

LES RÉFÉRENTIELS

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

II. RÉFÉRENTIEL ABSOLU OU RELATIF : LE MODE DE CALCUL

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. 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 sous prétexte qu'il ne s'agirait finalement que d'une simple question de référentiel.

Qu'est-ce qu'un référentiel ? Combien en existe-t-il ? Se valent-ils ? 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 d'un raisonnement logique.

Syllogisme ou sophisme?

« Un cheval bon marché est rare. Tout ce qui est rare est cher. Donc 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 ensemble de trois repères (longueur, largeur, hauteur) à l'origine commune permettant de mesurer les caractéristiques du mouvement d'une masse telles que la distance parcourue, la vitesse, le rayon d'une trajectoire ou la variation d'altitude.

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.

Ces repères qui définissent un référentiel, où doit-on les placer ? Il y a deux possibilités. Prenons un exemple universel.

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.

Le Soleil est alors supposé immobile et l'origine des repères qui permettent de décrire le mouvement des planètes se place en son centre ⁽¹⁾. Le Soleil est alors un *référentiel absolu* ⁽²⁾.

Ceci précisé, mettons-nous à la place d'un habitant de notre planète qui ignorerait tout de la mécanique céleste et qui serait persuadé que la Terre est immobile : cette fois, l'origine des repères se placerait au centre du globe terrestre. Dès lors, cette personne scrutant le ciel aurait l'impression que le Soleil est animé d'un *mouvement apparent*.

Pour différencier cette description de la précédente, on dit que la Terre est alors un *référentiel relatif* ⁽³⁾.

À l'évidence, ces deux référentiels livrent deux descriptions contradictoires, c'est pourquoi il est nécessaire d'en préciser le mode d'emploi.

Référentiel relatif, mode d'emploi

La description d'un mouvement à partir d'un référentiel relatif entraîne deux conséquences :

1. Le référentiel relatif (dans notre exemple : la Terre) est supposé 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.

Appliquons ces principes à la description du mouvement des automobiles.

Les deux référentiels en automobile...

Les véhicules terrestres étant 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.

Les automobiles évoluant dans un espace à deux dimensions, il est plus commode de placer l'origine des repères à la surface du globe, sur une borne kilométrique par exemple, ou sur tout autre point fixe à partir duquel il sera possible de mesurer la distance parcourue, le dénivelé, la vitesse et le rayon des trajectoires.

Si la Terre est le référentiel absolu, quel est le référentiel relatif ? C'est la voiture elle-même. L'origine des repères est alors placée au centre de l'habitacle.

Attention ! Appliquons le même mode d'emploi que dans l'exemple du système solaire : 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 qui, en réalité, n'existent pas.

Dès lors, choisir un référentiel entraîne de sérieuses conséquences. Pour éviter toute erreur, voici un rappel des trois règles d'or.

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.

Par conséquent, 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 est considéré comme immobile, il ne permet 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 est celui d'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 des systèmes qui ne sont, ni opposés, ni symétriques, ni complémentaires. Ils sont simplement différents. 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. Attention donc ! Une fois les observations faites, gare aux conclusions erronées...

Un exemple à méditer...

Ces trois règles sont déterminantes, ainsi que le démontre l'exemple suivant.

Considérons une voiture qui circule à 120 km/h sur une autoroute : dans le référentiel Terre, la vitesse du conducteur ceinturé sur son siège est de 120 km/h, dans le référentiel voiture, cette vitesse est strictement égale à 0, elle n'existe pas !

C'est bien la preuve qu'il n'est pas question de confondre ces deux référentiels, ni de les mélanger.

Le problème du virage...

Quelle est l'explication correcte des phénomènes lorsque la voiture décrit une trajectoire circulaire ? Quelles sont les forces mises en jeu ?

Rappelons d'abord qu'une force désigne « *Toute cause capable de modifier la vitesse ou la trajectoire d'une masse* » puisque telle est la définition officielle retenue pour l'élaboration du Système International d'Unités adopté partout dans le monde.

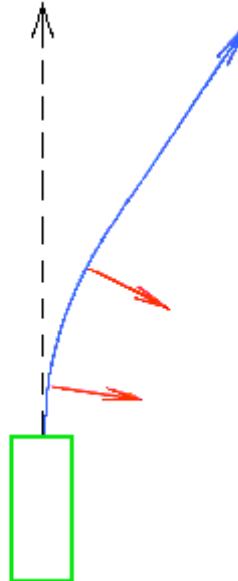
Considérons une voiture qui circule en ligne droite et dont le conducteur s'apprête à négocier un virage.

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*.

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 siège, 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.



© 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 rectiligne (flèche bleue).

Le même... vu de l'intérieur!

Dans le référentiel voiture, les images de la caméra embarquée montrent que les passagers 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, c'est la *force centrifuge*, elle est supposée s'exercer sur le centre de gravité de chacun des passagers, elle ne peut apparaître que dans un référentiel relatif, elle ne peut concerner que les passagers et les bagages.

Appellation non contrôlée...

Cette force qui n'existe pas mais qui fait tant fantasmer est universellement connue sous le nom de *force centrifuge*. Elle a été baptisée ainsi par certains théoriciens zélés, bien que cette appellation soit totalement incorrecte⁽⁴⁾.

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.

« *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 de la confusion entre deux référentiels qui sont pourtant deux univers indépendants.

La force observée dans la voiture ne peut en aucun cas s'exercer 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 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 : 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 donc d'une confusion 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 distinction entre ces deux référentiels aboutit tout naturellement à deux définitions antagonistes du concept de force :

Dans le référentiel Terre, on appelle *force de guidage* la force de contact qui s'exerce 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 les calculs.

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.

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

$$\mathbf{F}' = - \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y}$$

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 cette force est d'une nature différente de la précédente, tandis que le signe [-] précise son orientation spatiale, contraire à la logique du mouvement.

Conclusion

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

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

(1) *Le Soleil est supposé immobile. En réalité, le système solaire se déplace à la vitesse d'environ 250 kilomètres par seconde mais, pour décrire ce mouvement, il serait nécessaire de changer de référentiel et adopter celui de la Voie lactée comme référentiel absolu, le Soleil devenant alors un référentiel relatif (voir dossier ADILCA "système solaire").*

(2) *Référentiel absolu* : appelé aussi "référentiel galiléen" ou "référentiel inertiel". Contrairement à une erreur largement répandue, le statut d'un référentiel n'a rien d'immuable, tout dépend de ce que l'on souhaite étudier : la Terre est le 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 d'un véhicule terrestre par rapport au Soleil n'aurait aucun sens. Par contre, la Terre devient un référentiel relatif lorsqu'il s'agit de décrire le mouvement des planètes du système solaire puisque que celles-ci se déplacent par rapport au Soleil et non par rapport à la Terre.

(3) *Référentiel relatif* : appelé aussi "référentiel non galiléen" ou "référentiel non inertiel". Les définitions qui s'y rapportent sont toutes plus tarabiscotées les unes que les autres, rarement assorties d'un mode d'emploi, et encore moins illustrées d'exemples ! Mais, quelle que soit l'appellation, la règle reste toujours la même : un référentiel relatif doit être considéré comme parfaitement immobile, ce qui interdit de décrire son mouvement propre. Il s'ensuit que le mouvement observé à partir du référentiel voiture est un mouvement apparent qui, en réalité, n'existe pas. D'où un certain nombre de confusions et d'erreurs, y compris dans certains ouvrages de physique (voir dossiers ADILCA "force centrifuge", "force d'inertie", "Cessac & Tréherne").

(4) *Les physiciens soucieux d'exactitude scientifique devraient s'engager à renoncer à cette appellation trompeuse et lui préférer celle de force apparente, force imaginaire, force fictive ou pseudo-force.*

II. 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.

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 est fournie par les pneumatiques au contact du sol, elle s'exerce sur le passager par l'intermédiaire des roues, du châssis, de la carrosserie et du fauteuil.

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'un passager installé à bord 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, de la carrosserie du coffre à bagages en ce qui concerne le chargement.

B. RÉFÉRENTIEL RELATIF (en automobile : la voiture)

Force apparente, dite « force centrifuge »

$$F' = - M . Y$$

F' : force apparente, 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 : 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 : 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 [\prime] 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 apparente, 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 qui s'exerce à la périphérie des pneumatiques.

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 apparente, force imaginaire, force fictive 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 au 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 correspondante) ;
- 4) éventuellement, transposer un *raisonnement* (ici : passage d'une description réelle à une description imaginaire avec l'introduction du concept de force centrifuge).

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *