

## **STATIQUE ET DYNAMIQUE**

### **I. LES LOIS DE NEWTON**

### **II. STATIQUE ET DYNAMIQUE : LES DEUX DESCRIPTIONS**

### **III. FORCE CENTRIFUGE ET FORCE DE GUIDAGE : LE MODE DE CALCUL**

### **IV. BIBLIOGRAPHIE**

**ASSOCIATION ADILCA**

[www.adilca.com](http://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, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. »*

Le concept de force découle de ce principe.

### Concept de force

*« Une force désigne toute cause capable de dévier 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 concilier ces lois avec la statique et le concept de force centrifuge ?

**ASSOCIATION ADILCA**

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

\* \* \*

## II. STATIQUE ET DYNAMIQUE : LES DEUX DESCRIPTIONS

Les dérivées vectorielles et la transformation d'une base en rotation en une base fixe (dite "base de Frenet") apportent-elles la preuve mathématique de l'existence de la force centrifuge ? C'est ce que nous allons voir.

### Qu'est-ce qu'un référentiel ?

Un référentiel désigne un système de trois axes perpendiculaires ayant une origine commune, grâce auxquels on peut mesurer les caractéristiques du mouvement d'une masse (distance parcourue, rayon de trajectoire, variation d'altitude). Un référentiel peut être absolu, pour décrire un mouvement réel, ou relatif, pour décrire un mouvement apparent.

- la Terre est le *référentiel absolu* qui autorise la description du mouvement des voitures et de tout ce qu'elles contiennent (passagers, bagages) car, comme leur nom l'indique, les véhicules terrestres se déplacent par rapport à la Terre.

- une voiture est un *référentiel relatif* n'autorisant pas d'autre description que celle du mouvement des passagers et des bagages à l'intérieur de l'habitacle. Ce mouvement est appelé *mouvement apparent*.

La règle des référentiels (souvent bafouée) a été détaillée dans un dossier à lire par ailleurs (voir dossier ADILCA "référentiels").

### Qu'est-ce qu'une force ?

Une force désigne toute cause capable de modifier la vitesse ou la trajectoire d'une masse. On distingue deux types de forces : les forces réelles et les forces fictives.

- les *forces réelles* s'exercent à distance ou par contact, elles sont à l'origine du mouvement observé dans un référentiel absolu. Il n'existe que deux forces agissant à distance : la force de gravitation et la force électromagnétique, sans intérêt ici.

Il existe une multitude de forces de contact, dont celles qui régissent le mouvement des véhicules terrestres. Ces forces s'exercent sur les pneumatiques au contact du sol, elles sont au nombre de quatre : la force de traction, la force de retenue, la force de freinage et la force de guidage.

- les *forces fictives* sont d'une nature totalement différente : elles sont supposées s'exercer sur le centre de gravité d'une masse pour expliquer un mouvement apparent ou un équilibre apparent, à condition de raisonner dans les limites d'un référentiel relatif ou d'une description statique. La physique connaît trois forces fictives : la force d'inertie, la force centrifuge et la force de Coriolis.

## De la réalité à la fiction...

En quoi consiste la transformation d'une base en rotation en une base fixe ?

Les mathématiques et la physique sont complémentaires, mais une erreur fréquente consiste à aligner des calculs sans s'interroger sur leur signification réelle.

En l'occurrence, le passage d'une base en rotation à une base fixe est une transformation qui fait abstraction du mouvement réel. C'est donc une projection purement imaginaire.

En d'autres termes, la base en rotation est alors considérée comme parfaitement immobile, et il faut ensuite recourir à des forces fictives pour expliquer un mouvement ou un équilibre apparents.

## Du présent au conditionnel...

Comment distinguer la réalité de la fiction ? Voici un exemple :

- **Phrase 1** : j'ai gagné 300 € au loto et ma grand-mère m'a légué 700 €, je dispose de 1000 €.

- **Phrase 2** : si je gagnais 300 € au loto, et si ma grand-mère me léguait 700 €, je disposerais de 1000 €.

On voit que les deux calculs sont parfaitement exacts et équivalents dans les deux cas, à cette nuance près toutefois : la somme d'argent n'est réelle que dans la première phrase, elle est complètement fictive dans la seconde.

Ici, ce sont les modes de conjugaison qui permettent de faire la distinction, et il n'est pas question de mélange, ni du point de vue grammatical, c'est la règle de la concordance des temps, ni du point de vue comptable.

## De la dynamique à la statique...

La même transformation existe en mathématiques et en physique.

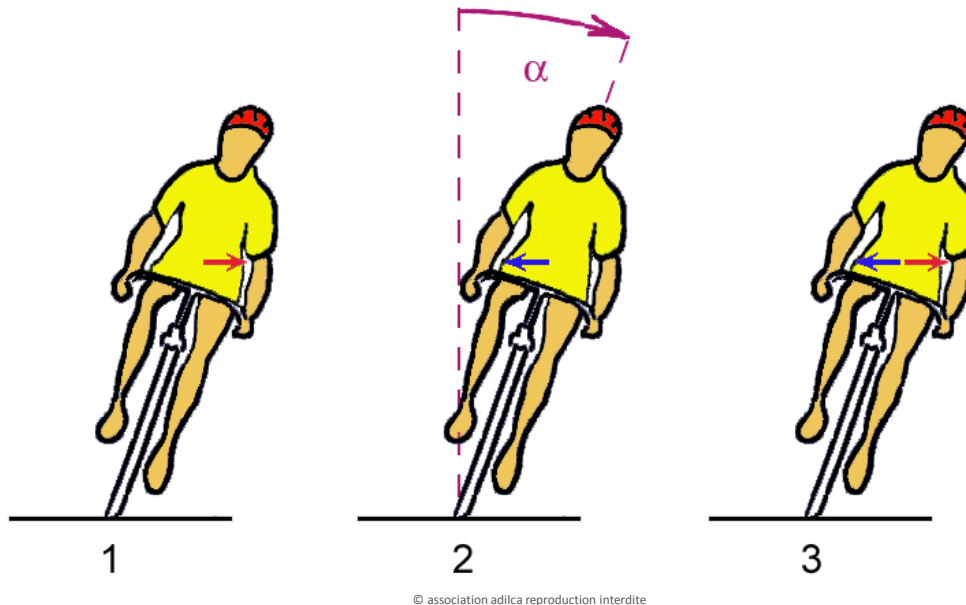
Passer d'une base en rotation à une base fixe est comme passer du présent au conditionnel, le conditionnel supposant ici que le mouvement réel est figé.

La première description est nommée "*dynamique*", c'est la description réelle.

La seconde est dite "*statique*", c'est une description imaginaire.

Mais, mieux qu'un long discours, voici l'exemple du cycliste en équilibre pour illustrer cette distinction.

Trois dessins valent mieux qu'un long discours...



- **Dessin 1** : c'est la description réelle, dite "*dynamique*". La base en rotation est constituée d'un cycliste sur sa bicyclette. Traduction concrète : le cycliste est en mouvement et décrit une trajectoire circulaire. Conformément au principe de Newton<sup>(1)</sup>, ce cycliste a été dévié de sa trajectoire initialement rectiligne grâce à une force de contact **F**, unique et bien réelle, qui provoque l'accélération transversale de son centre de gravité, c'est la *force de guidage* (flèche rouge sur le dessin 1). En réalité, cette force s'exerce au contact du sol mais, pour une meilleure lisibilité du dessin, nous l'avons "transportée" au centre de gravité du cycliste, ainsi que le permet une des règles de calcul vectoriel<sup>(2)</sup>.

Dans cette description, la relation appropriée est :

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

Une application numérique montre que si la masse du cycliste (bicyclette comprise, avec "**g**" = 10 m.s<sup>-2</sup>) est 100 kilogrammes, sa vitesse 10 mètres par seconde, et le rayon de sa trajectoire 100 mètres, l'intensité de la force de guidage nécessaire au maintien de cette trajectoire est 100 newtons. Par ailleurs, une mesure précise de l'angle d'inclinaison du cycliste par rapport à la verticale (à partir d'une photo par exemple) montrerait que, dans ces conditions, cet angle est très exactement égal à 5,7 degrés...

- **Dessin 2** : c'est une description imaginaire, dite "*statique*". La base en rotation a été transformée en base fixe. Traduction concrète : le cycliste est désormais immobile, il n'avance plus. Mais il penche d'un côté ! Pour éviter la chute, la condition d'équilibre exige la présence d'une force **F'**, force appelée "*force centrifuge*" (flèche bleue sur le dessin 2).

Cette force est censée s'exercer sur le centre de gravité du cycliste (si on néglige la masse de la bicyclette). Mais cette fameuse force existe-t-elle vraiment ? Non car, a-t-on déjà vu un cycliste, à la fois immobile et penché, mais cependant capable de se maintenir en équilibre dans une telle position ?

Cette force est qualifiée de "*centrifuge*", un terme qui signifie "*qui éloigne du centre*". Ce terme est-il approprié ? Non, car le cycliste est immobile et, faute de trajectoire, il n'y a évidemment ni rayon, ni centre ! L'appellation correcte de cette force est "*force d'inertie*", "*force fictive*", "*force imaginaire*", "*force apparente*" ou "*pseudo-force*", tous ces termes étant synonymes. Leur emploi éviterait bien des confusions.

Autre erreur regrettable, celle des relations entre grandeurs. En effet et contrairement à une idée reçue, la célèbre formule magique  $\mathbf{F} = \mathbf{M}\mathbf{V}^2/\mathbf{R}$  ne peut jamais s'appliquer à cette description dans laquelle la vitesse est toujours nulle. D'ailleurs, une tentative d'application numérique le confirme :

$$\forall \mathbf{M}, \forall \mathbf{R} \neq \mathbf{0}, \text{ pour } \mathbf{V} = \mathbf{0}, \mathbf{F} = \mathbf{M}\mathbf{V}^2/\mathbf{R} = \mathbf{0}/\mathbf{R} = \mathbf{0}! \dots$$

La voilà, cette fameuse preuve mathématique ! Et ce n'est pas tout ! Quelle valeur donner à  $\mathbf{R}$  ? Comment mesurer le rayon de trajectoire d'un objet immobile ? C'est clair, net et définitif : cette formule ne marche pas ici, elle ne mène qu'à une impasse !...

Alors comment calculer l'intensité de la force centrifuge ? En vérité, la seule et unique relation qui convient à cette description est celle-ci :

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

Dans cette relation,  $\mathbf{P}$  est le poids de l'ensemble et  $\alpha$  son angle d'inclinaison par rapport à la verticale. Ici, le signe [-] est déterminant : il précise l'orientation spatiale de cette force qui, bien évidemment, devrait s'exercer du côté opposé à l'inclinaison. On verra plus loin pourquoi ce signe, souvent oublié, est si important.

L'application numérique de cette relation montre que, pour retenir un cycliste immobile de masse 100 kilogrammes (bicyclette comprise, avec " $g$ " = 10 m.s<sup>-2</sup>) en position inclinée de 5,7 degrés par rapport à la verticale, il faudrait disposer d'une force en valeur absolue de... 100 newtons !

Une force de 100 newtons ? Oui ! Quel curieux hasard, quelle étrange coïncidence ! Ou plutôt : quelle extraordinaire correspondance des valeurs, quelle merveilleuse précision de la physique, car le hasard et les coïncidences n'ont évidemment pas leurs places ici.

Ces calculs montrent en effet que, pour une inclinaison identique, la force de guidage (description dynamique) et la force centrifuge (description statique) ont la même intensité. D'où la confusion.

Mais attention ! L'exactitude du calcul ne prouve pas la réalité du concept. L'une de ces deux forces seulement est bien réelle, c'est la force de guidage. L'autre est purement imaginaire, répétons-le, c'est la force centrifuge.

Et nous allons démontrer maintenant que ces deux forces, et donc les deux descriptions auxquelles elles se rapportent, ne peuvent ni se compléter, ni se superposer.

- **Dessin 3** : c'est un mélange des deux descriptions précédentes, une sorte de fusion contre nature destinée à apporter la preuve nette et définitive que les deux raisonnements sont totalement incompatibles.

Dans cette description, les deux forces coexistent, mais le calcul vectoriel nous montre que ces deux forces, d'égale intensité mais de sens opposé, se neutralisent :

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}' = 100 - 100 = 0 !$$

Comment interpréter ce résultat ? Une somme vectorielle égale à zéro signifie que tout se passe alors comme si ces deux forces n'agissaient plus : le cycliste est désormais livré à lui-même !

Autrement dit, si on raisonne en dynamique, le cycliste (qui est en mouvement) reste penché tout en conservant une trajectoire rectiligne : il ne peut plus décrire la moindre trajectoire circulaire ! Et si on raisonne en statique, le cycliste (qui est immobile) tombe immédiatement : il ne peut plus rester à la fois immobile et penché !

Ce raisonnement par l'absurde doit nous convaincre une bonne fois pour toutes que la force centrifuge n'existe pas, et qu'il faut impérativement choisir l'une de ces deux descriptions au détriment de l'autre ! CQFD ! De là découle une règle absolue : on ne mélange jamais une base en rotation et une base fixe, une description dynamique et une description statique, le présent et le conditionnel, la réalité et la fiction !

### **Statique ou dynamique : la véritable définition !**

Ce qui précède nous amène à ces deux définitions :

*« On appelle statique une description imaginaire dans laquelle une base en rotation est considérée comme fixe, une base en mouvement est considérée comme immobile. »*

*« On appelle dynamique la description réelle d'un mouvement de rotation ou de translation. »*

Attention ! La physique a horreur du mélange des genres. Insistons une fois encore sur l'interdiction formelle de fusionner les deux descriptions, une interdiction qui s'applique également aux formules. Que d'erreurs pour ceux qui, étudiants ou professeurs, ne respecteraient pas ces précautions !...

## Le principe de réciprocité

La distinction entre statique et dynamique implique une conséquence de taille qui concerne l'application du troisième principe de Newton, ou principe de réciprocité, un principe souvent oublié ou mal compris.

Que dit ce fameux principe ?

*« 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 cadre d'une description statique ?

Réponse : il ne s'applique pas car, la force d'inertie centrifuge relevant de la pensée magique, il n'y a pas d'interaction.

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cadre d'une description dynamique ?

Réponse : ainsi que nous venons de le voir, la force de guidage est une force horizontale qui s'exerce sur la masse du cycliste (on néglige la masse de la bicyclette) par l'intermédiaire des pneumatiques de la machine au contact du sol.

On en déduit que la masse du cycliste exerce une poussée horizontale sur le globe terrestre par l'intermédiaire des pneumatiques de la bicyclette, d'égale intensité à celle de la force de guidage, mais de sens opposé<sup>(3)</sup>.

Le mouvement de rotation du globe terrestre n'est pas perturbé par ce phénomène, étant donné le rapport des masses en jeu<sup>(4)</sup>.

## Force centrifuge : la véritable définition !

La distinction entre statique et dynamique nous amène à ces deux définitions originales et inédites de la force centrifuge :

*« On appelle force centrifuge la force transversale qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'un cycliste immobile (on néglige la masse de la bicyclette) pour le maintenir en équilibre avec une inclinaison identique à celle que l'on peut observer lorsqu'il décrit une trajectoire circulaire. Cette définition, valable uniquement en statique, devient caduque si le cycliste est en mouvement. »*

Pour une voiture, cette définition devient :

*« On appelle force centrifuge la force transversale qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile pour créer sur les pneumatiques et les suspensions un effet comparable à celui que l'on peut observer lorsque la voiture décrit une trajectoire circulaire. Cette définition, valable uniquement en statique, devient caduque si la voiture est en mouvement. »*



## Une force purement imaginaire !

Insistons sur la première exigence de cette définition : le véhicule doit être immobile. Soulignons ensuite le caractère hypothétique de cette force, clairement affirmé par l'emploi du conditionnel : “*la force qu'il faudrait exercer...*” et enfin, l'impossibilité technique d'exercer directement la moindre force sur le centre de gravité d'une masse quelconque...

D'ailleurs personne n'a jamais vu une telle force se manifester spontanément. On en déduit donc que la force centrifuge est bien une force imaginaire. C'est ce qu'on appelle une force d'inertie, une force fictive, une force apparente, une “pseudo-force”, c'est-à-dire une force qui n'existe pas.

La seule force capable de dévier la trajectoire des véhicules terrestres s'exerce au contact du sol, c'est la force de guidage, c'est la seule force qui existe vraiment. Il n'y a pas d'autre force mise en jeu dans le mécanisme de la trajectoire circulaire !

## La preuve par la bouteille d'eau...

Comment distinguer une description statique d'une description dynamique ? L'expérience dite “de la bouteille d'eau” peut donner la réponse.

Cette expérience consiste à remplir partiellement une bouteille d'eau en plastique, de préférence avec du sirop (menthe, grenadine...) pour en colorer le contenu, puis à installer le récipient à plat sur le guidon ou le réservoir d'une motocyclette.



© association adilca reproduction interdite

L'expérience dite “de la bouteille d'eau” permet de révéler la vraie nature de la description. En dynamique, la surface du liquide reste perpendiculaire au plan de symétrie de la motocyclette. En statique, le liquide tombe du côté où la machine s'incline.

Il suffit ensuite de se mettre en route afin d'observer les mouvements du liquide lors des variations de trajectoires : sauf conduite brutale, vibrations de la machine ou secousses engendrées par la nature du sol, la surface du liquide reste toujours perpendiculaire à l'axe de symétrie de la motocyclette. En statique, le liquide tomberait du côté où penche la machine.

Cette expérience est très utile : lorsqu'un professeur s'échine à dessiner des forces au tableau, demandez-lui donc comment se comporterait un liquide à l'intérieur d'une bouteille... Vous saurez tout de suite si le professeur raisonne en statique, en dynamique... ou s'il se trompe !

### **A quoi sert une description imaginaire ?**

Au-delà de la polémique aussi amusante que stérile, la vraie question à se poser est plutôt celle-ci : pourquoi les physiciens ont-ils éprouvé le besoin d'inventer des descriptions imaginaires ? La réalité ne suffit-elle pas ?

Accessoirement, cet exercice d'acrobatie intellectuelle, auquel beaucoup de professeurs ont recours, constitue une sorte de "*pont aux ânes*" destiné à faire le tri entre les pseudos-scientifiques (ainsi nomme-t-on ceux qui ne raisonnent qu'avec des pseudo-forces) et les autres...

Mais la véritable explication n'est pas là. Pour le physicien, cette construction intellectuelle se justifie dans un souci de cohérence de toutes les descriptions, aussi théoriques soient-elles.

C'est ainsi : la physique a horreur du vide et le physicien projette sa rigoureuse logique partout, y compris dans l'abstraction !

Les forces fictives sont des concepts qui ne servent qu'à satisfaire le besoin de cohérence propre à la théorie. Il n'en demeure pas moins que ces forces sont purement imaginaires, elles n'ont pas d'existence réelle. Affirmer le contraire relève de l'escroquerie ou de l'incompétence.

### **Conclusion**

L'imposture n'est pas le concept de force centrifuge !

L'imposture intellectuelle, c'est la confusion entre dynamique et statique, entre réalité et fiction, entre présent et conditionnel.

Pour dissiper tout malentendu, la moindre des précautions consiste à préciser clairement la nature de la description et d'ajouter que, dans le cas d'une description statique, il ne peut s'agir que d'une description imaginaire.

La suite coule de source : tout mélange de statique et de dynamique est évidemment proscrit.

L'une des conséquences de cette distinction est que la statique fait intervenir des forces fictives, dites aussi forces apparentes, forces imaginaires ou pseudo-forces, parmi lesquelles la force centrifuge. Car, l'autre imposture intellectuelle, c'est croire ou faire croire que la force centrifuge existe vraiment.

L'autre conséquence de cette distinction est que le principe de réciprocité énoncé par Isaac Newton est rigoureusement inapplicable en statique, il ne peut s'appliquer qu'en dynamique.

Enfin, la célèbre formule magique  $F = MV^2/R$  employée un peu partout à tort et à travers ne peut s'appliquer qu'à une description dynamique, elle ne peut donc exprimer qu'une seule force : la force de guidage.

(1) *Principe d'inertie d'Isaac Newton* : « Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. » *Le concept de force découle de ce principe* : « Une force désigne toute cause capable de dévier la trajectoire d'une masse. »

(2) *Un vecteur est une représentation graphique d'une grandeur quelconque (poids, force, accélération, vitesse...).* Il est toujours possible de déplacer le point d'application d'un vecteur, à condition de ne modifier ni son sens, ni son orientation, ni sa longueur, c'est l'une des règles de base du calcul vectoriel. Mais attention : le déplacement d'un vecteur n'autorise pas un changement de nom. Et surtout, gare à ne jamais combiner des vecteurs représentant des grandeurs de natures différentes !

(3) *Le cycliste ressent parfaitement cette action réciproque qui lui donne l'impression de peser davantage sur les pneumatiques de la bicyclette.*

(4) *Masse de l'ensemble cycliste + bicyclette : 100 kg ; masse du globe terrestre :  $6 \times 10^{24}$  kg, soit un rapport de 1 pour  $6 \times 10^{22}$  (ce qui signifie un nombre égal à 6 suivi de 22 zéros). La force de guidage et son action réciproque sont égales, mais leurs effets dépendent des masses sur lesquelles elles s'exercent. C'est une application concrète du deuxième principe de dynamique énoncé par Isaac Newton et qui se traduit par cette équation :  $[Y = F / M]$ . En examinant les limites de cette fonction, on voit que si la masse tend, sinon vers l'infini, du moins vers un nombre très grand, l'accélération tend, sinon vers zéro, du moins vers un nombre très petit. C'est ce qui explique que le globe terrestre reste insensible à la trajectoire circulaire du cycliste.*

**ASSOCIATION ADILCA**

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

\* \* \*

### III. FORCE CENTRIFUGE ET FORCE DE GUIDAGE : LE MODE DE CALCUL

#### 1. Force de guidage :

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

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

**M** : masse, exprimée en **kg**

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

**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 s'exerce au contact du sol et qui maintient un ensemble bicyclette + cycliste de masse totale 100 kilogrammes sur une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 10 mètres par seconde :

$$F = 100 \times 10^2 / 100 = 100 \times 100 / 100 = 100 \text{ N}$$

#### 2. Angle d'inclinaison :

$$\text{Tangente } \alpha = F / P$$

**α** : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension ;

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

**P** : poids, exprimée en **N**

cohérence des unités :  $\text{N} / \text{N} = \text{grandeur sans dimension}$ .

Exemple : calculons l'angle d'inclinaison quand une force de guidage de 100 N s'exerce sur un ensemble bicyclette + cycliste de 1 000 N :

$$\text{Tangente } \alpha = 100 / 1\,000 = 0,1$$

$$\alpha = 5,7^\circ$$

#### 3. Force centrifuge :

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

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

**P** : poids, exprimée en **N**

**α** : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension ;

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

Exemple : calculons la force, dite “*force centrifuge*”, qu’il faudrait exercer sur le centre de gravité d’un ensemble bicyclette + cycliste immobile pesant 1 000 N, ceci afin de le maintenir en équilibre malgré une inclinaison de 5,7 degrés par rapport à la verticale :

$$F' = - 1\ 000 \times \text{tangente } 5,7^\circ = - 1\ 000 \times 0,1 = - 100 \text{ N}$$

Remarque 1 : cette force est couramment appelée “*force centrifuge*” ce qui est un qualificatif incorrect puisqu’il n’y a ni trajectoire, ni rayon, ni centre (l’ensemble cycliste + bicyclette est immobile et le reste). Le vrai nom de cette force est : force d’inertie, force fictive, force imaginaire, force apparente ou pseudo-force.

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

Remarque 3 : attention aux interprétations erronées, l’égalité numérique des résultats n’autorisant pas l’interchangeabilité des descriptions, des concepts ou des raisonnements.

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

Remarque 5 : toute démarche scientifique doit passer par quatre étapes successives :

- 1) observer un *phénomène* (ici, un cycliste qui décrit une trajectoire circulaire) ;
- 2) mesurer des *grandeurs* (ici : masse de l’ensemble cycliste + bicyclette, sa vitesse et le rayon de sa trajectoire) ;
- 3) effectuer des *calculs* (ici : calcul de la force de guidage et de l’angle d’inclinaison correspondant) ;
- 4) éventuellement, transposer un *raisonnement* (ici : passage d’une description réelle à une description imaginaire avec l’introduction du concept de force centrifuge).

Les trois premières étapes, indispensables, garantissent la traçabilité du raisonnement. La quatrième étape, facultative, n’apporte rien sinon un risque de confusion, d’où les méprises au sujet de la force centrifuge.

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

\* \* \*

#### 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 intégrale en français de l'œuvre d'Isaac Newton), Paris 1759.
- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.

**ASSOCIATION ADILCA**

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

\* \* \*