

L'ADHÉRENCE ET LE 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...*” explique Pascal Vasselon, ingénieur français spécialiste 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 (le centre de la Terre) et d'intensité constante ⁽¹⁾.

Ceci 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 incontrôlable.

D'où viennent ces forces ? Elles naissent au contact du sol et s'exercent à la périphérie des pneumatiques pour se transmettre 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.

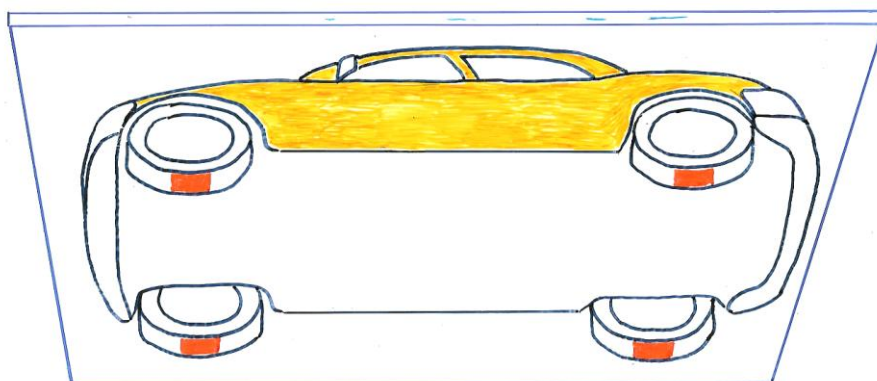
Les pneumatiques ont progressé grâce aux sports mécaniques et aux apports de la tribologie (du grec *tribein*, frotter et *logos*, étude), science du contact et du frottement entre deux matériaux, une discipline qui mêle à la fois des connaissances de physique et de chimie.

Cependant, en dernier ressort, c'est l'usage auquel le pneumatique est destiné qui fait la différence. En effet et selon le cas, la texture de la gomme privilégie soit l'endurance au détriment de l'adhérence (gomme dure des pneus de camions par exemple) 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 bien défini 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 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 étroitement 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 essentiellement de la texture de la gomme qui garnit la bande de roulement.

L'adhérence et son mécanisme...

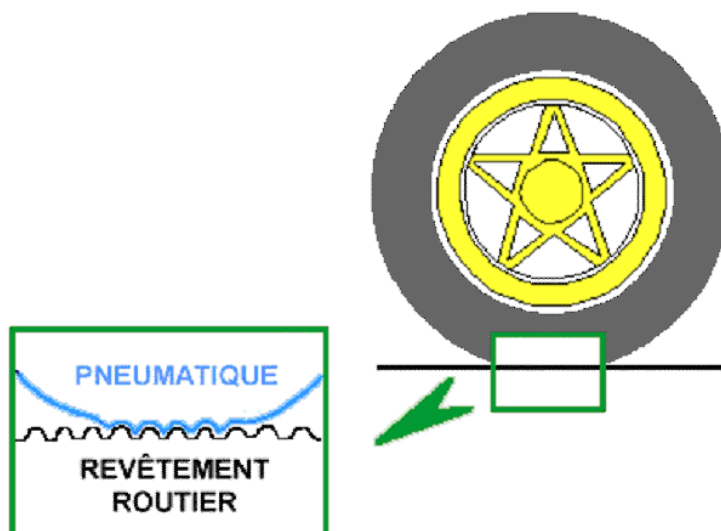
L'adhérence se définit comme la qualité du contact entre le sol et la bande de roulement des pneumatiques. L'adhérence repose sur trois mécanismes distincts :

- 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 sol 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 et celles du 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.

Indentation et adhésion sont deux mécanismes d'intensité variable, selon la texture de la gomme et sa température.



© association adilca reproduction interdite

Phénomène d'indentation.

Les conditions d'adhérence...

Les performances des pneumatiques sont tributaires des *conditions d'adhérence* : le profil de la route, la nature du sol et sa température, et tout ce qui peut s'interposer entre le sol et la bande de roulement des pneumatiques :

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 sol : terre, béton, bitume lisse ou rugueux. Et, pour rugueux qu'ils soient, tous les bitumes ne présentent pas la même texture, ce qui peut plus ou moins convenir à la gomme des pneumatiques ⁽³⁾.
3. Tout ce qui peut s'interposer entre le revêtement routier et la bande de roulement des pneumatiques : eau, poussières, feuilles mortes, hydrocarbures, gravillons, terre ou sable, sel, neige fraîche, neige tassée ou glace...

Or, les mécanismes d'indentation et d'adhésion des pneumatiques hautes performances supposent des *conditions d'adhérence* parfaites : température idéale, route horizontale et sans dévers, bitume uniforme, 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. En automobile, l'intensité maximale de la force de freinage ou de guidage dépend essentiellement des capacités d'indentation et d'adhésion de la gomme des pneumatiques. Pour une masse donnée, cette intensité est sensiblement proportionnelle à la surface de contact au sol des pneumatiques.

C'est pourquoi, dans des conditions idéales d'expérience, l'intensité de la force horizontale (de freinage ou de guidage) peut dépasser celle de la force verticale (poids).

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 faible 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'indentation et l'adhésion n'affectent pas la résistance au roulement si la roue tourne librement. Par contre, leur effet est maximal avec une amorce de glissement des pneumatiques, mais il 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 d'indentation et d'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, c'est donc le rapport entre deux *accélérations*⁽⁴⁾. Du point de vue de la physique, la valeur obtenue est une grandeur sans dimension.

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 du 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 de la trajectoire circulaire, l'accélération transversale se calcule à partir de la vitesse instantanée et du rayon de trajectoire⁽⁵⁾ ; 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 particulier d'un deux-roues qui décrit 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 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 circumférentielle* d'une roue et la *vitesse de translation* de la voiture, c'est une grandeur sans dimension qui s'exprime indifféremment par un pourcentage ou un coefficient.

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).

Le glissement est mesuré par les capteurs de vitesse incorporés aux roulements de roues, ces informations étant ensuite traitées, selon le cas, par le calculateur du système antiblocage (ABS) ou celui du système anti-patinage (ASC / EDS, voir le dossier ADILCA "électronique"). Leur rôle 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 désigne le glissement transversal des pneumatiques lorsque la force de guidage devient insuffisante pour inscrire la voiture sur une trajectoire circulaire ⁽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 un sous-virage (la voiture "tire tout droit"), une vitesse de lacet excessive caractérise un survirage (la voiture "part en tête-à-queue").

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...

On vient de le voir, le coefficient d'adhérence résulte d'un calcul, ce dernier intervenant après un test de freinage ou de guidage. Ce qui, même avec le meilleur matériel disponible (véhicule moderne et en bon état, pneumatiques haut de gamme), suppose 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 nature du revêtement, la déclivité ou le dévers. Et pour un même revêtement, d'autres facteurs influencent ces conditions : température du sol ou des pneus, présence d'eau, de poussières, de feuilles mortes, 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, revêtement rugueux, propre et sec, température idéale), 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 camion, par exemple, décélère en moyenne deux fois moins vite qu'une moto ⁽⁷⁾. 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 gare à l'excès de confiance, car 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 est constant sur une aire géographique donnée, et de variation négligeable jusqu'à 5 000 m d'altitude (les plus hautes routes 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 ($\pm 0,25$ %), 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 est fonction inverse du carré de la distance qui sépare du centre de la Terre).*

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

(3) *La rugosité du bitume dépend essentiellement de la densité et du calibre des granulats qui y sont incorporés (morceaux de roche concassée, gravillons, sable...). Ce sont ces granulats qui, lorsqu'ils émergent à la surface du revêtement, permettent au pneu de "s'accrocher" à la route.*

(4) *La décélération liée au freinage est ici exprimée en valeur absolue. L'accélération de référence est celle de la pesanteur terrestre ($9,8 \text{ m.s}^{-2}$).*

(5) *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.*

(6) *Dérive est un terme de marine ; l'angle de dérive désigne l'écart entre le cap théorique et le cap réellement suivi par un navire, définition évidemment impossible à transposer à l'automobile.*

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

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

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 voiture de 1 500 kg :

$$P = 1\,500 \times 9,8 = 14\,700 \text{ N}$$

Force :

$$F = M \cdot Y$$

F : force, exprimée en **N**

M : masse, exprimée en **kg**

Y : 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 :

$$F = 1\,500 \times 10 = 15\,000 \text{ N}$$

Décélération :

$$Y = V^2 / 2 D$$

Y : décélération, exprimée en **m.s⁻²**

V : vitesse initiale, exprimée en **m.s⁻¹**

D : distance de freinage, exprimée en **m**

cohérence des unités : **Y = (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) :

$$Y = 30^2 / (2 \times 45) = 900 / 90 = 10 \text{ m.s}^{-2}$$

Accélération transversale :

$$Y = V^2 / R$$

Y : 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 : $Y = (m^{+1}.s^{-1})^2 . m^{-1} = m^{+2}.s^{-2} . m^{-1} = m.s^{-2}$

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

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

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 : $(m^{+1}.s^{-1}) . (m^{-1}.s^{+1}) = \text{grandeur sans dimension}$

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 :

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

Coefficient d'adhérence :

$$\mu = Y / g$$

μ : coefficient d'adhérence, grandeur sans dimension ;

Y : 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 : $\mu = (m^{+1}.s^{-2}) . (m^{-1}.s^{+2}) = \text{grandeur sans dimension.}$

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 :

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

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 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 :

$$\mu = \text{tangente } 40^\circ = 0,84$$

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *