LES LOIS PHYSIQUES APPLIQUÉES AUX DEUX-ROUES :

1. LA TRAJECTOIRE CIRCULAIRE

2. L'EFFET GYROSCOPIQUE

3. QUELQUES RELATIONS ENTRE GRANDEURS

Les lois physiques qui régissent le mouvement des véhicules terrestres sont des lois universelles qui s'appliquent de la même manière à toutes les catégories de véhicules, qu'il s'agisse de voitures, de camions ou de deux-roues.

Néanmoins, s'agissant des deux-roues, quelques précisions sont nécessaires concernant, d'une part la trajectoire circulaire, d'autre part l'effet gyroscopique lié à la rotation des roues.

Ce sont ces deux sujets qui sont abordés ici.

1. LA TRAJECTOIRE CIRCULAIRE

Les lois de Newton

Les lois de Newton énoncent que :

- la trajectoire naturelle d'une masse en mouvement est *rectiligne*. Pour dévier cette trajectoire, il faut solliciter une *force* ;

- dans son expression mathématique, cette force est le produit d'une *masse* par une *accélération transversale* (principe fondamental de la dynamique).

Voyons comment ces lois s'appliquent au mouvement des véhicules terrestres, et plus particulièrement à celui des deux-roues.

La force de guidage

D'une manière générale, on appelle *force de guidage* toute force de contact capable de dévier la trajectoire d'une masse.

S'agissant d'une voiture, la force de guidage s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol lorsque le conducteur actionne la commande de direction. C'est donc le pivotement des roues directrices qui est à l'origine de cette force (voir dossier ADILCA ''*force de guidage*'').

Cette explication peut-elle se transposer au mouvement des deux-roues ?

L'équilibre en ligne droite

Examinons d'abord les conditions d'équilibre d'un deux-roues en ligne droite. Que se passerait-il si on supprimait le pivotement de la direction ? La chute serait quasi immédiate. C'est ce qui arrive quand la direction est bloquée, par exemple si les roues d'une bicyclette sont prises dans les rails d'un tramway.

Maintenir un deux-roues en équilibre en ligne droite consiste donc à modifier en permanence l'angle de pivotement de la direction, de manière à pouvoir récupérer à tout instant l'amorce d'une chute.

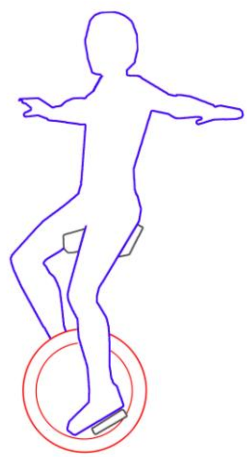
Il en résulte qu'un deux-roues est, par nature, dans l'incapacité de décrire une trajectoire rigoureusement rectiligne et que, pour tendre vers une ligne droite, il doit en réalité décrire une trajectoire de forme sinusoïdale.

L'amplitude de cette sinusoïde est d'autant plus grande que la vitesse est réduite, ceci pouvant être mis en évidence par les traces que des pneumatiques mouillés laissent sur le sol.

La trajectoire circulaire

Une fois le principe précédent assimilé, il ressort que la trajectoire circulaire d'un deux-roues résulte de l'amplification volontaire de cette sinusoïde dans le temps et dans l'espace : pour virer, le conducteur doit amorcer une chute immédiatement équilibrée par la réponse du guidon, avec ou sans l'aide des mains.

Contrairement au principe valable pour l'automobile, c'est donc l'inclinaison de la machine qui permet de solliciter la force de guidage, et non le pivotement de la roue avant. On peut d'ailleurs constater qu'un équilibriste juché sur un monocycle est parfaitement capable de décrire une trajectoire circulaire, simplement en se penchant du côté où il souhaite se diriger.



La trajectoire du monocycle prouve que c'est l'inclinaison qui permet de virer.

L'inclinaison du véhicule

Du point de vue de la physique, l'inclinaison du véhicule (qu'il soit muni d'une seule roue ou de deux) permet au(x) pneumatique(s) d'utiliser la réaction du sol comme force de guidage :

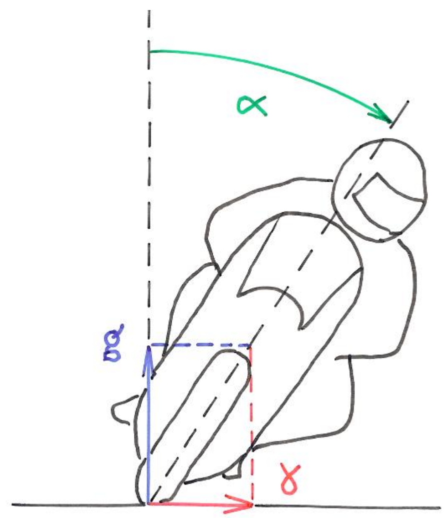
- si l'angle d'inclinaison est nul, la réaction du sol est verticale, strictement égale et opposée au *poids*, et comme il n'y a pas d'autre force en jeu, la trajectoire est rectiligne ;

- si l'angle d'inclinaison n'est pas nul, la réaction du sol présente une composante transversale, c'est la *force de guidage*. Le véhicule est alors dévié de sa trajectoire initiale et, sauf chute, s'inscrit sur une trajectoire circulaire.

Le poids est le produit d'une masse par l'accélération gravitationnelle, la force de guidage est le produit d'une masse par une accélération transversale. Après simplification, on est en présence de deux accélérations : l'une est *verticale* et invariable (9,8 $m.s^{-2}$), l'autre est *transversale* et fonction de l'angle d'inclinaison.

L’accélération transversale

Les propriétés des triangles-rectangles nous montrent que l’accélération transversale est fonction de la *tangente trigonométrique* de l’angle d’inclinaison [1], dans les limites que permet la garde au sol de la machine, l’adhérence des pneumatiques et celle du revêtement routier.



L’accélération transversale ϒ est fonction de la *tangente trigonométrique* de l’angle α.

Le tableau suivant montre la corrélation entre ces deux grandeurs [2] :

angle d’inclinaison	**10°**	**20°**	**30°**	**40°**	**50°**
accélération transversale ($m.s^{-2}$)	**1,7**	**3,6**	**5,7**	**8,2**	**11,7**

La vitesse

L’accélération transversale doit être inversement proportionnelle au rayon de la trajectoire, mais surtout, elle doit être proportionnelle au *carré* de la vitesse. La trajectoire étant imposée, c’est donc la vitesse *élevée au carré* qui est le facteur limitant lors des changements de trajectoire.

Le tableau suivant montre la corrélation entre la vitesse de passage en courbe et l’accélération transversale nécessaire pour décrire une trajectoire 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**
accélération transversale ($m.s^{-2}$)	**1**	**1,5**	**2**	**2,6**	**3,3**

Passager et bagages

À l'intérieur d'une voiture, les passagers et les bagages doivent être solidement arrimés à la carrosserie (par l'intermédiaire du siège, de la ceinture ou de sangles…) de manière à recevoir la force de guidage capable de les inscrire sur une trajectoire circulaire.

Qu'en est-il si le passager et les bagages sont installés sur une motocyclette ? En statique, l'inclinaison fait tomber à la fois la motocyclette, le passager et les bagages. En dynamique, le passager et les bagages sont soumis à une accélération transversale qui empêche la chute (voir dossier ADILCA ''*statique et dynamique*'').

Autrement dit, lorsque la motocyclette décrit une trajectoire circulaire à vitesse constante, le passager et son chargement sont en équilibre et ne risquent pas de glisser, ni à l'intérieur de la trajectoire, ni à l'extérieur.

Il en est de même pour toute masse liquide à bord : lorsqu'une motocyclette décrit une trajectoire circulaire à vitesse constante, et sauf conduite brutale, vibrations ou secousses, la surface du carburant forme toujours un plan perpendiculaire à l'axe de symétrie de la machine.

Ce principe a été démontré grâce à l'expérience dite ''de la bouteille d'eau'', expérience destinée à prouver que la force centrifuge n'existe pas (voir dossier ADILCA ''*force centrifuge*'').

Expérience dite ''de la bouteille d'eau'' :
la surface du liquide reste perpendiculaire à l'axe de symétrie de la machine.

La charge dynamique

On vient de le voir, lorsqu'un deux-roues décrit une trajectoire circulaire sur une route horizontale et sans dévers, le sol produit deux réactions perpendiculaires : l'une est verticale, égale et opposée au *poids* de l'ensemble machine + conducteur ; l'autre est horizontale, c'est la *force de guidage*.

Ces deux forces admettent une résultante appelée *résultante de guidage* qui s'exerce dans l'axe de symétrie du véhicule. L'intensité de cette résultante est égale à la somme vectorielle de la force de gravitation et de la force de guidage.

Concrètement, cela signifie qu'un deux-roues en équilibre sur une trajectoire circulaire ''pèse'' davantage qu'en ligne droite, entraînant une compression des pneumatiques et des suspensions : c'est ce qu'on appelle la *charge dynamique*.

Remarques :

- ne pas confondre la charge dynamique et le poids : le poids reste toujours constant quoi qu'il arrive (3) ;

- en statique, l'inclinaison ne peut entraîner qu'une chute.

L'adhérence

L'*adhérence* se définit comme la qualité du contact entre deux matériaux, ici la surface du revêtement routier et la bande de roulement des pneumatiques.

L'inclinaison d'un deux-roues est naturellement tributaire de l'adhérence :

- si l'adhérence est suffisante, le véhicule est soumis à une accélération transversale et décrit une trajectoire circulaire ;

- si l'adhérence est insuffisante, les pneumatiques glissent, rompant ainsi la condition d'équilibre. L'inclinaison combinée à une accélération transversale nulle entraîne la chute sur une trajectoire rectiligne.

Le coefficient d'adhérence

Le *coefficient d'adhérence* se définit comme le rapport entre l'accélération transversale et une grandeur de référence qui est l'accélération gravitationnelle terrestre (''**g**'' = 9,8 $m.s^{-2}$).

En combinant différentes grandeurs, on calcule facilement le coefficient d'adhérence d'un deux-roues en équilibre sur une trajectoire circulaire, en procédant de la même manière que pour calculer celui d'un véhicule à quatre roues (voir dossier ADILCA ''*adhérence et glissement*'').

Il existe un mode de calcul plus élégant : le coefficient d'adhérence étant le rapport entre deux accélérations, il est exactement égal à la *tangente trigonométrique* de l'angle d'inclinaison du deux-roues par rapport à la verticale.

Exemple : si un deux-roues s'incline de 45° par rapport à la verticale sur une chaussée horizontale et sans dévers, cela signifie que l'accélération transversale est, dans cet exemple, exactement égale à l'accélération gravitationnelle terrestre [(4)]. Le coefficient d'adhérence est alors égal à 1. Ceci est confirmé par le calcul : tangente 45° = 1.

Le principe d'action réaction

Le principe d'action réaction, ou troisième loi de Newton, énonce que toute masse sur laquelle s'exerce une force produit une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé. Ce principe, souvent confondu avec le concept de force centrifuge, ne s'applique jamais en statique où les interactions n'existent pas.

Par contre, il s'applique parfaitement et intégralement dans le cadre d'une description dynamique : cela signifie que, lorsqu'un deux-roues décrit une trajectoire circulaire, les pneumatiques exercent une poussée horizontale sur le sol, de même intensité que la force de guidage, mais de sens opposé.

Cette poussée s'exerce sur la Terre mais ne perturbe en rien son mouvement, étant donné le rapport des masses en jeu [(5)].

Conclusion

L'origine de la force de guidage diffère selon qu'on considère une voiture ou un deux-roues : s'agissant d'une voiture, la force de guidage provient du pivotement des roues directrices ; s'agissant d'un deux-roues, cette force provient de l'inclinaison de la machine.

Tous les autres principes de physique, notamment ceux concernant l'énergie cinétique et le freinage, sont parfaitement et intégralement applicables aux deux-roues, et dans les mêmes formes que celles énoncées pour l'automobile.

(1) *Dans un triangle rectangle, la tangente trigonométrique est le rapport entre la longueur du côté opposé et celle du côté adjacent de l'angle considéré.*

(2) *Il faut noter que l'angle d'inclinaison et, par conséquent, l'accélération transversale sont deux grandeurs indépendantes de la masse, elles ne dépendent que de la vitesse et du rayon de la trajectoire. On en déduit ce résultat surprenant : un cycliste et un motocycliste circulant à la même vitesse sur une trajectoire de même rayon présenteront un angle d'inclinaison et une accélération transversale rigoureusement identiques, en dépit du fait qu'ils devront solliciter chacun une force de guidage proportionnelle à leur masse.*

(3) *Le poids reste constant dans les limites d'une zone géographique donnée, sa variation restant négligeable jusqu'à 5 000 m d'altitude environ (le point culminant des routes européennes n'atteint pas 3 000 m). Par contre, en raison de la forme aplatie de la Terre, le poids varie avec la latitude.*

(4) *Un triangle rectangle dont l'un des angles vaut 45° est forcément isocèle : ses deux côtés sont égaux.*

(5) *Si on compare une motocyclette de masse 3×10^{2} kg et la Terre (6×10^{24} kg), ce rapport vaut 2×10^{22} !*

2. L'EFFET GYROSCOPIQUE

Définition

L'*effet gyroscopique* se définit comme la difficulté de modifier l'orientation du plan de rotation d'une masse tournante.

L'effet gyroscopique est ainsi nommé en référence au mode de fonctionnement du gyroscope, appareil de contrôle de mouvement utilisé notamment dans l'aviation (du grec *gyro* qui signifie rotation et *scope*, observer).

Le gyroscope fonctionne selon le principe suivant : l'appareil contient une roue dont le mouvement de rotation à grande vitesse est entretenu par un jet d'air sous pression. L'ensemble est monté libre sur deux axes perpendiculaires autorisant tous les degrés de liberté, de sorte que le plan de rotation de la roue reste toujours indépendant des mouvements de l'avion, à cause de l'effet gyroscopique. Grâce à ce type d'appareil, le pilote peut disposer d'un repère d'orientation spatiale constant et fiable.

D'où provient l'effet gyroscopique ?

L'effet gyroscopique est une manifestation du *moment cinétique*, un nom barbare pour désigner la *quantité de mouvement rotatif* d'une pièce qui tourne autour d'un axe. Cette grandeur est, pour une masse en rotation, l'équivalent de la *quantité de mouvement linéaire* pour une masse en translation (voir dossier ADILCA ''*collisions frontales*'').

Le moment cinétique possède une orientation spatiale, matérialisée par un plan de rotation. Ce plan est perpendiculaire à l'axe de rotation. Ainsi, toute tentative de modifier l'orientation de ce plan se heurte à la résistance provenant du moment cinétique, autrement dit, se heurte à l'effet gyroscopique.

Une expérience facile

L'effet gyroscopique peut être mis en évidence en tenant une roue de vélo à bout de bras : on constate qu'il n'y a aucune difficulté à modifier le plan de rotation de la roue quand celle-ci ne tourne pas.

Mais dès que la roue tourne, une résistance apparaît dont l'intensité est proportionnelle à la vitesse de rotation. En outre, à vitesse de rotation égale, diverses mesures ont montré que l'effet gyroscopique est proportionnel à la masse de la roue, et, à masse égale, proportionnel au carré de son rayon.

L'effet gyroscopique renforce la stabilité d'un deux-roues en mouvement rectiligne et s'oppose à la mise sur l'angle lors des changements de direction.

Remarque 1 : l'effet gyroscopique total qui s'exerce sur un deux-roues à moteur provient de l'ensemble des masses en rotation : roue avant, roue arrière (plus massique que la roue avant, elle génère davantage d'effet), pièces mécaniques (si le moteur est en position transversale, ce qui est le cas de la plupart des machines) : vilebrequin, arbres à cames, embrayage, arbres de boîte de vitesses et accessoires (alternateur, pompe à huile, pompe à eau…).

Remarque 2 : toutes caractéristiques égales par ailleurs (masse, rayon, vitesse de rotation), l'effet gyroscopique se manifeste de manière équivalente à partir de n'importe quelle pièce en rotation, et produit donc les mêmes effets, qu'il s'agisse de motocyclettes, de voitures ou de camions. Cet effet est simplement d'une importance relative à cause de la stabilité naturelle des véhicules à quatre roues.

Résistance à l'inclinaison

Le *pivotement de la direction* est nécessaire au maintien de l'équilibre d'un deux-roues en ligne droite comme en courbe mais, contrairement au principe qui s'applique à l'automobile, il est une conséquence du mouvement et non sa cause [(1)].

En première approximation, l'angle de pivotement de la direction d'un deux-roues est fonction de l'empattement et fonction inverse du rayon de la trajectoire, son amplitude moyenne se situant autour de ± 10°.

Par ailleurs, nous avons vu que l'accélération transversale ne dépend que de l'angle d'inclinaison de la machine par rapport à la verticale, cet angle pouvant atteindre ou dépasser 45°.

Tout changement de direction aux commandes d'un deux-roues exige donc une *mise sur l'angle*, manœuvre à laquelle s'oppose l'effet gyroscopique.

Le couple de roulis [(2)]

L'effet gyroscopique impose au conducteur d'exercer un *couple de roulis* (au sens physique du terme, c'est-à-dire une *force* combinée à un *bras de levier* [(3)]) afin de pouvoir incliner la machine chaque fois qu'un changement de direction est nécessaire.

Le couple de roulis peut se résumer à la somme de deux ou trois forces [(4)] orientées de haut en bas ou de bas en haut et s'appliquant à l'extrémité du guidon et des repose-pieds.

La demi-largeur du guidon et la distance qui sépare les repose-pieds de l'axe de symétrie de la machine sont les bras de levier constitutifs du couple en question.

Bien évidemment, le couple de roulis doit être à la mesure de l'effet gyroscopique total généré par les différentes pièces en rotation (roue avant, roue arrière, mais aussi transmission et moteur si ceux-ci sont en position transversale).

La vitesse

Les caractéristiques physiques des pièces en rotation étant définies par des grandeurs invariables (masse, rayon), la vitesse de rotation est la seule donnée affectant l'effet gyroscopique.

La rotation des roues étant toujours strictement corrélée à la translation du véhicule (sauf situation exceptionnelle telle que patinage, blocage de roue ou dérapage), on en déduit que le couple de roulis doit être proportionnel à la vitesse de la machine (on néglige l'incidence des variations de régime moteur dans le cas où ce dernier serait en position transversale).

L'autre facteur à prendre en considération est que, toutes conditions égales par ailleurs et indépendamment de ce qui a été énoncé ci-dessus, le couple de roulis doit être proportionnel à la vitesse de mise sur l'angle de la machine.

Conclusion

L'effet gyroscopique est un effet stabilisateur provoqué par toute masse qui tourne autour d'un axe.

L'effet gyroscopique est proportionnel à la vitesse de rotation.

L'effet gyroscopique s'oppose à la mise sur l'angle des deux-roues, il est contré par un couple de roulis, à l'initiative du conducteur.

Le couple de roulis doit être proportionnel, non seulement à la vitesse de la machine, mais aussi à la vitesse de sa mise sur l'angle.

(1) *Autrement dit, l'inclinaison de la machine précède le pivotement de la direction. Pour le vérifier, une expérience facile à réaliser consiste à tenir une bicyclette par la selle : on constate que le guidon pivote du côté où l'on incline la machine.*

(2) *Roulis est un terme de marine qui désigne le mouvement d'oscillation d'un navire d'un bord sur l'autre autour d'un axe longitudinal. Cette définition colle parfaitement au mouvement d'un deux-roues, à cette différence près qu'ici, l'axe longitudinal se confond avec la surface du sol.*

(3) *La notion de couple découle ici de l'impossibilité d'exercer directement une force sur une pièce en rotation, sauf à agir sur l'axe de rotation et de manière déportée. Rappelons qu'au sens physique du terme, un couple est le produit d'une force qui s'exerce perpendiculairement à l'extrémité d'un bras levier (le ''déport''). Une force s'exprimant en newton (symbole **N**) et un bras de levier en mètre (symbole **m**), l'unité de couple est donc le newton-mètre (symbole **Nm**).*

(4) *Une seule force peut suffire si le conducteur lâche le guidon ou s'il chevauche un monocycle.*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

3. QUELQUES RELATIONS ENTRE GRANDEURS

Poids

$$P = M \cdot g$$

P : poids, exprimé en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
g : accélération gravitationnelle, exprimée en $m.s^{-2}$
(accélération gravitationnelle terrestre : **g** = 9,8 $m.s^{-2}$)
cohérence des unités : **P** = kg . $m.s^{-2}$ = **N**

Exemple : calculons le poids d'une motocyclette de 300 kg (**g** = 10 $m.s^{-2}$) :

P = 300 x 10 = 3 000 **N**

Accélération transversale :

$$\Upsilon = V^2 / R$$

ϒ : accélération transversale, exprimée en $m.s^{-2}$
V : vitesse, exprimée en $m.s^{-1}$
R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**
cohérence des unités : $\Upsilon = (m.s^{-1})^2 \cdot m^{-1} = m^2.s^{-2} \cdot m^{-1} = \mathbf{m.s^{-2}}$

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une motocyclette qui décrit une trajectoire circulaire de 100 m de rayon à la vitesse de 20 $m.s^{-1}$ (72 $km.h^{-1}$) :

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

Accélération transversale :

$$\Upsilon = g \cdot \text{tangente } \alpha$$

ϒ : accélération transversale, exprimée en $m.s^{-2}$
g : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en $m.s^{-2}$
α : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension ;
cohérence des unités : **ϒ** = $\mathbf{m.s^{-2}}$

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une motocyclette qui s'incline de 22° par rapport à la verticale (**g** = 10 $m.s^{-2}$; tangente 22° = 0,4) :

$\Upsilon = 10 \times 0,4 = 4\ \mathbf{m.s^{-2}}$

Force de guidage :

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

F : force de guidage, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
V : vitesse, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**
cohérence des unités : $\mathbf{F} = kg . (m.s^{-1})^2 . m^{-1} = kg . m^2.s^{-2} . m^{-1} = kg . m.s^{-2} = \mathbf{N}$

Exemple : calculons la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques d'une motocyclette de masse 300 kg circulant à la vitesse de 20 $m.s^{-1}$ (72 $km.h^{-1}$) sur une chaussée horizontale à dévers nul, la machine décrivant une trajectoire circulaire de 100 m de rayon :

$$\mathbf{F} = 300 \times 20^2 / 100 = 300 \times 400 / 100 = 1\,200\ \mathbf{N}$$

Force de guidage :

$$F = P . \text{tangente}\ \alpha$$

F : force de guidage, exprimée en **N**
P : poids, exprimé en **N**
α : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension ;
cohérence des unités : $\mathbf{F} = kg.m.s^{-2} = \mathbf{N}$

Exemple : calculons la force de guidage qui s'exerce sur les pneumatiques d'une motocyclette (poids total 3 000 N) décrivant une trajectoire circulaire sur une chaussée horizontale à dévers nul, l'angle d'inclinaison de la machine par rapport à la verticale étant égal à 22° (tangente 22° = 0,4) :

$$\mathbf{F} = 3\,000 \times \text{tangente}\ 22° = 3\,000 \times 0{,}4 = 1\,200\ \mathbf{N}$$

Charge dynamique :

$$R = [P^2 + F^2]^{1/2}$$

R : charge dynamique, exprimée en **N**
P : poids, exprimé en **N**
F : force de guidage, exprimée en **N**
cohérence des unités : $\mathbf{R} = [(kg.m.s^{-2})^2]^{1/2} = (kg^2.m^2.s^{-4})^{1/2} = kg.m.s^{-2} = \mathbf{N}$

Exemple : calculons la charge dynamique d'une motocyclette de poids total 3 000 N soumise à une force de guidage de 1 200 N :

$$\mathbf{R} = [(3\,000^2) + (1\,200^2)]^{1/2} = [9\,000\,000 + 1\,440\,000]^{1/2} = [10\,440\,000]^{1/2} = 3\,235\ \mathbf{N}$$

Charge dynamique :

$$R = P / \cos \alpha$$

R : charge dynamique, exprimée en **N**
P : poids, exprimé en **N**
α : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension ;
cohérence des unités : $R = kg.m.s^{-2} = N$

Exemple : calculons la charge dynamique d'une motocyclette de poids total 3 000 N lorsque l'angle d'inclinaison de la machine par rapport à la verticale est égal à 22° (cosinus 22° = 0,927) :

$$R = 3\,000 / 0{,}927 = 3\,235 \text{ N}$$

Coefficient d'adhérence :

$$\mu = \Upsilon / g$$

μ : coefficient d'adhérence, grandeur sans dimension ;
ϒ : accélération transversale, exprimée en $m.s^{-2}$
g : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en $m.s^{-2}$
cohérence des unités : $\mu = m.s^{-2} . (m.s^{-2})^{-1} = m.s^{-2} . m^{-1}.s^{+2}$ = grandeur sans dimension.

Exemple : calculons le coefficient d'adhérence qui autorise une accélération transversale de 4 $m.s^{-2}$ ($g = 10\ m.s^{-2}$) sur une chaussée horizontale et sans dévers :

$$\mu = 4 / 10 = 0{,}4$$

Coefficient d'adhérence :

$$\mu = V^2 / (R . g)$$

μ : coefficient d'adhérence, grandeur sans dimension ;
V : vitesse, exprimée en $m.s^{-1}$
R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**
g : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en $m.s^{-2}$
cohérence des unités :
$\mu = (m^{+1}.s^{-1})^2 . (m^{+1} . m^{+1}.s^{-2})^{-1} = m^{+2}.s^{-2} . m^{-2}.s^{+2}$ = grandeur sans dimension.

Exemple : calculons le coefficient d'adhérence qui permet à une motocyclette de décrire une trajectoire circulaire de 100 m de rayon à la vitesse de 20 $m.s^{-1}$ ($g = 10\ m.s^{-2}$) sur une chaussée horizontale et sans dévers :

$$\mu = 20^2 / (100 \times 10) = 400 / 1\,000 = 0{,}4$$

Coefficient d'adhérence :

$$\mu = \text{tangente } \alpha$$

μ : coefficient d'adhérence, grandeur sans dimension ;
α : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension.

Exemple : calculons le coefficient d'adhérence qui autorise un angle d'inclinaison de 22° par rapport à la verticale sur une chaussée horizontale et sans dévers :

$$\mu = \text{tangente } 22° = 0{,}4$$

Effet gyroscopique :

$$Q = ½\, M \,.\, R^2 \,.\, \omega$$

Q : effet gyroscopique, exprimé en $\mathbf{kg.m^2.s^{-1}}$
M : masse, exprimée en **kg**
R : rayon, exprimé en **m**
ω : vitesse de rotation, exprimée en $\mathbf{rad.s^{-1}}$
cohérence des unités : $\mathbf{Q} = kg\,.\,m^2\,.\,s^{-1} = \mathbf{kg.m^2.s^{-1}}$
(*le radian est une grandeur sans dimension*)

Exemple : calculons l'effet gyroscopique provenant d'une roue assimilée à un disque plein et homogène de masse 12 kg et de rayon 0,30 m lorsque cette roue tourne à la vitesse de 10 tours par seconde (62,8 $rad.s^{-1}$) :

$$\mathbf{Q} = ½ \times 12 \times 0{,}30^2 \times 62{,}8 = 6 \times 0{,}09 \times 62{,}8 = 34\ \mathbf{kg.m^2.s^{-1}}$$

Couple de roulis :

$$C = Q \,.\, \alpha$$

C : couple de roulis, exprimé en **Nm**
Q : effet gyroscopique, exprimé en $\mathbf{kg.m^2.s^{-1}}$
α : vitesse de mise sur l'angle, exprimée en $\mathbf{rad.s^{-1}}$
cohérence des unités : $\mathbf{C} = kg.m^2.s^{-1}\,.\,s^{-1} = kg.m.s^{-2}\,.\,m = \mathbf{Nm}$
(*le radian est une grandeur sans dimension*)

Exemple : calculons le couple nécessaire pour incliner de 30 degrés (0,5 radian) en une seconde une roue assimilée à un disque plein et homogène de masse 12 kg et de rayon 0,30 m lorsque cette roue tourne à la vitesse de 10 tours par seconde (62,8 $rad.s^{-1}$) :

$$\mathbf{C} = 34 \times 0{,}5 = 17\ \mathbf{Nm}$$

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *