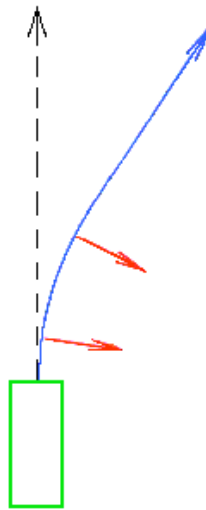


LA FORCE DE GUIDAGE

Dans un dossier ADILCA à lire par ailleurs (*“la force centrifuge”*), nous avons démontré que la force centrifuge n’était qu’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 transversale ? D’où provient la force de guidage et comment se la représenter ? Quelle est la vraie nature de la force de guidage ? 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 de génie du nom d’Isaac Newton décidait de repenser la physique en formulant les lois universelles du mouvement. Entre autres règles fondamentales, Newton énonçait le principe suivant : la trajectoire normale d’un corps en mouvement est de nature rectiligne. 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 rectiligne, il faut solliciter une force transversale, représentée ici 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 de traction, mais le raisonnement vaut aussi pour une trajectoire circulaire, 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, de concevoir qu'une main invisible tire transversalement sur une ficelle pour le dévier de sa trajectoire.

L'application à l'automobile

Ce concept s'applique-t-il à l'automobile ? Nous savons tous 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 transversale ayant pour effet de dévier la voiture de sa trajectoire initialement rectiligne. 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 va nous aider à 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 dévier 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 résolue. 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 tout au long du virage, elle ne peut varier qu'avec la force de traction ou de freinage, il vaut donc mieux l'oublier.

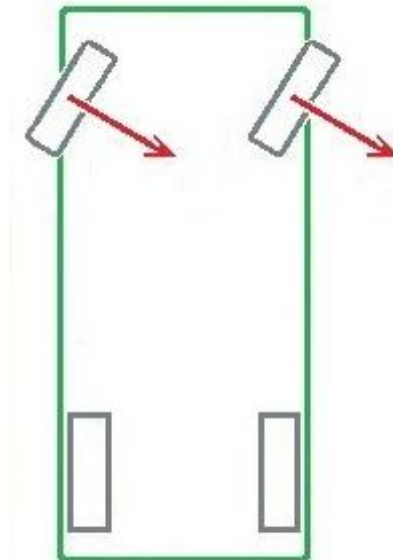
Et surtout, pas de mélange ! Rappelons encore une fois l'interdiction formelle d'additionner deux vecteurs représentant des grandeurs de natures différentes. On ne mélange pas les pommes et les poires, ni les forces et les trajectoires. Autrement dit, sur un dessin censé représenter une force, il est 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 faire tourner la voiture. Il suffit de choisir la bonne et de l'orienter correctement.

Faire table rase du passé...

Ce n'est pas tout : un lavage de cerveau est indispensable ! Il faut jeter aux orties 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 habitude, 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 au point 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.



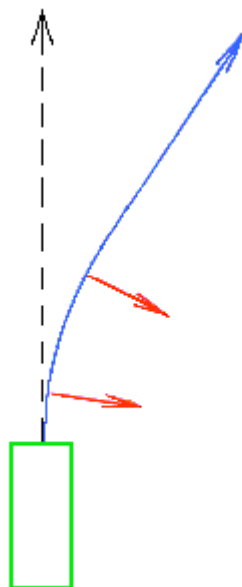
© association adilca reproduction interdite

La force de guidage prend naissance à la périphérie des roues directrices au contact du sol.

Il n'y a rien d'autre à ajouter, si ce n'est le rôle des roues arrière : en empêchant la voiture d'engager un mouvement de rotation sur elle-même (mouvement de lacet appelé "tête-à-queue"), elles participent à l'accélération transversale du centre de gravité.

Un petit truc pour vérifier...

Pas de vraie description scientifique sans vérification. Mais comment vérifier la validité d'un dessin ? C'est très simple, il suffit là encore 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 le dessin est correct, le mouvement imaginaire se traduit bien par une déviation de trajectoire telle qu'on pourrait l'observer sur le terrain. Et tant que vous y êtes, servez-vous aussi de ce truc pour tester les dessins qui vous passent entre les mains. Surprise garantie ! 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 !)

Le principe de réciprocité

Le troisième principe de Newton ⁽¹⁾, également appelé "principe de réciprocité", s'applique-t-il à la force de guidage ?

Oui, et justement parce que la force de guidage est une force réelle, au contraire des forces fictives (toutes !) qui ne résultent pas d'une interaction et pour lesquelles ce principe ne peut pas s'appliquer.

Reprenons le raisonnement. On l'a vu, la force de guidage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol. La réaction associée à cette force se manifeste donc au même point, avec la même intensité que la force de guidage, mais en sens opposé.

De fait, lorsqu'un conducteur sollicite la force de guidage, la voiture exerce une poussée sur le sol, poussée qui devrait logiquement affecter le mouvement de rotation de la Terre⁽²⁾.

Heureusement, cet effet reste purement théorique car, la masse de la voiture étant considérablement plus faible que celle de la Terre⁽³⁾, la voiture ne peut que glisser ou s'inscrire docilement sur une trajectoire circulaire.

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

Attention ! Cette réaction n'a rien à voir avec la force centrifuge :

- la force centrifuge est supposée agir sur le centre de gravité de la voiture, alors que cette réaction s'exerce au contact du sol ;
- la force centrifuge étant une force imaginaire, elle ne peut générer aucune interaction.

Une force de quelle nature ?

Il ne reste plus qu'à répondre à une dernière question : quelle est la vraie nature de la force de guidage ?

Première évidence, la force de guidage n'est pas de nature centripète car, centripète signifie "*qui rapproche du centre*". Or, le centre en question étant celui du cercle que décrit la voiture, c'est une évidence : la voiture n'en prend jamais le chemin, elle ne s'en rapproche jamais, elle est seulement déviée d'une trajectoire rectiligne.

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

Deuxième évidence, la force de guidage est une force de contact. Le contact en question est celui des pneumatiques avec le sol. Ce contact est de même nature que celui qu'on sollicite pour saisir un objet en le pressant 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 (voir le dossier ADILCA "*adhérence et glissement*").

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, des pneumatiques larges adhèrent mieux que d'autres plus étroits, des pneumatiques garnis de gomme tendre adhèrent mieux que d'autres de mêmes dimensions mais garnis de gomme dure, etc. Autant de phénomènes passés sous silence dans la littérature officielle...

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 pression, de contact ou de frottement capable de dévier la trajectoire d'une masse en mouvement. »

Une définition inédite ? Oui, car il faut rappeler une fois de plus que cette force, pourtant 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, celle qu'on utilise un peu partout, à tort et à travers :

$$F = MV^2/R \quad (4)$$

Cependant, cette formule n'exprime pas, n'a jamais exprimé et ne pourra jamais exprimer la force centrifuge, mais uniquement la force de guidage ⁽⁵⁾. Peut-on le démontrer mathématiquement ? Oui !

Voici comment : la force centrifuge est une force fictive qui n'apparaît que dans le cadre de descriptions imaginaires, comme l'est 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 type de description, c'est l'absence totale 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 formule magique, le résultat est surprenant :

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

Sans parler du rayon de trajectoire qui n'existe pas non plus, mais qu'on considère, 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 vitesse, et la vitesse n'existe que dans le cadre d'une description réelle du 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 **F = MV²/R** se rapporte bien uniquement à la dynamique, et donc à la force de guidage, mais à elle seule.

Les limites de la fonction

Étudions les limites de la fonction **F = MV²/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 :

$$\mathbf{F = MV^2/R = MV^2 / 0 = \infty}$$

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 :

$$\mathbf{F = MV^2/R = MV^2 / \infty = 0}$$

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

Étudions maintenant les limites de la fonction **F = MV²/R** par rapport à **V** (vitesse).

Toutes grandeurs égales par ailleurs, on constate que la force de guidage doit varier en proportion 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.

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 l'intensité de la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques de la voiture au contact du sol :

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

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

Les réactions de la voiture

C'est évident : la force de guidage est la seule force à considérer dans l'étude du mouvement circulaire des véhicules terrestres.

Qu'est-ce que ça change concrètement ? Tout devient plus clair. Par exemple, il est désormais possible de décrire de manière logique la nature et l'intensité des mouvements réactifs de la voiture, autant de phénomènes ignorés, inexpliqués ou inexplicables pour ceux qui en sont restés au concept de force centrifuge, c'est là l'une des grandes supériorités du nouveau concept⁽⁶⁾.

D'où viennent ces mouvements réactifs ? La force de guidage possède deux composantes, l'une transversale, l'autre longitudinale. Ces deux composantes ne s'exercent pas sur le centre de gravité de la voiture mais sur les roues directrices au contact du sol.

C'est pourquoi, dès que le conducteur actionne la commande de direction, la voiture réagit autour de son centre de gravité par un triple mouvement de rotation que l'on décompose selon trois axes orthogonaux.

Ce triple mouvement de rotation, c'est le *tangage*, le *roulis* et le *lacet*. Leur étude détaillée sortant du cadre de ce dossier, les lecteurs intéressés se reporteront au "GUIDE DES LOIS PHYSIQUES DE L'AUTOMOBILE".

Le nouveau concept répond donc enfin aux questions qui, de tous temps, ont tarabudé les spécialistes de l'automobile sans jamais trouver de réponses satisfaisantes, et notamment celles-ci :

- comment expliquer le changement de cap de la voiture lorsque le conducteur actionne la commande de direction⁽⁷⁾ ?
- quel est le véritable rôle des roues arrière ?
- pourquoi l'angle de pivotement des roues directrices est-il limité à 45° ?
- pourquoi faut-il accélérer dans un virage ?
- comment expliquer l'action de l'ESP (contrôle électronique de trajectoire, voir le dossier ADILCA "*l'électronique*") ?
- etc.

Posez ces questions à d'éminents spécialistes, ou mieux, tentez quelques explications à partir du concept de force centrifuge : les contradictions, les incohérences ou les absurdités vont se multiplier. Très vite ce sera l'impasse...

Conclusion

La physique est une science dure qui n'admet qu'une seule vérité. La trajectoire naturelle d'une voiture est rectiligne. Pour dévier cette trajectoire, il faut solliciter une force transversale qu'on appelle force de guidage.

La force de guidage est une force de contact qui s'exerce sur les pneumatiques des roues directrices au contact du sol lorsque le conducteur actionne la commande de direction.

Cette force s'exprime grâce à la relation $F = MV^2/R$. Son intensité est donc inversement proportionnelle au rayon de la trajectoire, elle dépend de la masse de la voiture et du carré de sa vitesse.

(1) *Le troisième principe de Newton s'énonce ainsi : "Toute force qui s'exerce sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé."*

(2) *Cette réaction peut dégrader le revêtement routier, c'est ce qu'on peut constater par exemple sur les circuits automobiles, aux endroits où les pilotes sollicitent de fortes accélérations transversales.*

(3) *L'action s'exerce sur la voiture, la réaction s'exerce sur le globe terrestre. Ce sont deux forces égales mais l'effet est inversement proportionnel à la masse (principe fondamental de la dynamique ou deuxième principe de Newton [$F = M Y$] et [$Y = F / M$]). Si on compare une voiture de 2 tonnes et le globe terrestre (6×10^{24} kg), le rapport des masses est de 1 pour 3×10^6 , soit 1 pour 3 000 milliards de milliards. La Terre ne subit donc aucune perturbation.*

(4) *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**). Cette grandeur est ainsi nommée en hommage aux travaux de sir Isaac Newton, physicien et mathématicien anglais (1642-1727), l'un des précurseurs de la science moderne.*

(5) *Plus précisément, il s'agit ici de 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 (voir "GUIDE DES LOIS PHYSIQUES DE L'AUTOMOBILE").*

(6) *Attention aux interprétations erronées : les réactions de la voiture autour de son centre de gravité n'ont aucun rapport avec le principe de réciprocité. Mais c'est pourtant l'une des confusions habituelles liées à l'emploi abusif du concept de force centrifuge.*

(7) *Terme de marine appliqué à l'automobile, avec la même signification : le cap se définit comme la direction dans laquelle pointe l'avant de la voiture : cap nord, est, sud ou ouest, avec toutes les variantes possibles. 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.*

QUELQUES RELATIONS ENTRE GRANDEURS...

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) :

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

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 :

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

Force de guidage :

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

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

Exemple : 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) :

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

Centre de gravité :

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

d : distance entre le centre de gravité et l'essieu directeur, exprimée en **m**

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

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

Guidage du train avant :

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

L : empattement, exprimé en **m**

d : distance entre le centre de gravité et l'essieu directeur, exprimée en **m**

cohérence des unités : **F** = kg . m⁺¹.s⁻² . m⁺¹ . m⁻¹ = kg.m.s⁻² = **N**

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

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

Guidage du train arrière :

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

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

M : masse, exprimée en **kg**

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

d : distance entre le centre de gravité et l'essieu directeur, exprimée en **m**

L : empattement, exprimé en **m**

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

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

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

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *