

RÉFÉRENTIELS ET FORCE CENTRIFUGE

I. LES LOIS DE NEWTON

II. RÉFÉRENTIEL ABSOLU OU RELATIF : LE MODE D'EMPLOI

III. LES DEUX RÉFÉRENTIELS EN AUTOMOBILE

IV. RÉFÉRENTIEL ABSOLU OU RELATIF : LE MODE DE CALCUL

A. RÉFÉRENTIEL ABSOLU

Force réelle, dite « force de guidage »

B. RÉFÉRENTIEL RELATIF

Force imaginaire, dite « force centrifuge »

V. 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, 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 ces lois avec la théorie des référentiels et le concept de force centrifuge ?

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

II. RÉFÉRENTIEL ABSOLU OU RELATIF : LE MODE D'EMPLOI

La force centrifuge est encore aujourd'hui le concept le plus représentatif de l'esprit "sécurité routière". En 1999, un article publié dans la revue "Formation & Sécurité" démontrait qu'une telle force n'existe pas, n'a jamais existé, ne peut pas exister (article "*Mystérieux virage*").

Cet article allait faire l'effet d'une bombe. Contre toute attente, il fut plutôt bien accueilli dans le milieu de l'éducation routière, les professionnels du secteur faisant preuve pour l'occasion d'une remarquable ouverture d'esprit.

En revanche, dans les programmes officiels comme dans les ouvrages spécialisés, le dogme obligatoire continue de faire de la résistance, au motif qu'il ne s'agirait finalement que d'une simple question de référentiel.

Qu'est-ce qu'un référentiel ? Combien en existe-t-il ? Quel en est le mode d'emploi ? D'où vient la confusion et comment démêler le vrai du faux ? Bien sûr, il n'y a qu'une seule vérité. Voici les clés du raisonnement.

Syllogisme ou sophisme ?

« *Un cheval bon marché est rare. Tout ce qui est rare est cher. Par conséquent, un cheval bon marché est cher.* »

Ce mode de raisonnement s'appelle un syllogisme. Dans cet exemple, l'absurdité de la conclusion provient d'une confusion entre deux systèmes de pensée : ce qui est vrai dans l'un ne l'est plus dans l'autre, et inversement.

En physique, les systèmes de pensée, ce sont les référentiels.

Définitions

Qu'est-ce qu'un *référentiel* ? Ce terme désigne un système de repérage permettant de mesurer les caractéristiques du mouvement d'une masse, telles que la distance parcourue, la vitesse, le rayon d'une trajectoire ou une variation d'altitude⁽¹⁾.

Au-delà de cette définition, un référentiel est un cadre rigide qui fixe les limites d'une étude, d'une observation ou d'un raisonnement. Pour le physicien, c'est un ensemble mathématique aux contours stricts et aux règles rigoureuses, l'équivalent du système de pensée pour le philosophe.

Un référentiel peut se lier à divers objets avec, pour conséquence, de livrer des descriptions contradictoires. Voici l'exemple classique.

L'exemple du Système solaire...

Depuis Copernic, Galilée et Newton, on sait que le Système solaire est un ensemble de planètes qui gravitent autour du Soleil.

- Si le référentiel est lié au Soleil, le Soleil est considéré comme immobile⁽²⁾. On le qualifie alors de *référentiel absolu*⁽³⁾, car le mouvement des planètes du système solaire devient parfaitement cohérent.

- Si le référentiel est lié au globe terrestre, c'est la Terre qui est considérée comme immobile. On la qualifie alors de *référentiel relatif*⁽⁴⁾, car le mouvement du Soleil et des planètes du système solaire redevient totalement incohérent.

Concrètement, cela signifie qu'un habitant de notre planète ignorant tout de la mécanique céleste et persuadé que le globe terrestre est immobile, aurait l'impression, en scrutant le ciel, que le Soleil est animé d'un *mouvement apparent*, alors qu'en réalité, il n'en est rien.

Les deux descriptions étant contradictoires, précisons le mode d'emploi d'un référentiel relatif.

Référentiel relatif, mode d'emploi

La description d'un mouvement à partir d'un référentiel relatif suppose deux conditions :

1. Le référentiel relatif (dans notre exemple : la Terre) est considéré comme parfaitement immobile même si, en réalité, il ne l'est pas.
2. Le mouvement observé (dans notre exemple : celui du Soleil) est alors qualifié de *mouvement apparent*, ce qui sous-entend qu'en réalité, ce mouvement n'existe pas.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

III. LES DEUX RÉFÉRENTIELS EN AUTOMOBILE

Les véhicules terrestres sont des machines conçues pour satisfaire des besoins de déplacements par rapport à la Terre. Décrire leur mouvement par rapport au Soleil n'aurait aucun sens. Autrement dit, en automobile, le référentiel absolu est la Terre.

En pratique, ce référentiel peut être lié à une borne kilométrique, ou à n'importe quel autre point fixe à partir duquel il sera possible de mesurer la distance parcourue, le dénivelé, la vitesse et le rayon de trajectoire.

Si la Terre est le référentiel absolu, quel est le référentiel relatif ? C'est la voiture elle-même. Le référentiel est alors lié à l'habitacle.

Attention ! Appliquons le mode d'emploi : puisque le référentiel absolu est ici la Terre, le référentiel relatif (ici la voiture) doit être considéré comme parfaitement immobile, même si, en réalité, il ne l'est pas, et les mouvements observés à l'intérieur de l'habitacle seront des mouvements apparents produits par des forces qui, en réalité, n'existent pas.

Dès lors, pour décrire un mouvement avec exactitude, voici les trois règles d'or à observer.

Première règle : savoir ce qu'on veut observer...

Insistons sur un point : les référentiels Terre et voiture ne sont pas équivalents, ils n'ont pas les mêmes limites, ni les mêmes propriétés : le mouvement, la vitesse ou la trajectoire d'une voiture, par exemple, ne sont observables que dans le référentiel Terre.

Dans le référentiel voiture, ces grandeurs n'ont pas de sens, elles n'existent pas. Il faut donc savoir ce qu'on veut observer et faire le choix en conséquence. En effet, chaque référentiel a ses propriétés qu'on peut résumer ainsi :

- Le référentiel Terre permet de décrire non seulement le mouvement de la voiture, mais aussi le mouvement de tout ce qu'elle contient (passagers, bagages...), c'est ce qui caractérise un *référentiel absolu*.

- Le référentiel voiture doit être considéré comme immobile, il ne permet donc pas de décrire le mouvement de la voiture, mais uniquement le mouvement apparent de ce qu'elle contient (passagers, bagages...), c'est ce qui caractérise un *référentiel relatif*.

Deuxième règle : choisir le bon poste d'observation...

Dans le référentiel Terre, l'expérimentateur est posté quelque part à l'extérieur de la voiture. Immobile par rapport à la Terre, il observe, non seulement le mouvement de la voiture, mais aussi le mouvement de tout ce qu'elle contient (passagers, bagages).

Le poste d'observation idéal du référentiel Terre se situe à bord d'un hélicoptère en vol stationnaire au dessus de la route. La voiture doit être équipée d'un large toit transparent ou découvert, de sorte qu'aucun phénomène affectant les passagers et les bagages ne puisse être ignoré.

Dans le référentiel voiture, l'expérimentateur est installé dans l'habitacle, il est privé de tout repère extérieur et observe uniquement ce qu'il se passe à l'intérieur.

Afin d'éviter que certaines perceptions ou sensations n'interfèrent avec les phénomènes étudiés, le poste d'observation idéal se situe devant un écran de télévision diffusant les images d'une caméra embarquée.

En effet, n'oublions pas que la voiture est un référentiel relatif, c'est-à-dire un système isolé, indépendant et dénué de toute influence extérieure, tel un espace immobile, clos et sans fenêtres. Autrement dit, dans ce référentiel, le mouvement de la voiture n'existe pas.

Troisième règle : ne pas mélanger les descriptions...

Les référentiels Terre et voiture sont deux systèmes indépendants qui ne sont, ni opposés, ni symétriques, ni complémentaires, ni interchangeable. Ils sont différents, tout simplement. Par conséquent il est strictement interdit de les permuter, de les associer ou de les superposer. En langage mathématique, on dit que leur relation est inclusive mais non réciproque.

Plus concrètement, ils sont comme une bouteille et un verre. Le contenu du verre loge dans la bouteille, mais pas l'inverse. La contenance du verre ne donne aucun renseignement sur celle de la bouteille.

Un exemple à méditer...

Voici un exemple qui illustre toute l'importance des ces règles. Considérons une voiture qui circule à 120 km/h sur une autoroute :

- Dans le référentiel Terre, la vitesse du conducteur ceinturé dans son fauteuil est de 120 km/h.
- Dans le référentiel voiture, cette vitesse est strictement égale à 0 !

Par conséquent, gare aux confusions et pas de mélange possible !

Le problème du virage...

Quelle est la description correcte du mouvement lorsque la voiture décrit une trajectoire circulaire ? Quelles sont les forces mises en jeu ?

Rappelons d'abord le *principe d'inertie* d'Isaac Newton :

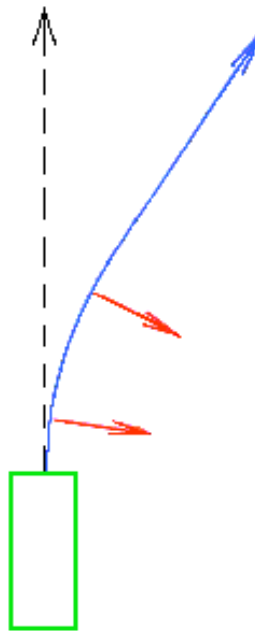
« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. »

Le concept de force découle du principe précédent :

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

Appliquons cette définition dans le cas d'une voiture qui circule en ligne droite et dont le conducteur s'apprête à négocier un virage.

Dans le référentiel Terre, la trajectoire naturelle de la voiture est une ligne droite. Pour dévier cette trajectoire, le conducteur doit solliciter une force transversale qui s'exerce au contact du sol lorsque les roues directrices pivotent, c'est la *force de guidage*.



© association adilca reproduction interdite

La trajectoire de la voiture est rectiligne par nature (pointillés). Pour dévier cette trajectoire, le conducteur doit solliciter une force transversale (flèche rouge) qui s'exerce au contact du sol lorsque les roues directrices pivotent, c'est la force de guidage. Dès que cette force cesse d'agir, la trajectoire redevient parfaitement rectiligne (flèche bleue). Attention à ne pas mélanger force et trajectoire.

Poursuivons la description : tandis que la voiture s'inscrit sur une trajectoire circulaire, les passagers et les bagages conservent une trajectoire rectiligne jusqu'au moment où la force de guidage leur est communiquée par contact avec le fauteuil, la portière ou la carrosserie.

Si la vitesse est constante, si on néglige la gravitation, la résistance de l'air et la résistance au roulement, la force de guidage est à ce moment-là la seule et unique force qui s'exerce sur la voiture, ses passagers et leurs bagages.

Telle est la description publiée pour la première fois en 1999 dans la revue "Formation & Sécurité". Il n'y a rien à ajouter, rien à retrancher, rien à modifier.

Le même... vu de l'intérieur!

Dans le référentiel voiture, les images de la caméra embarquée montrent que les passagers et les bagages s'animent d'un *mouvement apparent* qui les amène au contact de la carrosserie. C'est la seule observation possible. La description s'arrête là, car telles sont les limites de ce référentiel.

Et comme il n'y a pas de mouvement sans cause, c'est-à-dire sans force, et qu'il est impossible de faire la moindre référence à ce qu'il se passe à l'extérieur de la voiture, les physiciens ont inventé le concept de *force apparente* pour expliquer ce mouvement.

Cette force apparente est supposée s'exercer sur le centre de gravité des passagers et des bagages, elle ne peut apparaître que dans un référentiel relatif, elle ne peut concerner que les passagers et les bagages, rien d'autre.

Appellation non contrôlée...

Cette force apparente qui fait tant fantasmer est universellement connue sous le nom de *force centrifuge*, bien que cette appellation soit incorrecte⁽⁵⁾.

En effet, centrifuge signifie "*qui éloigne du centre*", allusion explicite à la trajectoire circulaire de la voiture.

Or, dans le référentiel voiture, cette trajectoire n'existe pas, il n'est donc pas possible de la prendre en compte. Toute allusion à la vitesse ou à la trajectoire de la voiture implique de raisonner dans le référentiel Terre.

Mais dans le référentiel Terre, c'est la force centrifuge qui n'existe pas ! Choisir un référentiel est donc bien un choix exclusif et les deux systèmes ne peuvent coexister.

Une double confusion...

De la confusion des mots à la confusion des référentiels, il n'y a qu'un pas, vite franchi.

« *La force centrifuge s'exerce sur les passagers et les bagages. Les passagers et les bagages sont installés dans la voiture. La force centrifuge s'exerce donc forcément aussi sur la voiture !... »*

Ce syllogisme provient du mélange toxique de deux référentiels.

La force observée dans la voiture ne s'exerce pas sur la voiture.

...aux conséquences catastrophiques !

Cette double confusion est à l'origine du fameux concept de force centrifuge, dogme fondateur de l'esprit "sécurité routière". « *Un cheval bon marché est cher, vraiment très cher !...* » s'oblige-t-on à répéter dans le monde de l'automobile, depuis des lustres, et de la manière la plus officielle qui soit...

En résumé...

Un même phénomène peut être décrit à partir de deux référentiels qu'on ne doit ni confondre, ni mélanger : l'un est absolu, l'autre est relatif.

Dans un référentiel absolu, la force centrifuge n'existe pas. Dans un référentiel relatif, c'est le mouvement qui n'existe pas.

Le concept de force centrifuge relève d'une double confusion de mots et de référentiels. Désormais, nul ne l'ignore ou n'est censé l'ignorer.

« *Un cheval bon marché n'est vraiment pas cher !...* »

Les deux définitions...

La nécessaire distinction entre deux référentiels aboutit tout naturellement à deux définitions antagonistes du concept de force :

Dans le référentiel Terre : « *On appelle force de guidage la force réelle qui s'exerce par contact sur les pneumatiques d'une voiture en mouvement pour la dévier d'une trajectoire rectiligne et lui imposer une trajectoire circulaire.* »

Dans le référentiel voiture : « *On appelle force centrifuge la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité des passagers et des bagages d'une voiture immobile pour les voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité.* »

Les deux formules...

Ces deux définitions sont si discordantes qu'elles imposent évidemment d'utiliser deux formules distinctes pour d'éventuels calculs. Là encore, gare aux confusions.

La *force de guidage* s'exprime à partir de la relation suivante :

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

Dans cette relation, **F** est la force de guidage, **M** est la masse de voiture, **V** sa vitesse et **R** le rayon de sa trajectoire. Ces grandeurs n'existent que dans le référentiel Terre, elles n'existent pas si la voiture est immobile. C'est pourquoi cette formule ne peut exprimer que la force de guidage et rien d'autre.

Quelle relation doit-on alors utiliser pour exprimer la *force centrifuge* ? Celle-ci, et uniquement celle-ci :

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

Dans cette relation, **F'** est la force centrifuge, **M** est la masse du passager ou des bagages, **Y** est l'accélération transversale calculée d'après les mesures extraites du référentiel absolu (vitesse, rayon de trajectoire).

Remarque : le signe [''] indique que ces deux forces ne sont pas interchangeables, celle-ci étant d'une nature différente de la précédente, tandis que le signe [-] précise son orientation spatiale, contraire à la logique du mouvement.

Le principe de réciprocité...

Qui dit force dit action réciproque. Rappelons le principe de réciprocité énoncé par Isaac Newton :

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

Ce principe s'applique-t-il indistinctement quel que soit le référentiel ? Non.

- Dans le référentiel Terre : la force de guidage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol. On en déduit que la voiture exerce une action réciproque sur le globe terrestre par le biais des pneumatiques, d'égale intensité mais de sens opposé. Cette action réciproque n'a pas de conséquence sur le mouvement de rotation du globe terrestre, étant donné le rapport des masses en jeu (voiture *versus* globe terrestre).

Le même raisonnement concerne les passagers et les bagages : la force de guidage s'exerce sur les passagers par l'intermédiaire de la carrosserie, des portières et des fauteuils. On en déduit que les passagers exercent une action réciproque sur les fauteuils, les portières et la carrosserie, d'égale intensité mais de sens opposé⁽⁶⁾. Cette action réciproque n'a pas de conséquence sur la trajectoire circulaire de la voiture, étant donné le rapport des masses en jeu (passagers *versus* voiture)⁽⁷⁾.

- Dans le référentiel voiture : la force apparente, dite « force centrifuge », est une force imaginaire qui, en réalité, n'existe pas. Le principe de réciprocité est donc rigoureusement inapplicable. Pas d'action, pas de réaction.

Conclusion

La description d'un mouvement exige de choisir un référentiel. L'un est absolu, l'autre est relatif. Le choix est définitif et entraîne de sérieuses conséquences.

Dans un référentiel absolu, la description est complète.

Dans un référentiel relatif, la description est tronquée, le mouvement n'est qu'apparent, les forces sont imaginaires et le principe de réciprocité est inapplicable.

La distinction entre ces deux référentiels aboutit à deux définitions antagonistes du concept de force, et donc à deux formules parfaitement distinctes.

« Un cheval est cher ou pas cher, mais c'est l'un ou l'autre !... »

(1) *Un système de repérage comprend trois axes orthogonaux (longueur, largeur, hauteur) avec une origine commune, auxquels on associe une mesure de temps (chronomètre).*

(2) *Le Soleil est supposé immobile car, en réalité, le Système solaire se déplace à la vitesse d'environ 250 kilomètres par seconde autour du centre de notre galaxie, la Voie lactée (voir dossier ADILCA "système solaire").*

(3) *Référentiel absolu : appelé aussi "référentiel galiléen" ou "référentiel inertiel". Un référentiel est dit absolu quand il autorise une description cohérente d'un ensemble de mouvements indépendants les uns des autres (exemple : le Soleil par rapport au mouvement des planètes du Système solaire). Attention : le statut d'un référentiel n'a rien d'immuable, tout dépend de ce que l'on souhaite étudier : la Terre, référentiel relatif pour décrire le mouvement des planètes du système solaire, devient un référentiel absolu pour décrire le mouvement des automobiles (à l'effet Coriolis près !), puisque celles-ci se déplacent par rapport à la Terre (c'est leur unique finalité). Décrire le mouvement des véhicules terrestres par rapport au Soleil n'aurait aucun sens.*

(4) *Référentiel relatif : appelé aussi "référentiel non galiléen" ou "référentiel non inertiel". Tout corps animé d'un mouvement dans un référentiel absolu peut à son tour recevoir son propre système de repérage, ce qui lui confère alors le statut de référentiel relatif (exemples : la Terre par rapport au Soleil ; une voiture par rapport à la Terre). Attention : pour remplir sa fonction de référentiel, le corps en question doit être considéré comme parfaitement immobile, ce qui interdit de décrire son mouvement propre. Il s'ensuit que le mouvement observé à partir d'un référentiel relatif est un mouvement apparent qui ne peut s'expliquer que par l'introduction d'une force imaginaire. Ne pas confondre la théorie des référentiels avec les descriptions statique et dynamique (voir dossier ADILCA "statique & dynamique").*

(5) *L'appellation correcte serait : force fictive, force imaginaire, force apparente ou pseudo-force.*

(6) *Cette action réciproque est parfaitement ressentie par le passager, elle lui donne l'impression de peser sur le bord du fauteuil, sur la portière ou la carrosserie. Les plus crédules y ont vu une manifestation de la force centrifuge... Rappelons qu'il est évidemment impossible de ressentir les effets d'une force imaginaire.*

(7) *Masse du globe terrestre (T) : 6×10^{24} kg. Masse de la voiture (V) : $1,5 \times 10^3$ kg. Masse d'un passager (P) : $0,1 \times 10^3$ kg. Rapport T/V : 4×10^{21} . Rapport V/P : 15. Rapport T/P : 60×10^{21} .*

IV. RÉFÉRENTIEL ABSOLU OU RELATIF : LE MODE DE CALCUL

A. RÉFÉRENTIEL ABSOLU (en automobile : la Terre)

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⁻¹**

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

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

Exemple 1 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur une voiture de masse 1500 kg décrivant une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$F = 1\,500 \times 20^2 / 100 = 1\,500 \times 400 / 100 = 6\,000 \text{ N}$$

Cette force s'exerce dans la surface de contact au sol des pneumatiques. En vertu du principe de réciprocité, les pneumatiques exercent une poussée horizontale sur le sol, d'égale intensité mais de sens opposé.

Exemple 2 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur un passager de masse 100 kg installé à bord d'une voiture décrivant une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$F = 100 \times 20^2 / 100 = 100 \times 400 / 100 = 400 \text{ N}$$

Cette force provient des pneumatiques, elle se transmet au passager par l'intermédiaire de la carrosserie et du fauteuil. En vertu du principe de réciprocité, le passager exerce une poussée sur le fauteuil et la carrosserie, d'égale intensité mais de sens opposé, ce qu'il ressent parfaitement et qui n'a rien à voir avec la force centrifuge.

2. Accélération transversale

$$Y = V^2 / R$$

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

V : vitesse, exprimée en **m.s⁻¹**

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

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

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une voiture décrivant une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 mètres par seconde :

$$Y = 20^2 / 100 = 400 / 100 = 4 \text{ m.s}^{-2}$$

Cette accélération transversale est commune à la voiture, aux passagers et aux bagages (c'est logique si les passagers et les bagages restent à bord), elle est fournie par la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques de la voiture au contact du sol, elle se transmet par l'intermédiaire des roues, du châssis, de la carrosserie et des fauteuils en ce qui concerne les passagers, des contours du coffre à bagages et des sangles de maintien en ce qui concerne le chargement.

B. RÉFÉRENTIEL RELATIF (en automobile : la voiture)

Force imaginaire, dite « force centrifuge »

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

F' : force imaginaire, dite « 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**

Exemple 1 : calculons la force, dite « force centrifuge », qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'un passager de masse 100 kg installé à bord d'une voiture immobile afin de lui procurer une sensation identique à celle qu'il éprouve dans la réalité lorsque la voiture est soumise à une accélération transversale de 4 mètres par seconde carrée :

$$F' = - 100 \times 4 = - 400 \text{ N}$$

Un raisonnement identique s'applique pour décrire le mouvement apparent des bagages non arrimés, lorsque ceux-ci glissent sur le plancher du coffre pour venir au contact de la carrosserie de la voiture.

Exemple 2 : calculons la force, dite « force centrifuge », qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'un sac de voyage de masse 2 kg posé au centre du coffre d'une voiture immobile pour le faire glisser jusqu'au contact avec la carrosserie, comme lorsque la voiture est soumise à une accélération transversale de 4 mètres par seconde carrée :

$$F' = - 2 \times 4 = - 8 \text{ N}$$

Remarque 1 : le signe ['] indique que cette force est d'une nature différente de celle de la force de guidage ; le signe [-] est obligatoire, il précise l'orientation spatiale de cette force, contraire à la logique du mouvement.

Remarque 2 : cette force imaginaire, dite « *force centrifuge* », est une force supposée s'exercer sur le centre de gravité, tandis que la force de guidage est une force de contact.

Remarque 3 : gare aux déductions hâtives ; l'égalité numérique des résultats n'autorise pas l'interchangeabilité des raisonnements.

Remarque 4 : cette force est couramment nommée « *force centrifuge* », ce qui est une appellation incorrecte puisqu'il n'y a ni trajectoire, ni rayon, ni centre (la voiture est immobile). Cette force devrait être appelée force fictive, force imaginaire, force apparente ou pseudo-force.

Remarque 5 : la traçabilité du raisonnement impose d'effectuer les différents calculs dans l'ordre indiqué, en partant du référentiel absolu pour aboutir à un référentiel relatif. Il est en effet impossible de calculer directement la force centrifuge en l'absence de données qui n'existent que dans le référentiel absolu (vitesse, rayon de trajectoire, accélération transversale).

Remarque 6 : toute démarche scientifique passe obligatoirement par quatre étapes successives :

- 1) observer un *phénomène* (ici, une voiture qui décrit une trajectoire circulaire) ;
- 2) mesurer des *grandeurs* (ici : la masse de la voiture, sa vitesse et le rayon de sa trajectoire) ;
- 3) effectuer des *calculs* (ici : le calcul de la force de guidage et de l'accélération transversale) ;
- 4) éventuellement, transposer un *raisonnement* (ici : transformation d'une description réelle en une description imaginaire avec l'introduction du concept de force centrifuge). Cette dernière étape est facultative puisqu'elle n'apporte rien, si ce n'est un risque de confusion entre la réalité et la fiction.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

V. BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA : *Les Lois Physiques de l'Automobile* (dossiers thématiques), Paris 2015.
- 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.
- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *