LES PNEUMATIQUES

ADHÉRENCE ET GLISSEMENT DES PNEUMATIQUES

Pneumatiques, masse surfacique, revêtement routier, macro-rugosité, microrugosité, conditions d'adhérence, coefficient d'adhérence, coefficient de glissement, dérive

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

ADHÉRENCE ET GLISSEMENT DES PNEUMATIQUES

Quand on évoque les progrès de l'automobile, on pense immédiatement au rendement des moteurs, à la baisse de la consommation, au respect de l'environnement, à la maîtrise acoustique, au confort…

Ces progrès spectaculaires ne doivent pas occulter ceux accomplis au niveau des pneumatiques, le pneu étant un produit de haute technologie et l'organe essentiel du mouvement de la voiture.

"*Tout vient des pneus…*" rappellent les spécialistes des études de châssis et liaison au sol en sports mécaniques. Et ce qui est vrai pour la course automobile l'est également pour la voiture de monsieur tout le monde.

La vérité sur le centre de gravité…

Commençons par tordre le cou à une idée reçue qui présente le centre de gravité comme l'*alpha* et l'*oméga* des lois physiques : le centre de gravité n'est qu'un point virtuel, un centre d'équilibre où s'applique la *résultante* des forces de gravitation qui agissent sur les différentes masses du véhicule. Cette résultante, c'est le poids, autrement dit une force d'orientation immuable (vers le centre du globe terrestre) et d'intensité constante [(1)].

Cela précisé, aucune autre force ne s'exerce jamais sur le centre de gravité d'aucune masse, quelle qu'elle soit.

Pour vous en convaincre, essayez donc d'atteindre le centre de gravité du premier objet qui se présente sous vos yeux, un stylo ou un briquet par exemple. Une fois l'objet en main, vous pourrez, certes, approcher ce fameux centre, mais de là à l'atteindre ? Et quant à y exercer une quelconque force…

Oublions le centre de gravité et intéressons-nous à ce que les spécialistes appellent la *liaison au sol*, car c'est là que tout se passe.

Le rôle des pneumatiques…

Le mouvement de la voiture dépend de quatre forces, et de quatre seulement : la force de traction, la force de retenue, la force de freinage et la force de guidage. Si ces forces n'existaient pas, il n'y aurait ni variation de vitesse, ni changement de trajectoire. Autrement dit, la voiture resterait immobile ou serait totalement incontrôlable.

D'où viennent ces forces ? Elles naissent au contact du sol et s'exercent à la périphérie des pneumatiques. Elles se transmettent ensuite aux roues, au châssis et à l'ensemble des éléments qui composent la voiture. Dès lors, on comprend pourquoi le pneumatique est l'organe essentiel de la création et de la transmission du mouvement.

Les qualités d'un pneumatique…

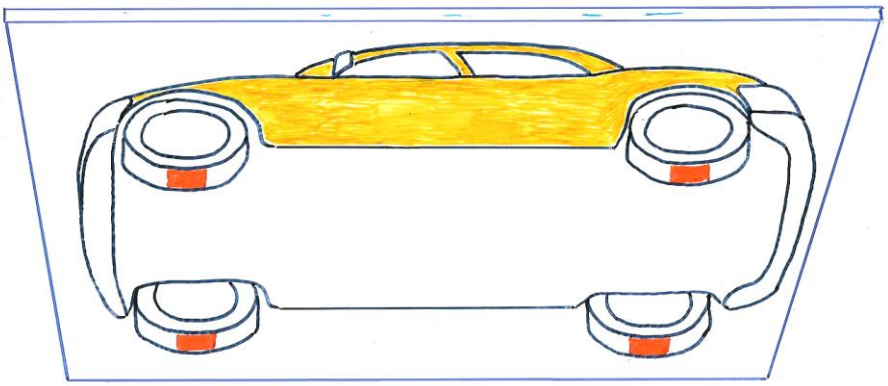
Un pneumatique moderne doit réunir des qualités qui, pendant longtemps, ont semblé inconciliables : endurance, faible résistance au roulement, faible bruit de roulement et surtout, adhérence.

La texture de la gomme, autrement dit sa composition chimique, peut privilégier, soit l'endurance au détriment de l'adhérence (gomme dure des pneus de camions), soit l'adhérence au détriment de l'endurance (gomme tendre des pneus de motos).

La masse surfacique…

Le choix d'une gomme adaptée à un usage spécifique dépend d'une grandeur nommée *masse surfacique*.

On désigne ainsi le rapport entre la masse du véhicule à freiner ou guider, et la surface totale de contact au sol de ses pneumatiques. Cette grandeur s'exprime généralement en kilogramme par centimètre carré (symbole **kg.cm^{-2}**).



© association adilca reproduction interdite

Surface de contact au sol des pneumatiques (d'après un document du ministère des transports, France).

Les valeurs courantes vont de 1,5 pour les voitures de tourisme avec deux personnes à bord sans bagages (cela signifie que chaque centimètre carré de la bande de roulement des pneumatiques doit alors freiner ou guider une masse d'1,5 kilogramme), à 8 pour les poids lourds [(2)].

Les performances des pneumatiques sont liées à la valeur moyenne et idéale de masse surfacique pour laquelle ils ont été conçus : plus la masse surfacique augmente (par adjonction d'un chargement, par exemple), plus il est difficile de freiner ou guider le véhicule.

Et tous les pneus ne se valent pas : à taille identique et à masse surfacique égale, ces performances varient selon les manufacturiers, elles dépendent de la nature de la gomme qui garnit la bande de roulement.

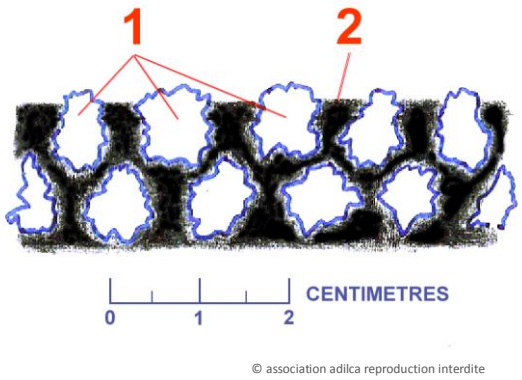
Le revêtement routier

Observons de près la surface d'une route : on constate que le revêtement est constitué de divers granulats (morceaux de roches concassées, gravillons, sable) noyés dans du bitume (goudron).

Les granulats qui émergent à la surface du bitume forment des aspérités plus ou moins saillantes et plus ou moins espacées, c'est la *macro-rugosité* du revêtement. La *microrugosité* désigne l'état de surface des granulats eux-mêmes.

En outre, la nature et les caractéristiques chimiques de la roche d'où ont été extraits les granulats conditionnent les affinités de contact qui peuvent exister entre différents matériaux.

Sur le seul critère de la rugosité, on recense une bonne dizaine de classes de revêtements routiers bitumés, chacune caractérisée par un *potentiel d'adhérence*, autre appellation de la *glissance*.



Coupe schématique d'un revêtement routier :
1. Granulats.
2. Bitume.

L'adhérence des pneumatiques…

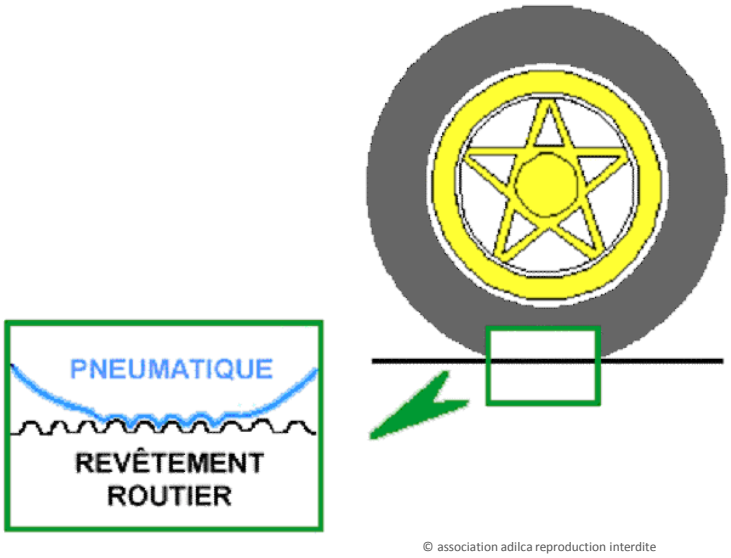
L'adhérence se définit comme la qualité du contact entre le revêtement routier et la bande de roulement des pneumatiques.

L'adhérence d'un pneumatique repose sur trois mécanismes distincts :

- Le poids qui pèse sur la roue, autrement dit la force verticale qui permet le contact entre le pneumatique et le sol, car sans ce contact, rien n'est possible.

- L'indentation (de "*dent*"), c'est la capacité de la gomme des pneumatiques à se déformer au contact des aspérités du revêtement routier pour en épouser les contours, capacité essentielle pour caler la roue et l'empêcher de glisser.

- L'adhésion (à distinguer de l'adhérence), due aux affinités de contact entre les molécules de la bande de roulement des pneumatiques et celles des granulats qui composent le revêtement routier. En effet, certaines de ces molécules ont la propriété de s'attirer mutuellement durant le temps très bref (quelques millièmes de seconde) pendant lequel elles sont en contact.



Phénomène d'indentation.

Les conditions d'adhérence…

Les performances des pneumatiques sont tributaires des *conditions d'adhérence* :

1. Le profil de la route : montée, descente, dévers positif ou négatif. En effet, toutes conditions égales par ailleurs, l'adhérence de freinage est améliorée en montée et pénalisée en descente (voir dossier ADILCA "*déclivités*"). De même, l'adhérence de guidage est améliorée en dévers positif et pénalisée en dévers négatif.

2. La nature du revêtement : terre, béton ou bitume.

3. La rugosité du revêtement routier ainsi que ses caractéristiques chimiques, autrement dit, son *potentiel d'adhérence*.

4. La température ambiante ainsi que celle des pneumatiques. La température est une manifestation de l'agitation des molécules qui composent la matière et donc de leur aptitude à créer des affinités de contact, aussi éphémères soient-elles.

5. Les corps étrangers qui peuvent s'interposer entre le revêtement routier et la bande de roulement des pneumatiques : eau, poussières, hydrocarbures, gravillons, terre, sable, sel, neige fraîche, neige tassée ou glace…

Remarque : les mécanismes d'indentation et d'adhésion des pneumatiques hautes performances ne fonctionnent que dans des *conditions d'adhérence* parfaites : route horizontale et sans dévers, température idéale, bitume rugueux, propre et sec.

Les forces en présence…

On a longtemps cru que la force verticale provenant de la masse qui pèse sur les roues, et dont dépend le contact des pneumatiques avec le sol (c'est ce qu'on appelle vulgairement le *poids*), constituait une limite que la force horizontale (*de freinage* ou *de guidage*) ne pourrait jamais atteindre, et encore moins dépasser.

Il s'agit là d'une interprétation erronée de la *loi de Coulomb*, qui ne s'applique qu'aux frottements simples, autrement dit, au *glissement*. Or, en automobile, c'est l'*adhérence de roulement* qui permet d'obtenir les performances maximales de freinage ou de guidage, grâce à l'indentation et l'adhésion des pneumatiques.

Roulement et glissement…

En termes de liaison au sol, on distingue la *résistance au roulement* (la roue tourne librement avec une valeur de glissement nulle), l'*adhérence de roulement* (la roue tourne avec une valeur de glissement, comprise entre 5 et 20 %) et l'*adhérence de glissement* (la roue tourne avec une valeur de glissement supérieure à 20 %, une valeur de 100 % signifiant que la roue cesse de tourner et glisse sur la chaussée).

L'effet maximal d'indentation et d'adhésion est obtenu avec une amorce de glissement des pneumatiques, mais cet effet qui cesse si le glissement est trop important. Autrement dit, lorsque le revêtement est rugueux, propre et sec, l'adhérence de roulement est toujours plus efficace que l'adhérence de glissement. C'est pourquoi les distances de freinage sont allongées en cas de blocage des roues : cela revient à se priver des effets de l'indentation et de l'adhésion.

Coefficient d'adhérence : la vraie définition…

Le coefficient d'adhérence se définit comme le rapport entre deux *forces* : la *force* de freinage (ou de guidage) et le *poids* de la voiture.

Après simplification, le coefficient d'adhérence se présente comme le rapport entre deux *accélérations* [3]. Du point de vue de la physique, la valeur obtenue est une grandeur sans dimension.

Calcul du coefficient d'adhérence

Le calcul du coefficient d'adhérence nécessite de connaître la décélération de la voiture (s'il s'agit d'un freinage), ou son accélération transversale (s'il s'agit d'une trajectoire circulaire) :

- Dans le cas d'un freinage, la décélération se calcule à partir de la vitesse initiale et de la distance de freinage ; le tableau suivant indique les valeurs correspondant à un coefficient d'adhérence égal à 1 :

vitesse initiale ($km.h^{-1}$)	50	70	90	110	130
distance de freinage (m)	10	19	31	47	66

© association adilca reproduction interdite

- Dans le cas d'une trajectoire circulaire, l'accélération transversale se calcule à partir de la vitesse instantanée et du rayon de trajectoire [4] ; le tableau suivant indique les valeurs correspondant à un coefficient d'adhérence égal à 1 :

vitesse instantanée ($km.h^{-1}$)	50	70	90	110	130
rayon de trajectoire (m)	20	38	62	94	132

© association adilca reproduction interdite

- Dans le cas d'un deux-roues décrivant une trajectoire circulaire sur une chaussée horizontale et sans dévers, outre le mode de calcul précédent, le coefficient d'adhérence est très exactement égal à la *tangente trigonométrique* de l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale (voir dossier ADILCA "*lois physiques deux-roues*").

Signalons enfin que les termes coefficient d'adhérence, coefficient de frottement ou coefficient de décélération sont parfaitement synonymes, cette dernière appellation étant celle qui correspond le mieux à la définition.

Coefficient de glissement : la vraie définition…

Le glissement se définit comme l'écart entre la *vitesse circonférentielle* d'une roue et la *vitesse de translation* de la voiture en situation d'accélération ou de freinage, écart qui s'exprime indifféremment par un pourcentage ou un coefficient [5].

Logiquement, le coefficient de glissement est toujours compris entre 0 (0 % de glissement, ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence entre la rotation de la roue et la translation de la voiture) et 1 (100 % de glissement, ce qui signifie que, soit la roue est totalement bloquée au freinage, soit elle patine alors que la voiture reste parfaitement immobile au démarrage).

Calcul du coefficient de glissement

Le coefficient de glissement est calculé à partir des données transmises par les capteurs de vitesse incorporés aux roulements de roues.

Ces données sont traitées par un calculateur qui compare la vitesse des roues avec celle de la voiture et, si besoin, fait intervenir le système antiblocage (ABS, réduction de la force de freinage) ou le système anti-patinage (ASC / EDS, réduction du couple moteur, voir le dossier ADILCA ''*électronique*'').

Le rôle de ces systèmes est de maintenir la valeur de glissement à son niveau optimal, généralement compris entre 0,05 (5 % de glissement) et 0,20 (20 % de glissement).

La dérive…

La dérive se définit comme l'écart entre le cap théorique et le cap réellement suivi par la voiture lors d'un changement de trajectoire. On distingue la *dérive de structure* liée à la déformation des pneumatiques (torsion des flancs autour d'un axe vertical lors du pivotement des roues directrices) et la *dérive de glissement* qui survient lorsque l'adhérence est insuffisante pour inscrire la voiture sur la trajectoire souhaitée [(6)].

L'ESP (contrôle électronique de trajectoire, voir le dossier ADILCA ''*électronique*'') détecte une dérive en comparant l'angle de rotation du volant avec la vitesse de lacet de la voiture : une vitesse de lacet insuffisante caractérise une dérive des roues avant (sous-virage, la voiture ''*tire tout droit*''), une vitesse de lacet excessive caractérise une dérive des roues arrière (survirage, la voiture ''*part en tête-à-queue*'') [(7)].

L'action de l'ESP consiste à agir sur l'un des freins de la voiture pour rétablir, dans la mesure du possible, des valeurs cohérentes.

Le système route + véhicule + conducteur…

Le coefficient d'adhérence n'a aucune valeur prédictive puisqu'il résulte d'un calcul, ce dernier n'intervenant qu'après un test de freinage ou de guidage. On en déduit l'existence d'un *système* : une route, un véhicule et un conducteur. Comment ce système influence-t-il le coefficient d'adhérence ?

D'abord, chacun sait que sur une route quelconque, les *conditions d'adhérence* varient en permanence selon la déclivité, le dévers, la nature et l'état du revêtement, la température du sol et celle des pneumatiques. Et pour un revêtement donné, d'autres facteurs influencent ces conditions : présence d'eau, de poussières, d'hydrocarbures, de gravillons, de terre ou de sable, de sel, de neige fraîche, de neige tassée ou de glace...

Ensuite, même dans des conditions idéales d'expérience (route horizontale et sans dévers, température idéale, revêtement rugueux, propre et sec), les *performances* de freinage ou de guidage diffèrent selon les catégories de véhicules, ainsi que le montrent les tests régulièrement publiés dans la presse spécialisée.

Un poids lourd, par exemple, décélère en moyenne deux fois moins vite qu'une moto [(8)]. Pourrait-il faire aussi bien ? Oui, à condition d'avoir la même masse surfacique et des pneumatiques garnis d'une gomme identique. Hypothèse irréaliste : ainsi modifié, le camion verrait sa capacité de chargement sérieusement réduite, tandis que le budget alloué aux pneumatiques exploserait…

Enfin, soulignons, entre autre, le rôle de la masse : tout le monde sait (ou devrait savoir) qu'une voiture lourdement chargée ne peut freiner ou virer aussi bien qu'à vide, c'est, là encore, une question de masse surfacique. Toutes conditions égales par ailleurs, le coefficient d'adhérence diminue donc avec l'augmentation de masse, et ce n'est qu'un exemple.

Le conducteur et son rôle…

Contre toute attente, le conducteur a lui aussi un rôle à jouer ! En effet, pour bénéficier des performances maximales des pneumatiques, notamment au freinage, une amorce de glissement est nécessaire. Mais la sollicitation doit rester modérée car l'adhésion cesse si l'indentation est impossible ou si le glissement se substitue au roulement.

Cette manœuvre est si inhabituelle en conditions normales, si brève (moins de 3 secondes suffisent pour immobiliser une voiture lancée à 100 $km.h^{-1}$ sur un bitume plan, propre et sec), et si délicate à contrôler, qu'elle fait l'objet d'un enseignement spécialisé dans des écoles de perfectionnement ou d'initiation au pilotage.

Dans la conduite de tous les jours, les éléments de sécurité active tels que le système antiblocage de roue (ABS), les systèmes anti-patinage (ASC / EDS) et le contrôle électronique de trajectoire (ESP) sont des aides précieuses, car ils permettent de réguler le glissement ou la dérive autour de valeurs optimales.

Mais attention, ces systèmes ont leurs limites : ils n'améliorent pas les conditions d'adhérence, ils ne remplacent pas le conducteur et ne corrigent pas non plus d'éventuelles réactions inappropriées…

Les interprétations erronées…

Le coefficient d'adhérence est une grandeur qui a donné lieu à nombre d'interprétations erronées.

Premier exemple : prétendre que le coefficient d'adhérence est toujours inférieur à 1 est une affirmation inexacte due à la confusion entre glissement et décélération. D'ailleurs, une simple lecture des essais publiés dans la presse automobile suffit pour s'en convaincre : non seulement la valeur 1 est souvent atteinte, mais elle est parfois dépassée, grâce aux capacités d'indentation et d'adhésion des pneumatiques modernes.

Deuxième exemple : se référer au coefficient d'adhérence d'une chaussée ou d'un revêtement quelconque relève d'une erreur conceptuelle majeure. En effet, même si certains énoncés de problèmes de physique en font mention, un revêtement routier ne peut se voir attribuer le moindre coefficient d'adhérence, et pour cause, il ne présente que des *conditions d'adhérence*, conditions qui, par la suite, seront exploitées ou non. Entre ''conditions d'adhérence'' et ''coefficient d'adhérence'', la nuance est de taille ! Le même raisonnement s'applique aux pneumatiques : leur attribuer un coefficient d'adhérence est une absurdité.

(1) *Le poids (à ne pas confondre avec la masse) est une constante sur une aire géographique donnée, et de variation négligeable jusqu'à 5 000 m d'altitude (les plus hautes routes asphaltées d'Europe n'atteignent pas 3 000 m : col du Stelvio en Italie, à 2 757 m d'altitude, col de l'Iseran en France, à 2 770 m d'altitude). Par contre, le poids varie avec la latitude (± 0,25 %), ceci en raison de la forme particulière de la Terre qui n'est pas parfaitement sphérique, mais légèrement aplatie aux pôles et renflée à l'équateur. L'accélération gravitationnelle terrestre (symbole g) est fonction inverse du carré de la distance qui sépare du centre du globe (g = 9,83 m.s^{-2} aux pôles, 9,78 m.s^{-2} à l'équateur, 9,81 m.s^{-2} autour des 45° de latitude).*

(2) *Masse 40 tonnes, ensemble monté sur 12 pneumatiques de type 315 x 22,5.*

(3) *La décélération liée au freinage est ici exprimée en valeur absolue. L'accélération de référence est celle de la pesanteur terrestre (sous nos latitudes : 9,8 m.s^{-2}).*

(4) *On confond souvent le rayon de la trajectoire avec le rayon du virage, alors que tout l'art de la conduite automobile consiste justement à les dissocier.*

(5) *Ne pas confondre le glissement avec la glissance. La glissance est le terme utilisé par les Ponts et Chaussées pour désigner l'état de surface d'un revêtement routier en dehors de toute situation de conduite, ce que nous appelons ici le* potentiel d'adhérence.

(6) *Le cap théorique est celui indiqué par l'orientation des roues directrices. La dérive de structure est parfaitement négligeable si la voiture est équipée de pneumatiques à taille basse, gonflés à la pression adéquate et si les changements de trajectoire sont opérés à allure normale.*

(7) *Le lacet désigne le mouvement de rotation de la voiture autour d'un axe vertical. Si la voiture était équipée de quatre roues directrices pivotant d'une même valeur angulaire, il n'y aurait pas de lacet.*

(8) *Revue* AutoPlus *n° 142 du 28 mai 1991.*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

RELATIONS ENTRE GRANDEURS

Poids :

$$P = M . g$$

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 voiture de 1 500 kg :

P = 1 500 x 9,8 = 14 700 **N**

Force :

$$F = M . \gamma$$

F : force, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
γ : accélération ou décélération, exprimée en **$m.s^{-2}$**
cohérence des unités : **F** = kg . $m.s^{-2}$ = **N**

Exemple : calculons la force de freinage capable de communiquer une décélération de 10 $m.s^{-2}$ à une voiture de masse 1 500 kg :

F = 1 500 x 10 = 15 000 **N**

Décélération :

$$\gamma = V^2 / 2 D$$

γ : décélération, exprimée en **$m.s^{-2}$**
V : vitesse initiale, exprimée en **$m.s^{-1}$**
D : distance de freinage, exprimée en **m**
cohérence des unités : **γ** = $(m^{+1}.s^{-1})^2 . m^{-1} = m^{+2}.s^{-2} . m^{-1}$ = **$m.s^{-2}$**

Exemple : calculons la décélération d'une voiture qui s'immobilise après avoir parcouru 45 mètres avec une vitesse initiale de 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$) :

γ = 30^2 / (2 x 45) = 900 / 90 = 10 **$m.s^{-2}$**

Accélération transversale :

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

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

Exemple : calculons l'accélération transversale d'une voiture qui décrit une trajectoire circulaire de 100 mètres de rayon à la vitesse de 25 $m.s^{-1}$ (90 $km.h^{-1}$) :

$$\gamma = 25^2 / 100 = 625 / 100 = 6{,}25\ \mathbf{m.s^{-2}}$$

Coefficient de glissement

$$a = (V - v) / V$$

a : coefficient de glissement, grandeur sans dimension ;
V : vitesse de translation de la voiture, exprimée en $m.s^{-1}$
v : vitesse circonférentielle de la roue, exprimée en $m.s^{-1}$
cohérence des unités : $(m^{+1}.s^{-1}) . (m^{-1}.s^{+1})$ = grandeur sans dimension.

Exemple : calculons le coefficient de glissement d'une roue qui tourne avec une vitesse circonférentielle de 80 $km.h^{-1}$, la vitesse de translation de la voiture étant de 100 $km.h^{-1}$:

$$\mathbf{a} = (100 - 80) / 100 = 20 / 100 = 0{,}2 = 20\ \%$$

Coefficient d'adhérence :

$$\mu = \gamma / g$$

μ : coefficient d'adhérence, grandeur sans dimension ;
γ : décélération ou 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 : $\mu = (m^{+1}.s^{-2}) . (m^{-1}.s^{+2})$ = grandeur sans dimension.

Exemple : calculons le coefficient d'adhérence autorisant une décélération de 10 $m.s^{-2}$ sur une route horizontale :

$$\mu = 10 / 9{,}8 = 1$$

Coefficient d'adhérence d'un deux-roues décrivant une trajectoire circulaire :

μ = tangente α

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 des pneumatiques d'une motocyclette qui décrit une trajectoire circulaire sur une chaussée horizontale à dévers nul, l'angle d'inclinaison de la machine étant de 40 degrés par rapport à la verticale :

μ = tangente 40° = 0,84

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***