

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

LA VOITURE, UN SPORT... DE GLISSE !

Les pneus des véhicules ne font pas que rouler: simultanément, ils glissent, même en l'absence de dérapage. Ce n'est pas sans incidence sur la conduite.

Quel conducteur n'a jamais eu le sentiment que, lorsqu'il freine ou accélère brutalement, il a du mal à garder la direction de son véhicule? Ou ne s'est interrogé sur la vitesse avec laquelle il peut prendre un virage sans déraiper? Les réponses à ces questions sont déterminées par les limites d'adhérence des pneus.

AU-DELÀ DES LOIS DU FROTTEMENT

Or pour comprendre ces limites, invoquer les lois usuelles du frottement ne suffit pas, car la gomme des pneus se déforme beaucoup au contact du sol. La conséquence principale est troublante: même lorsqu'il y a adhérence, une partie du pneu glisse sur la route.

Les situations où des frottements sont à l'œuvre, par exemple lorsqu'on

veut pousser une caisse sur un parquet, paraissent simples: ça glisse ou ça ne glisse pas! Et quand ça ne glisse pas, il n'y a pas de mouvement.

La force de frottement qui compense la force motrice (la poussée de la main dans l'exemple de la caisse) résulte des déformations, invisibles à notre échelle, des aspérités microscopiques des surfaces en contact. Dans ce cas statique, la force de frottement est indépendante de l'aire de contact et présente un maximum égal au produit de la charge (ici le poids) par un coefficient qui dépend de la nature des surfaces en contact. Quand la poussée dépasse ce seuil, l'objet se met à glisser, avec une force de frottement quasiment indépendante de la vitesse de glissement.

Pour un pneu, la situation est différente. Sa gomme peut se déformer fortement, comme on peut le constater en observant l'écrasement des pneus sous le

Quand une voiture freine brutalement ou suit un virage, une partie notable de la surface des pneus au contact de la route subit un glissement. Ce phénomène a une influence sur la vitesse effective du véhicule et, lorsqu'il tourne, sur sa direction.

poids du véhicule. Par conséquent, quand celui-ci roule, notamment lors des phases d'accélération, de freinage, lors des virages ou en présence de vent latéral, des contraintes mécaniques supplémentaires apparaissent au niveau de la couche de gomme périphérique en contact avec le sol: celle-ci subit d'importantes forces de cisaillement.

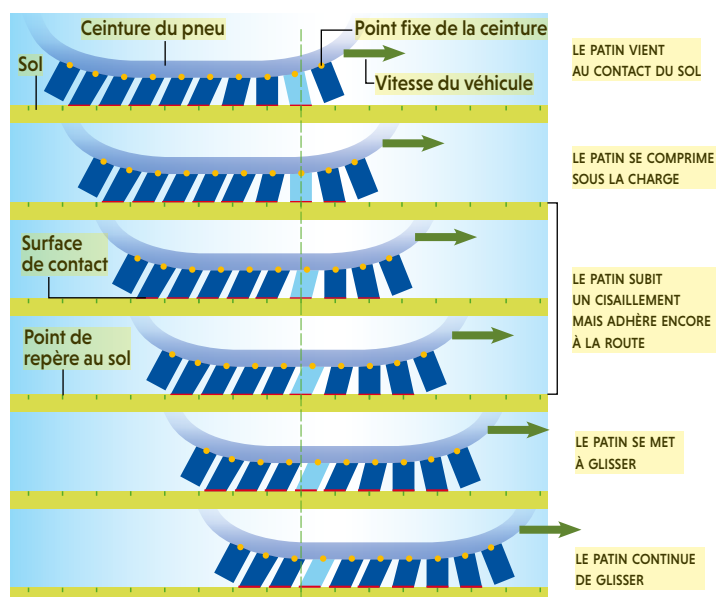
Comment se comporte alors le pneu? Pour le comprendre, modélisons la couche périphérique du pneu comme une succession de patins de gomme indépendants, très peu compressibles mais déformables. Ces patins sont fixés à l'armature métallique du pneu, qui est composée





UN PNEU QUI GLISSE PARTIELLEMENT

La couche externe d'un pneu est composée de patins de gomme déformables, fixés à une « ceinture » qui est, elle, inextensible. Lorsque la roue tourne et qu'un patin vient, à l'avant de la surface de contact pneu-sol, se poser sur la route, ce patin se comprime et se déforme. Le patin subit alors une force de cisaillement. Au début, ce cisaillement est insuffisant pour vaincre l'adhérence gomme-sol et la surface de contact du patin reste immobile. Puis, quand la force de cisaillement a dépassé un certain seuil, cette surface se met à glisser sur le sol (ici vers la droite). Ce glissement d'une partie des patins du pneu implique que, dans la situation de freinage illustrée ici, la vitesse effective du véhicule est légèrement supérieure à la vitesse nominale indiquée par la rotation des roues.



d'une multitude de fils d'acier noyés dans la gomme.

Lorsque le véhicule est au repos, la situation vis-à-vis des frottements est analogue à celle d'un solide habituel, la seule différence étant la déformation, visible à l'œil nu, du pneu.

Dès qu'il y a mouvement, la situation diffère radicalement, car les patins défilent sur la route comme avec une chenille. Analysons donc un freinage à décélération constante et supposons, pour simplifier, qu'à chaque fois qu'un patin entre en contact avec le sol, à l'avant du contact pneu-sol (dans le sens du mouvement), un patin se soulève à l'arrière.

Juste avant que le patin situé à l'avant ne se pose, la force de freinage est répartie sur tous les patins déjà posés. Ceux-ci sont donc fléchis et cisailés: leur base au contact du sol est décalée vers l'arrière par rapport à leur point d'attache sur la ceinture métallique du pneu (*voir l'encadré ci-dessus*). Lorsque, à l'avant, un patin entre en contact avec le sol en raison de la rotation de la roue, les forces horizontales sont donc déjà équilibrées par les autres patins. Ce patin se pose à la verticale de son point d'attache.

Le véhicule continuant à avancer un peu, le patin arrière se soulève et quitte le sol. La force qu'il exerçait doit alors être

assurée par tous les patins restés au contact de la route: leurs flexions augmentent, ainsi que les décalages entre leurs positions et celles de leurs points d'attache. Si l'on suit un patin donné à partir de son arrivée au contact du sol, on voit qu'il se déforme de plus en plus à mesure que les patins arrière se soulèvent. Ainsi, la force de frottement qu'il subit du sol augmente, jusqu'à atteindre le seuil de glissement. Le patin se met alors à glisser. ➤

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



Autrement dit, la partie antérieure du pneu au contact de la route est soumise à des contraintes faibles et ne glisse pas, tandis que la partie postérieure, soumise à des contraintes plus fortes, glisse.

GLISSEMENT ET DÉRIVE, MAIS TOUJOURS DE L'ADHÉRENCE

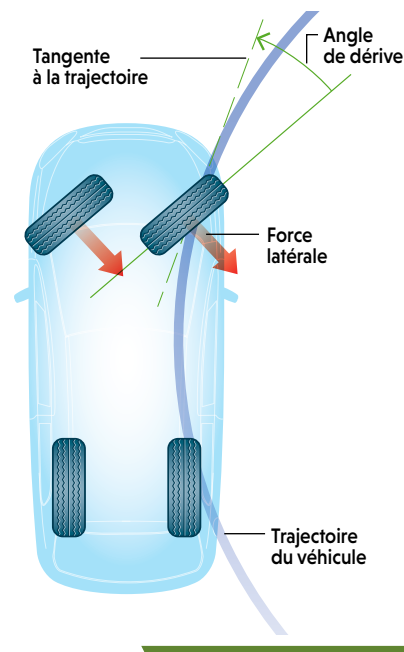
Quelle est la conséquence? Lorsque la roue fait un tour entier, la distance parcourue par le véhicule n'est pas simplement égale au périmètre (inextensible) de l'armature métallique: s'ajoute le déplacement de cette armature par rapport au sol dû au glissement d'une partie des patins. Il s'ensuit que la vitesse du véhicule ne coïncide pas avec la vitesse transmise par l'essieu à l'armature métallique. L'écart peut atteindre 10% lors d'un freinage bien maîtrisé par le conducteur ou le système antiblocage des roues. La force de freinage (respectivement la décélération) est alors de l'ordre du poids (respectivement de l'accélération de la pesanteur, g). L'adhérence du véhicule est bien préservée, mais seule une petite partie du pneu (entre 10% et 20% sur sol sec) ne glisse pas.

Un phénomène analogue se produit lorsque la voiture avance à vitesse constante. Le véhicule subit alors une force de traînée aérodynamique dirigée vers l'arrière, donc une décélération que compense l'action du couple moteur (la roue est motrice dans ce cas, donc les patins fléchissent, par rapport au cas du freinage, dans le sens inverse). Cependant, les ordres de grandeur sont très différents. Même à 130 kilomètres par heure, la traînée sur une voiture citadine est de l'ordre de 500 newtons, environ 5 % du poids du véhicule chargé, soit une décélération correspondante égale à 5 % de g . Le glissement ne se produit alors que pour une toute petite partie à l'arrière du pneu, juste avant que les patins ne se soulèvent, et l'écart des vitesses demeure inférieur à 1%: l'effet est négligeable.

Ce n'est plus le cas lorsque le véhicule entame un virage ou subit une bourrasque de travers. Dans ces conditions, les forces latérales peuvent être du même ordre de grandeur que le poids. Le raisonnement est alors le même que celui fait précédemment, mais il s'applique au niveau du contact au sol sur l'axe perpendiculaire à la vitesse du véhicule. Cette fois, la conséquence est un décalage angulaire, appelé dérive, entre l'orientation des roues et la vitesse du véhicule. La dérive peut atteindre 1 à 2 degrés pour la conduite sur route et 5 à 7 degrés pour la

DÉRIVE DANS UN VIRAGE

Lorsque le véhicule effectue un virage, des forces latérales (flèches rouges) du même ordre de grandeur que le poids agissent sur les pneus au niveau de leur contact avec le sol. Le glissement partiel des pneus qui s'ensuit a pour conséquence une dérive. Pour suivre la courbe de la trajectoire, le conducteur doit donc tourner ses roues d'un angle un peu supérieur à celui indiqué par la tangente.



conduite en ville, où les virages sont parfois très serrés. C'est loin d'être négligeable: pour 2 degrés de dérive, le décalage est de 3,5 mètres pour 100 mètres parcourus, soit la largeur d'une voie de circulation d'autoroute.

En outre, comme les forces sont plus importantes à l'arrière qu'à l'avant du pneu, celles-ci exercent sur la roue un couple. Nous ressentons celui-ci par l'intermédiaire du volant lorsqu'une bourrasque latérale déporte notre véhicule ou lorsque nous prenons un virage. Nous devons alors non seulement exercer un effort pour maintenir le volant dans la direction souhaitée, mais aussi tourner le volant pour ne pas être déporté: par exemple, on contrebraque à gauche lorsque le vent pousse le véhicule sur la droite. Ne rien faire, c'est le fossé assuré!

Ces effets latéraux ont aussi un impact majeur sur la tenue de route du véhicule. En effet, sur chaque patin intervient la force de frottement totale: à la fois la force de frottement longitudinale (dans la direction du mouvement) et la force de frottement latérale. Par conséquent, il y a un couplage entre l'adhérence longitudinale et transversale. Une étude plus précise montre que ce couplage n'est pas symétrique: autant freiner ou accélérer en ligne droite nous fait perdre assez rapidement le contrôle de la direction du véhicule, avec le risque de le sentir se déporter sur le côté, autant on garde notre capacité à freiner ou accélérer efficacement lorsque le véhicule effectue un virage. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Svendenius et B. Wittenmark, **Review of wheel modeling and friction estimation**, Département de contrôle automatique de l'Institut de technologie de Lund, août 2003.

Le pneu, l'adhérence, Société de Technologie Michelin, 2001.