

La technologie des pneus aujourd'hui et demain

Écarts d'exigences

Les pneus sont soumis à un conflit d'objectifs : la résistance au roulement, le frottement statique et l'abrasion sont dans une relation triangulaire incompatible. En particulier, les exigences de faible résistance au roulement et d'adhérence élevée, c'est-à-dire d'adhérence sur chaussée humide et sèche, sont diamétralement opposées. Les fabricants de pneus parviennent à faire le grand écart en guise de compromis et sont soumis à des exigences supplémentaires en raison des futures prescriptions en matière d'émissions Euro 7. *Andreas Senger*

La législation sur les émissions Euro 7, qui entrera en vigueur fin 2026, ne fixe pas seulement des limites plus basses pour les polluants des moteurs à combustion, elle définit également de nouvelles valeurs maximales pour l'usure des freins et des pneus. Elles s'appliqueront à la réception par type des pneus neufs à partir du Centre 2028. L'usure moyenne des pneus d'un véhicule est d'environ 120g pour 1000 km (30g/pneu). Pour les SUV lourds équipés de pneus larges, cela peut aller jusqu'à 180g/1000 km et plus. Plus un véhicule est lourd et plus les pneus sont larges, plus l'abrasion est importante et donc plus l'impact environnemental des particules de caoutchouc émises est élevé. L'ADAC a calculé qu'en Europe, environ 500 000 tonnes d'usure de pneus sont produites chaque année. Actuellement, il est prévu de limiter la masse des particules. La taille des particules de caout-

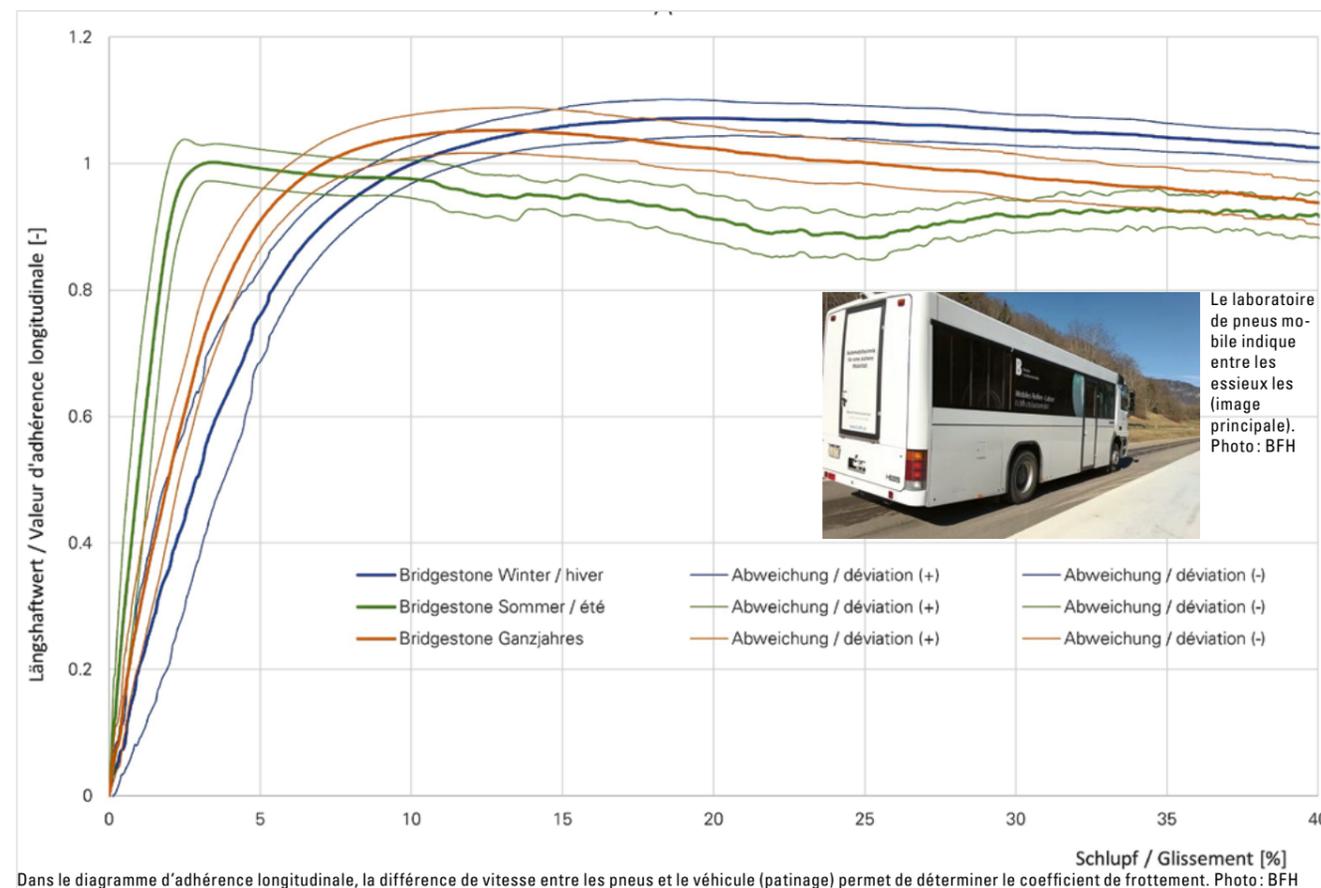
chouc ou le nombre de particules comme dans la mesure actuelle des gaz d'échappement diesel ne sont pas (encore) prévus par le législateur. Bien que les particules plus petites soient déterminantes pour les êtres humains et les autres organismes vivants.

Compte tenu du fait que les véhicules lourds (VEB) de plus de 2,5 tonnes à vide et utilisant la puissance de propulsion offerte polluent de manière disproportionnée, la norme Euro 7 a été conçue indépendamment de la transmission. Pour la première fois, les valeurs limites d'émission de polluants s'appliquent également aux véhicules à propulsion purement électrique. Pour les fabricants de pneus, cela signifie emprunter de nouvelles voies en matière de recherche et de développement. Le conflit principal entre l'abrasion et l'adhérence

ne peut pas être maîtrisé facilement. Si l'on veut réduire l'usure des pneus, la mesure la plus simple consiste à rendre le mélange de la bande de roulement moins élastique et donc plus dur. Un mélange de gomme dur entraîne nettement moins d'usure et donc une durée de vie plus longue. L'inconvénient est que le pneu, avec ses particules de caoutchouc, ne peut plus « s'imbriquer » de manière optimale avec la chaussée et présente une valeur d'adhérence moindre. L'adhérence, et donc la force d'adhésion entre le caoutchouc et la route, est appelée familièrement « adhérence ».

La physique sur les pneus

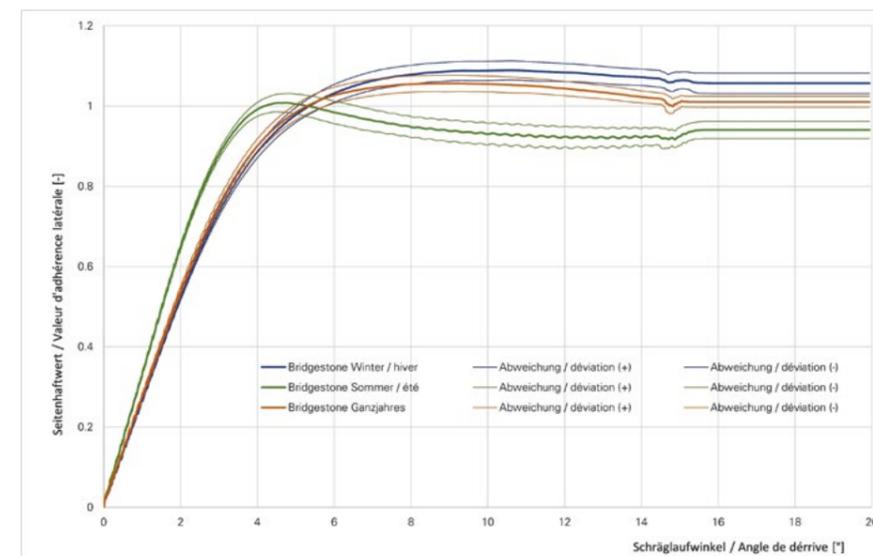
Une réduction de l'adhérence et donc du coefficient de frottement physique n'est pas envisageable, car cela minimiserait la sécurité active. Une réduction du coefficient de frottement se traduit par un patinage plus impor-



Dans le diagramme d'adhérence longitudinale, la différence de vitesse entre les pneus et le véhicule (patinage) permet de déterminer le coefficient de frottement. Photo: BFH

tant à l'accélération, des distances d'arrêt plus longues et des vitesses de virage plus faibles en conduite sportive. Ce fait peut être mis en évidence par le laboratoire mobile de pneus de la Haute école spécialisée bernoise. Pendant la semaine de mesure, le professeur Raphael Murri étudie avec des étudiants comment les pneus actuels se comportent en termes d'adhérence et de coefficient de frottement. Le coefficient de frottement indique la quantité de force de charge de la roue (force verticale) sur le pneu qui peut être transférée en force de frottement (force horizontale) sur la chaussée. Le coefficient de frottement peut être considéré comme un rendement. Plus la valeur est élevée, plus la force d'appui de la roue peut être convertie en force d'accélération, de freinage ou en force latérale. Plus la valeur est élevée, plus le pneu est sûr. Les données sont collectées à une vitesse de 40 km/h dans le cadre de séries de mesures complexes.

Dans le laboratoire de pneus mobile, une roue est montée sur un moyeu de mesure, qui est abaissé hydrauliquement et pressé sur la chaussée avec une charge de roue déterminée. Le camion roule alors sur une piste d'essai mouillée (arrosée avec de l'eau provenant d'un réservoir) et l'intervention des freins per-



Dans le diagramme d'adhérence latérale, l'angle de braquage par rapport au sens de la marche (angle d'inclinaison) permet d'enregistrer le coefficient de frottement et donc la transmission de la force latérale. Photo: BFH

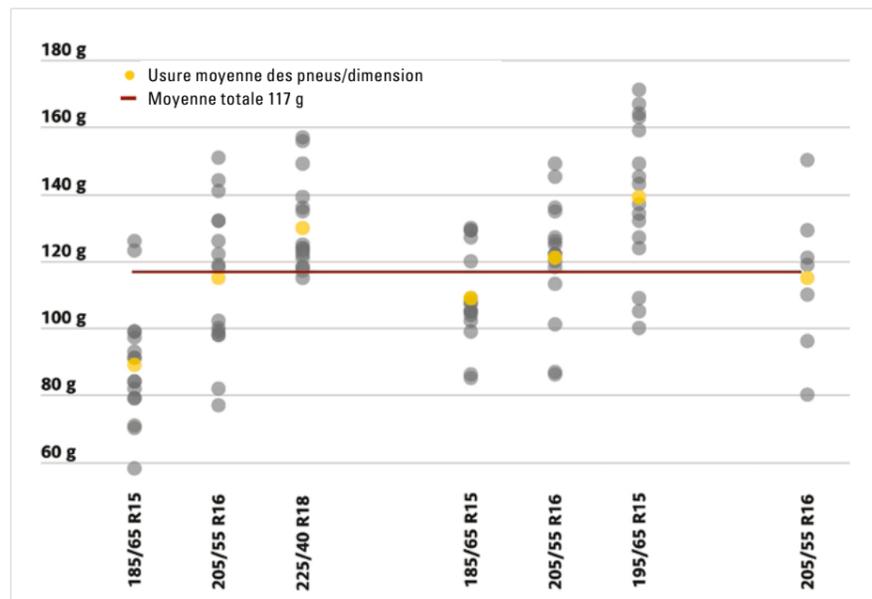
met de générer du patinage pour déterminer la valeur d'adhérence longitudinale. Le patinage est nécessaire pour que le pneu puisse établir la transmission de puissance. Une roue qui tourne librement ne peut donc pas du tout transmettre de forces à la chaussée. En conséquence, chaque patinage entraîne une abrasion entre les pneus et la chaussée. Un frein à ré-

glage fin permet d'augmenter la vitesse différentielle entre les pneus et le camion de laboratoire, et les forces peuvent être enregistrées par des dispositifs de mesure sur le moyeu de la roue. Dans l'exemple ci-dessus, on peut voir une série de 20 mesures pour chacun des trois

Suite page 28



La Haute école spécialisée bernoise a étudié les pneus et leur abrasion, d'abord sur le banc d'essai à roue, puis sur la route avec le laboratoire de pneus en mouvement. Photo: BFH



Dans le cadre de ses tests de pneus périodiques, l'ADAC a enregistré l'usure de différents pneus et recueilli les résultats. La variation de l'usure des pneus est importante, ce qui offre un potentiel de développement. Photo: ADAC

pneus différents de la marque Bridgestone. Les mesures ont été effectuées à des températures de la chaussée comprises entre 0 et 5 °C. Les mesures ont été effectuées à des températures de la chaussée comprises entre 0 et 5 °C. La série de mesures a examiné la dimension du pneu 195/65 R 15 91 H en tant que pneu été (Turanza T005), hiver (Blizzard M005) et toutes saisons (Control A005 Evo). Tous les pneus présentent la meilleure étiquette d'adhérence sur sol mouillé possible, à savoir A (recommandation fondamentale et optimale du client). Lors des mesures, la charge par roue était de 350kg et les pneus étaient gonflés à une pression de 2,5 bars. Le pneu d'été développe très rapidement une grande transmission de force et assure ainsi en été les distances d'arrêt les plus courtes au quotidien. Lors du test, il peut toutefois atteindre un maximum d'adhérence moins élevé que le pneu d'hiver en raison de son mélange de gomme dur et présente en conséquence la distance d'arrêt la plus longue (c'est pourquoi les pneus d'été devraient être remplacés même en l'absence de neige en hiver). Comme on pouvait s'y attendre, les pneus d'hiver sont ceux qui accumulent le plus lentement le coefficient de frottement via le patinage. Le mélange de gomme tendre peut bien « s'accrocher » à la surface de la route malgré les basses températures. Le pneu toutes saisons est un compromis, le pneu testé étant, du point de vue du matériau, un « mélange hiver » (il en existe aussi avec un « mélange été »).

Le diagramme des forces latérales présente des caractéristiques similaires: l'inclinaison

continue de l'axe de mesure avec la roue d'essai (augmentation de l'angle d'inclinaison) par rapport au camion de laboratoire à pneus permet de déterminer la valeur d'adhérence latérale et donc la capacité à générer des forces latérales lors du braquage. Pour les fabricants de pneus, cela signifie qu'il faudra à l'avenir agir sur de nombreux leviers afin de réaliser un compromis optimal entre usure et adhérence. Les mesures effectuées par la Haute école spécialisée bernoise et l'ADAC le montrent: certains fabricants de pneus réussissent mieux que d'autres à trouver le juste milieu entre usure et adhérence. Cela est lié au mélange et donc aux substances chimiques utilisées pour la production de la bande de roulement.

Améliorer le concept global

L'usure des pneus ne dépend pas uniquement du mélange de gomme, mais également de la structure de la carcasse, de la ceinture et des flancs (construction de base) ainsi que du guidage des roues. Si le pneu doit contribuer à réduire la consommation d'énergie du véhicule, il est judicieux de concevoir une structure de pneu rigide. Il en résulte moins de travail de frottement sur le latex (surface de contact) lors de la rotation, et donc moins de résistance au roulement. Si le latex est moins déformé, il peut aussi en résulter moins d'abrasion. Pendant son utilisation, un pneu perd environ un kilogramme de masse en raison de l'usure. L'ADAC a analysé l'usure des pneus de deux manières: un jeu de pneus est conduit sur une distance de 15 000 km ou l'usure est testée lors de trajets en convoi avec plusieurs véhi-

cules identiques et sur une distance d'environ 300 km. Avant et après le parcours de mesure, les pneus sont pesés, ce qui permet de déterminer quantitativement l'usure des pneus. Une autre approche a été adoptée en Suisse: dans le cadre de diverses études préliminaires et de plusieurs travaux de projet, le laboratoire mobile pour pneus de la Haute école spécialisée bernoise, dans la filière Technique automobile et véhicules, a été transformé pour mesurer les particules de pneus. Dans le travail de bachelor de Felix Bundschuh et Adrian Mühlheim, le dispositif de mesure a été optimisé sous la direction du professeur Danilo Engelmann et l'influence de la force d'appui de la roue, de l'angle d'inclinaison et de la pression du pneu sur la taille des particules d'abrasion a été étudiée. Les mesures ont été soutenues par le partenaire industriel Palas GmbH. Cela a permis non seulement de déterminer la masse de l'abrasion, mais aussi de mesurer la taille des particules de caoutchouc. A une vitesse de 40 km/h, les ingénieurs automobiles ont enregistré les émissions de particules sur la route et ont ainsi pu étudier de manière analytique les « Tyre and Road Wear Particles » (TRWP), c'est-à-dire l'abrasion des pneus et de la chaussée. La roue d'essai montée sur un moyeu de mesure peut, grâce à la modification de la charge de la roue (vérin hydraulique), à la transmission ou au freinage (patinage) et à l'inclinaison (angle de marche oblique, réglage de l'axe de mesure), modifier dynamiquement les pneus par rapport au laboratoire de mesure en mouvement et enregistrer les forces du moyeu de mesure.

Au moyen d'un dispositif d'aspiration avec un entonnoir, des particules d'une taille de 0,18 à 30 µm ont pu être enregistrées en nombre et la température de la surface du pneu a été déterminée au moyen de capteurs de température. L'un des défis était d'optimiser la vitesse d'écoulement et le débit volumétrique du prélèvement de mesure et de s'assurer que les particules de pneus puissent être transportées vers la section de mesure. Les résultats: lorsque la température du pneu augmente, la concentration de particules diminue légèrement; lorsque l'angle d'inclinaison augmente, le nombre de particules augmente et la taille des particules d'usure du caoutchouc augmente également. La pression des pneus et la charge par roue n'ont qu'une influence secondaire. En conséquence, pour les véhicules lourds, ce n'est pas la masse qui est à l'origine des émissions élevées de particules et donc de l'abrasion, mais l'accé-

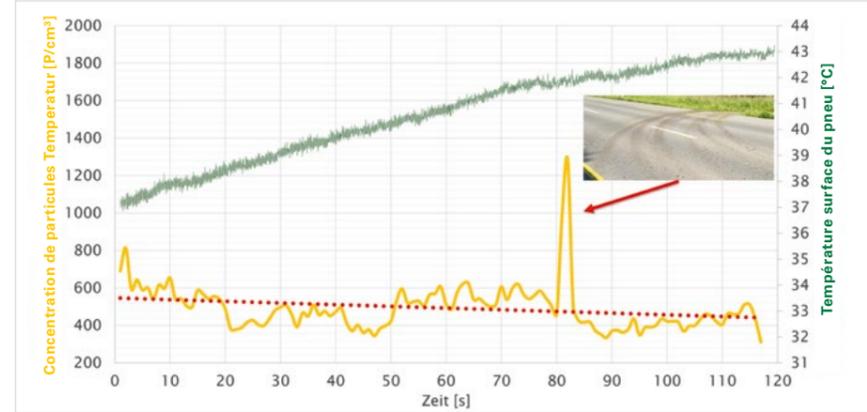
lération, la conduite en virage avec des puissances motrices élevées ainsi que la conduite sportive dans les virages.

Optimisation supplémentaire

En principe, un pneu ne peut transmettre des forces à la chaussée (au freinage comme à l'accélération) qu'avec le patinage, c'est-à-dire la différence entre la vitesse périphérique et la vitesse de déplacement dans le sens longitudinal. Dans les virages, il est nécessaire d'établir un angle d'inclinaison (différence d'angle entre le sens de la marche et le sens du mouvement d'un pneu) afin d'obtenir des forces latérales. Ainsi, si l'on veut qu'un véhicule présente une grande stabilité de conduite en ligne droite, il faut prévoir par construction de faibles angles de pincement sur les deux essieux du véhicule.

Cela peut être comparé au ski: une légère courbe de stemm (skis plus proches à l'avant qu'à l'arrière) assure la stabilité. Outre le parallélisme, une autre mesure constructive consiste à utiliser des angles de carrossage négatifs sur les roues. Grâce aux roues inclinées vers le haut et vers l'intérieur (vues de l'avant ou de l'arrière), on obtient, dans les virages, que les roues extérieures au virage roulent parallèlement à la chaussée grâce à l'inclinaison latérale de la carrosserie, ce qui permet la plus grande transmission de force possible. Or, les deux angles de géométrie de direction provoquent une usure accrue des pneus et sont contre-productifs dans les efforts visant à minimiser l'usure des pneus.

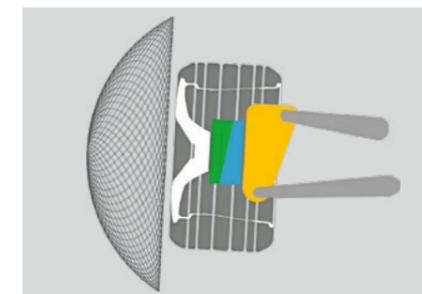
Afin de pouvoir varier les angles en fonction de la situation de conduite, on utilisera de plus en plus des actionneurs électriques qui permettent de régler le carrossage des roues grâce à un moyeu de roue adaptable. Lamborghini a déjà présenté un prototype. La direction de l'essieu arrière avec des actionneurs électriques individuels contribuera également à réduire l'usure des pneus. Si un véhicule roule en ligne droite à vitesse constante, les voies individuelles peuvent être maintenues à 0°. Si un virage doit être contourné de manière sportive ou qu'il en résulte une décélération im-



Le nombre de particules des pneus et de la chaussée à un angle d'inclinaison de 4° diminue lorsque la température de surface des pneus augmente (arrachement dû à la pollution de la chaussée). Plus un véhicule est lourd, plus les angles d'inclinaison sont importants dans les virages et plus l'usure des pneus est élevée. Photo: BFH



Au moyen d'un moteur électrique, la denture du prototype Lamborghini permet de régler le moyeu des roues pour des valeurs de carrossage variables. Photo: Lamborghini



Le fonctionnement du réglage du carrossage: en faisant tourner la partie du moyeu de roue colorée en vert par rapport à celle colorée en bleu, on obtient plus de carrossage. Photo: Lamborghini

portante, les roues arrière peuvent générer des angles de pincement doux grâce à un braquage indépendant, afin d'influencer positivement la stabilité de conduite et de freinage.

Conclusion et perspectives

Dans l'aperçu de l'ADAC, il apparaît que certains fabricants de pneus maîtrisent déjà nettement mieux l'abrasion que leurs concurrents. Une optimisation du côté de la chimie et de la construction permet des progrès significatifs. Dans le domaine de la recherche et du développement, de nombreuses questions restent encore sans réponse: quelle est la taille des particules (et pas seulement leur masse), quelle est leur toxicité et quelle est l'influence du revêtement de la chaussée? Outre ces questions fondamentales, il existe des solutions pratiques pour réduire l'usure des

pneus et de la chaussée. Les possibilités sont les installations de filtrage et le traitement des eaux usées de la route (déjà partiellement mis en œuvre) ou encore les installations d'aspiration sur le véhicule. L'adaptation des angles de géométrie des roues par des systèmes adaptatifs pour le pincement et le carrossage peut également apporter une amélioration dans le cadre d'une exploitation dynamique. Toutefois, la masse des grands véhicules, en particulier ceux à transmission électrique à batterie, dépend de l'homme derrière le volant: si le couple maximal des roues est souvent utilisé pour accélérer et si un angle de braquage important est généré dans les virages, l'usure des pneus est disproportionnée. Les fabricants de pneus sont mis au défi, dans la recherche et le développement, de maîtriser cet équilibre avec des solutions techniques. ●

Depuis 1964
CORTELLINI & MARCHAND AG
 061 312 40 40
 Rheinfelderstrass 6, 4127 Birsfelden

Le plus complet des services de réparation de boîtiers électroniques pour auto de Cortellini & Marchand AG
www.auto-steuergeraete.ch

Vous cherchez, nous trouvons - Votre service de recherche pour pièces automobiles d'occasion
www.gebrauchte-fahrzeugteile.ch

Nouveau: FGS, la remorque avec essieu élévateur et 100% d'équilibrage
 Poids utile à 2,9t

Remorques pour le transport de voitures, carrosseries
 Visitez notre exposition ou demandez une démonstration. Disponible également en modèle communal.

T&W Technik
 Dammstr. 16, 8112 Otelfingen
 tél. 044 844 29 62
www.fgs-fahrzeuge.ch