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 permet de solliciter 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.

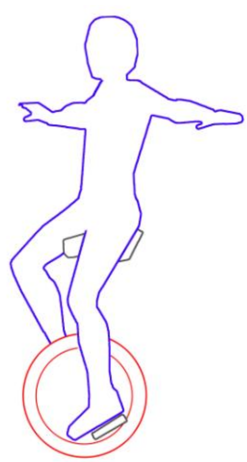
Il en résulte qu'un deux-roues est, par nature, dans l'incapacité de décrire une trajectoire rigoureusement rectiligne et que, pour tendre vers une ligne droite, il doit en réalité décrire une trajectoire sinusoïdale.

L'aspect de cette sinusoïde est d'autant plus marqué 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 à ce qu'il se passe en voiture, c'est donc l'inclinaison du véhicule 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 veut virer.



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 :

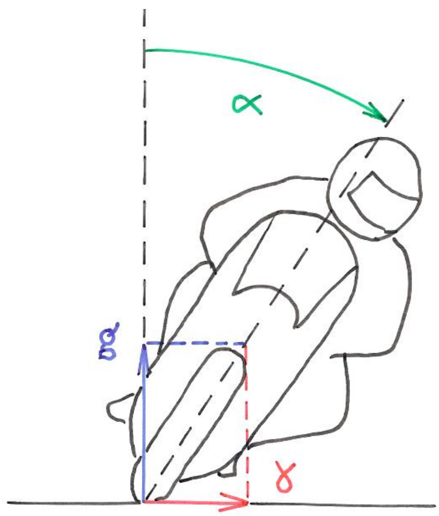
- si l'angle d'inclinaison est nul, la réaction du sol est verticale, égale et opposée à la force de gravitation, il y a pas de force de guidage, la trajectoire est rectiligne ;

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

L'accélération transversale

L'inclinaison du véhicule se traduit par une accélération transversale à laquelle sont soumis la machine, les passagers et leurs bagages.

Du point de vue mathématique, 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 Ɣ 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 est inversement proportionnelle au rayon de la trajectoire, mais elle est proportionnelle au *carré de la vitesse*.

La trajectoire étant imposée, c'est donc la vitesse 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 maintenir une trajectoire donnée (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 dues à l'état de la route, 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 forces 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 bande de roulement des pneumatiques et la surface du revêtement routier.

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 : il décrit alors une trajectoire circulaire ;

- si l'adhérence est insuffisante, les pneumatiques glissent, rompant ainsi la condition d'équilibre. Avec une accélération transversale nulle, c'est 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. 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 [(4)].

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 du véhicule.

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 toujours indépendantes de la masse, elles ne dépendent que de la vitesse et du rayon de la trajectoire. On en déduit qu'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) *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 masse tournante 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 masse tournante 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 est assez facile de modifier le plan de rotation de la roue quand celle-ci ne tourne pas. Mais dès que la roue tourne, ça devient difficile, et plus elle tourne vite, plus la difficulté augmente. En outre, à vitesse de rotation égale, on peut constater 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 donc à la mise sur l'angle nécessaire pour changer 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.

L'accélération transversale

Le pivotement de la direction est nécessaire au maintien de l'équilibre d'un deux-roues en ligne droite comme en courbe. Cependant, l'accélération transversale requise pour décrire une trajectoire circulaire ne dépend que de l'inclinaison de la machine et des conditions d'adhérence.

Diverses mesures montrent en effet que l'angle de pivotement de la direction est indépendant du rayon de la trajectoire, son amplitude moyenne se situant autour de ± 10°, tandis que l'accélération transversale est toujours fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale, cet angle pouvant atteindre ou dépasser 45°.

D'autres expériences démontrent que, toutes conditions égales par ailleurs (vitesse, rayon de trajectoire), l'angle de pivotement de la direction dépend des caractéristiques géométriques de la machine (empattement, angle de chasse et chasse linéaire).

Le couple d'inclinaison

Tout conducteur aux commandes d'un deux-roues doit donc exercer un *couple d'inclinaison* (au sens physique du terme) afin de contrer l'effet gyroscopique chaque fois qu'un changement de direction est nécessaire. Ce couple s'exerce de haut en bas ou de bas en haut, par l'intermédiaire du guidon et des repose-pieds.

Le couple d'inclinaison est fonction de la largeur du guidon et de la distance qui sépare les repose-pieds de l'axe de symétrie de la machine. À caractéristiques géométriques égales, ce couple est fonction de la masse des différentes pièces en rotation (roue avant, roue arrière, mais aussi transmission et moteur si ceux-ci sont en position transversale), du carré de leur rayon et de leur vitesse de rotation.

Conclusion

L'effet gyroscopique est un effet stabilisateur provoqué par toute masse en rotation. L'effet gyroscopique s'oppose à la mise sur l'angle des deux-roues, il est contré par un couple d'inclinaison, à l'initiative du conducteur.

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 $\mathbf{m.s^{-2}}$
(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 :

$$ϒ = V^2 / R$$

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

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 $km.h^{-1}$) :

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

Accélération transversale :

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

ϒ : accélération transversale, exprimée en $\mathbf{m.s^{-2}}$
g : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en $\mathbf{m.s^{-2}}$
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) :

ϒ = 10 x 0,4 = 4 $\mathbf{m.s^{-2}}$

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

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 :

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

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 **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 :

μ = 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 :

μ = 20^2 / (100 x 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 d'inclinaison :

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

C : couple d'inclinaison, exprimé en **Nm**
Q : effet gyroscopique, exprimé en $\mathbf{kg.m^2.s^{-1}}$
α : vitesse d'inclinaison, 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 * * *