

LES RÉFÉRENTIELS

I. RÉFÉRENTIEL ABSOLU ET RÉFÉRENTIEL RELATIF

II. RÉFÉRENTIEL ABSOLU OU RELATIF : LE MODE DE CALCUL

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. RÉFÉRENTIEL ABSOLU ET RÉFÉRENTIEL RELATIF

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 ? Quel en est le mode d'emploi ? Ces fameux référentiels se valent-ils ? 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 de l'imposture.

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 des systèmes ne l'est plus dans l'autre.

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

Définitions

Qu'est-ce qu'un *référentiel* ? Ce terme désigne un ensemble de repères qui permettent de mesurer les caractéristiques du mouvement d'une masse telles que la distance parcourue, la vitesse ou le rayon d'une trajectoire.

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.

Où doit-on placer ces repères qui définissent un référentiel ? 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 qualifié d'*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 véhicules terrestres 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, la vitesse ou le rayon d'une trajectoire.

Si la Terre est le référentiel absolu, quel est le référentiel relatif ? C'est la voiture elle-même. L'origine des repères est placée en son centre.

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 tout ce qu'il se passe à l'intérieur.

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 par exemple 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 sensations n'interfèrent avec les phénomènes observés, le poste d'observation idéal est placé 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 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, obligatoire en France depuis 1961.

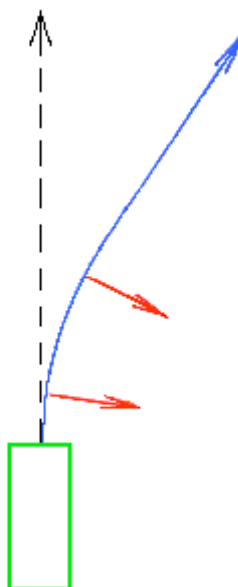
Considérons une voiture qui circule en ligne droite et dont le conducteur s'apprête à négocier un virage.

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 fictive* pour expliquer ce mouvement.

Cette force fictive, 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 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...

Conclusion

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 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 du tout !..."

(1) *Le Soleil pris comme référentiel 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 qui deviendrait alors le référentiel absolu (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 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, mais c'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.*

(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, qu'il soit absolu ou 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 et lui préférer celle de force fictive, force imaginaire, force apparente ou pseudo-force.*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

II. RÉFÉRENTIEL ABSOLU OU RELATIF : LE MODE DE CALCUL

A. Référentiel absolu

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 : 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 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 :

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

Cette accélération transversale, d'orientation centripète, provient de la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol, elle est transmise au passager par l'intermédiaire des roues, du châssis, de la carrosserie et du fauteuil.

B. Référentiel relatif

1. Force dite « centrifuge »

$$F' = - F$$

F' : force dite « *centrifuge* », exprimée en **N**

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

cohérence des unités : $F' = N$

Exemple : calculons la force dite « *centrifuge* » qu'il faudrait exercer le centre de gravité d'un passager de masse 100 kg installé dans une voiture immobile pour le voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité lorsqu'il est soumis à une force de guidage de 400 N :

$$F' = - 400 \text{ N}$$

2. Accélération dite « centrifuge »

$$Y' = - Y$$

Y' : accélération dite « *centrifuge* », exprimée en **m.s⁻²**

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

cohérence des unités : $Y' = \text{m.s}^{-2}$

Exemple : calculons l'accélération dite « *centrifuge* » qu'il faudrait communiquer au passager d'une voiture immobile pour le voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité lorsque l'accélération transversale est égale à 4 m.s⁻² :

$$Y' = - 4 \text{ m.s}^{-2}$$

Remarque 1 : cette accélération est qualifiée de « *centrifuge* », c'est une appellation incorrecte puisqu'il n'y a ni vitesse, ni rayon de trajectoire, ni centre (la voiture est immobile).

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

Remarque 3 : attention aux interprétations erronées, l'égalité numérique des résultats (au signe près) n'autorisant pas l'interchangeabilité des référentiels.