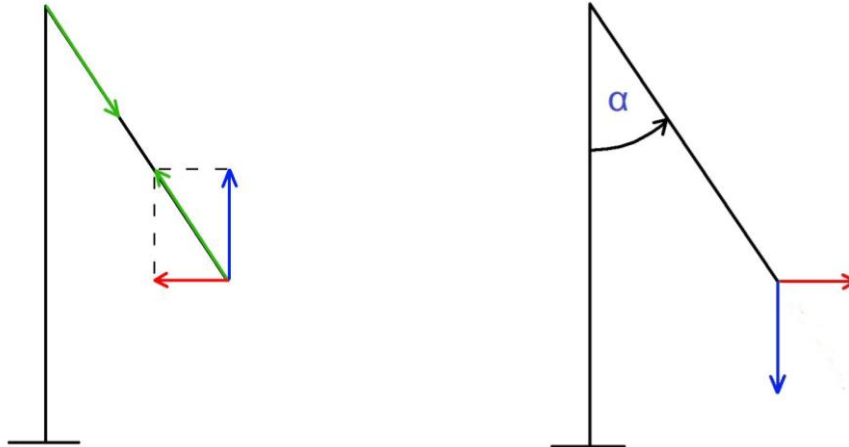
Une application numérique de ces deux relations donne un résultat surprenant : toutes conditions égales par ailleurs, on constate que la composante horizontale en dynamique et la force centrifuge en statique ont rigoureusement la même intensité !

Cependant, il ne faut rien en conclure de plus, puisque ces deux forces n'appartiennent pas à la même description. De fait, tout les distingue, tout les oppose :

- Le mouvement : l'une de ces deux forces s'exerce sur une bille en mouvement, l'autre s'exerce sur une bille immobile.
- Le point d'application : l'une s'exerce par contact sur un point situé à la surface de la bille, l'autre s'exerce sur son centre de gravité.
- L'origine du mouvement : l'une est le résultat de l'interaction de l'axe sur le fil et du fil sur la bille, l'autre relève de la pensée magique.
- L'orientation : l'une fait face à l'axe de rotation, l'autre lui tourne le dos. D'ailleurs, pour éviter toute confusion, une bonne précaution consiste à affubler la force centrifuge d'un signe négatif afin d'en préciser la direction.

Deux dessins pour comprendre...

Les deux descriptions précédentes portent chacune un nom : l'une est *dynamique*, l'autre est *statique*. Voici deux dessins pour les distinguer :



© association adilca reproduction interdite

Dessin de gauche : c'est la *description dynamique* de la rotation d'une bille autour d'un axe, en vue horizontale.

- La flèche bleue représente la force de sustentation qui s'exerce sur la bille. Égale et opposée au poids, cette force maintient la bille en équilibre vertical.

- La flèche rouge représente la composante horizontale de la force de traction qui s'exerce sur la bille. Cette composante maintient la bille sur une trajectoire circulaire.

- Il y a deux flèches vertes égales et opposées : l'une représente la force de traction que l'axe exerce sur la bille par l'intermédiaire du fil ; l'autre représente l'action réciproque que la bille exerce sur l'axe par l'intermédiaire du fil.

Dessin de droite : c'est la *description statique* du phénomène, autrement dit : le mouvement a disparu, l'axe ne tourne plus, la bille est immobile dans l'espace. Le fil forme un angle par rapport à la verticale, comme par magie. Le dessin est complet ainsi.

- La flèche bleue représente le poids de la bille.

- La flèche rouge représente la force centrifuge.

- Attention : pas d'action réciproque sur l'axe, ni d'addition vectorielle possible entre une force réelle (ici, le poids de la bille), et une force imaginaire (ici, la force centrifuge).

Conclusion

Rien de mystérieux ni de magique dans le mouvement d'une bille qui tourne autour d'un axe.

L'axe est entraîné par un moteur électrique, c'est la force électromagnétique qui est à l'œuvre, comme pour le tambour de la centrifugeuse.

Ensuite, tout s'explique par la force de contact que l'axe exerce sur la bille par l'intermédiaire du fil :

- Au repos, le fil est tendu verticalement pour équilibrer la force de gravitation que le globe terrestre exerce sur la bille.
- Une fois que l'axe se met à tourner, la bille prend de la vitesse et décrit une trajectoire circulaire grâce à la force de contact délivrée par le fil.

Il n'y a pas de force centripète, et pas de force centrifuge non plus.

(1) *“Pseudos-physiciens” : ainsi nomme-t-on, par dérision, les physiciens incapables de raisonner sans recourir à des pseudo-forces.*

(2) *Durant la phase d'accélération, le travail du moteur consiste à communiquer une énergie cinétique correspondant à la vitesse acquise par la bille (on néglige la masse du fil et la résistance de l'air), à laquelle il faut ajouter l'énergie gravitationnelle correspondant à la différence de hauteur entre la position de la bille au repos et sa position une fois la vitesse de rotation stabilisée.*

(3) *La force centripète désigne l'attraction mutuelle qui s'exerce à distance entre deux centres de gravité (voir dossier ADILCA “force centripète”). Un concept qui n'a rien à faire ici : la force qui s'exerce sur la bille n'agit pas à distance mais par contact, elle ne s'exerce pas sur le centre de gravité de la bille mais au point d'attache du fil. Enfin, la bille n'est évidemment pas attirée par l'axe de rotation, elle ne s'en rapproche jamais ; au contraire même, elle s'en éloigne dès que l'axe se met à tourner.*

(4) *Un vecteur est une représentation graphique d'une force ou d'une accélération. Lorsque deux vecteurs forment un angle droit, leur somme (résultante) est égale à la racine carrée de la somme de leurs carrés, c'est une application concrète du théorème de Pythagore sur les propriétés des triangles rectangles. Ici, on néglige la masse du fil ; dans le cas d'un manège de fête foraine, il faudrait évidemment prendre en compte la masse du bras porteur.*

(5) *Ce qui revient à dire qu'en dernière analyse, les forces réelles sont toutes le résultat d'une interaction avec la Terre.*

(6) *Le nom correct de cette force est : force d'inertie, force fictive, force imaginaire, force apparente ou pseudo-force, tous ces qualificatifs étant synonymes. Les forces d'inertie n'existent pas en dynamique, elles n'interviennent qu'en statique, une construction intellectuelle que l'on doit à Jean Le Rond d'Alembert, mathématicien et physicien français (1717-1783). Voir le dossier ADILCA “force d'inertie”.*

VI. CONCLUSION GÉNÉRALE

La force centripète est une force réelle qui agit à distance pour courber la trajectoire d'une masse. Ce concept permet d'expliquer le mouvement de rotation des planètes, comme par exemple celui de la Terre autour du Soleil.

Tous les autres mouvements de rotation, comme par exemple celui de la centrifugeuse ou celui d'une bille qui tourne autour d'un axe, ne s'expliquent que par l'action d'une force de contact, un concept qui n'a strictement aucun rapport avec celui de force centripète.

Quant à la force centrifuge, il s'agit d'une force imaginaire supposée s'exercer sur le centre de gravité d'une masse immobile. Ce concept n'intervient qu'en *statique*, à condition de figer le mouvement réel, il permet d'expliquer l'*équilibre apparent* d'un système considéré comme immobile.

Le concept de force centrifuge n'a sa place dans aucune description de quelque mouvement circulaire que ce soit, qu'il s'agisse de gravitation, de centrifugeuse ou de bille qui tourne autour d'un axe.

Attention à bien identifier le type de mouvement, la nature et le point d'application de chacune des forces mises en jeu, à ne pas confondre le réel et l'imaginaire, à ne pas mélanger les descriptions dynamique et statique.

D'une manière plus générale, il faut se méfier des descriptions simplistes, des formules au mode d'emploi incertain et des calculs aux résultats identiques, ils n'autorisent pas pour autant l'interchangeabilité des concepts et des raisonnements.

Par exemple, la célèbre formule magique $F = MV^2/R$ n'est valable qu'en dynamique, elle ne peut donc exprimer qu'une force réelle, pas une force imaginaire.

Enfin, n'hésitez pas à remettre en question les certitudes, les démonstrations ou les dessins de vos professeurs, aussi sympathiques, compétents ou convaincants soient-ils. Des recherches ont en effet démontré que les meilleurs d'entre eux ont pu (involontairement) vous induire en erreur (voir dossier ADILCA "*manuels scolaires de physique*").

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

VII. MOUVEMENT DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL : LE MODE DE CALCUL

A. Description dynamique

La Terre est en mouvement, elle tourne autour du Soleil.

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, exprimée en **m.s⁻¹**

R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

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

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 $150 \times 10^6 \text{ km}$ ($150 \times 10^9 \text{ m}$).

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

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

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

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

Remarque 1 : il suffit d'une force et d'une seule pour expliquer le mouvement de rotation de la Terre autour du Soleil, c'est la force centripète. Cette force s'exerce sur le centre de gravité de la Terre, elle est orientée vers le centre du Soleil. Il n'y a pas d'autre force mise en jeu dans le système solaire.

Remarque 2 : conformément au principe de réciprocité d'Isaac Newton, une force de même intensité mais de sens opposé s'exerce sur le centre de gravité du Soleil, mais sans conséquence quant à son mouvement propre, du fait de sa masse.

2. Calcul de l'accélération transversale :

$$Y = F / M$$

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

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

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

$$Y = 36^{+1} \times 6^{-1} \times 10^{(+21-24)} = 6 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-2}$$

Conformément au principe de réciprocité, calculons l'accélération que la Terre exerce sur le Soleil :

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

$$Y = 36^{-1} \times 2^{-1} \times 10^{(+21-30)} = 18 \times 10^{(-9)} \text{ m.s}^{-2}$$

C'est pourquoi le Soleil reste insensible à l'attraction de la Terre.

B. Description statique

La Terre cesse de tourner autour du Soleil, elle est immobile dans l'espace.

Calcul de la force centrifuge :

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

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

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

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

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

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

Remarque 1 : le signe [-] est obligatoire, il précise l'orientation spatiale de cette force, contraire à la logique du mouvement dans le système solaire.

Remarque 2 : cette force est couramment appelée "force centrifuge" ce qui est un qualificatif incorrect puisqu'il n'y a ni vitesse orbitale, ni rayon orbital, ni centre (la Terre est immobile). Le nom scientifique de cette force est : force d'inertie, force fictive, force imaginaire, force apparente ou pseudo-force.

VIII. MOUVEMENT D'UNE CENTRIFUGEUSE : LE MODE DE CALCUL

Prenons comme exemple une machine à laver munie d'un tambour de 0,25 mètre de rayon, la vitesse d'essorage étant de 1 200 tours par minute (20 tours par seconde).

1. Calcul de la vitesse circonférentielle du tambour :

$$V = 2 \pi \cdot R \cdot \omega$$

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

π : constante caractéristique du cercle, égale à **3,14** (sans dimension)

R : rayon du tambour, exprimé en **m**

ω : vitesse de rotation, exprimée en **tr.s⁻¹**

cohérence des unités : **V = m . s⁻¹ = m.s⁻¹**

$$V = 2 \times 3,14 \times 0,25 \times 20 = 31,4 \text{ m.s}^{-1} = \text{environ } 110 \text{ km.h}^{-1}$$

Cette vitesse est également appelée vitesse tangentielle (parce que tangente au cercle décrit), c'est la *vitesse linéaire* des gouttes d'eau au moment où celles-ci quittent le tambour. Précisons qu'en l'absence d'atmosphère, de gravitation et d'obstacle, les gouttes d'eau conserveraient indéfiniment cette vitesse et une trajectoire rectiligne.

2. Calcul de l'accélération transversale subie par le linge :

$$Y = V^2 / R$$

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

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

R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

cohérence des unités : **Y = (m.s⁻¹)² . m⁻¹ = (m².s⁻² . m⁻¹) = m.s⁻²**

$$Y = 31,4^2 / 0,25 = 986 / 0,25 = 4\,000 \text{ m.s}^{-2} = \text{environ } 400 \text{ "g"}$$

Cette accélération transversale est orientée vers l'axe de rotation du tambour, elle maintient le linge sur une trajectoire circulaire, elle provient de la *force de contact* que le tambour exerce sur le linge.

En vertu du principe de réciprocité d'Isaac Newton, le linge exerce une action réciproque sur les parois du tambour, d'intensité égale à celle de la force de contact, mais de sens opposé. Il n'y a ni force centrifuge, ni force centripète.

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

IX. MOUVEMENT D'UNE BILLE AUTOUR D'UN AXE : LE MODE DE CALCUL

A. Description dynamique

Une bille de masse 100 grammes (0,1 kg) pesant 1 N (accélération gravitationnelle "g" = 10 m.s⁻²) est suspendue par un fil et tourne autour d'un axe en décrivant une trajectoire circulaire de 0,25 mètre de rayon à la vitesse de 1 tour par seconde.

1. Calcul de la vitesse circonférentielle de la bille :

$$V = 2 \pi \cdot R \cdot \omega$$

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

π : constante caractéristique du cercle, sans dimension, égale à **3,14**

R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

ω : vitesse de rotation, exprimée en **tr.s⁻¹**

cohérence des unités : **V** = m . s⁻¹ = **m.s⁻¹**

$$V = 2 \times 3,14 \times 0,25 \times 1 = 1,57 \text{ m.s}^{-1}$$

2. Calcul de la composante horizontale :

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

F : composante horizontale, exprimée en **N**

M : masse, exprimée en **kg**

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

R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

cohérence des unités : **F** = kg . (m.s⁻¹)² . m⁻¹ = kg . (m².s⁻² . m⁻¹) = kg.m.s⁻² = **N**

$$F = 0,1 \times 1,57^2 / 0,25 = 0,1 \times 2,465 / 0,25 = 0,986 \text{ N}$$

3. Calcul de la tension du fil (*) :

$$T = [P^2 + F^2]^{1/2}$$

T : tension du fil, exprimée en **N**

P : poids de la bille, exprimé en **N**

F : composante horizontale, exprimée en **N**

cohérence des unités : **T** = [(kg.m.s⁻²)²]^{1/2} = [kg².m².s⁻⁴]^{1/2} = kg.m.s⁻² = **N**

$$T = [1^2 + 0,986^2]^{1/2} = [1 + 0,972]^{1/2} = 1,972^{1/2} = 1,4 \text{ N}$$

B. Description statique

La photographie d'une bille de masse 100 grammes (0,1 kg) en rotation autour d'un axe montre que le fil qui retient la bille forme un angle de 44,6 degrés par rapport à la verticale (accélération gravitationnelle "g" = 10 m.s⁻²).

Le mouvement étant figé, la bille est immobile, il faut donc imaginer une force horizontale qui s'exerce sur son centre de gravité pour la maintenir en équilibre dans cette position.

Cette force imaginaire, c'est la *force centrifuge*, qu'on appellera ainsi faute de mieux (la bille étant immobile, elle ne « fuit » pas ; de plus, il n'y a ni cercle, ni rayon, ni centre).

Calcul de la force centrifuge :

$$F' = - M \cdot g \cdot \text{tangente } \alpha = - P \cdot \text{tangente } \alpha$$

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

P : poids, exprimé en **N**

α : angle d'inclinaison du fil par rapport à la verticale.

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

$$F' = - 0,1 \times 10 \times \text{tangente } 44,6^\circ = - 1 \times 0,986 = - 0,986 \text{ N}$$

Remarques : la tangente trigonométrique de l'angle **α** est le rapport **F' / P**, c'est une grandeur sans dimension ; le signe [-] est déterminant, il rappelle que l'orientation spatiale de la force centrifuge est contraire à la logique du mouvement.

Enfin, soulignons que, dans le cadre de cette description, ce calcul est le seul possible. En effet, la bille étant immobile, il est interdit d'évoquer le rayon de sa trajectoire, pas plus que sa vitesse. Telles sont les règles de la statique.

(*) *La tension du fil est la résultante du poids et de la composante horizontale, elle est égale à la somme vectorielle de ces deux forces (flèche verte sur le dessin de gauche, page 11). La somme vectorielle se calcule à partir du triangle rectangle formé par translation d'un des deux vecteurs (sans modifier sa longueur ni son orientation), d'après les propriétés des triangles rectangles découvertes par Pythagore, philosophe et mathématicien grec du cinquième siècle avant notre ère. Le théorème de Pythagore énonce que, dans un triangle rectangle, le carré de l'hypoténuse (tel est le nom donné au grand côté d'un triangle rectangle) est égal à la somme des carrés des deux autres côtés. Autrement dit, dans un triangle rectangle, la longueur de l'hypoténuse est égale à la racine carrée de la somme des carrés des deux autres côtés, telle est la relation utilisée ici. Le rapport entre le côté opposé et le côté adjacent de l'angle non droit d'un triangle rectangle est appelé tangente trigonométrique de cet angle.*

X. BIBLIOGRAPHIE

- LE ROND D'ALEMBERT (Jean) : *Traité de dynamique*, Paris 1743.

- 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

* * *