
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

Les matériaux caoutchouteux

par Michel BARQUINS
Directeur de Recherche au CNRS
Laboratoire de Physique et de Mécanique des Milieux Hétérogènes
URA au CNRS n° 857
ESPCI - 10, rue Vauquelin - 75231 Paris Cedex 05

*II - Application à l'étude du roulement et de l'usure des pneumatiques**

1. ROULEMENT D'UN PNEUMATIQUE

Le pneumatique qu'est-ce donc ? Le profane éprouve quelques difficultés à imaginer que cet objet rond et noir, d'apparence banale, fabriqué en très grande quantité, est en fait un produit excessivement complexe de haute technologie (figure 30). Pour ne considérer que les pneumatiques équipant les véhicules de tourisme, leur utilisation standard font qu'ils doivent résister à plusieurs millions de cycles, de virages, de freinages et d'accélération. Quant aux pneumatiques

* N.D.L.R. : La première partie de cet article «*I - Leurs principales propriétés mécaniques et tribologiques*» est parue dans le B.U.P. n° 777.

équipant les avions, chacun doit supporter jusqu'à deux cent soixante-dix fois son poids et cela à plus de 300 km/h !

On peut décrire le pneumatique comme une enveloppe relativement souple confinant l'un des ressorts les plus légers que l'on puisse imaginer, à savoir l'air, l'élasticité du caoutchouc et sa déformabilité réversible ayant pour rôle d'exploiter ce ressort. Le pneumatique est composé d'une association judicieuse de plus de deux cents matières premières, qui peuvent être regroupées en trois catégories principales :

- mélanges très élaborés de caoutchoucs naturels et synthétiques, de charges de renforcement, d'agents de vulcanisation et de protection (anti-oxydant et anti-ozone, par exemple),
- câbles et nappes métalliques, et
- fibres textiles qui sont des polymères (rayonne, polyester, nylon ou encore aramide), l'ensemble devant assurer une liaison souple et durable avec un revêtement routier.

Le pneumatique comprend trois éléments majeurs :

- la carcasse, qui est un assemblage de nappes de câbles en textile enrobés de caoutchouc, ce squelette régit la souplesse du pneumatique et supporte,
- la bande de roulement, ainsi que ses prolongements latéraux appelés flancs, composés de mélanges d'élastomères renforcés par du noir de carbone, et
- les talons, armés de tringles en acier, qui permettent l'ancrage inextensible de la carcasse sur la jante de la roue (figure 30). Des nappes composées de divers types de textiles et d'acier servent de renfort pour limiter la déformation des mélanges de caoutchoucs sous l'effet de la pression d'air. Ils permettent également de transmettre des efforts importants utiles au guidage d'un véhicule, grâce à leurs propriétés de résistance à la déformation et à la rupture. La disposition des différents renforts est schématisée dans la figure 31, pour ce qui concerne la structure moderne de carcasse dite radiale, technologie brevetée par la manufacture Michelin en 1946. Cette structure permet, grâce à la souplesse autorisée des flancs, de maintenir entre la bande de roulement, rigidifiée par la ceinture constituée de nappes croisées, et le sol une zone de contact constante, ce qui n'était pas le cas avec l'ancienne structure dite diagonale (figure 32).

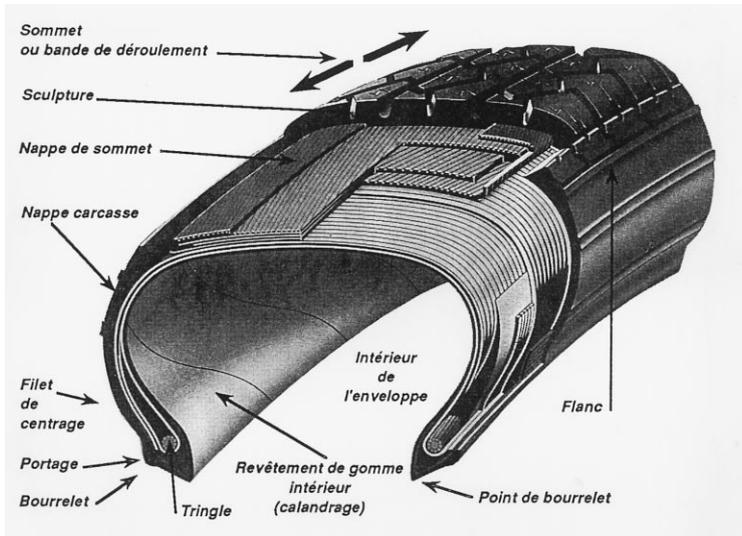


Figure 30 : Représentation schématique de la constitution d'un pneumatique moderne, dit à carcasse radiale, d'un véhicule de tourisme.

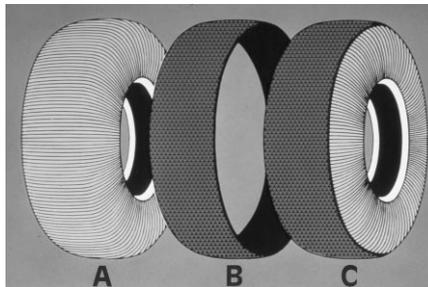


Figure 31 : Disposition des différents renforts pour un pneumatique dit à carcasse radiale.

- A : Carcasse radiale constituée d'une nappe de câbles disposés en arceaux droits,
- B : Ceinture composée de plusieurs nappes croisées, et
- C : Ensemble des deux éléments précédents.

1.1. Composition et fabrication d'un pneumatique moderne

Dans un premier temps, on peut être étonné du fait que ce n'est pas un seul caoutchouc ou plutôt un seul mélange caoutchouteux mais

plusieurs qui entrent dans la fabrication d'un pneumatique. Le schéma de la figure 30 nous permet de comprendre que chaque partie d'un pneumatique nécessite un caoutchouc «sur mesure» compte tenu de la nature des sollicitations qu'elle va être amenée à supporter. Ainsi, la bande de roulement, qui assure le contact avec le sol et est, par suite, un élément essentiel de la vie du pneumatique, doit être constituée par un mélange qui doit être adhérent sur tous les types de sol nu ou revêtu, doit résister à l'abrasion et ne doit pas s'échauffer trop pendant le roulement sous peine de perdre une grande partie de ses propriétés. De plus, sa partie externe porte les inévitables sculptures, constituées de canaux creusés plus ou moins profondément, selon des orientations judicieusement choisies, nécessaires à l'évacuation de l'eau. On a estimé qu'un pneumatique doit expulser, pour conserver la tenue de route du véhicule, une quantité considérable d'eau : vingt-cinq litres par seconde à 90 km/h !

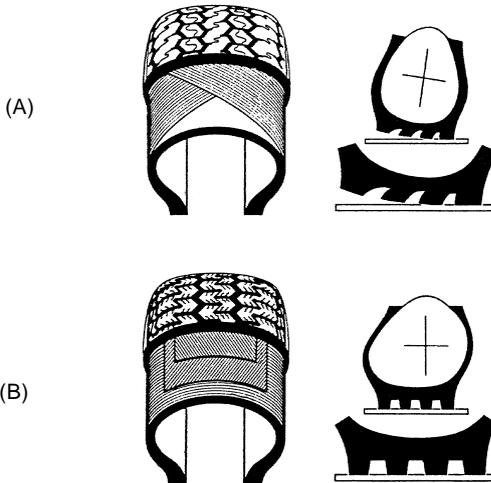


Figure 32 : Conception et comportement des pneumatiques :

A : à structure ancienne dite diagonale,

B : à structure moderne radiale.

Pour ce qui concerne les flancs, qui doivent «fléchir sans faiblir», à savoir se déformer de manière permanente et cyclique pour maintenir une zone de contact constante avec le sol (figure 32), leur rôle est de protéger la carcasse contre les agressions extérieures, qu'elles soient de nature mécanique comme les chocs et les griffures contre les trottoirs ou de nature chimique comme l'attaque par l'oxygène et l'ozone de

l'air, par exemple. Pour le cas particulier des pneumatiques sans chambre, l'élastomère constitutif du revêtement interne doit, bien évidemment, être imperméable à l'air pour maintenir la pression.

Les éléments évoqués précédemment sont élaborés à partir de mélanges caoutchouteux divers et spécifiques dont la formulation correspond réellement à un art, celui de choisir et d'associer les constituants d'un mélange pour lui conférer les propriétés souhaitées, correspondantes à l'utilisation prévue. Si le produit de base est effectivement un caoutchouc, selon le devenir du produit plusieurs critères de sélection entrent en jeu, tels que la température de transition vitreuse, la hauteur du plateau caoutchouteux, la cohésion, la possibilité de cristalliser sous tension, la résistance aux agressions mécaniques ou/et chimiques, la facilité de mise en œuvre, le coût, l'imperméabilité à l'air et à l'eau. Tous ces paramètres dépendent du choix des micro- et macrostructure des polymères sélectionnés. La notion de polymère «sur mesure», déjà signalée, prend ici toute son importance, et c'est le rôle primordial qu'a joué la somme des progrès réalisés dans la synthèse de nouveaux polymères qui fait qu'aujourd'hui les pneumatiques n'ont jamais été aussi performants.

Pour ce qui concerne les constituants principaux entrant dans la fabrication des pneumatiques pour véhicules de tourisme, on retiendra l'ordre de grandeur suivant : la mise en œuvre de mille kilogrammes de pneumatiques nécessite environ quatre cent quinze kilogrammes de caoutchoucs naturels et synthétiques, deux cent cinquante kilogrammes de noir de carbone, cent trente-cinq kilogrammes d'acier, trente kilogrammes de différents textiles et cent soixante-dix kilogrammes de produits divers, tels que des agents de vulcanisation (soufre et accélérateur de cuisson) qui confèrent aux matériaux caoutchouteux la stabilité dimensionnelle et l'indispensable élasticité, et des produits de protection qui assurent la stabilité chimique.

On peut se poser la question : pourquoi autant de «noir de carbone» ? C'est en 1904 que l'anglais Sidney Mote montra l'intérêt d'introduire dans le caoutchouc cette poudre noire, provenant de la décomposition thermique d'huiles lourdes aromatiques de pétrole ou de la pyrolyse de gaz naturel, en vue de le renforcer contre l'abrasion et d'améliorer sa dureté et son amortissement et, par suite, sa résistance à la rupture. Cette poudre de noir de carbone, dont 65 % de la production sont consommés par l'industrie du caoutchouc, présente une surface spécifique, des propriétés physico-chimiques et colloïdales qui condi-

tionnent la dimension des particules et la forme des agglomérats. La taille des particules et celle des agrégats qui en résultent est primordiale car ils percolent au sein du mélange caoutchouteux et conduisent à la réalisation d'une structure tridimensionnelle appelé réseau noir. Les petites particules, qui sont très renforçantes, dont les dimensions sont de l'ordre de vingt à trente nanomètres, sont plus particulièrement utilisées dans la confection des bandes de roulement à qui elles confèrent une grande résistance à l'abrasion et à l'usure. Par contre, les particules plus grosses, moins renforçantes, sont utilisées dans les parties du pneumatique tels que les flancs qui doivent supporter des flexions répétées et résister à l'échauffement.

Les câbles d'acier et les nappes en textiles divers entrent également dans la fabrication d'un pneumatique dont les différentes étapes sont schématisées dans la figure 33, la qualité du produit fini dépendant de la maîtrise parfaite de chacune de ces étapes.

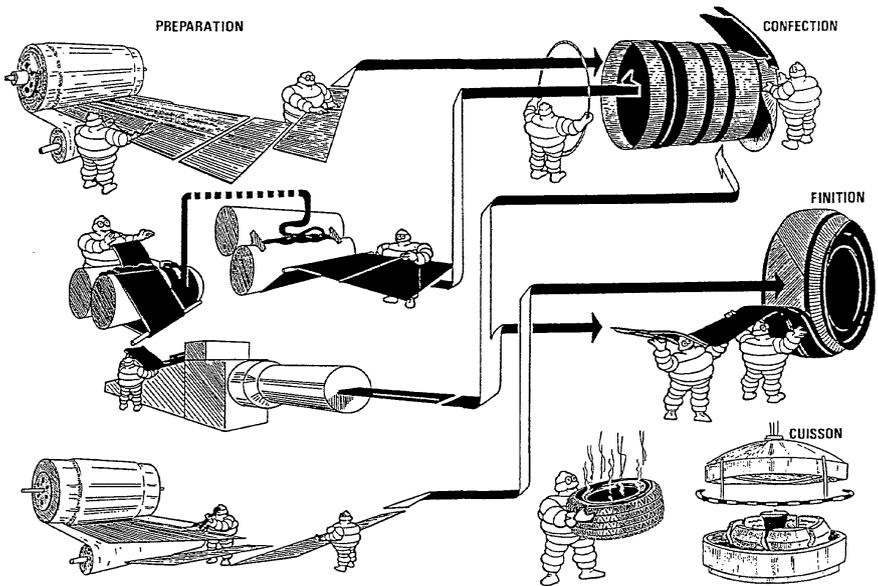


Figure 33 : Description schématique des différentes phases de la fabrication d'un pneumatique (document Michelin).

Dans un premier temps, le caoutchouc, le noir de carbone et les ingrédients de formulation, sauf les agents de vulcanisation, lesquels

seront introduits ultérieurement, sont fortement malaxés et mélangés intimement afin de parfaitement disperser le noir dans un milieu particulièrement visqueux, opération qui a pour effet d'augmenter considérablement la température et de ramollir le mélange, lequel acquiert par là-même la viscosité souhaitée. La température atteinte en fin de mélangeage étant voisine de la température de vulcanisation, on comprend aisément que l'on attende la phase finale de mise en œuvre de ce qui deviendra un pneumatique avant d'introduire les produits de vulcanisation. La bande de roulement, lisse au départ, ainsi que les flancs, qui sont profilés sont obtenus, avec une excellente précision de l'ordre de cent micromètres, soit par extrusion au travers d'une filière, soit par passage dans l'entrefer d'une calandre, composée de rouleaux à axes parallèles rapprochés en rotation inverse, dont les surfaces cylindriques comportent en creux le profil souhaité. Ces éléments sont mis en forme dans des conditions de température et de vitesse telles que le mélange caoutchouteux soit dans un état liquide visqueux gardant la mémoire des déformations subies.

La confection de la carcasse est réalisée à l'aide d'un cylindre en rotation qui reçoit d'abord une première couche d'un mélange caoutchouteux imperméable à l'air puis les nappes de câbles. Ces nappes sont constituées de câbles disposés parallèlement et de manière presque jointive et sont enduites sur les deux faces par une couche de mélange de caoutchouc à l'aide d'une calandre. Elles sont ensuite découpées soit perpendiculairement soit selon un angle défini en fonction de la position de la nappe sur le pneumatique. Les tringles, qui doivent maintenir le pneumatique sur la jante, sont ensuite disposées de chaque côté et les extrémités de la carcasse sont rabattues autour de ces tringles. Puis, différents caoutchoucs de bourrage et de protection des flancs sont mis en place.

La phase suivante consiste à passer de la configuration cylindrique précédente à la forme torique finale. Cette opération de conformation est réalisée en rapprochant l'une vers l'autre les deux tringles tout en soumettant la partie centrale de la surface initialement cylindrique à une pression suffisante afin de déformer les couches de caoutchouc jusqu'à la complète extension des câbles des nappes. Cette opération ne doit pas provoquer de destruction de l'assemblage câbles-caoutchouc, c'est la raison pour laquelle, les brins d'acier sont laitonnés au cours du tréfilage, ils reçoivent ainsi un placage d'alliage de cuivre et de zinc, le cuivre s'alliant au soufre servant à la vulcanisation pour former du sulfure de cuivre, ce qui a pour effet de parfaire l'adhésion entre l'acier

et le caoutchouc. Pour la même finalité, les câbles en textile subissent également une enduction de produits spécifiques appelés «primaires d'adhérence» avant leur mise au contact des mélanges caoutchouteux.

Quand le futur pneumatique a atteint sa forme enveloppante, le sommet reçoit les éléments de renforcement, les nappes et les bandes de caoutchouc qui vont constituer la bande de roulement, laquelle est encore lisse, toutes ces opérations étant effectuées sans chauffage afin de conserver aux différents mélanges leur caractère plastique, c'est-à-dire déformable sans recouvrance. Ce n'est qu'ensuite que le pneumatique est placé dans un moule très élaboré qui permet à la fois de chauffer, à l'eau ou à la vapeur, et d'imposer à l'aide d'une membrane, le moule une fois fermé, une forte pression interne afin que la bande de roulement reçoivent sa sculpture et que les différents marquages s'inscrivent en bosse ou en creux, tandis que le pneumatique acquiert sa forme définitive. C'est seulement au cours de cette dernière opération de séjour dans le moule que les différents mélanges caoutchouteux sont vulcanisés, traitement chimique qui leur confère l'élasticité souhaitée.

1.2. Fonctions du pneumatique

Les différents constituants précédemment évoqués, à savoir carcasse, bande de roulement, flancs et talons, sont réunis en une structure complexe telle que le pneumatique soit en mesure d'assurer les quatre fonctions principales suivantes :

– Porter la charge (plus de cinquante fois son propre poids). Pendant la rotation, le pneumatique est soumis à des écrasements cycliques de l'ordre de 16 à 24 % pour les véhicules de tourisme, de 13 à 18 % pour les poids lourds et de 7 à 8 % seulement pour les voitures de courses, engendrant d'importants dégagements de chaleur dus aux pertes par hystérésis, lesquels sont difficilement dissipés par suite d'une conductivité thermique médiocre du caoutchouc. Il en résulte parfois des températures de fonctionnement trop élevées pour être supportées sans dommage ;

– Transmettre un couple moteur ou un couple de freinage, c'est-à-dire «coller» à la route. Contrairement à la croyance populaire, les organes qui permettent d'arrêter un véhicule ne sont pas les freins, lesquels interviennent uniquement sur les roues, mais les pneumatiques et plus particulièrement une très faible portion de leur bande de roulement qui frotte sur le revêtement routier. Toute la puissance utile du moteur est en effet transmise par l'intermédiaire de la zone de contact avec la

chaussée dont la superficie n'excède pas quelques centaines de centimètres carrés ;

- Supporter les efforts latéraux induits par un changement de direction, un sol incliné ou un vent de travers. Ces efforts créent un écart angulaire, entre la direction du plan de roulement de la roue et celle de la trajectoire suivie, communément appelé angle de glissement ou dérive ;
- Participer à l'amortissement du véhicule, en complément des organes de suspension, sans jamais se substituer totalement à ces derniers.

Les fonctions principales précédentes, auxquelles on peut ajouter quelques exigences complémentaires concernant les qualités de confort (souplesse et bruit) et d'économie (usure), font intervenir un très grand nombre de paramètres impliquant architecture, forme, poids, pression, dessin des sculptures et mise en œuvre des mélanges caoutchouteux constitutifs du pneumatique. Ces différents facteurs doivent, bien évidemment, conférer au pneumatique des qualités essentielles de sécurité. Il y a une vingtaine d'années, quarante-sept variables influençant la tenue de route des véhicules de tourisme ont été inventoriées dont 40 % d'entre elles étaient relatives au pneumatique, les autres facteurs dépendant des conditions de conduite, de l'environnement ambiant et surtout des caractéristiques géométriques des chaussées.

1.3. Caractéristiques géométriques des chaussées

Le revêtement routier est chargé de supporter sans déformation excessive ni détérioration, en relation avec les couches de fondations, les efforts qui lui sont appliqués, tout en assurant une bonne adhérence aux véhicules. Les revêtements sont constitués de cailloux (granulats), de dimensions variables, agglomérés à l'aide d'un liant qui est soit hydraulique (chaux, ciment, laitier) ou pouzzolanique, soit hydrocarboné (bitume, goudron) et ces liants étant dénommés, suivant la nature ou/et la technique de mise en œuvre : bétons de ciment, bétons bitumineux ou enduits superficiels.

La surface de chaussée, quel que soit le soin apportée à sa réalisation, présente toujours des inégalités verticales et longitudinales mesurables, classées conventionnellement selon leurs dimensions en quatre catégories (figure 34) :

- **L'uni**, qui regroupe les défauts dont les dimensions horizontales s'étendent de 0,5 à 50 mètres, décrit les irrégularités liées aux imperfections inévitables de nivellement du terrain ou à la déformation

imprévisible du sol support de la chaussée. Les défauts de grandes longueurs d'onde diminuent le confort de conduite et la stabilité du véhicule, tandis que les courtes longueurs d'ondes, par le délestage des roues qu'elles provoquent, amoindrissent la directivité. Ces irrégularités accroissent la consommation de carburant ;

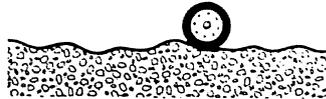
– La **mégatexture**, représente les inégalités essentiellement en liaison avec la dégradation du revêtement. Ces défauts, tels que nids de poules, ornières, voie en «tôle ondulée», décalage de dalles, joints endommagés, dégâts divers dus au gel, réparations localisées imparfaites, qui ont des dimensions horizontales variables entre 50 et 500 millimètres, sont générateurs de vibrations dont les conséquences concernent plus

Domaine	Gamme de dimensions	
	Horizontale	Verticale
Uni	0,5-50 m	0,1-20 cm
Mégatexture	5-50 cm	1-50 mm
Macrotexture	0,5-50 mm	0,2-10 mm
Microtexture	< 0,5 mm	< 0,2 mm

Uni



Mégatexture



Macrotexture



Microtexture

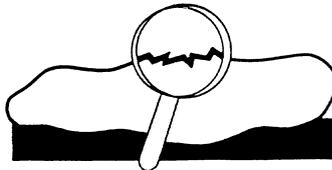


Figure 34 : Les quatre classes de la texture d'un revêtement routier.

particulièrement la stabilité des véhicules, le bruit de roulement à basse fréquence et la résistance au roulement (consommation de carburant). Pour les deux catégories suivantes, dont la terminologie a été proposée par Desmond Moore il y a tout juste vingt-cinq ans, elles sont directement liées à la grosseur, à la forme, à l'espacement des granulats ainsi qu'à leur état de surface géométrique ;

– La **macrotecture**, qui correspond à des dimensions horizontales variant entre 0,5 et 50 millimètres, décrit l'enfoncement et la répartition des granulats au sein du liant ainsi que divers défauts tels que les rainures produites par abrasion de la chaussée, les fissures et les arrachements de gravillons. La macrotecture, par sa forme et sa dimension, joue un rôle prédominant dans la résistance au roulement (consommation de carburant) et influe sur la facilité d'évacuation de l'eau sur chaussée mouillée. Elle est également responsable de la génération du bruit de roulement à moyenne fréquence ;

– La **microtexture** caractérise les irrégularités de surface des roches constitutives des granulats utilisés, leurs particularités pétrographiques et minéralogiques, tout comme celles des mortiers de ciments employés. Les dimensions horizontales et verticales, qui peuvent évoluer selon le climat, la saison et le trafic routier, sont inférieures à 0,5 et 0,2 millimètre, respectivement. La microtexture assure l'adhérence sur sol sec et, par suite, génère l'usure par abrasion. En revanche, la possibilité qu'offre cette texture de développer des pressions locales très élevées, capables de rompre un film liquide mince et de se ramener ainsi à un contact sec, constitue un élément indispensable à la sécurité de la circulation des véhicules (tenue de route) par temps de pluie.

1.4. Comportement du pneumatique

Jusqu'en 1945, les pneumatiques conventionnels comportaient tous une carcasse dite à «structure diagonale», terme utilisé pour traduire la disposition particulière des nappes de câbles qui étaient posées obliquement d'une tringle à l'autre et croisées lors des superpositions successives (figure 32A). Cette structure, qui solidarisaient les flancs et la bande de roulement et rigidifiait l'ensemble, avait comme inconvénient majeur de provoquer un basculement du pneumatique sollicité en virage, réduisant ainsi fort dangereusement la superficie de la zone de contact. De plus, à grande vitesse, la contraction transversale de la bande de roulement au passage dans la zone de contact, due à la distorsion des câbles, initiait une onde stationnaire dont l'effet destructeur était radical.

Aujourd'hui, ce type de carcasse est pratiquement abandonné pour les véhicules de tourisme au profit de la carcasse dite «radiale» dans laquelle, comme cela a déjà été signalé, les câbles textiles sont des arceaux droits disposés perpendiculairement au plan équatorial (figures 31A et 32B). Cette architecture confère à la carcasse une grande flexibilité mais de faibles rigidités latérale et longitudinale. Pour pallier cet excès de souplesse, on a vu que l'on recouvre le sommet de la carcasse par une ceinture composée de plusieurs nappes de câbles d'acier qui la rendent pratiquement inextensible et rigidifient la bande de roulement (figures 31B et 32B). Dans ces conditions, le pneumatique vire à plat et conserve une zone de contact constante avec le revêtement routier. De plus, pour une même force de poussée latérale, l'angle de glissement est moindre qu'avec l'ancienne carcasse diagonale, assurant ainsi une plus grande précision de conduite.

Il n'existe qu'un seul domaine où le pneu radial n'a pas encore détrôné complètement la construction conventionnelle, c'est celui de l'aviation civile, non parce que la souplesse des flancs, qui assure une bonne qualité de confort aux véhicules de tourisme, n'est pas compatible avec l'écrasement important (de l'ordre de 32 à 35 % avec la structure diagonale actuelle) que supporte le pneumatique au décollage, mais parce qu'il existe encore trop peu de manufacturiers ayant la maîtrise d'œuvre de ce type de produit pour l'aviation.

Seul lien physique entre le sol et le véhicule, la bande de roulement joue un rôle essentiel. Elle doit assurer sur tous les types de revêtement routiers, y compris sur les chemins empierrés (macadam), et pour des conditions météorologiques variées, une bonne tenue de route (adhérence) et présenter à la fois une grande résistance à l'usure, un faible bruit de roulement et une résistance à l'avancement réduite, cette dernière étant directement liée à la consommation de carburant. Ces qualités dépendent grandement du choix du mélange élastomérique et du dessin des sculptures.

S'il est vrai qu'un pneumatique à bande de roulement lisse assure la meilleure adhérence possible sur une surface lisse et sèche (voir les pneumatiques montés par temps sec sur les roues arrières motrices des bolides de Formule 1), la présence de sculptures s'avère indispensable sur les chaussées mouillées pour le drainage de l'eau, par ses canaux et rainures, les blocs de caoutchoucs intermédiaires assurant la transmission des forces. L'expérience montre que la tenue de route sur chaussée humide dépend beaucoup plus du dessin des sculptures que de la

composition du mélange caoutchouteux constitutif de la bande de roulement, ce dernier paramètre, pour autant, ne pouvant en aucun cas être négligé. Le matériau qui présente le plus fort coefficient de frottement est le copolymère styrène-butadiène (SBR), suivi par le caoutchouc naturel. Par contre le polybutadiène se caractérise par une très grande résistance à l'usure. C'est la raison pour laquelle, un compromis judicieux est trouvé pour les véhicules de tourisme dont les pneumatiques sont essentiellement à base de caoutchoucs synthétiques (copolymère styrène-butadiène, éventuellement étendu à l'huile, et polybutadiène) coupés avec du caoutchouc naturel et renforcés par du noir de carbone afin d'obtenir à la fois un coefficient de frottement non trop faible sur sol mouillé et une bonne résistance à l'usure.

Dans le cas des véhicules types poids lourds, engin de Génie civil et de travaux publics, les polyisoprènes s'imposent du fait de leurs faibles pertes viscoélastiques malgré les déformations importantes subies (figure 1 - article I). Les pneumatiques d'avion, ont la particularité de devoir supporter de très gros écarts de températures, $- 50^{\circ}\text{C}$ en altitude de croisière et $+ 350^{\circ}\text{C}$ à l'atterrissage à cause des flux d'air chaud provenant des tuyères. Comme aucun compromis ne peut être consenti quant à la valeur nécessairement élevée que doit présenter le coefficient de frottement, on utilise essentiellement le caoutchouc naturel, dont les pertes par hystérésis sont peu importantes et la température de transition vitreuse relativement basse ($- 70^{\circ}\text{C}$), mélangé en faible proportion avec du caoutchouc synthétique pour augmenter l'adhérence sur sol mouillé.

La bande de roulement est supportée par la carcasse qui, quelle que soit son architecture, peut être considérée au repos comme une structure tridimensionnelle capable de se déformer de manière élastique lorsqu'elle est sollicitée soit verticalement sous l'action de la charge normale, soit en torsion par l'application d'un couple vertical, soit longitudinalement ou transversalement sous l'effet d'un effort horizontal parallèle ou perpendiculaire, respectivement, à son plan équatorial. Posé sous l'action d'une charge sur une surface rigide, plane et lisse, un pneumatique gonflé s'aplatit. Qu'il s'agisse d'un pneumatique d'avion dont la zone de contact est de forme quasi elliptique ou celle d'un véhicule de tourisme qui est rectangulaire, la superficie de la zone de contact est principalement déterminée par l'écrasement et, il a même été mis en évidence qu'elle lui est pratiquement proportionnelle.

Dans la zone de contact, la complexité de la structure de la carcasse et des constituants adjacents fait que chaque élément de caoutchouc de la bande de roulement est soumis à un vecteur force qui admet une composante normale à la zone de contact, qui permet l'adhérence entre le pneumatique et la chaussée, et de deux composantes, qui lui sont parallèles, dites de cisaillement, l'une longitudinale et l'autre transversale, qui commandent le roulage sur une trajectoire donnée ou l'arrêt du véhicule. Les études entreprises avec des bandes de roulement lisses ont montré que les pressions normales se répartissent symétriquement dans le plan équatorial, comme attendu, suivant une distribution de forme elliptique et qu'il en est de même sur les bords latéraux du contact avec des intensités plus importantes de sorte que transversalement la distribution présente deux maxima (figure 35). En roulement à vitesse croissante, les pressions normales perdent leur symétrie longitudinale pour croître vers l'avant de la zone de contact.

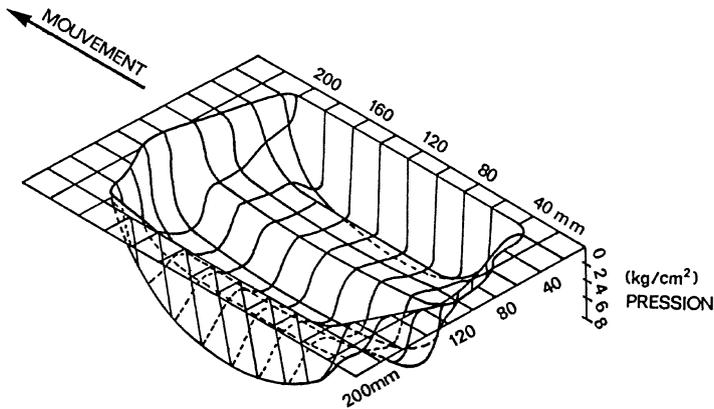


Figure 35 : Distribution des pressions dans la zone de contact entre un pneumatique à bande de roulement lisse et une surface rigide et plane.

Même en l'absence de couple de traction ou de freinage à transmettre, la zone de contact est le siège de contraintes de cisaillement longitudinales et transversales. Ces contraintes ont pour origine le fait que la surface externe d'un pneumatique n'est pas développable et qu'à l'interface, l'adhérence empêche les tendances aux compression et élongation de la bande de roulement induites par l'écrasement du pneumatique. Une étude détaillée des efforts tangentiels longitudinaux a permis de mettre en évidence une distribution de forme sinusoïdale avec annulation des contraintes aux limites avant et arrière, ainsi qu'au

centre, les compressions étant localisées dans la première moitié de la zone de contact et les tractions dans la seconde, à l'arrière.

Quant à la contrainte de cisaillement latérale, nulle à l'entrée de la zone de contact, elle augmente progressivement, passe par un maximum pour ensuite décroître jusqu'à s'annuler à la limite arrière du contact. Compte tenu du fait que le coefficient de frottement n'est pas infini, ces cisaillements provoquent l'apparition de microglissements, souvent appelés glissements secondaires, dont les amplitudes n'excèdent pas un dixième de millimètre. Ces glissements sont donc sans comparaison avec ceux provoqués, et déjà longuement décrits (figures 12 et 24 - article I) lorsque lors du roulement le véhicule accélère, freine ou vire. Il s'agit là des glissements appelés primaires, par opposition aux précédents, et aussi parce que leurs amplitudes sont beaucoup plus importantes et qu'en tout premier lieu, ils sont responsables de l'usure.

Rappelons que quel que soit le type de sollicitations que supporte le pneumatique, si un élément de caoutchouc entrant dans la zone de contact a été préalablement étiré par freinage ou comprimé par accélération, il reste dans le même état de déformation durant tout son séjour dans la région d'adhérence de l'interface. Il en résulte un écart, entre la distance effectivement parcourue et le nombre correspondant de rotations du pneumatique, appelé communément rampement ou pseudo-glissement. Ainsi, la vitesse de déplacement vraie et la vitesse circinférentielle du pneumatique dans le plan de la zone de contact ne sont pas égales, leur différence rapportée à la vitesse de roulement du pneumatique définit le taux de pseudo-glissement qui, selon Adolf Schallamach, représente d'une certaine manière la proportion d'énergie dissipée au sein de l'interface pneumatique-chaussée.

1.5. Résistance au roulement

Lorsqu'un pneumatique roule, on observe rapidement son échauffement, par suite de la conversion d'une énergie mécanique en chaleur (figure 36). L'énergie ainsi dissipée représente environ 7 % de l'énergie totale consommée par un véhicule de tourisme roulant à 80 km/h, ce qui, compte tenu de la faiblesse du rendement du moteur, équivaut encore actuellement à un tiers de l'énergie disponible. On comprend donc pourquoi un très grand nombre d'études ont été entreprises afin de déterminer les différents facteurs responsables de ces pertes et leurs effets respectifs, en vue de réduire l'énergie dissipée dans un pneumatique dont on a estimé qu'une diminution de 4 % entraînerait une baisse d'environ 1 % de la consommation en carburant.

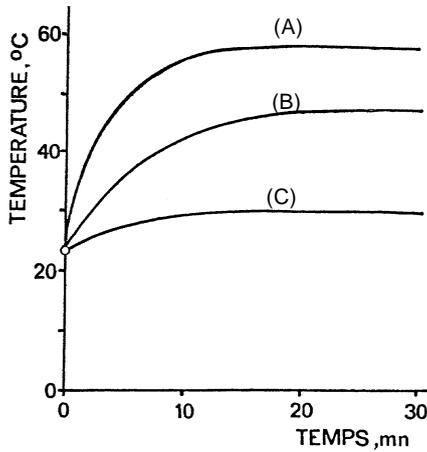


Figure 36 : Montée en température en divers points d'un pneumatique à carcasse radiale à 80 km/h :

A : Épaulements,

B : Air contenu, et

C : Surface de roulement.

L'énergie totale dissipée dans le mouvement d'un véhicule, rapportée à la distance parcourue, est un scalaire ayant la dimension d'une force que l'on appelle communément résistance au roulement, laquelle peut également être définie comme la puissance dissipée rapportée à la vitesse de déplacement. Historiquement, les physiciens et ingénieurs ont tenté d'expliquer l'évidence d'une telle résistance au roulement par un certain nombre de mécanismes différents. Dès 1785, le français Charles Augustin Coulomb attribuait ce phénomène à la variation d'énergie potentielle que subissait une roue rigide en surmontant les aspérités du chemin de roulement. On sait aujourd'hui qu'il n'en est rien, puisqu'une résistance au roulement est mesurable sur les surfaces les plus lisses. En 1875, l'anglais Osborne Reynolds émit l'idée supplémentaire de l'existence de glissements dans la zone de contact entre un solide roulant et une surface déformable pour justifier l'écart entre la distance parcourue par la rotation d'un cylindre et la longueur de sa circonférence. Cette hypothèse fut réfutée par l'anglais David Tabor en 1955 (il n'y a donc pas si longtemps), qui montra, par le roulement d'un cylindre sur une surface de caoutchouc, que ces effets de glissement, bien que réels, étaient négligeables, l'écart observé par Reynolds résultant de la déformation du substrat. Il a été largement établi depuis que la principale origine de l'énergie dissipée dans le

pneumatique est l'hystérésis des matériaux constitutifs, à savoir caoutchoucs et textiles polymériques, du pneumatique lui-même, les autres mécanismes tels que, adhésion entre pneumatique et chaussée, freinage aérodynamique, déformation du revêtement routier, vibrations, etc., ayant tous des effets de moindre importance.

Au début des années 1980, il a été estimé, en pratiquant une analyse thermographique, que les pertes par hystérésis dues aux modifications de forme du pneumatique en rotation sont à l'origine des 90 à 95 % de la quantité de chaleur produite, dont deux tiers par l'écrasement cyclique des matériaux de la carcasse et un tiers par les déformations de la bande de roulement provoquées par la macrotecture de la chaussée, les 5 à 10 % restants résultant des frottements dans la zone de contact. Ainsi la bande de roulement intervient pour 40 %, par déformation et glissement, dans l'énergie calorifique produite par le pneumatique. Il convient de préciser que les pourcentages d'énergie dissipée, que l'on peut attribuer aux différentes parties d'un pneumatique, sont relatifs aux composites câbles-caoutchouc car il est quasiment impossible de déterminer quelle part revient à chacun des deux types de constituants, compte tenu des grandes différences de leurs propriétés mécaniques.

Les différents paramètres régissant la part de la résistance à l'avancement d'un véhicule due exclusivement aux pneumatiques peuvent être classées en deux grandes catégories qui concernent :

- les caractéristiques du pneumatique lui-même (architecture, forme, dimension, poids, nature des différents constituants, dessin de la bande de roulement, ...), et
- les modalités de son utilisation (charge, pression, écrasement, vitesse, conditions de conduite, températures ambiante et de fonctionnement, distance parcourue, texture du revêtement routier, présence d'eau, ...).

1 - Influence des paramètres liés au pneumatique

De tous les facteurs, ce sont vraisemblablement la formulation et la mise en œuvre des mélanges caoutchouteux qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'études, dans le but de diminuer les pertes par hystérésis directement responsables de la résistance de roulement, sans pour autant faire décroître dangereusement l'adhérence sur sol mouillé. En effet, sur une surface grasse ou humide, les forces d'adhésion sont considérablement réduites, de sorte que la quasi totalité de l'énergie dissipée résulte des pertes par frottement interne (hystérésis) au sein de

l'élastomère, ce qui a conduit très tôt à l'idée d'utiliser des caoutchoucs à fortes pertes pour la bande de roulement afin d'en augmenter la résistance au glissement, tout en constatant la conséquence néfaste sur la consommation de carburant. La philosophie dans les années 1960 était simple : tout mélange présentant un fort amortissement lors d'un test de rebond était supposé apte à l'utilisation pour fabriquer la bande de roulement du pneumatique. Depuis cette époque, comme on l'a déjà signalé, des compromis ont été trouvés en coupant les matériaux synthétiques, dont l'utilisation fut préconisée pendant la seconde guerre mondiale, avec du caoutchouc naturel.

Bien que la nature du mélange polymérique prédomine devant celle des autres ingrédients tels que charge, huile et noir de carbone, ceux-ci ont fait l'objet d'études particulières afin d'en déterminer les effets sur les propriétés mécaniques (dureté, module d'élasticité, facteur de perte) et tribologiques (coefficient de frottement, résistance au roulement et à l'abrasion) des mélanges caoutchouteux. Un grand pas en avant a été réalisé, il y a une dizaine d'années, par l'anglais R. Bond qui mit en évidence que la déformation de la bande de roulement par les aspérités du revêtement de chaussée, en phase de glissement, se caractérise par des fréquences relativement hautes (de l'ordre de 0,05 à 1 MHz) et des températures élevées (de 100 à 150°C), tandis que la déformation en phase de roulement s'effectue à des fréquences inférieures à 120 Hz et

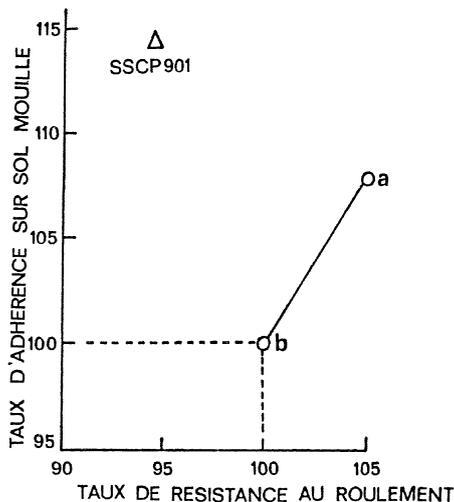


Figure 37 : Taux d'adhérence sur sol mouillé en fonction de la résistance au roulement pour deux copolymères styrène-butadiène traditionnels étendu à l'huile (a) ou non (b) et pour le nouveau matériau SSCP901.

à une température voisine de 50°C, pour un véhicule de tourisme. Ces considérations ont permis de mettre au point un nouveau copolymère styrène-butadiène, référencé SSCP901 dans la figure 37, lequel présente la particularité de produire de fortes pertes viscoélastiques à fréquence et température élevées et de dissiper peu d'énergie à basse fréquence et température ambiante, et qui donc est capable d'assurer une bonne tenue de route sur chaussée humide tout en réduisant la consommation de carburant sur sol sec. Bien évidemment, pendant les dix années qui viennent de s'écouler, rien n'a été figé, des mélanges encore plus performants ont été mis au point, mais l'information est gardée secrète.

L'architecture, la dimension et la forme du pneumatique, les angles d'orientation de la roue ainsi que les caractéristiques géométriques de la bande de roulement sont des paramètres qui, pour certains d'entre eux, jouent un rôle non négligeable dans l'intensité de la résistance à l'avancement d'un véhicule. La carcasse à structure radiale, qui est flexible et dont la ceinture en acier réduit la dissipation d'énergie par cisaillement, produit, en plus des avantages déjà signalés, une résistance au roulement moindre que l'architecture diagonale, avec une diminution de l'ordre de 8 % pour les véhicules de tourisme et de 25 % pour les poids lourds. Il est connu, depuis une quarantaine d'années, que l'augmentation de la dimension extérieure d'un pneumatique plein entraîne une réduction des pertes par roulement, la force variant comme la puissance $- 2/3$ du rayon, résultat qui peut être vérifié aujourd'hui par le roulement d'une sphère sur un massif de caoutchouc.

Pour ce qui concerne plus particulièrement la structure radiale actuelle, les résultats des nombreuses expérimentations entreprises dans ce domaine ont souvent conduit à des conclusions contradictoires, toutefois, la tendance prédominante étant qu'une augmentation du diamètre extérieur provoque une très légère décroissance de la résistance au roulement. L'incertitude règne encore quant aux influences de la largeur de la jante de la roue et de l'épaisseur du pneumatique. Néanmoins, il est souvent constaté que les pneumatiques dits «taille basse» présentent une résistance au roulement sensiblement plus élevée que ceux de forme traditionnelle. Lorsque l'on augmente l'angle de dérive de la roue, les déformations sont amplifiées, auxquelles viennent s'ajouter les effets des forces de frottement de glissement, de sorte que la résistance au roulement est augmentée ; il en est de même, mais de manière beaucoup moins marquée, par accroissement de l'angle de carrossage.

Parmi les trois zones principales d'un pneumatique, à savoir talons, flancs et bande de roulement, c'est vraisemblablement cette dernière qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études et surtout donné le plus de résultats convergents. En particulier, il a été montré que la résistance au roulement est diminuée de façon notable lorsque l'on réduit la largeur de la bande ainsi que son épaisseur. Ainsi, un pneumatique usé, qui présente donc des sculptures moins profondes, consomme moins d'énergie ; en contrepartie, l'endurance kilométrique et le comportement sur sol mouillé sont diminués d'autant. Les motifs de la bande jouent également un rôle non négligeable : la fragmentation des sculptures fait décroître la résistance au roulement, par suite de la mobilité accrue des blocs d'élastomères dont l'indépendance et la flexibilité réduisent l'effort moteur nécessaire pour épouser la forme de la macrotexture du revêtement routier (figure 38). Bien évidemment, cette fragmentation ne peut excéder une limite supérieure, propre à chaque type de pneumatiques, au-delà de laquelle il apparaît une instabilité directionnelle très inconfortable et surtout dangereuse.

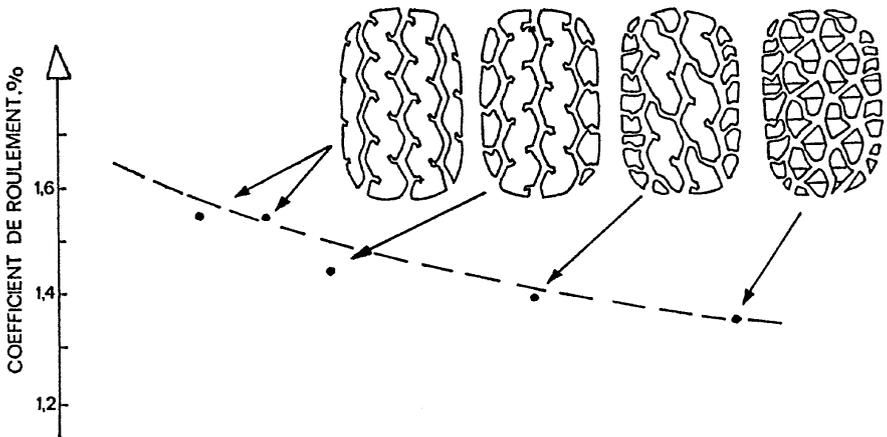


Figure 38 : Influence de la fragmentation des blocs de caoutchouc de la bande de roulement sur le coefficient associé à la résistance au roulement.

A ces paramètres de construction du pneumatique, précédemment évoqués, viennent s'ajouter l'influence des conditions d'utilisation ainsi que celle des variations du milieu ambiant.

2 - Rôle des conditions d'emploi et de l'environnement

En premier lieu, il convient de noter que la mise en rotation d'un pneumatique provoque un échauffement progressif jusqu'à l'obtention d'une température d'équilibre, laquelle est atteinte après une trentaine de minutes pour les véhicules de tourisme et après un temps trois à quatre fois plus long pour les poids lourds, et cela indépendamment de la dimension du pneumatique, de la charge, de la pression et de la vitesse. Au cours de cette phase de montée en température, la résistance au roulement diminue, comme on peut s'y attendre du fait de la réduction des pertes associées à l'élévation de température, de l'ordre de 1 % par degré Celsius jusqu'à la stabilisation.

Il y a environ une quinzaine d'années, il a été constaté qu'à l'équilibre de température, la résistance au roulement croît linéairement avec la force d'appui, et qu'il est possible de définir un coefficient de roulement (en rapportant la résistance de roulement à la charge d'appui), indépendant de la charge normale, contrairement au coefficient de frottement de glissement, dont la valeur pour des surfaces lisses et planes reste voisine de 0,01 quel que soit le type de véhicules. Pour ce qui concerne la pression de gonflage des pneumatiques, il a été mis en évidence l'augmentation quasi linéaire du coefficient de roulement avec l'inverse de la pression. Cette pression, dont la diminution accroît à la fois la consommation de carburant et le risque d'éclatement du pneumatique, est probablement l'aspect le plus négligé de l'entretien d'un véhicule. Il y a une dizaine d'années, une enquête entreprise aux États-Unis montrait qu'un véhicule sur quatre présentait au moins un pneumatique sous-gonflé, bien que l'air soit gratuit, comme s'en étonnait M. D. Rhoads, l'auteur de cette étude.

L'influence de l'écrasement du pneumatique, lequel peut être défini par la différence des rayons sans charge et sous charge, a fait l'objet de quelques études malgré le fait que cette déflexion élastique ne soit pas un paramètre intrinsèque puisque deux variables interviennent, à savoir, la charge d'appui et la pression de gonflage. Il a été trouvé qu'à écrasement constant la résistance au roulement augmente avec la charge supportée par les pneumatiques ainsi qu'avec la pression, résultat qui, compte tenu de la réduction de la résistance de roulement à pression croissante, prouve que l'effet d'écrasement prédomine sur celui de la pression de gonflage.

De tous temps, il a été constaté et même mesuré que la résistance au roulement croît avec le pourcentage de glissement, de sorte que les

conditions de conduite, telles que accélération, freinage, virage et vitesses élevées, sont également responsables de l'augmentation de l'énergie dissipée et par suite de la consommation accrue de carburant. Il a été souvent mis en évidence qu'en deçà de 80 km/h, le coefficient de roulement n'augmente pratiquement pas à vitesse stabilisée pour l'architecture radiale, par contre, au-delà de ce seuil, un accroissement important du coefficient de roulement est enregistré dont l'origine est attribuée à l'établissement de phénomènes vibratoires dissipatifs de très faibles amplitudes. La résistance au roulement est sensible à toute variation brutale de régime, qui déforme davantage le pneumatique et fait croître la superficie de la région de glissement dans la zone de contact, de sorte que l'énergie dissipée augmente aussi bien en phase de freinage qu'en phase d'accélération et cela d'une manière quasi identique pour la même intensité de couple imposé, comme le confirme la figure 39.

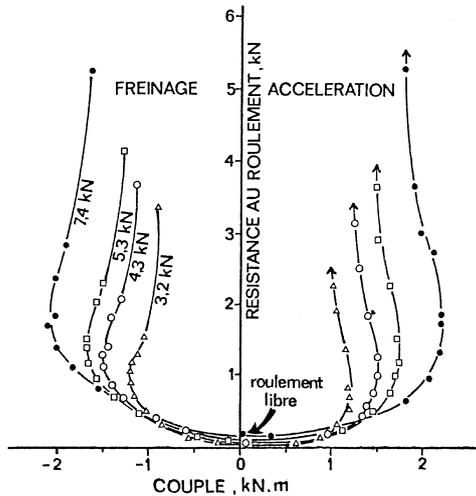


Figure 39 : Variation de la résistance au roulement en fonction du couple appliqué à la roue pour différentes charges d'appui.

L'influence des paramètres propres à la constitution du pneumatique ainsi que celle des efforts qui lui sont demandés sont modulées par le milieu extérieur et en particulier par le revêtement routier. Initialement considéré comme négligeable, il y a une cinquantaine d'années, l'effet de la texture de la chaussée sur la résistance au roulement est aujourd'hui très largement pris en considération (figure 40). Les nombreuses expériences entreprises tant au laboratoire que sur route

prouvent que c'est, de loin, l'augmentation des macro - et mégatextures - lesquelles déforment périodiquement la bande de roulement, provoquent une surcharge locale des blocs d'élastomère et produisent des micro-glissements dans la zone de contact - qui est responsable de l'accroissement de la résistance au roulement constatée. La macrotexture, dissipatrice d'énergie, est indispensable pour le drainage de l'eau en cas de pluie. Un grand nombre d'études ont été menées pour déterminer l'influence de la présence d'eau sur les caractéristiques que doit présenter le contact pneumatique-chaussée afin d'assurer au véhicule les meilleurs traction et tenue de route possibles ; en revanche, peu d'entre elles ont recherché l'incidence de l'élément liquide sur la résistance au roulement. En présence d'eau, il est constaté que l'énergie consommée est plus importante que sur sol sec, particulièrement aux fortes charges et vitesses élevées, d'une part, par suite de l'abaissement de la température qui augmente les pertes viscoélastiques et, d'autre part, du fait du travail d'évacuation de l'eau qui freine d'autant plus le véhicule que celui va plus vite, rappelons-nous qu'à la vitesse de 90 km/h, vingt-cinq litres d'eau doivent être éliminés par chaque pneumatique à chaque seconde.

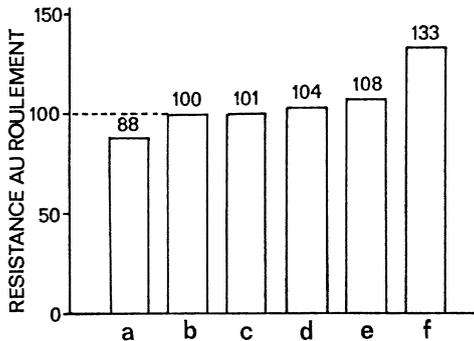


Figure 40 : Comparaison des résistances au roulement mesurées sur différentes surfaces : béton de ciment usé (a), béton de ciment neuf (b) choisi comme référence, enrobé à granulats très arrondis (c), enrobé à granulats arrondis (d), enrobé à granulats anguleux (e) et enrobé clouté (f).

2. LES CONDITIONS D'USURE D'UN PNEUMATIQUE

L'amélioration de la tenue de route des véhicules sur tous les types de chaussées et pour des conditions climatiques variées, la réduction des nuisances générées par le bruit de roulement, l'optimisation de la résistance au roulement afin de réduire la consommation de carburant,

sont des préoccupations permanentes des concepteurs des engins automobiles, des manufacturiers de pneumatiques et des techniciens des routes. Dans le coût de fonctionnement d'un véhicule, interviennent les fluides, tels que carburant et lubrifiants, les éventuelles pièces de rechange, les frais d'entretiens périodiques, et pour une part non négligeable le coût du remplacement des pneumatiques, lequel est essentiellement imposé, pour des conditions normales d'utilisation, par l'usure de la bande de roulement. C'est pourquoi, en complément des recherches entreprises sur la mécanique du roulement d'un pneumatique, un très grand nombre d'études a porté sur la détermination des différents paramètres promoteurs de la dégradation de la bande de roulement. Ces facteurs peuvent être classés en quatre catégories qui concernent :

- Le pneumatique lui-même : son architecture, la composition et les propriétés viscoélastiques du mélange caoutchouteux, la nature des câbles, le dessin de la bande de roulement, la pression de gonflage, la température de surface, la durée et les conditions de stockage après fabrication ;
- La roue : sa fonction motrice ou/et directrice, son alignement et l'angle de carrossage, son équilibrage, la charge supportée, la raideur de la suspension et l'effet des permutations sur le véhicule ;
- Le véhicule et son utilisation : vitesse, distance parcourue, habitudes du conducteur, telles que conduite souple ou accélérations excessives ou/et freinages tardifs et par suite brutaux ;
- Les conditions environnementales : topographie de la chaussée, nature du revêtement, sa rugosité, sa contamination (poussières, boue, pluie, neige, verglas), le climat, la saison, la température ambiante et l'humidité relative.

L'étude de l'influence de l'un quelconque des paramètres qui viennent d'être évoqués et qui contrôlent l'amplitude de l'usure impose de maintenir constants tous les autres, ce qui, pour des raisons technologiques et circonstancielles, n'est jamais le cas. C'est la raison pour laquelle la littérature scientifique et technique dans ce domaine fournit des résultats parfois contradictoires. Néanmoins, un certain nombre de tendances ont pu être dégagées et ont permis d'améliorer de façon notable la résistance à l'usure de la bande de roulement du pneumatique, et par conséquent sur sa durée de vie.

2.1. Méthodes d'évaluation de l'usure

L'usure est principalement étudiée suivant trois techniques différentes et complémentaires : à l'aide de machines spécifiques au laboratoire, sur des pistes aménagées pour des essais accélérés et sur routes afin de simuler des conditions d'utilisation proches de la réalité. Les machines de laboratoire sont fréquemment constituées d'un cylindre rotatif de grand diamètre dont les surfaces latérales, intérieure ou/et extérieure, sont recouvertes soit d'une couche abrasive soit d'éléments de revêtement routier et sur laquelle est appliquée, intérieurement ou extérieurement, une roue équipée d'un pneumatique. En variant les vitesses linéaires des deux systèmes cylindre et roue ou en modifiant l'angle des axes de ces deux éléments, comme cela est schématisé dans les figures 27B et 27C - article I, il est possible d'imposer des taux de glissement variés et donc de créer des conditions de roulement plus ou moins sévères. Sur circuits et sur routes, une situation voisine est réalisée à l'aide d'une cinquième roue à axe orientable montée sur un véhicule de tourisme spécialement appareillé ou sur une remorque. Toutefois, les ingénieurs ont très rapidement pris conscience de la complexité de la corrélation des différents résultats obtenus sur machines de laboratoire et sur route, par suite de l'intervention du grand nombre de facteurs environnementaux qu'il est difficile, si ce n'est impossible, de recréer au laboratoire lorsque les conditions d'usure sont sévères.

L'usure est mesurée, en fonction de la distance parcourue ou/et de conditions particulières de sévérité, par deux techniques principales : la perte de poids du pneumatique, qui est ultérieurement traduite en variation de volume lorsque l'on souhaite comparer différents élastomères, et l'amincissement de la bande de roulement. La première méthode, déjà préconisée il y a une cinquantaine d'années, qui nécessite certaines précautions de brossage, lavage et séchage avant pesée, présente le double avantage de délivrer une vitesse d'usure quasi constante avec la distance parcourue et d'être peu influencée par le dessin de la bande de roulement. En revanche, la détermination de l'amincissement à partir des mesures des profondeurs de la sculpture en divers points s'est avérée rapidement moins sensible en fournissant un taux d'usure excessif au début de l'essai de roulement (figure 41) par suite de la prise en compte, par cette méthode, de la modification de la forme des canaux et rainures provoquée par les premiers contacts avec le revêtement routier. Cette seconde méthode, malgré son inconvénient majeur, est tout aussi fréquemment utilisée que la première, parce qu'elle est plus rapide et donc plus économique et surtout parce

qu'elle permet une étude fine de la localisation de l'usure sur toute la largeur de la bande de roulement.

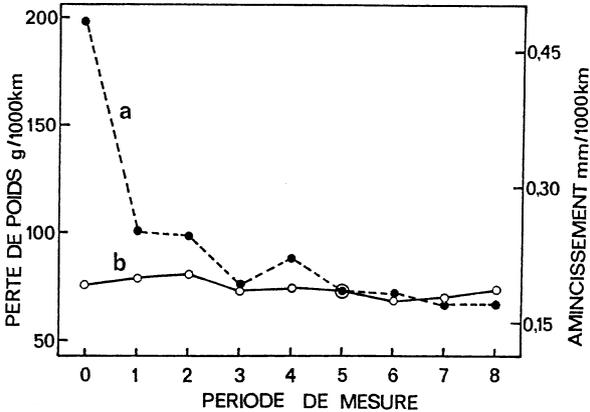


Figure 41 : Comparaison des taux d'usure déterminés pour le même pneumatique, à partir de la diminution de la profondeur de la sculpture (a) et de la perte de poids (b).

2.2. Mécanismes et conséquences de l'usure

Les deux techniques précédentes ont très tôt permis de mettre en évidence l'accroissement de la vitesse d'usure avec l'amplitude des glissements dans la zone de contact pneumatique-chaussée et particulièrement en situation d'enivrage qui peut conduire à un taux d'usure abrasive, par l'action des aspérités du revêtement routier, mille fois plus élevé qu'en ligne droite. Cette usure, qui endommage la couche externe de la bande de roulement sur une épaisseur de l'ordre de la fraction de millimètre, est reconnaissable par la formation d'un profil en «dents de scie» caractéristique. Comme cela a déjà été signalé, cette structure présente une orientation particulière, non directement dépendante de la direction du roulement, mais qui, en revanche, est étroitement liée au sens de glissement local puisqu'elle se crée perpendiculairement à celui-ci. La disposition des figures d'usure dépend ainsi de l'angle de carrossage de la roue et de l'intensité de la force latérale ou/et de l'angle d'enivrage, tandis que l'espacement des crêtes augmente et la structure devient plus grossière lorsque le pourcentage de glissement croît par accélération, freinage ou virage sévère (figure 42).

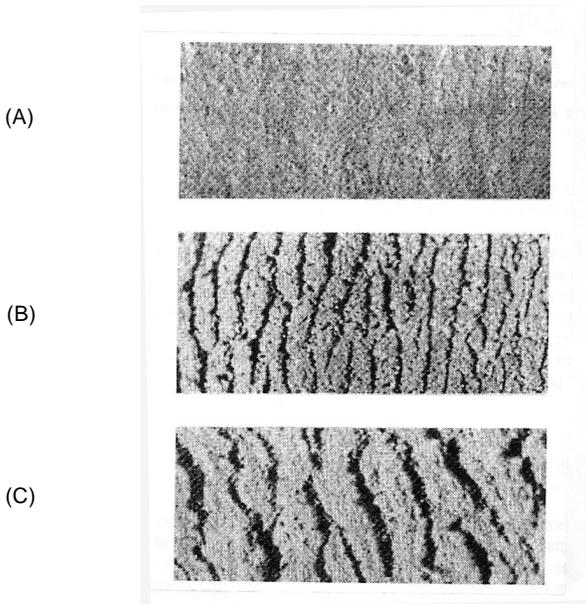


Figure 42 : Figures d'abrasion observées sur la bande de roulement d'un pneumatique en caoutchouc naturel pour des angles d'enravage, exprimés en degrés, égaux à : 0 (a), + 2 (b) et - 4 (c).

L'usure par abrasion, observable sur les pneumatiques de tourisme, tout comme sur ceux des véhicules poids lourds, composés de matériaux divers tels que caoutchouc naturel, caoutchoucs polybutadiène ou copolymère styrène-butadiène, noir de carbone, huile, paraffine, agents de vulcanisation et de protection, etc., produit des particules d'élastomère de forme quasi cylindrique dont le diamètre varie de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres et dont la longueur peut atteindre un millimètre. La formation de ces particules d'usure, qui ont même composition que les matériaux constitutifs de la bande de roulement peut être accompagnée d'émissions d'hydrocarbures et de composés soufrés gazeux.

Les débris d'usure les plus volumineux ne sont parfois que des agglomérats de très fines particules contenant des éléments chimiques tels que aluminium, silicium, calcium, potassium et fer, issus du revêtement routier. Ce phénomène a été identifié comme résultant de la dégradation mécano-chimique de l'élastomère, par fatigue, qui se manifeste par la formation d'une couche «liquide» à la surface de la

bande de roulement. Cette couche enrobe les divers produits présents sur la chaussée, qu'ils en proviennent directement par arrachement et fragmentation ou qu'ils y aient été apportés, et donne naissance à de fines particules qui, contrairement aux débris formés par abrasion, sont soluble dans le benzène.

Ce mode d'usure par fatigue est essentiellement observé lorsque les conditions de roulement sont peu sévères, c'est-à-dire pour un faible pourcentage de glissement, qu'il soit obtenu pour une accélération ou un freinage modéré, ou un angle d'environnement petit. Bien évidemment ces comportements sont modulés par la composition des mélanges caoutchouteux de la bande de roulement et la rugosité du revêtement routier. C'est ainsi qu'il a été constaté l'usure du copolymère styrène-butadiène par dégradation mécano-chimique au contact d'un béton autoroutier, alors que le caoutchouc polybutadiène, dans les mêmes conditions, produit des figures d'abrasion, ces dernières étant obtenues avec les deux mêmes matériaux dans le cas du contact avec une chaussée gravillonnée.

2.3. Influence des paramètres liés au pneumatique

La résistance à l'usure est très largement dépendante de la nature et de la quantité des divers ingrédients qui sont incorporés dans un composé caoutchouteux lors de sa mise en œuvre. Ces ajouts ont pour rôle essentiel de conférer au matériau un comportement viscoélastique adapté aux déformations que l'on souhaite imposer ou dont on sait qu'elles seront supportées, de sorte que l'un des paramètres clé de la résistance à l'usure est la température de transition vitreuse T_g du solide (figure 10 - article I), ou plus exactement l'écart entre cette caractéristique et la température d'utilisation. Ainsi le copolymère styrène-butadiène, dont la température de transition vitreuse T_g avoisine 217 K, présente un taux d'usure plus élevé en hiver qu'en été et se dégrade plus rapidement, pendant les mêmes périodes, que des mélanges copolymère styrène-butadiène / polybutadiène, dont les températures T_g varient de 194 à 208 K.

Deux autres facteurs jouent des rôles importants et complémentaires :

– le procédé et les ingrédients de la vulcanisation (soufre, matières organiques accélératrices, oxyde de zinc, acide gras, ...), cette dernière ayant pour effet d'augmenter les caractéristiques élastiques du matériau et par là-même de réduire les pertes visqueuses,

– et la technique de renforcement par ajout de noir de carbone et d'huile qui, en accroissant à la fois la dureté et la résistance au déchirement de l'élastomère, rend la bande de roulement moins sensible à l'usure par abrasion.

D'une manière générale, l'adjonction de noir de carbone, dont les propriétés physico-chimiques ou colloïdales conditionnent la dimension des particules et la forme des agglomérats, augmente les pertes par hystérésis, de sorte que la résistance à l'usure s'en trouve accrue. Les types de noirs de carbone présentant une grande surface spécifique (particules fines) et une haute structure (gros agrégats) favorisent la résistance à l'usure sévère. Il a été observé, il y a une quinzaine d'années, d'une part, que pour un degré de sévérité donné, le taux d'usure passe par un minimum à teneur en noir croissante et, d'autre part, que la quantité optimale de noir, à laquelle correspond une vitesse d'usure moindre, doit être augmentée lorsque la sévérité du test est accentuée. On peut ainsi déduire de ces résultats qu'un mélange performant pour les taux de glissement élevés, peut perdre une partie de ses qualités si les efforts imposés deviennent moins contraignant. On n'insistera jamais assez sur la nécessité d'ajuster avec précision le système de renforcement en fonction des conditions prévues d'utilisation : des teneurs en noir de carbone trop importantes ou trop faibles sont susceptibles de produire des effets néfastes, à savoir la réduction importante de la durée de vie de la bande de roulement.

Lorsque le glissement est faible et que l'usure s'opère essentiellement par un mécanisme de fatigue (dégradation mécano-chimique), un haut niveau de monosulfure, qui augmente la résistance à l'oxydation du caoutchouc, a pour effet d'accroître la durée de vie de la bande de roulement. En revanche, cette amélioration disparaît dès que le taux de glissement est amplifié, l'usure par abrasion devenant alors prédominante. Dans le cas du caoutchouc polybutadiène, il a été constaté une amélioration des propriétés anti-usure par réduction de la teneur en soufre. D'autres ingrédients, comme les huiles, avec lesquelles les mélanges sont étendus, jouent un rôle réducteur de la vitesse d'abrasion à la condition que le régime d'usure ne soit pas trop sévère.

Pour ce qui concerne l'architecture du pneumatique, la structure «radiale» s'est avérée rapidement plus performante que la structure conventionnelle «diagonale» par le simple effet de la raideur de la ceinture qui réduit l'amplitude des glissements dans la région arrière de la zone de contact avec la chaussée. Toutefois, il a été mis en évidence

que cette suprématie est amoindrie lorsque les pneumatiques à structure radiale équipent des engins poids lourds effectuant de fréquentes manœuvres dans un espace réduit, exercice qui sollicite de manière excessive la carcasse. Dans le même ordre d'idée, un défaut d'alignement des roues d'un véhicule de tourisme est la cause majeure des variations constatées de l'usure, dans des conditions de tolérances de montage pourtant couramment admises. Il a été récemment observé, sur les véhicules à traction avant, qu'un mauvais réglage de la suspension de l'essieu arrière, qui peut créer des angles de glissement ou/et de carrossage non négligeables, provoque un mode d'usure dit «diagonale» qui se traduit par un enlèvement du matériau caoutchouteux suivant des zones obliques régulièrement espacées sur toute la largeur de la bande de roulement (figure 43), réduisant ainsi grandement la durée de vie des pneumatiques.

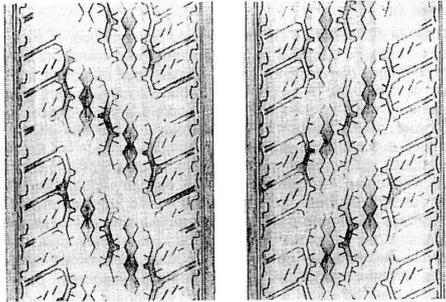


Figure 43 : Aspect schématique de l'usure dite «diagonale» pour les deux pneumatiques montés sur le même essieu. La symétrie des traces d'usure est parfaitement visible.

La relation directe entre l'accroissement du taux de glissement à l'interface pneumatique-chaussée et l'augmentation de l'usure aurait pu légitimement laisser présager une dégradation rapide des pneumatiques montés sur des roues motrices, et plus rapide encore sur des roues qui sont également directrices. En fait, il semble qu'il n'en est rien, comme ont pu le constater avec dépit les responsables de la société Firestone qui, dans les années 1980, se réjouissaient à la pensée que l'engouement des conducteurs américains pour les véhicules à traction avant allait raviver leur vente sur le marché de remplacement des pneumatiques. Ils ont très rapidement déchantés car les études d'usure, entreprises sur trois mille pneumatiques à architecture radiale montés sur des véhicules de tourisme, ont fait apparaître que la durée de vie d'un pneumatique était augmentée de manière significative lorsque l'on passait de la propulsion arrière à la traction avant. Peut-être faut-il voir dans ce

phénomène, l'illustration de l'expérience de Schallamach montrant dès 1952 que l'usure multidirectionnelle, telle celle que peut provoquer le roulement d'un train avant moteur, est moins sévère que l'usure unidirectionnelle induite par la propulsion arrière.

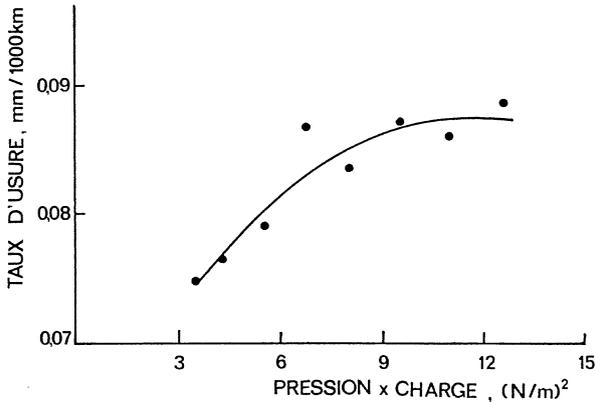


Figure 44 : Taux moyen d'usure d'un pneumatique à structure radiale en fonction du produit de la pression de gonflage par la charge supportée par le pneumatique.

La vitesse du véhicule, la charge normale supportée par la roue ainsi que la pression de gonflage du pneumatique sont des paramètres dont les influences sur la résistance au roulement ont été largement étudiées. Il n'en est pas de même quant à l'examen systématique de l'effet de ces mêmes facteurs sur la résistance à l'usure de la bande de roulement. Toutefois, une campagne d'essais, menée il y a une dizaine d'années, a permis de mettre en évidence l'augmentation du volume d'usure, rapporté à la distance parcourue, avec la charge supportée par chaque roue. Dans la plupart des cas, la pression de gonflage était ajustée afin de ramener l'écrasement du pneumatique dans le domaine des valeurs de son utilisation habituelle, et il a été constaté que le taux d'usure croissait avec le produit de la charge par la pression de gonflage, que les pneumatiques soient périodiquement permutés ou non (figure 44). La déflexion de la carcasse n'apparaît donc pas comme un paramètre influençant directement l'usure.

Une étude récente fait apparaître que la force latérale à laquelle est soumise un véhicule en virage peut être formalisée en fonction de la masse et de la vitesse de ce véhicule et du rayon de courbure de sa trajectoire. Prenant en compte des résultats plus anciens concernant la variation de volume d'usure, par unité de distance parcourue, propor-

tionnellement au carré de la force de réaction du pneumatique à une accélération, un freinage ou un changement de direction, il est déduit que :

- à charge constante, le taux d'usure varie comme la puissance quatre de la vitesse de roulement,
- à vitesse de roulement imposée, ce même taux d'usure est proportionnel au carré de la charge appliquée sur la roue et,
- à vitesse et charge maintenues constantes, le taux d'usure augmente comme l'inverse du carré du rayon de braquage du véhicule.

Pour chacun des cas précédents, l'accroissement du taux d'usure peut être interprété comme l'effet de l'augmentation du pourcentage de glissement à l'interface pneumatique-chaussée.

Comme cela a déjà été signalé, la sévérité du frottement et de l'usure dépend grandement de l'amplitude de l'angle de glissement, donc essentiellement des conditions de conduite, mais il ne faut pas négliger pour autant l'influence du relief de la région dans laquelle on circule le plus fréquemment, roulement en plaine ou dans des parties plus ou moins montagneuses et cela sans oublier l'influence de la nature et de la morphologie du revêtement routier ainsi que les effets de l'environnement (climat, saison, pluie, vent, température ambiante, ...).

2.4. Influence de la chaussée et de l'environnement

La prise de conscience du rôle que peut jouer l'état de surface géométrique de la chaussée sur l'amplitude de l'usure remonte à une trentaine d'années lorsqu'une étude menée aux États-Unis a permis de constater que le polybutadiène s'avérait plus performant que le copolymère styrène-butadiène sur les routes rugueuses du Texas, alors qu'au contact des revêtements plus lisses de la Californie, le classement était inversé. De même, il a été trouvé, en d'autres circonstances, que la résistance à l'usure d'un mélange chlorobutyl / styrène-butadiène est supérieure à celle d'un composé polybutadiène / styrène-butadiène sur une surface présentant des rugosités émoussées, alors qu'elle est inférieure lorsque les aspérités sont pointues. Cette inversion résulte des aptitudes opposées de ces deux matériaux à résister aux deux types d'usure par abrasion et par fatigue (dégradation mécano-chimique).

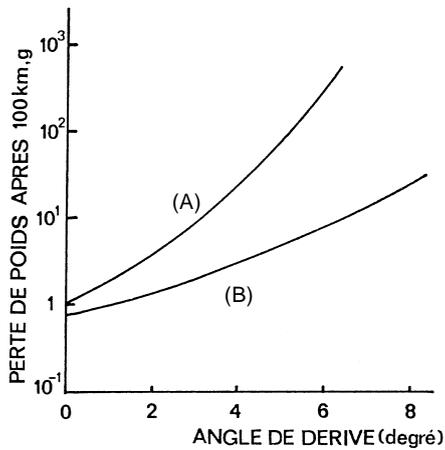


Figure 45 : Comparaison des vitesses d'usure d'une bande de roulement d'un pneumatique constituée d'un copolymère styrène-butadiène chargé en noir de carbone, au contact d'une microtexture

A : aiguë,

B : émoussée

Il est bien admis aujourd'hui que la détérioration des pneumatiques a pour principale origine le contact glissant entre la bande de roulement et la microtexture du revêtement routier, et pour une moindre part la présence de défauts d'uni, ou de nids de poule, d'ornières ou joints et autres imperfections diverses de dimensions voisines (mégatexture). D'une manière générale, les aspérités dures et aiguës produisent une abrasion par microcoupures, d'autant plus intenses qu'elles sont plus pointues, alors que les rugosités émoussées provoquent une usure apparemment plus douce par fatigue, laquelle, après un roulement prolongé, se manifeste par l'arrachement de volumineux morceaux de caoutchouc dû à l'amoinissement des propriétés mécaniques des sous-couches proches de la surface de la bande de roulement (figure 45). Dans le cas rare d'un frottement intense sur un revêtement lisse, qui peut être la conséquence d'un blocage de roue, le fort dégagement de chaleur qui en résulte entraîne une dévulcanisation du mélange caoutchouteux sur toute la surface de contact.

Il convient de signaler que les caractéristiques pétrographiques et minéralogiques des roches constituant le revêtement de chaussée sont susceptibles d'évoluer selon le climat, la saison et l'intensité du trafic routier. Par exemple, sous l'action du contact continu avec les

pneumatiques, les calcaires présentent une tendance marquée à se polir, la microtexture diminue donc, alors que la macrotexture augmente progressivement, l'usure concomitante du liant provoquant l'apparition de larges vides entre les granulats. En revanche, les granulats granitiques, plus résistants, conservent beaucoup plus longtemps leur microtexture acérée.

L'état de surface géométrique de la chaussée fluctue également avec la saison : en été, un trafic routier intense émousse les rugosités, ce qui a pour effet de réduire la résistance au roulement sur sol mouillé, donc diminue la sécurité, tandis qu'en période hivernale, le gel et la pluie accentuent la microtexture. Cette dernière observation, très bien mise en évidence avec les roches calcaires, résulte de l'attaque mécano-chimique des constituants de la chaussée à basse température par les agents atmosphériques (CO_2 , SO_2 , NO_2 , ...) dissous dans l'eau. Ainsi, après une chute de pluie, on commence par observer sur la chaussée mouillée une diminution du taux d'usure, liée à l'abaissement du coefficient de frottement, qui est suivie par une augmentation brutale, après assèchement du revêtement, due à l'action abrasive des aspérités nouvellement créées, la vitesse d'usure diminuant ensuite progressivement en même temps que se polit la microtexture.

La seule constatation de l'accroissement de l'usure après des intempéries conduirait naturellement à la conclusion que le roulement en période estivale ménage plus les pneumatiques que par temps froid et pluvieux. En fait, il n'en est rien, car les effets de modification de la texture du revêtement routier sont très largement contrariés par l'intervention d'un paramètre qu'il ne faut jamais négliger avec les élastomères : la température de la surface de la bande de roulement. Ce facteur dépend des températures de l'air ambiant et de la route, et des échauffements interne et externe du pneumatique résultant respectivement de l'écrasement périodique de la carcasse et de frottement de glissement dans la zone de contact. Il a été très souvent constaté l'augmentation de la vitesse d'usure avec la température de surface et il a été estimé que la perte en volume du caoutchouc, rapportée à la distance parcourue, croît de 2 à 3 % par degré Celsius. Cet effet de la température conjugué avec les propriétés viscoélastiques des mélanges caoutchouteux permet de comprendre aujourd'hui des observations datant de plus de quarante ans qui montraient que le caoutchouc naturel, dont la température de transition vitreuse est basse, s'usait moins en hiver que les caoutchoucs synthétiques, manufacturés à la même époque, dont on sait actuellement que les températures de transition

vitreuse étaient plus élevées. De même, la diminution de l'usure sur sol humide qui, à juste titre, peut être attribuée à la redistribution des contraintes dans la zone de contact, résulte pour une grande part de l'abaissement de la température de surface par le film d'eau.

Une étude récente met particulièrement bien en évidence les influences mutuelles des quatre paramètres principaux qui régissent la durée de vie des bandes de roulement des pneumatiques : la température de transition vitreuse du composé caoutchouteux, le degré de renforcement à l'aide de noir de carbone, la température à l'interface pneumatique-chaussée et la finesse de la microtexture du revêtement routier. Les vitesses d'usure de pneumatiques constitués de *cis*-polyisoprène, de copolymères styrène-butadiène, de *cis*-polybutadiène et de leurs mélanges, ont été mesurées sur routes pour différentes conditions de sévérité, en des lieux divers et à des époques de l'année variées. Les mélanges à basse température de transition vitreuse T_g étaient obtenus en ajoutant une forte proportion de polybutadiène dont la température T_g est de l'ordre de 170 K.

Les nombreux essais entrepris pour cette étude ont fait apparaître :

- dans tous les cas de figures, le taux d'usure est plus élevé quand la microtexture est très anguleuse et acérée,
- lorsque le degré de renforcement de l'élastomère est élevé, ce qui confère au matériau caoutchouteux des modules d'élasticité et dureté importants, la vitesse d'usure croît avec T_g , cette augmentation étant particulièrement marquée à basse température de l'interface pneumatique-chaussée,
- à faible degré de renforcement, le taux d'usure augmente avec T_g à basse température d'interface, alors qu'il diminue lorsque cette température est élevée. Ces différences de comportement ont été raisonnablement attribuées à la compétition entre les deux modes d'usure : l'usure par déchirement, qui prédomine aux faibles valeurs de T_g (comportement élastique) et l'usure par coupe pour les valeurs élevées de T_g (comportement visco-élasto-plastique).

3. CONCLUSION

La formulation des mélanges de matériaux caoutchouteux et autres conduisant à la conception d'un pneumatique est un art. C'est celui de faire appel à toutes les propriétés des polymères, ce qui conduit souvent à manipuler des concepts antagonistes, afin de réaliser un subtil

équilibre entre ces propriétés et aboutir à une structure composite. En effet, seule une structure composite permet à un pneumatique d'être rigide pour transmettre des efforts entre le véhicule et le sol, tout en étant suffisamment flexible pour assurer un contact de dimension non négligeable avec la chaussée.

Pour ce qui concerne la durée de vie du pneumatique, ou plus précisément celle de la bande de roulement, problème qui intéresse chacun d'entre nous, il faut retenir que cette usure est la conséquence directe de l'énergie de frottement de glissement dissipée à l'interface entre le pneumatique et le revêtement routier. Ne pouvant agir ni sur la qualité des pneumatiques montés sur les véhicules ni sur les propriétés des chemins qui vous mènent à l'endroit souhaité, le conducteur peut malgré tout intervenir par les conditions d'utilisation de son véhicule, en n'hésitant pas, par exemple, à sur-gonfler les pneumatiques en cas de transport de charges importantes ou/et en cas de longs trajets, deux situations qui conditionnent la température réelle de la surface du pneumatique dont l'élévation accélère la vitesse d'usure et décroît d'autant la durée de vie.

BIBLIOGRAPHIE

- M. BARQUINS : B.U.P., *La tribologie*, (1994), n° 764, pp. 793-822 ; (1994), n° 765, pp. 959-972. *Le collage*, n° 762, (1994), pp. 569-615. *Les polymères*, n° 743, (1992), pp. 509-530.
- M. BARQUINS : *Adhérence, friction and wear of rubber-like materials*, in «Wear and friction of elastomers» Denton/Keshavan editors, ASTM STP 1145, Philadelphia (1992) pp. 82-113.
- L. BATEMAN : *The chemistry and physics of rubber-like substances*, Applied Science Publishers Ltd, London (1963).
- M. BRÉDIMAS, M. BARQUINS et J.-P. QUESLEL : *Molécules géantes et caoutchouc*, Revue du Palais de la Découverte, vol. 19, n° 187 (1991) pp. 20-47.
- P. COMPAGNON : *Le caoutchouc naturel*, Éditions G.-P. Maisonneuve et Larose, Paris (1986).
- J.-D. FERRY : *Viscoelastic properties of polymers*, John Wiley & sons Inc., New York (1980).
- K. HALAUNBRENNER et A. KUBISZ : *Contact region of a hard ball rolling on a viscoelastic plate*, Journal of Lubrication Technology, vol. 90 (1968) pp. 101-105.

- D.-I. JAMES : *Abrasion of rubber*, Mac Laren and sons Ltd, London (1967).
- J. LE BRAS : *Éléments de science et de technologie du caoutchouc*, Éditions Techniques Coloniales, Paris (1951).
- H. LEHMAN : *Les civilisations précolombiennes*, Que sais-je, P.U.F., Paris (1977).
- J. MASSOUBRE : *35 années de pneu radial*, Caoutchoucs et Plastiques, n° 631 (1983) pp. 57-69.
- D.-F. MOORE : *The friction and lubrication of elastomers*, Pergamon Press, Oxford (1972).
- A.-D. ROBERTS : *Natural rubber science and technology*, Oxford Science Publications, Oxford (1988).
- A. SCHALLAMACH : *Le mécanisme d'usure du pneumatique*, Revue Générale du Caoutchouc, Vol. 36 (1959) pp. 1479-1486.
- J.-B. SERIER, A. VAN DYK et A. DIEZ : *Le caoutchouc en B.D.*, Éditions I.R.C., Paris, tome 1 (1985).
- J.-B. SERIER et A. DIEZ : *Le caoutchouc en B.D.*, Éditions I.R.C., Paris, tome 2 (1989).
- J.-B. SERIER : *Utilisation et symbolique du caoutchouc dans l'Amérique précolombienne*, Caoutchoucs et Plastiques, n° 706 (1991) pp. 29-31.
- F. TRYSTRAM : *Le procès des étoiles*, Éditions Seghers, Paris (1979).