

LA FORCE DE GUIDAGE

I. LES LOIS DE NEWTON

II. FORCE DE GUIDAGE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

III. FORCE DE GUIDAGE : LE MODE DE CALCUL

- 1. Accélération transversale**
- 2. Coefficient d'adhérence**
 - 3. Force de guidage**
 - 4. Centre de gravité**
- 5. Guidage du train avant**
- 6. Composante transversale**
- 7. Guidage du train arrière**
- 8. Mouvement de roulis**

IV. 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 s'appliquent-elles dans le cas d'un véhicule terrestre qui décrit une trajectoire circulaire ?

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

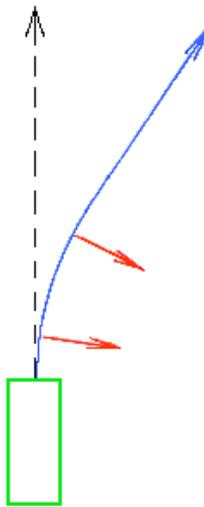
* * *

II. FORCE DE GUIDAGE : LA VÉRITABLE DÉFINITION

Dans un dossier ADILCA à lire par ailleurs ("*force centrifuge*"), nous avons démontré que la force centrifuge est une force imaginaire, la seule force à considérer quand la voiture décrit une trajectoire circulaire étant la force de guidage. Quelques précisions sont maintenant nécessaires car de nouvelles questions se posent. Par exemple celles-ci : qu'est-ce qu'une force, au sens physique du terme ? Comment visualiser une force ? D'où provient la force de guidage et comment la représenter ? Quelle est la vraie nature de cette force ? Comment peut-on l'exprimer et la calculer ? Et qu'est-ce que cela change concrètement ? C'est à toutes ces questions que nous répondons ici.

Un principe fondamental

Il y a trois siècles, un physicien du nom d'Isaac Newton décidait de repenser la physique en formulant les lois universelles du mouvement. Entre autres règles, Newton énonçait le *principe d'inertie rectiligne* : la trajectoire naturelle d'une masse en mouvement est une ligne droite. Pour dévier cette trajectoire, il faut une cause, c'est-à-dire une force. La définition précise de ce terme découle donc du principe précédent : une force désigne toute cause capable de dévier la trajectoire d'une masse.



© association adilca reproduction interdite

Principe de Newton : pour dévier une masse de sa trajectoire naturelle (flèche noire en pointillés), il faut solliciter une force transversale, ici représentée par une flèche rouge.

Comment visualiser une force ?

Observons un enfant tirer un jouet au bout d'une ficelle. La tension de la ficelle et le mouvement du jouet illustrent parfaitement la notion de force. En l'occurrence il s'agit

d'une force longitudinale, mais le raisonnement vaut aussi pour une déviation de trajectoire, car selon le principe de Newton, celle-ci résulte de l'action d'une force transversale. Pour se représenter ce type de force, il suffit donc, dans un premier temps, d'imaginer le jouet en mouvement sur une trajectoire rectiligne, puis dans un deuxième temps, concevoir qu'une main invisible tire transversalement sur une ficelle pour dévier le jouet de sa trajectoire naturelle.

L'application à l'automobile

Ce concept s'applique-t-il à l'automobile ? Tous les automobilistes savent par expérience que la trajectoire naturelle d'une voiture est une ligne droite, c'est une vérification concrète du principe de Newton. Négocier un virage ne va donc pas de soi. Si le conducteur veut pouvoir se diriger, il doit solliciter une force afin de dévier la trajectoire naturelle de la voiture. Évidemment, il n'y a ni main invisible, ni ficelle : le conducteur se contente de tourner le volant. Quel est donc le phénomène mis en jeu dans cette action ?

Les roulettes du caddie® ...

La rotation du volant entraîne le pivotement des roues directrices, c'est donc par le biais de celles-ci que se manifeste cette mystérieuse force. Une banale observation permet d'en comprendre le principe. Avez-vous remarqué combien il est difficile de pousser un chariot de supermarché si une des roulettes n'est pas parfaitement alignée ? La trajectoire erratique du chariot s'explique par la force indésirable que la roulette mal alignée exerce au contact du sol.

...et celles de la voiture

C'est un principe identique qui permet de diriger la voiture. La rotation du volant entraîne le pivotement des roues directrices avec, pour corollaire, la création d'une force transversale que le pneumatique exerce au contact du sol. Cette force s'appelle la *force de guidage*. C'est grâce à ce principe que le conducteur peut contrôler la trajectoire de la voiture, il n'y a pas d'autre force mise en jeu à cette occasion. L'énigme de la trajectoire circulaire est maintenant résolue. Il reste à cerner les caractéristiques de cette force.

Comment dessiner une force ?

La meilleure solution pour dessiner une force consiste à la représenter par une flèche, de préférence de couleur rouge, car cette couleur symbolise bien le concept de force. Mais attention à bien isoler les phénomènes : un petit effort de représentation mentale est nécessaire. La vitesse de la voiture, par exemple, est une grandeur supposée constante durant tout le virage, elle ne peut varier qu'avec la force de traction ou de freinage, il vaut donc mieux l'oublier.

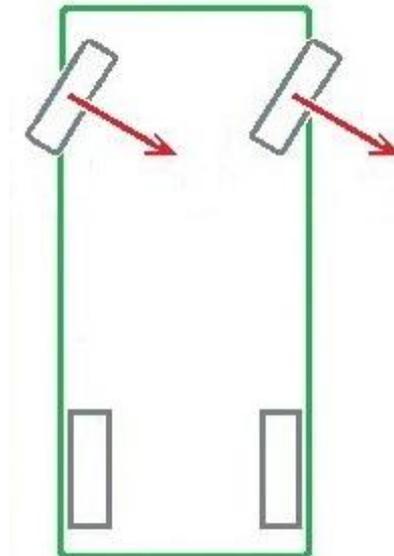
Et surtout, pas de mélange ! Rappelons encore une fois l'interdiction formelle d'additionner deux vecteurs représentant des grandeurs de natures différentes. On ne mélange pas les pommes et les poires, ni les forces et les trajectoires. Autrement dit, sur un dessin censé représenter une force, il est déconseillé de faire figurer quoi que ce soit d'autre, comme une trajectoire, par exemple, sauf à la dessiner en pointillé ou en utilisant une autre couleur. De toutes manières, pas besoin d'en rajouter ni de surcharger le dessin puisqu'une seule force est nécessaire pour inscrire la voiture sur une trajectoire circulaire. Il suffit donc de bien la choisir et de l'orienter correctement.

Faire table rase du passé...

Ce n'est pas tout : un lavage de cerveau est indispensable ! Il faut oublier tout ce qui s'est dit sur le sujet depuis des lustres, en particulier ces fameuses descriptions farfelues qui nous encombrant l'esprit et auxquelles chacun tente de se raccrocher par naïveté, par paresse ou par ignorance. Il faut faire table rase du passé. En effet, si les descriptions ne manquent pas, elles ont toutes en commun le fait d'occulter la seule force qui existe vraiment.

La force de guidage en dessin

Place au dessin. La force qui dévie la trajectoire de la voiture prend naissance dans la surface de contact au sol de chacune des deux roues directrices. Elle se représente par une flèche, perpendiculaire au plan de rotation des roues, orientée vers l'intérieur du virage, c'est-à-dire du côté où la voiture est déviée.

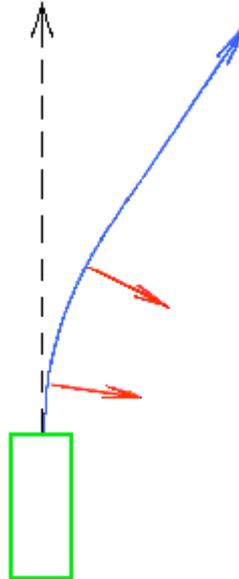


© association adilca reproduction interdite

La force de guidage s'exerce à la périphérie des roues directrices au contact du sol.

Un petit « truc » pour vérifier...

Pas de vraie description scientifique sans vérification. Mais comment vérifier la validité d'un dessin ? Il suffit d'un peu de bon sens et d'un petit effort d'imagination qui consiste à remplacer mentalement la flèche censée représenter une force par une ficelle sur laquelle tirerait une main invisible...



© association adilca reproduction interdite

Pour visualiser une force, remplacez la flèche rouge par une ficelle sur laquelle on tire !

Si la représentation est correcte, le mouvement imaginaire se traduit bien par une déviation de trajectoire telle qu'on pourrait l'observer sur le terrain.

Tant que vous y êtes, servez-vous aussi de ce « truc » pour tester les dessins qui vous passent entre les mains. Pas besoin de lourde démonstration scientifique, vous saurez tout de suite si la description tient la route ou pas (c'est le cas de le dire !)

Force de guidage et force centripète

Quelle est la vraie nature de la force de guidage ? Peut-on la qualifier de *force centripète* ? « *Centripète* » signifie à la fois « *qui attire vers un centre* » et « *qui s'exerce sur un centre* »

Première évidence : la voiture n'est pas attirée vers le centre de sa trajectoire, elle n'en prend jamais le chemin, elle est simplement déviée d'une trajectoire rectiligne.

Deuxième évidence : la force de guidage ne s'exerce pas sur le centre de gravité de la voiture mais à la périphérie des pneumatiques des roues directrices. Rappelons au

passage qu'il est évidemment impossible d'exercer la moindre force sur le centre de gravité de quelque masse que ce soit⁽¹⁾.

Logiquement d'ailleurs, seule une force agissant à distance pourrait être qualifiée de centripète, mais il n'en existe que deux qui satisfont cette exigence : la force électromagnétique et la force de gravitation (voir le dossier ADILCA "*force centripète*").

La force de guidage n'est donc pas centripète. Quelle est sa nature exacte ?

Une force de contact

La force de guidage est une force de contact comme il en existe une infinité, telle que celle que l'on sollicite pour saisir un objet entre les doigts. Tout comme la pression exercée sur l'objet, le poids qui pèse sur la roue est un facteur important qui conditionne en grande partie l'intensité de cette force, mais ce n'est pas le seul.

En effet, entre le pneumatique et le revêtement routier peuvent se créer des affinités de contact qui proviennent de minuscules charges électriques agissant à l'échelle des atomes. Ces affinités permettent à la gomme de la bande de roulement d'exploiter la rugosité du revêtement routier.

L'adhérence est le résultat de cet ensemble de facteurs. Ainsi s'expliquent nombre de phénomènes a priori incompréhensibles : à masse égale sur sol rugueux et propre, des pneumatiques larges adhèrent mieux que d'autres plus étroits, des pneumatiques garnis de gomme tendre adhèrent mieux que d'autres à gomme plus dure, etc. (voir le dossier ADILCA "*adhérence et glissement*").

Force de guidage : la véritable définition

Ce qui précède nous amène à cette définition originale et inédite de la force de guidage :

« On appelle force de guidage toute force de contact, de pression ou de frottement capable de dévier la trajectoire d'une masse. »

Une définition inédite ? Oui, car il faut rappeler une fois de plus que cette force si importante, sollicitée chaque jour par des millions de conducteurs, n'est nommée ou décrite nulle part. C'est à croire que les physiciens en ignoraient l'existence ou ont fait comme si elle n'existait pas.

Force de guidage : la bonne formule

Quelle relation utiliser pour exprimer la force de guidage ? Bien sûr, tout le monde connaît la célèbre formule magique, celle qu'on utilise un peu partout, à tort et à travers :

$$\mathbf{F} = \mathbf{MV}^2/\mathbf{R}$$

Attention : contrairement à une idée reçue, cette formule n'exprime pas, n'a jamais exprimé et ne pourra jamais exprimer la *force centrifuge*, mais uniquement la force de guidage. Pour le démontrer, rien de mieux que les mathématiques...

Rappelons d'abord que la force centrifuge est une force fictive qui apparaît uniquement dans le cadre de descriptions imaginaires, comme une description statique (voir le dossier ADILCA "*statique et dynamique*"), ou celle prenant le véhicule comme référentiel (voir le dossier ADILCA "*référentiels*").

Or, ce qui caractérise ce genre de description, c'est l'absence de mouvement : on raisonne comme si rien ne bougeait, comme si le « mobile » était immobile. Dans ces conditions, la vitesse est toujours nulle, bien évidemment. Si on tente d'appliquer la fameuse formule, on obtient le résultat suivant :

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

Zéro, symbole du néant, de ce qui n'existe pas. Sans même évoquer le rayon de la trajectoire, qui n'existe pas non plus puisque la voiture est immobile, mais qu'on a considéré ici, faute de mieux, comme un réel non nul. Bref, dans ce genre de description, la formule est rigoureusement inapplicable. C.Q.F.D.

En réalité, bien sûr, il n'y a pas de rayon de trajectoire sans mouvement, donc sans vitesse, et la vitesse n'existe que dans le cadre de la description d'un mouvement. Et là ça marche ! La formule s'applique donc si, et uniquement si, on considère une masse (**M**) animée d'une vitesse (**V**) et décrivant une trajectoire circulaire de rayon (**R**).

Autrement dit, la célèbre formule $\mathbf{F} = \mathbf{MV}^2/\mathbf{R}$ se rapporte bien uniquement à la dynamique, et donc à la force de guidage, mais à elle seule⁽²⁾.

Application numérique

Prenons l'exemple d'une voiture de masse 1 500 kg qui décrit une trajectoire circulaire de 100 m de rayon à la vitesse de 20 m.s⁻¹ et calculons d'abord l'intensité de la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques de la voiture au contact du sol :

$$\mathbf{F} = \mathbf{MV}^2/\mathbf{R}$$

$$\mathbf{F} = 1\,500 \times 20^2 / 100$$

$$\mathbf{F} = 1\,500 \times 400 / 100$$

$$\mathbf{F} = 1\,500 \times 4 = 6\,000 \mathbf{N}$$

Gare aux unités⁽³⁾ !

Les limites de la fonction

Allons plus loin. Quelles sont les limites de la fonction $F = MV^2/R$ par rapport à R (rayon de trajectoire) ?

Si on considère qu'un demi-tour sur place est une courbe de rayon nul, on peut, à l'aide de la relation précédente, écrire que :

$$F = MV^2/R = MV^2 / 0 = \infty$$

On en déduit que le demi-tour sur place est impossible, car il nécessiterait une force de guidage d'intensité infinie. Inversement, si on considère qu'une ligne droite est une courbe de rayon infini, on peut, à l'aide de la relation précédente, écrire que :

$$F = MV^2/R = MV^2 / \infty = 0$$

On en déduit que la trajectoire rectiligne résulte d'une absence de guidage. C'est bien ce qui se produit en ligne droite ou dans le cas d'une sortie de route : si la force de guidage est absente ou insuffisante, la voiture décrit ou retrouve une trajectoire rectiligne.

Quelles sont maintenant les limites de la fonction $F = MV^2/R$ par rapport à V (vitesse) ?

On constate que, toutes conditions égales par ailleurs, la force de guidage varie en fonction du *carré de la vitesse*. Autrement dit, l'intensité de la force de guidage doit être doublée quand la vitesse de passage en courbe est seulement multipliée par la valeur $2^{1/2}$, soit 1,414.

Le tableau suivant résume la corrélation entre la vitesse de la voiture et la force de guidage nécessaire pour décrire une trajectoire circulaire imposée (la valeur 1 a été arbitrairement corrélée à une vitesse de 50 km.h^{-1} pour servir de référence) :

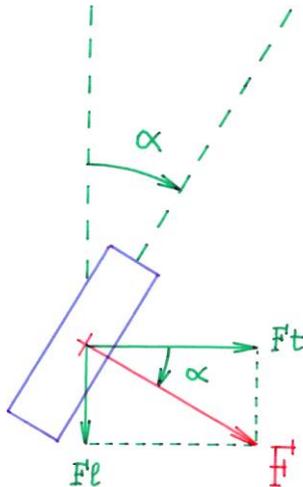
vitesse (km.h^{-1})	50	60	70	80	90
force de guidage (N)	1	1,5	2	2,6	3,3

© association adilca reproduction interdite

Les deux composantes de la force de guidage

Détaillons le phénomène de guidage : lorsque le conducteur actionne la commande de direction, les roues directrices pivotent. L'angle de pivotement a pour conséquence de répartir la force de guidage selon deux composantes : l'une est transversale, l'autre est longitudinale⁽⁴⁾.

La composante transversale permet le changement de cap de la voiture, tandis que la composante longitudinale agit comme une force de freinage⁽⁵⁾.



© association adilca reproduction interdite

Les deux composantes de la force de guidage F :
 F_t : composante transversale (changement de cap).
 F_l : composante longitudinale (freinage).
 α : angle de pivotement des roues directrices.

Les réactions de la voiture

La hauteur du centre de gravité et la distance qui le sépare des roues directrices apparaissent chacune comme un *bras de levier*. Les deux composantes de la *force de guidage* combinées à ces deux bras de levier forment trois *couples*, au sens physique du terme.

De fait, lorsque le conducteur actionne la commande de direction, la voiture est soumise à ces trois couples et réagit par un triple mouvement de rotation autour de son centre de gravité :

- Rotation dans un plan horizontal, c'est le mouvement de *lacet*.
- Rotation dans un plan vertical transversal, c'est le mouvement de *roulis*.
- Rotation dans un plan vertical longitudinal, c'est le mouvement de *tangage*.

Le rôle des roues arrière

Soumise à la composante transversale qui s'exerce sur le train avant, la voiture devrait tourner autour de son centre de gravité, autrement dit, faire un demi-tour sur elle-même, sans pour autant dévier de sa trajectoire initiale (mouvement de lacet, dit "*toupié*" ou "*tête-à-queue*"). Cela sans compter sur les roues arrière qui s'opposent à cette rotation, permettant ainsi l'accélération transversale du centre de gravité de la voiture.

Le principe de réciprocité

Le *principe de réciprocité* d'Isaac Newton énonce ceci :

« *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 cas de l'automobile ?

Reprenons le raisonnement. On l'a vu, la force de guidage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol. L'*action réciproque* se manifeste également au contact du sol, avec la même intensité que la force de guidage, mais en sens opposé.

De fait, lorsqu'un conducteur sollicite la force de guidage, les pneumatiques de la voiture exercent une poussée horizontale sur la chaussée, poussée qui devrait logiquement affecter le mouvement de rotation du globe terrestre⁽⁶⁾.

Heureusement, cet effet reste purement théorique, la masse de la voiture étant négligeable par rapport à celle de la Terre : la voiture ne peut que glisser ou s'inscrire docilement sur une trajectoire circulaire⁽⁷⁾.

Ajoutons que les trajectoires divergentes du très grand nombre de véhicules en circulation annuleraient cet effet, si celui-ci était perceptible.

Attention ! Cette action réciproque est souvent confondue avec la force centrifuge :

- La force centrifuge est une force imaginaire qui est supposée agir sur le centre de gravité d'une voiture immobile, alors que l'action réciproque est une force réelle qui s'exerce au contact du sol en réponse à la force de guidage.
- La force centrifuge étant une force imaginaire, elle ne résulte pas d'une interaction et ne peut en générer aucune (voir dossier ADILCA "*force centrifuge*").

Les sensations des passagers

Le principe de réciprocité d'Isaac Newton s'applique également aux passagers et il est facile de le vérifier lors d'un banal trajet en voiture.

Détaillons le mécanisme du mouvement circulaire : la force de guidage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol, elle se transmet ensuite aux passagers par l'intermédiaire des roues, du châssis, de la carrosserie et des fauteuils.

Les passagers exercent alors en retour une *action réciproque* sur les fauteuils, la carrosserie, le châssis et les roues.

Cette action réciproque exercée par les passagers est une banale force de contact, elle est strictement égale et opposée à la force de guidage qui s'exerce sur eux⁽⁸⁾.

Les automobilistes ressentent parfaitement cette action réciproque qui leur donne l'impression de peser sur les fauteuils et la carrosserie de la voiture, une impression qu'ils attribuent à la force centrifuge, à tort (mais ce n'est pas leur faute, voir l'origine de cette confusion dans le dossier ADILCA "*manuels scolaires de physique*").

Logiquement d'ailleurs, il est évidemment impossible d'observer ou de ressentir les effets d'une force imaginaire.

Conclusion

Tout véhicule terrestre, aérien ou maritime, décrit spontanément une trajectoire rectiligne s'il est livré à lui-même.

Toute variation de trajectoire suppose donc l'existence d'une force transversale qui s'exprime grâce à la relation $F = MV^2/R$: son intensité est fonction de la masse du véhicule et du carré de sa vitesse, elle est inversement proportionnelle au rayon de la trajectoire souhaitée.

S'agissant d'une automobile, cette force s'exerce sur les pneumatiques des roues directrices au contact du sol lorsque celles-ci pivotent.

Soumise à la force de guidage, la voiture exerce une action réciproque sur le globe terrestre, tandis qu'elle réagit par un triple mouvement de rotation autour de son centre de gravité (lacet, roulis et tangage).

Les passagers ressentent à la fois la force de guidage qui leur parvient par le biais de la carrosserie et des fauteuils, et l'action réciproque qu'ils exercent en retour sur les fauteuils et la carrosserie.

La description du mouvement circulaire de la voiture est alors complète : une seule force est nécessaire pour courber sa trajectoire, c'est la force de guidage. Il n'y a ni force centrifuge, ni force centripète.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

Notes et remarques

(1) Le centre de gravité, également appelé centre de masse, centre d'inertie ou centre d'équilibre, se définit comme le point d'application de la résultante de toutes les forces de gravitation qui agissent sur les différentes masses d'un ensemble non homogène (pour une voiture : moteur, transmission, roues, châssis, carrosserie, passagers, etc.), comme si toute la matière qui compose le véhicule était concentrée en ce seul point. Le centre de gravité d'une voiture de tourisme avec deux personnes à bord est approximativement situé entre les deux sièges avant, à la hauteur de l'assise, c'est le centre d'équilibre de l'ensemble. Ce point étant parfaitement immatériel, il est évidemment impossible d'y exercer directement la moindre force et le concept n'explique en rien l'origine du mouvement circulaire.

(2) Plus précisément, cette relation permet de calculer la résultante qui provoque l'accélération transversale du centre de gravité de la voiture, à distinguer du couple de lacet qu'exerce l'essieu directeur. La force centrifuge se calcule à l'aide d'une relation différente (voir dossier ADILCA "force centrifuge").

(3) Dans le Système International d'Unités (symbole SI) obligatoire en France depuis 1961, la masse est une grandeur scalaire (autrement dit invariable, à ne pas confondre avec le poids) qu'on exprime en kilogrammes (symbole **kg**), la vitesse, en mètres par seconde (symbole $m.s^{-1}$) et le rayon de trajectoire, en mètres (symbole **m**). La dimension obtenue est le kilogramme mètre par seconde carrée (symbole $kg.m.s^{-2}$), qui caractérise l'unité de force, le newton (symbole **N**).

(4) L'angle de pivotement des roues directrices peut varier de 0 jusqu'à $\pm 45^\circ$. La composante transversale est fonction du cosinus, elle diminue avec l'angle, tandis que la composante longitudinale, fonction du sinus, augmente avec l'angle. Les deux composantes sont égales quand l'angle de pivotement atteint 45° . Si cette valeur était dépassée, la voiture serait davantage freinée que guidée.

(5) Le cap est un terme de marine appliqué à l'automobile, il se définit comme la direction dans laquelle pointe l'avant de la voiture : cap nord, est, sud ou ouest, avec toutes les variantes possibles. Ne pas confondre le changement de cap et l'accélération transversale. Le "tête-à-queue" est un changement de cap sans accélération transversale, ce qui se produit si l'adhérence des roues arrière est nulle. Inversement, on pourrait parfaitement concevoir une accélération transversale sans changement de cap, ce qui se produirait si la voiture était munie de quatre roues directrices pivotant d'une même valeur angulaire.

(6) L'action réciproque exercée par les pneumatiques de la voiture peut dégrader le revêtement routier, on peut le constater notamment sur les circuits automobiles, aux endroits où les pilotes sollicitent de fortes accélérations transversales.

(7) La force de guidage et son action réciproque sont égales mais leurs effets sont inversement proportionnels à la masse sur laquelle elles s'exercent, c'est le deuxième principe de Newton. Ce principe s'exprime grâce à la relation $[F = M Y]$ d'où $[Y = F / M]$. Le résultat est que, si on compare une voiture de 2 tonnes et le globe terrestre (6×10^{24} kg), le rapport des masses est de 1 pour 3×10^{21} (le nombre 3 suivi de 21 zéros), autrement dit un rapport de 1 pour 3 000 milliards de milliards ou 3 000 trillions. La Terre ne subit donc aucune perturbation.

(8) Si on considère une voiture de 2 tonnes à vide, transportant deux passagers de 100 kg chacun, le rapport des masses est de 1 pour 10, un rapport pas si démesuré, surtout si deux autres passagers de même corpulence doivent les rejoindre à bord. Dès lors, les roues, le châssis, la carrosserie et les fauteuils de la voiture doivent être conçus de telle sorte qu'ils puissent transmettre une force de guidage suffisante, sans plier ni céder du fait de l'action réciproque.

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

III. FORCE DE GUIDAGE : LE MODE DE CALCUL

1. 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 : $Y = (m^{+1}.s^{-1})^2 . m^{-1} = m^{+2}.s^{-2} . m^{-1} = m.s^{-2}$

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une voiture qui décrit une trajectoire circulaire de 100 m de rayon à la vitesse de 20 m.s⁻¹ (72 km.h⁻¹) :

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

Les passagers correctement installés à bord ainsi que les bagages solidement arrimés sont soumis à une accélération transversale de même intensité.

2. Coefficient d'adhérence :

$$\mu = Y / g$$

μ : coefficient d'adhérence, grandeur sans dimension ;

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

g : accélération de référence, exprimée en **m.s⁻²**

(accélération gravitationnelle terrestre : **g** = 9,8 m.s⁻²)

cohérence des unités : $\mu = (m^{+1}.s^{-2}) . (m^{-1}.s^{+2}) = \text{grandeur sans dimension.}$

Exemple : calculons le coefficient d'adhérence permettant une accélération transversale de 4 m.s⁻² :

$$\mu = 4 / 9,8 = 0,4$$

3. Force de guidage :

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

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

M : masse de la voiture, exprimée en **kg**

V : vitesse, exprimée en **m.s⁻¹**

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

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

Exemple 1 : calculons la force de guidage capable de maintenir une voiture de masse 1 500 kg sur une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 m.s⁻¹ (72 km.h⁻¹) :

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

Cette force s'exerce dans la surface de contact au sol des quatre pneumatiques. En vertu du principe de réciprocité énoncé par Isaac Newton, les quatre pneumatiques de la voiture exercent simultanément une action réciproque sur le sol, de même intensité que la force de guidage, mais de sens opposé. Le globe terrestre reste insensible à cette action en raison de sa masse.

Exemple 2 : calculons la force de guidage qui s'exerce sur un passager de masse 80 kg installé à bord d'une voiture qui décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 20 m.s⁻¹ (72 km.h⁻¹) :

$$F = 80 \times 20^2 / 100 = 80 \times 400 / 100 = 320 \text{ N}$$

Cette force provient des quatre pneumatiques de la voiture. Elle se transmet au passager par l'intermédiaire des roues, du châssis, de la carrosserie et du fauteuil.

En vertu du principe de réciprocité énoncé par Isaac Newton, le passager exerce simultanément une action réciproque sur le fauteuil et la carrosserie, et *in fine*, sur le sol par l'intermédiaire du châssis et des roues, de même intensité que la force de guidage (320 N), mais de sens opposé.

Le passager ressent parfaitement cette action réciproque qui lui donne l'impression de peser sur le bord du fauteuil ou de la carrosserie. La carrosserie doit être suffisamment rigide et le fauteuil suffisamment bien fixé pour y résister.

4. Centre de gravité :

$$D = L \cdot M2 / (M1 + M2)$$

D : distance séparant l'essieu directeur du centre de gravité, exprimée en **m**

L : longueur de l'empattement, exprimé en **m**

M1 : masse pesant sur le train avant, exprimée en **kg**

M2 : masse pesant sur le train arrière, exprimée en **kg**

cohérence des unités : **d** = m . kg . kg⁻¹ = **m**

Exemple : calculons la distance entre l'essieu directeur et le centre de gravité d'une voiture répondant aux caractéristiques suivantes : empattement 2,5 m, 840 kg pesant sur le train avant, 660 kg sur le train arrière :

$$D = 2,5 \times 660 / (840 + 660) = 1\,650 / 1\,500 = 1,1 \text{ m}$$

Remarque : cette distance est le bras de levier constitutif du couple de lacet. Les couples de roulis et de tangage ne sont tributaires que de la hauteur du centre de gravité.

5. Guidage du train avant :

$$F = M \cdot Y \cdot (L - D) / L$$

F : guidage du train avant, exprimé en **N**

M : masse de la voiture, exprimée en **kg**

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

L : longueur de l'empattement, exprimé en **m**

D : distance séparant l'essieu directeur du centre de gravité, exprimée en **m**

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

Exemple : calculons la force de guidage qui s'exerce sur le train avant d'une voiture de masse 1 500 kg (empattement 2,5 m, distance séparant l'essieu directeur du centre de gravité 1,1 m) pour une accélération transversale de 4 m.s⁻² :

$$F = 1\,500 \times 4 \times (2,5 - 1,1) / 2,5 = 6\,000 \times 1,4 / 2,5 = 3\,360 \text{ N}$$

6. Composante transversale :

$$F_t = F \cdot \cosinus \alpha$$

F_t : composante transversale de la force de guidage, exprimée en **N**

F : guidage du train avant, exprimé en **N**

α : angle de pivotement des roues directrices, exprimé en degrés.

cohérence des unités : $F = \text{N}$

[Remarque : les valeurs trigonométriques sont des grandeurs sans dimension qui n'affectent pas les unités avec lesquelles elles se combinent]

Exemple : calculons la composante transversale lorsqu'une force de guidage de 3 360 N s'exerce sur l'essieu directeur d'une voiture, l'angle de pivotement des roues directrices étant égal à 15° (cosinus 15° = 0,96) :

$$F_t = 3\,360 \times 0,96 = 3\,226 \text{ N}$$

7. Composante longitudinale :

$$F_l = F \cdot \sinus \alpha$$

F_l : composante longitudinale de la force de guidage, exprimée en **N**

F : guidage du train avant, exprimé en **N**

α : angle de pivotement des roues directrices, exprimé en degrés.

cohérence des unités : $F = \text{N}$

Exemple : calculons la composante longitudinale lorsqu'une force de guidage de 3 360 N s'exerce sur l'essieu directeur d'une voiture, l'angle de pivotement des roues directrices étant égal à 15° (sinus 15° = 0,26) :

$$F_l = 3\,360 \times 0,26 = 870 \text{ N}$$

Cette composante agit comme une force de freinage qui ralentit la voiture, la décélération étant qualifiée d'induite parce qu'indissociable du guidage.

Remarques : la composante transversale combinée à la distance séparant l'essieu directeur du centre de gravité forme le couple de lacet ; combinée à la hauteur du centre de gravité, elle forme le couple de roulis. La composante longitudinale combinée à la hauteur du centre de gravité forme le couple de tangage.

8. Décélération induite :

$$Y = F_l / M$$

Y : décélération induite, exprimée en **m.s⁻²**

F_l : composante longitudinale de la force de guidage, exprimée en **N**

M : masse de la voiture, exprimée en **kg**

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

Exemple : calculons la décélération d'une voiture de masse 1 500 kg lorsqu'une composante longitudinale de 870 N s'exerce sur l'essieu directeur (on suppose que la route est horizontale, que la boîte de vitesses est au point mort et on néglige la résistance au roulement et la résistance de l'air) :

$$Y = 870 / 1\,500 = 0,58 \text{ m.s}^{-2}$$

9. Guidage du train arrière :

$$F = M \cdot Y \cdot D / L$$

F : guidage du train arrière, exprimé en **N**

M : masse de la voiture, exprimée en **kg**

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

D : distance séparant l'essieu directeur du centre de gravité, exprimée en **m**

L : longueur de l'empattement, exprimé en **m**

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

Exemple : calculons la force de guidage qui s'exerce sur le train arrière d'une voiture de masse 1 500 kg (distance séparant l'essieu directeur du centre de gravité 1,1 m, empattement 2,5 m) pour une accélération transversale de 4 m.s⁻² :

$$F = 1\,500 \times 4 \times 1,1 / 2,5 = 6\,600 / 2,5 = 2\,640 \text{ N}$$

Remarque : la force de guidage totale qui s'exerce sur la voiture (6 000 N) étant répartie entre les trains avant et arrière, une simple soustraction permet d'aboutir au même résultat (6 000 – 3 360 = 2 640).

10. Mouvement de roulis :

$$R = M \cdot Y \cdot H / L$$

R : mouvement de roulis, exprimée en **N**

M : masse de la voiture, exprimée en **kg**

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

H : hauteur du centre de gravité, exprimée en **m**

L : largeur de voie, exprimée en **m**

cohérence des unités : $R = \text{kg} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons le mouvement de roulis d'une voiture soumise à une accélération transversale de 4 m.s⁻² (masse 1 500 kg, hauteur du centre de gravité 0,5 m, largeur de voie 1,5 m) :

$$R = 1\,500 \times 4 \times 0,5 / 1,5 = 2\,000 \text{ N}$$

Ce résultat signifie que les roues extérieures à la trajectoire reçoivent un supplément de charge de 2 000 N, tandis que les roues intérieures sont délestées d'autant, le poids total de la voiture restant évidemment inchangé (dans notre exemple : 15 000 N pour "g" = 10 m.s⁻²).

Le phénomène de roulis est improprement appelé *transfert de masse* (les masses qui constituent un solide quelconque ne se transfèrent jamais séparément, sauf en cas de désintégration).

Il s'agit en réalité d'un déséquilibre, autrement dit d'un transfert de la *charge* qui pèse sur les pneumatiques lorsque la voiture est soumise à une accélération transversale, en raison de la distance qui sépare le sol du centre de gravité. Cette distance agit comme un bras de levier. Si la force de guidage s'exerçait directement sur le centre de gravité, il n'y aurait ni roulis, ni tangage, ni lacet, ni transfert de charge.

Remarque 1 : sur une route horizontale et sans dévers, parcourue à vitesse constante, le roulis se répartit entre les roues avant et arrière dans les mêmes proportions que le poids en statique, si on néglige le tangage lié à la composante longitudinale de la force de guidage.

Remarque 2 : le mouvement de tangage se calcule sur le même principe.

V. BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA (ouvrage collectif édité à compte d'auteurs) : *Guide des Lois Physiques de l'Automobile*, Paris 2002.
- 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

* * *