LES LOIS PHYSIQUES APPLIQUÉES AU MOUVEMENT DES DEUX-ROUES

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 deux-roues qui décrit une trajectoire circulaire ?

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

II. 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 génère 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 récupérer à tout instant l'amorce d'une chute grâce au pivotement de la direction.

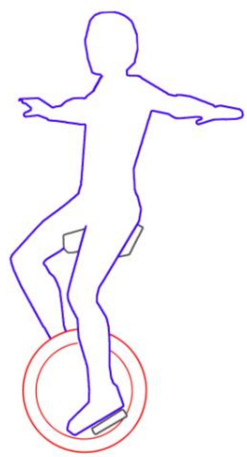
Il en résulte qu'un deux-roues est, par nature, dans l'incapacité de décrire une trajectoire rigoureusement rectiligne et que, pour tendre vers une ligne droite, il doit en réalité décrire une trajectoire de forme sinusoïdale.

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 directrice. 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 d'un 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 :

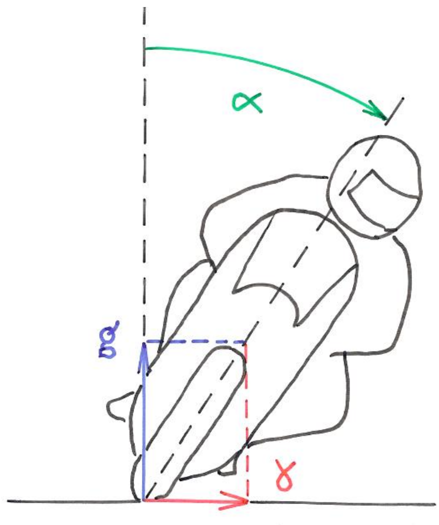
- si l'angle d'inclinaison est nul, la réaction du sol est verticale, strictement égale et opposée au *poids* ; ces deux forces étant équilibrées, la trajectoire est rectiligne ;

- 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 de la masse par l'accélération gravitationnelle. La force de guidage est le produit de la masse par l'accélération transversale. Après simplification, on est en présence de deux accélérations : l'une est *verticale* et invariante (9,8 $m.s^{-2}$ sous nos latitudes), 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 est inversement proportionnelle au rayon de la trajectoire, mais surtout, elle est 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 direction.

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, la moindre 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 un plan qui reste 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 démontrer l'existence de la *force de guidage*.

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 de la machine. 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.

Le principe de réciprocité

Le troisième principe de Newton, ou *principe de réciprocité*, énonce que toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé. Ce principe, souvent confondu avec le concept de force centrifuge, ne s'applique jamais dans une description statique où les interactions n'existent pas.

Par contre, il s'applique parfaitement 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. Le conducteur ressent parfaitement cette action réciproque : elle lui donne l'impression de ''peser'' davantage sur les suspensions et les pneumatiques de la motocyclette.

Cette poussée s'exerce sur le globe terrestre mais n'affecte pas son mouvement de rotation, étant donné le rapport des masses en jeu (4).

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. Naturellement, l'inclinaison d'un deux-roues est 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 l'accélération gravitationnelle terrestre prise comme référence (''**g**'' = 9,8 $m.s^{-2}$ sous nos latitudes).

Le coefficient d'adhérence d'un deux-roues en équilibre sur une trajectoire circulaire se calcule en procédant de la même manière que pour 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 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 [(5)]. Le coefficient d'adhérence est alors égal à 1 (tangente 45° = 1).

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, le freinage et les collisions, sont intégralement transposables et applicables aux deux-roues, 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 aire 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 du globe terrestre, 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} *!*

(5) *Un triangle rectangle dont l'un des angles vaut 45° est forcément isocèle, cela signifie que ses deux côtés sont égaux.*

III. 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. 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 terme barbare qui désigne la *quantité de mouvement de rotation* d'une masse qui tourne autour d'un axe. Cette grandeur est, pour une masse en rotation, l'équivalent de la *quantité de mouvement rectiligne* pour une masse en translation (voir dossier ADILCA ''*collisions frontales*'').

Le moment cinétique possède une orientation spatiale caractérisée par un plan de rotation. Ce plan est perpendiculaire à l'axe de rotation (1). 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 l'orientation de la roue quand celle-ci ne tourne pas.

Mais dès que la roue tourne, il devient difficile de modifier cette orientation : une résistance apparaît dont l'intensité est proportionnelle à la vitesse de rotation, c'est l'effet gyroscopique. Diverses mesures ont montré qu'à vitesse de rotation égale, cet effet est proportionnel à la masse de la roue et 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) telles que 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), le moment cinétique se manifeste de manière équivalente à partir de n'importe quelle pièce en rotation, et produit donc un effet identique, 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 la mise sur l'angle

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 circulaire et non sa cause [(2)].

De fait, on constate que l'angle de pivotement de la direction d'un deux-roues n'est pas corrélé à l'accélération transversale, il est essentiellement fonction de l'empattement de la machine et fonction inverse du rayon de sa trajectoire, son amplitude moyenne se situant autour de ± 10°. Cette valeur est négligeable si on la compare à l'angle d'inclinaison de la machine qui peut atteindre ou dépasser 45°.

Par conséquent, toute modification de la trajectoire d'un deux-roues oblige le conducteur à incliner la machine par rapport à la verticale, c'est la *mise sur l'angle*, une manœuvre à laquelle l'effet gyroscopique total oppose une certaine résistance.

Le couple de roulis

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

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

La demi-largeur du guidon et la distance qui sépare chaque repose-pied 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 invariantes (masse, rayon), la vitesse de rotation est la seule donnée affectant l'intensité de l'effet gyroscopique.

La rotation des roues étant toujours strictement corrélée à la translation du véhicule (sauf situation exceptionnelle telle que cabrage prolongé, 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 si ce dernier est 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 masse et à la vitesse de rotation.

L'effet gyroscopique total s'oppose à la mise sur l'angle du 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) *En jargon scientifique, on dit que le moment cinétique est une* grandeur vectorielle *(ça signifie qu'elle a une orientation spatiale, autrement dit, elle peut être représentée par une flèche), à la différence de l'énergie cinétique (de rotation ou de translation) qui est une* grandeur scalaire *(elle n'a pas d'orientation spatiale et ne peut être représentée que par un nombre). On peut le vérifier grâce à l'expérience de la roue de vélo tenue à bout de bras : un certain couple est nécessaire pour modifier l'orientation de la roue en rotation, tandis que sa vitesse de rotation reste inchangée malgré cette orientation (on néglige la résistance de l'air et celle des roulements à billes). Dans les ouvrages intégristes, une grandeur vectorielle est signalée par une flèche horizontale placée au-dessus du symbole.*

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

(3) *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, une définition qui colle parfaitement au mouvement d'un deux-roues. L'axe longitudinal dont il est question ici passe par le centre de gravité de la machine. Si la machine était isolée dans l'espace, le couple de roulis la ferait tourner autour de cet axe ; au contact du sol, le couple de roulis combiné à la réaction transversale que la route exerce sur les pneumatiques, abaisse cet axe jusqu'à la surface du sol, d'où l'inclinaison de la machine.*

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

IV. LA FORCE CENTRIFUGE

Force centrifuge, définition

Le concept de force centrifuge a été utilisé à tort et à travers pour décrire n'importe quel mouvement circulaire, aux dépens de la seule et véritable explication du phénomène. Car, comme chacun sait (ou devrait savoir), la force centrifuge est une *force fictive*.

Qu'est-ce que cela signifie ? Citons le dictionnaire Larousse : « *fictif, ive : qui ne fait pas partie de la réalité, qui relève de l'imagination* ». En clair : la force centrifuge n'existe pas (voir dossier ADILCA ''*force centrifuge*'').

Voici la véritable définition du concept de force centrifuge appliqué au mouvement circulaire d'un cycliste :

« On appelle force centrifuge la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'un cycliste immobile (on néglige la masse de la bicyclette) afin de le maintenir en équilibre malgré son inclinaison. »

Examinons les conditions de validité de cette définition :

1. Le cycliste est parfaitement *immobile*. Il n'y a donc pas de mouvement circulaire. Et sauf phénomène surnaturel, il est évidemment impossible pour un cycliste de rester à la fois immobile et penché.

2. L'emploi du conditionnel : ''*la force qu'il faudrait exercer…*'' Mais personne n'a jamais pu observer une telle force en action. La *pensée magique* à l'œuvre, en somme…

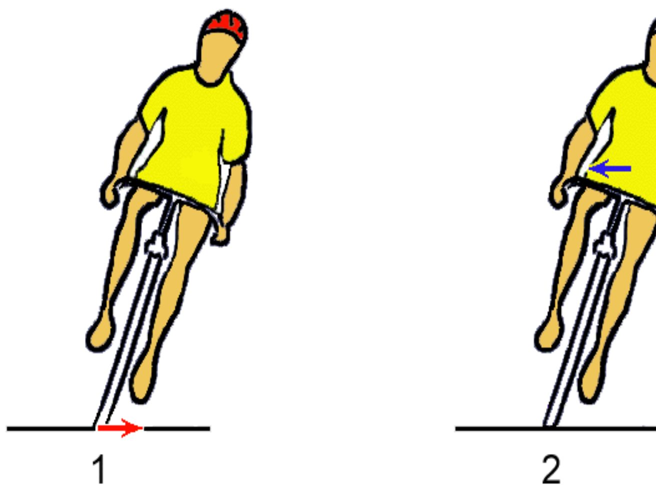
3. Une force qui, si elle existait, devrait s'exercer sur le *centre de gravité* du cycliste. Une condition qui laisse perplexe : essayons d'abord de localiser précisément ce fameux centre (lui aussi objet de bien des fantasmes…), et cherchons ensuite à identifier le type d'interaction dont il pourrait être l'objet(*)…

En bref : Le concept de force centrifuge ne sert qu'à décrire un équilibre statique purement imaginaire, une description sans intérêt pour le grand public qui aurait plutôt besoin de savoir quel est le véritable mécanisme du mouvement circulaire.

Deux dessins, deux légendes

Dessiner une force qui n'existe pas, c'est tout à fait possible ! Cependant, deux dessins sont nécessaires. En effet, un seul dessin pourrait suffire pour expliquer la trajectoire circulaire du cycliste mais, si l'on tient absolument à dessiner cette fameuse force centrifuge, il en faut un second, afin d'éviter tout malentendu. Naturellement, chaque dessin devra posséder sa propre légende.

Voici à quoi ressemble (ou devrait ressembler) un dessin censé représenter la force centrifuge :



<u>Dessin 1</u> : c'est la description réelle (dite ''*dynamique''*) : le cycliste est en mouvement, il décrit une trajectoire circulaire, il a été dévié d'une trajectoire rectiligne grâce à la *force de guidage* qui s'exerce sur les pneumatiques de la bicyclette au contact du sol (flèche rouge). Il n'y a rien à ajouter.

<u>Dessin 2</u> : c'est une description imaginaire (dite ''*statique''*) : cette fois le cycliste est parfaitement immobile, il est penché mais ne tombe pas, il se maintient en équilibre grâce à une force imaginaire qui s'exerce sur son centre de gravité (flèche bleue). Cette force imaginaire qui fait tant fantasmer, c'est la *force centrifuge*.

Conclusion

La force centrifuge est supposée agir sur un cycliste immobile pour l'empêcher de tomber, c'est donc une force purement imaginaire.

La trajectoire circulaire du cycliste ne s'explique que par l'action d'une seule force qui s'exerce sur les pneumatiques de la bicyclette au contact du sol, c'est la force de guidage.

(*) *Le centre de gravité (appelé également 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, comme si toute la matière était concentrée en ce seul point. Dans le cas du corps humain, l'ensemble est constitué du squelette, des muscles, des liquides et de tous les organes nécessaires à la vie. Dans le cas d'une bicyclette, l'ensemble est constitué du cadre, des roues, de la selle, du guidon, de la transmission et des freins. Ces deux exemples montrent que le centre de gravité est un point parfaitement immatériel, il est donc strictement impossible d'y exercer la moindre force.*

V. 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 ($g = 10\ m.s^{-2}$) :

$$P = 300 \times 10 = 3\,000\ N$$

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 : $\Upsilon = (m.s^{-1})^2\ .\ m^{-1} = m^2.s^{-2}\ .\ m^{-1} = m.s^{-2}$

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

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

Accélération transversale :

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

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 : $\Upsilon = m.s^{-2}$

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) :

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

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

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 :

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

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 : $F = kg.m.s^{-2} = N$

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) :

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

Angle d'inclinaison :

$$\text{Tangente } \alpha = F / P$$

α : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension ;
F : force de guidage, exprimée en **N**
P : poids, exprimée en **N**

cohérence des unités : N / N = grandeur sans dimension.

Exemple : calculons l'angle d'inclinaison quand une force de guidage de 1 200 N s'exerce sur une motocyclette de 3 000 N :

$$\text{Tangente } \alpha = 1\,200 / 3\,000 = 0{,}4 \text{ d'où } \alpha = 22°$$

Force centrifuge :

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

F' : force centrifuge, exprimée en **N**
P : poids, exprimée en **N**
α : angle d'inclinaison par rapport à la verticale, grandeur sans dimension ;

cohérence des unités : **F'** = $\mathbf{kg.m.s^{-2}}$

Exemple : calculons la force, dite ''*force centrifuge*'', qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une motocyclette immobile pesant 3 000 N, ceci afin de la maintenir en équilibre malgré une inclinaison de 22 degrés par rapport à la verticale :

F' = – 3 000 x tangente 21,8° = – 3 000 x 0,4 = – 1 200 **N**

Remarque 1 : cette force est couramment appelée ''*force centrifuge*'', un qualificatif incorrect puisqu'il n'y a ni trajectoire, ni rayon, ni centre (la motocyclette est immobile et le reste). Le vrai nom de cette force est : force d'inertie, force fictive, force imaginaire, force apparente ou pseudo-force.

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

Remarque 3 : attention aux interprétations erronées, l'égalité numérique des résultats n'autorisant pas l'interchangeabilité des descriptions, des concepts ou des raisonnements.

Remarque 4 : la traçabilité du raisonnement impose d'effectuer les différents calculs dans l'ordre indiqué. Il est en effet strictement impossible de calculer l'intensité d'une force fictive sans utiliser les données mesurées dans la réalité (angle d'inclinaison, poids, force de guidage).

Remarque 5 : toute démarche scientifique doit nécessairement passer par quatre étapes successives :

1) observer un *phénomène* (ici, un motocycliste qui décrit une trajectoire circulaire) ;

2) mesurer des *grandeurs* (ici : la masse de la motocyclette avec son pilote, la vitesse de la machine et le rayon de sa trajectoire) ;

3) effectuer des *calculs* (ici : l'accélération transversale, la force de guidage et l'angle d'inclinaison de la machine) ;

4) éventuellement, mais c'est une démarche facultative qui n'apporte strictement rien à la compréhension du phénomène étudié, transposer un *raisonnement* (ici : transformation d'une description réelle en une description imaginaire avec l'introduction du concept de force centrifuge).

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 :

$$R = P / \text{cosinus}\ \alpha$$

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 : $\mathbf{R} = kg.m.s^{-2} = \mathbf{N}$

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) :

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

Coefficient d'adhérence :

$$\mu = \Upsilon / g$$

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

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

Coefficient d'adhérence :

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

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 :
$\mu = (m^{+1}.s^{-1})^2 \cdot (m^{+1} \cdot m^{+1}.s^{-2})^{-1} = m^{+2}.s^{-2} \cdot m^{-2}.s^{+2}$ = 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 :

$$\mu = \text{tangente } 22° = 0,4$$

Énergie cinétique de translation :

$$E = \frac{1}{2} M \cdot V^2$$

E : énergie cinétique, exprimée en **J**
M : masse, exprimée en **kg**
V : vitesse, exprimée en **$m.s^{-1}$**
cohérence des unités : **E** = kg . $(m.s^{-1})^2$ = $kg.m^2.s^{-2}$ = **J**

Exemple : calculons l'énergie cinétique d'une motocyclette + conducteur de masse totale 300 kg circulant à 20 $m.s^{-1}$ (72 $km.h^{-1}$) :

$$E = \frac{1}{2} \times 300 \times 20^2 = 150 \times 400 = 60\,000 \text{ J}$$

Énergie cinétique de rotation :

$$E = \frac{1}{2} M . R^2 . \omega^2$$

E : énergie cinétique, exprimé en **J**
M : masse, exprimée en **kg**
R : rayon, exprimé en **m**
ω : vitesse de rotation, exprimée en **rad.s⁻¹**
cohérence des unités : **E** = kg . m² . s⁻² = **J**
(*le radian est une grandeur sans dimension*)

Exemple : calculons l'énergie cinétique de rotation des deux roues d'une motocyclette lorsque ces roues tournent à la vitesse de 10 tours par seconde (63 $rad.s^{-1}$), la roue avant ayant une masse de 12 kg, la roue arrière ayant une masse de 16 kg, chaque roue étant assimilée à un disque plein et homogène de rayon 0,30 m :

$$E = [\frac{1}{2} \times (12 + 16) \times 0{,}30^2 \times 63^2] = [\frac{1}{2} \times 28 \times 0{,}30^2 \times 63^2]$$

$$\mathbf{E} = 14 \times 0{,}09 \times 3\,970 = 5\,000 \ \mathbf{J}$$

Quantité de mouvement de rotation :

$$Q = \frac{1}{2} M . R^2 . \omega$$

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

Exemple : calculons la quantité de mouvement de rotation des deux roues d'une motocyclette lorsque ces roues tournent à la vitesse de 10 tours par seconde (63 $rad.s^{-1}$), la roue avant ayant une masse de 12 kg, la roue arrière ayant une masse de 16 kg, chaque roue étant assimilée à un disque plein et homogène de rayon 0,30 m :

$$Q = [\frac{1}{2} \times (12 + 16) \times 0{,}30^2 \times 63] = [\frac{1}{2} \times 28 \times 0{,}30^2 \times 63]$$

$$\mathbf{Q} = 14 \times 0{,}09 \times 63 = 80 \ \mathbf{kg.m^2.s^{-1}}$$

Ce calcul permet de quantifier l'effet gyroscopique qui provient de la rotation des masses en question.

L'effet gyroscopique se manifestant par une résistance à la mise sur l'angle de la machine lors des changements de direction, le conducteur doit le compenser en exerçant un couple de roulis.

Couple de roulis :

$$\mathbf{C = Q \,.\, \alpha}$$

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

Exemple : calculons le couple de roulis nécessaire pour incliner de 30 degrés (0,5 radian) en une seconde un ensemble de masses en rotation générant un effet gyroscopique de 80 $kg.m^2.s^{-1}$:

C = 80 x 0,5 = 40 **Nm**

Remarque : il s'agit ici d'un couple unique, à répartir entre les différents points d'appui dont dispose le conducteur (guidon, repose-pieds...).

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

VI. BIBLIOGRAPHIE

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

- KITTEL (Charles), KNIGHT (Walter D.), RUDERMAN (Malvin A.) : *Cours de Physique de Berkeley, Tome 1 (traduction du texte original par Pierre Lallemand),* Éditions DUNOD, Paris 2001.

- LE ROND D'ALEMBERT (Jean) : Traité de dynamique, Paris 1743.

- LE TONNELIER DE BRETEUIL, marquise du Chastellet (Gabrielle Émilie) : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (traduction française de l'œuvre d'Isaac Newton), Paris 1759.

- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *