



Tout sur
le pneu



Tout sur
le pneu

*Centenaire, le pneumatique est plus
que jamais d'une étonnante modernité.
Il a su intégrer progressivement tous les
progrès de la science et s'adapter aux
exigences de la société : moindre
consommation énergétique, moindre
pollution, plus de sécurité.*

*C'est pourquoi ces "boîtes à air"
équiperont encore demain
tous les véhicules.*

Édouard Michelin

© 2002, Michelin. Droits réservés

Éditeur : Manufacture Française des Pneumatiques Michelin
Société en commandite par action, au capital de 304 000 000 €
Place des Carmes Déchaux - 63000 Clermont-Ferrand
RCS Clermont-Ferrand B 855 200 507
ISBN : 2-06-100521-7

A l'initiative et sous la direction de la communication MICHELIN
Création, Rédaction, Illustrations, Maquette : BGC TOSCANE 04 73 62 14 87
Conseil éditorial : Renaud de Laborderie

Crédit photo : Photothèque Michelin, p. 10, en haut à gauche, PhotoDisc, p. 12, voiture en haut à droite, chemin de fer :
© Studio Bachèlerie, p. 16, © F Bouillon / Marco Polo, p. 18 et p. 74, terre, PhotoDisc, p. 17, voiture en bas à droite : © Studio Bachèlerie, p. 17,
© J.P. Evans / Stock Image, p. 20, en haut : © Studio Bachèlerie, p. 22, voiture en haut à gauche : © Studio Bachèlerie, p. 40, PhotoDisc, p. 48,
© Studio Bachèlerie, p. 50, © DiMaggio / Kalish / The Stock Market, p. 61, © Charlie Samuels / The Stock Market, p. 65, © Picturesque / Sunset,
p. 85, © Lester Lefkowitz / The Stock Market, p. 90, haut à droite, "Le Pneumatique" p. 99, © Dick Reed / The stock Market, p. 101, "Un curieux
instantané (août 1924)" / Sigma, p. 102, © David Sailors / Corbis Stock Market, p. 107, © M.L. Simibaldi / The stock Market,



Sommaire

→ **Avant-propos** p 8
Le pneu, cet inconnu.



**CH. 1 → Et roule le pneumatique...
au service de la mobilité** p 10
Invention de la roue et débuts des transports.
Essor de la mobilité terrestre.
L'auto-mobilité : une grande liberté.

**CH. 2 → Une cascade
de mutations technologiques** p 20
Le pneu à talons.
Le pneu conventionnel.
Le pneu Radial.
Le pneu Bias Belted.
Le Tubeless.
Le "pneu vert".
PAX System.



**CH. 3 → À la découverte
de votre pneumatique** p 26
Comment fonctionne-t-il ?
Morphologie du pneu.
Décrypter les sculptures et le marquage.



**CH. 4 → Les matériaux du pneumatique
pour un composite de très haute technologie** p 38
Les caoutchoucs naturels ou synthétiques.
Charges renforçantes et adjuvants.
Fils métalliques et textiles : une armature haut de gamme.



**CH. 5 → Sept performances
pour un champion** p 48
1 Porter la charge.
2 Obéir aux ordres du conducteur.
3 Travailler sobrement.
4 Toujours plus silencieux.
5 Maîtriser la production de chaleur.
6 Travailler pour la durée.
7 Un rôle majeur dans le comportement du véhicule.



**CH. 6 → Sous le signe de l'alliance
le véhicule, la roue et le pneu** p 60
L'ensemble pneu-roue en harmonie.
La liaison au sol.
Cinq angles caractéristiques de positionnement.



**CH. 7 → Recherche et essais :
la quête de la perfection** p 68
Un outil prodigieux : la CAO.
La science des matériaux.
Du virtuel au réel : tous les essais.



**CH. 8 → Fabrication du pneu :
une révolution en cache une autre** p 76
Mélangeage - assemblage - conformation - cuisson.
Nouveau procédé : le C3M et ses atouts.



**CH. 9 → Le pneu dans le monde :
un fort potentiel de croissance** p 84
Marché mondial : une demande de plus en plus spécifique.
La compétition : vitrine du savoir-faire technique.



**CH. 10 → Prenez soin de vos pneus,
ils vous les rendront au centuple** p 94
Les grandes règles de vigilance.
Montage et démontage : une affaire de spécialiste.
Vous avez crevé, que faire ?

Index p 108



Le pneu, cet inconnu

Discret, il vit près de vous mais le plus souvent son univers vous reste étranger.

En dépit d'une carrière déjà bien remplie, il est toujours aussi inventif et ne cesse d'évoluer et de se perfectionner pour vous offrir toujours plus.

Le premier pneu pour auto est daté de 1895. Objet frêle et vulnérable, destiné à l'origine aux cycles et aux fiacres, il est réinventé par les frères Michelin qui l'installent sur une automobile de course de leur conception, l'Éclair. Dès lors, le succès pour le pneu va être toujours plus grand, car, depuis qu'il a été prouvé que le pneu boit l'obstacle, plus rien ne lui résistera. Dès 1898, grâce à lui, le mur de la vitesse est franchi à plus de 106 km/h. Un siècle plus tard, l'automobile et le pneu sont devenus ensemble les premiers acteurs des transports terrestres.

Près de 80 % du trafic terrestre combiné des marchandises et des déplacements de personnes sont assurés par la route, avec des véhicules automobiles roulant sur des pneus.

Ce constat étonnant a, bien sûr, une explication. Seule l'automobile apporte cette liberté de mouvement quasi absolue à laquelle nous sommes tellement attachés. Mais, qui procure, in fine, cette mobilité exceptionnelle ? Le pneu. Sans lui, pas de liaison porte à porte, pas de fantaisie dans les plans de voyage ni de vagabondage hors bitume, quelles que soient la saison et la météo.

Acteur reconnu, le pneu est pourtant un produit ignoré issu d'une technique quasiment inconnue du public. "Rond et noir", sa banalité n'est qu'apparente. En perpétuelle progression, ce produit industriel haut de gamme combine 200 composants, le meilleur de la métallurgie,

du textile et de la chimie. La plus minime défaillance lui étant aussi interdite, tout cela rend sa conception et sa fabrication d'une complication extrême. En les révélant, cette mini-encyclopédie remet le pneu à sa vraie place dans le monde du transport, celui des technologies de pointe.

Aujourd'hui, c'est aussi à lui que les constructeurs d'automobiles demandent des efforts pour consommer moins et diminuer d'autant la pollution. Contribuer à la sauvegarde de l'environnement en coûtant moins cher, en durant plus et en améliorant tenue de route et freinage, voilà un challenge sans surprise pour Michelin. Dès 1950, son pneu Radial n'a-t-il pas fait un grand pas dans cette direction, puis les "pneus verts" franchissant en 1992 une nouvelle étape vers de basses consommations tout en montant d'un cran les autres performances ?

Le début du XXI^e siècle voit l'arrivée d'un pneu PAX System encore meilleur et capable d'effacer l'angoisse de la crevaison. Ce pneu révolutionnaire apporte des avantages considérables en performance. Il permet aussi de rouler deux cents kilomètres à quatre vingt kilomètres / heure à pression zéro. Enfin, il offre aux constructeurs la possibilité de concevoir de nouveaux véhicules. Comme tous les autres pneus, il réclame un minimum d'attention, surveillance de l'état, contrôle des pressions, pour pouvoir donner le meilleur d'eux mêmes : sécurité, longévité et agrément d'utilisation, dans le respect total de l'environnement.

À vous maintenant, lecteurs, de redécouvrir le pneu pour apprendre à en tirer le meilleur parti. Ce petit livre vous guidera afin que vous repreniez "bon pneu, bon œil" votre route en toute quiétude.

1 Et roule le pneumatique, au service de la mobilité



*Comment transporter ses proies
et se déplacer plus aisément ?
Dès l'aube de l'humanité, l'homme
décide d'améliorer sa mobilité.
Il n'a pas cessé depuis.*

Transporter devient une caractéristique de l'homme avec les grandes migrations qui l'entraînent dans la colonisation de la terre entière. Mais avec quelle lenteur ! Il faut attendre 3 500 ans avant J-C pour connaître - grâce aux Sumériens - le principe de la roue, utilisée à cette époque à des fins guerrières. Cette invention aboutira au 19^e siècle à la grande révolution du transport et de la mobilité des populations. Pendant quelques millénaires encore, la roue reste fondamentalement inchangée dans son principe mais gagne, peu à peu,

en légèreté, en élégance et en facilité de roulement.

Il faut attendre Papin, Cugnot, Watt et Stephenson, il y a deux siècles et demi seulement, pour connaître une autre grande révolution

*Désormais équipée
de pneumatiques,
la roue a franchi
un pas décisif.*



technique : la machine à vapeur. Celle-ci, avec sa première application, la locomotive sur voie ferrée, fournit à l'homme une prodigieuse source d'énergie pour



*Dès 3 500 avant
J.-C., les
Sumériens
inventent la roue.
Sur cette image,
le char assyrien
date, lui,
du IX^e siècle
avant J.-C.*

ses déplacements. Très vite, les inventeurs, voulant se libérer du rail, donnent naissance à une drôle de machine : l'automobile. Et les inventions ne cesseront de foisonner, à commencer par les deux plus importantes : celle du moteur à explosion et celle du pneumatique.

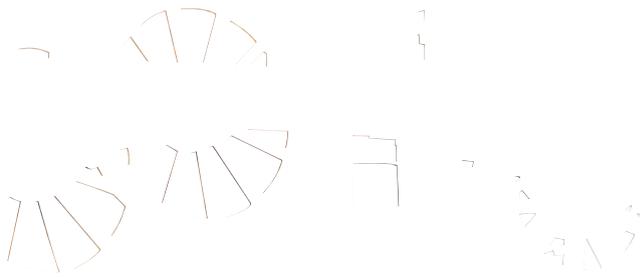
Longtemps rivale acharnée du chemin de fer, l'automobile a tracé une route bien à elle, mettant en valeur ses propres atouts (liberté, sécurité, rapidité, fiabilité, déplacements à volonté...). D'autant que les progrès cons-



tants du réseau routier se sont combinés avec les avancées technologiques du pneumatique qui, au cours d'une aventure mouvementée, finit par s'imposer face à tous ses concurrents.

DES ORIGINES À NOS JOURS, LA CAPACITÉ À TRANSPORTER D'UN SEUL HOMME S'EST ACCRUE DE 200 000 FOIS !

Époque	Moyen	Charge (kg)	Heures pour 10 km	Capacité de transport* *Tonne x km en une heure
- 30 000		30	3	0,1
- 8 000		200	2	1
- 3 500		200	1	2
1770		2 000	2	10
1830		10 000	1	100
1895		500	0,25	20
1925		10 000	0,2	500
1980		20 000	0,1	2 000
2000		400 000	0,2	20 000



L'essor de la mobilité terrestre

Le temps des pionniers !

Fruit de l'ingéniosité de l'écossais James Watt, la première machine à vapeur dans l'industrie apparaît en 1780. Quelques années plus tôt, Joseph Cugnot, ingénieur militaire français, avait réussi, en utilisant la vapeur, à mécaniser le fardier qui servait à transporter les pièces d'artillerie.

L'ingénieur Richard Trevithick, pionnier de l'emploi de la haute pression dans les machines à vapeur, construit en 1803, la première locomotive routière digne de ce nom. Vingt ans plus tard, George Stephenson, qui a compris avant tout le monde le principe de l'adhérence des roues d'acier sur une surface d'acier, crée la première locomotive sur rails : elle est baptisée "Rocket", c'est tout dire !

Le chemin de fer prend son essor, tandis que se développent déjà les premières voitures sans chevaux.

En 1822, Griffith invente une diligence à vapeur qui, en service

➤ 1768 :

Le caoutchouc devient utilisable grâce à Hérisant et Macquer.

➤ 1770 :

Ancêtre de l'automobile, le fardier de Cugnot, propulsé par la vapeur, atteint la vitesse de 4 km / heure.

➤ 1823 :

Solubilité du caoutchouc trouvée par Mackintosh.

➤ 1839 :

Vulcanisation découverte par Goodyear.

Le fardier de Cugnot.



commercial, parcourt les environs de Liverpool. La longue rivalité entre rail et route a commencé... À cette époque, le train détient l'indiscutable avantage de la vitesse : l'uniformité de la voie ferrée préserve la mécanique des chocs, ce qui est loin d'être le cas pour la route. Et si en 1865, le train effectue le trajet Paris-Nice à 100 km/h, la voiture, elle, ne dépassera pas, pendant encore 30 ans, les 30 km/h. Avec le moteur à explosion, les automobiles franchissent un pas décisif. En 1889, Gottlieb Daimler construit une automobile équipée d'un moteur à pétrole, de taille et de



*Plantation d'hévéas *brasiliensis* et collecte du latex par saignée.*

poids très réduits, sans doute l'ancêtre direct des véhicules actuels.

*L'hévéa *brasiliensis* transformé en pneumatiques !*

À la fin du 19^e siècle, on redécouvre le caoutchouc connu depuis le voyage du naturaliste Charles de la Condamine, au 18^e siècle ainsi que l'arbre qui sera ensuite le plus exploité : l'hévéa *brasiliensis*.

La découverte, vers 1768, par Hérisant et Macquer de la solubilisation du caoutchouc dans l'essence de térébenthine ou l'éther ouvre la voie et, en 1819, Thomas Hancock s'aperçoit qu'en travaillant le matériau brut, celui-ci se transforme en une masse pâteuse et plastique. L'adjonction de certains produits permet alors sa plastification : c'est une première étape importante dans la manufacture du caoutchouc.

Mackintosh invente ensuite, en 1823, l'imperméabilisation des tissus en découvrant un solvant spécifique, le naphta (huile de houille). Mais, inconvénient

majeur, le caoutchouc devient poisseux par temps chaud, dur et cassant par temps froid. Charles Goodyear trouve la solution en 1839, en mettant au point le procédé de la vulcanisation (action de la chaleur sur un mélange de caoutchouc et de soufre) qui donne à la gomme des propriétés élastiques.

Dès lors, tout est en place pour qu'à partir du milieu du 19^e siècle, les usages du caoutchouc se multiplient.

Ses qualités intrinsèques : malléabilité, élasticité, grande résistance mécanique, adhérence sur tout type de surface, en font, depuis 100 ans, un matériau indispensable à l'industrie du pneumatique qui consomme 70 % de la production mondiale.



*Hévéa *brasiliensis*.*





Les débuts d'une grande passion entre l'homme et la voiture !

Vers 1835, un autre pionnier, Charles Dietz, garnit les jantes de son tracteur à vapeur de bandes de liège et plus tard de caoutchouc : le bandage de caoutchouc plein est né. Sa simplicité et la robustesse obtenue grâce à la vulcanisation constitueront longtemps une solution assez rationnelle. Mais les exigences de vitesse et de confort, condamneront bientôt ses insuffisances : son poids et sa faible flexibilité.

Dès 1845, l'ingénieur Robert W. Thomson invente le premier pneumatique qui combine l'élasticité du caoutchouc servant d'enveloppe externe et celle de l'air emprisonné dans plusieurs chambres à air en caoutchouc, plus petites. Mais, sans doute en avance sur son temps, il n'a aucun succès.

En 1888, le vétérinaire John Boyd Dunlop imagine une roue qui associe tissu, gomme, cuir et air. S'il s'agit d'un pneumatique encore imparfait, dont la réparation est très longue, il permet cependant une application immédiate aux vélocipèdes et remporte un vif succès.

En 1891, les frères André et Édouard Michelin créent le pneu démontable. C'est l'origine du pneumatique tel que nous le connaissons, ou presque,

aujourd'hui. Leur découverte est, dès lors, l'objet de perfectionnements continus. Le nouveau pneu est nettement supérieur aux précédents et sa facilité d'utilisation, sans commune mesure : il se démonte et se remonte en moins d'un quart d'heure.

Cette invention s'applique tout d'abord à la bicyclette (en raison de



Jenatzy et sa "Jamais Contente".

son faible poids), puis les frères Michelin passent rapidement aux pneus pour fiacre. Dès 1895, ils relèvent le défi du pneu pour automobile et équipent pour la course Paris-Bordeaux-Paris, un véhicule qu'ils ont eux-mêmes conçu et fabriqué : "l'Éclair" (ainsi baptisée du fait d'un défaut de direction qui la fait zigzaguer !). Malgré de nombreuses difficultés durant la course, l'Éclair arrive dans le temps imposé et démontre publiquement l'intérêt de cette invention historique : le pneu pour auto, qui va permettre à l'automobile de progresser, dans tous les sens



Malgré ses imperfections, l'Éclair va démontrer l'intérêt historique du pneumatique !

du terme, à une rapidité extraordinaire. Le pneumatique "boit l'obstacle", la mécanique et les passagers sont libérés des chaos de la route : la voiture peut enfin franchir la barrière des 30 km/h.

En 1898, une voiture

électrique "La Jamais Contente", équipée de pneus Michelin dont le diamètre restreint abaisse le centre de gravité du véhicule, franchit, pour la première fois dans l'histoire de l'automobile, le mur des 100 km à l'heure.

Dès lors, le pneu accompagnera et souvent anticipera les progrès majeurs de l'automobile en matière de sécurité et de performances.

> 1895 : Le premier pneu pour automobile par les frères Michelin.

> 1898 : Les 100 km/h sont atteints avec la "Jamais Contente".

> 1918 : Les pneus sont standardisés. Ils comportent désormais des triangles, du noir de carbone, des câbles textiles.

DES PERFORMANCES EXTRÊMES

Outre l'enthousiasme collectif qu'elles suscitent, les compétitions ont toujours joué un rôle important dans le développement du pneumatique. De 1900 à 1911, le pneu Michelin est de toutes les épreuves automobiles, le plus souvent en tête et fait déjà la preuve de son avancée technologique en matière de compétition.

Aujourd'hui, les courses de Formule 1 et les rallyes sont toujours la vitrine technique des capacités extrêmes des pneumatiques. Parce que les véhicules de compétition développent des puissances exceptionnelles, le pneumatique de course doit être poussé à des niveaux extrêmes. Déjà dans les années 80, une Porsche prototype aux 24 heures du Mans faisait passer près de 1 000 CH par les deux roues arrière. En 1994, une Bugatti EB 110 Sport réalisait un record de vitesse sur glace à 280 km/h. Sur ce sol hostile, seuls des pneus de haute technologie pouvaient accomplir un tel exploit.



Dessin du premier pneumatique imaginé par Robert W. Thomson en 1845.



Pneu de John Boyd Dunlop, combinant tissu, gomme, cuir et air, imaginé en 1888.

Il équipera les premiers vélocipèdes (du mot véloce : rapide).



1891 : Le premier pneu démontable pour vélo est créé par Michelin.

L'auto-mobilité : une grande liberté !

L'automobile a introduit une nouvelle donnée dans l'histoire du monde : l'homme se déplace à sa guise et transporte ce qu'il veut. Ses rapports avec l'espace et le temps en sont considérablement modifiés. L'accès à l'automobile connaît, depuis 50 ans, une large démocratisation.

Le pneumatique est, plus que jamais, le partenaire indéfectible de cette aventure.

Conduire est à la portée de tous...

Certes. Mais cette liberté individuelle s'exerce au sein d'une collectivité où "les autres" disposent de la même possibilité... Et conserver la maîtrise d'un véhicule de plusieurs centaines de kilos, susceptible de rouler à grande vitesse, demande une réelle maîtrise : une fraction de seconde d'inattention peut entraîner l'accident. La conduite doit prendre en compte et souvent anticiper le comportement des autres conducteurs.

Largement aidée par les progrès du pneumatique, la voiture permet aujourd'hui une conduite sûre et souvent assistée dans ses fonctions de sécurité (anti-blocage,



anti-patinage...). Mais elle fait face désormais à un nouveau challenge : répondre aux attentes individuelles des usagers, sans porter atteinte aux conditions de vie des riverains, ni à la qualité de l'environnement.

La sécurité : un enjeu central

Après la deuxième guerre mondiale, le développement rapide de l'auto-mobilité a multiplié le nombre d'usagers de la route. La sécurité routière est devenue un enjeu central.

Dès les années 70, en Europe et aux USA, les mesures sur la limitation de vitesse, le port de la ceinture et l'amélioration de la sécurité des voitures ont commencé à porter leurs fruits. Mais il reste encore beaucoup à faire, notamment dans la formation des conducteurs.

L'action de Ralph Nader aux États-Unis en direction des constructeurs américains a eu également

un effet décisif sur les améliorations apportées aux véhicules en matière de sécurité, exemple suivi par toute l'industrie automobile mondiale.

Les pneumatiques sont au diapason avec l'amélioration de la distance de freinage sur les sols mouillés et hivernaux. Route et pneumatique unissent leurs efforts pour réduire les risques d'hydroplanage (la texture du revêtement routier agissant aussi sur le drainage de l'eau).

L'invention du pneu Radial, notamment, accroît considérablement les capacités de tenue de route et de freinage du pneu.

Reste à l'usager à assurer la surveillance régulière de ses pneumatiques... Si la législation sanctionne sévèrement les pneus lisses, c'est qu'ils représentent un réel danger (voir chapitre 10) : entretenir le système de freinage est insuffisant si des pneus en mauvais état compromettent l'indispensable adhérence à la route.

Grâce à des artifices aérodynamiques, un véhicule de F1 peut "peser" jusqu'à 4 fois son poids. Ainsi, un pneu de F1 assure un freinage pouvant atteindre 4 "g".

"g" est la grandeur physique qui mesure les accélérations ou décélérations.

La valeur de l'accélération liée à l'attraction terrestre vaut 1 g soit 9,8 m/s².





Roulons sur une planète verte...

Des années 60 aux années 80, la progression du parc automobile a accru les nuisances sonores et la pollution de l'air ambiant, touchant particulièrement les populations urbaines.

Le bruit du trafic, qui se propage par transmission dans l'air, a trois causes identifiées : les véhicules, les pneus, la chaussée. Les pouvoirs publics, en relation avec les industriels, réagissent et mettent en place les normes anti-bruit. Entre 1980 et 1995, les industriels concernés se mobilisent et leurs actions conjuguées obtiennent, pour les voitures, une baisse de 6 décibels (ce qui signifie une puissance

* NOx :
Oxydes d'azote
dont
l'inhalation
peut être toxique.

CO2 :
Dioxyde de
carbone,
contribuant à
l'effet de serre.

sonore divisée par 4 !), baisse à laquelle les pneus ont largement contribué.

Dans le domaine des émissions gazeuses des moteurs, la création des "pneus verts" diminue efficacement la consommation de carburant et réduit, dans les mêmes proportions, les émissions de gaz de combustion, notamment de CO2 et NOx*.

Enfin, ménager l'environnement, c'est réduire la consommation de matières premières ! L'accroissement régulier de la longévité des pneus y participe : les 50 000 km sont souvent dépassés pour un pneu de bonne qualité.

En fin de vie, différentes techniques de recyclage (utilisation dans des



fours de cimenterie, rechapage) permettent de valoriser la matière et l'énergie contenue dans les pneus usés. Les matières premières sont économisées, le nombre de pneumatiques à éliminer est réduit.

Un coût à la baisse !

En 1900, la durée de vie des premiers pneus était particulièrement courte : de 1 200 à 1 500 km. Elle atteignait 6 000 à 8 000 km vers 1910. Quant aux prix, ils s'échelonnaient, en 1906, de 300 à 600 de nos actuels euros, à la pièce, selon la dimension.

Le coût d'utilisation au kilomètre, excessivement lourd à l'origine, fut l'objet d'une amélioration permanente tout au long du siècle. **Aujourd'hui, le budget des pneus vaut à peine 1/10^e du budget consacré au carburant.**

Sport ou confort ?

Les constructeurs automobiles et les manufacturiers collaborent

étroitement pour développer des pneumatiques offrant toujours plus de liberté, d'agrément et de confort.

Selon les types de véhicules, les attentes des usagers sont différentes : qualité du comportement routier pour un véhicule sportif, plus de confort pour une limousine... Les pneus se différencient très nettement par leur morphologie sur ces deux plans :

- aux véhicules sportifs, les formes extra larges et basses ;
- aux véhicules confortables, les formes plus hautes.



> 1936 :
De l'acier dans
les pneus avec
Le Métallic de
Michelin.

Le pneu
Pilot Sport
(2000).

2 Une cascade de mutations technologiques



D'un principe simple à une réalité complexe

Tiré à des milliards d'exemplaires et utilisé au quotidien, le pneu semble banal. C'est tout l'inverse. À peine centenaire, il résulte de mutations technologiques majeures et sa structure composite se révèle d'une incroyable complexité.

Si un tube de caoutchouc gonflé d'air serti autour d'une jante avait suffi pour remplir parfaitement toutes les fonctions indispensables à la mobilité d'une voiture, on aurait pu s'en tenir au premier modèle conçu en 1895 par Michelin. Ce vénérable ancêtre était déjà doté d'une carcasse incorporée dans la gomme : les dimensions limitées de l'époque exigeaient que l'on gonfle fortement le pneu (deux à trois fois plus qu'un pneu actuel) afin qu'il supporte la charge du véhicule. Pour empêcher sa dilatation sous l'effet de cette haute pression, une armature souple était donc réalisée par l'empilage de toiles textiles caout-

> 1946 :

Le pneu Radial (Michelin).

> 1950 :

Le Tubeless.

> 1980 :

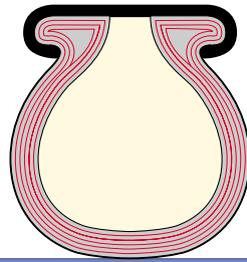
Les premiers pneus neige à lamelles non cloutés (Michelin).

> 1992 :

Le Green X de Michelin (premier pneu commercial de la famille des "pneus verts").

> 1998 :

Le PAX System de Michelin.



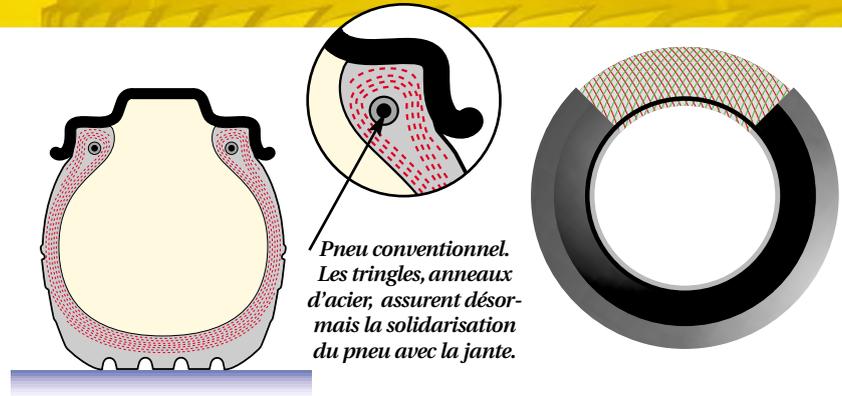
Pneu à talons. Sous l'effet de la pression de gonflage, il permet au pneu de s'incruster dans les gorges latérales de la jante et de se fixer assez solidement sur celle-ci.

choutées puis mise en forme de pneu à l'intérieur d'un moule. Mais, la suite de l'histoire montre que pour répondre à l'évolution des besoins, la conception fera appel à des solutions toujours plus sophistiquées : du pneu à talons au PAX System de Michelin, la révolution est permanente...

Tenue de route, longévité : une recherche constante d'améliorations

Successeur du pneu à talons : le pneu conventionnel

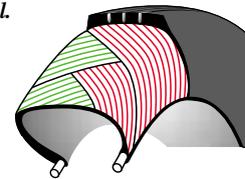
De 1920 à 1950, le terme pneumatique restera synonyme de construction croisée ou diagonale, dite encore "conventionnelle".



Pneu conventionnel. Les tringles, anneaux d'acier, assurent désormais la solidarisation du pneu avec la jante.

La structure conventionnelle se décrit comme une enveloppe de caoutchouc armée de nappes superposées de câbles parallèles, formant entre elles un angle (celui entre les directions des câbles) d'environ 45° avec le plan médian du pneumatique. Cet empilage de nappes se retrouve indifféremment dans les flancs et dans le sommet.

Pneu conventionnel. Sa carcasse formée de plis alternés et croisés s'inspire du bandage médical.



Les couches superposées de tissus, au nombre de six à huit pour un pneu de tourisme simple, vont jusqu'à douze pour un pneumatique poids lourd. Le nombre de nappes est augmenté, autant que nécessaire, car c'est lui qui conditionne la charge que supporte le pneumatique. Caractérisé par sa raideur, la structure croisée n'offre pourtant qu'une médiocre tenue latérale au pneu,

génératrice de forts glissements sur le sol, dont découle une usure rapide sur routes sinueuses. De plus, les flexions répétées du pneu provoquent un échauffement excessif en raison des frottements entre les multiples nappes superposées... La longévité et l'économie ne sont pas ses points forts.

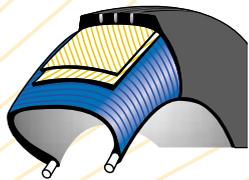
Le pneu à carcasse radiale : le progrès tous azimuts

Révolution dans la conception des pneumatiques et résultat imprévu d'une longue étude qui tentait de comprendre les défauts de la structure conventionnelle, le pneu à carcasse radiale a vu le jour en 1946.

La structure du Radial présente la particularité de dissocier totalement les fonctions flanc et sommet. L'armature est formée d'arceaux textiles qui constituent

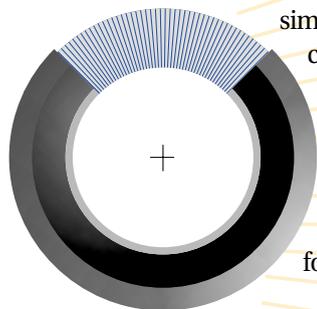
Ce curieux pneu ajouré appelé "Cage à Mouches" est en fait le tout premier prototype du fameux pneu Radial.





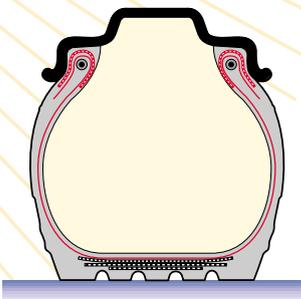
une sorte de tube surmonté de deux nappes de câbles métalliques croisées selon un angle approprié (de l'ordre de 20°). Cette structure se distingue par sa relative

simplicité : une ou deux couches pour la carcasse et deux nappes sommets pour le pneu de base, trois pour les pneus à hautes performances.



Par la très grande souplesse de son flanc, le pneu Radial dispose d'une importante flexibilité verticale, gage d'un confort élevé. Il assure en permanence une surface de contact maximum avec le sol. Le guidage est très direct, la tenue

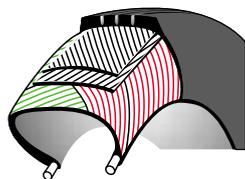
Le Radial dévoile ses secrets : des arceaux parallèles et une ceinture armée de fils d'acier. Sa morphologie lui donne une assise au sol bien à plat.



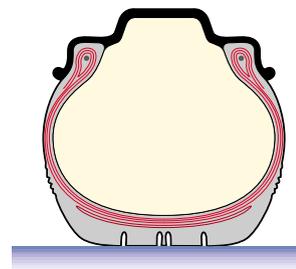
de cap lors de perturbations transversales (brusques dévers, rafales de vent) est remarquable, ainsi que la résistance à l'usure. **Sur le plan thermique, le Radial s'échauffe très peu et, de ce fait, peut rouler à des vitesses beaucoup plus élevées. Il est plus sûr et dure plus longtemps.**

Le pneu Bias Belted : une invention sans grand lendemain...

Conçu par les spécialistes d'Outre-Atlantique, le "Bias", sorte d'hybride du conventionnel et du Radial, avait pour but d'éviter aux fabricants américains d'avoir à modifier leur appareil de production, inadapté à la fabrication du Radial. Mais les performances ne furent pas à la hauteur des espérances. Dès 1975, les pneumatiques radiaux importés d'Europe, ou fabriqués aux USA dans de nouvelles usines, équipent déjà la première monte américaine. À la fin des années 70, le Bias est sur le déclin ! L'industrie du pneumatique américaine passe au Radial qui, en 1980, occupe 52 % du marché première monte et remplacement.



Le pneu Bias s'inspire visiblement du sommet du Radial, sans en atteindre la simplicité.



Le Tubeless : le pneu reste en forme...

Lors de la création du premier pneumatique démontable en 1895, Michelin envisageait déjà de supprimer la chambre à air. Le concept en était resté là, car ni les matériaux, ni la technologie de l'époque ne permettaient de franchir le pas. Michelin dépose néanmoins, dès 1930, le brevet d'un pneu "à chambre incorporée" sous le nom de ACI. Mais celui-ci devra encore attendre l'après-guerre pour voir le jour.

Lors de la Seconde Guerre Mondiale, la pénurie des matières premières favorise le développement d'élastomères synthétiques comme le butyle, dont les propriétés d'étanchéité sont remarquables.

Parallèlement, la fabrication en grande série de jantes véritablement étanches et géométriquement précises favorise la commercialisation du pneu sans chambre. En 1953, Michelin lance ainsi son premier ACI, tandis que les manufacturiers américains

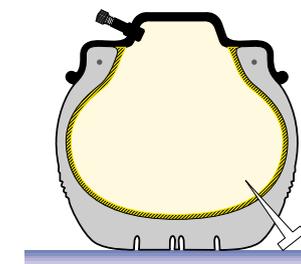
Vu en coupe, le Bias reste cependant très "conventionnel", tout comme ses performances.

fabriquent déjà leurs pneus "Tubeless", de l'anglais "sans tube", autrement dit "sans chambre".

Rapidement, les utilisateurs et les constructeurs automobiles européens réalisent qu'il s'agit de la meilleure parade au danger de la crevaison. Dans les années 60, Citroën équipe toutes ses 2 et 3 CV.



Pneu ordinaire avec chambre. Dégonflage très rapide en cas de crevaison.



Pneu Tubeless garni d'une couche étanche de butyle. En cas de crevaison, le dégonflage est lent, gage d'une sécurité accrue.

Le Tubeless, a de multiples avantages.

Au montage, plus de risque de pincer la chambre à air.

Au gonflage, pas d'air emprisonné entre la chambre et l'enveloppe.

Grâce au dégonflage lent, en cas de crevaison,

l'automobiliste n'a pas obligation de changer la roue sur place.

Dès les années 70, le mouvement se généralise pour être aujourd'hui universellement adopté.

Le Tubeless s'est imposé par ses multiples avantages : simplicité du montage, élimination des erreurs de montage, causes fréquentes de crevaisons, réduction des coûts et sécurité globale.

Le "pneu vert" économise le carburant

À vitesse constante et en utilisation courante, 20 % de l'énergie nécessaire pour faire avancer le véhicule sont consommés par les pneus.

Les recherches entreprises pour diminuer "la résistance au roulement" du pneu, cause de cette consommation, ont abouti durant les années 90 à des solutions efficaces.

Une technologie particulièrement innovante consiste à agir directement sur le caoutchouc de la bande de roulement par **un renforcement nouveau à base de silice**. Mise au point par Michelin depuis 1993, elle a donné naissance au "pneu vert" ou Green X et permet un gain de 20 à 25 % de résistance au roulement tout en gardant les qualités d'adhérence de la gomme. Résultat : pour une voiture de milieu de gamme, consommant 8l aux 100 km,

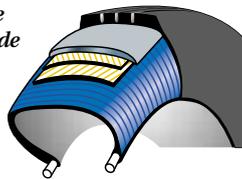
l'économie de carburant est de l'ordre de 0,3 litre.

L'économie peut sembler minime. Mais, rapporté à l'intégralité du parc automobile mondial équipé en pneumatiques standard, l'équipement en "Green X" aboutirait à une économie annuelle de 20 millions de TEP (tonnes équivalent pétrole) par an, environ l'équivalent de la consommation globale d'un pays comme la France ! En outre, cette économie éviterait de rejeter dans l'atmosphère 60 millions de tonnes de CO2...

Une autre solution : le "bi-couche" !

Destinée à la bande de roulement, cette technologie de basse résistance au roulement met en œuvre deux couches de gommages différentes, plaquées l'une sur l'autre. La gomme résistante à l'usure est placée sur la partie roulante du pneumatique. En dessous - et en sandwich entre la ceinture et la bande de roulement - est placée une gomme spéciale, à très faible coefficient de perte énergétique.

Le pneu bi-couche fait apparaître sous la bande de roulement la couche de gomme à faible perte énergétique.



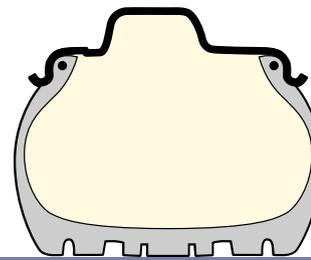
Le PAX System : une nouvelle race de pneumatiques.

Avec PAX System, Michelin a véritablement transformé la conception du pneumatique. S'adaptant à tous les types de véhicules, quel que soit leur niveau de gamme, PAX System se positionne comme futur standard.

L'architecture de la zone de liaison à la roue a été complètement modifiée. Les flancs sont plus courts et assurent une meilleure tenue de route, rendant le comportement du véhicule plus précis et plus sûr. La résistance au roulement de PAX System est aussi sensiblement réduite par rapport aux pneus actuels (jusqu'à 10 %).

Le véhicule consomme moins, pollue moins. Le maintien du pneu sur la jante est garanti même à pression nulle.

La comparaison de ces deux coupes met en évidence toutes les particularités du nouveau PAX System, notamment son système de clipsage à la jante.



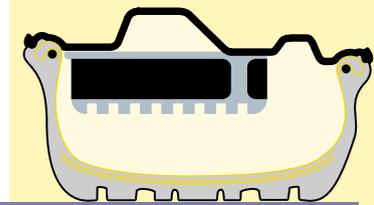
En cas de crevaison, le véhicule continue à rouler car la roue comporte un appui souple sur lequel le pneu se pose lorsque la pression de gonflage est nulle. Le pneu ne sort plus de la jante.

Grâce à cet appui, le conducteur peut parcourir à pression nulle jusqu'à 200 km à une vitesse de 80 km/h. Le contrôle de la trajectoire du véhicule est assuré, même en cas de perte de pression brutale.



ATTENTION !

Ce nouveau dispositif suppose impérativement la présence d'un système de détection de roulage à plat. L'automobiliste doit être averti dès qu'il roule en sous-gonflage afin d'adapter sa conduite en conséquence !



3 À la découverte de votre pneumatique...



Comment fonctionne-t-il ?

Porter, transmettre, guider, les trois fonctions de base du pneu sont plus difficiles à réaliser qu'il n'y paraît. Invisible, sa structure se révèle aussi importante que ses gommes.

- Porter la charge résultant de la masse du véhicule et de toutes les surcharges liées aux mouvements dynamiques du véhicule.
- Guider le véhicule sur les trajectoires décidées par le conducteur.

- Transmettre au sol les efforts de freinage ou d'accélération décidés par le conducteur.

Ces trois fonctions sont complétées par les aptitudes du pneu à :

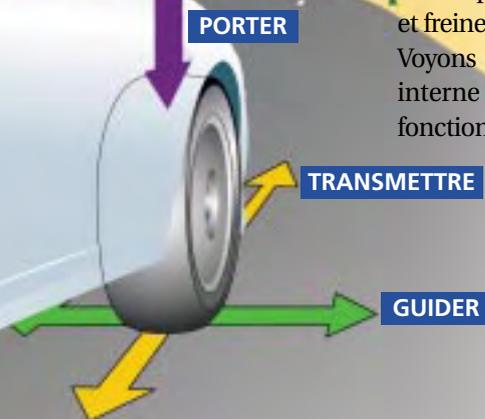
- Filtrer les petites irrégularités du sol.
- Rouler avec peu d'effort et peu d'échauffement jusqu'à des vitesses élevées.
- Conserver durablement toutes ses qualités.

Tout passe par une aire de contact du pneu sur le sol grande comme une main !

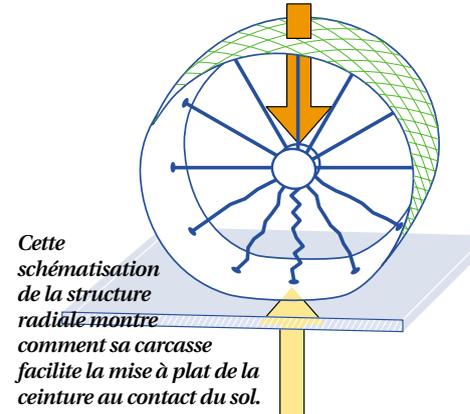
Parce que le pneu est souple, il épouse le sol avec aisance.

Le contact de la gomme avec le sol génère des forces superficielles élevées capables de guider, propulser et freiner le véhicule.

Voyons comment la constitution interne du pneu concrétise ces fonctions et aptitudes.



Une ceinture inextensible : le secret de la structure radiale...



Placée sur la périphérie du pneu, cette ceinture se comporte, sous l'effet de la pression de gonflage, comme une voûte à laquelle le moyeu de la roue est rattaché par des haubans - en fait les câbles radiaux constituant la carcasse dite radiale -. Au contact du sol, la charge aplatit la ceinture pour développer une surface de contact telle que la pression multipliée par la surface égalise la charge. Dans cette zone de contact, les haubans se trouvent détendus. La charge est donc effectivement suspendue à la ceinture par les autres haubans restés tendus.

Avec le Radial, les câbles des flancs, bien que six fois moins nombreux que ceux du pneu conventionnel, travaillent principalement en traction. Ce fonctionnement est idéal pour la carcasse, généralement

faite de câbles de rayonne ou polyester, et lui assure une excellente endurance.

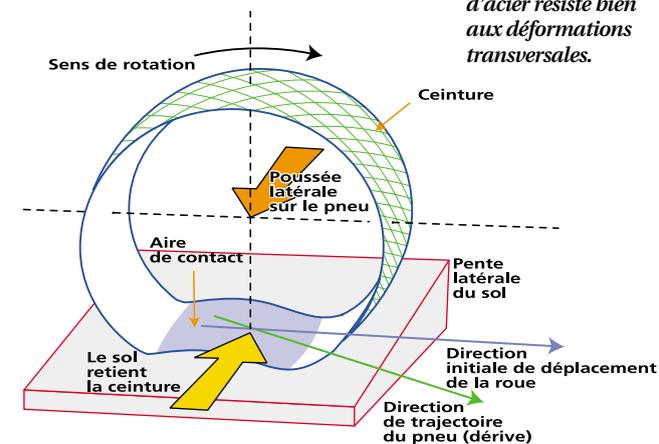
La solution aux déformations transversales du pneu...

Quand un véhicule est soumis à une poussée latérale dans la zone de contact, la ceinture est retenue, comme agrippée, par le sol.

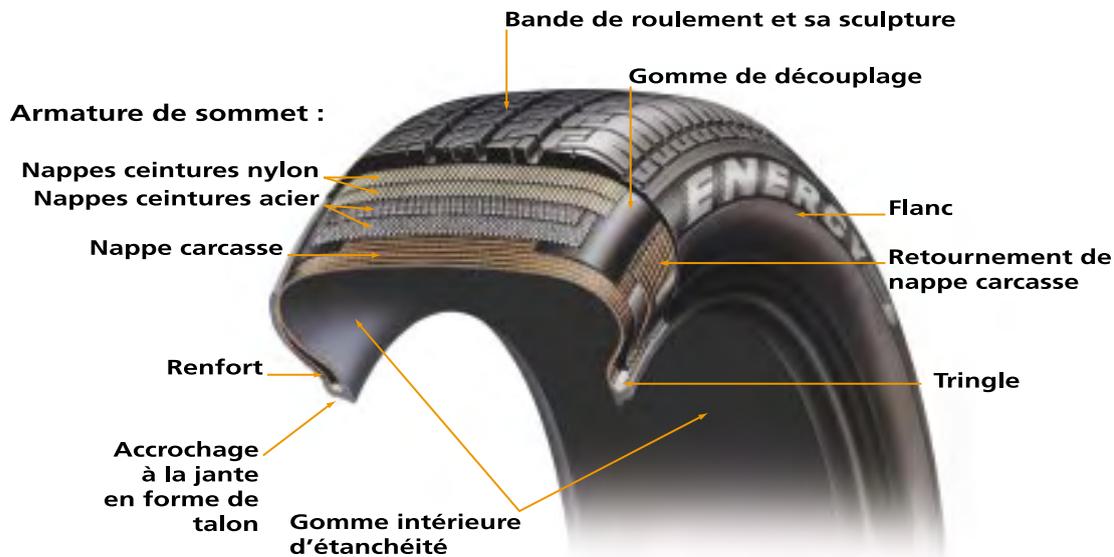
Un véritable cisaillement déforme ainsi la ceinture et l'oblige à progresser "en crabe" sur le sol. Il en résulte une déviation de trajectoire, appelée "dérive", qu'il faut limiter le plus possible pour garantir au véhicule un guidage précis. Un résultat d'autant plus facile à obtenir que la ceinture résistera mieux à la déformation transversale. À la fois large et renforcée par une armature de câbles d'acier, la ceinture répond bien au problème.

C'est la solution adoptée pour le pneu Radial avec sa ceinture de fins câbles d'acier posés en deux couches croisées... Principe encore amélioré depuis les années 70 avec les pneus larges ou taille basse.

Soumise à une poussée latérale, la ceinture armée d'acier résiste bien aux déformations transversales.



MORPHOLOGIE : UN VISAGE MODESTE ET UN SQUELETTE SOPHISTIQUÉ



Pour répondre avec pertinence à chacune de ses missions, chaque zone du pneumatique suit un schéma de construction spécifique.

Dans sa forme la plus classique, le pneumatique est constitué d'une enveloppe qui comprend une carcasse interne, une bande de roulement, un accrochage et des flancs, et un élément intérieur d'étanchéité à l'air.

*L'accrochage à la jante :
une performance d'acrobate*

La zone d'accrochage assure la liaison mécanique entre un support totalement rigide, la jante, et une structure extrêmement souple, le pneumatique.

PORTRAIT D'UNE ROUE

La jante :
partie périphérique de la roue qui supporte le pneumatique. Sa forme précise assure un positionnement rigoureux et parfaitement étanche du pneu.

Le disque :
soudé à la jante, il garantit la fixation de la roue sur le moyeu.

À noter :
le moyeu, élément solidaire de la suspension, donne sa liberté de rotation à la roue.



Un virage pris au maximum de la poussée transversale avec une pression de gonflage insuffisante.

Son travail s'accompagne de frottements permanents contre le crochet de la jante. Le matériau protecteur qui la compose doit donc être extrêmement résistant à l'abrasion. Cette zone basse du pneumatique assure la transmission des couples moteur ou de freinage.

Les talons contiennent des tringles, sortes de câbles d'acier noyés dans la bordure du pneu. Elles servent à serrer le pneumatique sur la jante et sont capables de supporter jusqu'à 1 800 kg d'effort sans risque de rupture.

Dans les pneumatiques tubeless, il n'y a plus de chambre à air. La gomme mince qui la remplace est intégrée au pneumatique et forme une couche intérieure qui est imperméable à l'air. Cette gomme d'étanchéité maintient la pression.

*Les flancs :
des remparts contre les agressions*

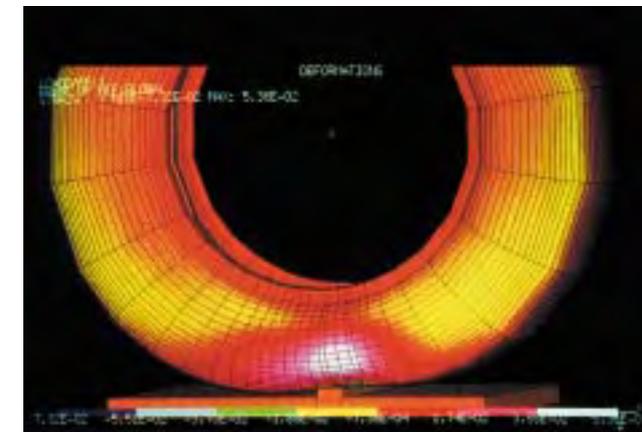
Ces parties latérales, en gomme souple d'une épaisseur de l'ordre

de 2 à 4 mm, protègent le pneumatique contre les frottements, les griffures et les agressions.

Lorsque le pneu frotte le long d'un trottoir (ce qui n'est recommandé ni pour le pneu, ni pour la direction ou la jante), ce sont les flancs, pour les pneus courants, qui protègent la carcasse.

Les flancs assurent également une bonne résistance aux déformations répétées ainsi qu'aux attaques chimiques de l'oxygène et de l'ozone contenus dans l'air. Ce sont eux, également, qui reçoivent tous les marquages réglementaires (voir page 34).

Simulation par ordinateur de la déformation des flancs sur un obstacle au sol.



*La ceinture et la carcasse :
une musculature d'athlète*

Support de la bande de roulement, constituée de nappes de câbles métalliques enrobés de caoutchouc, la ceinture assure la résistance mécanique de l'ensemble du pneumatique à la vitesse et à la force centrifuge. Elle est conçue en fonction des conditions de service de chaque type et de chaque dimension de pneumatique.

Quant à la carcasse, elle relie la ceinture avec la zone d'accrochage à la jante.

*Les nappes de sommet :
rigides et souples à la fois,*

Fabriquées par calandrage, elles peuvent être comparées à un

sandwich de câbles en acier, très fins et très résistants, pris entre deux gommages minces.

Les nappes sont croisées obliquement et collées l'une sur l'autre. Le croisement de leurs fils avec ceux de la carcasse forme des triangles indéformables (triangulation) : cette disposition assure la rigidification du sommet. La ceinture ainsi formée est inextensible dans le sens circonferentiel du pneumatique afin de ne pas s'étirer sous l'effet de la centrifugation et du gonflage.

Elle doit être rigide dans le sens transversal pour résister aux efforts de dérive et, en même temps, assez souple dans le sens radial pour "boire l'obstacle".

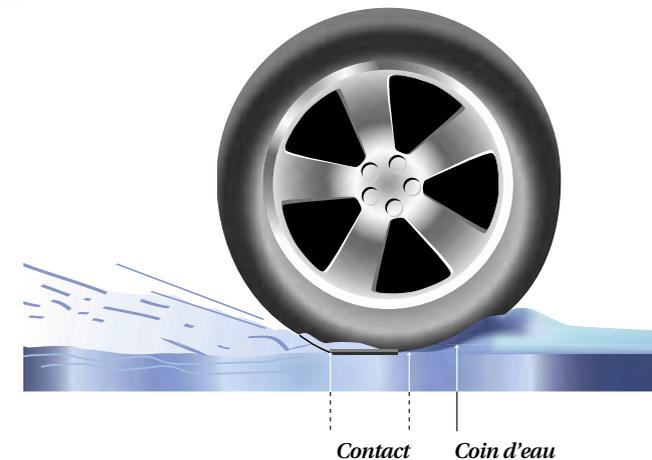
*La bande de roulement :
de multiples fonctions*

Posée par-dessus les nappes de sommet, cette partie du pneumatique est en contact avec le sol et comporte la "sculpture" ou dessin en creux pour évacuer l'eau. Toutes les fonctions du pneumatique s'expriment pleinement grâce à son contact sur le sol. Réalisant le contact (ou empreinte) au sol, la bande de roulement doit présenter un ensemble de solutions techniques pour répondre à ses fonctions parfois contradictoires et préserver la sécurité :

*Empreinte
d'un pneu mise
en évidence
par de
la fluorescéine.*



- **être résistante à l'usure** : il faut prévoir un volume de gomme pour que le pneu tienne longtemps (2 000 cm³ environ) ;
- **pouvoir rouler à grande vitesse** : sa masse doit rester limitée afin de ne pas générer des forces centrifuges trop importantes ;
- **adhérer sur sol mouillé** : la bande de roulement doit être entaillée d'un réseau de canaux de drainage, qui représente jusqu'à 35 % du volume de gomme à user.





Les sculptures : savoir les décrypter

Nées pour affronter l'eau

Le caoutchouc naturel, malgré toutes les qualités qu'on lui connaît, ne permet pas, dans toutes les conditions climatiques que rencontre un pneu, d'avoir une adhérence constante.

Dès les années 1910, on s'est aperçu que les pneus "sculptés" glissaient moins sur le sol mouillé que les pneus lisses.

Des canaux évacuent l'eau sur le côté ou à l'arrière des pneus

Les sculptures servent à assécher la chaussée sous la bande de roulement afin que celle-ci puisse toucher le sol et y trouver l'adhérence. En quelques millièmes de seconde, la sculpture collecte l'eau dans les canaux d'évacuation et la

rejette hors de la zone de contact. Il existe souvent deux systèmes d'évacuation :

- des canaux latéraux transversaux qui évacuent l'eau très rapidement sur les côtés du pneu ;
- des canaux centraux circonférentiels qui rejettent l'eau derrière le pneu ou la stockent. On les multiplie parfois pour compenser la largeur croissante des pneumatiques.

Il existe un grand nombre de sculptures diverses, dont les formes résultent du calcul et de l'expérimentation afin de s'adapter à chaque type de pneu.

Comment lire une sculpture

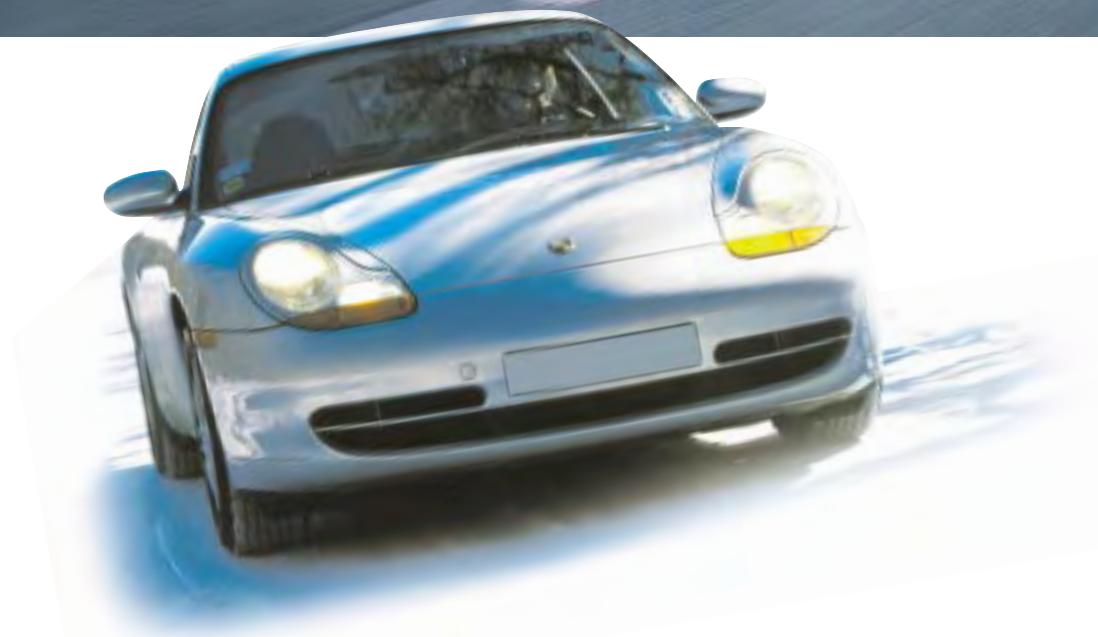
Le pneu routier

Surface entaillée à 30 % environ. Profondeur des entailles de 6 à 9 mm. Les creux sont des sillons longitudinaux associés à des canaux transversaux. Les lamelles, nombreuses, garnissent les parties massives de la sculpture.

Il est adapté à des roulages sur route sèche ou mouillée et acceptable sur neige bien damée.

Le pneu sport

Surface entaillée à 35 % environ. Profondeur des entailles de 5 à



8 mm. Les creux sont parfois des sillons longitudinaux, mais forment plus souvent des dessins en V. En général, les lamelles sont peu nombreuses ou inexistantes.

Le pneu est excellent à haute vitesse sur route sèche et bon sur route mouillée.

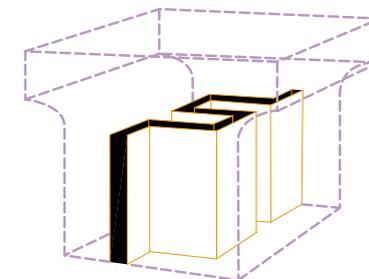
La lamellisation en 3 dimensions

Cette technologie se caractérise par des mécanismes d'autoblocage

dans l'épaisseur de la gomme et par une mobilité élevée de la lamelle à la surface de la gomme.

On concilie ainsi une bonne rigidité des pains de gomme pour un comportement routier particulièrement satisfaisant sur sol sec et une mobilité des griffes pour une bonne adhérence sur des sols mouillés ou enneigés. En outre, ces mécanismes perdurent pendant l'usure de la sculpture.

La lamelle vilebrequin réduit la mobilité du bloc par un effet d'imbrication. (La zone en noir sur le schéma correspond à une partie creuse).





Le pneu neige

Surface entaillée à 35 % environ. Profondeur des entailles de 8 à 10 mm. Les creux sont constitués de sillons multiples en réseaux, dessinant de nombreux blocs. Les blocs sont fortement lamellisés pour multiplier les accroches dans la neige et améliorer la traction et le freinage. Des gommages adaptés

optimisent les performances de contact à basse température, sur neige compactée ou gelée.

Le pneu a une très bonne tenue de route sur neige et verglas, tout en procurant une parfaite sécurité sur route sèche.

Deux grands types de pneus 4X4

- Les polyvalents

Surface entaillée à 35 % environ. Profondeur des entailles de 8 à 12 mm. Les creux en réseaux dégagent des blocs bien découpés mais peu agressifs. Les lamelles sont peu nombreuses.

Avec cette morphologie, le pneu est bon sur des sols non revêtus, sur neige et sur boue et offre une aptitude routière tout à fait correcte, compte tenu des capacités de vitesse moindres des véhicules.



- Les spécialistes "Tout terrain"
Surface entaillée de 40 % environ. Profondeur des entailles de 15 mm environ. Les creux donnent au pneu un aspect très découpé, dégageant des blocs très hauts mais massifs qui présentent

une bonne résistance à l'arrachement. **Le pneu dispose d'une très bonne capacité de franchissement (obstacles rocheux) et peut rouler sur des sols agressifs, de la boue profonde et des pentes très raides.**



Deux types de sculptures.

En haut : sculpture pour polyvalents à dominante routes et chemins.

En bas : sculpture "Off Road" ou "Tout terrain", à usage chemins et franchissement.

Les marquages : une obligation internationale

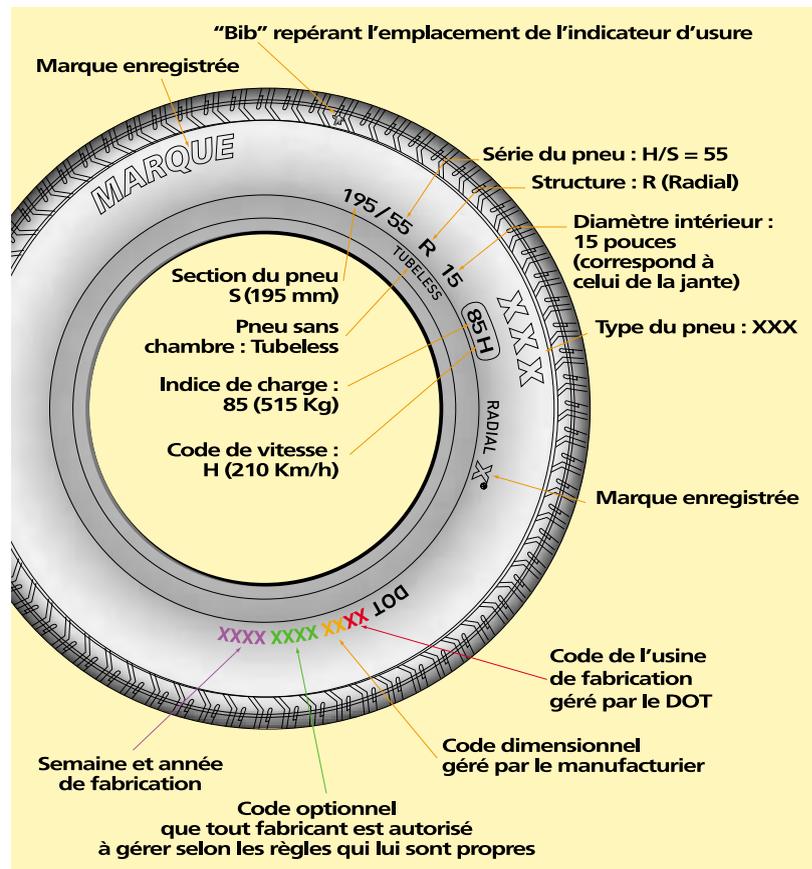
*Dis-moi qui tu es... je saurai si je
suis en sécurité avec toi*

La fabrication et l'utilisation du pneumatique - indissociables de la sécurité - sont régies par une réglementation. Celle-ci impose un certain nombre de marquages

obligatoires répondant à une codification internationale. Ils définissent le pneumatique, ses conditions normatives d'utilisation, son origine et sa date de fabrication. Ils se concrétisent par moulage sur les flancs du pneu.

Ces marquages constituent une garantie supplémentaire pour l'utilisateur.

MARQUAGE DES PNEUS COURANTS

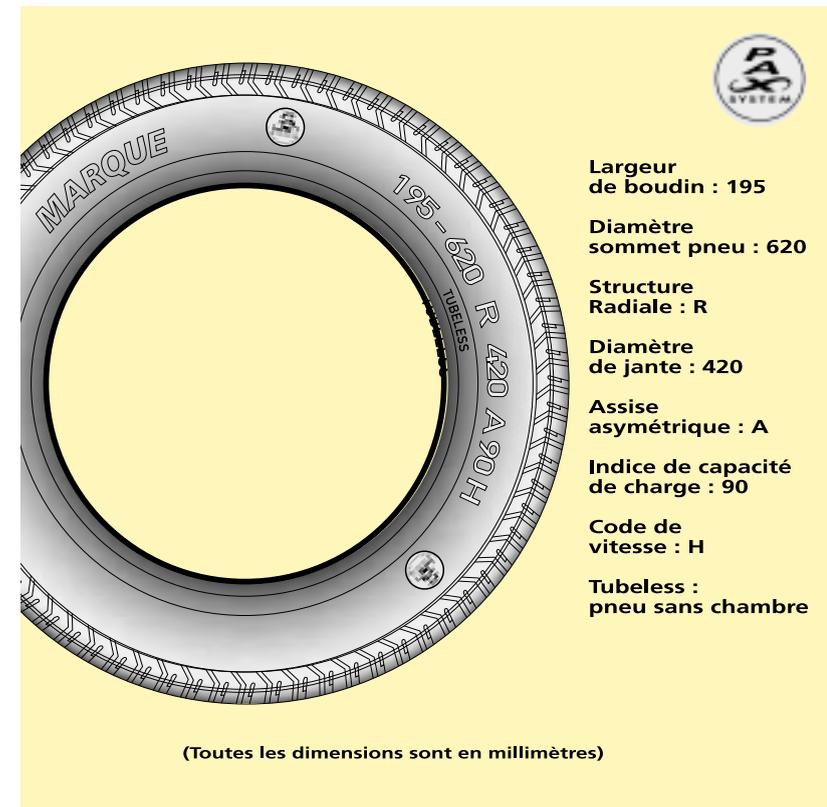


Décryptage... tout sur l'origine et les caractéristiques d'un pneu

Le marquage des pneus précise les conditions d'utilisation, telles que l'indice de charge et l'indice de vitesse, qui correspondent aux performances maximales du pneu. Enfin, le marquage "DOT" (Department of Transportation - USA) est une exigence réglementaire américaine pour l'exportation du pneu aux États-Unis et au Canada.

Chez tous les spécialistes, les manufacturiers mettent à la disposition des usagers des tableaux de correspondances, permettant, notamment, de conserver la valeur de circonférence de roulement qui est une obligation légale et technique. L'étalonnage de votre compteur de vitesse et de kilométrage en dépend.

MARQUAGE DES PNEUS PAX SYSTEM



Code de vitesse	Vitesse (km/h)
A1	5
A2	10
A3	15
A4	20
A5	25
A6	30
A7	35
A8	40
B	50
C	60
D	65
E	70
F	80
G	90
J	100
K	110
L	120
M	130
N	140
P	150
Q	160
R	170
S	180
T	190
H	210
V	240
W	270
Y	300
VR	>210
ZR	>240

Indice	Charge en Kg
60	250
61	257
62	265
63	272
64	280
65	290
66	300
67	307
68	315
69	325
70	335
71	345
72	355
73	365
74	375
75	387
76	400
77	412
78	425
79	437
80	450
81	462
82	475
83	487
84	500
85	515
86	530
87	545
88	560
89	580
90	600
91	615
92	630
93	650
94	670
95	690
96	710
97	730
98	750
99	775
100	800
101	825
102	850
103	875
104	900
105	925
106	950
107	975
108	1000
109	1030
110	1060

4 Les matériaux du pneumatique :



pour un composite de très haute technologie

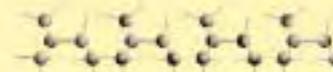
On demande tout et son contraire au pneu, adhérence-longévité, précision de conduite-confort, etc. Il parvient à résoudre ces contradictions au prix de l'extrême sophistication de ses nombreux composants, environ 200.

Il rassemble des matériaux aux propriétés très diverses : plus de 200 matières premières interviennent dans sa composition. Les chercheurs puisent dans cette large palette pour élaborer les composants du pneu, chacun ayant un rôle à jouer selon le type de pneumatique fabriqué.

Caoutchoucs naturels et synthétiques, charges et adjuvants : des composants de choc !

Le caoutchouc naturel

L'Hévéa, ou "l'arbre qui pleure", est connu depuis des siècles chez les indiens d'Amazonie qui pratiquaient une incision sur l'écorce de l'arbre et recueillaient le latex se présentant sous la forme d'un liquide blanc et laiteux contenant des globules de caoutchouc. En se coagulant, le caoutchouc épouse la forme de divers objets. L'hévéaculture exige des conditions climatiques et hygromé-



ZOOM SUR LE CAOUTCHOUC !

Le caoutchouc appartient à la famille des polymères qui peuvent être d'origine naturelle ou synthétique. Ces produits une fois transformés existent en abondance autour de nous : matières plastiques, films, joints, tuyaux, pneus...

Le caoutchouc naturel appartient à la classe des élastomères. Toutes ces substances se caractérisent par de très hauts poids moléculaires. Les molécules se présentent sous forme de longues chaînes dont le motif de base est appelé monomère. C'est un produit organique, constitué par du carbone et de l'hydrogène.

Pour le caoutchouc naturel, le monomère est l'isoprène. Le polymère est constitué de longues chaînes dont la composition influence les propriétés : plus la chaîne est longue et régulière, plus elle est élastique. Or, tous les motifs du caoutchouc naturel sont placés de la même manière dans la chaîne. Il est dit 100 % stéréo régulier.

En revanche, si chaque chaîne est élastique, le caoutchouc naturel, lui, est plastique, car ses chaînes restent relativement indépendantes les unes des autres. Il se déforme mais ne peut reprendre sa forme initiale. Pour le rendre élastique, il est nécessaire de relier les chaînes entre elles de la façon la plus régulière possible en ayant recours à la vulcanisation. Plus les chaînes formeront un réseau cohérent, meilleure sera l'élasticité.

triques très particulières. La zone de plantation est comprise entre le 20° parallèle de latitude nord et le 20° parallèle de latitude sud, aire climatique équatoriale et tropicale où les précipitations annuelles oscillent entre 1 500 mm et 2 000 mm d'eau. 85 % de la production mondiale de latex est assurée par de petits producteurs indépendants.



Plants d'hévéas.

Les plantations sont situées principalement en Asie du Sud-Est (en Thaïlande, 1^{er} producteur mondial, en Indonésie, en Malaisie, au Sri Lanka, en Inde et au Vietnam), en Amérique Latine (au Brésil, au Guatemala...) et en Afrique (en Côte d'Ivoire, au Nigeria, au Liberia, au Cameroun...).





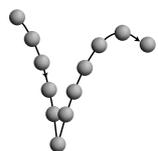
Puis vinrent les produits de substitution...

Une consommation en forte augmentation, les divers conflits mondiaux ont conduit à rechercher une production plus importante, d'abord par la récolte du caoutchouc sylvestre de plantation, puis par la fabrication de caoutchouc artificiel ou synthétique.

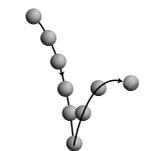
En France, la production de caoutchoucs synthétiques a débuté dans les années 50 et ces nouveaux matériaux ont amélioré la qualité des articles fabriqués (les chambres à air en caoutchouc butyle, par exemple) ou encore trouvé de nouvelles applications.

Dans l'industrie du pneumatique, 60 % des caoutchoucs utilisés sont des caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir d'hydrocarbures d'origine pétrolière, le caoutchouc naturel restant cependant nécessaire pour les 40 % restants. La part du caoutchouc naturel est plus importante dans les flancs et la bande de roulement des pneumatiques de génie civil et de poids lourds, car sa haute résistance est mieux adaptée à ces usages.

* **HYSTÉRÈSE :**



Une balle de caoutchouc rebondit très haut si son hystérésis est faible.



Une balle de caoutchouc rebondit peu si son hystérésis est forte.

Une différence essentielle entre les deux types de caoutchouc est l'hystérésis*. Le caoutchouc synthétique développe une hystérésis forte, très supérieure à celle du caoutchouc naturel, d'où son intérêt pour la fabrication de pneus adhérents.

Charges renforçantes et adjuvants chimiques

À ces gommages naturelles ou artificielles sont ajoutés divers produits, indispensables à la fabrication du pneumatique : les charges de renfort et les agents de vulcanisation.

Le noir de carbone

Apparus en 1915, les noirs de carbone occupent une place prépondérante dans l'industrie du caoutchouc. Les mélanges de gommages, renforcés par le noir de carbone, décuplent la résistance à l'usure des pneumatiques.

Les noirs de carbone sont obtenus par combustion ou décomposition thermique partielle de gaz naturel ou d'hydrocarbure. Ils représentent 30 % de la composition du mélange et donnent sa couleur au pneu, couleur qui détient, par ailleurs, un réel pouvoir contre le rayonnement des ultra-violets pour s'opposer à la fissuration et au craquelage de la gomme.

La silice

Issue du sable, la silice a des propriétés connues depuis longtemps, dont l'amélioration de la résistance à la déchirure des mélanges de gomme.

En 1992, Michelin a franchi une étape décisive en associant une silice originale à un élastomère de synthèse spécifique par un agent de liaison chimique, réunis par un procédé particulier de "mélangeage".

Les mélanges obtenus par cette technique ont permis l'élaboration de pneus présentant, notamment, une faible résistance au roulement et une bonne adhérence sur les sols froids, sans perdre les qualités de résistance à l'usure des mélanges au noir de carbone. Cette innovation est à l'origine des "pneus verts" à basse résistance au roulement.



Le soufre

Il sert à vulcaniser le caoutchouc en le faisant passer de l'état plastique à l'état élastique. Son action est accompagnée de produits retardateurs et accélérateurs utilisés simultanément en fabrication qui optimisent l'action de la chaleur au moment de la cuisson du pneumatique.

D'autres produits servent à favoriser l'homogénéisation des mélanges et à faciliter leur extrusion, ainsi que leur adhésion aux nappes textiles des carcasses ou aux câbles d'acier.

Pour fabriquer 200 kg de bande de roulement d'un pneumatique de tourisme, il faut : 100 kg de caoutchouc, principalement synthétique et un peu de naturel, 35 kg de noir de carbone, 35 kg de silice, 20 kg d'huile, 4 kg de résine, 2 kg d'antioxydant, 2 kg de cires, 4 kg d'oxyde de zinc, 1,5 kg d'acide stéarique, 1 kg d'accélérateur de vulcanisation, 1,5 kg de soufre, et, éventuellement, des colorants.



Opération de mélangeage de la gomme entre cylindres.



Fils textiles disposés pour le calandrage.

Enfin, les gommages contiennent diverses substances destinées à favoriser la conservation du pneumatique dans le temps : antioxydants, antiozone...

Fils métalliques et textiles : une armature haut de gamme

Véritable squelette du pneumatique, les renforts de câbles textiles et métalliques sont aussi nécessaires les uns que les autres pour

garantir sa géométrie et ses rigidités spécifiques. Ils assurent également la souplesse indispensable à la mise à plat du pneumatique sur le sol.

Des renforts qui ont transformé le pneu

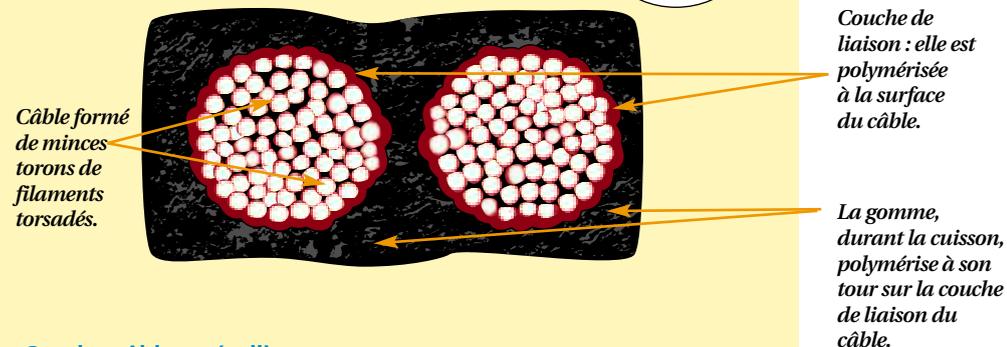
- Grâce à leurs propriétés de résistance à l'allongement et à la rupture, ils transmettent des efforts importants tels que ceux mis en jeu par le gonflage, la centrifugation ou le guidage.

LIAISON DE LA GOMME ET DES CÂBLES DE RENFORT

Il n'y a pas d'adhésion spontanée entre la gomme et la surface d'un câble textile ou métallique. Pour obtenir une liaison robuste et durable après cuisson du pneu, on aura recours à des agents de liaison très spéciaux.

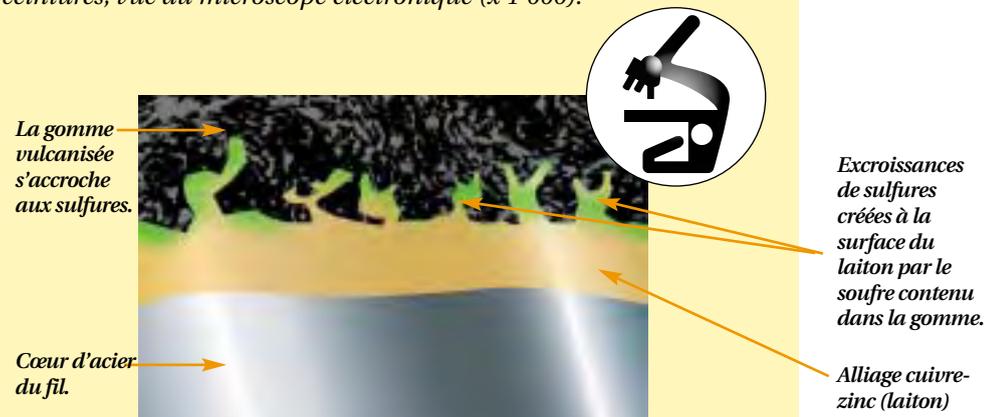
> Cas des câbles textiles

Schéma d'une coupe vue au microscope (x 50) réalisée dans la carcasse.

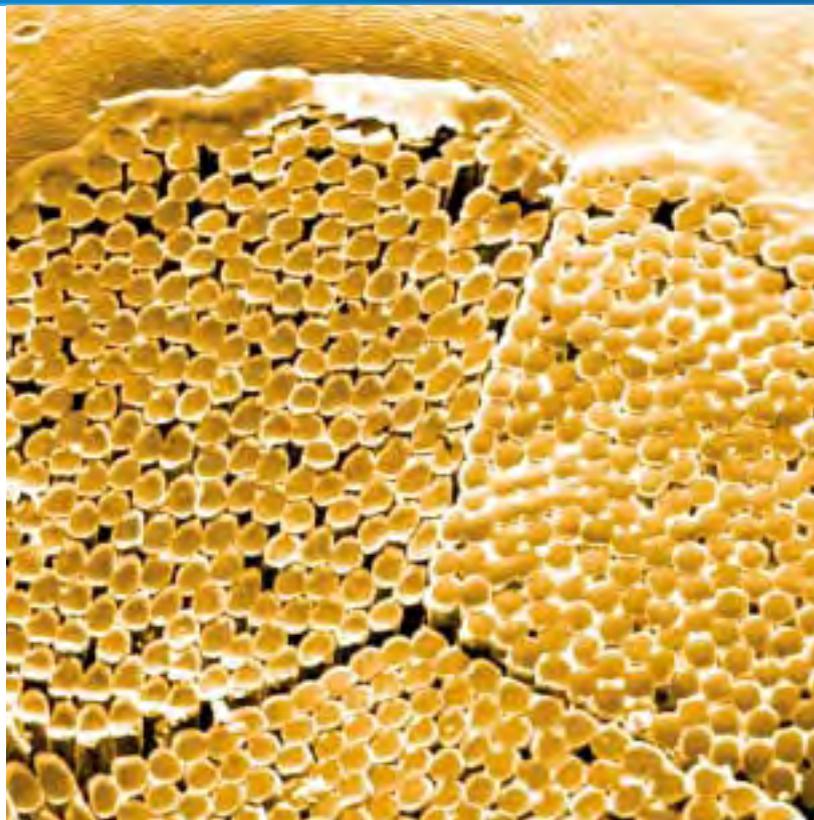


> Cas des câbles métalliques

Schéma d'une coupe d'un fil d'acier, réalisée dans les nappes de ceintures, vue au microscope électronique (x 1 000).



*Vue au microscope
d'une coupe de
câble textile
(x 500).
1 500 d'entre eux
forment la
carcasse d'un
pneu radial.*



LA FABRICATION DES CÂBLES MÉTALLIQUES

Le tréfilage

Le tréfilage a pour objectif de réduire à quelques centièmes de millimètre le diamètre du fil d'acier à partir d'un gros fil machine de diamètre 5,5 mm.

Le retordage

Les fils unitaires ainsi obtenus sont tressés par 4 ou 6 et constituent un câble, très souple et très endurant, d'un diamètre inférieur à 1 mm.

Le calandrage

*Pressés par des cylindres entre deux feuilles minces de gommés, les câbles deviennent des nappes métalliques calandrées.
Les nappes métalliques calandrées constitueront l'armature du sommet.
L'acier est aussi utilisé dans la fabrication des tringles, pièces essentielles du pneumatique qui assurent l'accrochage de l'enveloppe à la roue.*

• **Du fait de la grande flexibilité du textile**, les fils ont la capacité de travailler parfaitement en traction pure et d'être également très souples. Le textile est idéal pour les flancs du pneumatique. Les fils métalliques sont réservés à la ceinture du pneumatique qui exige une forte rigidité latérale et circonférencielle.

Les fils métalliques

Un agencement de plus en plus sophistiqué dans le pneumatique (voir construction radiale) a été rendu possible par la technologie des minces câbles d'acier. Premier à maîtriser le tréfilage d'acier dur en fil fin, Michelin a su introduire de l'acier dans l'armature du pneumatique dès 1934.

Ce progrès technique majeur, associé à l'élaboration d'un revêtement assurant une liaison physico-chimique forte entre la gomme et l'acier, a été utilisé industriellement en 1937 dans le pneumatique Michelin "Metalic" pour véhicules poids lourds. Sa carcasse en acier représentait une avancée considérable en termes de longévité, d'endurance et de capacité à porter la charge.

Depuis, l'acier a été universellement adopté comme ceinture de renfort des pneus Radiaux .

*Les minces fils d'acier,
au diamètre de 0,2 mm,
sont assemblés
pour former un câble
d'environ 1 mm
de diamètre.*





Ligne de tréfilage du fil machine (du diamètre de 5,5 mm jusqu'au diamètre de 1,5 mm).

Les fils textiles

Les fibres textiles constituent la carcasse du pneumatique tourisme. 1 500 petits arceaux textiles placés côte à côte sont répartis tout autour de celui-ci et ceinturés par deux nappes de câbles d'acier.

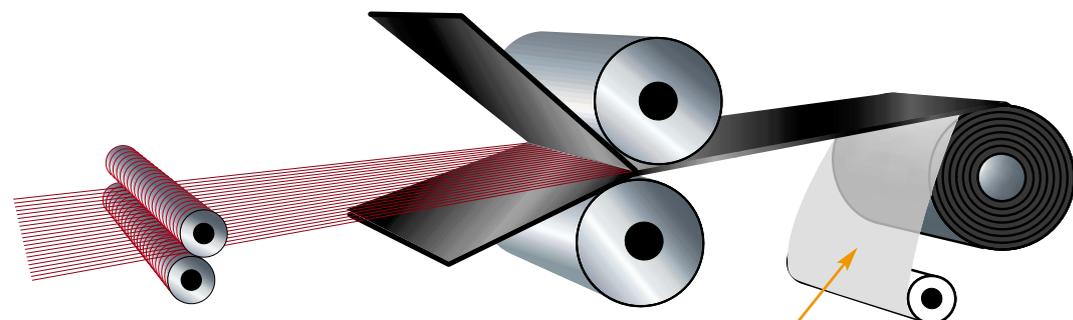
À l'origine, les cotons naturels à fibres longues étaient largement employés. Mais, sensibles à la chaleur, à l'humidité et aux flexions répétées, ils ont été remplacés par de nouveaux produits. C'est le cas de la rayonne, obtenue à partir de la fibre cellulo-

sique du bois, qui est utilisée depuis le développement du pneu Radial.

Parallèlement, dans les années 60, les fibres synthétiques, comme le polyester et le nylon, ont été introduites dans la composition du pneumatique. L'aramide (polyamide aromatique) est apparue au début des années 70. On l'utilise en substitution du métal dans certains pneumatiques de voitures et également comme renforts de carcasse. Cette fibre allège de façon significative le pneumatique, sans nuire à ses performances d'endurance.

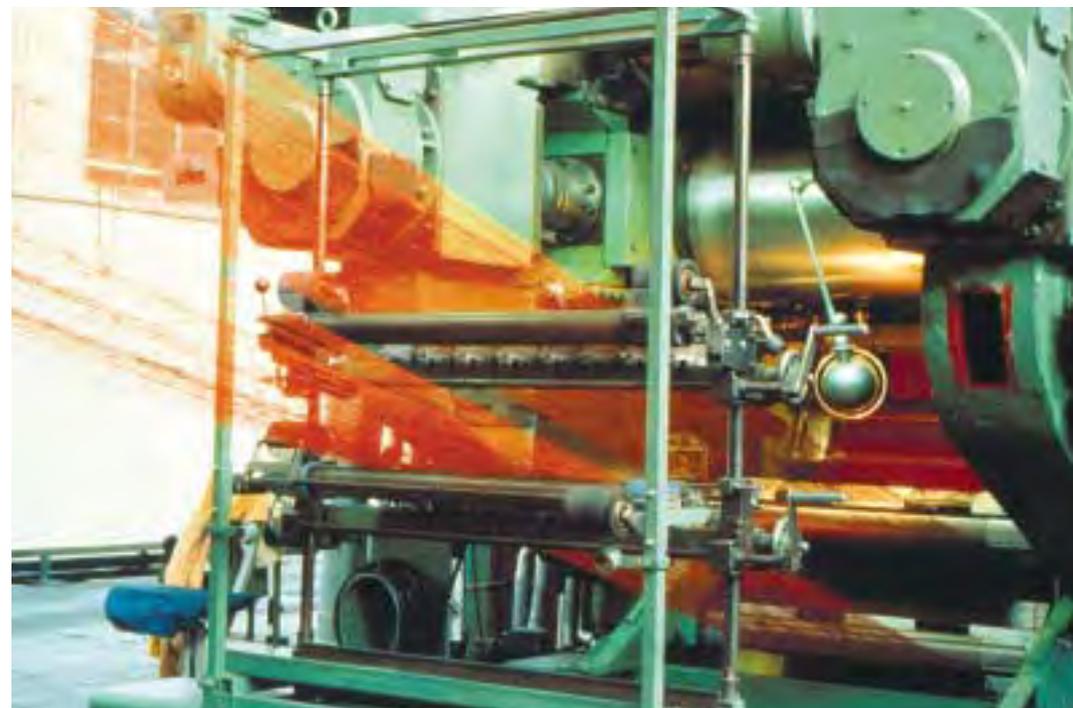
PRINCIPE DU CALANDRAGE :

Le mariage entre les câbles et les couches minces de gomme est réalisé par compression entre deux cylindres de grand diamètre.



Intercalaire anti-collant.

Calandrage des nappes textile.



5 Sept performances

pour un champion



On n'a jamais vu un poids lourd sur des roues de vélo.

De même, pour les voitures de tourisme, c'est la dimension du pneu qui détermine sa capacité maximale de charge. Au-delà de ce principe de base, de nouvelles carcasses et qualités de gommes apportent plus de performance dans tous les domaines.

1 Bien gonflé, pour porter sa charge !

Une approche empirique simple montre que la charge portable par un pneu dépend de son volume interne et de sa pression de gonflage : par exemple, un pneu de 25 litres de volume interne gonflé à 2 bars peut ainsi porter 500 kg.

C'est dire l'importance de la pression de gonflage ! Si le rap-

port pression / charge est correct, le fléchissement des flancs dans la zone de contact avec le sol ne dépassera pas 20 % de leur hauteur. Ce qui assure aux flancs un travail de flexion raisonnable et garantit une longévité maximale de la carcasse.

2 Obéir aux ordres du conducteur

Lors de la conduite, un véhicule est soumis à des forces importantes.

• **Selon un axe longitudinal** pour les efforts d'accélération ou de freinage : les pneus doivent transmettre, au niveau de l'aire de contact avec le sol, des forces tangentielles importantes. En freinage d'urgence, la force totale de freinage équivaut au poids du véhicule.

• **Selon un axe transversal** pour les efforts de guidage : il s'agit de maintenir le véhicule sur la trajectoire désirée à une vitesse donnée. Dans le cas d'une voiture de gamme moyenne, un seul des quatre pneus peut avoir à fournir une force instantanée de 600 kg.

La gomme, élément clé de l'adhérence

L'adhérence est un élément essentiel dans le contact du pneu avec le sol : sans elle, les voitures patineraient, sans pouvoir ni

virer, ni accélérer ou freiner. La masse du véhicule, combinée aux effets extérieurs (vent, dévers de la route, pentes, irrégularités du sol), en ferait un objet mobile incontrôlable !

Grâce à ses propriétés visco-élastiques, la gomme joue un rôle essentiel dans le phénomène de l'adhérence au sol. Ce matériau a la particularité, après déformation, de retrouver sa forme initiale au bout d'un certain temps : c'est le phénomène de l'hystérèse dont découlent les mécanismes d'adhérence des pneumatiques.

FORMULE DE LA VALEUR APPROCHÉE DU VOLUME INTERNE D'UN PNEU À PARTIR DE SES DIMENSIONS

Exemple :

Valeurs lues sur le marquage d'un pneu 205/50 R 16

$S = 205$, $H/S = 50$, $Dj = 16$

S : largeur de section du pneu (mm)

H/S : rapport hauteur sur largeur de section (en %)

Dj : diamètre de jante (en pouces)

Formules :

A_s = aire de section droite du pneu (mm^2)

$A_s = S \times H \times 0,8$

R_g = rayon de giration de section droite (mm)

$R_g = 1/2 (Dj \times 25,4 + H)$

$H = S \times H/S / 100$

Calculs :

$H = 205 \times 50 / 100 = 102,5 \text{ mm}$

$A_s = 205 \times 102,5 \times 0,8 = 16\,810 \text{ mm}^2$

$R_g = 1/2 (16 \times 25,4 + 102,5) = 254,5 \text{ mm}$

$\text{Volume} = 6,28 \times R_g \times A_s / 10^6 = 26,9 \text{ litres}$



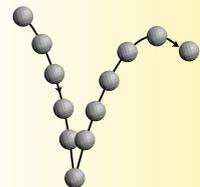


L'HYSTÉRÈSE, GARANTE DE L'ADHÉRENCE DU PNEU

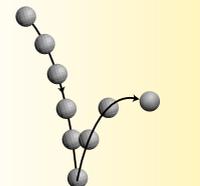
Un matériau ayant des propriétés parfaitement élastiques restitue entièrement l'énergie qu'on lui fournit. Un ressort métallique, par exemple, reprend sa forme initiale après avoir subi une déformation.

Un matériau hystérétique, tel le caoutchouc, ne restitue pas toute l'énergie fournie, mais en transforme une partie en chaleur... et en force.

Lorsque le pneu s'écrase en roulant, il y a pénétration des aspérités du sol dans la gomme. L'hystérèse, phénomène de retard de réaction mécanique, génère une force horizontale qui s'oppose aux tentatives de glissements de la gomme. C'est ce que l'on appelle l'adhérence, à l'origine de la sécurité de trajectoire du véhicule.



Hystérèse faible



Hystérèse forte

Un bon revêtement routier "retient" le pneu

Le pneu a également besoin du revêtement routier qui met en œuvre un mécanisme générateur d'adhérence : l'indentation.

Celle-ci nécessite un revêtement présentant des "indentateurs", c'est-à-dire des petites aspérités qui vont s'enfoncer superficiellement dans la gomme.

En théorie, il existe un phénomène complémentaire : l'adhésion.

Celle-ci suppose un contact parfait entre la gomme et le sol : cette situation est assez rare sur une route ordinaire car elle implique que le revêtement soit parfaitement propre et sec.

Les qualités d'adhérence d'un pneu - quel que soit le revêtement routier - sont peu modifiées sur un sol sec. En revanche, sur sol humide ou mouillé, l'adhérence est toujours dégradée.

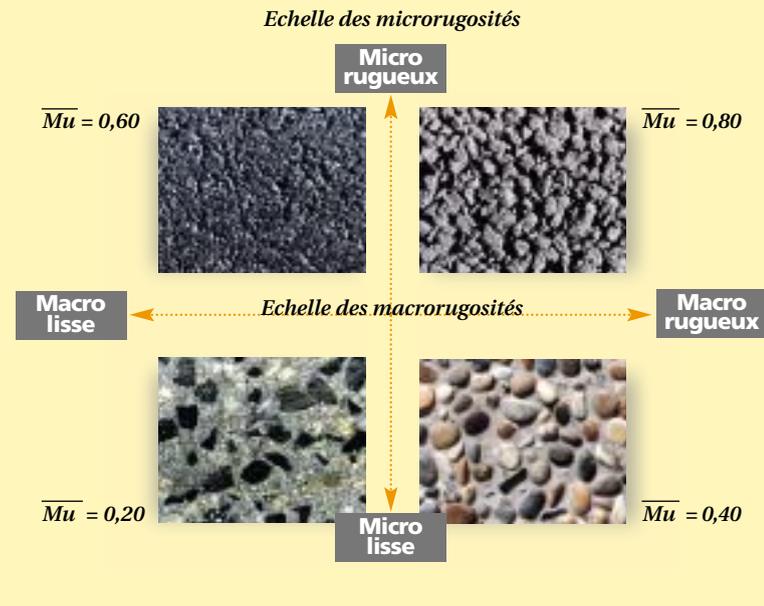
On a déjà signalé l'importance des creux de sculpture pour maîtriser le drainage de l'eau sous le pneu.

En effet, un pneu lisse rencontrerait, dès 80 km/h, un effet de soulèvement au-dessus de la couche d'eau, appelé hydroplanage.

Sur sols hivernaux

À très basse température, la glace devient sèche et donne naissance à un sol microrugueux qui favorise l'adhérence. Lorsque la température est comprise entre - 5° et 0° C, la pression des pneus au sol provoque une fonte superficielle de la glace qui se recouvre d'un mince film d'eau. La glace s'apparente

ON CLASSE LES REVÊTEMENTS ROUTIERS SELON DEUX CARACTÉRISTIQUES : MACRO ET MICRORUGOSITÉ



$\overline{\mu}$ représente le coefficient moyen d'adhérence pour un type de revêtement mouillé.

Lorsque la route est inondée, la sculpture permet d'évacuer l'eau du dessous du pneu, ce jusqu'à des vitesses importantes.



alors à un sol microlisse inondé. Pluie, neige, boue ou sol gras, l'adhérence est dans tous les cas notablement diminuée !

Travailler sobrement

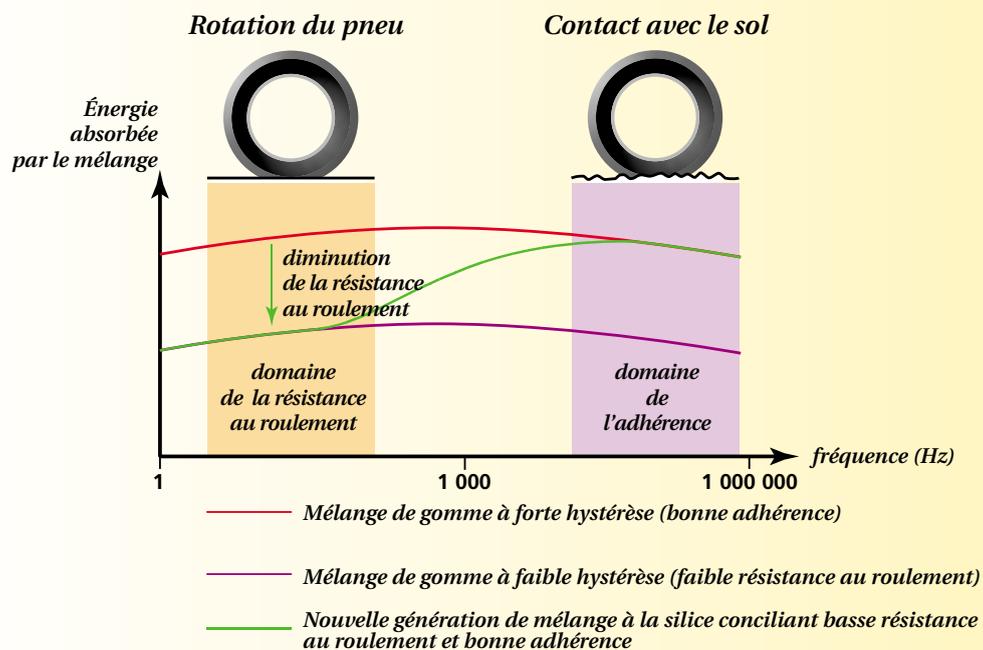
Qu'est-ce que la résistance au roulement ? Bien qu'un pneu semble

rouler avec une grande facilité, il est en fait légèrement freiné par le phénomène d'hystérèse, consommateur d'énergie.

Pendant longtemps, il a été impossible d'abaisser la résistance au roulement, par diminution de l'hystérèse de la gomme, sans compromettre le potentiel d'adhérence du pneu.

Cet antagonisme fut résolu, dans les années 90, grâce à la substitution de la silice au noir de carbone. Les déformations de surface, génératrices d'adhérence, se produisent à des fréquences élevées, comprises entre 10^3 et 10^7 Hz (1 hertz = un cycle aller-retour par seconde, soit mille et dix millions de Hz).

RÔLE DES MÉLANGES DANS LES MÉCANISMES D'ADHÉRENCE ET DE RÉDUCTION DE LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT (EN VERT, GOMME À LA SILICE)



Avec les pneus Green X, la résistance au roulement n'est plus que de 9 kg pour 1 tonne transportée.

Les déformations de structures ont lieu à chaque tour de roue, c'est-à-dire, pour une voiture roulant à 100 km/h, environ 15 fois par seconde. La résistance au roulement et l'adhérence ont donc deux territoires fréquentiels bien distincts.

Toutefois, une question subsiste : une gomme à forte hystérèse nécessaire à l'adhérence ne présentera-t-elle pas toujours une perte énergétique importante en matière de résistance au roulement ?

La substitution de la silice à la

place du noir de carbone modifie le comportement visco-élastique habituel des gommages. Leur courbe d'absorption d'énergie devient alors très modérée en-dessous de 1 000 Hz, mais reste élevée au-delà, ce qui concilie les deux performances jusqu'alors antagonistes.

Les automobilistes disposent ainsi de pneus à la fois sûrs et économes en carburant, la baisse de résistance au roulement entraînant une diminution de la consommation de carburant sans rien sacrifier de l'adhérence.

4 Toujours plus silencieux

Depuis 1980, le bruit émis par les pneumatiques d'une gamme tourisme donnée a fait un progrès de 5 décibels *, dans les conditions de mesure de la nouvelle directive 2001/43.

Ce gain correspond à une puissance acoustique émise divisée par trois.

Le bruit est principalement provoqué par le contact pneu-chaussée : rencontre répétée et rapide d'éléments irréguliers attachés à la surface du pneu ou à celle du sol. Il y a simultanément des entrechoquements et des mécanismes sonores aériens. Il y a aussi du chuintement et du crissement.

Les irrégularités de surface du sol peuvent provenir de sa macrorugosité (cailloux enrobés) ou des défauts isolés du revêtement (plaques d'égouts, joints d'auto-route, rainures transversales...). Les irrégularités de la surface du pneu ont pour origine les creux de sculpture destinés au drainage de l'eau sous le pneu. Elles génèrent, soit des effets de martèlement, soit des effets de tuyaux sonores, soit, enfin, des relâchements rapides des déformations élastiques accumulées dans l'aire de contact.

Ces mécanismes provoquent des phénomènes sonores que l'on peut découper en trois plages de fréquences.

* Pour chaque diminution de 3 décibels, la puissance acoustique est divisée par 2.



BRUIT DE ROULEMENT : DES VIBRATIONS SONORES

L'oreille perçoit des sons quand l'air est animé de vibrations comprises entre 20 et 20 000 Hz. En roulement sur le sol, le pneu est à la fois créateur et transmetteur de vibrations.

Les bruits de roulement se manifestent distinctement sur trois bandes de fréquence.

Basses fréquences (de 30 à 500 Hz)

La forte rugosité d'un sol routier excite la bande de roulement et la structure interne du pneu.

Les vibrations produites sont propagées via la structure du véhicule puis transmises à l'air. On perçoit un bourdonnement continu à l'intérieur de l'habitacle.

Moyennes fréquences (de 500 à 3000 Hz)

La sculpture est à l'origine de mécanismes vibratoires ensuite propagés par l'air.

- Les blocs de sculpture arrivant successivement au sol créent une percussion cadencée.

Un dessin de sculpture fait de courts motifs répétitifs générera un bruit dit de sirènement.

La technique consiste à construire une irrégularité circonférentielle du dessin qui, en cassant la fréquence, atténue beaucoup l'effet de sirène.

- Durant leur contact avec le sol, les éléments de gomme de la sculpture sont affectés par des micro-glissements. Ces glissements génèrent des sons, assez audibles, que l'on qualifie de chuintements.

- Dans les creux de sculpture au contact du sol, il y a successivement emprisonnement, compression et décompression d'air. Il en résulte un bruissement d'air également qualifié de chuintement.

Hautes fréquences (au dessus de 3000 Hz)

Des glissements importants de la gomme sur le sol sont obtenus par des sollicitations très appuyées en virage, accélération ou freinage. La vibration intense de la gomme crée un bruit caractéristique de crissement.



Maîtriser la production de chaleur

Un pneu est conçu et optimisé pour maîtriser totalement son comportement thermique jusqu'à une vitesse limite déterminée. Celle-ci est spécifiée dans le marquage dimensionnel du pneu, tout comme sa charge maximale et sa pression de gonflage.

À chaque flexion du pneu, le caractère hystérique de la gomme entraîne, au sein du matériau, une transformation partielle d'énergie en chaleur. Cependant, la gomme ne s'échauffera pas si elle a le temps de dissiper la chaleur générée. Inversement, si les sollicitations sont répétées à cadence trop élevée (par exemple supérieure à 30 Hz), la chaleur s'accumule au sein de la gomme et la température s'accroît progressivement. En augmentant encore la cadence, on peut aboutir à un emballement thermique dont la conséquence rapide est la destruction du pneumatique.

6

Travailler pour la durée

Préoccupation majeure pour l'utilisateur, la durée de vie d'un pneu peut être très variable. Si la moyenne, pour un bon pneu, est d'environ 50 000 km, cela peut varier de 1 à 10 pour les extrêmes. Cette variabilité ne dépend pas de la qualité du pneu mais de ses conditions d'usage.

Point de contact avec le sol, la bande de roulement est l'élément qui s'use le plus. Son degré d'usure détermine le moment de changement du pneu. Une détérioration de la carcasse (chocs, éclatement) entraîne, par contre, l'élimination du pneumatique avant qu'il ne soit usé.

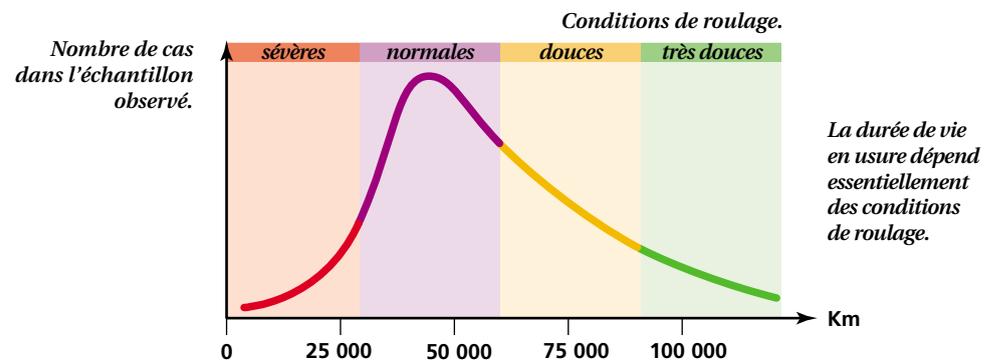
Deux règles d'usage doivent être respectées :

- une charge qui ne dépasse pas la capacité du pneu, afin d'éviter un travail en flexion excessif qui accélérerait fortement son usure ;

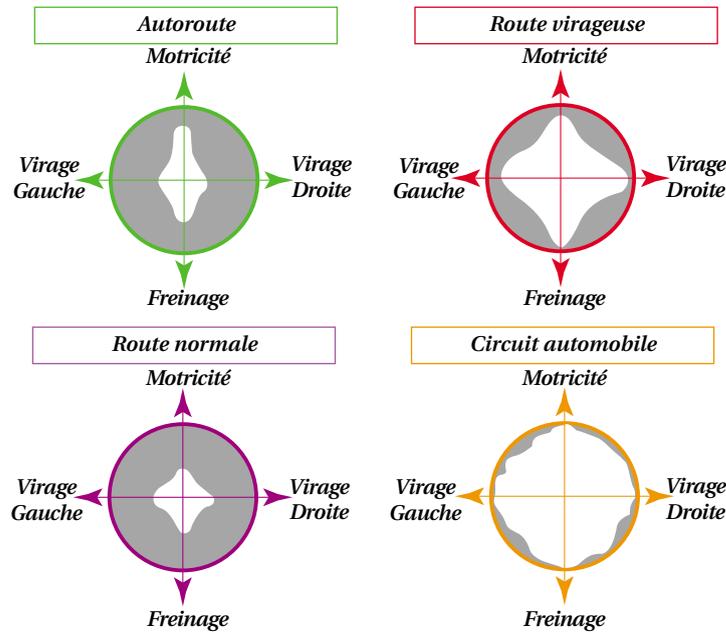
- une pression correcte (spécifiée par le constructeur du véhicule) qui garantit la meilleure répartition de la charge dans toute l'aire de contact et donc un travail du pneu au sol plus homogène. Cette condition est essentielle pour une usure lente et bien répartie. Un manque - très fréquent - de 20 % de pression peut coûter 10 000 km de durée de vie en moins pour le pneu !

Un excès de pression ne vaut guère mieux. 20 % au-delà de la préconisation du constructeur représentent 8 000 km en moins de durée de vie du fait d'une usure trop localisée au centre de la bande de roulement...

DISTRIBUTION STATISTIQUE DES DURÉES DE VIE EN EUROPE



REPRÉSENTATION STATISTIQUE DE LA SOMME DES FORCES TANGENTIELLES ENTRE LE PNEU ET LE SOL



En blanc : efforts les plus couramment rencontrés. Le rayon du cercle représente une force de 1 000 kg.

La moindre usure ? Sur l'autoroute...

Les efforts permanents demandés au pneu conditionnent les micro-glissements dans l'aire de contact. Ce sont ces glissements, répétés en permanence, qui génèrent l'arrachement de la gomme et provoquent l'usure du pneumatique. Les faits montrent qu'un pneu s'use très vite, lors d'une conduite "sport" et beaucoup plus lentement dans le cas d'une conduite sur autoroute.

Sur autoroute :

Les efforts latéraux sont peu intenses et les efforts longitudinaux sont surtout moteurs. Au total, la surface des efforts est relativement faible, puisqu'elle correspond à 1/8 de celle du cercle représenté sur le schéma. La somme des glissements sera donc très modeste.

Sur une route à virages :

Les efforts latéraux sont importants, de même que les efforts de freinage. La surface relative du diagramme correspond à la moitié de la surface du cercle. Cette

condition 4 fois plus sévère que sur autoroute accroît considérablement les glissements dans le contact pneu/sol.

En conduite sportive :

Le diagramme des efforts montre que l'automobiliste utilise largement le potentiel du pneu. La surface relative est de l'ordre de 9/10 de celle du cercle. Dans pareilles conditions, les glissements sont sans doute de 10 à 20 fois supérieurs à ceux sur autoroute.

Un rôle majeur dans le comportement du véhicule

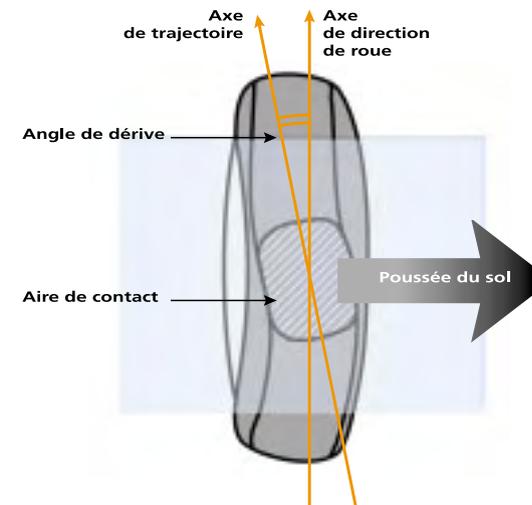
À la fois essentiel pour la sécurité du véhicule et important pour l'agrément de conduite, le comportement routier correspond aux réactions du véhicule face à des sollicitations combinées et fluc-

tuantes (braquage, accélération, freinage...). Il fait principalement appel à la progressivité et à la fidélité de la réponse du véhicule aux actions du conducteur. Tout doit se dérouler sans brutalité, ni imprévu.

Sa mise au point est particulièrement complexe car elle dépend de nombreux paramètres intervenant sur trois niveaux :

- celui du véhicule (répartition des masses...),
- celui des éléments de liaison entre le sol et la voiture (pneus, direction, suspension...),
- celui des systèmes d'aide à la conduite (contrôle de stabilité, anti blocage des roues...).

Le pneumatique joue un rôle clé dans le comportement routier car il assure, en bout de chaîne, toutes les actions nécessaires à la trajectoire du véhicule à des vitesses relativement élevées.



L'aire de contact pneu sur sol en virage. Vue à travers une dalle de verre.

*Une batterie de tests
de comportement pour
vérifier les performances du pneu*

La direction

Afin de mesurer l'amplitude, la progressivité de la réponse et la rapidité avec laquelle réagit le pneu, le pilote braque le volant d'un certain angle et le maintient constant. Il observe les réactions de comportement par rapport à un schéma idéal.

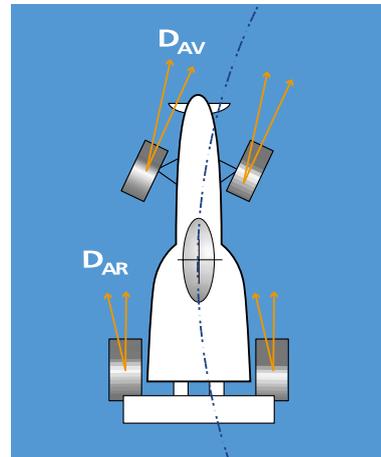
La dérive

En virage, le conducteur impose, par l'intermédiaire du volant, un angle de braquage aux roues avant du véhicule. En fait, il dirige les roues, non pas sur la trace de trajectoire, mais un peu plus vers l'intérieur du virage : c'est la "mise en dérive" du pneu.

En virage, les 4 pneus sont en régime de dérive. L'arrière peut parfois dériver plus que l'avant. C'est ce qu'on appelle le survirage.



La dérive correspond à l'angle D que forme le plan de la roue avec la trajectoire suivie. Cette "mise en dérive" des pneus génère les forces transversales permettant au véhicule de prendre le virage. En réaction, les roues arrière "cherchent" l'équilibre en se mettant, elles aussi, naturellement en dérive par rapport à la ligne de trajectoire initiale.



La répartition des angles de dérive, de l'essieu avant et de l'essieu arrière du véhicule, détermine son tempérament survireur ou sous-vireur.

Le survirage

Une voiture est en situation de survirage lorsqu'en courbe, elle a tendance à suivre une trajectoire plus serrée que la courbe souhaitée et peut, à la limite, partir en "tête à queue".

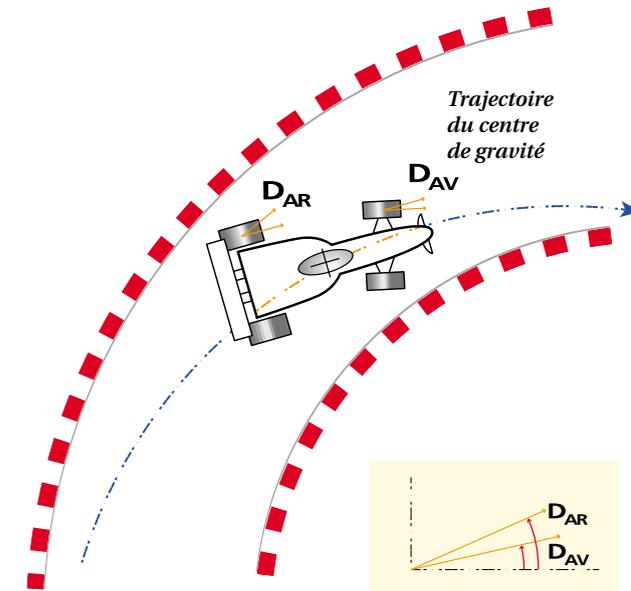
Plus le véhicule est survireur, plus il demande d'aptitudes au pilotage : ce type de comportement est plutôt réservé aux voitures de compétition.

Le sous-virage

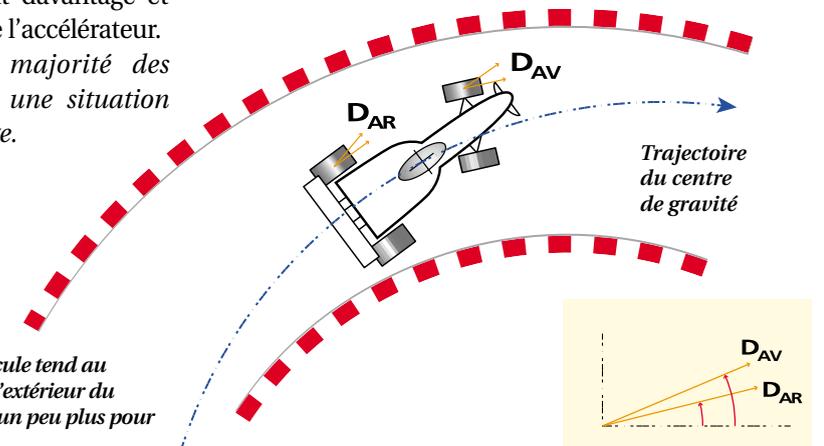
Un véhicule est en situation de sous-virage lorsqu'il a tendance, en courbe, à suivre une trajectoire moins serrée que celle souhaitée et, à la limite, à "aller tout droit". On peut généralement corriger le sous-virage en braquant davantage et en levant le pied de l'accélérateur.

L'idéal pour la majorité des conducteurs, c'est une situation de léger sous-virage.

En sous-virage, le véhicule tend au contraire à sortir vers l'extérieur du virage. Il faut braquer un peu plus pour suivre la courbe.



En survirage, le véhicule rentre dans l'intérieur du virage. Il faut contrebraquer.



6 Sous le signe de l'alliance le véhicule, la roue et le pneu



Mal employé, un excellent pneu aura un comportement médiocre. Le bon positionnement instantané du pneu sur le sol est essentiel à l'obtention d'un guidage et d'une adhérence parfaits en toutes circonstances. C'est à la liaison véhicule-sol d'assurer la maîtrise de l'attitude optimale du pneu sur le sol.

L'ensemble pneu-roue : une harmonie essentielle

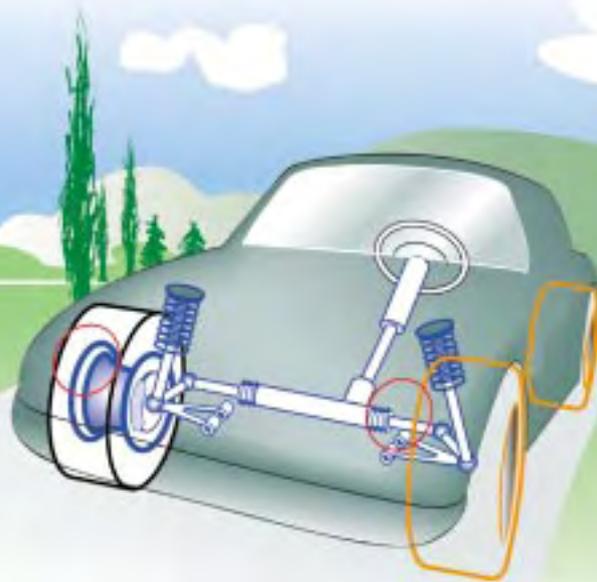
Par principe, pneu et roue forment un tout cohérent qui obéit à des règles strictes d'assemblage.

*La roue :
un modèle de fonctionnalité*

Fortement sollicitée, la roue satisfait à des critères de conception exigeants. Et s'il lui est demandé, avant tout, de tourner parfaitement "rond", elle doit être également résistante, légère, équilibrée, facile à manipuler, offrir en toutes circonstances une sécurité absolue et permettre, enfin, une bonne ventilation des freins.

Les matériaux utilisés sont l'acier ou l'aluminium et plus rarement le magnésium.

Les roues en acier sont constituées de deux parties soudées, le disque et la jante. Lorsque les roues sont en aluminium, elles sont généralement coulées d'un



seul bloc - on parle alors de roue "monobloc". Enfin, pour le dépannage lors de crevaison, les roues sont amovibles et fixées sur le moyeu par 3, 4 ou 5 écrous.

Gage d'une bonne entente, la qualité du montage.

Le montage du pneu sur la roue répond à un ensemble de spécifications précises.

- Le centrage du pneu, sa rotondité et le centrage de la roue sur le moyeu.
- L'absence de rotation du pneu sur la jante.
- L'équilibrage dynamique de l'ensemble.
- La règle de compatibilité dimensionnelle entre la largeur du pneu et la largeur de la jante, indiquée dans les tableaux de montage.
- Un pneu tubeless doit être impérativement monté avec une jante tubeless (étanche).

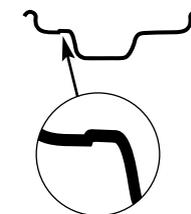
Le respect de ces règles limite le risque de déjantage du pneu en cas de dégonflement ou de choc.



IDENTIFIER LES JANTES

Un système normalisé d'identification des jantes a été adopté à l'échelle internationale.

Les cotes sont généralement données en pouces, 1 pouce équivalant sensiblement à 2,5 cm. Les jantes portent des inscriptions du type : 6 J x 15 H 26. Cela signifie que la largeur intérieure est de 6 pouces, la lettre J désignant une forme spécifique du bord de jante. La lettre H désigne la forme du bourrelet anti-décoincement. Le nombre 26 indique le déport de la jante (distance entre le plan médian de la jante et le plan de fixation de celle-ci au moyeu).

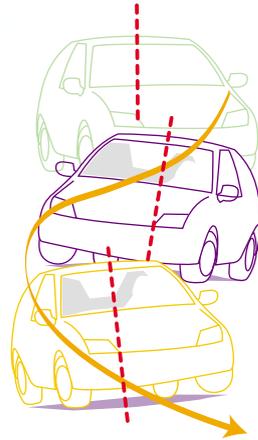


Bourrelet anti-décoincement.



La liaison au sol : contact et stabilité !

Les roues, guidées par la suspension, assurent en permanence le contact au sol des quatre pneumatiques, quels que soient les irrégularités et les mouvements de caisse du véhicule : roulis (mouvement de gauche à droite) ou tangage (mouvement d'avant en arrière)...

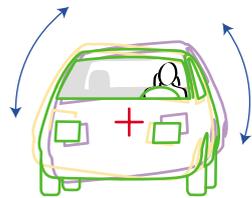


Le lacet

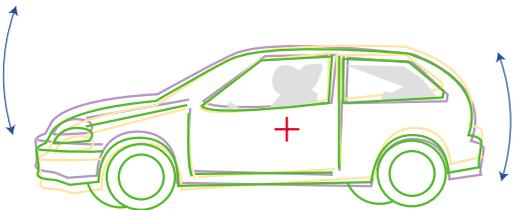
La qualité de contact entre le pneu et le sol détermine la précision du guidage et la capacité de transmission des efforts du véhicule vers la chaussée.

La liaison au sol constitue donc un point essentiel pour le bon fonctionnement des pneus.

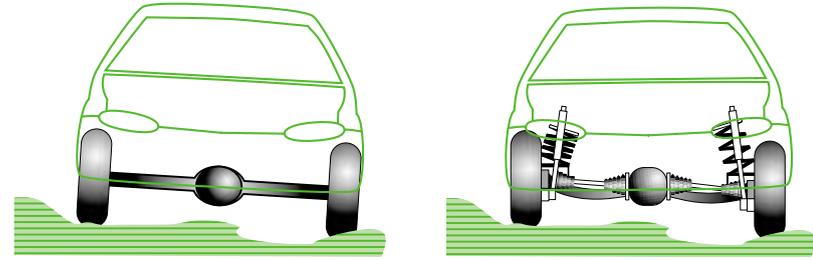
Les systèmes de suspension ont pour rôle le filtrage et l'amortissement des mouvements remontant du sol. Les essieux sont, pour cela, équipés de ressorts complétés par des amortisseurs. À l'origine de la voiture, les essieux étaient rigides



Le roulis



Le tangage



Les roues indépendantes donnent plus de liberté pour régler le fonctionnement du couple pneu / véhicule

et la position des roues par rapport à l'essieu était constante, mais l'ensemble du véhicule devait "encaisser" le passage des obstacles.

Pour éviter cette "réaction en chaîne", les techniciens ont cherché à rendre les roues "indépendantes", c'est-à-dire non solidaires de l'essieu.

L'histoire a égrené de nombreuses solutions, mais l'automobile semble avoir définitivement opté pour 4 roues indépendantes les unes des autres. L'avenir proche verra la généralisation de systèmes de "gestion intelligente" de la liaison au sol (suspensions pilotées par ordinateur, radar capable de détecter les inégalités du sol, etc.), mais les progrès technologiques n'occulent pas le rôle essentiel du pneumatique dans le filtrage des vibrations :

- **Sur un axe vertical** : le pneu est performant dans le filtrage des irrégularités du sol de moyenne dimension (de quelques millimètres à 2 ou 3 cm). Il supplée à la fonction des ressorts de suspension

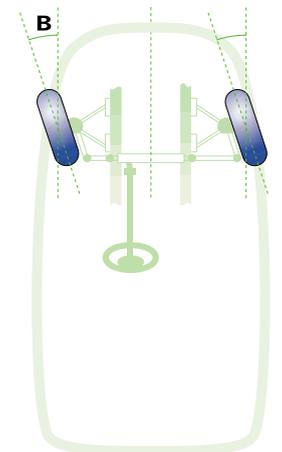
qui ne sont efficaces qu'à basses fréquences et fortes amplitudes.

- **Sur un axe horizontal** : le pneu rencontre, sur les obstacles isolés, des réactions longitudinales de "butage" (raccords, plaques d'égout, petites saignées).

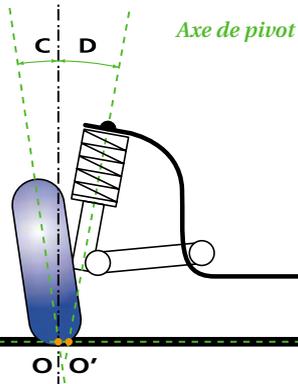
Contact pneu-sol : cinq angles caractéristiques de positionnement

Le braquage aux ordres du volant (B)

Il correspond à la rotation de la roue autour d'un axe vertical résultant de l'action sur le volant.



Pour virer, le volant commande le braquage des roues avant. On exprime sa valeur par l'angle B dit "angle de braquage".



Vue frontale du train avant
 C : angle de carrossage
 D : angle de pivot
 O : centre de l'aire de contact du pneu
 O' : projection de l'axe de pivot
 OO' : déport latéral (généralement proche de zéro)

Le carrossage (C)

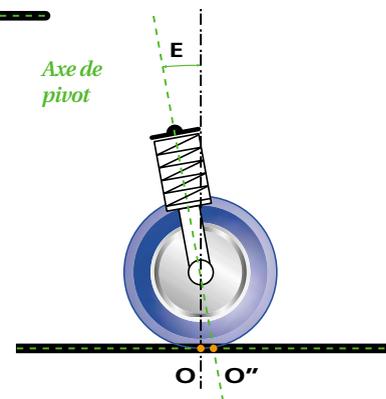
Le carrossage désigne l'inclinaison de la roue par rapport à la verticale. Si les roues convergent vers le bas (cas de la figure), le carrossage est positif. Si elles convergent vers le haut, le carrossage est négatif. Le carrossage est réglé en fonction de caractéristiques propres à chaque véhicule.

L'angle de pivot (D)

Il s'agit de l'angle formé par l'axe de pivot et la verticale, lorsque le véhicule est vu de face. Il facilite la bonne stabilité de la direction en neutralisant les réactions de freinage et les irrégularités de la route.

La chasse (E)

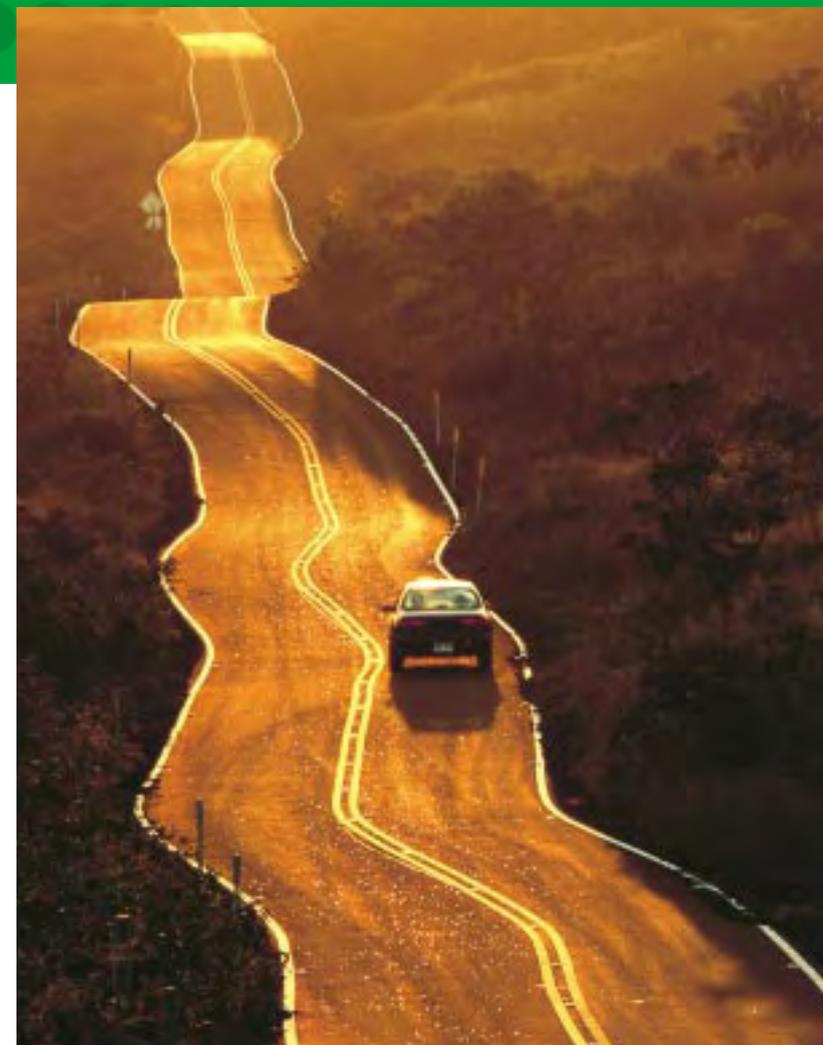
Elle correspond à l'angle compris entre l'axe de pivot et la verticale lorsque la voiture est vue de côté. La chasse est positive quand l'axe de pivotement est incliné vers l'arrière. En roulage, la chasse permet le rappel des roues en ligne droite : c'est l'auto-alignement.



Vue latérale du train avant
 O'' : projection de l'axe de pivot
 O : centre de l'aire de contact du pneu
 E : angle de chasse
 OO'' : déport longitudinal

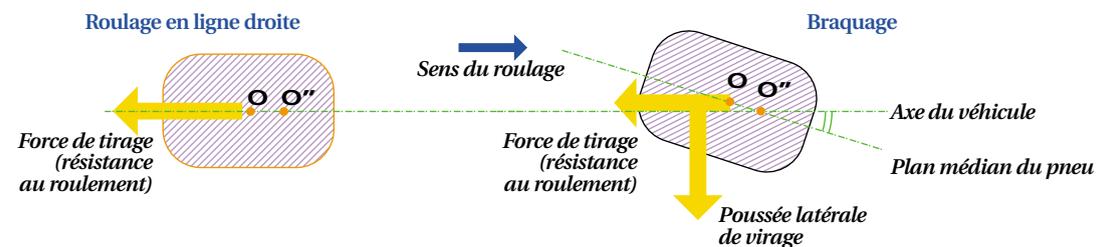
L'auto-alignement

Les angles de pivot et de chasse définissent le point de projection au sol de l'axe de pivotement de la roue. La distance entre le point de pivotement et le centre de l'aire de contact crée dans le contact un couple d'auto-alignement qui ramène la direction de la voiture à un braquage nul. Il s'agit donc d'un facteur important pour la sécurité en cas de relâchement du conducteur.



Pour suivre une trajectoire aussi insolite, les pneus doivent assurer à tout moment un guidage sans défaut.

VUE DES FORCES LONGITUDINALE ET LATÉRALE DANS L'AIRE DE CONTACT.



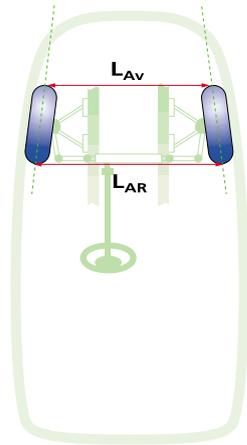
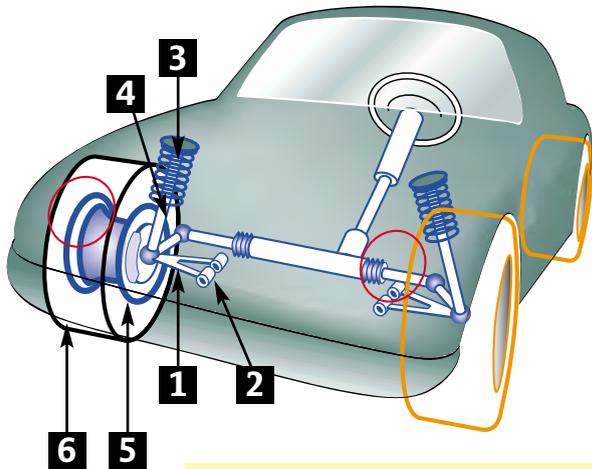
Le plan médian du pneu et l'axe longitudinal du véhicule sont parallèles.

Les 2 forces tirent sur le bras de levier oo'. Il apparaît un couple d'auto-alignement auquel doit s'opposer l'action du conducteur, par ses efforts sur le volant.

Le parallélisme

Le parallélisme désigne en fait l'écart de parallélisme entre les plans médians des deux roues avant. Il peut se traduire, soit par du pincement, comme dans la figure ci-contre, soit, au contraire, par de l'ouverture.

Pour compenser les déformations de la liaison au sol au cours de son utilisation, un "non-parallélisme" est souvent nécessaire à l'état de repos.



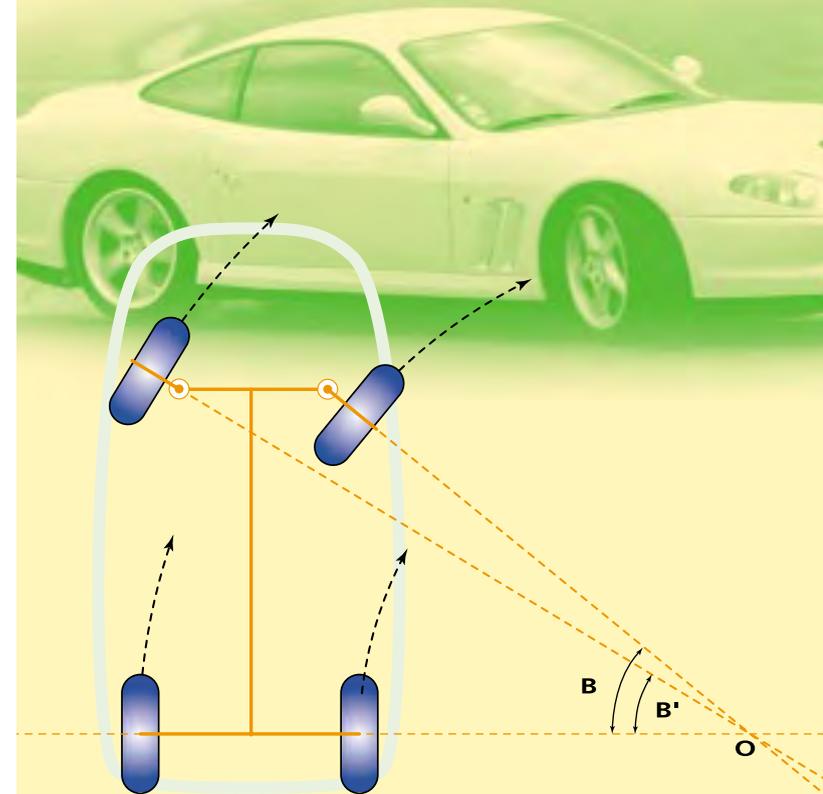
Le parallélisme en théorie et en pratique.
Pincement : $L_{AR} - L_{AV} \approx 1 \text{ à } 2 \text{ cm}$

Remarque : en roulage, les variations d'attitude du véhicule par rapport au sol sont rapides et importantes. Elles ont une action permanente sur des angles que nous venons de définir
Le rôle de la liaison au sol est de conserver la bonne maîtrise de l'attitude du pneu.

UNE CHAÎNE D'ORGANES DE HAUTE TECHNICITÉ.

- 1 - Les bras de liaison : montés sur des pivots, ils assurent et contrôlent les débattements des roues par rapport au châssis.
- 2 - Les articulations anti-vibratoires : elles filtrent les vibrations horizontales.
- 3 - Les ressorts de suspension : ils assurent la flexibilité verticale. Ils sont métalliques ou hydro-pneumatiques .
- 4 - Les amortisseurs : ils atténuent les effets de rebond intempestifs liés à la détente des ressorts de suspension.
- 5 - La roue : elle assure la fixation du pneu et transmet toutes les forces vers la suspension.
- 6 - Le pneu : il réalise, par l'intermédiaire de l'aire de contact, les fonctions de porter, guider, transmettre et amortir.

L'ÉPURE DE JEANTAUD



Pour que les roues directrices avant de la voiture adoptent sans problème les trajectoires qu'elles doivent suivre dans un virage, c'est-à-dire des cercles concentriques, il faut que la direction imprime à chacune une orientation légèrement différente. La roue intérieure doit être braquée davantage que la roue extérieure puisqu'elle doit décrire une circonférence de plus faible rayon.

Au début du XIX^e siècle, Jeantaud a trouvé une solution géométrique d'une grande simplicité qui permet de faire converger les rayons de trajectoire des quatre roues sur un point unique O.

7 Recherche et essais : la quête de la perfection



En 1895, les pneus de l'Éclair se changeaient tous les 170 km. Un "tourisme" de 2001 peut parcourir 100 000 km. Un gigantesque saut qualitatif comparable à ceux de la recherche, des matériaux et des essais, accéléré par l'arrivée des très gros ordinateurs.

Entre ces deux extrêmes, s'inscrit la prodigieuse évolution de la recherche : des années lumières séparent les expérimentations empiriques du début de l'aventure du pneu des études virtuelles d'un pneu sur ordinateur. Grâce aux énormes capacités de calcul actuelles, les chercheurs ont, des décennies durant, observé

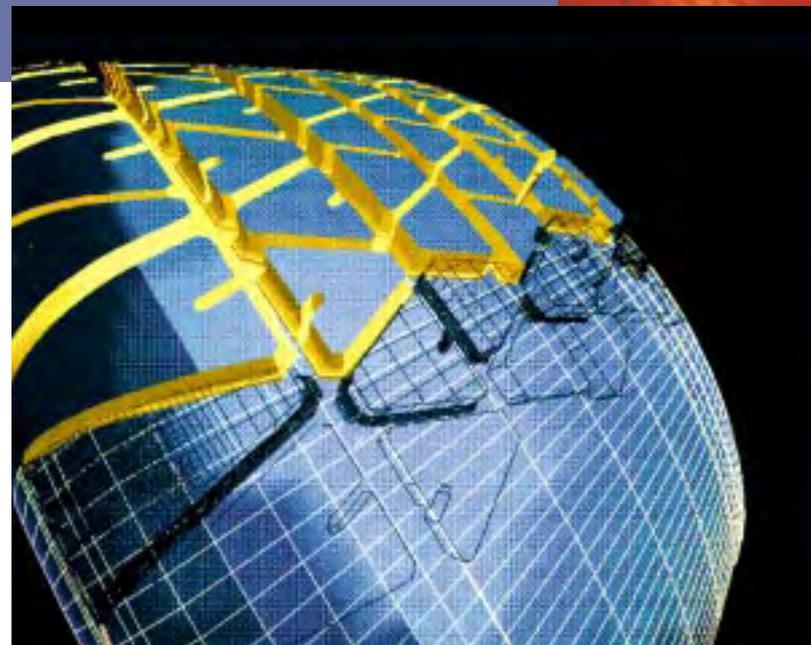


les pneus, analysé leur comportement et essayé d'en comprendre les causes. Objectif : atteindre des performances sans cesse plus élevées dans les domaines les plus variés de la mobilité terrestre.

Un outil prodigieux bouleverse la recherche : la CAO

Pendant longtemps, les chercheurs n'ont pu faire progresser les performances des pneus qu'à partir des acquis de leurs aînés. Si, au fil des années, ils parvenaient assez bien à gagner en sécurité et en durée de vie du pneu, les progrès étaient lents et demandaient d'énormes efforts d'expérimentation...

L'application des lois de la physique butait sur la complexité croissante de systèmes toujours



Création d'une sculpture de bande de roulement. L'écran donne une vision déjà très réaliste de l'aspect final.

plus sophistiqués. La prudence exigeait donc de passer par de nombreux essais de prototypes avant d'envisager une fabrication effective.

Les chercheurs progressaient, sinon à tâtons, du moins par expériences successives : prototype, essais, analyse des résultats, corrections du modèle puis à nouveau, essais... jusqu'à la solution finale satisfaisante. Ce cheminement était long et coûteux et les résultats n'étaient pas fiables à 100 %. Il était impossible, alors, d'envisager l'idée d'un produit "satisfaisant du premier coup".

*Le premier pas vers
l'étude virtuelle...*

Au cours de la seconde moitié du 20^e siècle, des spécialistes de la

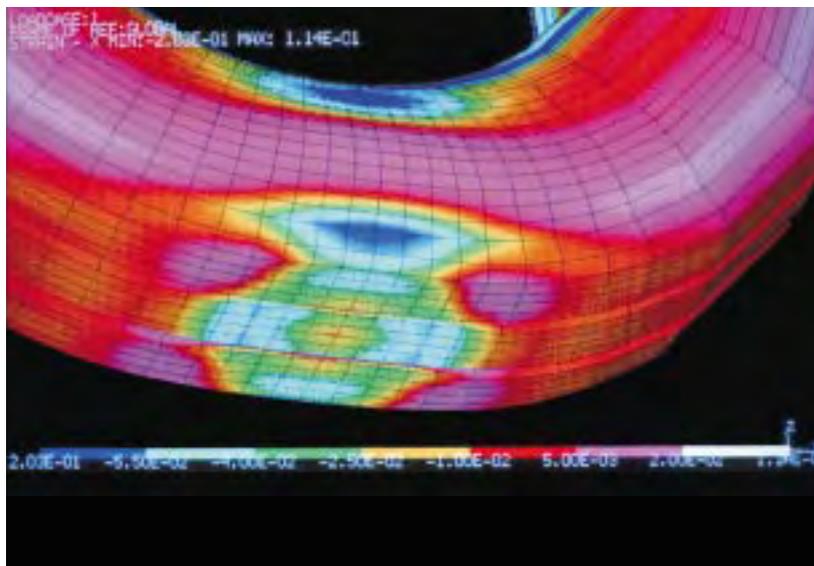
mécanique physique mirent au point une théorie de calcul du comportement de structures de formes et d'agencements complexes : le calcul par éléments finis. Celui-ci reposait sur un découpage virtuel de la structure à étudier en mini-éléments (à l'image d'un mur constitué de briques). On appliquait ensuite les lois de la mécanique, à la fois à leurs composants et à leurs interactions, lors de contact. On put, dès lors, prédire, avec une bonne certitude, la façon dont fonctionnerait telle ou telle construction dans des conditions extrêmes et il devint donc possible de la réaliser d'emblée dans sa forme la plus performante (par exemple, optimiser la résistance au vent des ponts suspendus).

Cette théorie mécanique s'appuyait sur un préalable.

Les déformations devaient être linéaires et de faible amplitude. Or, le caoutchouc est un matériau à très grandes déformations non linéaires.

Ensuite, le découpage en éléments finis doit être fin, ce qui multiplie le nombre d'équations à résoudre simultanément.

Par exemple, la distribution des pressions dans l'aire de contact régit les phénomènes d'adhérence, de comportement, d'usure. Cette image montre la cartographie des pressions de contact du pneu sur le sol, comme si le sol était transparent. En bleu foncé, une zone de pression élevée.

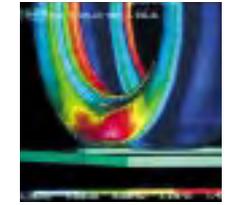
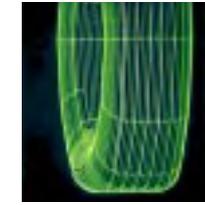
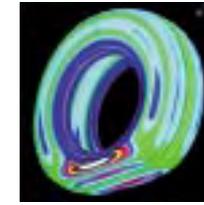


Ainsi, un pneu représente à lui seul un système de plusieurs dizaines de milliers d'équations à recalculer plusieurs centaines de fois afin de prendre en compte les grandes déformations du matériau (ce que l'on nomme la convergence)...

On imagine, alors, la phénoménale puissance de calcul à mettre en œuvre pour mener à bien cette résolution.

1980 : premières applications au pneumatique du calcul par éléments finis

À cette époque, même les ordinateurs les plus puissants mettaient plusieurs dizaines d'heures à résoudre les calculs de déformation d'un pneu. Aujourd'hui, avec



Pression, charge, vitesse, angle de dérive... autant de variables qu'il faut balayer pour déterminer le fonctionnement optimum du pneumatique.

des ordinateurs un million de fois plus puissants, il faut moins d'une heure pour résoudre des problèmes encore plus complexes! (*)

Les années 90 ont connu le développement fulgurant de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Une technique devenue "classique", mais qui a révolutionné les bureaux d'études. Désormais, à partir d'une définition entièrement virtuelle de la constitution interne d'un pneumatique, la CAO fournit une réponse (voire plusieurs) à la multitude de questions que se posent les chercheurs :

- carte des pressions de contact du pneu au sol,
- sollicitation de la carcasse dans les zones de grandes déformations,
- températures de la bande de roulement à forte charge ou à grande vitesse,
- capacité de poussée du pneu dans les courbes,
- confort du pneu lorsqu'il est soumis à des vibrations,
- réduction du bruit de roulement,
- estimation de la résistance au roulement, etc.

L'ingénieur concepteur peut ainsi vérifier les conséquences de ses choix de construction, de dessin et de matériaux dans toutes les performances essentielles de son projet... encore à l'état virtuel !

Un prototype reste nécessaire

Cette phase d'étude, extrêmement riche en exploration de solutions, définit le prototype susceptible de répondre le mieux aux exigences du cahier des charges. Vient ensuite une étape qui demeure incontournable : la réalisation effective de pneumatiques et les tests en conditions réelles. Seuls ces derniers, en vraie grandeur, appréhendent toute la complexité des performances des pneus. Néanmoins, la mise au point d'un nouveau produit, plus performant que son prédécesseur, s'effectue dans des délais deux, trois ou quatre fois plus courts qu'en 1980.

Avec la CAO, les ingénieurs sont sortis du carcan de l'empirisme : elle leur a permis d'aller plus vite et plus loin.

() Dès 1985, Michelin s'est équipé de l'ordinateur le plus puissant du monde à l'époque : le CRAY.*

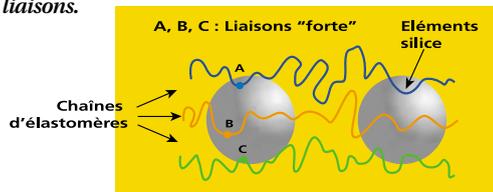
La science des matériaux mise à contribution

La mise en œuvre du caoutchouc dans les pneus passe par une série de technologies de “renforcement”. Parce que ses utilisateurs attendent du pneumatique qu’il dure longtemps, celui-ci a besoin d’être doté d’une gomme résistante. Et s’il ne perd que 5 mm d’épaisseur, en moyenne, pour un parcours de 50 000 km, c’est grâce au renforcement de la gomme

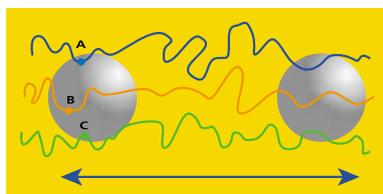
Ces 3 schémas montrent comment la silice est solidement “attachée” aux molécules d’élastomère et pourquoi les sollicitations d’allongement ne perturbent pas ces liaisons.



LIAISON “FORTE”



REPOS



ALLONGEMENT

L'ACTION DU NOIR DE CARBONE ET DE LA SILICE AU CŒUR DU MATÉRIAU

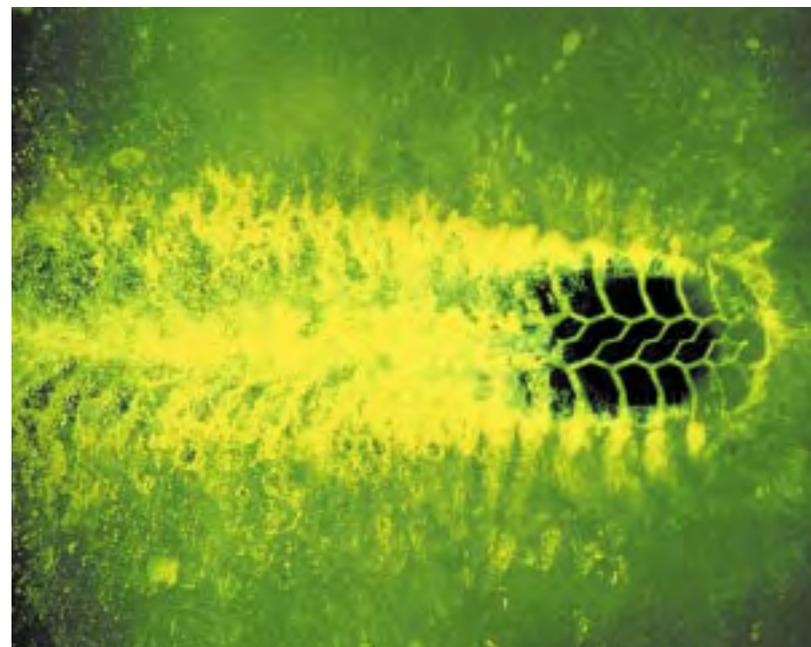
Les interactions des charges de renfort avec les chaînes d'élastomères conditionnent en grande partie les performances du pneu. Même si les recherches sont encore en cours, on sait que les chaînes d'élastomères ont une affinité naturelle avec le noir de carbone. Les molécules composant ces chaînes peuvent se fixer spontanément en de nombreux points à la surface du noir de carbone, sans agent intermédiaire.

Ces liaisons charge / chaîne, dites faibles, autorisent, lors d'une sollicitation à faible fréquence, des glissements de la chaîne d'élastomères sur la charge. Ils engendrent des pertes d'énergie par frottement, qui génèrent à leur tour de la résistance au roulement.

La silice, elle, n'a pas d'interactions naturelles avec les chaînes d'élastomères.

Il est donc nécessaire d'introduire un agent chimique dit “de liaison” afin de créer un lien chimique entre la silice et l'élastomère.

Ces agents de liaisons sont des molécules désignées sous le nom de silanes, dont la mise au point a permis d'utiliser la silice de façon efficace dans les pneus de tourisme. Dans les domaines de sollicitations de haute fréquence, caractéristiques de l'adhérence de la gomme avec le sol, les réactions du mélange “silice” assurent une bonne performance, notamment sur sol froid et humide. De plus, les liaisons fortes entre la silice et l'élastomère améliorent la résistance à l'usure.



Étude hydrodynamique de pneu en 1980. Sur cette photo, prise sous une plaque de verre, l'eau teintée par de la fluorescéine montre comment le pneu, à 80 km/h, résiste à l'hydroplanage.

par des charges très résistantes à l'abrasion, comme le noir de carbone et la silice depuis 1992. **L'introduction du noir de carbone dans les mélanges qui composent le pneumatique, multiplie sa durée de vie par cinq.** Quant à la silice, elle diminue partiellement l'hystérèse du caoutchouc, tout en améliorant la résistance à l'usure.

Du virtuel à un début de réalité : les essais en laboratoire...

Lorsque les études de CAO proposent un produit satisfaisant, celui-ci est matérialisé sous forme d'un prototype très proche du

produit fini. Il est alors soumis aux tests et aux épreuves les plus extrêmes, en laboratoire, afin de valider les performances jusqu'aux limites virtuelles du pneu : capteurs dynamométriques et thermiques, sondes acoustiques, mesures par thermographie infrarouge... Toutes les technologies de contrôle et de mesures sont utilisées et, en matière de sécurité, les essais sur simulateur de “roulage” testent le pneumatique jusqu'à ses limites ultimes, c'est-à-dire la destruction. Le cœur même de la matière est pénétré, examiné, analysé à l'aide de procédés non destructifs : holographie, profilométrie optique, contrôle d'architecture par rayons X, ultrasons...

Sur les bancs d'essais, les pneumatiques d'un manufacturier roulent chaque jour l'équivalent de 25 fois le tour du monde !



L'heure de vérité : les essais sur véhicule

Reste à franchir le dernier pas, du laboratoire à la pratique. Les essais sur véhicules demeurent une étape importante qui complète les mesures scientifiques en introduisant deux paramètres fondamentaux : la réalité du terrain et le jugement humain.

Sur la route, l'association "pneu / véhicule / conducteur" révèle d'autres secrets en évaluant le comportement et le confort du pneumatique via l'appréciation du conducteur (essais sur circuits reproduisant des situations typiques). Le pneumatique est

Les pneus sont également testés sur sols routiers. Des véhicules laboratoire, équipés d'une cinquième roue reliée à une instrumentation sophistiquée, effectuent des mesures analytiques d'adhérence.



LES CENTRES DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT MICHELIN

Près de Clermont-Ferrand, Michelin possède 35 km de circuits, sur 500 hectares au sein de la zone industrielle de Ladoux. Ils réunissent les principaux types de revêtements de sols et de configurations couramment rencontrés et permettent à une flotte de 600 véhicules d'évoluer quotidiennement.

Michelin exploite également d'autres centres d'essais à l'étranger. Le Centre de Laurens aux États-Unis (Caroline du Sud) étudie les problèmes spécifiques liés au marché nord-américain. Le Centre d'Almería, dans le sud de l'Espagne, offre une large variété de sols naturels et les conditions climatiques des régions chaudes (il est utilisé, notamment, pour tester les pneus géants des engins de génie civil). Le centre d'Otha, au Japon, étudie et met au point les pneus destinés aux marchés d'Asie.

poussé jusqu'à ses limites (vitesse, charge, pression...) pour tester ses réponses dans toutes les situations (porter, transmettre, guider, amortir, durer...). Les essayeurs partent parfois au bout du monde pour mettre les prototypes à l'épreuve des pistes sahariennes ou des routes glacées du Grand Nord. Reconnu "bon pour le service", le

pneumatique est enfin lancé en grande série sur le marché. Mais il reste "suivi"* de près : enquêtes détaillées auprès de flottes de véhicules, observations des revendeurs et des utilisateurs, analyse des enveloppes avant rechapage, sont autant de précieuses données dont l'exploitation statistique et prépare ainsi les futurs pneumatiques.

** Pour avoir cette connaissance parfaite des pneus en utilisation, Michelin assure le suivi régulier de 80 000 véhicules sur tous les continents.*

8

Fabrication du pneu : une révolution en cache une autre



L'extrême complexité du pneumatique impose une fabrication longue et minutieuse avant cuisson. L'obtention d'une qualité parfaite et constante est à ce prix. Manuelle et grande consommatrice d'espace, la production s'automatise alors qu'arrivent de nouvelles machines plus compactes et souples.

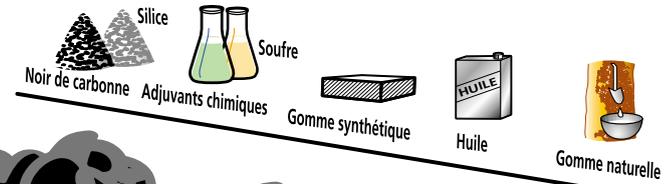
La préparation des composants : un mélange pour chaque usage...

La composition d'un mélange est étroitement adaptée à l'usage prévu pour le pneu et les formules sont élaborées selon les propriétés spécifiques désirées. À chaque phase du procédé, le travail du

fabricant s'avère particulièrement minutieux : contrôles dimensionnels, pesées, mesures thermiques sont les garants d'une qualité suivie.

Les différents produits entrant dans la composition de la gomme souhaitée sont d'abord intime-

LES COMPOSANTS DE LA GOMME



CÂBLES TEXTILE

Retordage
Câblage

MÉLANGEAGE

CÂBLES ACIER

Tréfilage
Câblage

ASSEMBLAGE

Gomme mince

Nappe de carcasse

Tringles

Gommes profilées de flancs

Conformation

2 nappes de ceinture acier

Bande de roulement

CONFORMATION

CUISSON

ment malaxés dans un puissant mélangeur, d'une capacité de 200 litres. Le noir de carbone est incorporé à ce stade. Le travail mécanique fourni pour le disperser dans ce milieu très visqueux conduit à une forte élévation de

température. Peu à peu, le mélange se ramollit et acquiert la viscosité escomptée.

Après un temps de repos, on introduit sur un appareil d'homogénéisation le soufre et les autres additifs

favorisant la vulcanisation. Le mélange obtenu est présenté sous forme de plaque.

Des nappes de câbles découpées en lés

Ces nappes sont constituées de câbles disposés parallèlement et de façon jointive, enrobés entre deux couches de gomme sur une machine à calandrer.

Ces nappes sont ensuite découpées en lés, selon un angle déterminé en fonction de leur utilisation dans la construction du pneu.

Les autres composants

Parallèlement, d'autres machines confectionnent des profilés, les renforts de talons, les gommes de flancs, les bandes de roulement (encore lisses)...

Ces profilés sont fabriqués avec une précision de l'ordre de 0,1 mm, par extrusion ou par calandrage entre des rouleaux comportant en creux le profil désiré.

Sur un tambour rotatif plat, le premier composant, la gomme d'étanchéité du pneu, est posé, puis enroulé.



L'assemblage : chaque composant à sa place !

L'assemblage, appelé également confection, a pour but d'empiler à plat les différents composants sur un tambour cylindrique, dans un ordre déterminé et avec une grande précision.

Le collant à cru, liant naturel de chacun d'eux, assure leur cohésion. Après chaque pose, les gommes sont rapprochées et rouletées pour empêcher toute inclusion d'air et former un tout parfaitement homogène.

Le premier produit mis en place est la gomme intérieure, étanche (pneumatiques tubeless). La nappe de carcasse est disposée ensuite transversalement. Les tringles sont positionnées de chaque côté de la nappe. Enfin, différentes gommes de bourrage et de protection des flancs sont posées.



La conformation : le futur pneu prend la forme d'un anneau

Grâce à l'opération de conformation, on passe d'une forme cylindrique à une forme d'anneau torique, proche de celle du futur pneumatique. Pour ce faire, les tringles sont rapprochées l'une de l'autre, tout en soumettant la partie centrale à un gonflage qui



tend et bombe les couches de gomme, dans la limite de la longueur des câbles des nappes. Compte tenu des fortes déformations imposées par cette étape, l'adhésion entre les éléments assemblés doit être assurée.

Il faut ensuite enrouler sur cette forme torique les nappes de ceinture du sommet et la bande de roulement toujours lisse. Divers profilés complémentaires sont également posés. On obtient ce que l'on nomme un bandage.

La cuisson : pour une parfaite cohésion de l'ensemble

Jusqu'à-là, le pneumatique n'a pas été chauffé, de manière à conserver le caractère plastique des différents mélanges de gommes utilisés dans sa construction. Lors de cette dernière étape, il est placé dans un moule chauffé à l'eau surchauffée et à la vapeur.

L'eau circule de façon continue dans une membrane. En se gonflant, elle applique le pneumatique contre les parois du moule pour imprimer les sculptures et les marques externes. La cuisson dure une dizaine de minutes à une température de l'ordre de 150° C.

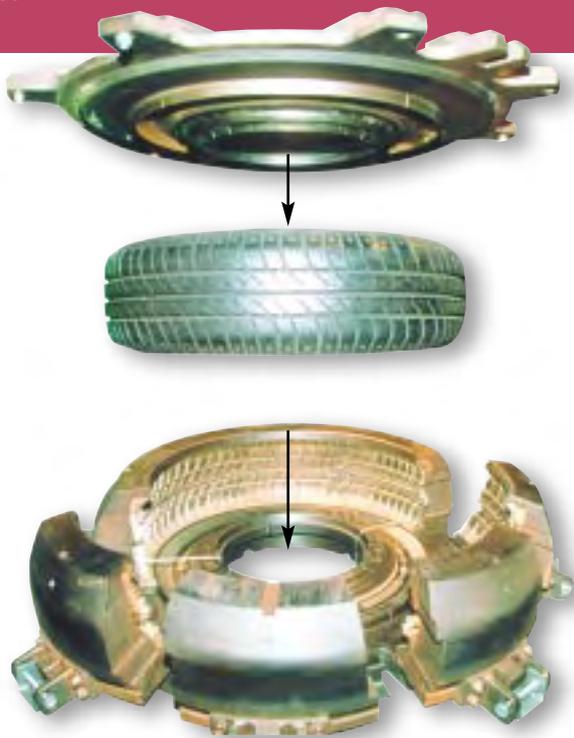
C'est alors que la cohésion de l'ensemble est réalisée par la vulcanisation.



Photo de gauche : ce tambour rotatif gonflable donne à la carcasse sa forme torique. À ce stade, les 2 nappes de ceinture sont enroulées sur le diamètre final.

Un mélange plastique devenu élastique. Avant la vulcanisation, la matière à l'état plastique était molle et déformable comme de la pâte à modeler. Travaillée, elle gardait en partie la forme qui lui était imposée. Après la vulcanisation, cette matière, désormais élastique, retrouve systématiquement sa forme initiale.

L'intérieur d'un moule



Un moule se compose d'un grand nombre de pièces mobiles permettant soit d'introduire l'ébauche crue du pneu avant cuisson, soit de l'extraire après vulcanisation.

En reliant les molécules de caoutchouc entre elles, les molécules de soufre les empêchent de se séparer. Le caoutchouc perd ainsi son caractère plastique et, selon le degré de vulcanisation, acquiert l'élasticité, fermeté et résistance à l'abrasion. L'ensemble de ces phénomènes, générés par la cuisson, assure la parfaite cohésion entre les mélanges de gomme et les renforts métalliques et textiles.

Ces différentes opérations montrent combien toutes les zones du pneumatique sont dépendantes les unes des autres et prouvent à quel point, lors de sa conception, la plus petite modification d'un paramètre peut entraîner des conséquences pour l'ensemble.

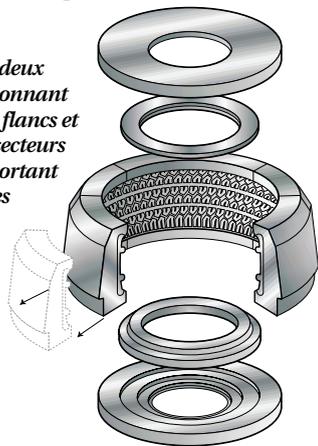
Le moule donne au pneu son visage définitif

Essentiel dans la chaîne de fabrication, le moule est une pièce maîtresse qui donne au pneumatique sa géométrie et son aspect définitif, tout en transmettant les calories nécessaires à la vulcanisation.

En outre, il lui faut assurer, avec les autres organes mécaniques de la presse de cuisson, les milliers de cycles d'ouverture et de fermeture occasionnés par des cycles de cuisson inférieurs à 15 minutes. La partie du moule spécialisée pour la sculpture est faite d'éléments d'aluminium coulé.

La complexité de leur conception nécessite des moyens sophistiqués : définition de l'outillage de fonderie par modélisation en 3 dimensions, données de conception transposées à la fabrication par machines d'usinage à commande numérique, ...

Le schéma visualise les deux couronnes donnant la forme des flancs et six des huit secteurs circulaires portant les garnitures de moulage de la sculpture.



Changer de siècle

Au cours du XX^e siècle, l'industrie automobile a connu un essor considérable. Elle est devenue progressivement un bien de grande consommation.

L'industrie traditionnelle du pneumatique s'est développée en parallèle. Les manufacturiers ont tout naturellement construit des unités de production de taille importante, capables de fabriquer de grandes quantités de pneus au meilleur coût. Cette approche nécessitait des investissements lourds et peu modulaires.

Au fil des années, le marché de l'automobile s'est considérablement diversifié pour répondre aux attentes de plus en plus spécifiques des consommateurs. Ces évolutions ont amené les manufacturiers à rechercher, en complémentarité des grandes chaînes de production de pneumatiques, des outils totalement nouveaux capables de réaliser industriellement du "sur mesure".

Le C3M Michelin : un outil révolutionnaire

L'utilisation de technologies novatrices a permis de concevoir un procédé très compact. Un module de fabrication occupe une surface au sol de 30 mètres carrés et se transporte sur deux palettes avions.

Le C3M fonctionne uniquement à l'électricité. Sa consommation d'énergie est de 50% inférieure au procédé traditionnel. Celui-ci compte sept grandes étapes de fabrication alors que le C3M les regroupe en une seule, supprimant ainsi les stocks intermédiaires. Imaginé il y a une quinzaine d'années, ce nouveau procédé a fait ses preuves. Plus de 20 millions de pneus fabriqués sur cet outil révolutionnaire roulent à travers le monde.

Les atouts du C3M

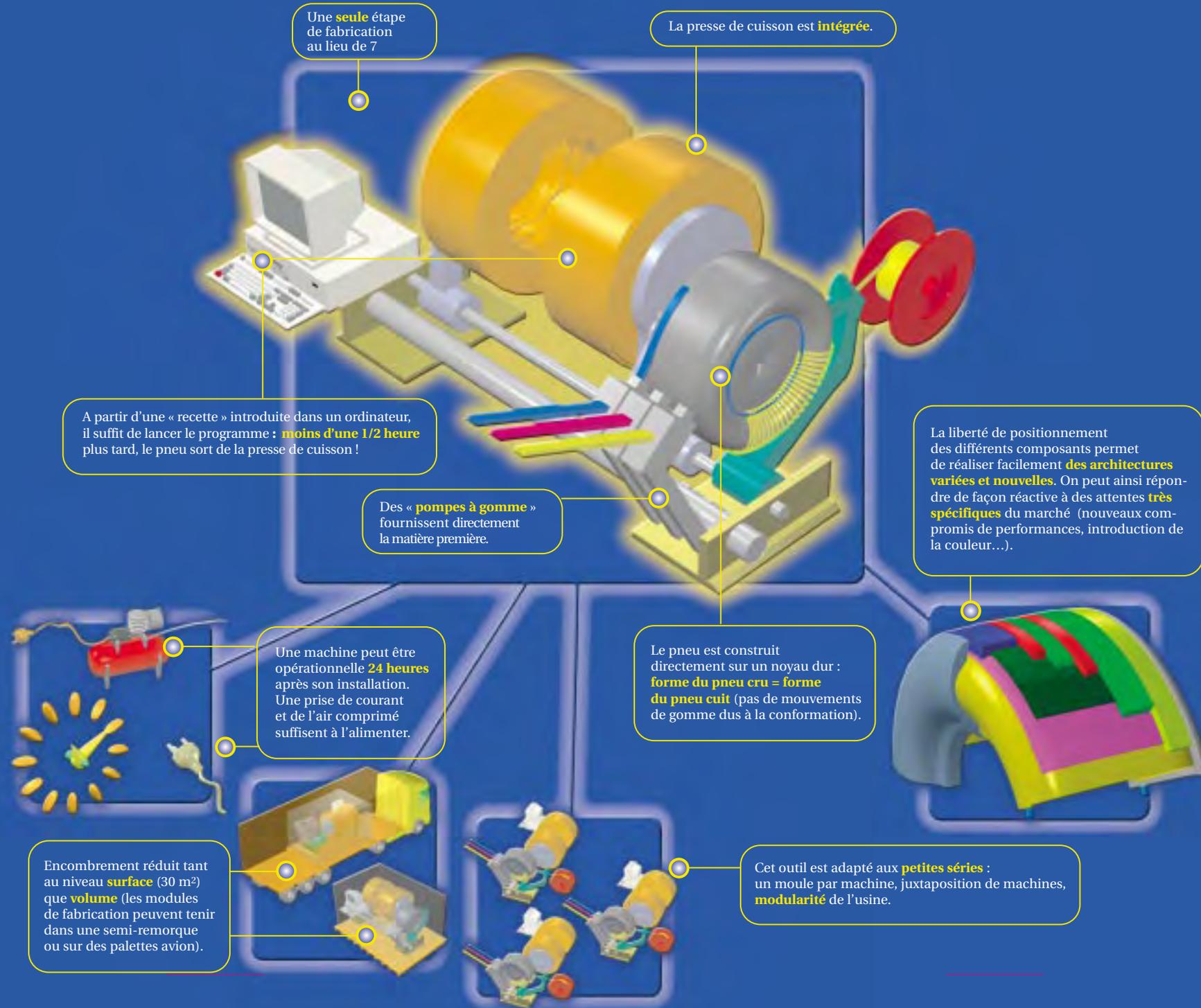
Le C3M joue la vitesse. Les machines se déplacent facilement et peuvent démarrer 24 heures après leur arrivée sur un site industriel. Le temps de conception et de mise au point des pneus est considérablement raccourci.

Le C3M permet de réaliser des pneumatiques innovants. On peut positionner avec une très grande précision des matériaux élémentaires (câbles, mélanges de gomme).

Le C3M peut fabriquer des petites séries à des coûts de revient compétitifs. Et sur une même machine, on peut fabriquer des pneus très différents.

Cette nouvelle technologie trouve tout naturellement sa place sur les marchés du très haut de gamme. Elle permet de répondre aux exigences spécifiques (techniques et économiques) des clients.

LE C3M : LE PROCÉDÉ ET SES ATOUTS



9 Le pneu dans le monde : un fort potentiel de croissance



La longévité croissante de pneus toujours plus radialisés et l'amélioration des réseaux routiers ont rendu les ventes de pneus quantitativement stables pour les marchés de renouvellement en Amérique du Nord, en Europe et au Japon .

Mais, qualitativement, c'est l'inverse ! Le nombre des dimensions explose, suivant en cela la diversification croissante des véhicules, le développement du haut de gamme et le besoin de personnalisation dans les pays riches.

Quant au reste du monde, il recèle encore un formidable potentiel de croissance...



L'émergence de nouveaux marchés comme l'Europe de l'Est, l'Asie et l'Amérique Latine ouvre de nouveaux débouchés. Les grands manufacturiers s'y installent, non seulement pour répondre à une demande croissante, mais aussi pour suivre les constructeurs automobiles et être présents dès la première monte, dans le pays d'origine.

Reste donc aux grands manufacturiers à proposer les bons produits attendus par les consommateurs, ce qui passe, à l'évidence, par une très grande diversification de leurs productions.

Mondialisation : une multiplicité de familles de pneus

En 2000, le marché mondial atteint le milliard de pneus par an. Les ventes (en chiffre d'affaires) sont réalisées :



Un poids lourd roule en moyenne 10 fois plus qu'une voiture en un an. Ses pneus durent 10 fois plus et leur poids représente 20 fois celui des pneus sur une voiture.

- pour 60 % auprès des véhicules de tourisme et des camionnettes,
- pour 25 % auprès des poids lourds, alors que le parc "camions" ne représente que 1/40^e du parc total. Le tonnage annuel de pneus pour l'ensemble des poids lourds atteint environ la moitié de celui des voitures,
- pour 5,8 % auprès des engins de génie civil,
- pour 4,3 % auprès des deux roues (motos, vélos),
- 3,5 % auprès des véhicules agricoles et des avions.

Trois groupes possèdent 50 % des usines de production de pneus dans le monde

Le secteur est déjà fortement concentré, puisque trois groupes assurent 60 % de la production mondiale. Il est probable, du fait des investissements énormes que nécessite l'évolution des technologies, que le phénomène se poursuivra encore.

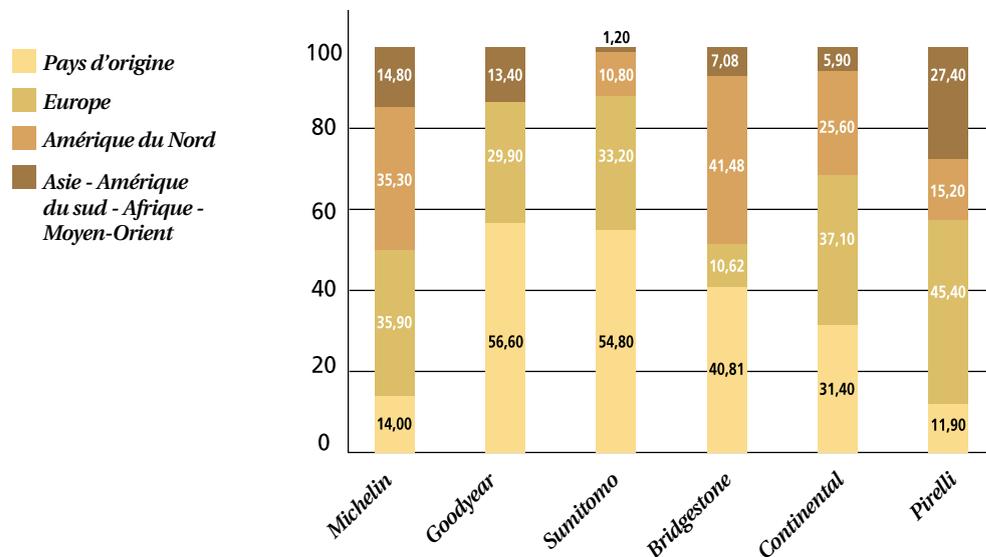
En 2000, le trio de tête était constitué du français Michelin, du japonais Bridgestone et de l'américain Goodyear, associé avec Dunlop.

Ces fabricants représentent des groupes mondiaux détenteurs de

nombreuses marques autrefois indépendantes. Ils sont propriétaires, au total, de plus de la moitié des usines de production de pneus dans le monde.

L'Europe reste un pôle très fort dans le domaine des pneumatiques avec d'autres fabricants de renom comme Pirelli et Continental.

IMPLANTATION EN 2000 DES PRINCIPAUX PNEUMATICIENS SUR LES MARCHÉS MONDIAUX (EN % DU CA).

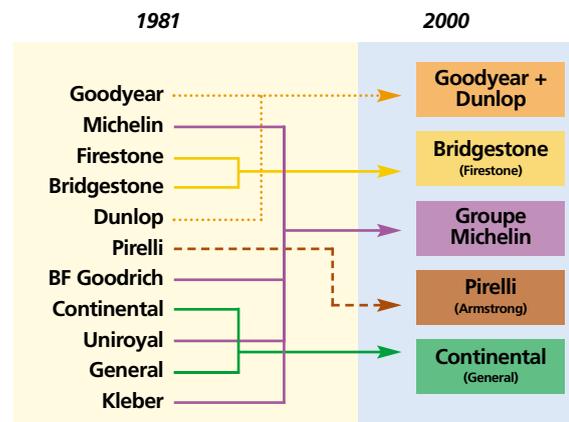


1 milliard de pneus
produits chaque année

La production de pneus est intimement liée à la vente de véhicules, c'est une évidence, mais les chiffres ne progressent pas mécaniquement : chaque année, 49 millions de véhicules légers et 1 milliard de pneumatiques sont produits dans le monde...

- 5 % des pneus sont destinés aux poids lourds,
- les 95 % restants sont répartis entre la première monte et le remplacement.

La première monte correspond à l'équipement des véhicules neufs. Le calcul est donc simple, 5 pneus par voiture pour un total de 49 millions, soit 245 millions.



Les onze principaux pneumaticiens en 1981 et la recomposition des forces en 2000.

Le reste, 705 millions, sont achetés pour le renouvellement des pneus des véhicules en circulation. Le parc mondial étant composé de 600 millions de véhicules, il s'achète donc, pour le remplacement, 1,2 pneu par an et par véhicule. En moyenne, les automobilistes changent leurs 4 pneus tous les 3,3 ans ; soit environ tous les 30 000 kilomètres pour un train complet.

Des demandes de plus en plus spécifiques...

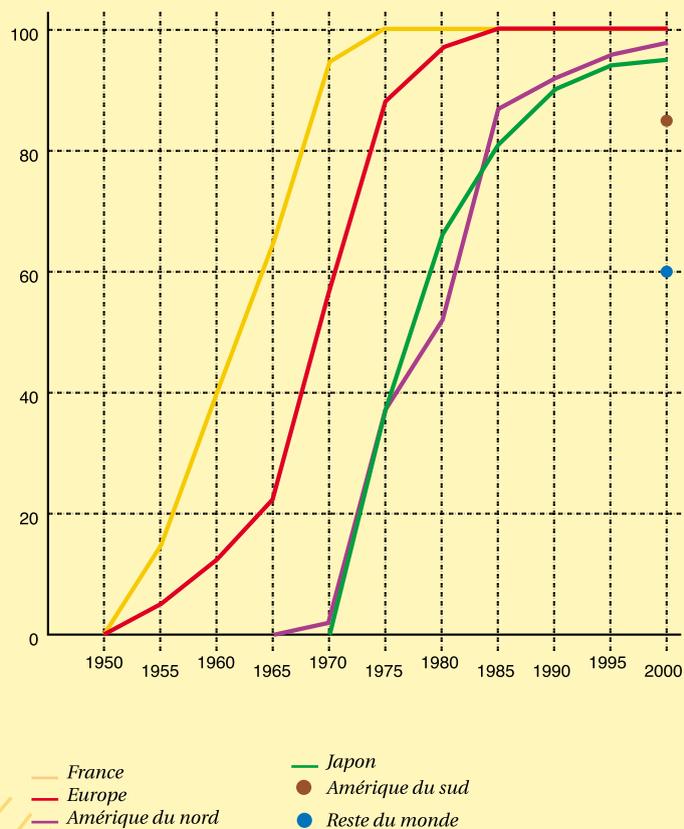
Les marchés d'Europe et d'Amérique du Nord se caractérisent par la grande variété des modèles de véhicules à équiper. Chaque constructeur automobile a ses exigences et souhaite disposer de pneus spécifiques. Le marché du remplacement suit cette tendance avec une variété de dimensions de pneus toujours croissante.

La première monte correspond à l'équipement initial du véhicule dans son usine de production. Tous les composants, dont les pneumatiques, font l'objet d'une sévère procédure d'homologation technique. Pour gagner ces homologations, les grands manufacturiers développent des technologies de pointe. Ils sont d'ailleurs convaincus que



LA RADIALISATION PLANÉTAIRE DE 1950 À 2000

Les atouts exceptionnels du Radial : une durée de vie triplée, une tenue de route inégalable, une faible résistance au roulement lui ont permis de conquérir les clients du monde entier en 3 décennies. Aujourd'hui, c'est le standard universel - quel sera le successeur de ce pneu dont les performances restent jusque-là inégalées ?



(Pneumatiques de tourisme en première monte et remplacement)

l'avenir se situe dans une démarche de valorisation des produits, seule capable de satisfaire les clients les plus exigeants.

Les constructeurs automobiles attendent des pneus verts qui consomment moins et des pneus run flat capables de rouler à pression faible ou nulle après crevaisson.

Les "grands" disposent d'atouts réels : ils peuvent gagner les homologations de la première monte et fidéliser le client lors de l'achat de remplacement. En revanche, sur les pneus les plus courants, ils sont fortement concurrencés par les productions de petits manu-

facturiers qui ne sont pas tenus d'offrir, faute de notoriété à défendre, une gamme aussi complète et une qualité aussi irréprochable.

À titre d'exemple, Michelin produit 6 000 types de pneus tourisme différents, mais réalise 80 % de son chiffre d'affaires avec 1 000 d'entre eux. Pour seulement 20 % du chiffre d'affaires, le fabricant doit produire 5 000 pneus différents, souvent en petites séries. Le problème est d'autant plus complexe que la durée de vie commerciale du produit est passée de 10 ans et plus à environ 5 ans pour les gammes de remplacement.

L'automobile est un produit en évolution permanente. Fournir les équipements de pneus en première monte est donc extrêmement stimulant pour la qualité et l'innovation chez un pneumaticien.



LES PNEUS CONCEPT

Derrière le terme "concept" se cachent plusieurs notions.

Il y a la notion de concept technologique dans lequel le pneu est repensé dans sa globalité, comme ce fut le cas pour le pneu Radial ou encore le PAX System.

Les constructeurs utilisent quant à eux l'expression "concept-car" pour tous les projets d'avant-garde qui sont, par exemple, présentés au public lors des grands salons automobiles.

Souvent des "pneus-concepts" y sont associés. Même si ces pneumatiques sont fonctionnels, il s'agit aussi d'exercices de "design". Ils constituent un outil particulièrement intéressant pour la recherche des manufacturiers en stimulant la créativité.

Enfin, il existe des pneus réalisés spécialement pour vous, comme, par exemple, les pneus couleurs.

Grâce au e-commerce, les clients ont désormais la possibilité de

créer et commander en ligne des pneus personnalisés en fonction de leurs goûts. Une innovation proposée par la marque BFGoodrich.



Nouvelles donnes

Des marchés d'ordre quantitatif se développent dans des pays qui accèdent à un meilleur pouvoir d'achat et pour lesquels tous les grands groupes ont une stratégie de conquête.

Afin de répondre rapidement à la demande, notamment en Amérique latine ou en Europe de



l'Est, les grands manufacturiers optent pour la localisation auprès des clients avec le rachat de producteurs locaux.

Parallèlement, progressent des marchés de type "qualitatif" qui répondent au désir de certains usagers de posséder une voiture personnalisée selon leurs envies. Cette tendance actuelle s'appelle le "tuning".

"Tuner" son véhicule, c'est le transformer afin de posséder un modèle en exclusivité puisque les modifications apportées en font une voiture unique.



La base d'un bon "tuning" prévoit obligatoirement des jantes larges en alliage léger et des pneumatiques taille basse...

Le "tuning" est plus qu'un simple phénomène de mode, il devient mature et sophistiqué, au point d'influencer parfois les constructeurs automobiles.

Dans cette discipline qui accorde toute son attention aux aspects techniques, le pneumatique joue un rôle particulièrement important. Il contribue à améliorer le look du véhicule et autorise des performances à la hausse.

Pour répondre aux attentes, les dimensions de transformation connaissent une croissance exceptionnelle dont le rythme annuel moyen est de 30 %.



Compétitions : vitrine et terrain d'essais pour les manufacturiers

Les plus grands manufacturiers s'engagent chaque année dans la majeure partie des disciplines de sport mécanique : vitrine idéale pour démontrer la supériorité de leurs innovations et de leurs solutions face à celles de leurs concurrents.

Le pneu étant un élément essentiel de la performance des véhicules et de la victoire, un parcours réussi en compétition offre aux manufacturiers une formidable reconnaissance des professionnels et du grand public et une identité dynamique.



Exploit : dès son 4^e Grand Prix en 2001, Michelin l'emportait.



En la matière, le palmarès de Michelin est exceptionnel et connu de tous les passionnés des sports mécaniques. Son retour en Formule 1 en 2001 a donc été perçu comme un événement considérable dans le monde du sport automobile. Après y avoir imposé la technologie radiale dans les années 70 et 80, cette présence dans la Formule 1 constitue pour le manufacturier une occasion de renforcer ses positions dans le monde et de resserrer les liens avec ses clients constructeurs.

MICHELIN PALMARES F1 (1977 - 1984)

> 1977

Arrivée en F1 avec le premier pneu Radial F1.

> 1979

Michelin vainqueur des championnats Pilotes et Constructeurs.

> 1983

Vainqueur du championnat Pilotes.

> 1984

Vainqueur des championnats Pilotes et Constructeurs.

> En 7 années : 52 pôles, 59 victoires, 3 titres Pilotes, 2 titres Constructeurs.



Les autres disciplines sont également très stimulantes pour l'innovation technique.

- Le Championnat du Monde des Rallyes, édition 2001 : Michelin et Peugeot champions.

Pour Michelin, ce nouveau succès porte son record de titres mondiaux à 31 (16 titres de Constructeurs et 15 de Pilotes) depuis la création du Championnat en 1973.

- Les 24 heures du Mans comptent parmi les épreuves de sport mécanique les plus suivies. Michelin y a récolté de nombreux trophées sans discontinuer, preuve de l'exceptionnelle endurance de ses pneus.

- Enfin, les rallyes africains dans lesquels les manufacturiers développent des pneus capables



24 heures du Mans

de supporter des sollicitations très dures sur des pistes très "casantes". Michelin participe au Paris-Dakar depuis sa création en 1978 avec une réussite qui ne se dément pas.

MICHELIN PALMARES 2001

> Retour de Michelin en F1 Sur 17 Grands Prix, 11 podiums pour Michelin, dont 4 places de 1^{er}.

> Championnat du Monde des Rallyes. Michelin champion en catégorie Constructeurs.

> 24 heures du Mans. Podium Scratch, Michelin 1^{er} et 2^e Prototypes, Michelin aux trois premières places.

> Dakar 2001. Michelin 3 fois 1^{er} (auto, moto et camion)

10 Prenez soin de vos pneus, ils vous le rendront au centuple...



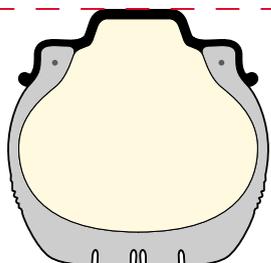
Mal entretenu, un pneu se dégrade très vite. Quelques règles à connaître, un suivi régulier et des interventions simples, permettent de le garder en pleine forme, très longtemps.

Les 5 grandes règles d'une bonne vigilance

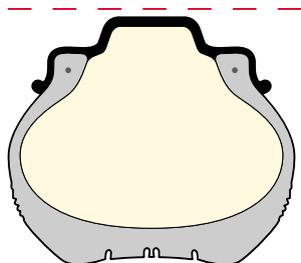
1 - Surveiller la pression

En première monte, la pression est réglée pour optimiser les performances du pneu sur le véhicule. Or, un pneu perd régulièrement de l'air : pensez à contrôler la pression tous les mois (sans oublier la roue de secours). Quelques modèles de voitures, parmi les plus récents, sont équipés de capteurs et d'émetteurs installés sur chaque roue et d'un récepteur qui affiche la pression en permanence et signale un éventuel passage sous le seuil de sécurité.

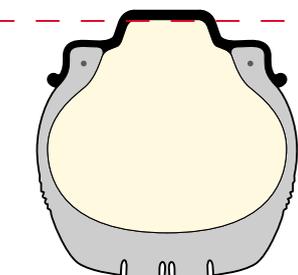
Le juste gonflage



Pneu correctement gonflé



Pneu sous-gonflé



Pneu sur-gonflé

LES PNEUS SPÉCIAUX POUR CAMPING-CAR

Les camping-cars sont fréquemment exposés à la surcharge imposée par les usagers. Pour pallier à cela, il existe des gammes de pneus spécifiques, renforcés

("reinforced") et acceptant un gonflage à des pressions supérieures à la moyenne. Ces pneumatiques sont également aptes à résister à des températures élevées et aux longues distances.

De toutes façons, il est vivement recommandé au conducteur de camping-car de ne pas surcharger son véhicule et d'équilibrer les charges sur les essieux en évitant le fréquent porte-à-faux sur l'arrière.



Pour les voitures ne comportant pas encore ce système embarqué, la vérification de la pression s'effectue à "froid" - soit une heure après l'arrêt du véhicule ou, au plus, après 3 km parcourus à faible vitesse. Quand la vérification est faite sur pneu "chaud", la pression est plus élevée, jusqu'à 0,3 bars au-dessus de la pression préconisée à froid. Il s'agit d'un phénomène normal et c'est pourquoi il ne faut jamais dégonfler un pneu qui vient de rouler, sous prétexte qu'il serait sur-gonflé.

Lorsque la pression de gonflage est insuffisante, les flancs du pneu travaillent anormalement.

Résultats : une fatigue excessive de

la carcasse, une élévation de la température et une usure anormale... Le pneu risque alors de subir des dommages irréversibles, même si sa pression a été ramenée par la suite à un niveau correct. Le risque majeur étant évidemment l'éclatement d'un pneu en cours de route et la perte de maîtrise du véhicule par son conducteur. Les statistiques de l'ASFA (regroupant les sociétés autoroutières de France) des trois dernières années montrent qu'un accident mortel sur douze a pour origine le sous-gonflage.



Le sous-gonflage est dangereux en toutes circonstances :

- il rend le véhicule moins stable et moins précis,
- il affaiblit le pneu qui chauffe à vitesse élevée et qui, si la pression est basse, va éventuellement jusqu'à la dislocation,
- il peut provoquer le décrochage d'avec la jante et la perte de contrôle du véhicule.

À l'opposé, un sur-gonflage risque de poser des problèmes de stabilité car le contact du pneu avec le sol se trouve diminué.

Autre obligation : l'écart de pression entre essieu avant et essieu arrière, nécessaire à l'équilibre dynamique du véhicule, doit être scrupuleusement respecté.

Il suffit, pour connaître les valeurs de gonflage avec précision, de consulter l'étiquette constructeur à bord du véhicule ou les tableaux de gonflage disponibles chez tous les professionnels de l'automobile.

À noter : **le bouchon de valve**, qui semble très secondaire, **est un élément essentiel de l'étanchéité du pneu**. Il ne faut jamais oublier de le remettre en place après vérification de la pression et de sa parfaite propreté intérieure.

Utilisations particulières

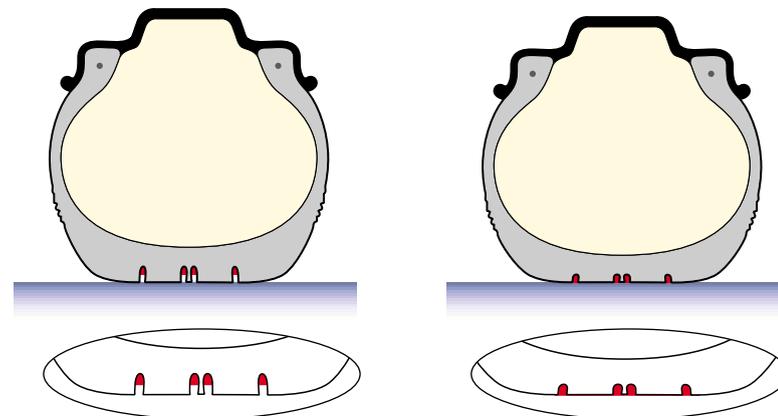
- Si le véhicule effectue un long trajet à vitesse soutenue ou si sa charge est particulièrement élevée, il est conseillé de majorer la pression des pneus de 0,2 à 0,3

bars, sans oublier de dégonfler après ce type d'usage.

- Lorsque la voiture tracte une caravane, un bateau... ne jamais oublier que le poids de la remorque accroît également la charge du véhicule. Il faut donc augmenter la pression des pneus arrière du véhicule en se conformant aux indications des tableaux de gonflage (de l'ordre de 0,3 bars).

2 - Veiller au bon équilibrage

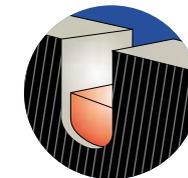
L'ensemble roue-pneumatique doit "tourner parfaitement rond" autour de son axe. S'il présente une petite surcharge locale (un balourd), la roue sera soumise, à certains régimes, à de très fortes vibrations qui se répercutent dans la direction, détériorent les articulations de la suspension, affectent la tenue de route et l'agrément de conduite.



Cette vérification, lorsque la roue est en rotation, est effectuée par un professionnel disposant du matériel nécessaire. Les balourds sont ainsi repérés et compensés par de petites masses de plomb accrochées au rebord de la jante. Ces masselottes pouvant être arrachées par un coup de trottoir, on doit s'assurer fréquemment de leur présence. Toutefois, avant d'incriminer l'équilibrage, il est important de vérifier le centrage de la roue et l'absence de voile (déformation dans le plan de la roue). Parfois, la roue doit être remplacée.

3 - Contrôler l'état d'usure

La bande de roulement assure en grande partie l'adhérence du pneu à la route. Elle comporte des indicateurs d'usure situés en fond de sculpture, dans les rainures principales (généralement plus larges).



Indicateur d'usure.

L'usure amoindrit la capacité de drainage du pneu. Quand les indicateurs d'usure sont atteints par l'usure, il est temps de remplacer le pneu.

Sur les routes de l'hiver, les pneus hiver lamellisés font preuve d'une grande efficacité et d'une grande polyvalence d'utilisation.



À noter : la différence de profondeur de sculpture des pneus montés sur un même essieu ne doit pas dépasser 5 mm.

Le pneu est obligatoirement changé dès leur affleurement (légalement la sculpture minimale restante est de 1,6 mm). Au fur et à mesure de l'usure, la capacité à évacuer l'eau diminue : il convient donc de réduire la vitesse sur sol mouillé.

Les rainures secondaires, qui ne comportent pas d'indicateurs, disparaissent parfois en cours

d'usure de la bande de roulement. Malgré cette absence d'indication, il est préférable de remplacer le pneu usé et de rechercher la cause de cette usure localisée, généralement anormale.

Les coupures, chocs ou boursoufflures accidentels sur la bande de roulement ou sur les flancs imposent une vérification immédiate interne et externe du pneu par un spécialiste.

4 - S'adapter à la saison

Aujourd'hui, le marché des pneus hivernaux est essentiellement un marché de pneus non cloutés. Le risque de détérioration des chaussées a conduit, en effet, les pouvoirs publics à limiter l'emploi des pneus à clous à certaines périodes de l'année, définies par arrêté ministériel, complété par décret préfectoral en fonction des conditions climatiques de chaque département. Quant aux chaînes antidérapantes, on ne les utilise que sur des routes enneigées, à une vitesse modérée.

En réponse, les manufacturiers ont mis au point des pneus-hiver non cramponnés, lamellisés, utilisables sans limitation de période, dotés d'une bonne adhérence sur neige et même sur verglas, grâce à la conception particulière des mélanges de gommages et à une technologie très élaborée de lamelles.

Il existe plusieurs codes de vitesse pour les pneus-hiver (Q, T, H).

5 - Surveiller les pneus qui dorment

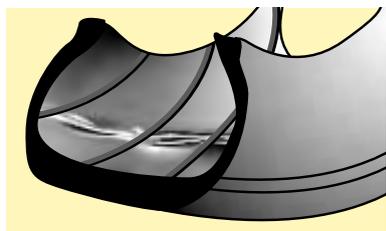
Même peu ou pas utilisés, les pneus vieillissent. On le constate à l'apparition de craquelures de la gomme de bande de roulement ou des flancs, qui s'accompagnent parfois d'une déforma-

tion de la carcasse. Surtout si on les entasse les uns sur les autres. Il est indispensable de les stocker à l'intérieur d'un local propre, en évitant la présence de matériels générateurs d'ozone tels que les lampes fluorescentes ou à vapeur de mercure, les moteurs électriques ou encore tout matériel susceptible de provoquer des étincelles et décharges électriques comme les chargeurs de batterie. Éloigner également les pneus des solvants, des lubrifiants et des combustibles...

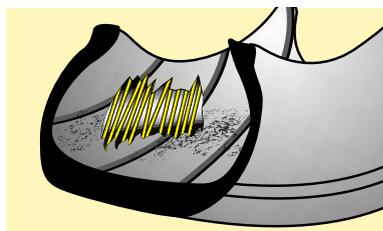
Attention aux véhicules longuement immobilisés !

Des pneus montés sur caravanes, remorques, porte-bateaux ou tout autre véhicule demeurant en stationnement prolongé, présenteront parfois des altérations liées à l'âge.

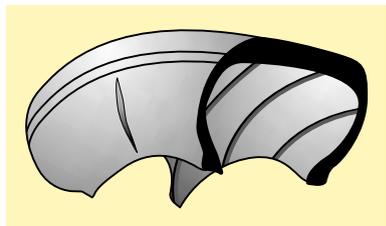




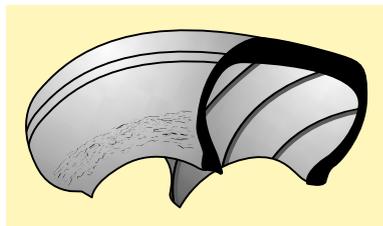
Plissures et marbrures de la gomme intérieure.



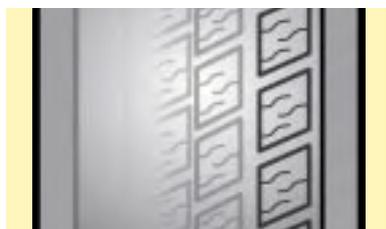
Dislocation de la carcasse.



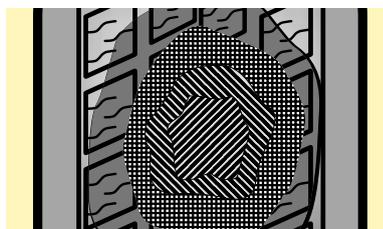
Coupures de flanc.



Craquelage du flanc.



Usure croissante d'un bord à l'autre de la bande de roulement.



Usure localisée importante avec nappes sommet apparentes.

Durant leur immobilisation, allégez leur charge et protégez-les de la lumière et du soleil. Si des craquelures ou des déformations apparaissent sur vos pneumatiques, montrez-les à un spécialiste qui évaluera leur aptitude à rouler.

Pour les mêmes raisons, surveillez les pneus des roues de secours. Ils peuvent être très anciens et présenter des signes de vieillissement ou encore avoir été en contact avec des produits

corrosifs ou sources de chaleur. En plus de sa surveillance personnelle, l'automobiliste a tout à gagner à consulter un professionnel qui le conseillera gratuitement. Toute anomalie risque d'avoir de graves conséquences : défaut de comportement du véhicule, détérioration du pneu et même éclatement. La responsabilité de l'automobiliste peut être engagée en cas de dommages causés à autrui.

QUAND DOIT-ON REMPLACER UN PNEU ?

- Si, après crevaison, le spécialiste détecte des traces d'endommagement.
- S'il n'est pas conforme aux préconisations d'équipement du véhicule : dimension incorrecte, code de vitesse inférieur à celui prévu par le constructeur, indice de charge inférieur à celui prévu par le constructeur, catégorie incorrecte (tourisme/camionnette).
- S'il est à la limite légale d'usure.
- S'il présente une usure localisée anormale.
- S'il porte des traces de vieillissement.
- S'il présente des blessures ou déformations susceptibles de nuire à la sécurité.

Remplacer les pneus : le rôle du professionnel

C'est le devoir du réparateur professionnel que de respecter scrupuleusement les consignes données par les fabricants, les constructeurs automobiles et la réglementation.

À l'exception de la roue de secours, la réglementation française interdit de monter, sur les voitures particulières et leurs remorques, deux pneus de dimensions et de types différents sur le même essieu. En cas d'équipement mixte, pneus radiaux et diagonaux, les premiers sont toujours montés à l'arrière (même sur une traction avant).



D'une façon générale, mieux vaut s'adresser à un professionnel pour l'entretien de ses pneus : toute anomalie peut avoir de graves conséquences pour la conduite...



Il est fortement conseillé de monter les pneus neufs ou les moins usés sur l'essieu arrière, afin d'assurer la meilleure tenue de route principalement sur sol mouillé. Une période de rodage d'une centaine de kilomètres à vitesse modérée est alors nécessaire avant d'atteindre les performances optimales.

Un démontage en trois temps

1. Regardez la forme des usures et notez de faire procéder, s'il y a lieu, aux réglages de suspension du véhicule.

2. Dégonflez totalement le pneu, en dévissant et retirant le mécanisme de valve avec un outil adapté afin d'éviter tout danger lors du décollement du talon avec les leviers.

3. Vérifiez que le pneu ne présente aucun dommage : coupure, blessure, mise à nu de la carcasse (voir p. 100).

Les bases du montage : rigueur et minutie

• Vérifiez que la jante est conforme à la dimension du pneu à monter : diamètre, largeur, forme du rebord. Les pneumatiques tubeless de structure radiale doivent être montés uniquement sur jantes étanches à profil anti-décoincant.

• Respectez le sens du montage pour les pneus asymétriques et/ou directionnels.

• Débarrassez la jante de ses souillures éventuelles (graisse, rouille, résidus de pâte de montage...).

• Lubrifiez les talons du pneu et la jante avec un produit approprié. Négliger cette étape peut entraîner des dommages aux talons du pneu et éventuellement des ruptures de tringles lors du montage ou du gonflage (les mixtures à base d'hydrocarbure sont à proscrire).

• Lorsque le pneumatique est en position sur la jante, amorcez



Montage et démontage : seuls les professionnels savent répéter mille fois des gestes connus pour gagner quelques dixièmes de secondes le jour J...

le gonflage de façon à ce que les talons se mettent en place correctement.

À ce niveau du montage, vérifiez le bon centrage du pneu (concentricité du cordon par rapport au bord de jante). Il est parfois nécessaire, pour y parvenir, d'utiliser une pression supérieure à celle d'utilisation. Respectez les pressions maximales préconisées par les manufacturiers et fabricants de jante. Surtout, n'oubliez pas de ramener aussitôt la pression à sa valeur normale d'utilisation.

Attention ! Pour les pneumatiques de tourisme, utilisez uniquement les installations de gonflage prévues pour ce type de pneus. Gonflez avec de l'air sec et filtré.

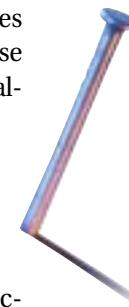
Et pour être complet :

- Toujours utiliser une valve neuve appropriée lors du montage d'un pneu "tubeless" neuf.
- Ne pas monter une chambre à air dans un pneu tubeless, qui doit toujours être associée à une roue tubeless (étanche).
- Au-delà de 4,75 bars et pour les pneumatiques d'indice de vitesse supérieure à "V", une valve métallique est requise.

L'utilisateur face à la crevaison

Vous disposez d'un de ces détecteurs de crevaison, arrivés depuis peu sur le marché ?

Vous êtes immédiatement informé dès l'apparition d'une fuite. Sinon deux types de situations peuvent se présenter à vous.



La perforation est de petite taille.

Si vous roulez à grande vitesse, une brusque résistance du volant vous indique l'apparition d'un problème. Si vous roulez en ville, à vitesse modérée, vous sentez vite la voiture tirer d'un côté, la direction et les suspensions se durcir. Puis le pneu claque en émettant un bruit très spécifique. Si vous continuez de rouler, une odeur de caoutchouc brûlé vous informera que le pneu et la chambre sont hors d'usage.

Une perforation de taille importante conduit à l'éclatement du pneu.

Il s'agit d'une situation d'urgence : essayez de conserver la maîtrise du véhicule, en rétrogradant notamment, et stoppez le plus vite possible.



Pneu dégonflé. Dans cet état, il ne pourra rouler que quelques centaines de mètres à vitesse très réduite.

L'ÉPREUVE DU CHANGEMENT DE ROUE EN SIX ÉTAPES

*Vous avez à changer
votre roue :*

*en conducteur
prévoyant, vous disposez
d'une roue de secours
en bon état et correctement
gonflée, d'un cric adapté
et d'un outillage convenable !
Souvent, le bras de levier de
la manivelle de serrage est
un peu juste pour débloquer
des écrous trop serrés.
Prévoyez une clé à cliquet
ou une croix.*



1 - Mettez le warning en marche. Garez-vous sur une aire de dégagement, toujours le plus loin possible de la chaussée. Serrez le frein à main. Mettez les passagers à l'abri. Prenez les précautions nécessaires à votre propre sécurité.



2 - Calez une des roues. Placez le cric à l'emplacement prévu à proximité de la roue crevée. Débloquez les écrous sans les retirer.



3 - Soulevez la voiture jusqu'au décolllement de la roue du sol. Enlevez les écrous et placez-les sur un endroit propre.



4 - Déposez la roue crevée. Présentez la roue de secours sur le moyeu. Serrez légèrement les écrous en centrant la roue.



5 - Descendez la voiture et retirez le cric. Bloquez fermement les écrous avec la clé. Rangez matériel et roue crevée dans le coffre.



6 - Reprenez avec prudence la voie de circulation. Éteignez le warning.

Et après ?...

Chaque année, 400 000 tonnes de pneus usagés sont retirées de la circulation en France. Que deviennent ensuite ces pneus ?

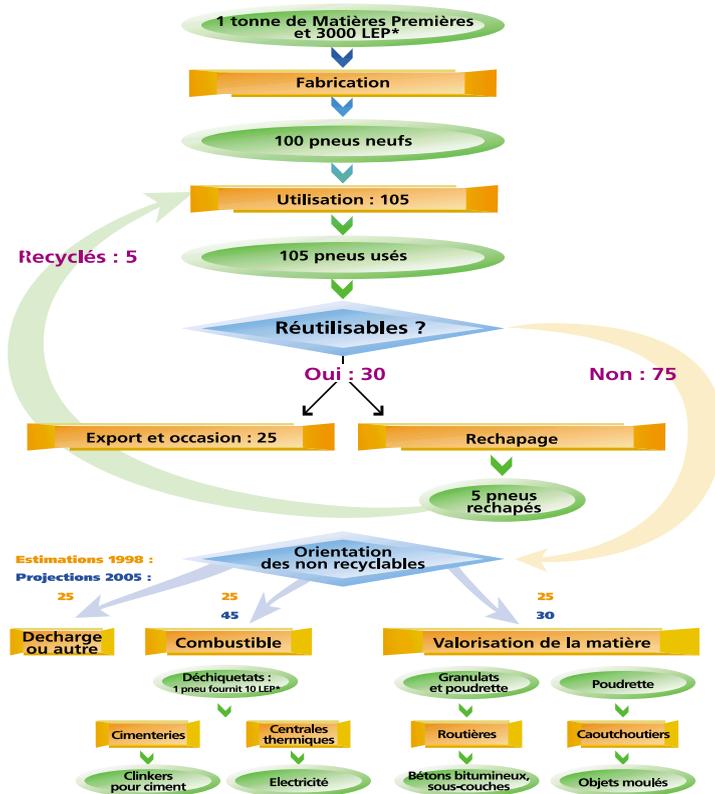
La solution ancienne consistant à mettre en décharge des produits usagés est arrivée à son terme car la non-dégradabilité de certains déchets, comme les pneus par exemple, mettait en jeu l'écologie des sols et l'environnement. Les gouvernements aux échelons

nationaux et internationaux, en concertation avec les producteurs, ont initié une démarche de valorisation des déchets qui prendra son plein effet au cours de la décennie 2000-2010.

Pour les pneus usagés, deux pistes sont ouvertes :

- **La valorisation de la matière par recyclage**, qu'il s'agisse de la carcasse des pneus, compte tenu de leur aptitude au rechapage, ou qu'il s'agisse de la matière de base, le caoutchouc, presque totalement récupérable.

CYCLE DE VIE POUR 100 PNEUS TOURISME PRODUITS EN EUROPE
(Estimation des flux en 1998 et projection sur 2005)



*LEP = litre d'équivalent pétrole.



- **La valorisation énergétique**, sachant que la combustion d'un kilo de pneus a le même pouvoir calorifique qu'un litre de pétrole. Détaillons-en les voies :

- Le recyclage par rechapage : sur une carcasse saine, débarrassée des restes de la gomme de roulement usée, par une nouvelle bande vulcanisée. À noter que les pneus de tourisme présentent une rechapabilité de moins de un pneu sur dix alors que les pneus de poids lourds à carcasse acier, disposant d'une structure très endurante, supportent jusqu'à deux rechapages.

- Le recyclage du caoutchouc : il est réalisé sous forme de poudrette épurée de tous les éléments étrangers qui va servir de matière première pour le moulage d'objets soumis à un usage moins sévère que les pneus. Une autre application incorpore cette poudrette dans les revêtements routiers.

- La valorisation énergétique : elle est appelée à devenir prépon-

dérante. Elle consiste à brûler des déchetats de pneus dans les chaudières de centrales électriques et, plus récemment, dans les fours de cimenteries.

Les efforts conjoints des gouvernements, des fabricants (de pneus, de voitures, de routes) et des utilisateurs, concourent à la sauvegarde de l'environnement avec comme objectifs :

- une moindre consommation de matières premières,
- une moindre consommation de carburant, donc de pétrole,
- une moindre pollution atmosphérique résultant de moins de gaz émis par les moteurs,
- une moindre émission sonore du trafic routier,
- une moindre dégradation des sols et des paysages par arrêt de la mise en décharge.

Aujourd'hui comme hier, le pneu continue d'apporter, par une innovation permanente, une contribution forte à l'amélioration de la vie des hommes : plus de mobilité, plus de sécurité, dans un environnement mieux préservé.

A

ACIpage 23
 Adhérencepage 49
 Affleurementpage 98
 Angle de positionnementpages 63-64
 Assemblagepages 76-77

C

Cables de renfortpages 43-44
 Calandragepage 47
 CAOpages 68-69-70-73
 Caoutchoucpages 38-39
 Carcassepage 29
 Ceinturepages 22-27
 Centre Recherche et Développement Michelinpage 75
 Changement de pneupage 98
 Changement de rouepage 105
 Chargepage 48
 Compétitionpage 92
 Comportement routierpage 57
 Comportement thermiquepage 54
 Composantspage 77
 Condamine, Charles de laPage 13
 Conformationpages 77-78
 Couchespage 21
 Crevaissonpages 103-104
 C3Mpages 81-82
 Cugnot, Josephpage 12
 Cuissonpages 77-79
 Cycle de viepage 106

D

Daimler, Gottliebpage 12
 Dérivepage 27
 Dietz, Charlespage 14
 Dunlop, John Boydpage 14

E

Équilibragepage 97
 Essaispages 74-75

G

Géométriepage 67
 Goodyear, Charlespage 13
 Green Xpage 24
 Griffithpage 12

H

Hystérèsepages 40-50-52-54

I

Indentationpage 50
 Intensité acoustiquepage 53
 Irrégularités de surfacepage 53

J

Jeantaudpage 67

L

Lamellisationpage 33
 Liaison au solpages 32-33

M

Mackintoshpages 12-13
 Macro-micro rugosité.....pages 51-53
 Marquagespages 36-37
 Mélangeage.....page 77
 Mélangespage 52
 Michelin, André, Edouard.....pages 14-20-23-24-41-45-71
 Mondialisation.....pages 84-85-86
 Montage (et démontage) de pneuspages 101-102-103
 Morphologiepage 28

N

Nader, Ralphpage 17
 Nappes de sommetpage 30
 Noir de carbonepages 40-72-73

P

Parallélisme.....page 66
 PAX System.....pages 20-25-37
 Pneus.....pages 32-33-34-35
 Pneus (concept, sortes de)page 90
 Pression de gonflage.....pages 94-95-96

R

Radial.....pages 17-20-22-27-46-81
 Radialisation planétaire.....page 88
 Recyclage.....page 18
 Résistance au roulementpage 52
 Rouepages 12-60-61

S

Saisons.....page 99
 Sculpturespage 32
 Silice.....pages 41-72-73
 Soufrepage 41
 Sous-virage.....page 59
 Stephenson, Georgepage 12
 Surviragepage 59

T

Thomson, Robertpage 14

U

Usurepage 97

V

Volume internepage 49

W

Watt, Jamespage 10-12

