

## **DESCRIPTION DE DIVERS MOUVEMENTS DE ROTATION :**

### **1. LA CENTRIFUGEUSE**

**(mouvement de l'eau et du linge)**

### **2. LA TERRE QUI TOURNE AUTOUR DU SOLEIL**

### **3. LA BILLE QUI TOURNE AUTOUR D'UN AXE**

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

### **4. APPLICATION NUMÉRIQUE**

**(force centrifuge *versus* force centripète)**

## 1. LA CENTRIFUGEUSE

Tout le monde connaît le principe de la centrifugeuse qui trouve son application dans le lave-linge ou l'essoreuse de la maison. Centrifugeuse vient de centrifuge qui signifie "*qui éloigne du centre*". La centrifugeuse prouve-t-elle l'existence de la force centrifuge ? C'est ce que nous allons voir...

### Un principe fondamental...

Un des principes fondamentaux de la physique (c'est la première loi de Newton, voir le dossier ADILCA "*Isaac Newton*") énonce que la trajectoire normale d'un corps en mouvement est de nature rectiligne.

Cette trajectoire naturelle ne peut être déviée que par une force transversale. La notion de force découle du principe précédent : une force désigne toute cause capable de dévier la trajectoire d'une masse. On distingue deux types de forces correspondant à cette définition : la force centripète qui agit à distance (voir dossier ADILCA "*force centripète*"), et les forces qui agissent par pression ou par contact.

Ces lois sont le fondement de la physique moderne, elles ont été découvertes et formulées par le physicien anglais Isaac Newton en 1666.

### Comment fonctionne une centrifugeuse ?

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

Dans son mouvement de rotation, le tambour entraîne le linge mouillé placé à l'intérieur, l'obligeant ainsi à décrire une trajectoire circulaire.

Conformément à la loi de 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 une force de contact exercée par le tambour.

Cette force est orientée vers l'axe de rotation du tambour, c'est la seule force supplémentaire introduite dans le système quand celui-ci se met à tourner (on néglige la résistance de l'air). Aucune force de nature centripète ou centrifuge n'agit donc sur le linge, à quelque moment que ce soit.

### L'évacuation de l'eau

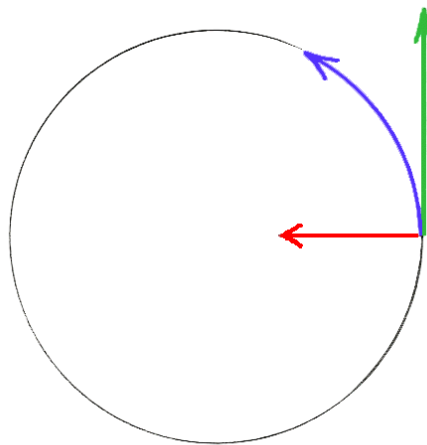
De quelle manière l'eau quitte-t-elle le tambour ?

Le linge, poreux par nature, ne peut communiquer une force suffisante aux molécules d'eau qui vont donc le traverser et se retrouver au contact du tambour.

On a déjà dit que le tambour est un cylindre percé d'orifices. À la hauteur de ces orifices, il n'y a plus de force de contact, les molécules d'eau quittent donc le tambour sur une trajectoire rectiligne tangente au rayon.

Par conséquent, si l'eau quitte le tambour c'est par défaut de force de contact et pas à cause de la force centrifuge. D'ailleurs, aucune force de nature centripète ou centrifuge n'agit sur les molécules d'eau à quelque moment que ce soit, pas plus à l'intérieur du tambour qu'à l'extérieur.

Pour être précis, la trajectoire des molécules d'eau livrées à elles-mêmes n'est parfaitement rectiligne qu'au moment précis où elles quittent le tambour, cette trajectoire étant ensuite progressivement influencée par l'action combinée de deux forces : la force de gravitation et la résistance de l'air.



© association adilca reproduction interdite

#### Principe de la centrifugeuse

Le linge mouillé décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) grâce à la force de contact (flèche rouge) exercée par le tambour. L'eau quitte le tambour sur une trajectoire rectiligne tangente au rayon (flèche verte). Attention à ne pas additionner les vecteurs force et trajectoire !

#### **Conclusion**

En conclusion : la centrifugeuse existe, mais pas la force centrifuge !

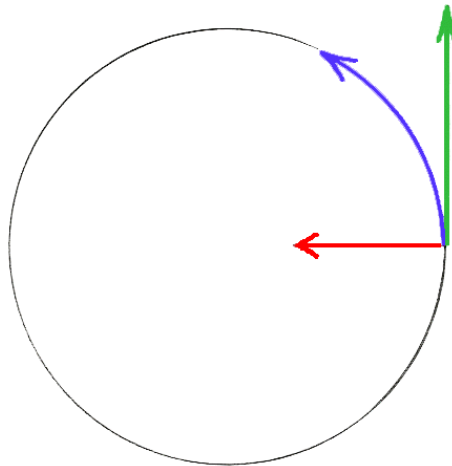
**ASSOCIATION ADILCA** [www.adilca.com](http://www.adilca.com) \* \* \*

## 2. LA TERRE QUI TOURNE AUTOUR DU SOLEIL

Les lois de la physique sont celles de l'Univers, ce sont donc des lois *universelles* : elles s'appliquent de la même façon à la centrifugeuse, à la bille qui tourne autour d'un axe, à la trajectoire d'une voiture, à l'équilibre du système solaire ou à n'importe quel autre phénomène, c'est là tout le génie d'Isaac Newton de l'avoir découvert.

Appliquons ces lois 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.

Comment expliquer cette trajectoire ? Elle est due à la force de gravitation qui provient de la masse du Soleil. Cette force mystérieuse, dite aussi *force centripète*, agit à distance, elle est de la même nature que celle qui, sur Terre, fait tomber les objets au sol.



© association adilca reproduction interdite

### Représentation schématique du mouvement de la Terre

La Terre décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) à cause d'une force centripète (flèche rouge) qui l'attire vers le Soleil : c'est la force de gravitation. Si cette force n'existait pas, la Terre adopterait une trajectoire rectiligne (flèche verte).

### **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 de gravitation, la Terre prendrait immédiatement la direction du Soleil pour venir s'y fondre <sup>(\*)</sup>.

- insensible à la gravitation mais conservant sa vitesse, la Terre adopterait immédiatement une trajectoire rectiligne et s'éloignerait du Soleil (\*\*).

Insistons sur ce point : si la Terre s'éloignait du Soleil, ce serait bien par défaut de force de gravitation et non à cause d'une quelconque force centrifuge.

### **Le troisième principe de Newton**

Le troisième principe de Newton énonce que toute force s'exerçant sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé.

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas du système solaire ? Le Soleil attire la Terre, donc la Terre attire également le Soleil, avec une force de même intensité et de même direction, mais de sens opposé ! Cette force s'exerce au centre du Soleil, elle est orientée vers le centre de la Terre.

Pourquoi la Terre seule infléchit-elle sa trajectoire, le Soleil restant parfaitement immobile ? C'est une question de rapport de force entre deux corps de masses inégales, le Soleil étant 333 333 fois plus massique que la Terre (\*\*\*) .

### **Conclusion**

En conclusion : le concept de force centrifuge n'est pas plus nécessaire dans cette description-ci que dans toutes les autres !

(\*) *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  $275 \text{ m.s}^{-2}$  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.*

(\*\*) *Dans cette hypothèse, la Terre finirait par quitter le système solaire au bout d'une dizaine d'années. Privé de lumière et de chaleur, le globe terrestre serait incapable d'abriter la moindre forme de vie.*

(\*\*\*) *Masse du Soleil (S) :  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$  ; masse de la Terre (T) :  $6 \times 10^{24} \text{ kg}$  ; rapport S / T :  $0,33 \times 10^6$ .*

**ASSOCIATION ADILCA**

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

\* \* \*

### 3. LA BILLE QUI TOURNE AUTOUR D'UN AXE

Quelques “pseudo-physiciens” <sup>(1)</sup>, 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, on doit pouvoir s'en passer, quelle que soit la nature du mouvement circulaire considéré : centrifugeuse, bille retenue par un fil, manège de fête foraine, voiture, planète, etc. Si on n'y parvient pas, c'est qu'il y a un “loup” quelque part ! À vous de le trouver !

#### Description du dispositif

Imaginons un dispositif composé d'un moteur 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 <sup>(2)</sup> 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 fondamental de la physique (première loi de Newton, voir le dossier ADILCA “*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.

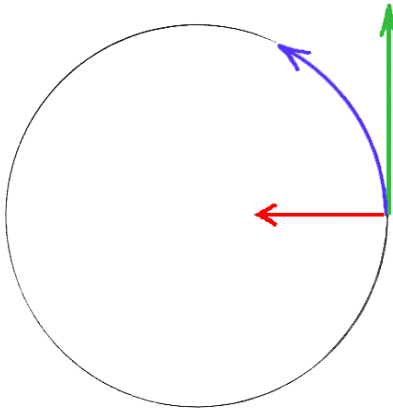
La force en question, c'est la force centripète <sup>(3)</sup>. C'est une force horizontale orientée vers l'axe de rotation, elle s'exerce sur la bille par l'intermédiaire du fil.

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, d'orientation centripète, elle maintient la bille en rotation. La tension du fil est égale à la résultante (autrement dit : à la somme vectorielle) de ces deux forces<sup>(4)</sup>.

Cette description est complète ainsi ! Il n'y a pas besoin de rajouter quoi que ce soit, et surtout pas de force centrifuge, il n'y en a pas besoin, et pour cause : la force centrifuge n'existe pas !



© association adilca reproduction interdite

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

La bille décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) à cause de la force centripète (flèche rouge) délivrée par l'axe de rotation et transmise par le fil (l'axe et le fil n'apparaissent pas sur le dessin). Si cette force cessait brusquement d'agir, par exemple en cas de rupture du fil, la bille livrée à elle-même retrouverait immédiatement une trajectoire rectiligne (flèche verte).

## Calcul de la force centripète

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

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

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<sup>-1</sup>**). 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 :

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

## Le troisième principe de Newton

Le troisième principe de Newton, souvent mal compris, énonce que toute force s'exerçant sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé. Attention à ne pas confondre cette réaction avec la force centrifuge !

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 force centripète<sup>(4)</sup>.

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<sup>(5)</sup>.

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 placé sur l'axe et tournant en même temps que lui. L'observateur n'ayant 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 peu de scientifiques ont réellement compris 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 suffit de préciser qu'on raisonne en statique, ça revient strictement au même !

Quant au mode d'emploi, ne le cherchez pas ailleurs ! Notre association milite depuis toujours pour une mise en garde systématique permettant de distinguer les descriptions et interdire les mélanges : ce raisonnement est dit "statique", par opposition au raisonnement "dynamique" exposé plus haut. Quelles sont les limites de ce raisonnement ?

Le mouvement de rotation de la bille est désormais figé, comme si on l'observait à partir d'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 puisqu'il n'y a plus de trajectoire circulaire, donc plus de centre, le mouvement de rotation de la bille ayant disparu aux yeux de l'observateur !

Ajoutons qu'ici, le troisième principe de Newton est rigoureusement inapplicable puisqu'il n'y a pas d'interaction, la force centrifuge étant 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 :

$$F' = - M g \tan \alpha$$

Pour garantir la validité de la relation, la masse **M** de la bille doit s'exprimer en kilogrammes (symbole **kg**), l'accélération gravitationnelle **g** doit s'exprimer en mètres par seconde carrée (symbole **m.s<sup>-2</sup>**). L'angle  $\alpha$  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. 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 **N**). La cohérence des unités se vérifie ainsi (les grandeurs trigonométriques n'ont pas de dimension) :

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

### Égalité = danger !

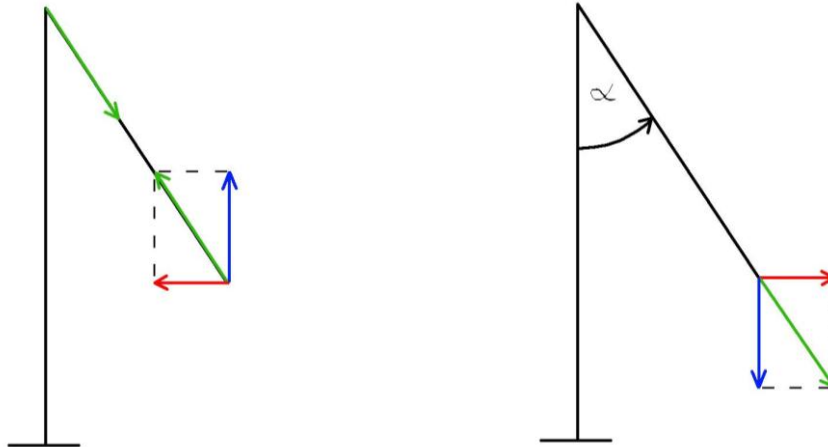
Une application numérique de ces deux relations donne un résultat surprenant : toutes conditions égales par ailleurs, on constate que la force centripète en dynamique et la force centrifuge en statique ont rigoureusement la même intensité !

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

- l'une de ces deux forces s'exerce par contact sur une bille en mouvement, l'autre s'exerce sur le centre de gravité d'une bille immobile ;
- l'une de ces deux forces est le résultat d'une interaction, de l'axe sur le fil et du fil sur la bille, l'autre non ;
- l'une de ces deux forces est d'orientation centripète, l'autre est d'orientation centrifuge. D'ailleurs, pour éviter toute confusion, une bonne précaution consiste à affubler la force centrifuge d'un signe négatif afin de préciser sa direction.

## Deux dessins pour bien comprendre...

Les deux descriptions précédentes ne devant être ni confondues, ni mélangées, il est impératif de les distinguer par deux dessins séparés, comme ceux-ci :



© 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 à son poids, c'est ce qui la maintient en équilibre vertical ;

- la flèche rouge représente la force centripète qui s'exerce sur la bille, c'est ce qui la maintient sur une trajectoire circulaire ;

- il y a deux flèches vertes égales et opposées : l'une représente la résultante des deux forces précédemment citées, elle s'exerce sur la bille par l'intermédiaire du fil ; l'autre représente la réaction à cette résultante, elle s'exerce sur l'axe de rotation par l'intermédiaire du fil.

**Dessin de droite** : c'est la *description statique* du phénomène, autrement dit : l'axe ne tourne pas, la bille est immobile dans l'espace, comme par magie, le fil formant un angle par rapport à la verticale.

- la flèche bleue représente le poids de la bille ;

- la flèche rouge représente la force centrifuge ;

- la flèche verte représente la résultante de ces deux forces.

## Conclusion

En conclusion, égalité = danger !

La force centrifuge est une force imaginaire qui ne permet pas de décrire la réalité du mouvement circulaire.

D'une manière générale, méfiez-vous 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 !

Suivez donc ces conseils : toujours distinguer la nature, le point d'application et l'orientation des différentes forces étudiées, ainsi que les réactions associées ; ne jamais mélanger les descriptions ; ne jamais associer une force réelle et une force imaginaire !

Par ailleurs, n'hésitez pas à remettre en question les certitudes, les démonstrations ou les dessins de vos professeurs, aussi sympathiques, diplômés et compétents soient-ils ! Des recherches ont en effet démontré que les meilleurs d'entre eux ont pu involontairement vous induire en erreur (voir le dossier ADILCA "Cessac & Tréherne").

(1) *"Pseudos-physiciens" : ainsi nomme-t-on, par dérision, ceux s'obstinent à ne considérer que les forces imaginaires, dites aussi forces fictives ou pseudo-forces, en ignorant les autres.*

(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) *Cette force est qualifiée ici de centripète pour la commodité du raisonnement, alors qu'elle n'est pas de nature centripète puisque la bille ne se rapproche jamais de l'axe de rotation (voir le dossier ADILCA "force centripète"). Cette force est en réalité une force de contact : la bille est tout simplement déviée de sa trajectoire rectiligne par l'action du fil.*

(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.*

**ASSOCIATION ADILCA**

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

\* \* \*

## 4. APPLICATION NUMÉRIQUE

### Description dynamique

Une bille de masse 100 grammes (0,1 kg) pesant 1 N (accélération gravitationnelle "g" = 10 m.s<sup>-2</sup>) est suspendue à 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<sup>-1</sup>**

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

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

**ω** : vitesse de rotation, exprimée en **tr.s<sup>-1</sup>**

Cohérence des unités : **V** = m . s<sup>-1</sup> = **m.s<sup>-1</sup>**

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

#### 2. Calcul de la force centripète :

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

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

**M** : masse, exprimée en **kg**

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

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

Cohérence des unités : **F** = kg . (m.s<sup>-1</sup>)<sup>2</sup> . m<sup>-1</sup> = kg . (m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup> . m<sup>-1</sup>) = kg.m.s<sup>-2</sup> = **N**

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

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

Cohérence des unités : **T** = [(kg.m.s<sup>-2</sup>)<sup>2</sup>]<sup>1/2</sup> = [kg<sup>2</sup>.m<sup>2</sup>.s<sup>-4</sup>]<sup>1/2</sup> = kg.m.s<sup>-2</sup> = **N**

*Remarque : la puissance ½ équivaut à une racine carrée.*

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

## 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<sup>-2</sup>).

Le mouvement étant figé, il faut imaginer une force qui s'exerce sur le centre de gravité de la bille 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 s'éloigne pas ; de plus, il n'y a ni cercle, ni centre).

## Calcul de la force centrifuge :

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

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

**M** : masse, exprimée en **kg**

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

**$\alpha$**  : angle d'inclinaison du fil par rapport à la verticale

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

*Remarque : les valeurs trigonométriques n'ont pas de dimension.*

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

Attention ! 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. Pas question donc, d'évoquer le rayon de la trajectoire de la bille, et encore moins sa vitesse !

(\*) *La tension du fil est la résultante du poids et de la force centripète, elle est égale à la somme vectorielle de ces deux forces (flèche verte sur le dessin de gauche, page 10). 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 Vème siècle avant notre ère. Le théorème de Pythagore énonce que, dans un triangle rectangle, le carré de l'hypoténuse 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.*