

DOSSIER
TECHNIQUE



Le Pneumatique



Renfort - Matrice - Carcasse - Tringle - Caoutchouc - Adhérence - Dérive - Aquaplaning - Usure - Remplacement

Remerciements : L'auteur remercie les ingénieurs et techniciens des manufacturiers : en priorité Michelin, Goodyear, Dunlop et Yokohama, pour lui avoir transmis une partie de leur savoir et pour la qualité des échanges et des relations personnelles ainsi créées.



Le Pneumatique

Dossier créé avec la collaboration de l'École de la Performance, Nogaro.
www.ecoleperformance.com

François MONATH
Architecte véhicule

Chargé de cours à l'École de la Performance



1. Introduction.....	.....
1.A La mobilité.....	.....
1.B Son histoire.....	.....
1.C Enjeux économiques et environnementaux.....	.....
2. L'architecture d'un pneumatique.....	.....
2.A Les différents composants et leur fonctionnalité.....	.....
2.B Les matériaux.....	.....
2.C Les contraintes normatives.....	.....
3. Le contact pneumatique / sol.....	.....
3.A Remarque préliminaire.....	.....
3.B Principes de l'adhésion du pneumatique sur le sol.....	.....
3.C L'utilité de l'adhérence.....	.....
3.D Les différents types de sol et l'adhérence.....	.....
3.E Le climat et le pneumatique.....	.....
3.F Le bilan du contact pneumatique-sol.....	.....
3.G Le bruit de roulement.....	.....
4. Le véhicule et le pneumatique.....	.....
4.A Rappel de quelques notions.....	.....
4.B Les mouvements du véhicule sur le sol.....	.....
4.C Les critères de jugement d'un pneumatique sur une voiture.....	.....
4.D La roue.....	.....
4.E Le cas du pneumatique Moto.....	.....
4.F La spécificité du pneu Poids Lourds.....	.....
5. La fabrication d'un pneumatique.....	.....
5.A La préparation des mélanges de caoutchouc.....	.....
5.B Le façonnage des renforts.....	.....
5.C La préparation de la bande de roulement.....	.....
5.D La préparation des éléments complémentaires.....	.....
5.E Assemblage et Mise en Forme.....	.....
5.F La vulcanisation.....	.....
5.G Les contrôles.....	.....
5.H Les défauts de fabrication.....	.....
6- L'entretien et la Maintenance.....	.....
6.A La distribution.....	.....
6.B Recommandations à l'usage.....	.....
6.C Le montage.....	.....
6.D L'équilibrage.....	.....
6.E Les incidents et causes d'usure anormale, Détériorations.....	.....
6.F Comment poursuivre sa route ?.....	.....
ANNEXE.....	.....
BIBLIOGRAPHIE.....	.....

Remarque. Les figures incluses dans ce texte ont pour but d'apporter un appui pédagogique aux démonstrations. Les valeurs d'échelle indiquées sont purement illustratives et ne doivent pas être considérées comme des valeurs réelles.

1 — [INTRODUCTION]

1-A LA MOBILITÉ : raison d'être du pneumatique.

Basé sur les propriétés du latex, découvert au Moyen Âge dans la forêt brésilienne, le pneumatique n'a cessé, depuis son invention au 19^{ème} siècle, d'évoluer et de se développer. Ainsi, nous disposons actuellement d'un produit abouti, au comportement complexe, mais bien maîtrisé par des professionnels expérimentés. Son développement est lié à l'essor de l'automobile, à l'accroissement de notre mobilité et de notre vitesse de déplacement.

Depuis que le monde a pris conscience de la rareté de l'énergie, la mobilité, qui renvoie à la propriété de se déplacer dans un espace via un engin motorisé, est devenue une préoccupation majeure pour nos contemporains.

Notre mobilité a fait, au cours du temps, des progrès considérables. Preuve en est, l'homme parcourait en moyenne 5 kms/jour en 1936 contre 45kms/jour en 2006. Cela a été rendu possible grâce à l'optimisation de la vitesse des déplacements, via les progrès de la technologie relative aux transports. Ces progrès résultent directement de l'utilisation de la roue et de son corollaire : l'automobile.

Depuis le cercle de bois primitif, l'arrivée du pneumatique a révolutionné son emploi et permis le développement de cette caractéristique majeure de la mobilité actuelle : la vitesse.



Le pneumatique, indissociable de la roue est un organe majeur de notre mobilité. Il est partout présent, de la bicyclette à l'avion, en passant par la brouette, la tondeuse à gazon, le poids lourd, le tracteur agricole, etc. Chaque fois qu'il y a contact entre le sol et un mobile, le pneumatique est présent.

1-A.1 SA FONCTION :

Le pneumatique est le seul organe qui établit le contact du véhicule avec le sol. Cela paraît une évidence, mais encore faut-il en avoir conscience. Ce contact avec le sol va permettre au véhicule de se mouvoir.

Le pneumatique demeure un organe complexe, dont la mise en œuvre des différents composants fait appel à de nombreuses applications scientifiques comme la mécanique, la résistance des matériaux, la chimie. Le pneumatique est un élément élastique, pouvant être comparé à un ballon rempli d'air, dont les déformations vont dépendre des efforts appliqués au véhicule lors de son déplacement sur le sol. Les fonctionnalités principales du pneumatique sont les suivantes :

- **porter** la masse du véhicule : il s'agit d'un effort vertical. Le pneumatique va se déformer pour mettre en œuvre une adhérence. Le pneumatique est aussi le premier élément de suspension, véritable filtre vibratoire des sollicitations induites par les imperfections de la route.

- **démarrer, accélérer, modifier** la vitesse : c'est un effort longitudinal d'accélération, lié au couple moteur appliqué à la roue.

- **ralentir, décélérer, freiner, arrêter** : c'est un effort longitudinal de freinage.

- **modifier** sa trajectoire, **prendre des virages, manœuvrer** : il s'agit d'un effort transversal induit par la force centrifuge et le braquage des roues directrices.

Le pneumatique devra remplir ces tâches, sans générer une trop grande résistance au roulement et ce, quelles que soient les conditions de sol (sec, mouillé, irrégulier, déformé, etc.) et de température (allant des froids du grand nord jusqu'aux chaleurs des régions désertiques.)

Les réactions à ces sollicitations vont définir le comportement dynamique du véhicule, en particulier sa « **tenue de route** » et son « **confort** ». Ce lien obligatoire, cet attachement indéfectible, entre la voiture et le pneumatique, montre l'impérative nécessité de la bonne adéquation entre ces deux entités.

Organe de liaison entre la route et le véhicule, le pneumatique doit être vu comme un élément majeur intervenant dans la sécurité de nos déplacements. Comme de nombreux organes mécaniques entrant dans la composition d'un véhicule, le pneu est soumis à l'application de normes et au respect de règlements pour sa définition et son emploi.

1-A.2 LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN PNEUMATIQUE.

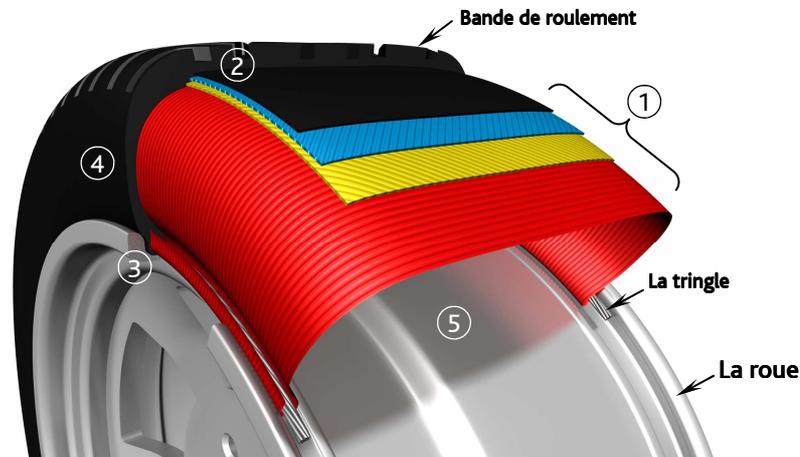


Fig. 1.1

Un pneumatique est composé de cinq parties principales :

- ① La carcasse, composée de fils croisés, enduits de caoutchouc, qui vont transmettre les efforts définis au § précédent.
- ② La bande de roulement en caoutchouc, qui assure le contact avec le sol.
Lors de la fabrication, carcasse et bande de roulement sont assemblées à l'aide d'un mélange de caoutchouc naturel et synthétique à l'état « cru », qui doit ensuite être « cuit » pour obtenir les caractéristiques finales d'élasticité ainsi qu'une parfaite homogénéité. Cette opération de cuisson est appelée : vulcanisation.
- ③ L'accrochage sur la roue, via un câble appelé tringle.
- ④ Les flancs, faisant la liaison entre la bande de roulement et l'accrochage à la roue.
- ⑤ L'air qui maintient l'ensemble dans sa forme d'origine, celle d'un tore et lui donne sa fonction pneumatique.

1-A.3 SES CONTRAINTES.

Le pneumatique s'accommode des conditions climatiques et de roulage les plus extrêmes. Bien qu'il soit souvent « oublié », compte tenu de sa couleur discrète et de l'entretien réduit qu'il requiert, cet organe demande malgré tout une surveillance minimale pour garantir un niveau de sécurité optimal.

Le pneumatique ne peut être dissocié d'un autre organe qui complète la transmission des efforts au véhicule : la **roue**. Roue et pneumatique doivent former un ensemble homogène, parfaitement adaptés l'un à l'autre. Plus largement, le pneumatique et sa roue ne peuvent être séparés du véhicule qu'ils équipent.

Le pneumatique s'use en service. Les erreurs de conduite peuvent provoquer des dommages plus ou moins importants et dangereux. La crevaison reste l'incident le plus courant. Le pneumatique est un élément majeur intervenant dans la sécurité de nos déplacements, et il n'est pas inutile de rappeler que sur une voiture pesant 1500daN et roulant à 100km/h, la surface de contact au sol, surface qui va transmettre tous les efforts énoncés précédemment, est équivalente à la surface de 4 semelles de chaussures.....ou 4 x 250cm².

De par ses composants, le pneumatique sera sensible à deux paramètres :

D'une part la température de l'air et du sol et d'autre part la qualité du sol sur lequel il va rouler : consistance, granulométrie, état de surface, etc..... Le pneumatique doit vivre avec la route sur laquelle il roule.

Le pneumatique est soumis à plusieurs impératifs :

- C'est un organe de sécurité. Il doit avoir une capacité de résistance mécanique minimale, y compris lors d'une utilisation anormale et imprévue.
- Être économiquement performant.
- Être conforme aux normes et règlements en vigueur.
- Être compatible avec la roue qui lui sert de support

Remplir ces fonctions, dans le cadre des impératifs demandés, aboutit à un compromis, le pneu universel ne peut exister. La position de ce compromis va introduire un typage du pneumatique et l'orienter vers un usage défini : un pneu pour chaque condition d'utilisation : Performance, 4x4, Mobilité, Hiver, Coût réduit, Durée de vie, etc....

1-B SON HISTOIRE

1-B.1 LES PRÉMICES DU PNEUMATIQUE.

A l'instar de nombreuses évolutions, l'histoire de la mobilité, des sciences et techniques qui lui sont liées, s'est faite par le raisonnement, mais aussi beaucoup par le hasard et un bon sens lié à des qualités d'observation.

Ainsi, la naissance du pneumatique remonte à l'année 1845, date à laquelle son créateur **Robert W. Thomson** dépose un brevet détaillé et circonstancié d'un système prévu pour équiper les roues des voitures, à l'époque encore tirées par des chevaux, afin de s'affranchir du mauvais état des routes d'Écosse.

Ce brevet Cf. fig. 1.2 décrit une ceinture élastique formée de tissus noyés dans du caoutchouc, remplie d'air et placée autour de roues en bois. L'ensemble était protégé par une bande de cuir, faisant office de bande de roulement. Le système prévoyait même des rivets, fixés dans le cuir, en guise de protection et pour limiter les pertes d'adhérence.

Le principe, qui consiste à enfermer l'air dans une chambre en caoutchouc étanche, était déjà connu depuis plusieurs siècles par les Indiens d'Amazonie qui récoltaient le latex d'hévéa. La nouveauté fut d'enfermer cette chambre dans une enveloppe résistante, qui la protège et limite son expansion.

En 1839, les travaux de **Goodyear**, quincailleur dans le Connecticut aux Etats-Unis, aboutissent à la mise au point du principe de la vulcanisation, sorte de cuisson faisant passer le latex de l'état plastique à l'état élas-

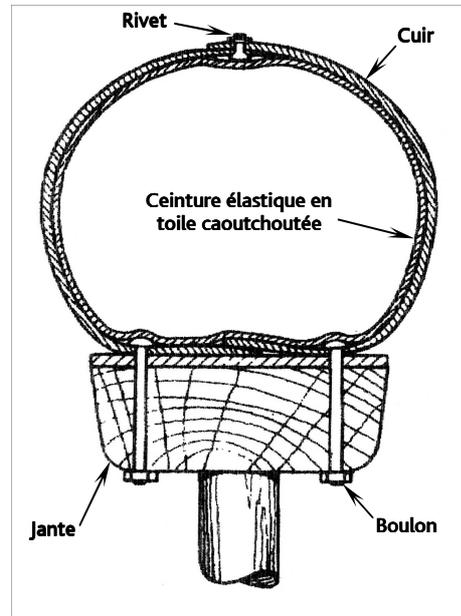


Fig. 1.2
Le pneu original de Thomson de 1845.

tique, insensible au chaud et froid. Ce procédé, permet l'utilisation industrielle du latex au moment de l'essor de la bicyclette et de l'automobile. Ce fut le vrai départ de la généralisation de son emploi et de sa prospérité.

1-B.2 AUX ORIGINES DU CAOUTCHOUC...

Avant d'aller plus loin, quelques mots sur l'origine du caoutchouc, élément clé de la composition d'un pneumatique. Cette matière était déjà connue des Mayas, Indiens de l'Amérique Centrale, ce sont eux qui nomment le liquide sortant d'un arbre, poussant à l'état naturel dans la forêt amazonienne : l'hévéa, **cahutchu** ou « bois qui pleure ». Cet arbre, au tronc droit et pouvant atteindre une hauteur de 20m, possède sous son écorce plusieurs canaux, baptisés canaux lactifères, dans lesquels s'écoule un liquide blanchâtre : le **latex**. Si l'on incise ces canaux, le liquide s'écoule et a la propriété de sécher et former une pellicule protectrice, une sorte de pansement.

La première étude scientifique sur les propriétés du latex est l'œuvre du français **Charles de la Condamine** lors d'une expédition dans la forêt amazonienne de 1736 à 1744.

Dès 1826, **Faraday**, devant des échantillons de latex coagulé, démontre que le caoutchouc est un hydrocarbure contenant 5 atomes de Carbone et 8 atomes

d'hydrogène.

En 1876, un planteur britannique **Wickham**, fait sortir clandestinement des graines d'hévéa du Brésil pour les implanter à Ceylan, en Indonésie, en Malaisie, au Vietnam, et installer de véritables plantations de production et de pré-traitement.

Matière végétale à l'origine et de provenance exotique, la crainte d'en être privé en cas de conflit conduit à rechercher une autre source d'approvisionnement. C'est en 1876, que le français **G. Bouchardot** réussit à créer par synthèse une substance analogue au caoutchouc naturel, à base d'isoprène.

En 1887, l'anglais **W.A. Tilden** parvint à produire de l'isoprène à partir d'essence de térébenthine.

Mais c'est en Allemagne, en 1909, avec la découverte chez Bayer par **F. Hofmann** de l'isoprène, par synthèse de substances d'origine minérale, que se développe l'industrie du caoutchouc de synthèse. C'est la première forme imparfaite de caoutchouc artificiel.

A la même époque, **Kondakov**, chimiste russe, met en œuvre un polymère élastique à partir d'un hydrocarbure plus facile à fabriquer : le diméthyl-butadiène. C'est à partir de cette base qu'Hofmann va fabriquer en

1916 un méthyle-caoutchouc.

Après le pétrole, le caoutchouc, qu'il soit naturel ou synthétique, est probablement la matière qui a conquis la plus grande place dans l'économie mondiale.

1-B.3 LA RENAISSANCE DU PNEUMATIQUE.

C'est en 1889, soit 44 ans après Thomson, que **John Dunlop**, vétérinaire à Belfast, dépose un brevet semblable, bien que moins précis.

Comme le tricycle de son fils avec des roues en fer faisait trop de bruit sur les pavés, il a cherché une solution pour limiter ce bruit. Il remplace les roues de fer par des roues en bois, auxquelles il fixe par collage, une feuille en caoutchouc mise sous la forme d'un tube, le tout est entouré d'une enveloppe en tissu de coton et gonflée avec une pompe. J. Dunlop serait aussi l'inventeur de la valve.

En revanche, si le système de J. Dunlop apporte une amélioration magistrale du confort, elle apporte un souci nouveau : celui de la crevaison.

Si l'invention de Thomson est arrivée beaucoup trop tôt, celle de Dunlop profite d'un facteur nouveau et porteur : l'invention et le développement de l'automobile. En effet, un an plus tôt, en août 1888, **Mme Bertha Benz** a fait ce qui est considéré comme le premier voyage en automobile, avec une voiture à trois roues, équipées d'une roue avant en caoutchouc plein.

Quelques temps plus tard, un fabricant de vélos situé avenue de la Grande Armée à Paris, **Adolphe Clément**, négocie avec Dunlop une licence de fabrication, ce qui lui permet d'équiper ses vélos de « bouées de sauvetage » en raison de la couleur blanc-beige du caoutchouc naturel.

En 1891, les frères **Edouard et André Michelin**, confrontés à la réparation d'un pneumatique, probablement d'origine Clément, met en évidence la complexité de l'intervention. Les bandages étant collés sur la jante, une réparation demande beaucoup de soins et de temps, plus de 15h. De cette constatation, découle l'invention du pneumatique démontable pour vélo. Michelin dépose ainsi trois brevets permettant de séparer les fonctions de la jante et du pneumatique.

Ce principe de pneumatique démontable, suite aux roula-ges et à leur retour d'informations, est amélioré par l'introduction du principe de la tringle, permettant de sécuriser la fixation du pneu et de mieux répartir les efforts sur la jante.

Dans la foulée, en juin 1895, les frères Michelin, forts de l'expérience acquise sur le vélo, créent le premier pneumatique pour automobile. Comme pour le vélo, ils veulent démontrer la supériorité du principe en participant à la course Paris-Bordeaux-Paris. Pour ce faire, ils construisent leur propre voiture « **l'Éclair** » Cf. fig.1.3 et

réussissent malgré de nombreuses crevaisons à faire le périple dans le temps imparti. Bien que l'Éclair soit le dernier concurrent classé, ce résultat eut des conséquences majeures. Il montrait qu'il était possible de faire rouler une voiture sur de l'air.



Fig. 1.3
l'Éclair des frères Michelin

Mais comme toute nouveauté technologique, l'idée n'est pas adoptée très facilement, tout au moins selon la revue « France Automobile » du 12 avril 1896, dans laquelle nous trouvons sous le titre : « Pneus partout », l'entrefilet suivant : « Les roues constituent certainement les organes essentiels de toute voiture automobile et en présence des résultats parfaits que l'emploi des bandages pneumatiques a donné pour ces derniers, il est difficile de comprendre l'opposition qu'a rencontrée chez certains constructeurs leur emploi pour l'automobile. »

En 1902, apparaît la première bande de roulement « sculptée ». Deux ans plus tard, les premiers essais de noir de carbone comme additif furent entrepris. L'objectif était de donner plus de résistance à la gomme, notamment à l'abrasion. C'est donc à partir de 1904 que les pneus sont passés de la couleur blanc-beige du caoutchouc naturel, au noir que nous connaissons actuellement. Cf. fig. 1.4

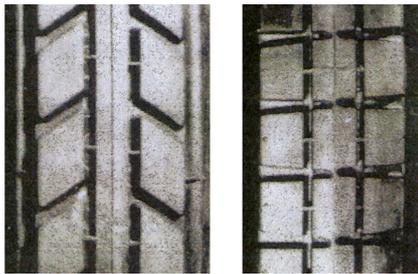


Fig. 1.4

En 1918, apparaissent les bases de la première standardisation des dimensions de pneu. Compte tenu de l'augmentation, à cette époque, du nombre de pneumatiques en exploitation, les incidents, multiples et divers, vont générer de nombreuses évolutions. L'une d'elles concerne le tissu de coton.

Sous l'effet de la charge et des nombreuses flexions de flanc lors du roulage, le tissu classique se déformait, se vrillait, voire se déchirait. **John Fullerton Palmer** modifie le tissage en utilisant un gros fil de chaîne qui encaissera les efforts dans le sens de leur longueur. Ces fils de chaîne sont maintenus en position par de fins fils de trame dont le seul but est de maintenir ensemble les fils de chaîne. Cette technique prit le nom de tissu « **Cord** »

En 1923, apparait le premier pneumatique à basse pression, « le pneu Ballon ». Selon les dimensions et la charge supportée, cette pression pouvait atteindre 7bars, ce qui le rendait sensible à l'éclatement. La réduction de pression a permis de mettre en évidence l'importance du comportement de la bande de roulement et de ses sculptures.

Jusqu' en 1931, le textile utilisé pour la confection des nappes est le coton. C'est à cette date qu'apparaissent l'emploi de nouveaux matériaux comme la Rayonne, encore appelée « soie artificielle ». Ce combiné chimique est issu de la cellulose. Cela a permis de s'affranchir des fluctuations d'approvisionnement du coton, de réduire la température interne du pneumatique en fonctionnement, et à diamètre égal d'augmenter la charge de rupture.

Pour s'affranchir des inconvénients du coton, Michelin lance en 1936 le « Metallic », premier pneumatique dans lequel le tissu coton est remplacé par des fils d'acier.

Le 4 juin 1946, Michelin dépose le brevet du pneumatique à carcasse radiale. Jusqu'à cette date la structure du pneumatique était constituée de couches textiles croisées en diagonale. Près d'un siècle après le brevet de Thomson, Michelin apporte une nouveauté technique qui est une véritable révolution : le pneu « Radial », à carcasse acier. Cette évolution technique, qui dissocie le travail du flanc de celui de la bande de roulement, va faire progresser de façon sensible le comportement routier des véhicules et leur sécurité. Ce nouveau principe fait chuter la résistance au roulement, tout en permettant une réponse dynamique plus sûre et une meilleure résistance à l'usure.

Simultanément, apparaissent les premiers essais d'un nouveau matériau pour la structure : le nylon, première fibre synthétique, qui va progressivement supplanter la rayonne.

En 1949, a lieu la présentation d'un pneu « Tubeless » ou sans chambre à air par la société américaine **Goodrich**. La chambre à air est remplacée par une feuille de gomme très élastique et étanche à l'air, directement fixée à l'intérieur de l'enveloppe. Restait à obtenir une parfaite étanchéité au niveau de la jante et entre l'enveloppe et la jante. Cette technique, reprise par Goodyear en 1954, s'est quasi généralisée aujourd'hui.

En 1965, Michelin sort le premier pneumatique asymétrique : l'XAS pour répondre aux besoins des véhicules rapides.

Depuis cette date, la technologie du pneumatique a continuellement progressé mais sans profondes modifications sur son principe. Seule évolution notable, les diamètres. Pour diminuer la hauteur du centre de gravité des véhicules, ils se sont constamment réduits et la bande de roulement élargie. Mais actuellement, la tendance est de ré-augmenter les diamètres, sans pour autant réduire la largeur, afin de réduire la résistance au roulement.

1-C ENJEUX ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX.

Le pneumatique est une pièce complexe, avec un fort contenu technologique, faisant intervenir de nombreux aspects techniques et scientifiques. Il est devenu indispensable et une pièce maîtresse de notre mobilité donc de notre développement économique.

Nous nous garderons de donner des chiffres que ce soit de production ou de valeur financière, ceux-ci sont de-

venus tellement fluctuants que ce qui est valable aujourd'hui ne le sera plus demain. Nous nous bornerons à montrer l'importance de cet équipement et tout ce qui découle de la vulgarisation de son utilisation.

1-C.1 LE DÉVELOPPEMENT DE LA MOBILITÉ face aux problèmes environnementaux.

Le pneumatique est indissociable du véhicule, support de mobilité. L'organisation de nos sociétés ne permet pas actuellement d'envisager la suppression de l'automobile, malgré les tendances de freiner sa croissance dans les pays développés. L'avenir du pneumatique dépend de l'avenir de l'automobile et réciproquement. L'un et l'autre sont tributaires d'une énergie fossile : le pétrole. L'un comme source de matériaux issus de la Pétrochimie, l'autre comme source d'énergie pour le moteur à combustion interne. Le nombre de véhicules augmente rapidement et le parc automobile double tous les 15 ans. Le besoin en mobilité reste encore très fort dans de nombreux pays. Chaque automobile nécessite au minimum un train de 4 pneumatiques en première monte et en moyenne 2 trains sur sa durée de vie. C'est un marché que se partage une dizaine de manufacturiers majeurs dans le monde. Parmi les nui-

sances liées à l'utilisation d'un véhicule, le rejet de gaz carbonique (CO²) est le facteur sur lequel le pneumatique peut intervenir directement, en réduisant la résistance au roulement. Cette réduction de Résistance au Roulement diminue les rejets de CO². Un autre facteur intervenant sur les nuisances induites par la mobilité : le comportement de l'automobiliste, son besoin de mobilité et son utilisation réelle de la mobilité. Mais c'est un autre sujet.

La sécurité est une préoccupation majeure liée à l'emploi d'un véhicule et par conséquent à l'utilisation d'un pneumatique. De nombreux incidents sont dus à un manque de surveillance et plus particulièrement de la pression de gonflage. Les manufacturiers et équipementiers s'en préoccupent pour proposer des systèmes de surveillance.

1-C.2 LES MATÉRIAUX.

Ils sont de nature diverse et demandent la mise en œuvre de techniques nécessitant des moyens d'élaboration lourds en investissements et une compétence en perpétuelle évolution.

→ a) les caoutchoucs :

- Le **caoutchouc naturel**. Il est produit dans des plantations industrielles, en Asie : Malaisie, Indonésie, Vietnam et au Brésil essentiellement. La main d'œuvre nécessaire pour pratiquer la « saignée », faire la récolte, entretenir les arbres et les plantations reste importante. C'est une source de revenu pour une population. Le traitement d'affinage pour produire les « balles » de caoutchouc est plus automatisé.

- Le **caoutchouc synthétique**. Les différentes variétés sont issues du pétrole et pour quelques produits encore obtenues à partir du charbon. C'est lors de la distillation du pétrole que sont récupérés les différents composants de base qui composeront après diverses transformations chimiques, mélanges et affinages, la gamme des caoutchoucs synthétiques utilisée dans la fabrication du pneumatique. Cela a généré une industrie pétrochimique localisée proche des raffineries, avec ses moyens de production, sa R & D, son réseau de distribution. La part du caoutchouc synthétique dans le pneumatique dépasse nettement la part prise par le caoutchouc naturel. L'Allemagne, pour des raisons historiques, est le leader européen de la chimie du caoutchouc synthétique, suivi par la France et les États-Unis.

→ b) les renforts.

Ce sont des fibres textiles et métalliques. Leur élaboration met en œuvre toutes les techniques de l'industrie textile. La filature permet de transformer les fibres en

fils. Leur origine est soit naturelle, soit synthétique. Dans ce dernier cas, l'industrie pétrochimique intervient comme pour les caoutchoucs synthétiques. Les fils synthétiques sont obtenus par extrusion au travers de filières. Les renforts acier sont élaborés par les techniques de la tréfilerie et calibrés par des filières.

→ c) Le coût des matières premières.

Les prix à la production sont très fluctuants. Celui des caoutchoucs et des renforts synthétiques évolue avec le cours du pétrole brut dont il est dérivé. Celui du caoutchouc naturel est plus fluctuant. Certaines zones habituellement productrices de caoutchouc se sont converties à la production d'huile de palme, plus simple et plus rentable à produire que le caoutchouc naturel et dont la demande est forte pour les biocarburants. Originaire majoritairement d'Asie du Sud-Est, la production de caoutchouc naturel est soumise aux fluctuations du climat et aux aléas politiques. La culture de l'hévéa est très extensive et il faut attendre sept ans avant qu'un arbre ne produise contre trois pour un palmier à huile. Dans ces conditions, il est difficile de trouver les investisseurs prêts à régénérer d'anciennes plantations ou à en créer de nouvelles. D'où les conséquences sur les prix.

1-C.3 LA MISE EN ŒUVRE.

→ a) La **production**. Un pneumatique est un produit complexe demandant une grande précision dans son élaboration. Au fil du temps, la production s'est automatisée pour aboutir à une intervention minime de l'homme. Cette automatisation a demandé des investissements importants, de la matière grise et nécessite une maintenance rigoureuse, mais permet une production 24h/24 afin de fournir le marché. Une telle automatisation nécessite toujours des opérateurs qualifiés, formés au suivi des opérations. Le point d'achoppement est la diversité des produits à fournir, entre les dimensions, les indices de charge, les indices de vitesse, et les

diverses applications. Cela impose aux moyens de production une grande souplesse dans le potentiel de modification.

→ b) La **consommation d'énergie**. Que ce soit pour l'élaboration des mélanges de caoutchouc, la mise en œuvre des renforts, l'assemblage et le montage du pneumatique, l'énergie à mettre en œuvre est importante. Mais il y a une opération encore plus énergivore vu les masses à chauffer : la cuisson ou vulcanisation de chaque pneumatique.

1-C.4 RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.

Le pneumatique est un matériau composite faisant intervenir de multiples paramètres, appliqués à des systèmes de transport très variés. Comme toute technologie, le suivi des évolutions des matières, des concepts, des procédés de fabrication demandent une main d'œuvre particulièrement qualifiée dont la formation demande temps et moyens.

Quelques axes de réflexion :

→ a) Le développement de synergies entre les caoutchoucs et les matières plastiques, tous deux dérivés du pétrole.

→ b) L'intensification du recyclage et des procédés de valorisation des pneumatiques usagés, avec l'élaboration de nouveaux produits utilisant des granulats récupérés de caoutchouc déjà vulcanisés. A noter que 80% du caoutchouc produit est utilisé par le pneumatique.

→ c) La recherche d'amélioration des performances des produits: tenue aux hautes et basses températures, ré-

sistance chimique, connaissance du vieillissement, élasticité.

→ d) L'efficacité énergétique. D'une part au travers de la réduction de la résistance au roulement, ce qui amène à travailler l'architecture du pneumatique : tailles basses, suppression des roues jumelés sur les poids lourds, action sur la structure de la carcasse. Et d'autre part au travers du procédé de vulcanisation, étape la plus énergivore, amenant le mélange de caoutchouc de l'état plastique à l'état élastique.

→ e) Les préoccupations environnementales et la mise en place de règlements contraignants sur l'emploi de certaines substances chimiques. Cela concerne directement l'usage des additifs comme par ex. : l'oxyde de zinc utilisé pour la vulcanisation de certains polymères, ou les huiles aromatiques. Des substituts devront être développés.

1-C.5 LE PNEUMATIQUE DU FUTUR.

Malgré une apparente stabilité avec les années, le pneumatique a fortement évolué. Par contre peu de choses ont bougé dans la forme, la couleur, les principes de fonctionnement. Donc est-il encore possible de le faire évoluer ?

→ a) La tendance pousse à la généralisation des pneumatiques **taille basse**. Un pneumatique série 50 devient la norme. Cette évolution est rendue possible par les progrès effectués dans la connaissance des mélanges et dans les dessins de sculpture pour permettre une bonne tenue sur sol mouillé. Ce phénomène s'accompagne de l'augmentation de dimension de la roue et une roue de 16" est aujourd'hui fréquente. Les modèles sportifs sont fréquemment équipés de roue de 18 et même 20". Cela présente entre autre l'avantage de pouvoir mettre des freins de plus gros diamètre permettant de garder des

puissances de freinage acceptables malgré l'augmentation importante du poids des véhicules.

→ b) Le **concepteur** actuel restera en permanence face à :

- Un **équilibre** délicat entre coût de production et niveau de marché en raison d'une concurrence internationale farouche. Le pneumatique, équipement de sécurité de haute technicité a un rôle souvent mal compris par l'utilisateur qui s'oriente trop facilement vers le moins cher à l'achat sans prendre en compte tous les éléments du service rendu.

- Un **compromis** entre:

- Confort et stabilité directionnelle.
- Niveau d'usure et augmentation des performances en général et sur route mouillée en particulier.

- La nécessaire réduction de la **résistance au roulement** pour réduire la consommation d'énergie amènera des évolutions dans les valeurs d'hystérésis des mélanges et un travail sur les structures de la bande de roulement. L'expérimentation montre la nécessité d'un compromis entre cette recherche de réduction de la résistance au roulement et le maintien d'un niveau satisfaisant sur les distances de freinage.

- La **sécurité** lors d'une perte de pression de gonflage.

- La **réduction** du bruit de roulement, bien qu'il y ait plus à gagner en travaillant sur le revêtement routier que sur le pneumatique.

- Une recherche permanente de **poids**.

- L'**accrochage** de notre pneumatique sur la roue, système qui a peu évolué dans le temps.

- Une **réglementation** sur l'environnement de plus en plus contraignante, obligeant les chimistes à rechercher des mélanges ayant moins d'impact négatif sur la nature, comme par ex. le développement du butadiène biosourcé. L'augmentation du coût du pétrole et la priorité qui pourrait être donnée à son emploi comme combustible, ne peut que pousser les recherches dans ce sens.

- Au souci de garder la fonction pneumatique en utilisation, donc de surveiller la **pression de gonflage**. Le laxisme et l'ignorance grandissante du conducteur face à la gestion de ses pneumatiques imposent de l'avertir de toute chute de pression dont les conséquences peuvent être sérieuses. Si les systèmes de roulage à plat permettent de s'affranchir d'une roue de secours, ils ne résolvent pas l'évolution du comportement du pneumatique ni l'absence de responsabilité du conducteur. Cela laisse un futur aux systèmes de réajustement automatique de la pression. Tout ceci, en imposant à notre concepteur de travailler en étroite collaboration avec les hommes du véhicule, un pneumatique ne se jugeant qu'au travers de sa prestation sur ce véhicule.

c) Le **pneumatique du futur** utilisera-t-il toujours la même technologie ?

➔ - De tout temps, la roue dans son ensemble a été un sujet de réflexion, de recherche et d'innovation. Dès le début du 20^e siècle, au tout début du développement de l'automobile, le pneumatique s'était montré le meilleur intermédiaire entre la roue rigide et le sol. Mais cet intermédiaire était fragile et sujet à de fréquents incidents. D'où à cette période les nombreuses inventions présentées sous le vocable de « Roue élastique » dont l'objet était de présenter un système plus robuste, tout en revendiquant les qualités de souplesse du pneumatique. Cf. figs. 1.5, 1.6, 1.7

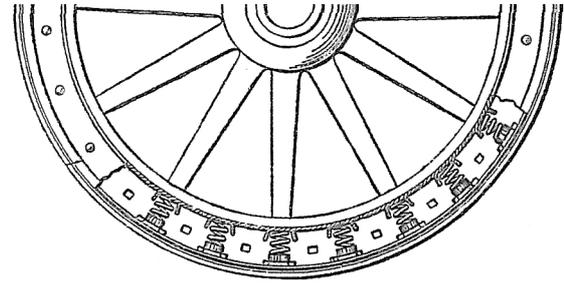


Fig. 1.5

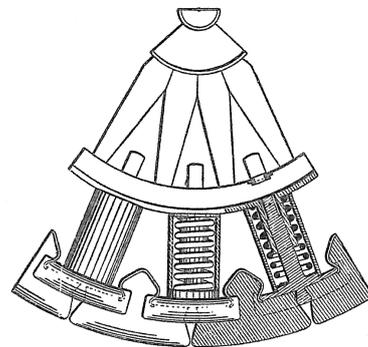


Fig. 1.6

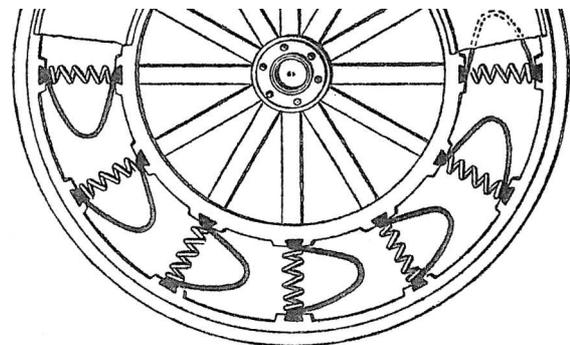


Fig. 1.7

Quelques exemples de « roues élastiques »

Puis, avec les travaux effectués sur le pneumatique et les progrès obtenus, ce concept de roue élastique est tombé dans l'oubli. Mais ce concept pourrait ressortir, par sa possibilité de proposer la particularité d'être increvable et de réduire sensiblement la quantité de caoutchouc utilisée. Le progrès dans la connaissance, l'élaboration et l'utilisation des matériaux composites permettent d'envisager de nouvelles formes. La roue élastique était-elle en avance sur son heure et verrons-nous bientôt des pneumatiques sans air ? Cf. figs. 1.8, 1.9, 1.10, 1.11



Fig. 1.8
La roue qui a roulé sur la lune.



Fig. 1.9
Une application actuelle d'une « roue élastique »



Fig. 1.10
Pneumatique MICHELIN, sans air, incluant la jante et à bande de roulement amovible.



Fig. 1.11
Roue et pneumatique intégrés.

Roue et pneumatique sont indissociables, aussi le système du futur intégrera-t-il la roue? Ne peuvent-ils être intégrés et produits en une pièce unique? L'avenir va sûrement nous réserver de nouvelles innovations.

Mais en attendant nous allons passer en revue les éléments entrant dans la composition d'un pneumatique pour mieux en comprendre son mécanisme de fonctionnement.

2 — [L'ARCHITECTURE D'UN PNEUMATIQUE]

2-A LES DIFFÉRENTS COMPOSANTS DU PNEUMATIQUE et leur fonctionnalité.

Le § 1-A.2 et fig. 1.1 définissent les 5 parties principales constituant l'architecture d'un pneumatique : -la carcasse, -la bande de roulement, -l'accrochage à la roue, les flancs et, -l'air.

Le pneumatique est un tore, objet en 3 dimensions, aussi pour se repérer dans la suite de ce document, nous lui affecterons un trièdre de référence : $Oxyz$. Ce trièdre va matérialiser :

- **3 plans** : Transversal zOy , Horizontal xOy , Longitudinal xOz .

- et **3 axes** : Ox , Oy , Oz

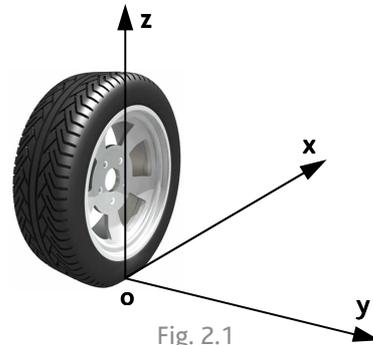


Fig. 2.1

2-A.1 LA CARCASSE.

La carcasse d'un pneumatique est l'élément par lequel vont transiter les efforts, de la bande de roulement à la roue. Une carcasse est formée de fils croisés. Le mode de croisement de ces fils, va nous permettre de répertorier trois grandes familles d'architecture du pneumatique, que nous classerons par ordre chronologique de mise en œuvre :

- **La carcasse diagonale.** Cf. principe sur fig. 2.2

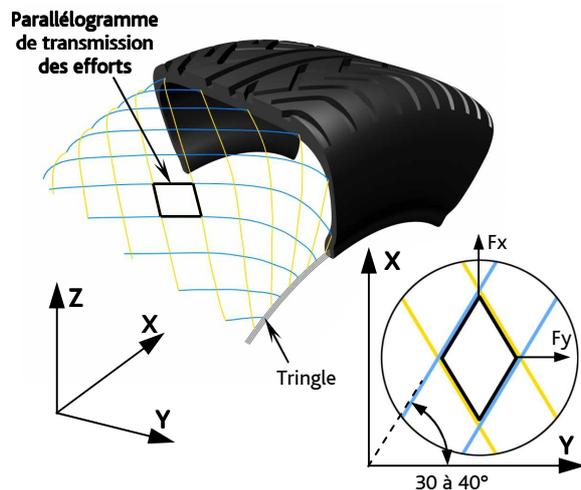


Fig. 2.2

Les fils sont disposés en diagonale par rapport au plan médian, d'un bord d'accrochage à la roue à l'autre bord. Leur croisement forme un parallélogramme par lequel les efforts appliqués au pneumatique vont se transmettre.

- **La carcasse diagonale ceinturée** ou « Bias Belted »
Cf. principe sur fig. 2.3

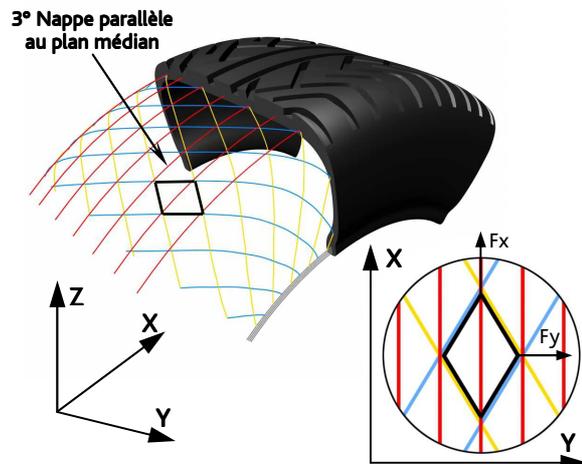


Fig. 2.3

Il est ajouté une couche de fils sur le sommet du pneumatique, à la façon d'une ceinture. Cette couche ne débord pas sur les flancs. L'objectif de ces fils supplémentaires est de rigidifier le parallélogramme de transmission des efforts.

- **La carcasse radiale.** Cette technologie a la particularité de séparer totalement la fonction du flanc et la fonction sommet. Cf. principe sur figs. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7

2 — [L'ARCHITECTURE D'UN PNEUMATIQUE]

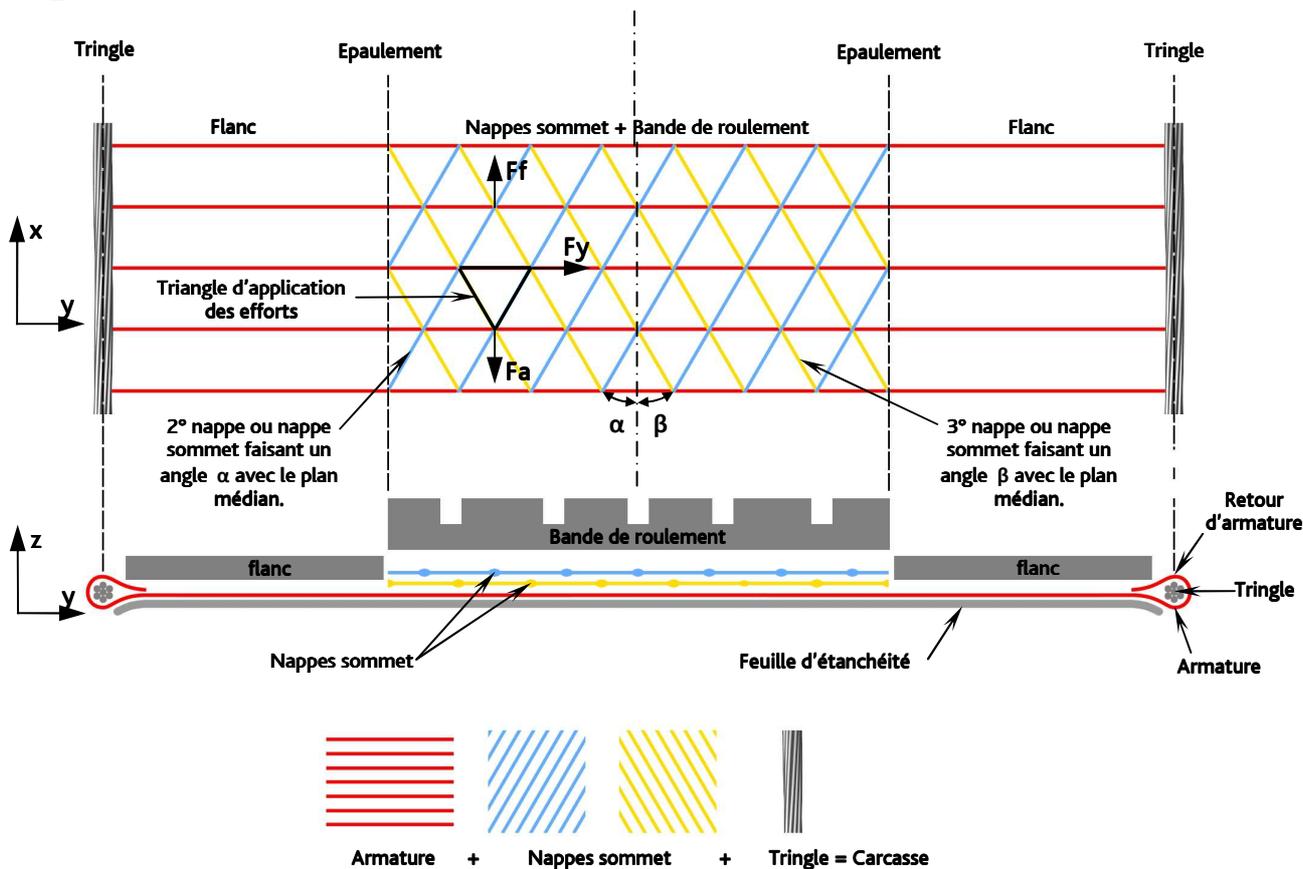


Fig. 2.4

Assemblage à « plat »

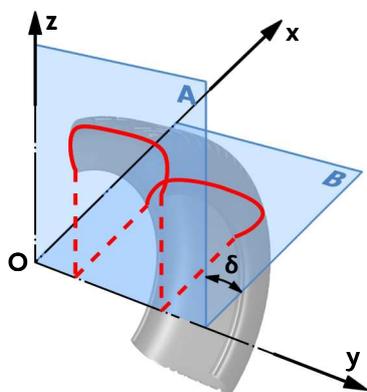


Fig. 2.5

Disposition de l'armature.

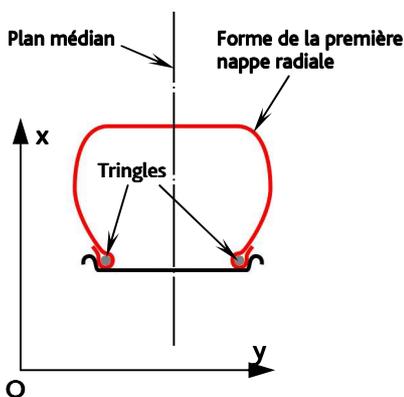


Fig. 2.6

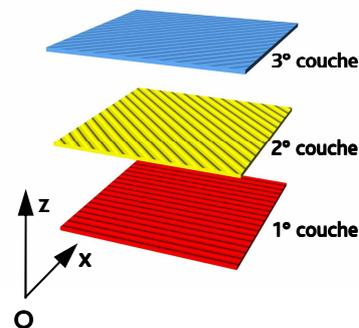


Fig. 2.7

Positionnement des couches.

La carcasse est composée :

-D'une **armature**. Il s'agit de la pièce principale. Cf. figs. 2.4, 2.5, 2.6

Les fils de l'armature sont disposés radialement, c'est-à-dire dans des plans successifs, passant tous par l'axe de rotation de la roue et perpendiculaire à la direction de roulement. A chaque fil correspond un plan. Ces fils d'armature joignent les deux bords du pneumatique et prennent une forme en arceaux. Cf. Figs. 2.4, 2.6 Selon la charge demandée au pneumatique, cette nappe d'armature pourra être doublée, voire triplée.

- De **nappes sommet**, au minimum deux, qui viennent à la façon d'une ceinture, et sous forme d'une paroi cylindrique, dure et rigide, s'enrouler autour de l'armature. Chaque nappe de fils, pré-imprégnée de caoutchouc, forme un angle bien défini par rapport à l'orientation de l'armature (le « Ply »). Le système de nappes, permet par le nombre et l'orientation des différentes nappes de définir les caractéristiques dynamiques du pneumatique, dont la plus importante est sa capacité de guidage. Cf. figs. 2.4, 2.7 et le principe de fonctionnement. Armée par ses renforts, cette ceinture est à la fois souple verticalement (sens Oz), très rigide transversalement (sens Oy) et en torsion autour de l'axe Oz.

2 — [L'ARCHITECTURE D'UN PNEUMATIQUE]

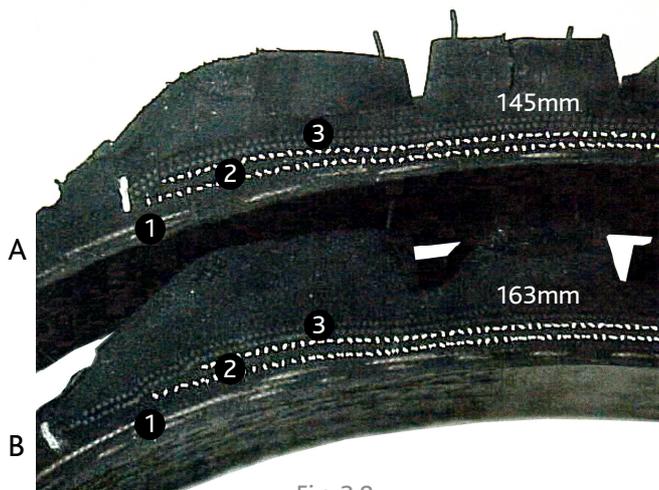


Fig. 2.8

Coupes transversales montrant la position des nappes sommets.

- ① Armature
- ② 1° nappe sommet en 2 couches.
- ③ 2° nappe sommet, aussi en 2 couches.

La coupe B montre un allongement vers le flanc des nappes sommets.

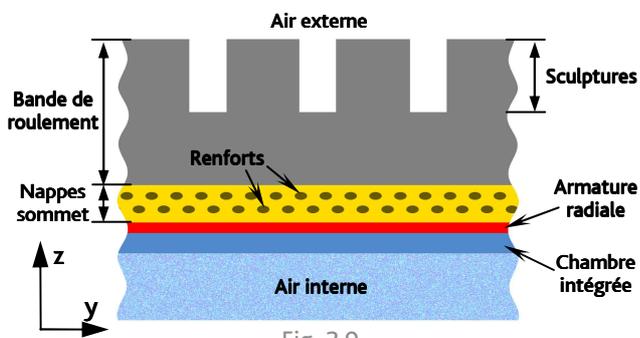


Fig. 2.9

Schématisation de principe des coupes de la fig. 2.8

Les fils subissent une préparation :

1°) Ils sont tissés pour former une sorte de toile ou « Cord ». Les fils placés dans le sens de la longueur, appelés fils de chaîne sont maintenus en position parallèle et serrés entre eux, par un fil perpendiculaire, appelé fil de trame. Cf. fig. 2.10

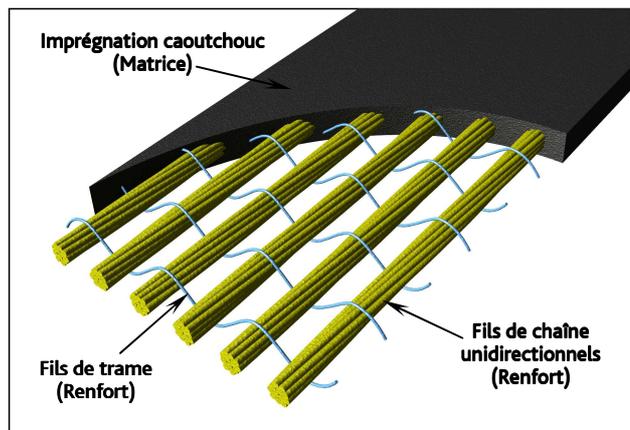


Fig. 2.10

Dans le pneumatique, le fil de trame est un fil très fin dont le rôle est uniquement de maintenir les fils de chaîne en position. Cela forme une armure unidirectionnelle. Les efforts seront transmis par le seul fil de chaîne, dans une seule direction.

Dans le cas du fil d'acier, le fil de trame est souvent supprimé.

2°) Ils sont pré-imprégnés avec un mélange de caoutchouc lors de l'opération de calandrage. L'ensemble se présente sous forme d'une nappe. Suivant le sens de découpe de cette nappe, les fils feront un angle par rapport à l'axe de la nappe. La nappe prend alors le nom de « Ply ». Cf. fig. 2.11

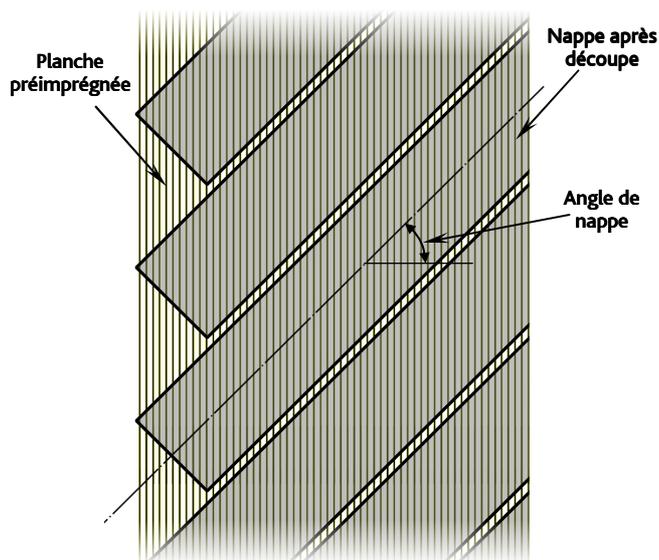


Fig. 2.11

Le principe de fonctionnement d'une carcasse.

Le pneu radial transmet les efforts en s'appuyant sur le principe du triangle. Cf. fig. 2.12 L'armature forme la base du triangle et chacune des nappes sommet, disposant d'un angle différent, forme les deux autres côtés du triangle. Ce principe, par l'angle donné à l'orientation des fils, va donner une grande rigidité de torsion à la ceinture (comme peut l'être un cylindre). La superposition de nappes d'angles légèrement différents permet de renforcer l'un ou l'autre des côtés du triangle sans utiliser un diamètre de fil trop important. Ce qui permet de garder une faible rigidité de flexion des flancs lors du passage dans la zone de contact avec le sol.

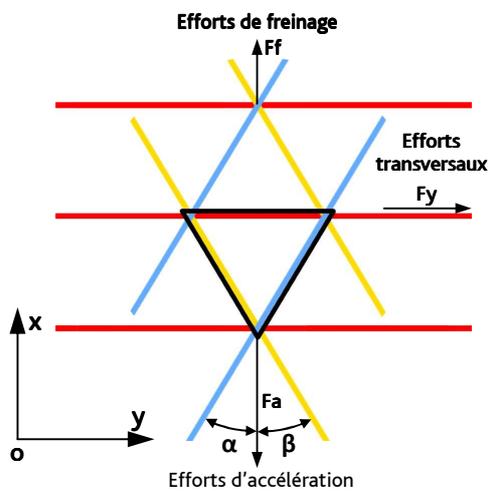


Fig. 2.12

Application des efforts selon le principe du triangle.

Plus l'angle de la nappe sera fermé, autrement dit proche du plan médian, meilleure sera la stabilité de roulage. Pour certains pneumatiques de grande largeur, utilisés sur les véhicules rapides, il peut être ajouté une dernière nappe, enroulée à 0° pour donner encore plus de stabilité à haute vitesse.

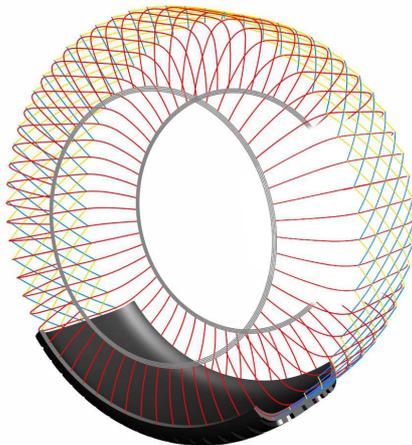


Fig. 2.13

Synthèse de la position des fils-renfort dans une carcasse radiale.

- De deux **tringles**. Cf. figs. 2.14, 2.15 Câbles d'acier cuivré, de forte section, ayant la forme d'un cerceau. Sur ces tringles, positionnées chacune à un bord, viennent s'enrouler les fils d'armature. Le cuivrage est une couche d'interface qui améliore l'adhérence du caoutchouc sur l'acier. Les tringles transmettent et répartissent les efforts à la roue. Elles sont noyées dans le caoutchouc, qui va également servir de positionnement, d'accrochage et d'étanchéité avec la roue via le **talon**. Cf. fig. 2.14

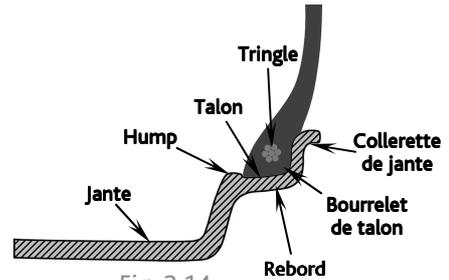


Fig. 2.14

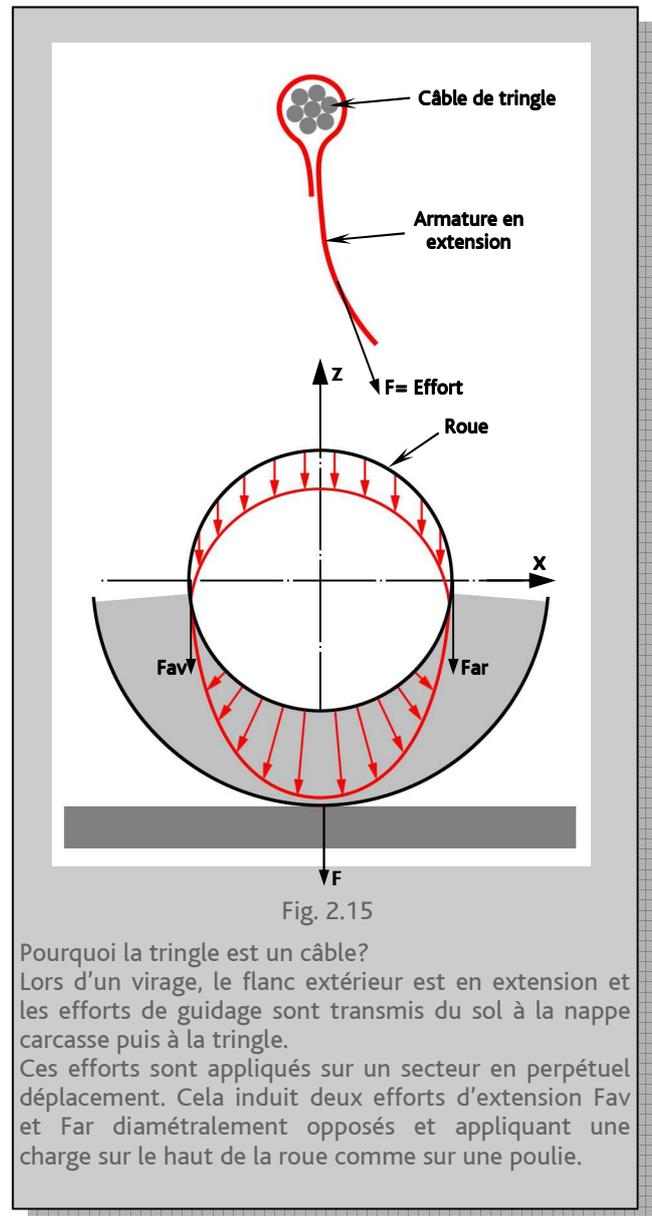


Fig. 2.15

Pourquoi la tringle est un câble?

Lors d'un virage, le flanc extérieur est en extension et les efforts de guidage sont transmis du sol à la nappe carcasse puis à la tringle.

Ces efforts sont appliqués sur un secteur en perpétuel déplacement. Cela induit deux efforts d'extension Fav et Far diamétralement opposés et appliquant une charge sur le haut de la roue comme sur une poulie.

→ L'ARCHITECTURE DU PNEUMATIQUE : Une application du principe des matériaux composites

La structure d'une carcasse d'un pneumatique est construite sur le principe des matériaux composites, à renforcement multidirectionnel. Elle est constituée de deux matériaux distincts, non miscibles, mais liés entre eux, dont les qualités individuelles se combinent et se complètent en donnant un matériau hétérogène. Les performances globales de ce matériau s'en trouvent améliorées par rapport à la performance de chaque constituant. Chacun de ces matériaux transmet à l'autre les efforts qui lui sont appliqués.

Un tel matériau comprend trois éléments : le renfort, La matrice et l'interface entre le renfort et la matrice.

a) Le renfort. Véritable structure portante, le renfort est constitué d'un ensemble de fils de grande longueur, continus, orientés, positionnés par couches unidirectionnelles, collées les unes sur les autres et croisées les unes par rapport aux autres. Sous cette forme, le matériau est dit : anisotrope.

C'est cette structure qui apporte la résistance mécanique. Le renfort est le matériau qui va donner sa forme au pneumatique.

Pour cela, le fil doit présenter différents critères de dimension (diamètre, longueur) et de propriétés physiques (résistance spécifique : Effort de traction / diamètre), faible capacité d'allongement, facilité de mise en œuvre, légèreté, compatibilité avec la matrice, résistance thermique.

Selon la nature chimique du fil, il peut être procédé à un traitement particulier, appelé **ensimage**, avec une huile ou une résine, pour faciliter la liaison au niveau de l'interface renfort-matrice.

Physiquement, le fil, peut se présenter sous différentes formes :

- **Fil simple** : fabriqué à partir de filaments ou de fibres discontinues maintenues ensemble par torsion.
- **Fil retors** : constitué d'au moins 2 fils simples torsadés ensemble.
- **Fil câblé** : constitué d'au moins 2 fils retors, torsadés ensemble.
- **Fil assemblé** : fil formé d'au moins 2 fils accolés ensemble sans torsion.

Il est défini un taux volumique en fils, rapport entre le volume occupé par les fils et le volume total du pneumatique. Ce taux évolue suivant l'utilisation du pneumatique et il augmentera en fonction des charges subies.

L'origine des fils utilisés dans un pneumatique peut être :

- **Végétale** (ex : le coton, la rayonne encore appelée « soie artificielle » ou viscose.) L'un et l'autre sont

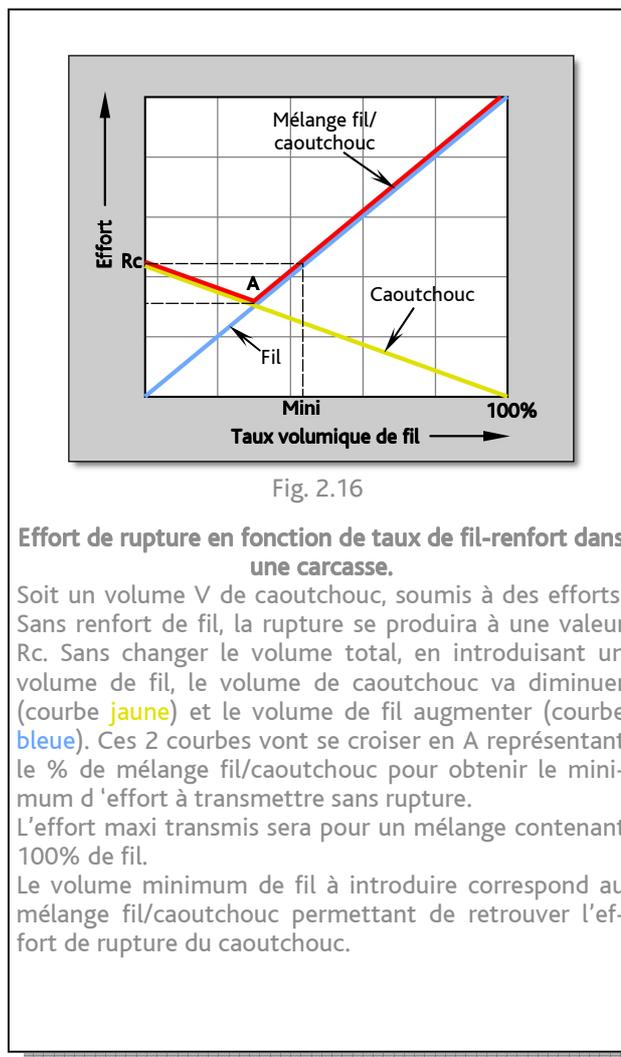


Fig. 2.16

Effort de rupture en fonction de taux de fil-renfort dans une carcasse.

Soit un volume V de caoutchouc, soumis à des efforts. Sans renfort de fil, la rupture se produira à une valeur R_c . Sans changer le volume total, en introduisant un volume de fil, le volume de caoutchouc va diminuer (courbe **jaune**) et le volume de fil augmenter (courbe **bleue**). Ces 2 courbes vont se croiser en A représentant le % de mélange fil/caoutchouc pour obtenir le minimum d'effort à transmettre sans rupture.

L'effort maxi transmis sera pour un mélange contenant 100% de fil.

Le volume minimum de fil à introduire correspond au mélange fil/caoutchouc permettant de retrouver l'effort de rupture du caoutchouc.

composés de cellulose et ont l'inconvénient d'absorber l'eau. La rayonne est un fil plus résistant et plus homogène que le coton.

- **Synthétique** ex : polyamide, polyester, aramide Cf. tableau 2.17

Nom commercial	Famille chimique	Matières de départ
Rhovyl	Chlorofibres	Acétylène et acide chlorhydrique
Nylon	Polyamides	Hexaméthylène
Tergal	Polyester	Éthylène et Xylène
Kevlar	Aramidés	Benzène

Tableau 2.17

. Les **polyamides** disposent d'une bonne tenue à la chaleur et de bonnes performances mécaniques.

. Les **aramides** (nom commercial : Kevlar) ont une bonne résistance à la traction, sont légers, se dilatent faiblement sous l'effet de la chaleur, ont une bonne résistance aux chocs et à la fatigue, mais sont sensibles à l'humidité et l'adhérence avec la matrice est à vérifier.

- **Métallique** (ex : fil d'acier)

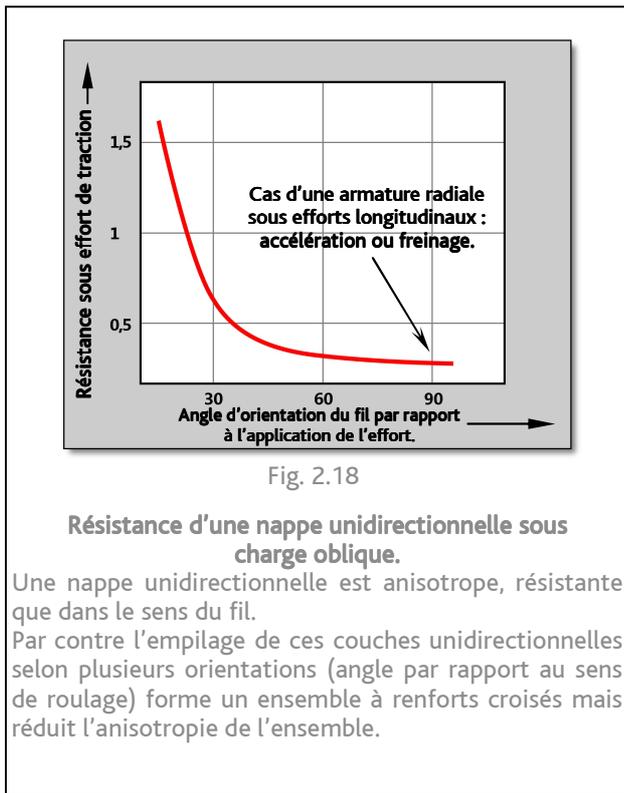


Fig. 2.18

Résistance d'une nappe unidirectionnelle sous charge oblique.

Une nappe unidirectionnelle est anisotrope, résistante que dans le sens du fil.

Par contre l'empilage de ces couches unidirectionnelles selon plusieurs orientations (angle par rapport au sens de roulage) forme un ensemble à renforts croisés mais réduit l'anisotropie de l'ensemble.

b) La matrice. La matrice fait le lien entre les fils de renfort et répartit les efforts. Cette matrice est le mélange de caoutchouc, qui sert à pré imprégner les fils pour former une nappe. Si le fil donne la forme au pneumatique, c'est la matrice qui fige cette forme. Ce mélange de caoutchouc a aussi un rôle de protection.

Les éléments intervenant dans le choix de cette matrice :

-Sa facilité de mise en œuvre

-Ses propriétés : ➔ **Physiques** : densité, stabilité dimensionnelle, résistance aux impacts.

➔ **Mécaniques** : allongement, fluage, relaxation, tenue à la température.

-Sa durabilité : Résistance au vieillissement, à la fatigue, à la chaleur, aux agressions chimiques, au frottement, à l'usure.

La matrice est un matériau de fonction dont le rôle est

de transmettre des informations, ce qui nécessite une grande maîtrise de sa structure microscopique. La performance du pneumatique sera impactée par les possibilités techniques des mélanges de caoutchouc utilisés.

c) L'interface. L'interface assure la liaison entre le fil de renfort et le caoutchouc de la matrice. La fraction volumique de cette interface est toujours très faible et théoriquement nulle. Mais c'est par cette interface que seront transmis les efforts mécaniques entre le caoutchouc et le fil. Pour éviter toute rupture dans l'ensemble du matériau, il ne doit y avoir aucun mouvement relatif entre le caoutchouc et le fil dans cette interface. Cela signifie que dans l'ensemble du pneumatique, la compatibilité des liaisons chimiques entre les différents matériaux composant la carcasse et les éléments voisins constitutifs du pneumatique doit être parfaite. Ces liaisons peuvent être réalisées par adhésion mécanique par l'intermédiaire d'une surface plus ou moins rugueuse ou par collage sous forme d'une réaction chimique entre le fil et la matrice.

La coexistence entre deux matériaux aussi différents qu'un fil d'acier et un mélange de caoutchouc pose quelques problèmes, dont le plus crucial est de tenir compte de la différence d'allongement sous effort et lors des changements de température, entre le fil et le caoutchouc. Cf. fig. 2.19

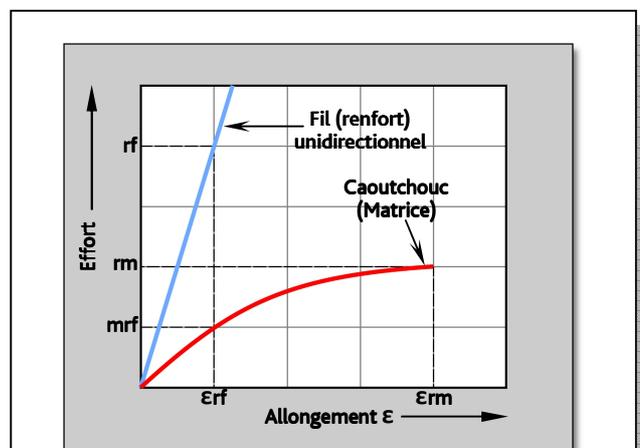


Fig. 2.13

Les efforts d'allongement dans une nappe. La différence entre le fil et le caoutchouc.

ϵ_{rf} = Allongement à la rupture du fil : < 10%.

ϵ_{rm} = Allongement à la rupture du caoutchouc jusqu'à 600%.

m_{rf} = Effort de traction dans la matrice à la rupture du fil.

r_m = Effort de rupture du caoutchouc.

r_f = Effort de rupture du fil.

À la rupture du fil : $\epsilon_{rf} < \epsilon_{rm}$.

2-A.2 LA BANDE DE ROULEMENT.

C'est une couche de caoutchouc plus ou moins épaisse, dans laquelle sont générés les efforts qui vont ensuite transiter par la carcasse puis la roue. Elle assure le contact avec le sol et dispose de **sculptures** alternant creux (ou espaces) et reliefs (ou pavés).

La bande de roulement est la partie qui s'use sur un pneumatique et la profondeur des sculptures permet de mesurer cette usure. Ces sculptures ont aussi pour fonction d'évacuer l'eau lors des roulages par temps de pluie.

a) la **sculpture**. La forme et l'agencement des pavés peuvent donner à la sculpture une multitude de combinaisons différentes selon la destination finale du pneumatique. La figure 2.20 de A à H montre quelques exemples.



Fig. 2.20 A

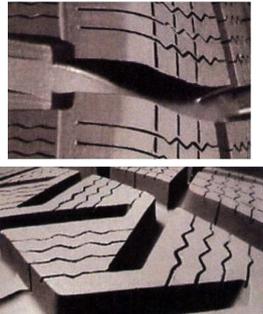


Fig. 2.20 B



Fig. 2.20 C

- A) Sculpture constituée de gros pavés espacés, avec des pavés d'épaulement plus rapprochés. Elle sera utilisée pour un roulage sur sol meuble, non revêtu, la boue, la pierraille.
- B) Sculpture comportant trois grands canaux longitudinaux. Les pavés des épaulements sont assez espacés et légèrement lamellisés. Il s'agit d'un profil de sculpture standard pour routes macadamisées. Sa tenue sous condition de pluie sera bonne.
- C) Sur cette sculpture, les canaux longitudinaux ont disparu, les pavés de forme allongée sont très proches les uns des autres et les épaulements sont larges et arrondis. Cette forme privilégie la stabilité en ligne droite et le comportement en virage sur sol sec.



Figures 2.20 D

- D) Exemples de lamellisation. Ce sont de très fines « coupures » dans le pavé de caoutchouc. La quantité, la forme et la position de ces « coupures » augmentent le nombre d'arêtes au contact du sol. Cela améliore la mobilité du pavé et le suivi du contact avec le sol. Cette forme sera privilégiée pour le roulage sur sols à basse adhérence, du type neige tassée, glace.

2 — [L'ARCHITECTURE D'UN PNEUMATIQUE]



Fig. 2.20 E

- E) Exemple de sculpture pour application agricole et génie civil, qui rappelle le principe de la « roue à aubes ».



Fig. 2.20 F

- F) Autre forme de sculpture pour une application : neige, boue, mauvaise route. Les pavés sont largement dimensionnés. Leur implantation sur la carcasse est large. Les faces verticales sont légèrement obliques pour permettre un meilleur « débouillage » ou nettoyage des entailles lors du roulage.



Fig. 2.20 G

- G) Exemple de mauvais « débouillage ». La boue reste incrustée entre les pavés.



Intérieur Fig. 2.20 H Extérieur

- H) Les sculptures peuvent être asymétriques par rapport au plan médian du pneumatique. Montée sur véhicule, la bande de roulement ne remplit pas les mêmes fonctions selon sa position dans l'espace. La zone intérieure est celle qui fournira en priorité l'adhérence. La zone extérieure aura pour mission principale de guider le véhicule dans les phases de virage. Cette dernière fonction imposera plus de masse de caoutchouc et une plus grande rigidité des pavés de caoutchouc.

⇒ L'alternance des reliefs et des creux permet de définir un **taux d'entaille** : rapport entre la surface des creux et la surface totale de la bande de roulement. Plus celui-ci sera élevé, meilleur sera le comportement du véhicule par temps de pluie. Par contre, sur sol sec et bonne adhérence, les pavés de la zone de contact avec le sol seront plus sollicités. Cela pourra introduire une élasticité entre le sol et la carcasse et rendre la conduite plus « floue ».

⇒ Lors du contact avec le sol, le pavé de caoutchouc de la sculpture va subir des efforts : d'abord le poids du véhicule et ensuite les sollicitations imposées par le roulage Cf. § 1-A.1 Comme le pavé est un bloc élastique, il va se déformer sous l'effet des efforts.

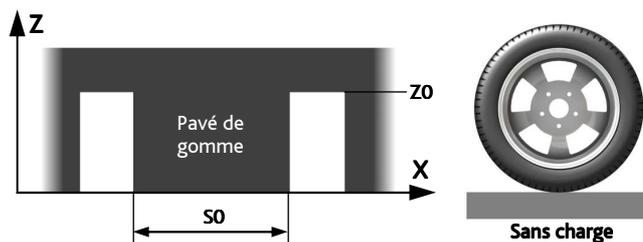


Fig. 2.21 A

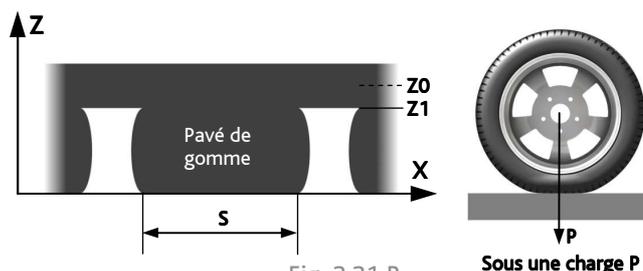


Fig. 2.21 B

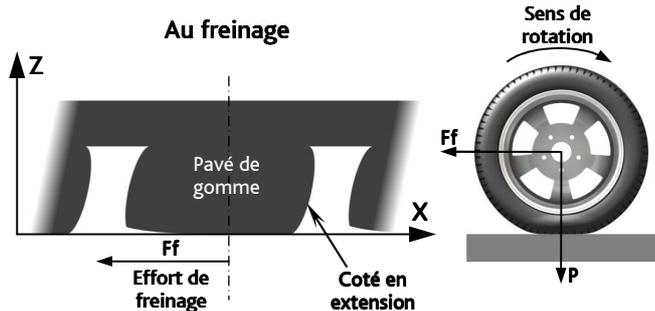


Fig. 2.21 C

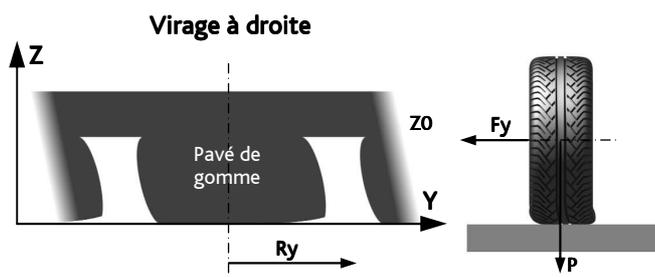


Fig. 2.21 D

Exemples de déformation du pavé de caoutchouc.

⇒ Par temps de pluie, ces sculptures se comportent comme une « pompe à eau » chargée d'évacuer l'eau de la zone de contact et ainsi permettre au pavé de caoutchouc de pénétrer dans la couche d'eau et d'avoir le contact avec le sol et jouer son rôle « d'agent d'adhérence ». Les creux sont autant de canaux d'évacuation. Leur nombre, leur forme, leur connexion et leur débouché vers l'extérieur sont autant d'éléments qui vont donner son efficacité à la bande de roulement en roulage par temps de pluie.

b) Les caractéristiques physiques et mécaniques du caoutchouc utilisé. Les mélanges pour bande de roulement sont spécifiques et distincts des mélanges utilisés pour les autres parties. La différence entre deux bandes de roulement à dessin de sculpture identique se fera par la dureté shore et l'hystérésis du caoutchouc.

➔ **Une faible dureté Shore** donnera de bonnes performances sur sol froid et à forte micro texture, mais par contre son usure sera rapide, et ses performances vont rapidement chuter lorsque la température va s'élever. Ce comportement s'inversera au fur et à mesure de l'augmentation de cette dureté.

➔ **L'hystérésis**, Cf. § ANNEXE, phénomène « retard » de la fonction élastique du caoutchouc, lequel améliore le roulage par temps de pluie. Cela se traduit par un décalage dans le temps entre la déformation et son retour à l'état d'origine. L'hystérésis peut s'assimiler à un amortissement, spécificité des matériaux viscoélastiques. Cet amortissement sera fonction :

- De la fréquence des déformations. Cette fréquence, de l'ordre du (kHz) va dépendre :
 - ⇒ De la taille des pavés de caoutchouc.
 - ⇒ Du nombre de **granulats** par mètre du sol sur lequel va rouler notre pneumatique. Ce sont

eux qui produisent les déformations verticales dans le pavé de caoutchouc.

- ⇒ De la **vitesse** de déroulement, et par extension, de la vitesse du véhicule. Cette vitesse détermine le temps écoulé entre deux déformations.

- De l'**amplitude** des déformations.

- De la **température**. L'expérience montre que l'hystérésis est influencée par la température et la nature du caoutchouc :

- ⇒ L'hystérésis d'un caoutchouc synthétique est toujours supérieure à celui d'un caoutchouc naturel (NR).
- ⇒ L'hystérésis d'un mélange de caoutchouc diminue lorsque la température augmente. Dans ce cas, la valeur maximale d'amortissement se produit à des fréquences plus élevées, autrement dit à des vitesses de déroulement plus élevées.

- Un **caoutchouc** naturel présente une hystérésis maximale à une fréquence d'environ 10kHz, alors qu'un caoutchouc synthétique va le développer à une fréquence nettement plus basse, de l'ordre du kHz.

Comme nous le verrons plus loin, ce phénomène d'hystérésis intervient dans le coefficient d'adhérence. Il en résulte qu'une simple variation des propriétés du caoutchouc, due à l'hystérésis, peut modifier l'adhérence.

c) La différenciation des mélanges. Selon la « spécialisation » du pneumatique, la bande de roulement peut être composée d'un mélange de caoutchouc de caractéristiques différentes :

- ⇒ Dans la largeur, pour favoriser les appuis.
- ⇒ Dans son épaisseur, pour modifier le coefficient d'adhérence en fonction de l'usure.

d) Le bruit. C'est au niveau de la bande de roulement et de ses sculptures qu'est généré le bruit de roulement. Cette émission sonore est liée à la distribution des efforts au sol.

e) La transmission des efforts. Tous les efforts appliqués au pneumatique sont générés dans la bande de roulement. Mais, ces efforts doivent ensuite être retransmis, successivement, aux nappes sommets, puis à l'armature, et enfin aux triangles et à la roue. Pour que cette transmission se fasse dans les meilleures conditions, bande de roulement et nappes sommets doivent impérativement être homogènes et adaptées l'une à l'autre. Tout manque d'homogénéité entre la bande de roulement et les nappes sommet, fera chuter le niveau de performance de l'ensemble. De même, toute modification du dessin de la bande de roulement nécessitera de vérifier le comportement des nappes sommet.

Généralement lors de la conception d'un pneumatique, il est établi en priorité la définition de la bande de roulement selon sa destination : sculpture, taux d'entaille, puis mélange. Cette définition reste un compromis. Ensuite, à partir de cette définition, sera conçue la structure des nappes sommet.

2-A.3 LES FLANCS.

Les flancs servent de lien entre l'ensemble : nappes sommets + bande roulement et la tringle. La bordure latérale de raccordement, entre la bande de roulement et le flanc est l'**épaulement**, élément majeur dans le comportement en virage du pneumatique.

Le flanc est composé des fils de l'armature et d'une couche de caoutchouc extérieure d'épaisseur variable, dont le but est d'assurer la protection contre les chocs (par ex. : sur un trottoir). Cette couche extérieure est complétée par la couche intérieure chargée d'assurer

l'étanchéité aux gaz et à l'air.

Les fils d'armature forment des arceaux orientés perpendiculairement à la direction du mouvement. Cela donne une grande flexion verticale des flancs, et par extension, une grande souplesse sous charges verticales. Toujours sous charges verticales, le travail des nappes sommet se trouve « déconnecté » de celui des flancs. Par conséquent, la flexion du flanc n'induit aucun effort dans les nappes sommet. Les fonctions entre flanc et sommet s'en trouvent nettement séparées.

2-A.4 L'INTÉRIEUR DU PNEUMATIQUE.

L'intérieur du pneumatique est tapissé d'une feuille de caoutchouc particulière qui remplace la chambre à air. Cette feuille, à base de butyl, renforcé avec du talc a pour but d'assurer l'étanchéité à l'air.

2-A.5 L'AIR.

Il s'agit d'une composante souvent négligée, mais qui reste de première importance. C'est la pression de l'air régnant à l'intérieur du pneumatique qui est la base de la fonction pneumatique et qui va définir son comportement et son vieillissement.

Sans air, un pneumatique n'en est pas un. Rappelons que la racine grecque « pneuma » signifie « Souffle » et que l'adjectif « pneumatique » est relatif à l'air et aux gaz en général.

Cet air est à une pression supérieure à la pression atmosphérique et se répartit à l'intérieur des parois, roue comprise. C'est l'air sous pression qui permet à la carcasse de reprendre sa forme après déformation, en plus du rappel élastique du caoutchouc. C'est l'élément majeur de la fonction élastique.

a) le gonflage à l'azote. Bien que l'air soit composé de 75% d'Azote, il peut être recommandé un gonflage à l'Azote pur. Gaz neutre, l'azote a l'avantage de ne pas cheminer à travers les parois caoutchouc, contrairement à l'oxygène. Cela présente l'avantage de gonfler avec un produit pur, exempt d'oxygène et de vapeur d'eau. Les caoutchoucs qu'il soient d'origine naturelle ou synthétique n'apprécient pas la présence d'oxygène, qui a la particularité d'accélérer leur vieillissement. La vapeur d'eau peut intervenir en créant des phénomènes de vaporisation ou de condensation lors des variations de température.

b) l'air, gaz réel. L'air est un gaz réel, mais pour simplifier le raisonnement, et sans commettre une grande erreur, nous l'assimilerons à un gaz parfait, fluide idéal qui répond à des lois établies expérimentalement, ces lois mettant en évidence des propriétés

thermo-élastiques.

Un gaz parfait est défini par son équation d'état que nous écrivons sous la forme :

$$p \times \frac{V}{T} = \text{Constante}$$

⇒ **p** = pression régnant à l'intérieur du pneumatique, mesurée en bar, daN/cm² ou encore en P.S.I. dans les pays anglo-saxon (1bar = 15 p.s.i.)

⇒ **V** = Volume d'air correspondant au volume intérieur du pneumatique, en m³.

⇒ **T** = température de l'air, en °C.

Cela signifie dans le cas de notre pneumatique que le produit **p x V** varie dans le même sens que la température **T**. Mais, compte tenu de la rigidité de notre carcasse, le volume **V** peut être considéré comme constant. Il en résulte que tout échauffement du pneumatique va provoquer une augmentation de pression interne, proportionnelle à l'écart de température, et inversement, tout refroidissement et retour à la température ambiante va faire chuter cette pression.

Cette variation de pression a une incidence sur la valeur du **Rayon sous charge** (**R_{sc}**) de l'ensemble roue + pneumatique. Par la modification de la déformation des flancs, elle fait évoluer sa raideur radiale. De même cette variation de pression va modifier la surface de contact sur le sol. Elle augmentera lorsque la pression chutera et inversement lorsqu'elle augmentera.

Il s'agit d'une propriété qui sera utilisée lors de roulage sur sol meuble (exemple : le sable). Diminuer la pression va augmenter la surface au sol et permettre une meilleur

2 — [L'ARCHITECTURE D'UN PNEUMATIQUE]

leure progression.

c) la différence de masse. Un autre facteur, dont il est utile de tenir compte dans l'évolution de la pression sous l'effet de la température, est l'écart de masse entre le pneumatique et la masse du volume d'air qu'il contient. Cet écart se retrouve dans la différence de Chaleur spécifique (ou capacité thermique massique, ou encore chaleur massique) entre ces deux matériaux. Si l'on définit :

C_p = chaleur spécifique de l'air

C'_p = chaleur spécifique du caoutchouc

m = masse de l'air contenue dans le volume du pneumatique.

M = masse du caoutchouc.

nous constatons que la masse d'air enfermée dans le volume du pneumatique est beaucoup plus faible comparée à la masse du caoutchouc. De même $C_p < C'_p$, avec pour conséquence : $C_p \times m \ll C'_p \times M$.

2-A.6 LA VALVE.



Fig. 2.22 A

Valve pour roue tôle



Fig. 2.22 B

Valve vissée pour roue alliage

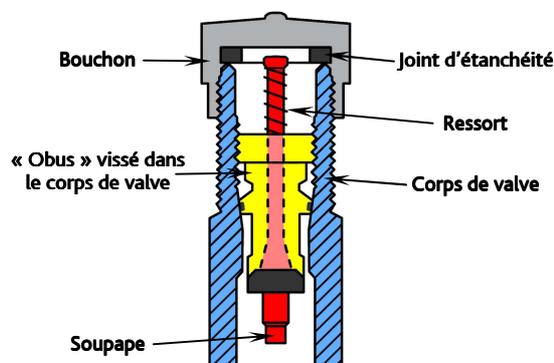


Fig. 2.22 C

C'est la pièce mécanique, qui va permettre de gonfler le pneumatique, c'est-à-dire introduire l'air nécessaire pour obtenir la pression de fonctionnement. C'est une simple soupape, tenue fermée par un ressort et la pression de l'air. Lors du gonflage, la différence de pression entre le gonfleur et la pression intérieure va l'ouvrir. Elle se fermera d'elle-même lorsque la pression recherchée sera atteinte.

Cette valve est fermée par un bouchon vissé, dont l'importance est souvent négligée. Il complète l'étanchéité

de la valve proprement dite, mais surtout, il évite à la poussière et aux impuretés de venir perturber le fonctionnement de la soupape. Ce bouchon est un agent de propreté et permet d'éviter une « crevaison lente ».

Certains embouts de gonflage disposent d'une aiguille qui lors de la connexion sur la valve vient automatiquement ouvrir la soupape. C'est systématiquement le cas lorsque l'embout de gonflage dispose d'un manomètre de mesure.

2-B LES MATÉRIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DE LA MATRICE ET DE LA BANDE DE ROULEMENT.

Il s'agit des différents mélanges de caoutchouc utilisés. Ils intègrent de nombreux composants et sont plus ou moins chargés en additifs dont le but est de donner au caoutchouc les propriétés spécifiques voulues.

Les mélanges utilisés pour façonner un pneumatique

sont composés dans des proportions variables de caoutchouc naturel et de caoutchouc synthétique. Les proportions d'un mélange sont un compromis, un savant équilibre dont les propriétés finales sont fonction du besoin.

2-B.1 LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU CAOUTCHOUC.

a) Résilience. Il s'agit de sa résistance au choc, laquelle se matérialise par la hauteur de rebond d'une balle.

b) Élasticité. Il s'agit de la propriété, pour le caoutchouc, de pouvoir revenir à sa forme initiale après une sollicitation.

Ces deux caractéristiques sont applicables dans n'importe quelle direction, et s'expliquent par la structure moléculaire, obtenue par polymérisation d'une chaîne de monomères.

c) Souplesse. Le caoutchouc peut être déformé facilement.

d) Imperméabilité à l'air et à l'eau. Pour conserver ses propriétés pneumatiques, il est impératif que l'air sous pression reste emprisonné dans le volume délimité par le caoutchouc. De même, aucun élément extérieur (eau, poussière, etc) ne doit pénétrer dans ce volume pour perturber son fonctionnement.

e) Résistance. À l'abrasion et aux produits chimiques selon les additifs incorporés.

f) Compatibilité avec d'autres matériaux. Il peut être assemblé avec d'autres matériaux tels que les textiles et l'acier, pour former un matériau composite, inextensible, présentant une combinaison de propriétés entre : résistance, solidité, souplesse.

2-B.2 LA CHIMIE DU CAOUTCHOUC SYNTHÉTIQUE.

Elle est liée à celle des hydrocarbures, dans lesquels le pétrole est omniprésent et plus particulièrement à l'un de ses composants : l'éthylène.

a) la structure macromoléculaire. Quel que soit le type de caoutchouc considéré, la structure macromoléculaire est un polymère formé en une longue chaîne de monomères (molécule de base) qui s'assemble au cours d'une opération appelée **Polymérisation**. C'est la propriété que possède l'atome de carbone de constituer des molécules possédant un grand nombre d'atomes. Lors de cette opération, l'assemblage peut se faire de plusieurs manières :

- ⇒ de **bout en bout**, cela donne une configuration appelée : **cis-**
- ⇒ en **chaînes latérales** : l'extrémité d'un monomère se fixe entre les extrémités d'un autre mono-

mère pour former une chaîne latérale, d'un côté ou d'un autre. Cette configuration est appelée : **trans-**

b) la chaîne. Dans l'opération de polymérisation, le monomère peut être assimilé à un objet pourvu de crochets lui permettant de s'associer avec d'autres objets, eux-mêmes portant des crochets. Si chaque objet possède un seul crochet, alors la chaîne est linéaire, comme par ex. les polyamides. Dans le cadre d'un polymère tridimensionnel, le monomère dispose de trois crochets, c'est le cas des polyesters.

L'action de l'oxygène peut provoquer une réaction de scission d'une chaîne polymère et sa destruction.

Les caoutchoucs sont solubles dans l'essence, le benzol, le toluène, l'éther de pétrole, mais insoluble dans l'eau ou l'alcool.

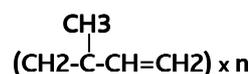
2-B.3 LES CAOUTCHOUCS DE BASE.

a) Le caoutchouc naturel ou (NR : Natural Rubber).

Le caoutchouc naturel est un produit d'origine végétale. Certaines plantes contiennent en surface, des vaisseaux lactescents qui, après incision, produisent un liquide blanchâtre, laiteux : le **latex**. Le latex est une émulsion stable, composée d'eau et de 30 à 40% de « globules » constituant la partie élémentaire du NR.

Un grand nombre de végétaux peuvent fournir des latex, le plus utilisé est une euphorbiacée : l'**hévéa brasiiliensis**, cultivé dans des plantations. Il faut 100 hévéas adultes pour produire 36l de latex et 24kg de NR par jour.

Le NR est un colloïde et il n'y a qu'un seul type chimique, monomère de base : **cis-1-4** poly-isoprène :



* **n** signifie que ce monomère est reproduit n fois, pour former un polymère.

Le NR a de bonnes qualités d'élasticité, une bonne résistance à la déchirure, mais il s'use rapidement.

b) Les caoutchoucs synthétiques.

Les caoutchoucs synthétiques sont des hydrocarbures pouvant appartenir à de nombreux types chimiques différents, et dans lesquels il y a comme élément de base l'isoprène artificiel, mais aussi de nombreux autres monomères tels que :

- Butadiène : **CH₂=CH-CH=CH₂**
- Styrène : **CH₂=CH-C₆H₅**

- Chloroprène : $\text{CH}_2-\overset{\text{Cl}}{\text{C}}-\text{CH}=\text{CH}_2$
- Éthylène : $\text{CH}_2=\text{CH}_2$
- Propylène : $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}_2$
- Butylène.
- Acronitrile. etc...

Les mélanges de caoutchouc utilisés se différencient par :

- La méthode d'élaboration,
- La longueur de la chaîne moléculaire,
- L'arrangement des monomères dans la chaîne, **cis-** ou **trans-**.

Cela permet de constituer des polymères de longues chaînes et de structures indéfiniment variées, sur la base de plusieurs monomères. D'où la possibilité, par des combinaisons spécifiques d'obtenir une large gamme de propriétés.

Pour amener les molécules d'un mélange composé de monomères différents à s'unir, il est généralement nécessaire d'introduire un catalyseur, le plus souvent du Sodium, agent chimique chargé de favoriser et d'accélérer la réaction chimique.

Les principales matières premières sont des liquides ou des gaz liquéfiés provenant majoritairement du pétrole, et / ou du charbon.

Vu les caractéristiques particulières de l'emploi d'un pneumatique, seules quelques combinaisons seront majoritairement utilisées, nous retiendrons :

1°) L'isoprène (IR : Isoprène Rubber)

Les difficultés rencontrées pour la fabrication d'une réplique synthétique du NR furent liées au moyen d'unir les unités isoprène, selon un arrangement régulier. Pour obtenir une chaîne à maillon droite, les catalyseurs capables d'obtenir ce résultat ne furent mis en œuvre qu'au milieu du 20^{es}. Plus la chaîne sera longue et alignée, plus les propriétés du composé synthétique se rapprocheront du NR.

Le principal débouché de l'IR est le pneumatique de toutes dimensions, car il est possible d'obtenir une constance de qualité. .

IR et NR sont utilisés pour les pneus d'avion, dont les conditions d'emploi sont particulières : fortes charges, chocs lors des atterrissages, grande vitesse périphérique, gradients de température entre le stockage en vol et le roulage sur piste.

2°) Le caoutchouc de styrène-butadiène (SBR : Sty-rène-Butadiène Rubber).

Il s'agit d'un polymère composé de 25% de maillons styrène, distribués au hasard dans 75% de maillons butadiène. Il en existe plus de 500 qualités différentes. Ses propriétés sont assez proches du NR. Cf. schéma du procédé de fabrication sur fig. 2.23

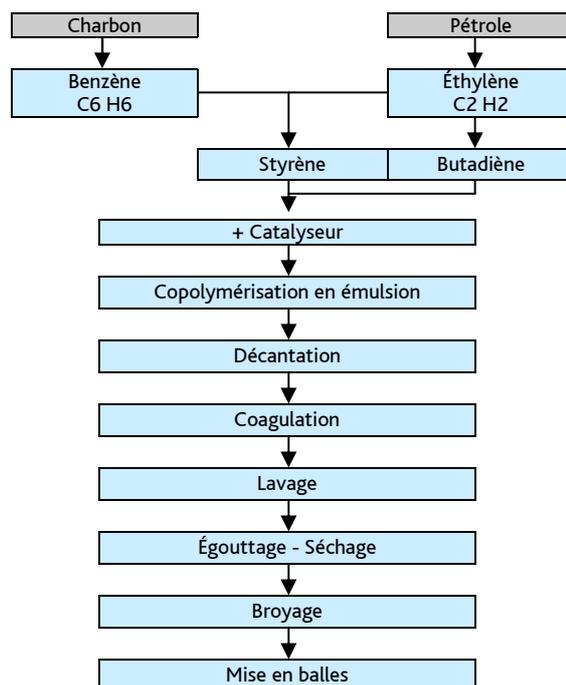


Fig. 2.23

Schéma de fabrication du SBR.

Par rapport au caoutchouc naturel, le caoutchouc de styrène-butadiène présente néanmoins quelques différences :

- ⇒ Il est tout d'abord moins résilient et ne restitue, en conséquence, pas la totalité de l'énergie de déformation fournie, ce qui lui donne une forte hystérésis. La perte se transforme en chaleur. Cette dernière caractéristique est utile pour le roulage sur sol mouillé. En effet, l'expérience montre qu'un caoutchouc à forte hystérésis a une meilleure adhérence sur sol humide et verglacé. L'hystérésis a également une influence sur la température du pneumatique, température qui va aussi dépendre des épaisseurs de caoutchouc, de la pression de gonflage en fonctionnement, de la vitesse du véhicule et des conditions atmosphériques.
- ⇒ Il résiste mieux à l'abrasion, d'où son utilisation surtout pour les bandes de roulement.

Le SBR est majoritairement utilisé pour les pneus tourisme, application qui utilise environ les 2/3 du SBR produit dans le monde.

3°) Le caoutchouc de Polybutadiène (BR : Butadiène Rubber)

Il existe plusieurs sortes de caoutchouc de butadiène, selon le procédé de fabrication, par émulsion ou en solution et le type de catalyseur utilisé.

Tous possèdent une grande résilience, supérieure à celle du caoutchouc naturel. Cela signifie une faible hystérésis et une faible quantité de chaleur produite en interne lors des déformations.

La tenue à l'abrasion du caoutchouc de Polybutadiène est bonne et sa flexibilité reste acceptable à basse température. Il accepte facilement les ingrédients complémentaires, tels que : huile, noir de carbone. Par contre sa résistance à l'entaille est faible.

Le caoutchouc de Polybutadiène est le plus souvent utilisé en addition avec un autre caoutchouc, notamment avec l'isoprène et le caoutchouc naturel pour les pneus Poids Lourds, pour mieux contrôler l'échauffement interne.

4°) Le caoutchouc de Chloroprène ou polychloroprène (CR : Chloroprène Rubber)

Sa structure chimique ressemble à celle de l'IR, avec le remplacement d'un groupe méthyle (radical monovalent CH₃) par un atome de chlore. Cela donne à ce composé une bonne tenue à l'huile et aux solvants, ainsi qu'une bonne résistance au vieillissement sous l'effet des rayons UV (le soleil) et de l'oxydation (effet de l'oxygène et de l'ozone).

Sa tenue à la température est bonne et selon le composé, peut dépasser 100°C.

Sa résilience est inférieure à celle du NR et diminue fortement en dessous de 0°C.

Autres qualités : bonne résistance à l'abrasion et un bon coefficient d'adhérence.

5°) Le Butyl caoutchouc (IIR : Butyl caoutchouc)

C'est un copolymère, composé à base d'iso butylène et d'une petite proportion d'IR.

Sa propriété remarquable est une très basse perméabilité à l'air et aux gaz. Il a une faible résilience, une bonne résistance à la lumière, à l'ozone, au vieillissement et aux températures élevées. Sans modification du polymère original, l'IIR est peu compatible avec les autres caoutchoucs.

Son application est la fabrication de chambre à air et du revêtement interne (encore appelé **liner**) pour pneumatiques Tubeless.

6°) Le caoutchouc d'éthylène-propylène (EPDM)

C'est un composé de 2 hydrocarbures : 40 à 70 % d'éthylène en poids et un complément de propylène, auquel il est ajouté une petite quantité d'un monomère. C'est un produit difficile à mettre en œuvre.

Ce composé accepte d'importantes quantités d'ingrédients complémentaires. Il a une bonne résistance à la lumière solaire, à l'ozone et au vieillissement. Son utilisation dans la fabrication de pneumatique s'étend progressivement.

Les principales propriétés de ces caoutchouc sont regroupés dans le tableau 2.24

Tableau des propriétés par type de caoutchouc. Valeur de 1 à 6. 1=le moins bon 6=le meilleur.

Propriétés	Type	NR	IR	SBR	BR	CR	IIR	EPDM
Résistance à la traction		6	5	5	3	5	4	4
Allongement à la rupture		6	6	5	4	5	5	4
Résistance à l'abrasion		3	3	4	6	4	3	4
Résistance à l'entaille		5	5	4	2	5	5	5
Élasticité au choc		5	5	4	6	5	1	5
Flexibilité à basse température		5	5	4	5	4	5	5
Résistance à la chaleur		3	3	4	4	5	4	5
Résistance à l'oxydation		3	3	4	5	5	5	6
Résistance à la lumière		3	3	4	4	5	5	6
Résistance aux intempéries		3	3	3	4	5	5	6
Résistance aux huiles		1	1	2	1	5	1	3
Résistance à l'essence		1	1	3	2	5	1	2
Résistance aux acides et bases		4	4	4	4	5	5	6
Résistance à la combustion		1	1	1	1	4	1	1
Perméabilité au gaz		2	2	3	3	4	6	3
Rémanence de compression à -40°C		4	4	4	4	2	2	3
Rémanence de compression à +20°C		5	5	4	4	4	3	4
Rémanence de compression à +100°C		1	1	2	2	3	5	5

Tableau 2.24

2-C LES CONTRAINTES NORMATIVES.

Un pneumatique doit pouvoir être remplacé, donc être interchangeable. Cette interchangeabilité impose de standardiser les dimensions, et les caractéristiques

structurelles, d'où la mise en place de normes de désignation, et de construction, applicables par les différents manufacturiers.

2-C.1 DESIGNATION.

Un pneumatique pour voiture particulière est désigné par une suite de chiffres et de lettres, gravés sur les flancs dans un ordre précis :

a) la largeur. La largeur nominale **S** de la section, en pouces ou en millimètres. Cf. Fig. 2.25

Ex : **225** signifie 225 mm. Comme dans toute fabrication, ces dimensions sont affectées de tolérances. Deux pneumatiques fabriqués par deux manufacturiers distincts, bien qu'indiquant la même valeur de largeur sur

le marquage, pourront en fait être d'une largeur supérieure ou inférieure à cette valeur. Cette tolérance peut varier de 2 à 5%.

b) la série, définit le rapport nominal d'aspect : **H/S x 100**, **H** étant la hauteur de la section et **S** la largeur selon fig. 2.25.

Ex : **/50**, signifie que la hauteur est 50/100 de la largeur. C'est la caractéristique d'un pneu « large ».

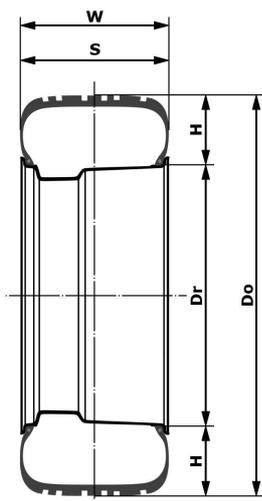


Fig. 2.25

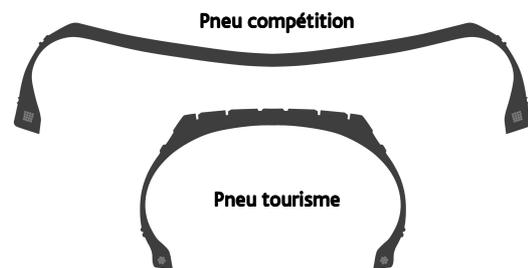


Fig. 2.26

Écart de rapport H/S pour deux applications distinctes.

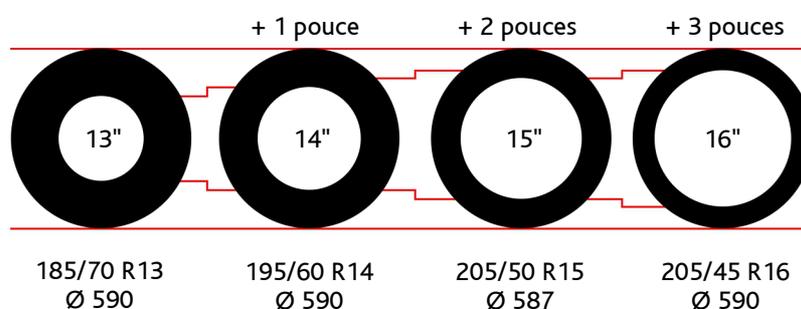


Fig. 2.27

Pour un même diamètre extérieur, il sera possible de choisir entre différents diamètres de roue comme illustré par la fig. 2.27 : pour un diamètre extérieur de 590 il sera possible de monter une roue de 13" en série 70 ou une 16" en série 45. Mais cela ne sera pas neutre sur la largeur, qui va passer de 185 à 205mm.

La conséquence en sera une modification de la forme de l'empreinte de la surface de contact au sol. Cf. figs. 2.28a et 2.28b

Série 70



Fig. 2.28 a

Série 50

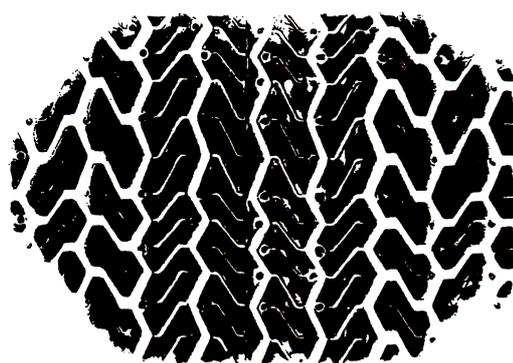


Fig. 2.28 b

Forme d'empreintes de contact au sol.

Pour un pneumatique série 70, cette empreinte sera plus longue que large et inversement pour une série 50, à diamètre extérieur identique dans les deux cas.

c) Une lettre : l'indice de vitesse.

La structure architecturale du pneumatique définit une vitesse périphérique maximale qu'il ne peut dépasser sans risque de rupture. Sur la désignation, cela se traduit par une lettre correspondant à une vitesse maxi. Cf. tableau en annexe

Ex : H : jusqu'à 210km/h, V : > 210km/h.

d) Le type de carcasse : Diagonale ou Radiale.

Ex : R = Radial.

e) Le diamètre nominal de la jante. Il s'agit de la zone d'accrochage du pneumatique sur la jante. C'est une cote, en pouces ou en millimètres.

Cf. tableau d'équivalence, pouces (ou inchs) et millimètres, en annexe.

Il en résulte une désignation, comme par ex : **215 / 70 VR 15** dans laquelle :

⇒ **215** est la largeur nominale, en mm.

⇒ **70** est la série et signifie que le rapport $H/S = 0,70$ ou $H = 0,70 \times S$,

⇒ **V** correspond à une vitesse maxi > 210km/h,

⇒ **R** indique une construction de type Radiale,

⇒ **15** est le diamètre nominal de la jante, en pouces. Ce mélange d'unité entre le système métrique et le système anglo-saxon est un consensus mis en place pour limiter les dissensions entre les approches US et Européennes.

2-C.2 LES INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES.

Ce marquage comporte dans certains cas, outre les informations minimales précédentes, les marquages complémentaires suivants :

a) Tubeless ou pneumatique avec chambre intégrée.

Tubeless signifie : sans chambre. Si de fait la chambre à air est physiquement supprimée, la fonction est remplacée par une feuille de caoutchouc spécial, à base de butyl, intégrée à la carcasse et qui, comme la chambre à air a pour fonction d'assurer l'étanchéité à l'air. A noter qu'un pneu Tubeless nécessite l'usage d'une valve et d'une roue spécifiques.

Un pneumatique qui n'a pas cette mention tubeless inscrite sur le flanc nécessite l'usage obligatoire d'une chambre à air. Par contre, il est interdit de mettre une chambre à air dans un pneumatique marqué Tubeless.

b) M+S, sigle de Mud and Snow, Boue et Neige.

Cette mention indique un pneumatique adapté au rou-

lage tous chemins dans la boue et sur la neige. Ces pneumatiques se distinguent visuellement par les sculptures de la bande de roulement dont les pavés ont une forme pyramidale particulière et un fort taux d'entaille.

c) Renforcé (Reinforced) Ce pneumatique a subi une construction particulière avec ajout de nappes en général sur l'armature et sur la ceinture. Ce type de pneumatique est apte à subir de plus fortes charges et à rouler sur des sols plus contraignants comme par ex. dans la pierraille.

d) Un Indice de charge, (ou charge maximale admissible pour une pression donnée.) Cette mention est une information complémentaire à l'indice de vitesse. Elle est exigée par certains pays. Elle peut prendre la forme soit :

⇒ D'un chiffre Cf. tableau en annexe

Pour un pneumatique déterminé, cette limitation de charge fait l'objet d'un abaque : les **courbes isoflèches** qui précisent pour chaque pression, la charge maxi acceptable. Cf. fig. 2.29

⇒ D'une inscription. Ex : «**MAX LOAD ... AT PSI MAX PRESS** », ou : Charge maximale... à pression maximale en PSI (Pounds by Square Inch.)

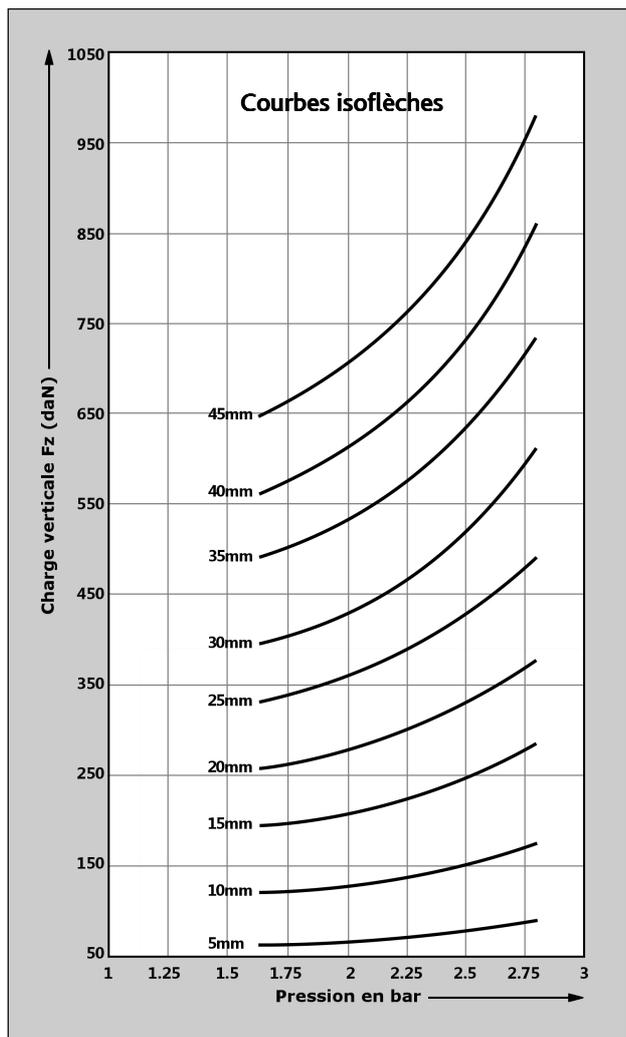


Fig. 2.29

e) Le nombre de « Ply » ou nappes constituant la structure, flanc et ceinture.

Ex : « **SIDEWALL PLIES.....** » : Nombre de Ply du flanc , « **TREAD.....PLIES** » : Nombre de ply de la ceinture.

f) La conformité à norme. Selon certains pays, l'attestation de **conformité à une Réglementation ou à une Norme**, nationale ou internationale, comme par ex : **DOT....** pour les Etats-Unis, (Department Of Transportation).

g) La date de fabrication. Située en général sur la partie basse proche du talon, cette date est souvent indiquée à la fin d'une série de chiffre, par la semaine de l'année et le dernier chiffre de l'année en cours. Ex : « 458 », le chiffre 45 est utilisé pour signifier la 45ème semaine de l'année et le chiffre 8 pour l'année 2008. Mais le manufacturier peut aussi utiliser des sigles particuliers qui lui sont propres.

h) Des repères, propres à chaque manufacturier : sa Marque, des repères de production, etc...

j) Les indicateurs d'usure. L'usure d'un pneumatique se mesure par la profondeur des sculptures. Plus l'usure est grande, plus faible est la profondeur de ces sculptures. Ces indicateurs sont des excroissances de caoutchouc qui se trouvent en fond de sculpture et sont intégrés à la bande de roulement. Cf. fig. 2.30

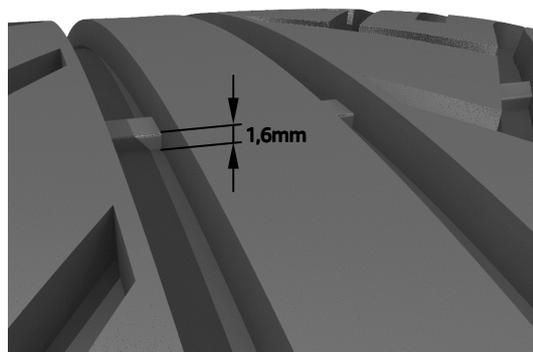


Fig. 2.30

2-C.3 NORMES ET RÈGLEMENTS.

La dimension d'un pneumatique, donc sa désignation et son marquage font l'objet de **Normes : Iso, AFNOR, ETRTO** (European Tyre and Rim Organisation) et doivent suivre une réglementation : **Règlements de Genève, ECE, DOT** (Department Of Transportation), etc....

La réglementation européenne ECE/324 contraint les constructeurs, à partir de novembre 2012, d'installer sur leurs nouveaux véhicules des systèmes de surveillance de la pression des pneumatiques (SSPP), afin de détecter toute pression de gonflage anormale.

2-C.4 L'INFORMATION AU CONSOMMATEUR.

A compter du 1^{er} juillet 2012, les manufacturiers sont tenus d'apposer une étiquette supplémentaire pour chaque pneumatique, indiquant le niveau de performance dans 3 domaines :

a) la **résistance au roulement**, qui impacte directement la consommation d'énergie. L'intervalle entre le niveau A et le niveau G correspond à un écart de consommation estimé à 0,5l / 100kms. Cette résistance est mesurée sur banc à rouleau selon la procédure ISO 28580.

b) le niveau d'**adhérence** sur sol mouillé. L'écart entre A et G correspond à une distance > 10m, lors d'un freinage.

c) le **niveau sonore**, ou bruit émis par le pneumatique et mesuré à l'extérieur du véhicule.

C'est une volonté de la Commission Européenne de réglementer ces paramètres en appliquant un « grading », comme cela se pratique déjà pour l'électroménager. Il ne devrait y avoir aucune inscription au niveau D, pour bien marquer la différence entre les « bons » et les « moins bons ».

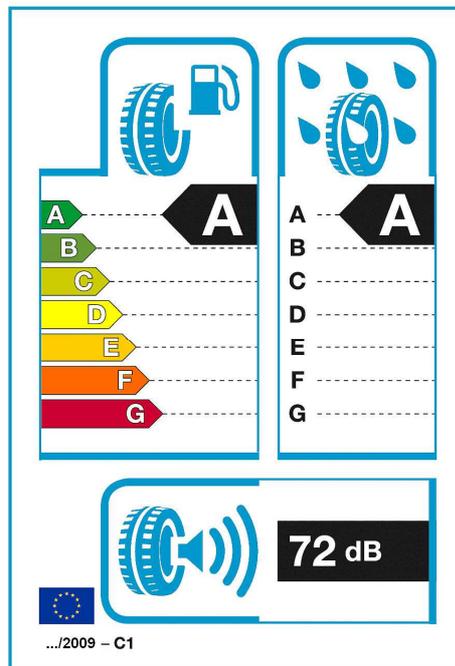


Fig. 2.31

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

3-A REMARQUE PRÉLIMINAIRE.

Ce contact pneu/sol est une zone fondamentale, une sorte de frontière qui va délimiter deux systèmes relationnels distincts dans la création et la transmission des efforts :

3-A.1 LE PREMIER SYSTÈME.

Il est la relation entre le pneumatique et le sol sur lequel il roule. C'est ce qui va être étudié dans le chapitre 3.

Nous examinerons deux types de sol : le sol rigide et le sol meuble. La grande majorité des pneumatiques roule sur la route, sol rigide, et le véhicule doit suivre cette route. Il est utile de préciser quelques données qui vont influencer sur le pneumatique :

a) Définition d'une route. Une route est un ouvrage capable d'assurer un trafic de véhicules, et permettant de se rendre d'un point A à un point B, dans les meilleures conditions de vitesse, de confort et de sécurité.

b) Les principales caractéristiques d'une route :

- Le **tracé**, encore appelé parcours, tient compte des conditions géographiques et des nécessités de la circulation pour aller de A à B. Un tracé doit respecter une vitesse de référence, ou vitesse minimale de sécurité, qui induit des contraintes d'aménagement (exemple : le rayon des courbes sur une autoroute doit avoir une valeur minimale de 1200m pour une vitesse de référence de 140km/h.)

- Les **profils**. Ils doivent être régulier, sans creux ni bosses, on distingue :

- 1°) Le **profil en Travers** : La largeur : de 5 à 7m pour une route à deux voies du réseau secondaire. La pente vers l'extérieur : de 1,5 à 2% ; Le **dévers** en courbe : de 2 à 6,5%.

- 2°) Le **profil en Long** : Pente des montées et des descentes <4% sauf en pays montagneux.

- 3°) La **portance**, capacité à résister aux charges de la circulation, y compris sous l'effet des intempéries. Cela nécessite une bonne stabilité des couches constitutives, qui doivent être insensibles à la dégradation sous l'effet de la charge verticale, de l'eau, mais aussi de produits tels que : l'huile, l'essence, le gas-oil, le sel de déneigement, etc.

- 4°) L'**état de surface** : usure, propreté, encrassement. C'est la propriété de non-glissance de la couche supérieure ou couche de roulement.

- c) les conditions de circulation.** Une route doit résister à la charge de la circulation et aux conditions météorologiques pendant un certain nombre d'années, c'est sa « durée de vie ».

3-A.2 LE SECOND SYSTÈME.

Il est la relation entre le pneumatique et le véhicule, le lien entre les paramètres mécaniques du pneumatique et ceux du véhicule : masse et répartition des masses,

cinématique, fréquence de suspension, etc. Ce second système fait l'objet du § 4, et sera la synthèse de l'emploi du pneumatique en termes de « tenue de route ».

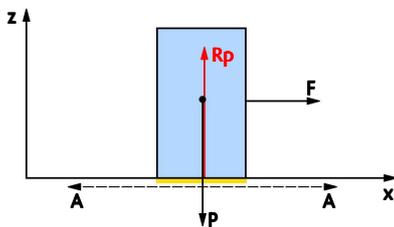
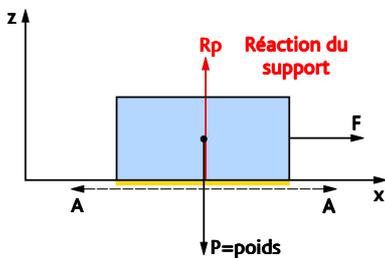
3-B PRINCIPES DE L'ADHÉSION PNEUMATIQUE/SOL.

Il s'agit d'analyser les phénomènes physiques générés lors du contact du pneumatique avec le sol. Cela nous permettra de mieux évaluer les limites des conditions d'utilisation de notre voiture sur la route.

Le pneumatique étant le point commun entre le véhicule et le sol, Le phénomène physique majeur généré dans la zone de contact pneumatique-sol est : L'**adhérence** (« union d'une chose à une autre »).

3-B.1 DÉFINITION DE L'ADHÉRENCE.

a) Le principe de l'adhérence découle des expériences faites en 1835 par Coulomb et Morin. L'expérience de base est la suivante : Cf. fig. 3.1 Un corps ayant la forme d'un parallélépipède est posé sur un sol plat et horizontal. Il est soumis à la gravité par son poids P , le sol comme tout support fournit une réaction égale en valeur et de sens opposé. Il s'agit donc d'un contact plan sur plan. Si l'on veut déplacer ce corps dans le plan de son support, il faut lui appliquer un effort F , parallèle au plan de ce support. Le déplacement ne sera effectif que lorsque la force F atteindra une intensité de valeur A que l'on appelle : « **limite d'adhérence** ». A est équivalent à une force.



Expériences de Coulomb et Morin.

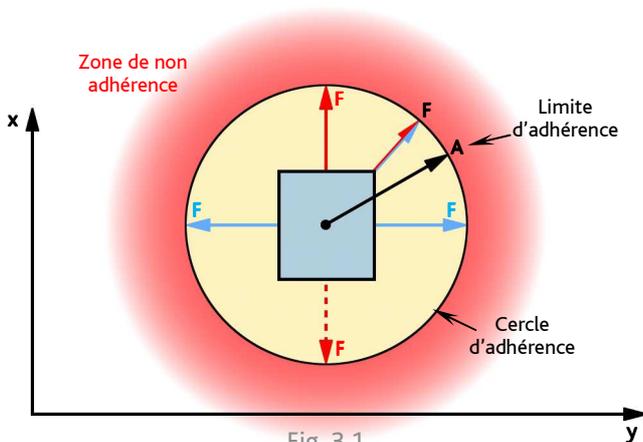


Fig. 3.1

Le cercle d'adhérence.

Connaissant la valeur de P et ayant enregistré la valeur de A , il existe une relation liant A et P : $A = \mu \times P$, dans laquelle :

- μ = coefficient sans dimension caractérisant l'adhérence des surfaces en contact. Ce coefficient dépend de l'état de surface et de la nature physico-chimique des corps en contact.

- P = Poids du corps considéré, force de gravité, verticale.

b) Les expériences de Coulomb et Morin précisent que si l'on :

- Change le côté du parallélépipède en contact avec le support, A ne change pas, et reste indépendant de la surface. Pour un même poids P , si la surface S diminue, la pression par unité de surface augmente. L'adhérence est proportionnelle à la pression et à l'aire de contact :

$$A = \mu \times \frac{P}{S} \times S$$

- Ajoute un deuxième parallélépipède, de même poids que le premier, la valeur limite d'adhérence A est multipliée par deux.

- Interpose entre le parallélépipède et son support, un corps aux caractéristiques physico-chimiques différentes, par exemple de l'huile, qui modifie la qualité du contact entre les deux surfaces. Alors, la limite d'adhérence est modifiée.

- Applique l'effort F dans une quelconque direction parallèlement au support, la valeur de A ne change pas.

Conséquence : Si en appliquant l'effort F parallèlement au support dans n'importe quelle direction, la valeur de A reste identique, alors le vecteur A représentant la valeur limite d'adhérence, va délimiter dans le plan du support, un cercle appelé : **Cercle d'Adhérence**. Cf. fig. 3.1 et § 3-C.2

c) De leurs expériences, Coulomb et Morin déduisent deux informations complémentaires :

- Qu'il est plus difficile de créer le mouvement que de l'entretenir, ce qui impose de distinguer :

1°) le frottement de départ : μ_0 .

2°) du frottement cinétique, c'est-à-dire lors du mouvement : $\mu_c < \mu_0$.

- Qu'une fois le corps en mouvement, A était indépendant de la vitesse de déplacement.

Le résultat de ces expériences conduit à des lois simples définies comme : **les lois du frottement**.

Nous appellerons forces de frottement, les forces plus ou moins complexes et plus ou moins discernables qui absorbent de l'énergie lors d'un mouvement.

3-B.2 REMISE EN CAUSE DES LOIS DE COULOMB ET MORIN.

a) Les expériences de Kimball. Quelques années plus tard, en 1877, l'américain Kimball effectue de nouvelles expériences, en utilisant des sabots de frein en fonte sur des roues en acier. Ces expériences montrent que le coefficient μ chute, lorsque la vitesse augmente, pour se stabiliser ensuite et atteindre une valeur limite. Cf. fig. 3.2.

b) Les expériences de Bochet. En 1855, le physicien Bochet, qui avait déjà pressenti que μ variait avec la vitesse, démontre que le frottement est un phénomène à **hystérésis** et que tout chiffre annoncé ne peut-être qu'une moyenne dépendant d'un ensemble de mesure.

Il démontre aussi que μ n'est pas totalement indépendant de la surface de contact. Cf. fig. 3.3. μ passe par un minimum pour augmenter ensuite au fur et à mesure de l'augmentation de la surface de contact.

Compte tenu de la grande importance dans l'industrie de ces phénomènes de frottement, de nombreuses expériences furent réalisées depuis les essais de ces précurseurs, mais à ce jour, aucun résultat formel ne vient contredire ces expériences.

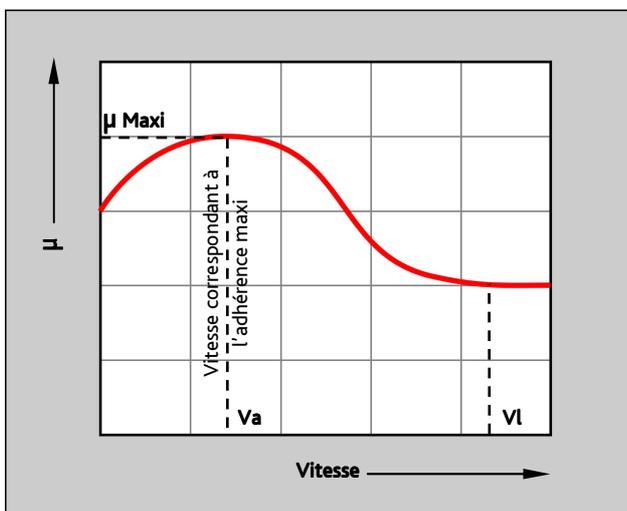


Fig. 3.2

Incidence de la vitesse du mouvement.

A faible vitesse, μ peut être faible, pour croître ensuite et passer par un maximum, puis décroître à nouveau pour atteindre une valeur stable. D'autres expériences ont montré que plus la pression exercée sur le sol est élevée, plus rapidement se stabilisait la valeur de μ .

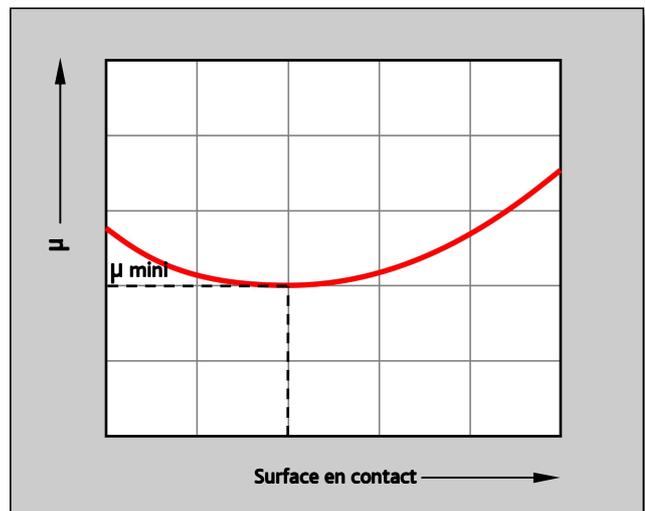


Fig. 3.3

Incidence de la surface des zones de contact.

A charge P , pression de gonflage p et vitesse constantes.

3-B.3 LE CAS PARTICULIER DU PNEUMATIQUE.

Avec le pneumatique, nous sommes en présence de deux matériaux particuliers, d'un côté un matériau **viscoélastique**, déformable : le pneumatique et sa bande de roulement en caoutchouc et de l'autre un **sol rigide** composé de graviers maintenus par un liant bitumineux.

De nombreux essais plus récents ont montré que les conditions d'adhérence entre caoutchouc et route s'écartent des constatations initiales faites par Coulomb. Notamment en ce qui concerne le coefficient d'adhérence, lequel :

- diminue lorsque la pression au sol augmente.
- croît avec la vitesse jusqu'à un maxi puis décroît. Cf. Fig. 3.2
- diminue avec la température, tant que celle-ci reste $>$ à 0°C .

Ces 3 points sont les grandes différences par rapport aux lois « classiques ».

a) **Les composantes de l'adhérence d'un pneumatique.** L'analyse du déplacement à vitesse constante d'un bloc de caoutchouc portant une charge P , sur une surface rugueuse permet de définir selon la théorie de l'adhérence développée par KUMMER et MEYER deux sous-composantes pour A : Cf. fig. : 3.4

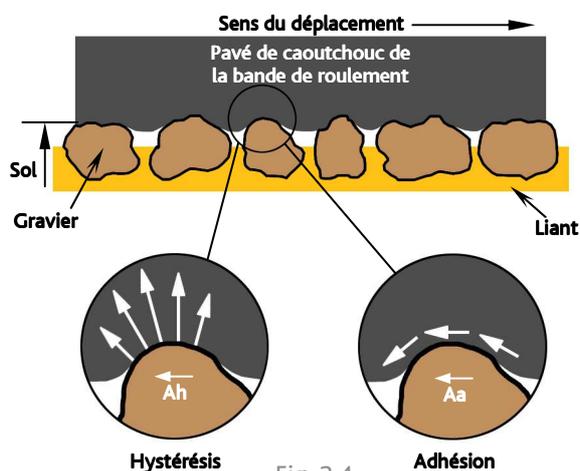


Fig. 3.4

Les composantes de l'adhérence.

- Une composante d'**adhésion**, Aa , qui suit le plan géométrique des aspérités. Cette composante d'adhésion est la conséquence des pressions ponctuelles sur le granulat, pression qui donne naissance à d'importantes forces moléculaires entre les matériaux. Ces forces moléculaires mettent en action des tensions de cisaillement dans la surface de contact. La résultante est une force horizontale : Aa .

- Une composante d'**hystérésis**, Ah , basée sur la déformation des éléments du pavé de caoutchouc lors de son passage sur les inégalités de la surface. Lors de cette déformation, il y a une différence entre l'énergie dépensée pour la compression et l'énergie, plus faible, resti-

tuée après le passage de la déformation, lors du retour à la normale. Cf. ANNEXE § Hystérésis. Cette différence, qui est une perte, engendre des efforts, dont une résultante horizontale : Ah .

L'adhérence globale sera la somme de ces deux composantes : $A = Aa + Ah$.

b) **Propriétés des composantes de l'adhérence.** Dans la grande majorité des conditions de roulage, la composante d'adhésion : Aa est la plus importante.

A noter que nous avons toujours la règle : $A = \mu \times P$ (Adhérence = coefficient d'adhérence \times charge verticale). Cela signifie que pour Aa correspond μa et pour Ah correspond μh . $A = Aa + Ah = P \times (\mu a + \mu h)$

Le rôle de chacune de ces composantes se comprend mieux, à la lumière de trois situations distinctes. Prenons un bloc de caoutchouc et faisons le rouler sur :

1°) Une plaque de verre, parfaitement plane, lisse et sèche. Dans ce cas, il n'y a aucune déformation élastique due aux inégalités dans le plan de contact avec le sol, d'où $Ah = 0$. En conséquence, $A = Aa$.

2°) Un sol déformé et rugueux. Il y aura déformation élastique dans le plan de contact avec le sol, donc $A = Aa + Ah$.

3°) Après une pluie, le sol est recouvert d'une pellicule d'eau. Cette eau va s'interposer entre le caoutchouc et le sol. Conséquence, les liaisons intermoléculaires d'adhésion seront faibles à nulles, soit : $Aa = 0$ et $A = Ah$.

Cette dernière situation explique l'importance de la caractéristique d'hystérésis du caoutchouc utilisé lors du roulage sous la pluie. Plus le mélange adopté aura d'hystérésis, c'est-à-dire de capacité de déformation, meilleure sera l'adhésion par temps de pluie. De plus, dès que le sol présentera des caractéristiques de rugosité plus marquées, permettant au caoutchouc d'avoir un contact direct avec le granulat, il se créera à chaque contact, un potentiel d'adhérence Aa supplémentaire qui renforcera l'adhérence totale.

3-B.4 LES PARAMÈTRES INFLUENÇANT Aa et Ah .

a) **La pression au sol.** Elle est définie, pour une pression de gonflage donnée, par le rapport :

$$\frac{P}{S} = \frac{\text{Charge verticale}}{\text{Surface de contact au sol}}$$

Cette pression n'est pas constante sur toute la surface de contact. Cf. fig. 3.5 Elle diffère dans chacun des plans : transversal et longitudinal, et sera influencée par :

- Une modification de la pression de gonflage. Cf. figs. 3.6, 3.7
- Une variation de la charge verticale, tout en tenant compte, qu'une modification de charge verticale, à pression de gonflage constante, va aussi modifier la surface de contact. Cf. fig. 3.8

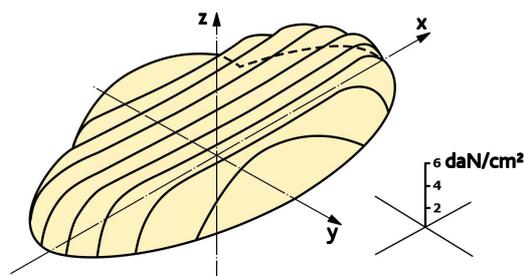


Fig. 3.5

Pression au sol suivant 3 axes, pour une pression de gonflage et une charge verticale données.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

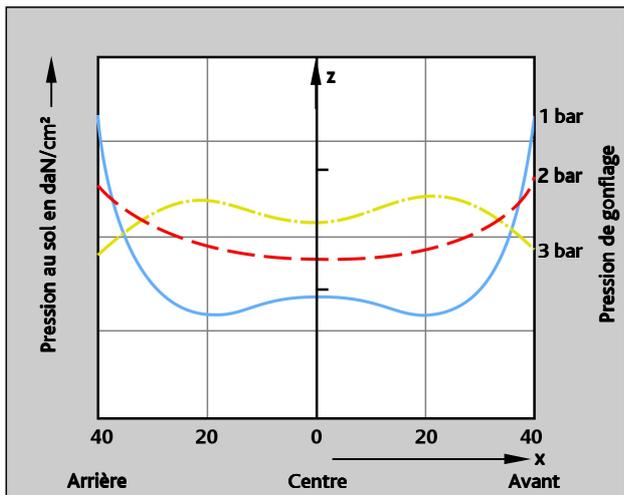


Fig. 3.6

Pression au sol en fonction de la pression de gonflage.

Dans le plan longitudinal.

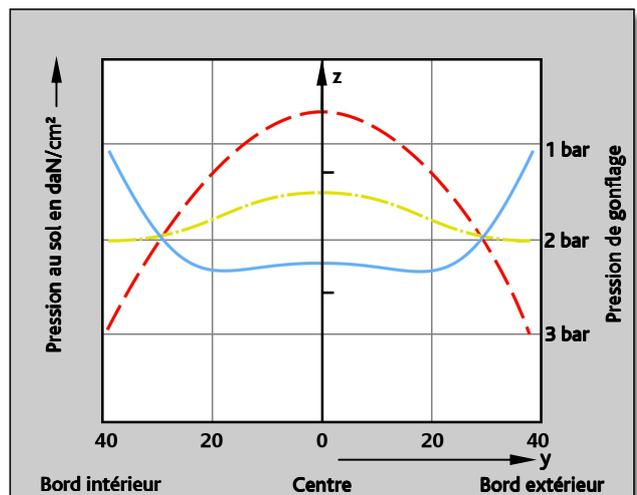


Fig. 3.7

Dans le plan transversal.

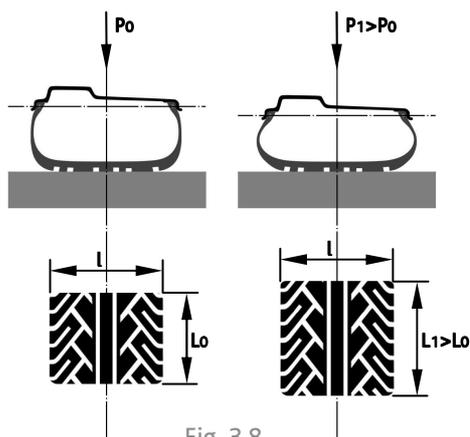


Fig. 3.8

Variation de la longueur de l’empreinte au sol en fonction du poids à la roue.

Sur un pneumatique à carcasse radiale, une augmentation de charge verticale, à pression de gonflage constante, provoque une augmentation de la longueur de la zone de contact au sol, alors que la largeur reste pratiquement constante. Cf. fig. 3.8

Par ailleurs, cette pression de contact n’est pas homogène sur toute la surface et évolue avec la vitesse de roulage. A faible vitesse, la pression est plus élevée sur les bords Cf. figs. 3.9, 3.10 et lorsque la vitesse augmente, l’inertie des nappes sommet va encore modifier cette répartition de pression.

Par contre, si la charge verticale à la roue reste constante et que la pression de gonflage augmente, il y a réduction de surface de contact, ce qui a pour effet de modifier la répartition des pressions au sol. Cf. fig. 3.6

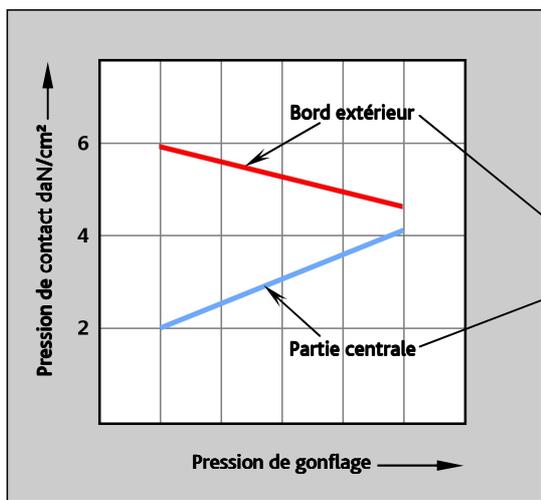


Fig. 3.9

Évolution de la pression au sol.

En fonction de la pression de gonflage et pour une charge verticale constante.

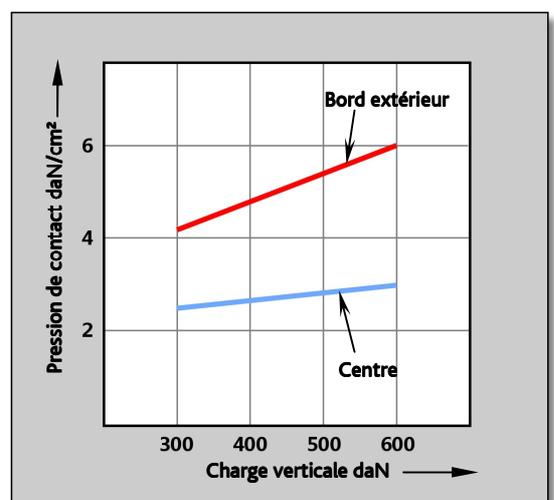


Fig. 3.10

En fonction de la charge verticale pour une pression de gonflage constante.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

De nombreux essais montrent que : μ_h augmente et μ_a diminue, lorsque la pression de contact au sol augmente. Comme μ_a diminue plus rapidement que l'augmentation de μ_h , la conséquence est que la somme $\mu_a + \mu_h$ va chuter avec l'augmentation de la pression de contact. Cf. fig. 3.11

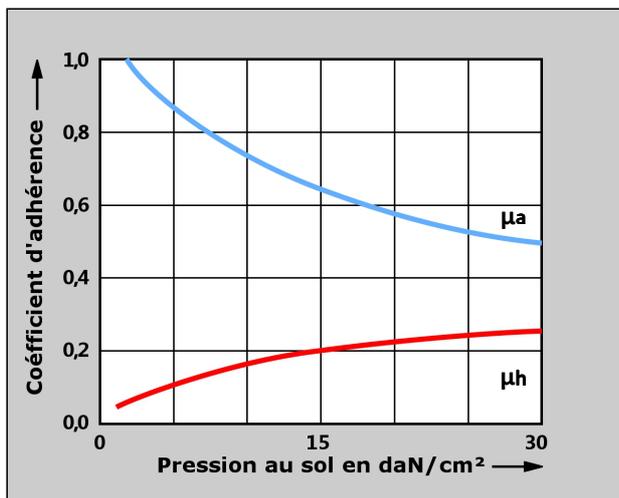


Fig. 3.11

Influence de la pression au sol sur les composantes de l'adhérence.

b) La vitesse de déplacement. Avec la vitesse, μ_a augmente, atteint un maximum pour diminuer ensuite. Diverses expériences montrent que ce phénomène est indépendant du mélange de caoutchouc, du matériau constituant la surface de la route, et de la charge verticale. Il est attribué au « glissement relatif » inhérent au roulage de tout pneumatique. Cf. § G et figs. 3.17a et 3.17b

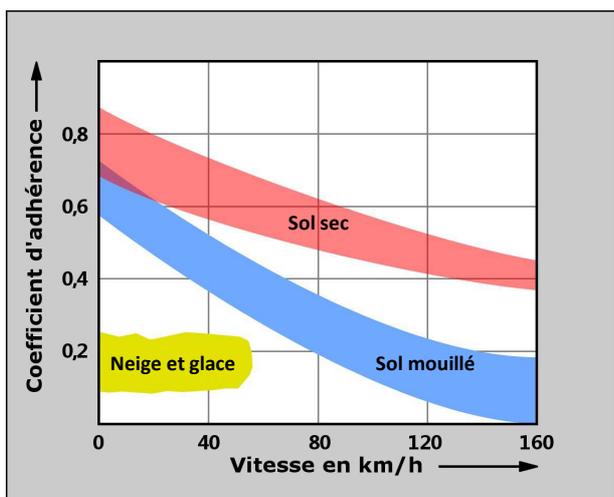


Fig. 3.12

Incidence des conditions météo sur l'adhérence en fonction de la vitesse.

c) La température. Lorsque la température augmente, μ_a et μ_h diminuent. Cf. fig. 3.13

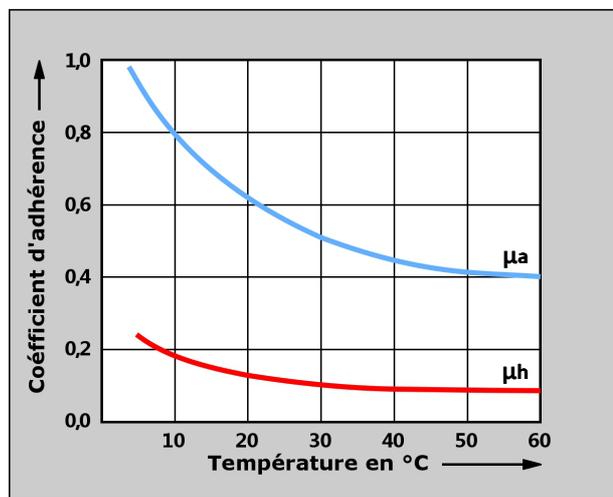


Fig. 3.13

Influence de la température.

L'augmentation de la température agit au niveau moléculaire, tant sur l'adhésion que l'hystérésis : μ_h et μ_a ont tendance à chuter.

Pour l'hystérésis, après déformation, la structure moléculaire revient plus rapidement à sa position initiale. D'où une réduction de l'effet d'hystérésis.

d) La qualité et l'état de surface de la couche de roulement. μ_a est sensible à la propreté du sol, que nous pouvons aussi appeler encrassement. μ_a est élevé pour des surfaces propres, sèches, lisses. La présence d'eau limite l'action moléculaire, et avec de l'huile, μ_a peut être = 0. Cf. figs. 3.12 et 3.14

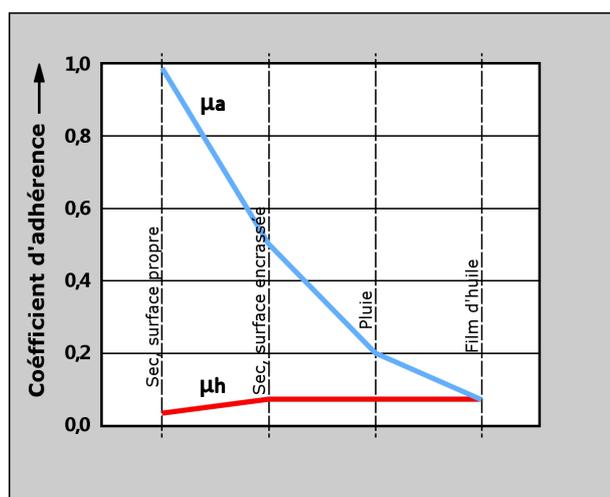


Fig. 3.14

Influence de l'état de surface du sol.

Dès que la rugosité augmente, μ_a chute. A l'inverse de μ_h qui va croître avec la texture et la rugosité de la surface. Chaque élément de rugosité, en fonction de la forme, sphérique ou conique du granulat, créera une déformation du pavé de caoutchouc. Cf. fig. 3.15 L'existence d'un film intermédiaire d'eau ou d'huile n'a que peu à pas d'influence sur μ_h .

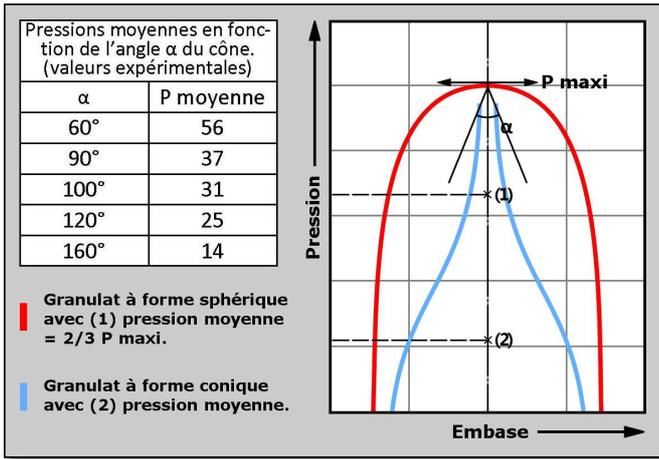


Fig. 3.15

Pression au sol d'un pavé de caoutchouc en fonction de la forme du granulat.

e) La composition du mélange de caoutchouc. Cf. fig. 3.16 Selon la nature des composants, la température de fonctionnement du pneumatique et le type de sol sur lequel il roule, le niveau d'adhérence varie.

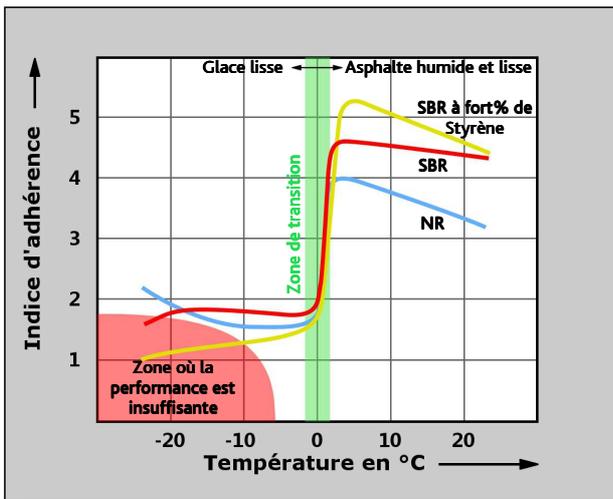


Fig. 3.16

Incidence du type de caoutchouc sur l'adhérence en fonction de la température.

f) Le cas de la roue bloquée. Il n'y a plus déroulement du pneumatique sur le sol. Ce sont donc les mêmes pavés de caoutchouc qui restent au contact. Le comportement est alors celui d'un simple pavé de caoutchouc tracté et glissant à la vitesse du véhicule et supportant une charge verticale. L'expérience montre que le caoutchouc réagit de la même façon que lorsqu'il est en rotation.

g) Le glissement relatif. C'est un phénomène propre au déroulement d'un pneumatique en ligne droite sur le sol. Il s'agit d'une différence de distance parcourue entre le déroulement correspondant à la vitesse de rotation du pneumatique et la distance réelle parcourue. L'expérience montre que l'adhérence est maximale lors d'une accélération ou d'un freinage pour un glissement relatif variant selon l'architecture du pneumatique entre 8 et 20%. Ce glissement relatif dépend de la rigidité, donc de la déformation, de la carcasse et de la dureté du mélange de caoutchouc utilisée pour la bande de roulement.

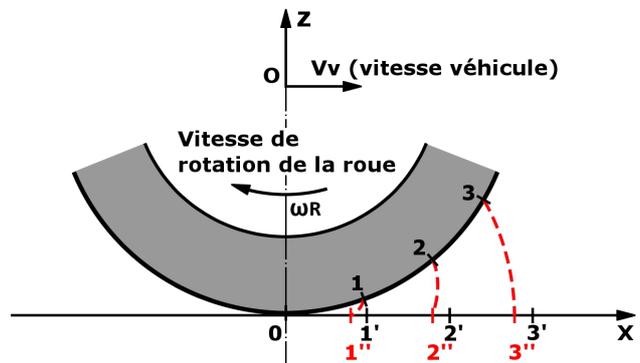


Fig. 3.17 A

Définition du glissement relatif.

Soit les repères 1, 2, 3 positionnés à l'extérieur de la bande de roulement d'un pneumatique.

Transposons sur le sol les repères 1', 2', 3' tels que : $O1=O1', O2=O2'$ etc...

Lors du déroulement du pneumatique sur le sol, nous constatons que le repère 1 vient en 1'', au lieu de venir en 1'. Il en est de même pour le point 2 qui vient en 2'', tel que : $O1'' < O1', O2'' < O2'$. Nous constatons également que : $1''1' < 2''2' < 3''3'$.

Il y a donc un retard dans le déroulement. Ce retard définit le : « glissement relatif » et correspond à une déformation de cisaillement au niveau des pavés de caoutchouc de la bande de roulement.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

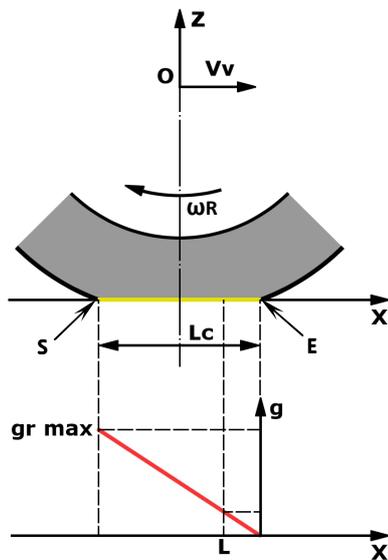


Fig. 3.17 B

Application à une zone de contact au sol d'un pneumatique.

Le glissement est nul en E, à l'entrée de la bande de roulement dans la zone de contact. Au fur et à mesure du déroulement, comme nous l'avons vu dans l'expérience de la fig. 3.17A, le glissement va augmenter, jusqu'au point S, sortie de la bande de roulement de la zone de contact. Cela peut se traduire par une droite de glissement : $g = f(L)$, avec L, position du point considéré dans la zone de contact.

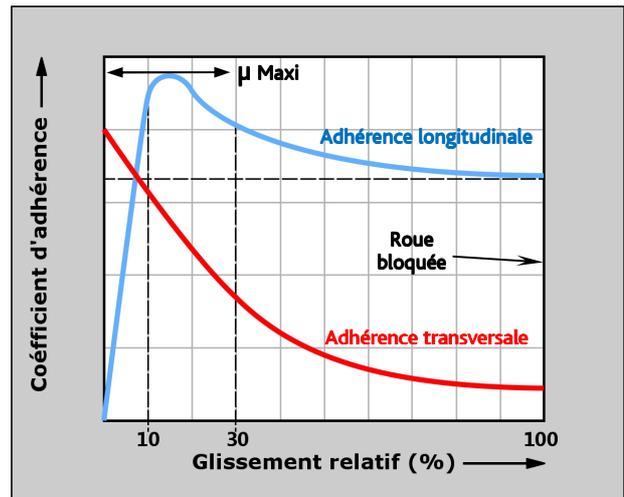


Fig. 3.18

Récapitulatif : adhérence longitudinale et transversale en fonction du taux de glissement relatif.

L'adhérence maximale en longitudinal n'apparaît qu'à une valeur de glissement fonction de l'architecture du pneumatique.

3-C L'UTILITÉ DE L'ADHÉRENCE.

On en distingue deux principalement, à savoir :

3-C.1 PREMIÈRE UTILITÉ : PERMETTRE LA MISE EN ROTATION D'UNE ROUE.

a) Soit une roue rigide sur un sol rigide. Cf. fig. 3.19

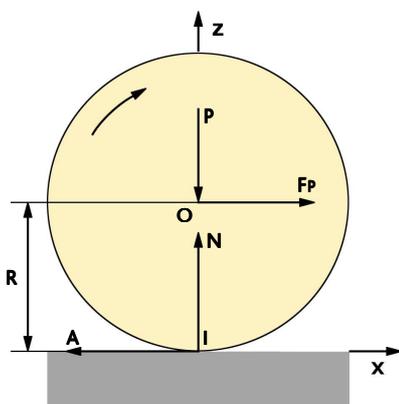


Fig. 3.19

Mise en rotation d'un roue rigide sur un sol rigide.

C'est le cas d'une roue de locomotive sur un rail. Roue et support sont indéformables, le contact entre les deux est donc ponctuel en I. La roue porte un poids P et les matériaux en contact nous donnent un coefficient d'adhérence μ . Il en découle une valeur A, limite d'adhérence. Le sol, renvoie une réaction N, égale et opposée à P. Au repos, O, centre de rotation de la roue, est situé sur la verticale passant par I. Si nous appliquons en O un effort F_p = effort de propulsion, nous allons provoquer le déséquilibre du point O / point I. Ce déséquilibre ne sera possible que parce qu'il existe au sol une réaction A, potentiel d'adhérence. La roue étant parfaitement circulaire, en rotation, le déséquilibre sera permanent, la circonférence du cercle étant en fait une infinité de points I, qui sont autant de centres instantanés de rotation de la roue / sol. L'existence d'un potentiel d'adhérence A permet à un effort F_p appliqué au centre de la roue, de la mettre en rotation.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

b) Considérons maintenant **une roue élastique sur un sol rigide**. Cf. fig. 3.20

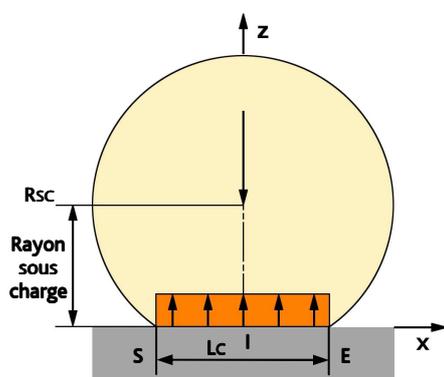


Fig. 3.20

Roue élastique sur sol rigide.

Cela représente notre pneumatique sur une route. La roue étant élastique, le point de contact avec le sol ne sera plus ponctuel, mais prendra la forme d'une surface de contact. La grandeur de cette surface dépend des caractéristiques élastiques de notre roue. Le rayon de la roue n'est plus R , mais R_{sc} = Rayon sous charge. Comme nous avons une zone de contact, l'action du poids sur le sol sera répartie sur l'ensemble de la surface de contact. Pour faire tourner notre roue en lui appliquant un effort F_p en son centre O , nous constatons que l'effort F_p précédent est insuffisant pour obtenir la rotation, il est nécessaire d'appliquer un effort complémentaire $F'p$. Pour expliquer l'existence de cet effort

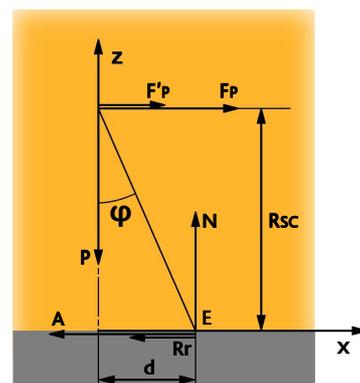


Fig. 3.21

Mise en rotation d'une roue élastique sur un sol rigide.

complémentaire, considérons notre roue avec une circonférence à l'image d'un polygone, constitué d'une multitude de facettes, qui seront autant de zones de contact L_c . Le segment ES représente une de ces facettes et l'objectif est de provoquer le déséquilibre de O , par rapport à un point d'appui au sol. Le point I précédent, centre instantané de rotation de la roue / sol s'est déplacé de I vers E , où s'applique la réaction N . Cf. fig. 3.21

P et N l'un et l'autre sur des lignes d'action parallèles et verticales, distantes de d , vont former un couple antagoniste, qui devra être vaincu par le moment : $F'p \times R_{sc}$. Cette valeur de $F'p$ est la composante de base d'une notion appelée : **Résistance au Roulement**. Cette résistance au roulement dépend de l'architecture du pneumatique mais aussi de l'hystérésis des mélanges de caoutchouc choisis. Cf. développement § 4-B.2]

3-C.2 SECONDE UTILITÉ: elle découle de l'utilisation du CERCLE D'ADHÉRENCE.

Une voiture ne peut démarrer et ensuite rouler, changer de direction que grâce à une force contenue dans le plan de la route. Elle trouve son point d'appui dans l'adhérence qui se développe entre la bande de roulement du pneumatique et la route. Cf. § 3-B.1.

Soit un coefficient d'adhérence $\mu = 0,8$, et une voiture de poids $P = 1000\text{daN}$, l'effort maxi d'adhérence, dans le plan de la route sera $1000 \times 0,8 = 800\text{daN}$. Tout dépassement de cette valeur provoquera une perte d'adhérence lors de la phase de démarrage, en roulage et lors d'un freinage, donc une perte de manœuvrabilité.

D'où la première application du cercle d'adhérence à notre pneumatique. Cf. figs. 3.22 et 3.23

Sur cette fig. est représentée la zone de contact du pneumatique au sol. Ce pneumatique supporte une charge P . La nature du sol et le type de pneumatique utilisé vont définir un coefficient d'adhérence μ et une valeur limite d'adhérence : $A = P \times \mu$, valeur qui est le rayon du cercle d'adhérence de la roue considérée. En roulage, dans un virage, aucune des roues de notre véhicule ne supportera la même charge verticale. Cela signifie qu'un véhicule à quatre roues aura dans ces conditions quatre cercles d'adhérence distincts. Cf. fig. 3.25

a) Les configurations du cercle d'adhérence. Trois cas peuvent se présenter, Cf. fig. 3.22 :

1°) Seule est appliquée une force transversale F_y , correspondante à un virage de rayon R et franchi à la vitesse V . F_y est une force centrifuge de valeur :

$$F_y = M \times \frac{V^2}{R}$$

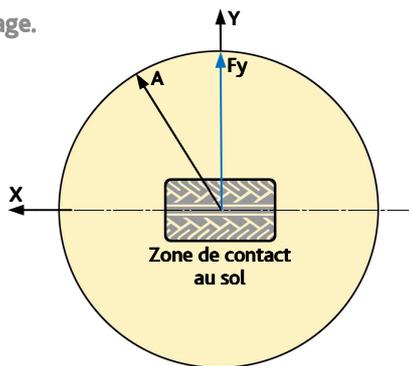
Pour rester dans le domaine adhérent, autrement dit pour imprimer une modification de trajectoire à la voiture, il est impératif que $F_y \leq A$.

2°) En plus d'un effort transversal F_y , il est appliqué un effort longitudinal d'accélération F_a . Le principe géométrique de la composition des forces nous donne une résultante R et pour que les efforts appliqués puissent permettre à la fois de modifier la trajectoire et d'accélérer, il est impératif que $R \leq A$.

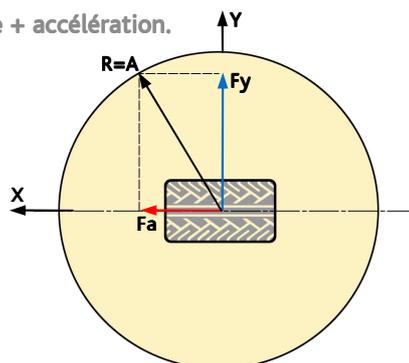
3°) L'effort d'accélération est remplacé par une force longitudinale de freinage F_f .

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

a) En virage.



b) Virage + accélération.



c) Virage + freinage.

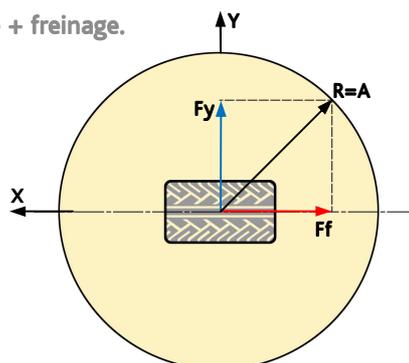


Fig. 3.22

Application du cercle d'adhérence.

Sachant que les efforts transversaux sont le résultat d'un angle au volant, les efforts d'accélération, le résultat d'une action sur la pédale d'accélérateur, et les efforts de freinage, le résultat d'une action sur la pédale de frein, il ne reste plus à au conducteur de notre véhicule qu'à positionner à chaque instant de sa conduite, et en toutes circonstances, la résultante R à l'intérieur du cercle de rayon A .

b) Sur route mouillée. Si la route est mouillée, la valeur de A est réduite du fait de la réduction de μ . Le principe du diagramme des efforts s'applique toujours, mais en tenant compte de la réduction du potentiel d'adhérence. Cf. fig. 3.23

c) 4 x 4. De même si le véhicule n'est plus en deux roues motrices, mais en quatre roues motrices, l'effort de propulsion se répartira sur quatre roues au lieu de deux en fonction du système de propulsion. Cf. fig. 3.24

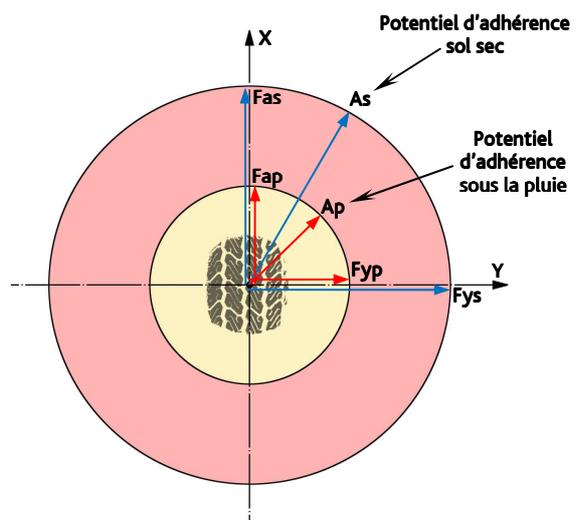


Fig. 3.23

Cercle d'adhérence : incidence de la pluie.

F_{ap} = Effort de propulsion maxi sous la pluie

F_{as} = Effort de propulsion maxi sur le sec

F_{yp} = Effort transversal maxi sous la pluie

F_{ys} = Effort transversal maxi sur le sec

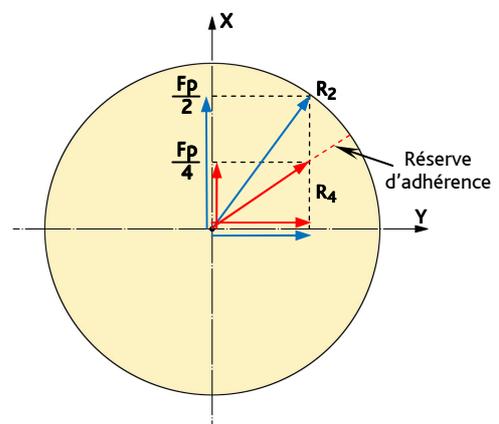


Fig. 3.24

Apport du 4X4.

En deux roues motrices l'effort de propulsion F_p sera réparti sur 2 roues, soit : $\frac{F_p}{2}$ par roue.

En quatre roues motrices, F_p sera appliqué sur 4 roues soit $\frac{F_p}{4}$ par roue.

d) Remarques sur le vocabulaire : Nous attirons l'attention du lecteur, qu'autour de ces lois sur le frottement et les phénomènes physiques induits, s'est créé un vocabulaire qui nomme les mêmes phénomènes avec des mots différents. Il est toujours recommandé de bien comprendre de quel phénomène il est question.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

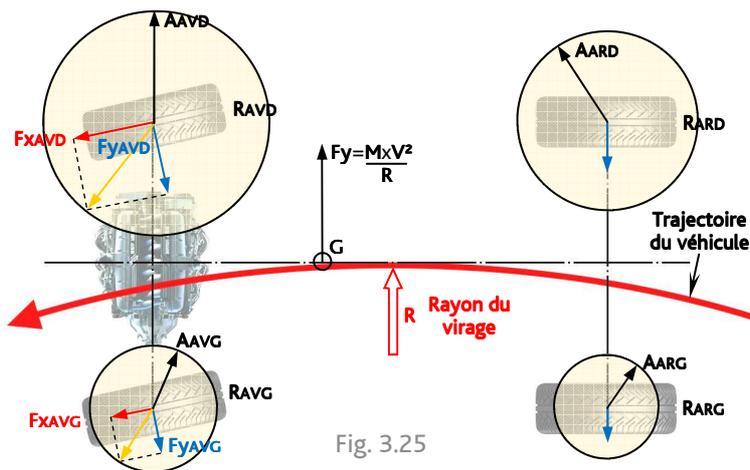


Fig. 3.25

Synthèse de l'utilisation du cercle d'adhérence sur un véhicule traction dans un virage.

$AAVG = \mu \times PAVG =$ valeur limite d'adhérence sur la roue AVG.

Idem pour les autres roues.

3-D LES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS ET L'ADHÉRENCE.

Un pneumatique est conçu pour rouler sur une route. Selon les caractéristiques de celle-ci, notre pneumatique sera plus ou moins efficace, notamment par le niveau d'adhérence qu'elle va transmettre. A noter que ce niveau d'adhérence transmis est un facteur primordial de la sécurité routière.

Il faut également noter que la circulation automobile est basée sur la possibilité de contrôler en permanence et de façon précise, la trajectoire et la vitesse des véhi-

cules. Pour cela, il est indispensable qu'il existe une force d'adhérence entre le pneumatique et la route. Elle est une combinaison de plusieurs facteurs :

- La **route** : sa géométrie et son revêtement.
- Le **véhicule** : son équipement pneumatique, son entretien, son architecture,
- Mais aussi et surtout du comportement du **conducteur** : sa compétence, son psychisme.

3-D.1 L'OFFRE ET LA DEMANDE D'ADHÉRENCE.

a) Les contraintes de la demande. Le conducteur, est le demandeur d'adhérence, il a besoin, pour accélérer, freiner, prendre un virage, d'une adhérence qui varie suivant :

- Le tracé et l'état de la route,
- Sa vitesse de roulage.

b) L'offre.

De son côté, le revêtement va mettre à disposition de notre conducteur une offre d'adhérence dépendant :

- De sa formulation,
- Des conditions de pose,
- De son usure, conséquence du trafic,
- Des conditions météorologiques, notamment par la présence d'eau.

Avec le trafic, la partie supérieure du revêtement va subir une usure sous la forme d'une action de polissage. Cf. fig. 3.15 Cette action sera plus marquée dans les zones de roulage très sollicitées : virages, côtes, zones de freinage... Ces zones présenteront un niveau d'adhérence inférieur aux autres zones, moins sollicitées. L'offre ne sera donc pas une constante lors d'un roulage. Cf. figs. 3.26 et 3.27

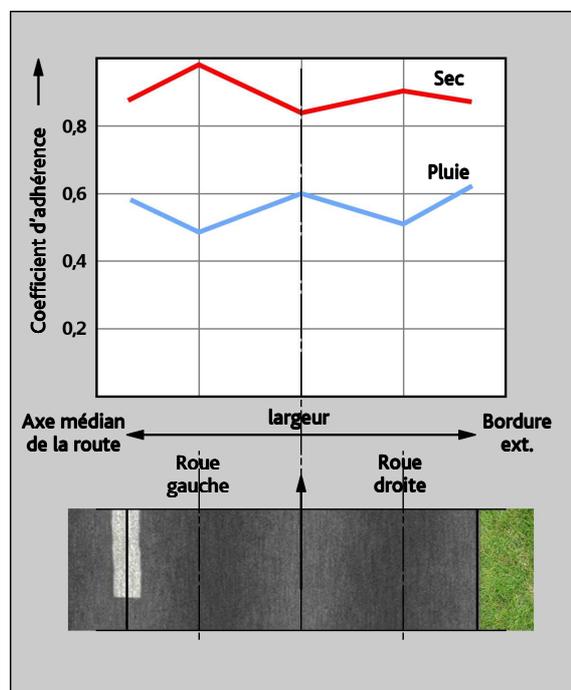


Fig. 3.26

Évolution de l'adhérence suivant le profil en travers de la chaussée. Les zones correspondantes au passage des roues D et G seront les plus usées.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

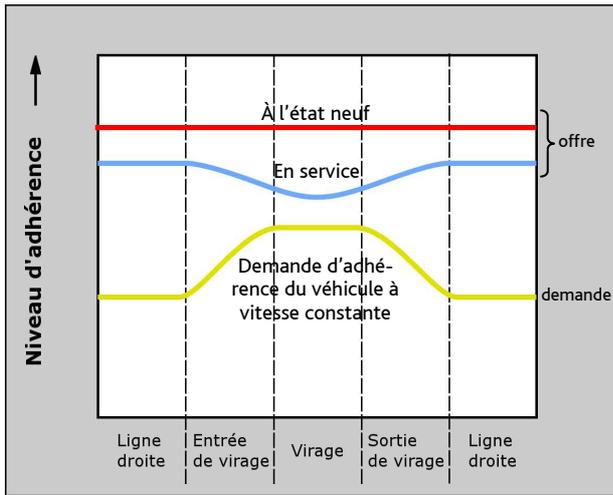


Fig. 3.27

Offre et demande d'adhérence.

L'écart qu'il y a entre le niveau moyen d'adhérence offert et le niveau moyen d'adhérence demandé correspond à la marge de sécurité disponible pour le conducteur.

Dans la pratique, cet écart est constamment variable et se trouve modifié par une multitude de paramètres, soit au niveau de l'offre, par un revêtement de qualité supérieure, un dévers dans un virage qui va le réduire, soit au niveau de la demande, par une vitesse, un besoin de braquage.

Pour le fabricant de route, les souhaits de l'utilisateur lors de ses déplacements, vont se traduire par une offre de deux adhérences globales distinctes. Cf. fig. 3.18

1°) L'adhérence longitudinale μ_L . Elle est mesurée par un « Coefficient de Frottement Longitudinal », (CFL en abrégé).

Ce coefficient est mesuré au moyen d'une roue remorquée, tractée à une vitesse constante. Le vecteur vitesse V est contenu dans le plan de la roue. Cette roue est soumise à une charge verticale F_z connue. Lors du remorquage, la roue est progressivement freinée. L'effort F_x longitudinal, qui existe dans l'aire de contact pneumatique/sol, est enregistré jusqu'au blocage complet de la roue. Le R_{sc} étant connu ainsi que la vitesse de rotation de la roue et la vitesse V du véhicule, cela permet de mesurer aussi le glissement relatif. Le CFL est la valeur maxi du rapport : F_x / F_z Cf. fig. 3.28

2°) L'adhérence transversale μ_T . Elle est mesurée par un « Coefficient de Frottement Transversal », (CFT en abrégé).

Ce coefficient est mesuré de la même façon que le CFL, sauf que la roue est braquée d'un certain angle. Il en résulte que le vecteur vitesse n'est plus contenu dans le plan de la roue ce qui induit un nouvel effort F_y , transversal. Le CFT est la valeur maxi du rapport F_y / F_z .

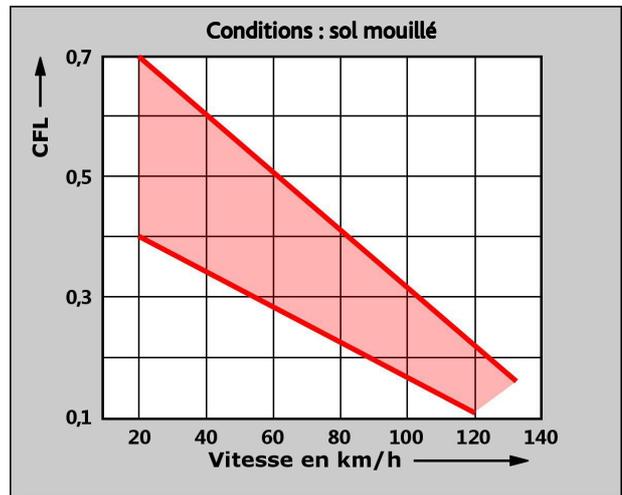


Fig. 3.28

Relevés statistiques de mesure du CFL sur autoroutes et routes nationales du nord de la France.

3-D.2 LES PARAMÈTRES DE LA ROUTE AGISSANT SUR L'ADHÉRENCE.

Il s'agit des paramètres qualité de la **couche de roulement**. Une couche de roulement est la partie superficielle visible d'une route. Elle représente la partie sur laquelle le pneumatique va rouler. Comme il y a contact direct, elle doit résister aux sollicitations induites par le roulement du pneumatique lors des phases : accélération, freinage, et virage. Ces sollicitations sont dans le plan du sol donc par conséquent tangentielles à la roue et contenues dans le plan du cercle d'adhérence.

La couche de roulement est un produit à durée de vie longue, son remplacement demande la mise en œuvre de moyens lourds, son auscultation et son entretien doivent être réguliers, voire systématiques.

Nous distinguerons :

a) Les couches de roulement portantes.

Cette couche de roulement doit :

- résister aux agressions atmosphériques et être imperméable pour protéger les couches profondes qui constituent la structure de la route,
- présenter une texture avec un niveau de rugosité minimum,
- être un élément du confort de roulage.

Cette couche est composée de granulats et de liants.

• **Les granulats.** il s'agit de pierres, étalées sur le sol, coincées et enchevêtrées entre elles, de différentes grosseurs, de différentes formes, de différentes compositions et définies par leur granulométrie. Cf. Tableau. 3.29

Dimensions	Appellation
$D > 20\text{mm}$	Cailloux
$20\text{mm} > D > 2\text{mm}$	Gravier
$2\text{mm} > D > 20\mu\text{m}$	Sable
$20\mu\text{m} > D > 2\mu\text{m}$	Limon
$2\mu\text{m} > D$	Argile

Tableau 3.29

Classes de granulométrie.

Dans le cas d'un sol meuble, il peut être constitué d'un mélange de quantité variable de chacun de ces composants.

Cette granulométrie est le résultat d'un classement par tamisage au travers de mailles de dimensions décroissantes.

Le rôle des granulats : Ils vont donner à la couche ses qualités antidérapantes. Il est communément retenu quatre paramètres :

- Le nombre moyen de particules par unité de surface,
- Leur dimension et grosseur moyenne,
- Leur forme,
- Leur nature géologique.

Ces granulats sont obtenus par concassage de roches, dont la dureté va permettre d'éviter toute fragmentation sous la charge de la roue et résister à l'effet de polissage dû au trafic. Cet effet de polissage devient important au fur et à mesure que le diamètre des granulats augmente.

- **Les liants.** Les granulats seuls, présentent un certain nombre d'inconvénients :

- Leur stabilité mécanique est insuffisante. Sous l'effet de la charge de la roue, il y a mouvement relatif entre chaque grain ce qui détruit la cohérence de la couche, et le frottement que ce mouvement engendre induit une usure rapide.

- L'imperméabilité de la chaussée n'est pas assurée.

Pour pallier à ces inconvénients, les granulats sont agglomérés et collés entre eux par un liant. Nous nous trouvons une nouvelle fois face à une forme de matériau composite, le granulat étant le renfort et le liant la matrice. Le liant permet de :

- Boucher les interstices séparant les granulats, qui, ainsi, ne peuvent plus avoir aucun mouvement.
- Rendre la surface étanche, imperméable à l'eau.

On distingue deux types de liants :

- **Les liants hydrauliques**, qui forment avec l'eau et le granulat un béton de ciment. Les couches de roulement à base de ciment sont dites rigides. Il existe d'autres liants hydrauliques : pouzzolane, laitier de haut fourneau.

Pour supporter les charges, une couche de roulement en béton de ciment, devra disposer d'une épaisseur importante. Ses caractéristiques de surface vont varier dans le temps, au fur et à mesure de son vieillissement, autrement dit de son usure. Pour remédier à cet inconvénient, et pour obtenir les rugosités souhaitées, la partie superficielle subit un traitement mécanique de surface lors de la construction. Dans la majorité des cas, il s'agit d'un balayage dans le sens perpendiculaire à l'axe de roulage.

Lors du vieillissement et sous l'effet du trafic, liant et granulat ne vont pas s'user à la même vitesse et l'adhérence sera tributaire de la proportion granulats-liant présente à la surface. Si les granulats sont prépondérants, leur résistance au polissage sera alors un facteur prioritaire.

Le béton de ciment utilisé pour la construction d'une route a une composition, notamment son dosage en ciment, identique à celle utilisée en génie civil. Il est de même élaboré dans les mêmes unités de fabrication.

- **Les liants hydrocarbonés.** On distingue deux provenances :

- 1) Par distillation du pétrole, c'est le **bitume**, majoritaire dans la fabrication des couches portantes. Le bitume est un adhésif thermoplastique (qui se ramollit sous l'effet de la chaleur et inversement redevient dur en refroidissant), imperméable à l'eau, et chimiquement peu réactif.

- 2) Par distillation de la houille, c'est le **goudron**.

Les couches de roulement à base de liants hydrocarbonés sont dites souples.

Les liants hydrocarbonés ont des particularités propres, notamment mécaniques liées à la température : liquides à chaud et solides à froid. Une particularité importante pour la couche de roulement est le « **point de ramollissement** », ou température à laquelle le liant devient visqueux, puis liquide et perd sa caractéristique solide.

Chaque liant possède sa propre courbe de **consistance** en fonction de la température Cf. fig. : 3.30

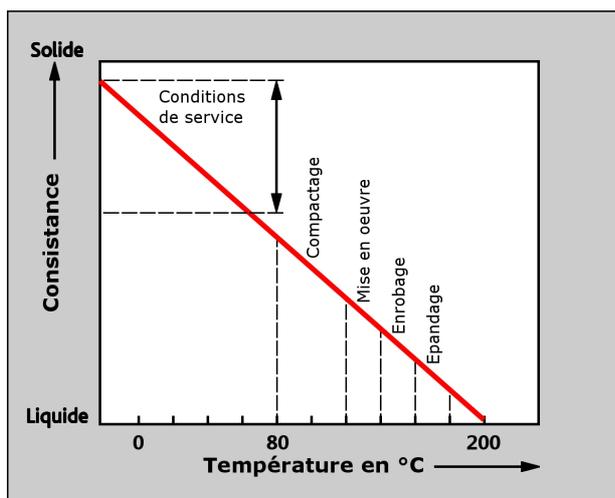


Fig. 3.30

La consistance d'un bitume en fonction de sa température.

Dans ce schéma, nous pouvons distinguer 2 zones :

- la partie > à 80°C dite de haute température.

- celle correspondant aux conditions de service, dans laquelle le bitume a le comportement d'un matériau viscoélastique.

Utiliser un liant « dur », dont le point de ramollissement sera élevé, a un effet favorable sur l'adhérence car il maintient mieux le granulat en position.

Le résultat du mélange entre granulat et liant hydrocarboné va dépendre du procédé de mise en place :

- Par **épannage** du liant sur la couche de fondation, recouverte ensuite d'une couche de granulat, l'ensemble étant compacté par un cylindre. Cela forme un revêtement en « couche mince ».

- Par fabrication dans une unité spécialisée, du mélange granulat + liant pour former un « béton bitumineux », encore appelé « **Enrobé** » qui est ensuite étendu sur le sol par une machine spéciale : le « finisher » et compacté. Le liant entoure complètement le granulat pour former une couche plus ou moins épaisse. La tenue mécanique du mélange une fois étalée sur le sol dépend des capacités de collage du liant et de l'opération de compactage qui va donner cohésion et imperméabilité à la couche de roulement.

L'expérience montre qu'un mélange ayant une granulométrie discontinue présente des niveaux d'adhérence élevés.

De même, selon la granulométrie moyenne d'un béton bitumineux, il présentera une « teneur en vide », qui se caractérise par un espace plus ou moins grand entre deux granulats. Plus le granulat sera gros, et plus cette teneur en vide sera élevée. Et, c'est cette teneur en vide qui va définir la perméabilité superficielle de la couche de roulement.

b) Les couches de roulement meubles. Cf. fig. 3.32

Les couches de roulement meubles renvoient à toutes les routes ou chemins dont la surface est composée du

matériau du sol naturel et sans liant. Leur variété est immense : de l'herbe d'un pâturage au sable des zones désertiques en passant par les différentes formes de routes dites empierrées ou pavées. Nous retrouvons les défauts cités précédemment pour les granulats sans liant.

Il est courant de distinguer deux groupes de couches de roulement meubles : 1) les sols **cohérents** et 2) les sols **non cohérents**. La cohérence se définit comme un état dans lequel intervient : la grosseur et la structure du grain, ainsi que la teneur en eau : Cf. fig. 3.32

Vu la diversité de ces couches de roulement meubles, nous n'en examinerons que deux, qui représentent des extrêmes : 1) **le sable sec**, exemple de sol non cohérent et 2) **l'argile humide**, exemple de sol cohérent. Ces deux sols ne vont pas réagir de la même manière lorsqu'ils seront soumis aux mêmes charges. Au passage de la roue, les déformations du sol seront différentes et il pourra garder la forme de l'empreinte du passage, par une saignée permanente : **l'ornière**.

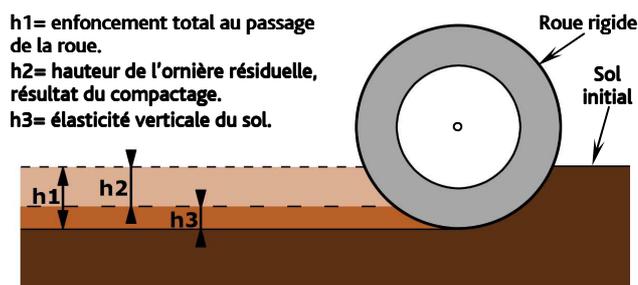


Fig. 3.31

Formation d'une ornière sur sol meuble.

- Un **sable** se caractérise par :

- Sa **granulométrie** ou dimension des grains. De : 2 mm > Ø > 20µ jusqu'au **limon**, de : 20µ > Ø > 2µ Cf. tableau 3.29. Vu la taille des grains, un sable parfaitement sec ne présente pas de forces de liaison ou d'adhésion entre ses grains.

- La **forme des grains** : ronds, rectangulaire, de forme aléatoire, à bords arrondis. Cette forme sera fonction de l'origine du sable. Sur une dune, formée de sable poussé par le vent, les grains seront arrondis par l'érosion provoquée par le roulement des grains les uns sur les autres.

- Son **compactage** initial. Soit par l'effet du poids des grains empilés les uns sur les autres, soit par le trafic de véhicules, la couche de roulement sableuse sera plus ou moins compactée.

- Son **taux d'humidité**. C'est un paramètre majeur pour la mobilité, l'eau, dans une certaine proportion donne au sable une certaine cohésion, en liant les grains entre eux.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]



a) Sable légèrement humide et compact. Le fond de l'ornière montre les empreintes des sculptures. Ces empreintes se chevauchent légèrement, laissant apparaître un début de cisaillement longitudinal de la couche de roulement.



b) Sable sec assez compacté, la hauteur d'ornière est faible. Les empreintes des sculptures sont nettes et bien formées. Le déboufrage est parfait. Il n'y a pas de problèmes de motricité.



c) Forme d'ornière dans un sable sec sans cohésion. L'ornière forme un V.



d) L'ornière précédente après forte pluie de quelques minutes. En fond de sillon, l'eau tarde à pénétrer dans le sol et sur la couche superficielle, l'eau a formé une croûte qui n'est pas suffisamment résistante pour permettre la motricité. Une fois cette croûte enlevée, le sable sec apparaîtrait. La pluie n'aura pas sensiblement amélioré la cohésion du sable, ni la motricité.



e) Ornière en terrain argileux à teneur en eau moyenne. L'ornière peut se former, mais elle n'est pas profonde. La cohésion horizontale est limitée, car elle montre des zones de cisaillement de l'empreinte.



f) Ornière en terrain argileux saturé d'eau. Elle est profonde et à bords francs.

Fig. 3.32

Exemples de sols sableux et argileux.

- Une **argile humide** se caractérise plus difficilement, mais il est possible de faire ressortir les paramètres suivants :

- L'importance de son **taux d'humidité**.

- Une classe de **granulométrie** de faible dimension, qui, liée au taux d'humidité, crée une adhésion des grains entre eux, pour former une masse compacte et plastique.

- Une composition et une répartition de **particules** très variables selon les zones géographiques.

- Quelques éléments de définition des caractéristiques mécaniques de ces types de couches de roulement. On distingue ainsi :

1°) La portance. A la charge verticale provoquée par le passage du pneumatique, le sol devra répondre par une réaction. La qualité de cette réaction va dépendre de sa cohésion et de la façon dont il se déforme. Si le pneumatique se déforme dans la zone de contact, le sol va se déformer également. Le résultat sera la formation d'une ornière dont la dimension sera fonction du poids du véhicule, du pneumatique et des caractéristiques du sol. La hauteur de l'ornière interviendra dans la résistance au roulement.

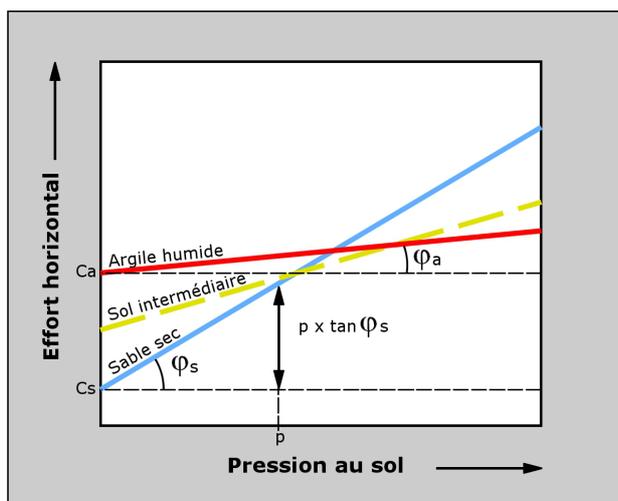


Fig. 3.33

Effort horizontal en fonction de la pression au sol sur sol meuble.

L'effort horizontal, est créé dans le plan de la zone de contact. Il a une caractéristique identique dans le sens longitudinal (accélération et freinage) et transversal (virage). La pression au sol est le rapport de l'effort vertical (le poids à la roue), sur la surface de la zone de contact :

$$P_s = \frac{P}{S}$$

C_a et C_s représentent la cohésion initiale du sol, avant tout effet de compactage de la roue. ϕ_a et ϕ_s sont deux angles définissant l'effet de compactage. C'est une caractéristique propre à chaque sol meuble. En général, $\phi_a < \phi_s$. Pour un sable sec, l'effort horizontal potentiel peut s'écrire : $F_h = C_s + P_s \times \tan \phi_s$

2°) Le cisaillement dans le plan du sol. Pour avancer, le pneumatique transmet un effort moteur longitudinal, dans le plan du sol. Cet effort appliqué sur les grains va provoquer un cisaillement en fonction des caractéristiques du sol et de la charge verticale. Ce cisaillement se définit comme le rapport : Effort horizontal / Surface de la zone de contact. Cf. fig. 3.33

3°) Le compactage initial, caractérisé par l'existence ou non d'un trafic.

4°) L'homogénéité de la sous couche. Si la couche de roulement n'a rien sur quoi s'appuyer, les déformations du sol vont perturber portance et cisaillement.

5°) L'importance du temps, dans le sens de la **durée**. Les sols réels ont des caractéristiques qui évoluent dans le temps, en raison de l'évolution des conditions atmosphériques :

- l'**ensoleillement** et la **température** qui font varier le taux d'humidité,

- une chute de **pluie**.

Un sable pourra autoriser une certaine mobilité, le matin au lever du jour, et ne plus rien permettre en milieu d'après-midi, par le fait de la modification de son taux d'humidité.

6°) Examinons ce qui se passe au niveau du pneumatique. Il sert d'intermédiaire, de transmetteur d'effort entre la couche de roulement et la masse à déplacer. Par conséquent, sa définition sera un facteur primordial de mobilité :

- La **pression de gonflage** va définir la surface de la zone de contact. Par conséquence, Portance du sol et Pression dans le pneumatique sont liées et cela va définir la capacité de la roue à transmettre des efforts. L'expérience permet de définir une relation entre la pression de gonflage et la pression au sol :

$P_s = 0,8 + 0,7p_g$ avec : $-P_s$ = pression au sol et p_g = pression de gonflage. Selon cette formule, la pression au sol sera toujours légèrement supérieure à la pression de gonflage. Cf. fig. 3.34

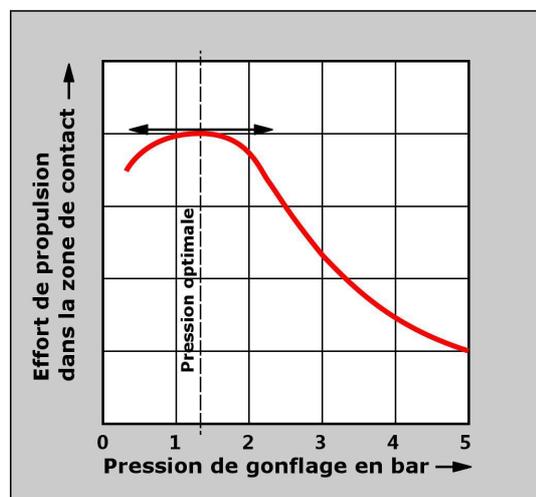


Fig. 3.34

Effort de propulsion en fonction de la pression de gonflage sur sol meuble.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

La mobilité sera améliorée en réduisant la pression au sol, c'est-à-dire en réduisant la pression de gonflage. Cela réduit la profondeur de l'ornière et permet au pneumatique de mieux « flotter ». Réduire la pression de gonflage du pneumatique va lui donner plus de souplesse et augmenter le glissement relatif par rapport au sol, ce qui améliorera le coefficient de cisaillement. Cf. fig. 3.35

Certains véhicules, amenés à rouler fréquemment sur des sols meubles de différentes cohésions, sont équipés d'un système de « gonflage centralisé ». La valve de chaque roue est reliée à un compresseur via un joint tournant étanche dans le moyeu. Le conducteur dispose d'une commande lui permettant d'ajuster selon le besoin la pression dans chaque essieu.

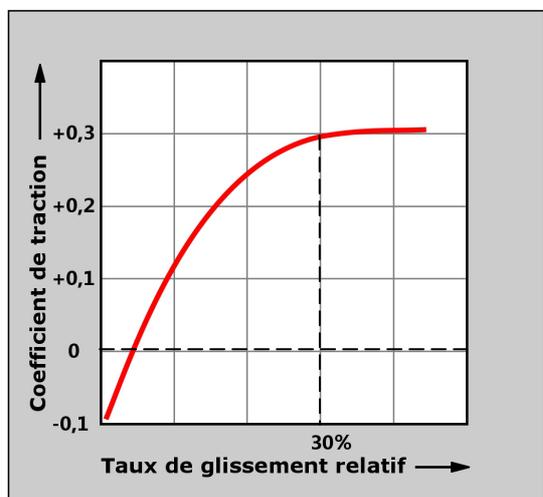


Fig. 3.35

Coefficient de traction sur sol meuble en fonction du glissement relatif.

- La façon dont la **carcasse** va se déformer induit des mouvements parasites dans la bande de roulement. Ces mouvements peuvent générer une décohésion de la couche de roulement. La bonne adaptation entre carcasse et bande de roulement est impérative.

- La **forme de l'empreinte** du pneumatique dans la zone de contact va interférer sur les caractéristiques de l'ornière. A surface égale, un pneumatique étroit laissera une empreinte plus longue que large alors qu'un pneumatique large laissera une empreinte courte et large. Cf. fig. 3.36

- La **bande de roulement**, interface pneumatique-sol, sera suffisamment souple pour suivre au plus près les déformations du sol. Cf. fig. 3.37

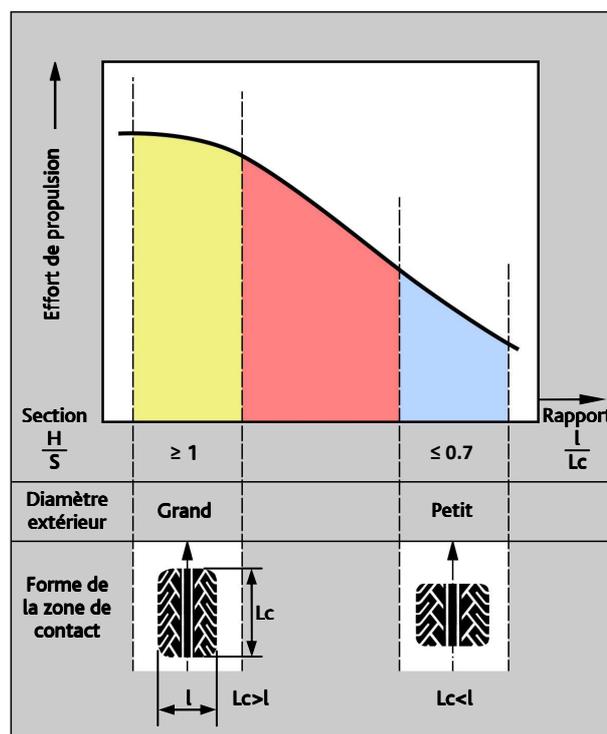


Fig. 3.36

Effort de propulsion en fonction de la forme de la zone de contact sur sol meuble.

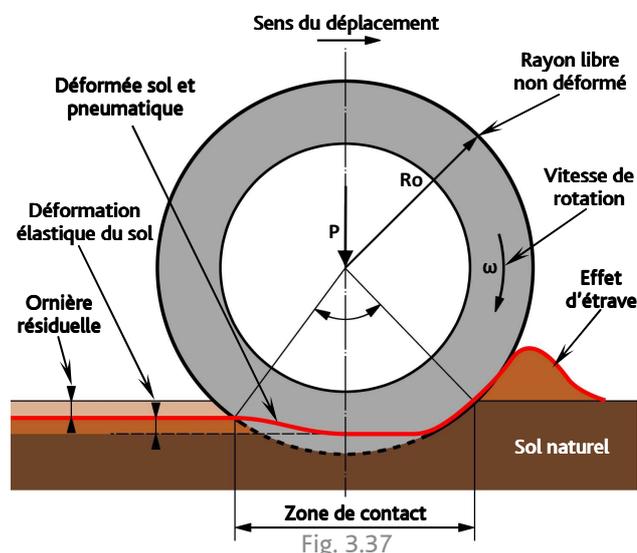


Fig. 3.37

Roulement d'une roue élastique sur sol meuble.

⇒ Sur **sable sec** : pour ne pas dégrader l'interface pneumatique-sol, la bande de roulement sera de faible épaisseur, lisse ou faiblement sculptée.

⇒ Sur **argile humide** : l'interface a besoin d'un appui marqué qui sera obtenu par des pavés proéminents et « agressifs ».

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]



Fig. 3.38

Forme de sculpture pour sol meuble argileux.

Par contre dans les deux cas, la forme des sculptures devra permettre le « **débouillage** », ou nettoyage des rainures lorsque la bande de roulement va quitter la zone de contact. Si ce nettoyage ne se fait pas, ce qui peut arriver en fonction de la cohésion du sol, il y aura, lorsque la bande de roulement « encrassée » reviendra au contact du sol, une diminution de l'adhérence par la présence de sable ou d'argile dans les rainures. Cf. fig. 3.32f

- Un **sol meuble** se déforme au passage du pneumatique, il se comporte alors comme un fluide visqueux, sur lequel le pneumatique va « flotter ». Cf. fig. 3.39

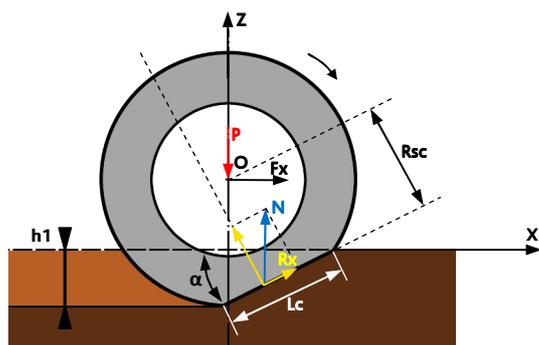


Fig. 3.39

Résistance à l'avancement sur sol meuble.

Le roulage dans une ornière est une situation semblable à celle rencontrée lors du gravisement d'une rampe perpétuellement renouvelée, de pente α et de longueur L_c . Nous pouvons définir :

- $\sin \alpha = \frac{h1}{L_c}$ profondeur d'ornière.
longueur de la zone de contact.

- N est la réaction de P , appliquée au barycentre des efforts répartis dans la zone de contact.

- N va se décomposer suivant les axes Gx' et Gz' tel que : $\vec{N} = \vec{Pc} + \vec{Rx}$

Pc sera appelé : portance

Rx est une résistance à l'avancement :

$Rx = P \sin \alpha = P \times \frac{h1}{L_c}$ dont la projection horizontale

est : $F'x = Rx \times \cos \alpha$ Pour progresser dans l'ornière, le véhicule aura besoin d'un effort de propulsion F_x et d'un effort complémentaire $F'x$. Rx est directement proportionnel à $h1$ profondeur de l'ornière et inversement proportionnel à L_c longueur du contact au sol. Pour réduire cette résistance, il sera recherché un pneumatique de grand diamètre permettant de réduire $h1$ et augmenter L_c .

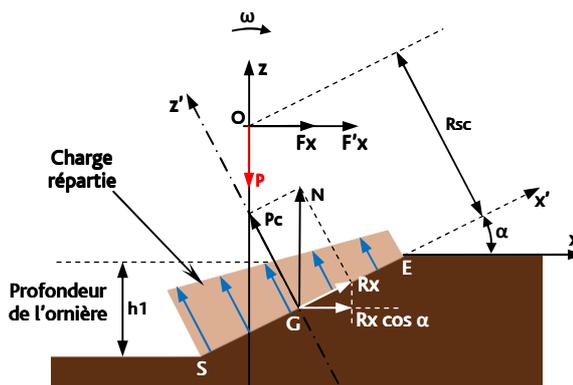


Fig. 3.40

Détail des efforts.

- Nous avons vu précédemment (§ : 3-B.5) que le coefficient d'adhérence longitudinal est maxi pour un taux de glissement relatif de 5 à 20%. Sur sol meuble, nous avons le même phénomène qui sera d'autant plus important que le rapport : longueur de la zone de contact / largeur sera grand et >1 . Cf. fig. 3.36

• Le **sol réel** sera un compromis entre le sable sec et l'argile humide, cela signifie que le choix du pneumatique sera aussi un compromis, sachant que sur un parcours, il sera amené à rencontrer non pas un seul type de sol mais plusieurs pouvant être assez différents.

Mais dans tous les cas, le roulage sur sol meuble nécessitera un choix orienté vers :

* Un surdimensionnement pour permettre un roulage sous charge à pression de gonflage réduite.

* La préférence du plus grand diamètre extérieur compatible avec le volume disponible, pour mettre en œuvre une zone de contact plus longue que large.

* Une section avec un rapport H/S aussi proche que possible de 1, voire supérieur.

c) Citons le cas particulier des **sols pavés**. Cf. fig. 3.41 Ce sont des blocs de pierre juxtaposés à plat sur le sol. Leur surface est très dure, les joints entre ces pierres peuvent être un mortier, du sable ou encore le sol naturel. Par temps de pluie, les conditions d'adhérence peuvent fortement chuter, d'autant plus que la surface sera usée, donc lisse.



Fig. 3.41
Exemple de sols pavés.

d) Les défauts géométriques de surface. Des coupes longitudinales et transversales (profil en long et profil en travers) d'une couche de roulement, montrent des défauts géométriques de surface. Nous distinguerons 4 types de défauts, dans l'ordre croissant de la dimension du défaut : Cf. fig. 3.42

- La **micro rugosité** caractérise la forme et l'angularité du granulat composant le revêtement. La dimension est de l'ordre du **1/10^e de mm**. L'origine de la roche, le procédé de concassage vont donner des arêtes aux formes plus ou moins vives. C'est à ce niveau qu'intervient la résistance de polissage dû au trafic. L'origine et le mode d'élaboration du granulat sont les facteurs primordiaux.

La micro rugosité est un paramètre de l'adhérence entre le pneumatique et la couche de roulement.

- La **macro rugosité** est un défaut de surface, dont la dimension est de l'ordre du **cm**, qui se superpose à la micro rugosité. C'est un défaut de forme, une sorte

d'ondulation, liée à la formulation du revêtement : dimension et arrangement des granulats. Ce défaut donne une indication sur sa capacité de drainage de l'eau. Cf. fig. 3.44

- La **Méga rugosité** est un défaut dont la dimension est de l'ordre de quelques **dizaines de cm**.

- **L'uni, ou planéité.** Défaut dont les dimensions dépassent le **m**. L'uni représente des défauts de grande échelle, sensibles par l'usager, et qui vont influencer directement la tenue de route et le confort. L'Uni est lié à la qualité des moyens de mise en œuvre de la couche de roulement et à son épaisseur (de 6 à 8 cms).

La distinction entre ces défauts est affaire de moyens de mesure et de définition ou encore d'ordre de grandeur, de manière à inclure l'un ou l'autre des défauts dans la bonne catégorie.

Macro et Micro rugosité vont se combiner pour définir le potentiel d'adhérence du revêtement. Cf. fig. 3.43

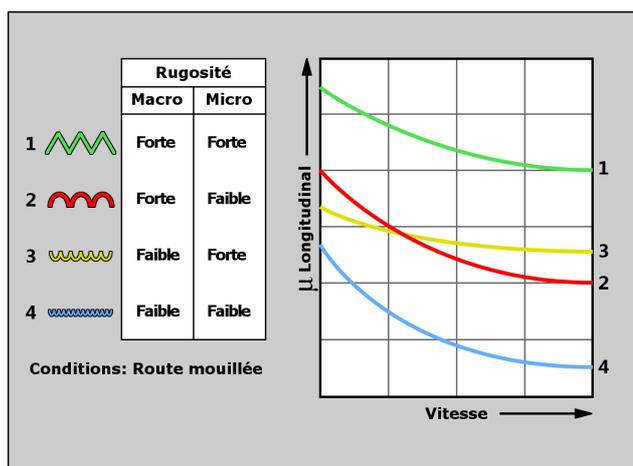


Fig. 3.43

Niveau d'adhérence en fonction de la rugosité et de la vitesse.

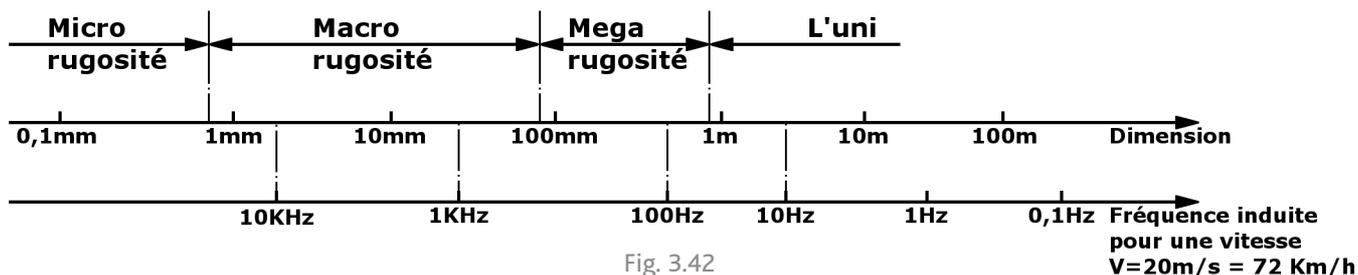
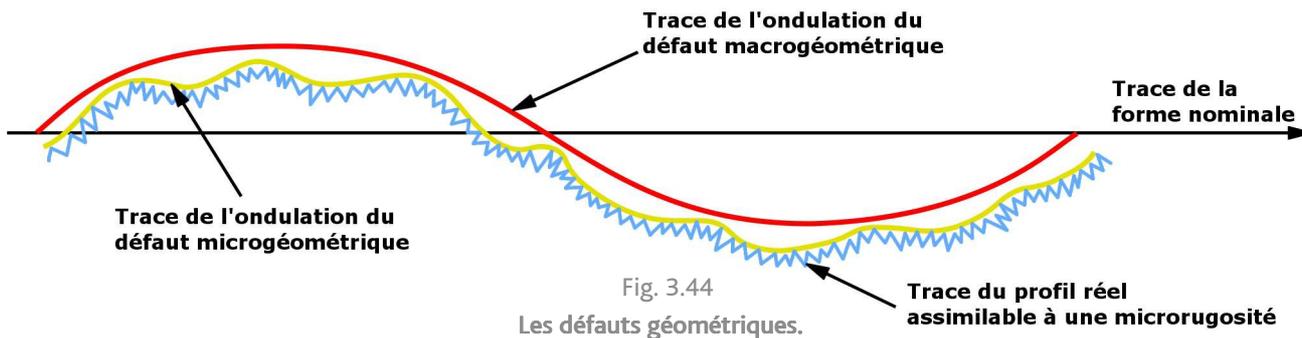


Fig. 3.42
Les inégalités de la route.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]



Ces défauts géométriques vont avoir une influence sur le pneumatique mais aussi sur le véhicule. Cf. § 4

- La **fréquence** de travail de la masse suspendue du véhicule est comprise entre 1,0 et 1,4 Hz. Cela signifie que la suspension du véhicule va absorber des défauts de forme <20m.

- Par contre, la **masse semi-suspendue**, représentée par la roue montée, le pivot, le frein, ainsi qu'une partie des éléments de guidage de la suspension, se situe entre

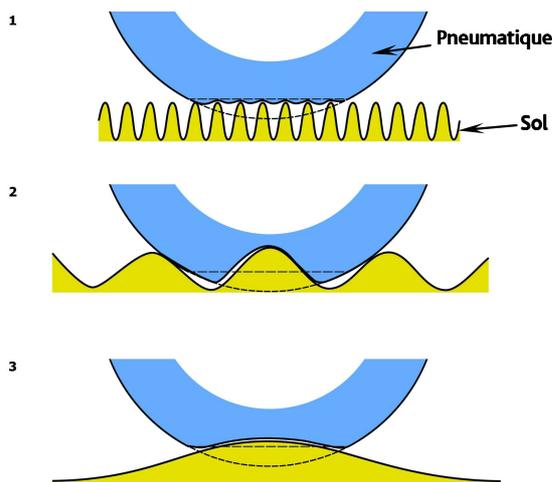


Fig. 3.45

Interaction sol-pneumatique : influence des irrégularités du sol sur la zone de contact.

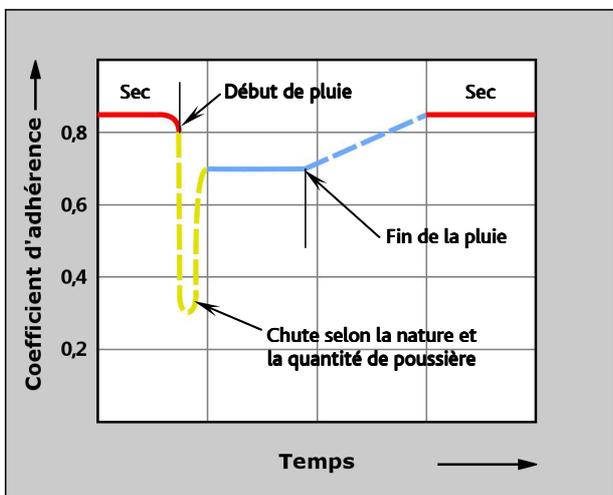


Fig. 3.46

Phénomène du verglas d'été.

le pneumatique, corps élastique et l'étage de suspension. La fréquence de travail de ce pneumatique est voisine de 15hz. Cela signifie que le pneumatique va réagir, donc être sollicité pour des défauts de profil inférieur à 100mm, ce qui ne sera pas neutre pour la Résistance au Roulement.

Pour des défauts de profil que l'on évalue à la demi-zone de contact, il est admis qu'ils sont absorbés par la déformation de la bande de roulement. Cf. fig. 3.45

e) **La période de l'année.** Indépendamment du facteur usure, l'adhérence d'une couche de roulement varie selon la saison. En général, elle est maximale au printemps et minimale en automne. L'écart peut atteindre 0,1 entre la fin de l'hiver et l'automne suivant. Cela est dû au phénomène de nettoyage produit par les pluies, abondantes au printemps. Cette pluie évacue les déchets de toutes sortes comme la poussière, l'huile et le carburant « perdus » lors du passage des véhicules. Cf. fig. 3.47. Pendant la période estivale, le trafic augmente et les pluies sont faibles. Les espaces entre granulats s'encrassent et lors de l'arrivée des premières pluies à l'automne, il apparaît un phénomène appelé « **Verglas d'Été** ». Cf. fig. 3.46

En roulage, les éléments mécaniques d'un véhicule ne sont pas étanches. Ils ont tendance à laisser échapper quelques gouttes d'huile sur la chaussée, surtout lors de ses changements d'assiette, au freinage et en virage. Après un plein de gas-oil, un bouchon de réservoir peut laisser échapper quelques gouttes de carburant, etc....



Fig. 3.47

Taches d'huile sur une couche de roulement.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

Ces éléments se mêlent à la poussière pour se coller sur le sol. Aux premières gouttes, la poussière, l'huile et l'eau vont former un amalgame visqueux superficiel, une sorte de « lubrifiant », faisant chuter brutalement le niveau d'adhérence. Cette chute sera d'autant plus importante que le revêtement sera usé. **Aa** devient proche de **0**.

Au fur et à mesure de la chute de pluie, le sol va se laver et reprendre progressivement son niveau d'adhérence, d'abord celui d'une route mouillée, puis lorsque la pluie aura cessé, celui d'une route sèche et propre.

f) Le niveau d'usure de la couche de roulement. Avec le trafic, notamment celui des Poids Lourds, une couche de roulement s'use et se modifie. Il est défini un **index d'usure**, tenant compte de l'évaluation du nombre de passages de véhicules, de l'âge de la couche de roulement en mois, du trafic moyen journalier et d'un coefficient de pondération selon le type de chaussée.

La valeur de cet index est un élément qui va déterminer si la couche de roulement doit être refaite ou non pour

conserver le niveau d'adhérence nécessaire à la sécurité du trafic.

Quelques remarques sur l'usure des couches de roulement :

- La couche de roulement doit répondre aux **sollicitations du trafic** par des réactions égales et opposées.

- Si le **granulat** s'use, le **liant** s'use aussi il est même souhaitable qu'il s'use un peu plus vite que le granulat pour que ce dernier conserve une partie dénudée gardant le contact avec le pneumatique.

- Le **trafic** provoque un martelage par les pavés de caoutchouc du pneumatique sur la couche de roulement. Ce martelage provoque une diminution de la rugosité par : - polissage, - effritement et - arrachement partiel ou total des granulats.

- L'usure est fonction de la **vitesse moyenne** des véhicules constituant le trafic. Plus la vitesse sera élevée, plus grands seront les efforts développés dans la zone de contact.

3-E LE CLIMAT ET LE PNEUMATIQUE.

Les véhicules équipés de pneumatiques doivent être capables de rouler dans toutes les conditions de climat rencontrées sur la Terre. De ces conditions, nous retiendrons :

3-E.1 LA PLUIE.

Il s'agit de la perturbation météorologique la plus fréquente. En tombant, l'eau se répand sur la couche de roulement et va modifier le contact du pneumatique avec le sol. L'adhérence dont nous avons besoin pour rouler va dépendre de la façon dont cette eau va pouvoir être évacuée, donc de :

a) la route et sa couche de roulement. Cela implique le mode d'écoulement de l'eau permettant de laisser apparent un contact avec le granulat. Les facteurs à prendre en compte seront :

- La **forme et la grosseur** des granulats,

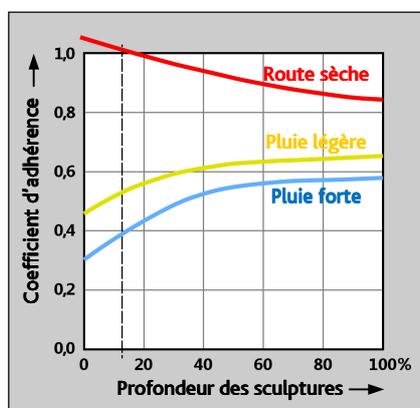


Fig. 3.48

En ville : 50 Km/h

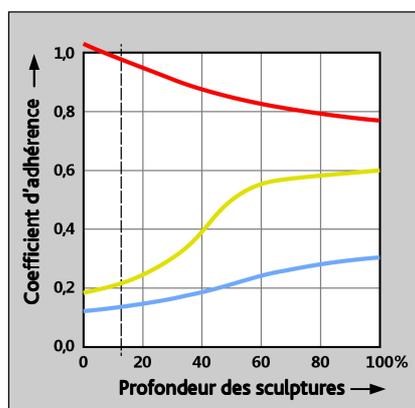


Fig. 3.49

Sur route : 90 Km/h

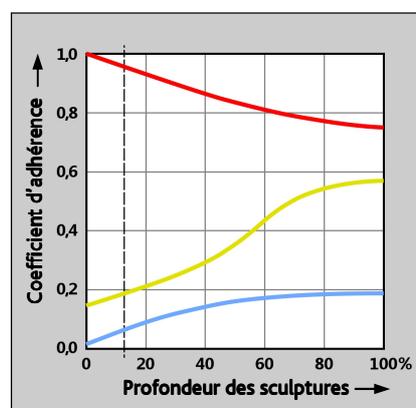


Fig. 3.50

Sur autoroute : 130 Km/h

Évolution de l'adhérence en fonction de l'usure des sculptures du pneumatique et de la pluie.

- La **dimension des intervalles** entre les granulats, intervalles formant autant de canaux d'écoulement,

- La **rugosité** des granulats,

- La **pente transversale** de la route afin de créer une différence de hauteur et permettre à l'eau de s'écouler par gravité vers le fossé.

b) La bande de roulement du pneumatique :

- De ses sculptures et son taux d'entaille, y compris sur l'épaulement extérieur, sollicité en virage, Cf. figs. 3.48, 3.49, 3.50

- De l'**hystérésis** du mélange de caoutchouc,

- De la **vitesse relative** de cette bande de roulement par rapport au sol.

Lors du roulage sur un film d'eau ou sur route mouillée, la pression de contact du pneumatique sur la route s'appliquant pendant un temps très court peut ne pas avoir suffisamment de temps pour évacuer toute l'eau de la surface du granulat. Cela signifie que la composante d'adhésion μ_a du coefficient d'adhérence restera toujours faible. Cela signifie également que la composante μ_h prend de l'importance et par conséquent, va dépendre des aspérités et des arêtes des granulats.

c) L'intensité de la pluie et de la quantité d'eau résultante. L'intensité détermine une hauteur d'eau instantanée sur le lieu de roulage, fonction du potentiel d'écoulement de la route et de la largeur de la chaussée.

d) L'effet « Pompe à eau » du pneumatique ou processus d'élimination de l'eau, le phénomène d'Aquaplaning (ou aquaplanage). Il est répertorié plusieurs formes d'aquaplaning :

⇒ L'aquaplaning « **dynamique** ». Pour retrouver l'adhérence la plus élevée possible, la bande de roulement a pour mission d'évacuer l'eau de la zone de contact. Cf. fig. 3.51 et 3.52

En roulage sur une épaisseur d'eau couvrant le sommet des granulats, la zone de contact du pneu sur le sol peut être séparée en 3 tronçons Cf. fig. 3.54 L'importance relative entre ces 3 zones va déterminer le coefficient d'adhérence disponible. La zone **a**, dans laquelle il n'y a pas contact entre le pavé de caoutchouc et le sol, mérite une attention particulière par l'apparition selon la hauteur d'eau rencontrée d'un phénomène « d'étrave » comme à l'avant d'un bateau, phénomène nettement plus marqué sur une roue bloquée que sur une roue en rotation. Dans cette zone, vont intervenir :

- Les effets d'**inertie**. L'eau représente une masse non négligeable qu'il faut déplacer. Cela nécessitera une dépense d'énergie supplémentaire. Plus la vitesse du véhicule sera élevée et plus l'inertie de la masse d'eau prendra de l'importance dans le phénomène de « pompe à eau ». Au volant, cela se ressent comme un ralentissement assez brutal, comme celui ressenti lors du passage d'une flaque d'eau.

- La section effective des **canaux d'évacuation** dans la bande de roulement. Selon leur géométrie, leur largeur, ces canaux auront une plus ou moins bonne efficacité, vu le temps de contact au sol très court. Le risque d'aquaplaning sera d'autant plus restreint que la hauteur des sculptures de la bande de roulement permettra l'évacuation de la quantité d'eau. Cf. fig. 3.51

En reprenant les composantes de l'adhérence **A**, la composante d'hystérésis **A_h**, est peu dépendante de l'épaisseur du film d'eau. Par contre la composante d'adhésion **A_a** va être directement dépendante de cette épaisseur. L'apparition du phénomène « d'aquaplaning » correspond au passage progressif des zones **b** et **c** au même état que dans la zone **a**. Cf. figs. 3.53 et 3.54 La pression hydrodynamique de l'eau devient progressivement supérieure à la pression de contact.

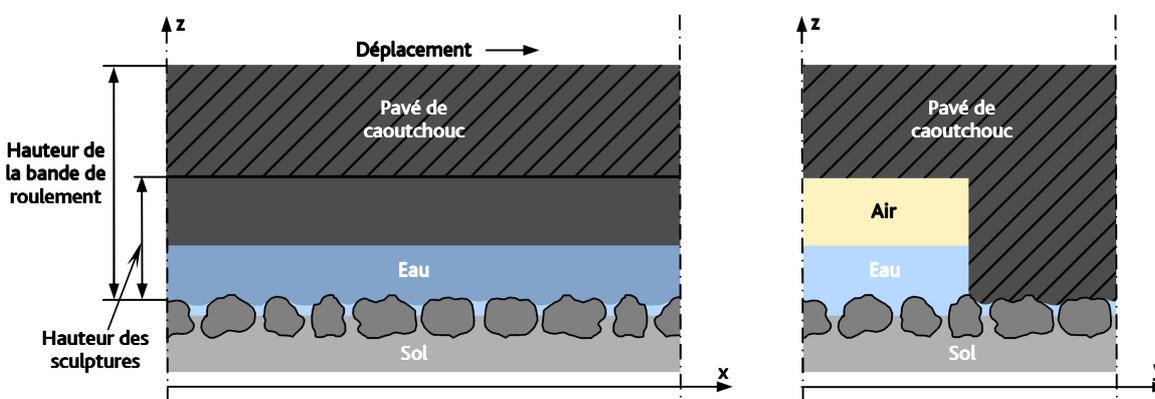
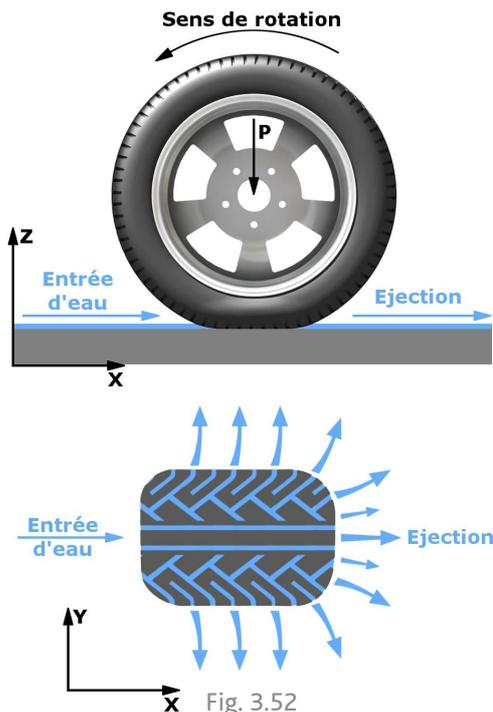


Fig. 3.51

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]



Roulage sur route mouillée. Les sculptures ont suffisamment de temps pour évacuer la couche d'eau.

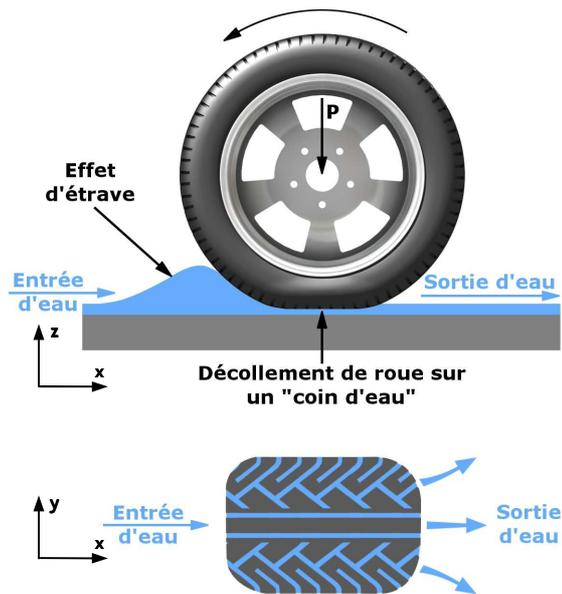


Fig. 3.53

Phénomène d'aquaplaning.

Un film d'eau sépare le pneumatique du sol. Les sculptures n'ont plus assez de temps pour évacuer la couche d'eau.

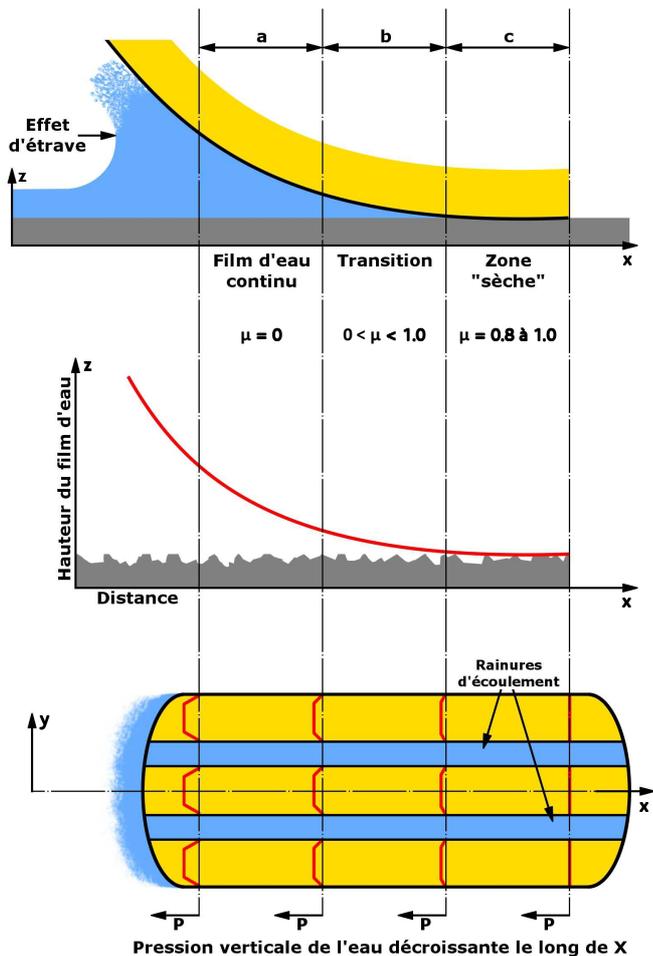


Fig. 3.54

Écoulement de l'eau entre le pneumatique et le sol.

Ce phénomène se produit par forte pluie, ou lors du passage dans une **flaque**, accumulation d'eau, de surface limitée, localisée dans des zones aléatoires. Une **flaque** est la conséquence d'un défaut de profil de la route. Le système route-pneumatique ne peut plus évacuer la couche d'eau qui se présente devant la roue. Il y a alors disparition complète de l'adhérence, donc du guidage du véhicule. Et dans ces conditions, le conducteur ne peut plus accomplir une quelconque manœuvre, sa trajectoire sera celle de son dernier vecteur vitesse, juste avant l'apparition du phénomène.

La qualité du revêtement peut aussi être la cause d'un aquaplaning, dans le cas d'une faible macro rugosité et d'une microrugosité à fort taux d'usure : distance sommet-creux < 1mm.

L'aquaplaning est un phénomène de portance, le pneumatique « flotte » littéralement sur un film continu d'eau. Il subit alors une poussée verticale, de bas en haut, qui va dépendre :

- de la **densité des granulats**, densité qui va définir la section de passage par où l'eau peut s'évacuer. Ce paramètre est prioritaire par rapport au dessin de la bande de roulement sur l'efficacité de l'évacuation de la masse d'eau.

- de la **vitesse du véhicule**, donc de la durée du contact. Toute augmentation de la vitesse du véhicule va accroître le phénomène de portance et une augmentation proportionnelle des zones a et b. Cf. fig. 3.55 Pour donner un ordre de grandeur : à 90 km/h, ce temps de contact est de 1/150^e de seconde.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

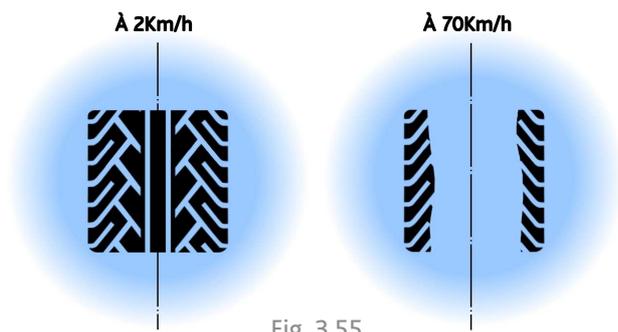


Fig. 3.55

Exemple d'empreinte au sol en fonction de la vitesse sur route mouillée.

Il ne reste que 2 bandes latérales en contact avec le sol.

Conditions :

- Charge verticale et hauteur d'eau constantes
- Roulage en ligne droite
- Avec la même forme de sculpture

- du **taux d'entaille** et de la **dimension**, donc de leur usure, des canaux d'évacuation de la bande de roulement. Cf. fig. 3.48, 3.49, 3.50

⇒ Le « **Verglas d'été** » ou aquaplaning visqueux. Cf. fig. 3.46

⇒ L'**aquaplaning « chaud »**. Il y a une condition très particulière qui peut également provoquer un phénomène d'aquaplaning. Cela touche plus particulièrement les poids lourds. Vu leurs conditions de roulage : charge, vitesse, température du sol, la température du pneumatique peut dépasser 100°C. S'il arrive sur une fine couche d'eau, cette dernière va se trouver emprisonnée dans la zone de contact avec le sol, et être partiellement vaporisée. Cette vaporisation crée une augmentation de pression dans un volume fermé, augmentation qui peut être suffisante pour soulever le pneumatique du sol. Ce phénomène apparaît surtout à basse vitesse, donc en fin de freinage, le temps de contact au sol étant alors plus important et suffisant pour permettre cette vaporisation.

3-E.2 LA NEIGE ET LE FROID.

La chute des températures a des conséquences sur :

- le changement d'état de l'eau qui se cristallise et passe de l'état liquide à l'état solide, sous forme de glace, ou de cristaux de neige,
- la modification du comportement des mélanges de caoutchouc.

a) La neige



- La neige est un corps poreux, viscoélastique, mélange d'air et d'eau. Cette eau se présente sous trois différents états : solide, liquide, vapeur. Selon les conditions atmosphériques : température, pression, hygrométrie, vent, ensoleillement, les quantités relatives de ces trois différents états vont varier.

- Une neige est dite « sèche et froide », si elle ne contient qu'une phase solide très légère et de l'air dans les espaces interstitiels. Cette neige est encore appelée « poudreuse » et a la caractéristique de n'avoir aucune cohésion. Sa température est < -5°C. Cf. fig. 3.56

- Une neige est dite « humide » ou « mouillée », si elle contient à la fois, les phases : solide + liquide + vapeur. L'air peut encore être présent mais en faible volume. La différence entre les qualificatifs humide et mouillée, est dans la quantité de la phase liquide.

⇒ Une neige humide peut être formée en boule avec un léger suintement d'eau. L'eau joue le rôle de lubrifiant pour abaisser le coefficient d'adhérence. Cela nous rapproche des conditions de roulage sous la pluie. La température d'une neige humide est comprise entre -1°C et +5°C.

⇒ Une neige mouillée est gorgée d'eau, collante, lourde. Lors de la mise en boule dans la main, l'eau s'échappe pour en réduire le volume. Il ne reste qu'une phase d'eau liquide, prépondérante et une phase solide. Cette neige a atteint son point de fusion.

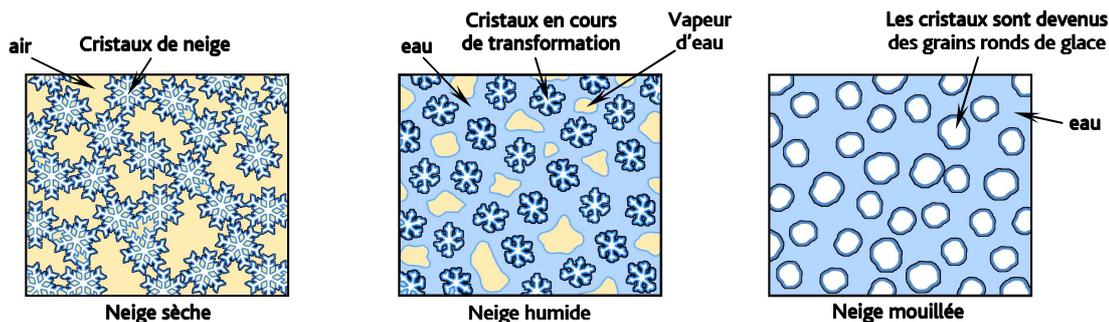


Fig. 3.56

Schématisation des différents types de neige.

- La neige sur une route perturbe le trafic en faisant chuter l'adhérence. Cf. fig. 3.57 L'expérience et des mesures montrent que plus cette neige est froide, meilleur sera le coefficient d'adhérence.

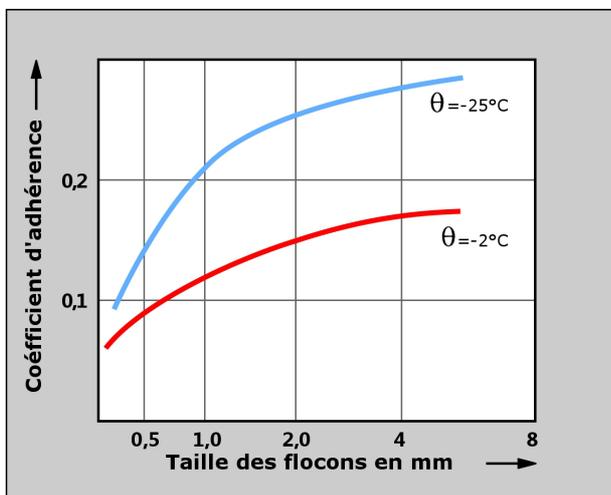


Fig. 3.57

Coefficient d'adhérence en fonction de la taille des flocons de neige et de la température.

b) Les conditions nécessaires à une chute de neige. Il faut au moins 3 conditions :

- Des **conditions météorologiques** particulières : hygrométrie, pression, une température $< 0^{\circ}\text{C}$.
- Un **nuage** contenant de la vapeur d'eau en surfusion grâce aux conditions météorologiques précédentes. La surfusion de l'eau dans l'atmosphère est un phénomène physique fréquent, les gouttelettes d'eau restent liquides dans un air dont la température est $< 0^{\circ}\text{C}$.
- Des **impuretés** : poussières, grains de sable dans l'air, à une température $< 0^{\circ}\text{C}$. Elles sont le déclencheur.

c) Son évolution une fois au sol : La chute de neige va former au sol une couche, plus ou moins épaisse, couche qui a la propriété d'être instable avec le temps, et dont les caractéristiques vont évoluer suivant la hauteur.

Cette couche a 2 **interfaces** : **1°)** neige-sol, et **2°)** neige-atmosphère.

La partie proche du sol, va progressivement se mettre à sa température, souvent proche de 0°C , et va subir le poids du reste de la couche. Ce qui va produire un compactage des parties basses.

Par, contre, la partie proche de l'atmosphère va subir les contraintes météorologiques extérieures : -vent, -gel, -soleil, etc...

Entre ces 2 interfaces, la couche est soumise, dans sa hauteur, à des échanges thermiques complexes provoquant des modifications d'état entre les 3 phases : -solide, -liquide, -vapeur d'eau. Ces modifications vont provoquer des évolutions de structure des cristaux, évolutions qui ne sont pas neutres pour le passage d'un

pneumatique.

L'altitude est un paramètre à prendre en compte, comme la température chute avec l'altitude, la densité de la neige chutera dans la même proportion, occupant un volume plus grand. Pour une quantité d'eau équivalente, une neige à 0°C donnera une couche d'une hauteur de 10cms alors que si elle est à -10°C , cette hauteur pourra atteindre 40cms. Cela signifie aussi qu'aucune chute de neige ne ressemble à une autre et que la température de l'air reste le facteur primordial.

d) Quelques caractéristiques mécaniques (Nous ne retiendrons que les principales, liées à la mobilité du pneumatique sur la neige.)

- **Le tassement.** Une fois au sol, le flocon est soumis à son poids. L'accumulation de flocons sur la couche va provoquer un tassement naturel sur la hauteur, tassement qui sera :

- Proportionnel à la **charge verticale**, donc à la hauteur de la couche de neige. Mais au passage de la roue, cet effort vertical deviendra très important et assimilable à une action de frittage, à température constante. Sous cet effort vertical, l'air et l'eau vont s'échapper, et laisser la phase solide former une ornière, à bords francs, de hauteur variable et dont le fond formera une couche plus ou moins compacte et cohérente dont dépendra le coefficient d'adhérence. Nous retrouvons des analogies avec le roulage sur sol meuble.

- Inversement proportionnel à la **température**, plus elle sera basse, plus difficile sera le tassement. Que ce soit lors de la chute comme ensuite durant la vie au sol, ce paramètre température reste **LE** paramètre le plus important. C'est lui qui va définir les quantités résiduelles des 3 phases : solide, liquide, vapeur.

- Inversement proportionnel à la **densité**. Une densité élevée est le résultat d'un tassement.

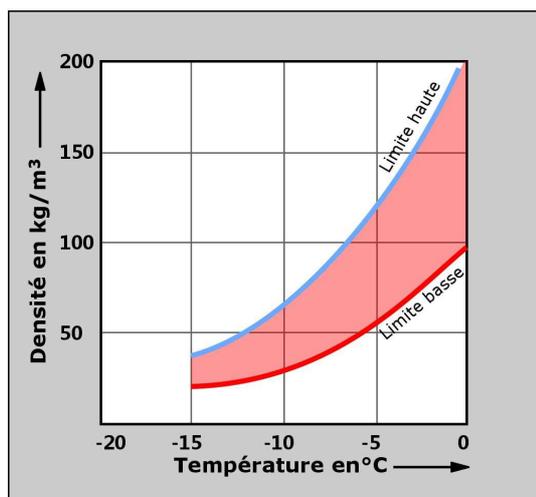


Fig. 3.58

Densité de la neige en fonction de la température extérieure

- La couche de neige **adhère** au sol. La neige est un matériau pesant, donc le phénomène d'adhérence sur le sol s'applique, comme sur tout corps pesant.

- La résistance au **cisaillement**. L'empilage de flocons qui composent la couche de neige présente une résistance au cisaillement, résistance fonction de :

- La **cohésion** ou solidité des liaisons entre cristaux. Dans le temps sous l'effet du tassement, les cristaux vont s'imbriquer les uns dans les autres jusqu'à obtenir un collage. Ce collage est aussi favorisé par la modification géométrique des cristaux sous l'effet de la pression et des modifications de température. Cf. tableau 3.59.

Temps	6h	1jour	3jours	7jours
Re en gr/cm ²	100	170	190	330

Tableau 3.59

Résistance au cisaillement d'une couche de neige en fonction du temps.

Conditions : neige froide de densité initiale 150Kg/m³ et conditions météorologiques constantes.

Plus la température est basse, meilleure sera la cohésion d'une neige tassée. Par contre, si la température remonte, en période de fonte, avec apparition d'une phase liquide importante, la cohésion va chuter.

- La **pression verticale** appliquée sur le plan soumis au cisaillement. Dans notre cas, la pression viendra de la charge verticale appliquée par le pneumatique, ramenée à la surface de l'empreinte au sol.

- Du **type de cristal** composant le flocon, de son âge, de sa métamorphose. Lorsque le cristal s'est transformé en grain aux formes arrondies, forme ultime lors de la fonte, la résistance au cisaillement décroît rapidement, d'autant plus rapidement que la teneur en eau est importante.

e) Influence du type de neige sur le roulement d'un pneumatique. Vu le nombre de paramètres entrant en jeu, donnant à la neige un caractère continuellement évolutif lorsqu'elle est au sol, le nombre de cas différents est quasi infini. Apprécier la qualité de la neige dans une circonstance donnée, demande une grande expérience. La sécurité en dépend. Nous ne citerons que quelques cas, les plus fréquents.

- **Cas N°1 : Le sol est gelé et l'air extérieur est <0°C.** La neige n'est composée que de la phase solide et d'air, donc de faible densité. Au sol, la couche va rapidement prendre de l'épaisseur. Le pneumatique devant faire sa trace et son passage va réaliser le compactage d'une neige dont la cohésion va augmenter. L'orniérage sera marqué. Pour tenir compte de cette cohésion de compactage, la bande de roulement devra disposer de pavés proéminent et bien espacés. Le coefficient d'adhérence peut atteindre : 0,4.

Selon la précipitation, la hauteur que peut atteindre la couche de neige n'est pas neutre pour la progression

d'un véhicule. Il est couramment admis qu'au-delà de 25cms d'épaisseur, la progression peut être compromise quel que soit l'équipement pneumatique. La garde au sol du véhicule ainsi que le diamètre des roues seront des paramètres importants. Dans ces conditions, avec le temps et le trafic, le roulage se fera sur une neige de plus en plus tassée (par effet de frittage) pour former une couche de roulement compacte et dure. Cette couche compactée pourra être soumise à un dégel diurne et un regel nocturne, pour devenir progressivement une dalle de glace.

Pour garder un bon coefficient d'adhérence, la bande de roulement du pneumatique pourra être soit :

- **lamellisé**, c'est-à-dire découpée en fines bandes pour augmenter le nombre de contacts ponctuels avec le sol. Cf. fig. 3.60



Fig. 3.60

Pneumatique lamellisé.

- disposer de **clous** plantés dans le pavé de caoutchouc. Ces clous auront pour effet de se piquer dans la glace et transformer la roue en engrenage. Cf. figs. 3.61, 3.62



Fig. 3.61

Clou à pointe pyramidale

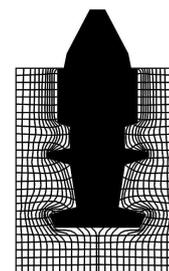


Fig. 3.62

Accrochage dans le pavé de caoutchouc

A noter que plus cette couche sera froide, meilleure sera son adhérence.

Un surcroît de mobilité peut être obtenu par l'emploi de chaînes. Cf. fig. 3.63

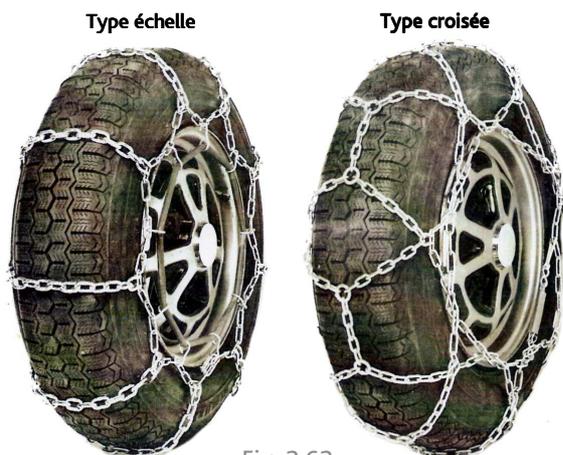


Fig. 3.63
Chaines à neige.

Ce sont des excroissances fixées à la périphérie de la bande de roulement. Leur fonction est de pénétrer dans la couche de neige, pour procurer un effet d'engrenage. Vu la forme et le volume de ces chaînes, leur emploi est réservé à la neige fraîche et récemment compactée.

• **Cas N°2 : Le sol est gelé et l'air extérieur est >0°C.**

La neige qui tombe a commencé sa transformation au contact de l'air et contient les 3 phases : solide, liquide, vapeur. En arrivant au sol, la phase liquide ne tarde pas à geler pour former avec la phase solide une croûte plus ou moins dure suivant les proportions des 3 phases.

La bande de roulement doit pouvoir pénétrer cette croûte, soit par des pavés proéminents, soit par l'ajout de clous. Selon la consistance de cette croûte, le coefficient d'adhérence peut atteindre : 0,3.

• **Cas N°3 : Le sol est froid mais pas gelé et l'air extérieur est <0°C.** Arrivé au sol, le flocon commence à fondre pour donner une phase liquide qui pourra rapidement geler. Ce début de fonte va également modifier la forme des cristaux, rendant le compactage plus difficile. La cohésion est faible, et par conséquence, le coefficient d'adhérence faible : 0,1. La bande de roulement devra disposer de pavés proéminents et bien espacés.

• **Cas N°4 : Le sol et l'air extérieur ont une température >0°C.** Avant d'arriver au sol la neige a commencé à fondre. Elle est composée des 3 phases : solide, liquide, vapeur. En arrivant au sol, la fonte continue. Si le volume de précipitation est important, il se formera une hauteur de « soupe », sans aucune cohésion, mais pouvant geler la nuit et former des ornières. Le coefficient d'adhérence sera faible : 0,1.

La bande de roulement devra se comporter comme avec l'eau de pluie, les pavés et canaux devront expulser ce mélange d'eau et de glace pour atteindre une couche de roulement propre.

• **Cas N°5 : Le verglas.** C'est une couche, en général fine, de glace, souvent homogène et transparente, qui recouvre un sol gelé. Les propriétés mécaniques de la glace sont fonction de sa température. Si celle-ci est froide, la glace sera compacte et dure. Elle se fragilisera lorsque la température remontera.

Ce verglas apparaît lors :

- d'un **refroidissement brutal** sur un sol gardant des traces d'humidité ou d'eau résiduelle.

- de la **congélation** des gouttelettes d'eau d'un brouillard. L'eau passe de la phase liquide à la phase solide.

- d'une **pluie sur sol gelé**. Pour que le verglas se forme dans cette circonstance, il faut plusieurs conditions :

- Un sol gelé et froid en profondeur.
- Une température de couche de roulement <-4°C.

- d'une **température de l'eau de pluie** proche de 0°C avec une précipitation limitée dans le temps pour ne pas influencer sur la température de surface. Comme la congélation dégage de la chaleur et en tenant compte de l'écart de densité entre l'eau et le sol, cette eau de pluie provoque un dégel rapide du sol.

Si la neige est visible, c'est rarement le cas du verglas, qui se trouve le plus fréquemment dans les zones d'ombre orientées au nord. Le verglas recouvre la micro rugosité et selon la quantité jusqu'à la macro rugosité. Son adhésion à la couche de roulement est forte et ne se décolle pas facilement sous l'effet du trafic.

Le coefficient d'adhérence est faible, même si quelques sommets de granulats dépassent de l'épaisseur de la glace.

La bande de roulement sera lamellisée et/ou cloutée.

- **Deux autres cas** : Le givre blanc et la grêle peuvent ponctuellement faire chuter l'adhérence d'un sol.

⇒ Le **givre** est le passage de l'eau de la phase vapeur à la phase solide, qui se dépose en granules, plus ou moins séparées par des bulles d'air, sur le sol et plus particulièrement sur le sommet des granulats. Le givre, de couleur blanche, est visible et évolue sous l'effet du compactage lié au trafic, pour se transformer en une forme de verglas compact qui reste sur le sommet des granulats.

⇒ La **grêle** est une goutte d'eau qui gèle lors de sa chute pour former une bille de glace. Selon l'importance de la précipitation, l'amoncellement de ces billes peut former une couche de hauteur variable. C'est un phénomène qui apparaît le plus fréquemment au printemps.

L'un et l'autre de ces phénomènes apparaissent dans des atmosphères qui ne sont pas très froides, ils sont donc ponctuels et de courte durée. Dans le cas de la grêle, selon la dimension des billes, la capacité d'évacuation des canaux de la bande de roulement sera plus ou moins importante.

- **Un cas particulier : la saumure.** Après une chute de neige, le déblaiement de la chaussée s'effectue par moyens :

⇒ **mécanique** (chasse neige, turbine,...),

⇒ ou **chimique**. Il est alors répandu sur la couche, un sel (Chlorure de sodium, chlorure de potassium ou chlorure de calcium), dont l'objet est d'abaisser la

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

température du point de congélation de la phase liquide présente dans la neige. Il est ainsi introduit dans la neige, un produit chimique additionnel, très actif, qui va en modifier la composition, et donner, en terme d'adhérence pour le pneumatique une nouvelle variante de matériau plus ou moins visqueux, sur lequel s'accrocher.

L'abaissement de la température a une limite théorique voisine de : -5°C , variable en fonction de la teneur en sel du mélange. Par contre, s'il survient un abaissement de la concentration en sel, par exemple par un apport d'eau, le mélange peut tout de même geler et provoquer un verglas dont la composition est éloignée d'une glace pure.

f) Les conséquences sur les mélanges de caoutchouc. Le contact ne se fait plus avec un granulat et un liant, mais avec un matériau différent dont la cohésion mécanique n'est pas constante. Pour retrouver un niveau d'adhérence suffisant, il sera nécessaire de revoir les pressions de contact ainsi que le matériau du mélange de caoutchouc.

- La **pression de contact** sera augmentée par une

réduction de largeur de la bande de roulement et par une forme de sculptures donnant un taux d'entaille plus élevé. Les pavés auront des formes plus pyramidales pour mieux pénétrer dans la neige et des canaux plus larges pour permettre un « auto-nettoyage » efficace lors du tour de roue.

- Lorsque la **température** chute, le mélange de caoutchouc durcit. Pour limiter ce durcissement, le mélange utilisera plus de NR. Cf. fig. 3.16 Les charges de renforcement seront également adaptées à cette utilisation particulière. Comme ces mélanges sont un compromis, le déplacement de l'équilibre vers une performance à basse température se fera au détriment d'autres caractéristiques, comme l'usure et l'indice de vitesse.

Les manufacturiers ont développé des mélanges spécifiques pour les conditions de basse température, sous l'appellation de « Thermogomme » ou « thermocontact ». Ces mélanges restent plus malléables lorsque la température chute, tout en restant utilisables à des températures tempérées.

3-E.3 TEMPÉRATURE ET CHALEUR.

Cette chaleur provient de l'augmentation de température du pneumatique, augmentation qui a deux causes majeures : d'une part la surcharge verticale, d'autre part le rayonnement solaire et la température extérieure. Ces deux causes pouvant se cumuler. A noter que la température extérieure a un lien direct avec le rayonnement solaire.

a) la surcharge verticale. Le pneumatique est employé à une valeur supérieure à sa limite de charge. Cela induit un travail de déformation de la carcasse, travail produisant de la chaleur qui s'accumule progressivement dans la masse du pneumatique.

b) Le rayonnement solaire et la température extérieure. Le pneumatique est un « corps noir » qui absorbe et emmagasine l'énergie des rayons solaires. Un pneumatique exposé au soleil chauffe, même sans rouler.

Dans les zones désertiques, l'ensoleillement est abondant et il y règne des températures ambiantes élevées, jusqu'à 50°C .

La chaleur accélère le vieillissement du caoutchouc. Selon la nature du mélange, et l'emploi du pneumatique, celui-ci peut atteindre des températures dépassant $100-120^{\circ}\text{C}$. L'évolution du mélange de caoutchouc sous ces températures et sous contrainte peut amener des dégradations irréversibles : décollement de bande de roulement, destruction de l'enrobage des nappes de carcasse, etc., pour aboutir à la destruction par éclatement.

c) Le respect de la charge. Un pneumatique utilisé par forte chaleur nécessitera un respect scrupuleux de la charge et de la pression de gonflage préconisées. Éventuellement il disposera d'un mélange de caoutchouc adapté.

3-F BILAN DU CONTACT PNEUMATIQUE/SOL: EQUILIBRE ENTRE OFFRE ET DEMANDE D'ADHÉRENCE. Cf. 3-D.1

Si nous considérons d'une part le véhicule qui roule sur la route, et d'autre part, les conditions météorologiques et la qualité de la couche de roulement, nous aurons besoin à chaque instant d'un équilibre, entre ce qu'offrira la couche de roulement comme potentiel

d'adhérence et la demande faite par le véhicule. Cette demande dépendra des caractéristiques de ce véhicule, mais aussi de la personne assise derrière le volant, de son comportement, son expérience, etc.

3 — [LE CONTACT PNEU/SOL.]

3-F.1 LA DEMANDE.

La demande viendra du véhicule et s'exprimera :

- tout d'abord dans l'axe de marche du véhicule, lors :

- Du démarrage et de l'accélération de mise en vitesse du véhicule,
- Du roulage dans une pente (que ce soit une montée ou une descente),
- Du freinage, avec son effort de décélération.

- ensuite perpendiculairement à l'axe de marche lors du virage, qui est un changement de direction. Cf. le § sur le cercle d'adhérence.

Il est à remarquer que ce sont dans les conditions de freinage et de changement de direction que la demande sera la plus forte.

Physiquement, cette demande est proportionnelle à V^2 , carré de la vitesse du véhicule. Cela sera matérialisé, quelle que soit la condition de roulage :

- au freinage, par l'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} M \times V^2$$

- en courbe, par l'effort centrifuge :

$$F_c = \frac{1}{2} M \times \frac{V^2}{R}$$

3-F.2 L'OFFRE.

L'Offre sera fonction du coefficient d'adhérence μ selon les différents paramètres étudiés précédemment auxquels s'ajoute la composante météorologique, difficilement maîtrisable.

L'offre d'adhérence mise à disposition du conducteur décroît avec la vitesse du véhicule et l'usure du revêtement.

Résultat, le véhicule va rencontrer les plus faibles

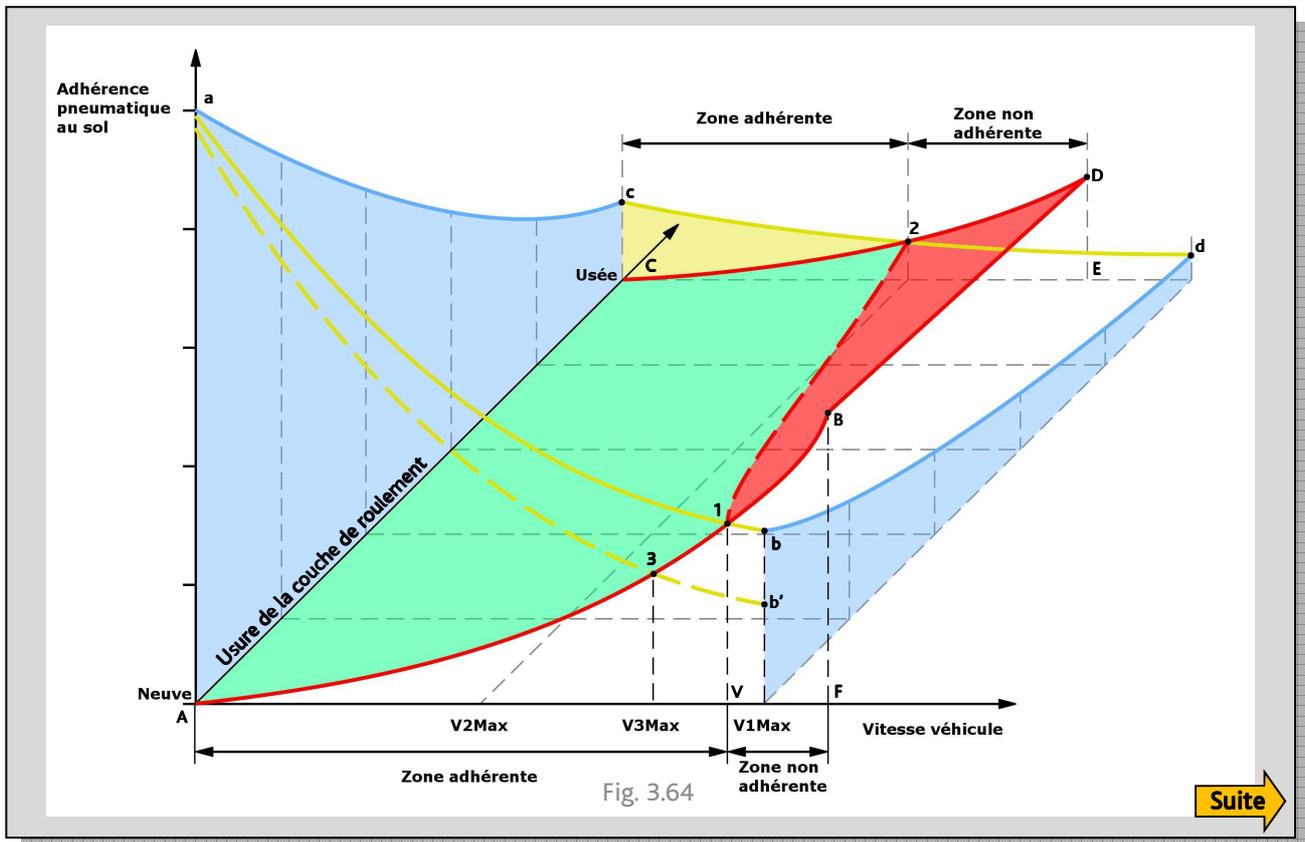
adhérences sur :

- les routes à grande vitesse et à fort trafic,
- dans les virages,
- les approches de croisement,

C'est à dire aux endroits très sollicités où les plus fortes adhérences sont nécessaires.

Ce qui peut se traduire par le diagramme de la fig. 3.64

3-F.3 BILAN : OFFRE / DEMANDE. Cf. Encart et fig. 3.64.



Suite

Diagramme offre-demande d'adhérence.

La demande : elle est représentée par la surface **A B D C** formée d'une infinité de parabole traduisant la proportionnalité à V^2 et limitée par **AB** et **CD**. **AB** représente la demande dans le cas d'une couche de roulement neuve, alors que **CD** est dans le cas d'une couche de roulement usée. Nous avons donc : **BF > DE**

L'offre : elle se traduit par la surface **a b d c**. Cette offre chute avec la vitesse et d'autant plus vite que le revêtement sera usé. **ac** est la courbe représentant l'offre idéale, **bd** est la courbe de l'offre disponible pour une vitesse **V**.

Ces deux surfaces se coupent en une courbe : **1-2**, qui sera la frontière délimitant deux zones distinctes : la zone adhérente, qui permettra la transmission des efforts au sol et un zone non adhérente qui ne permettra aucune transmission. Toute demande se trouvant dans la surface **1-2 D B** ne pourra être satisfaite.

À noter que l'offre diminue avec la vitesse alors que la demande augmente.

Au point **1** correspond un vitesse **V1 max** et au point **2**, **V2 max** avec **V2 max < V1 max**. Les surfaces limites **a 1 A** et **c 2 C** représentant un excès de l'offre sur la demande. La courbe **a b** représente un pneumatique opérant à sa valeur optimale de glissement relatif alors que la courbe **a b'** représente une roue bloquée (qui ne tourne pas). Dans ce cas, l'intersection avec **AB** définit un point **3** et un nouvelle vitesse **V3 max < V1 max**.

Dans le cas idéal d'une couche de roulement neuve, si la vitesse **V** du véhicule est **< V1 max** nous serons dans une zone adhérente. Le conducteur va pouvoir freiner normalement et même augmenter l'intensité du freinage, proportionnellement à la chute de la vitesse.

Par contre si la vitesse **V > V1 max**, l'offre d'adhérence sera insuffisante et en cas de freinage, la roue va se bloquer. Cela nous fait passer sur la courbe **a b'** avec une réduction de l'offre d'adhérence.

3-G LE BRUIT DE ROULEMENT.

Un pneumatique roulant sur le sol émet du bruit.

Le contact du pneumatique sur la couche de roulement génère des ondes sonores, d'origines diverses :

3-G.1 LA TRAINÉE AÉRODYNAMIQUE.

L'ensemble roue et pneumatique forme un disque dont les faces ne sont pas planes. Les formes de ce disque liées à son déplacement en translation et en rotation créent des turbulences de l'air. Le niveau de bruit induit par ces turbulences est proportionnel à la vitesse de rotation.

3-G.2 UN EFFET DE « POMPE À AIR ».

Les canaux composant la sculpture de la bande de roulement délimitent des volumes d'air. Lorsqu'ils viennent en contact avec le sol, ces volumes se trouvent comprimés et un pourcentage de cet air va être éjecté vers l'extérieur. Cette éjection va émettre un bruit, identique à un souffle. Nous retrouvons un phénomène proche de l'effet « pompe à eau ».

Mais la totalité de l'air contenu dans les canaux de la sculpture n'est pas éjecté, d'où cette notion de pourcentage. Ce pourcentage est fonction du dessin des sculptures et de l'imbrication des canaux.

Il se passe le phénomène inverse lorsque les sculptures vont quitter la zone de contact, l'air va reprendre sa place et créer un bruit d'aspiration, comme celui d'une ventouse.

L'intensité du bruit due à cet effet de pompe va

dépendre :

- De la **vitesse** du véhicule
- Du **taux d'entaille** qui définit le débit volumique de la pompe à air.
- De la **géométrie** des canaux formant les entailles de sculpture. Une strie longitudinale est un tuyau d'air ouvert aux deux extrémités. Une strie transversale est en général un tuyau d'air ouvert à une seule extrémité. Plus le dessin géométrique de la sculpture sera complexe et irrégulier, plus le niveau de bruit émis sera élevé.
- De la **répétition** dans la zone de contact de la même forme de canaux.

Un dessin de sculpture **M+S**, au taux d'entaille élevé sera plus bruyant qu'un pneumatique route.

3-G.3 UN EFFET DE CHOC.

Selon le taux d'entaille, dans le cas d'un grand espacement des pavés, ceux-ci viennent frapper la couche de roulement, engendrant un bruit de martèlement, d'autant plus important que la vitesse est élevée, la chaussée irrégulière et les granulats de grande dimension.

Pour réduire ce bruit dû à l'effet de choc, de nombreuses bandes de roulement disposent d'un nombre de pavés moins important sur la partie extérieure que sur la partie intérieure. Cette asymétrie modifie la fréquence des chocs.

3-G.4 LA VIBRATION DU PNEUMATIQUE.

Le pneumatique est un corps élastique, et comme tout corps élastique soumis à des déformations répétées et rapides, il est le siège de vibration. Une roue d'une voiture roulant à 90km/h, fait environ 12tr/s, cela signifie qu'une partie d'un flanc sera déformée 12 fois/s. Cela représente une fréquence variant selon le type de pneumatique de 10 à 14Hz. Ces vibrations concernent les flancs, la carcasse et les pavés de caoutchouc de la bande de roulement, chaque partie étant une source de bruit.

Dans ces niveaux de vibration vont intervenir l'architecture du pneumatique, mais aussi le type de revêtement de la couche de roulement. Certains revêtements seront bruyants pour certains pneumatiques et silencieux

pour d'autres.

Le bruit est aussi fonction de la rugosité. Cette rugosité fait vibrer le pavé de caoutchouc à des fréquences pouvant atteindre 1000Hz. Ces vibrations consomment de l'énergie qui se transforme en chaleur dans le caoutchouc.

Selon la nature de la couche de roulement, notamment sa porosité, la réverbération du bruit sera plus ou moins importante.

Avec l'usure, les niveaux de bruit émis vont évoluer et en général, un pneu usé est plus bruyant qu'un pneu neuf. Car l'usure est souvent irrégulière, ce qui modifie la distribution des efforts dans la zone de contact.

3-G.5 LA CHARGE VERTICALE.

Il s'agit d'un facteur important dans la mesure où il change les conditions de travail de la zone de contact. Un pneumatique chargé est plus bruyant que le même moins chargé, à conditions de roulage identiques.

En revanche, l'expérience montre que la pression de gonflage et la température ont peu à pas d'influence majeure sur le niveau de bruit émis.

4 — [LE VÉHICULE ET LE PNEUMATIQUE]

Notre § 3 était consacré à l'étude du contact entre le pneumatique et le sol. Nous l'avons appelé premier système. Maintenant nous allons examiner le second système, qui traitera de la relation entre le pneuma-

tique et le véhicule qu'il supporte et doit déplacer. Ce § ne reprend des principes de la dynamique du véhicule que les particularités intéressant le pneumatique.

4-A RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS:

4-A.1 LE POIDS.

C'est une force traduisant l'action de la gravité qui s'exerce sur tout corps matériel immobile, au voisinage de la Terre. Cette force **P** est portée par la verticale passant par le Centre de Gravité du corps, et dirigée vers le

sol et de valeur : $P = M \times g$, avec **M** = masse du corps, et **g** = **champ** de pesanteur local, qui est une constante homogène à une accélération = $9,81\text{m/s}^2$. Tous les corps solides sont pesants.

4-A.2 LE CENTRE DE GRAVITÉ.

Point fixe d'un corps par lequel passe la force qui représente son poids et cela quelle que soit l'orientation du corps.

4-A.3 LE PRINCIPE D'INERTIE.

Un corps ne peut modifier de lui-même, c'est-à-dire sans l'intervention d'une force extérieure, son état de repos ou de mouvement. C'est la première loi de **Newton** : « *Tout corps persévère dans son état de repos*

ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins qu'il ne soit déterminé à changer cet état par des forces agissant sur lui. »

4-A.4 LA GRAVITÉ - RAPPEL GRAVITAIRE.

Pour soulever une pierre posée sur le sol, nous devons exercer un effort musculaire. Cette pierre est **pesante** et a un **Poids**.

Pour garder cette pierre au-dessus du sol il est nécessaire de maintenir l'effort musculaire, car chaque fois que nous réduisons cet effort, elle a tendance à redescendre en direction du sol.

Si nous lâchons la pierre, en supprimant complètement

l'effort musculaire, la pierre retombe sur le sol, comme attiré par lui. Une fois au sol, la pierre reste immobile, plaquée sur le sol qui lui sert de support. Elle est alors en équilibre, la composante **Poids** se trouvant annulée par la réaction du support. Ce phénomène est appelé **Gravité** et s'applique à une pierre de poids $P = M \times g$.

4-A.5 L'ÉQUILIBRE - LA STABILITÉ.

Un corps est en équilibre stable si, écarté légèrement de sa position, il tend à y revenir de lui-même. Cf. fig. 4.1. C'est le cas du pendule, dont le point de fixation **O** est situé au dessus du centre de gravité **G** de la masse **M**.

Un corps est en équilibre instable si, écarté légèrement de sa position, il tend à s'en écarter davantage. Cf. fig. 4.2 Dans ce cas, le point de fixation **O** est en dessous du centre de gravité **G**.

Un corps est en équilibre indifférent quand il reste au repos dans toutes les positions qu'on lui donne.

Un deux roues dont le contact au sol est en deux points

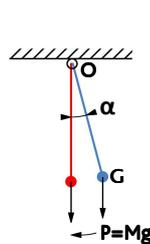


Fig. 4.1

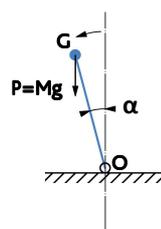


Fig. 4.2



Fig. 4.3

La stabilité.

alignés se retrouve dans la catégorie instable, car son centre de gravité est au dessus du sol. Cf. fig. 4.3

4 — [LE VÉHICULE ET LE PNEUMATIQUE]

Une voiture à quatre roues est assimilable à une table posée sur quatre pieds. Cf. fig. 4.4. Ces pieds délimitent une surface de sustentation au sol **ABCD**. Pour renverser cette table, il faudra lui appliquer un effort **F** dont la ligne d'action sera au dessus de **G**. Si cet effort est suffisamment important, elle va subir une rotation autour d'une ligne reliant deux pieds restant au contact du sol. Les deux autres pieds vont décoller du sol. Si l'effort diminue, la table revient à sa position stable d'origine. C'est le cas lorsque le centre de gravité **G** est en position **G1**. Par contre lorsque **G** arrive en **G2**, à la verticale de la ligne d'appui au sol, l'équilibre devient instable. Passée la position **G2**, vers **G3**, elle se renverse. Cf. fig. 4.5 Un kart est un exemple de ce type de stabilité.

Mais notre voiture interpose une suspension entre la roue et le châssis. Cela revient à doter notre table de « pieds élastiques ». Avant de la renverser il faudra d'abord écraser les ressorts de suspension (trajet **G** à **G1** sur fig. 4.7) avec rotation autour de **O**, centre instantané de rotation (C.I.R.). Ensuite la table pivotera autour du point **A**, nouveau C.I.R.

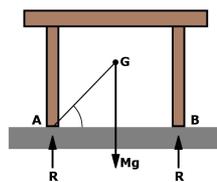


Fig. 4.4

Au repos

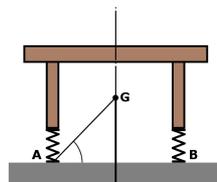


Fig. 4.6

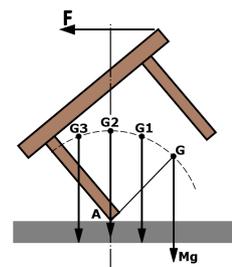


Fig. 4.5

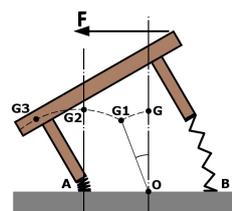


Fig. 4.7

La stabilité tabulaire.

4-A.6 LES DIFFÉRENTES FONCTIONS D'UNE ROUE.

Sur un véhicule, toutes les roues sont **porteuses**, c'est-à-dire qu'elles subissent une charge verticale, et ce, que le véhicule soit à vide ou en charge.

Ensuite, une roue **porteuse** peut-être **motrice**, que le véhicule soit Traction ou Propulsion. Et enfin, une roue

peut-être **porteuse**, **motrice** et **directrice**. C'est le cas d'une roue avant d'une traction. C'est dans ce dernier cas que les contraintes sur le pneumatique seront les plus importantes.

4-B LES MOUVEMENTS DU VÉHICULE SUR LE SOL.

La route forme un plan en deux dimensions, longueur et largeur. Le véhicule posé sur ce plan ajoute une troisième dimension. Cela signifie que le déplacement de

notre véhicule sur la route se fera par rapport à un **trièdre de référence G.x.y.z**. Cf. fig. 4.8

4-B.1 LES SIX DEGRÉS DE LIBERTÉ ET LEUR COUPLAGE.

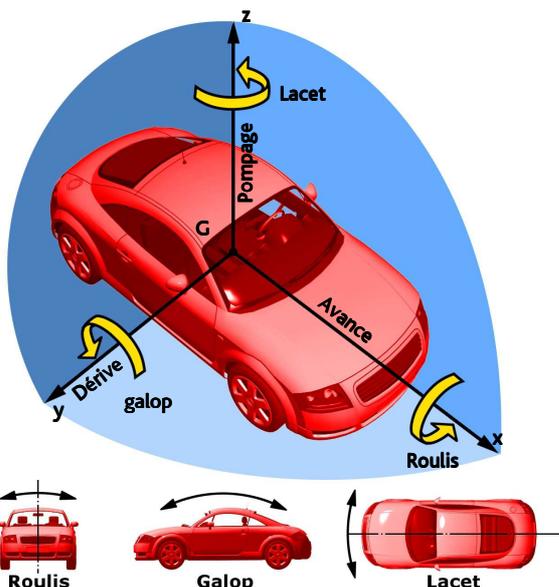


Fig. 4.8

Les six degrés de liberté.

A partir du trièdre de référence **G.x.y.z**, positionné en son Centre de Gravité **G**, nous pouvons définir les mouvements élémentaires de notre véhicule, chacun étant un degré de liberté, soit :

a) **3 déplacements**, chacun suivant un axe :

- Selon l'axe **Gx**, que nous appellerons l'**Avance**, dans le sens de marche du véhicule.
- Selon **Gy**, la **Dérive**, ou déplacement transversal.
- Selon l'axe **Gz**, le **Pompage**, ou déplacement vertical.

b) **3 rotations**, chacune autour d'un axe :

- Autour de l'axe **Ox**, le **Roulis**. Le centre de roulis **O** est distinct de **G**.
- Autour de l'axe **O'y**, le **Galop**. Ce mouvement de galop sera décomposé en : - **Cabrage** lors des phases d'accélération et, - **Plongée** lors des phases de décélération. Le centre de galop **O'** est distinct de **O** et de **G**.
- Autour de l'axe **Gz**, le **Lacet**.

4 — [LE VÉHICULE ET LE PNEUMATIQUE]

Ces mouvements : déplacements et rotations interfèrent les uns sur les autres, ils sont dits : couplés.

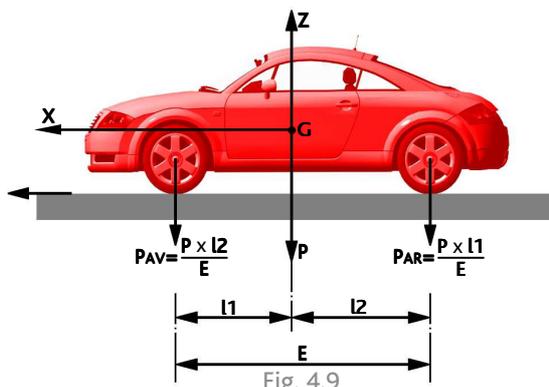
Dans la suite de ce §, nous examinerons ce qui se passe

dans chacun des plans en liaison avec l'axe de rotation correspondant.

4-B.2 PARAMÈTRES DANS LE PLAN LONGITUDINAL xGz ET ROTATION AUTOUR DE Oy.

a) **Le centrage longitudinal.** Le véhicule est une masse disposant d'un Centre de Gravité **G** et reposant sur 4 roues qui sont quatre points d'appui avec le sol. Cf. fig. 4.9 Le poids **P** se répartit sur chacun des essieux en **P_{AV}** et **P_{AR}** en fonction des longueurs **l1** et **l2** qui positionnent **G** par rapport aux essieux.

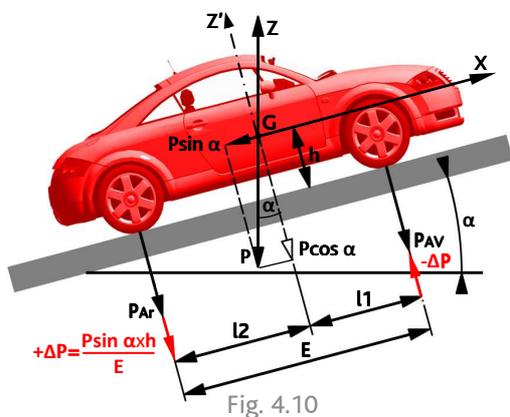
l1 et **l2** sont appelés les « paramètres de centrage ». Une voiture disposant d'un moteur AV et traction AV aura un centrage portée vers l'essieu AV, en général 2/3 du poids total sur l'AV et 1/3 sur l'AR. C'est l'inverse pour une propulsion disposant du moteur à l'AR.



Le centrage longitudinal.

b) **Les transferts de charge.** Les transferts de charge se produisent dans trois cas :

1°) Dans une pente. Cf. fig. 4.10



Le transfert de charge dans une pente.

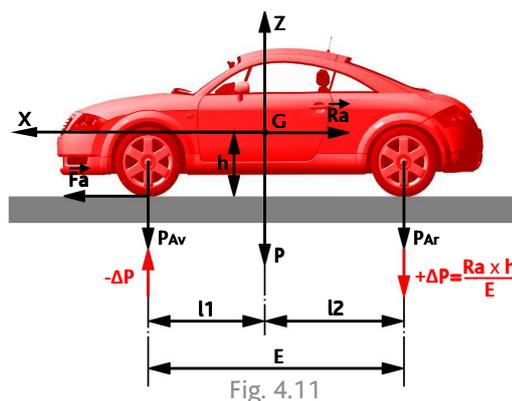
La composante du poids reste verticale. Dans une pente cette composante, ramenée au trièdre lié au véhicule se décompose en **P_{cos} α** et **P_{sin} α**. Ce dernier facteur, positionné dans l'axe de marche du véhicule, introduit un transfert de charge:

$$\Delta P = \frac{P \sin \alpha \times h}{E}$$

h = hauteur du centre de gravité par rapport au sol.

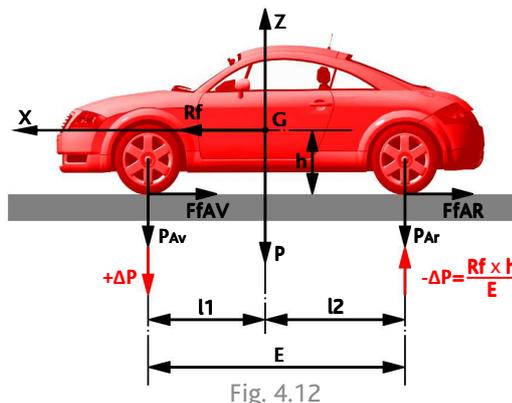
E = empattement, distance séparant les essieux AV et AR.

2°) Lors d'une phase d'accélération. Cf. fig. 4.11 L'effort moteur transmis aux roues motrices va créer une réaction d'inertie appliquée en **G**. Effort moteur **F_a** et réaction **R_a** d'inertie, ne se trouvant pas sur le même axe, vont composer un couple. Ce couple va provoquer une rotation autour d'un axe **O'y** et un transfert de charge : **ΔP**. L'essieu AR va s'alourdir de **ΔP** et le train AV s'alléger de **ΔP**.



Le transfert de charge en accélération.

-Il en est de même lors d'une phase de freinage, sauf que les efforts sont dans le sens opposé, Cf. fig. 4.12 et le transfert de charge inversé.



Le transfert de charge au freinage.

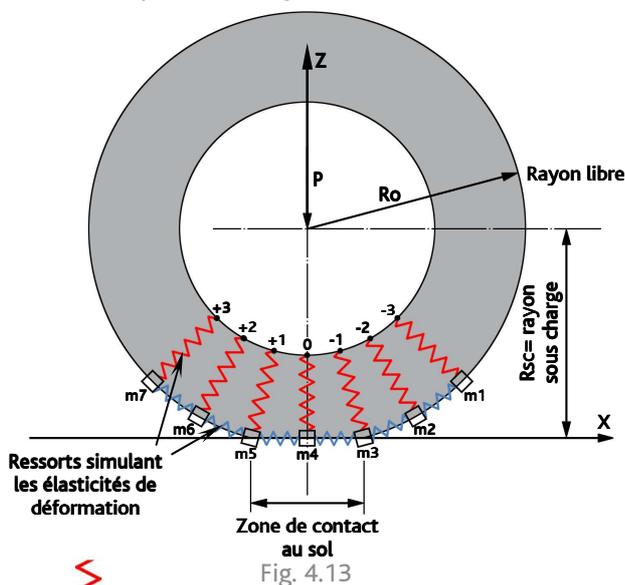
c) La raideur longitudinale

Le pneumatique a une raideur suivant les trois axes. Ces raideurs peuvent être représentées par des ressorts élémentaires, liés chacun à une masse élémentaire. Cela permet de symboliser les efforts et les déformations dans la structure. Cf. figs. 4.13 et 4.14

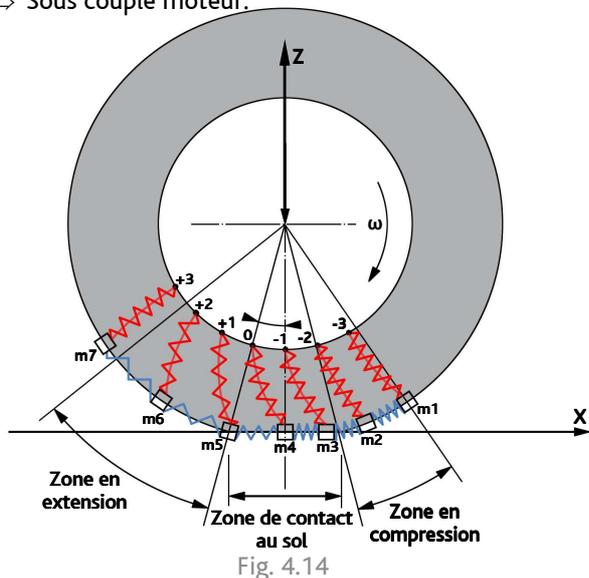
Dans le plan longitudinal, cette raideur se traduit par un effort longitudinal et un déplacement mesurés sur un pneumatique au repos. Cf. fig. 4.15

Cette raideur est fonction de la charge verticale, pour une pression de gonflage donnée. Plus la charge sera importante, plus l'effort à fournir sera important. Cette raideur longitudinale intervient lors des phases d'accélération mais surtout lors des freinages.

⇒ En statique sans charge.



⇒ Sous couple moteur.



Représentation schématique des raideurs verticales et longitudinales.

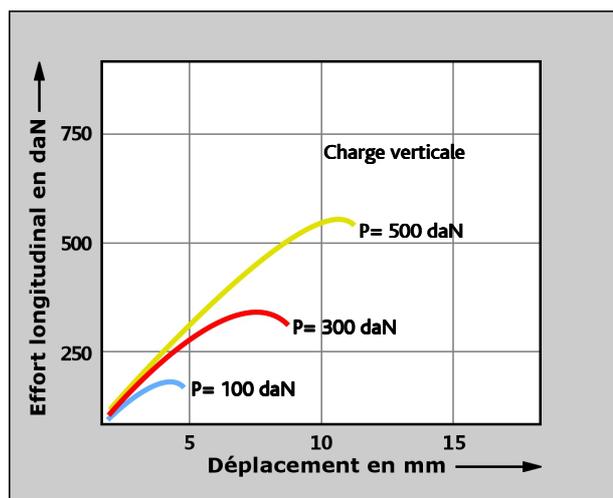


Fig. 4.15

Raideur longitudinale.

Pneumatique : Série 60, largeur 200mm, diamètre : 15 pouces, roue : 7 1/2 J15, pression de gonflage : 3.0 bars.

d) La raideur radiale

Dans le plan vertical xGz et toujours au repos, un pneumatique se comporte comme un ressort métallique de suspension. Cf. fig. 4.16 Cette raideur, qui a la forme d'une droite, est fonction de la pression de gonflage. En augmentant la pression, la raideur augmente, ce qui influe sur le confort.

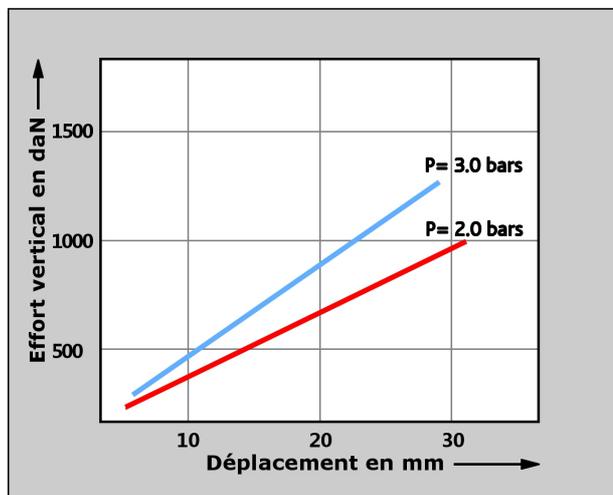


Fig. 4.16

Raideur radiale.

Pneumatique : idem à la Fig. 4.15

La raideur radiale d'un pneumatique doit être adaptée à la raideur du ressort de suspension. Il est commun d'avoir une raideur de pneumatique dix fois supérieure à la raideur du ressort de suspension. Si la raideur du ressort devient trop importante, il peut se produire un effet de « balle ». Le véhicule rebondit sur la seule élasticité du pneumatique. Ceci est particulièrement visible sur les engins de Travaux Publics sans suspension et avec des pneumatiques de fortes dimensions.

Les mouvements verticaux de l'engin sont ceux d'une balle rebondissant sur le sol. Si l'engin parcourt le même chemin régulièrement sur un sol meuble à faible cohésion, cet effet peut être à l'origine d'une « tôle ondulée », modification superficielle du profil en long.

e) la variation du rayon de roulement avec la vitesse. Avec la vitesse de rotation, la masse de la ceinture est soumise à l'effet de la force centrifuge. Cette force va s'opposer à la déformation des flancs. L'importance de cette variation sera aussi fonction de la capacité de la ceinture de s'allonger. Cf. fig. 4.17

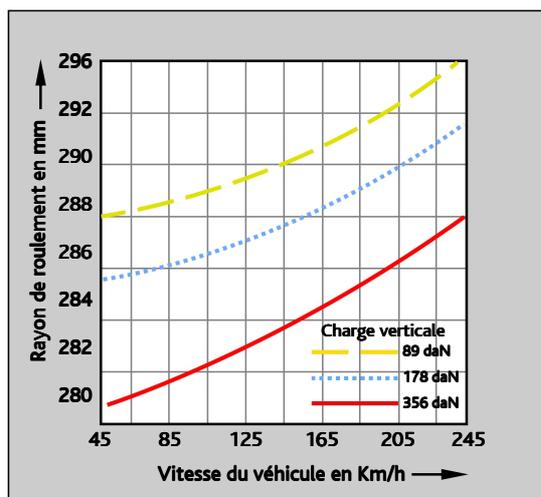


Fig. 4.17

Effet de centrifugation.

f) Le pompage. Il s'agit d'un mouvement vertical selon l'axe Gz.

g) Evolution de la charge verticale. La charge verticale appliquée sur un pneumatique en fonctionnement est un paramètre majeur, nous distinguerons :

- La **charge statique initiale** qui variera en fonction du poids transporté.
- Les **efforts longitudinaux**, lors du freinage ou d'une accélération.
- Les **efforts transversaux** lors d'un virage.
- Les **efforts aérodynamiques**. En roulage, l'effet de la vitesse de déplacement dans l'air va induire une charge aérodynamique selon le principe de l'aile d'avion. Suivant la forme du véhicule, cette charge pourra être positive, ce qui procurera un appui supplémentaire, ou négative, ce qui provoquera une réduction de charge.

h) Le galop Il s'agit d'une rotation autour d'un axe O'y, perpendiculaire au plan xGz. Le point O', situé dans ce plan, est déterminé par l'architecture de la suspension et la position des attaches de suspension sur le châssis. A chaque essieu correspond un centre instantané de rotation, ou « **centre de percussion** » de cet essieu.

Lorsque le véhicule passe un obstacle, il le passe, en général, d'abord avec l'essieu avant. Cet obstacle a une certaine hauteur et va soulever l'avant du véhicule qui effectue une rotation autour de l'axe de percussion lié à l'essieu AV. Il en sera de même pour l'essieu AR, qui franchira l'obstacle après un temps t dépendant de l'empiètement et de la vitesse du véhicule. Cf. fig. 4.18

Selon la fréquence de la suspension de chaque essieu, le véhicule va osciller d'AV en AR autour d'un centre instantané de rotation résultant. C'est le mouvement de **galop**.

i) Les efforts moteur et de freinage. Ces efforts sont introduits sur le véhicule au niveau de la zone de contact du pneumatique avec le sol.

j) La Résistance au Roulement. Le pneumatique est un matériau composite élastique qui se déforme dans la zone de contact avec le sol. La déformation : - des flancs, - de la ceinture, - de la bande de roulement, consomme de l'énergie. Le phénomène d'hystérésis, propre au caoutchouc, fait que les parties déformées ne restituent pas la totalité de l'énergie reçue lors de la déformation, lorsqu'elles reprennent leur forme initiale. La différence entre énergie absorbée et énergie restituée est transformée en chaleur. Un pneumatique qui roule chauffe. La puissance dissipée est traduite par : $P_r = R_r \times V$, avec :

- P_r = Puissance absorbée au Roulement (en Watt).

- R_r = Résistance au roulement, équivalent à une force (en Newton) et située au niveau de la roue, dans le plan xGz.

- V = Vitesse du véhicule (en m/s).

Il est aussi utilisé un autre terme :

le **coefficient de résistance au roulement** :

$$C_r = \frac{R_r}{P}$$

avec : P = charge verticale sur le pneumatique. Pour un pneu radial, C_r a une valeur moyenne de 0,12. Cela signifie que pour maintenir une vitesse constante d'un véhicule d'une tonne, il sera nécessaire d'exercer une force de 12 daN pour vaincre la résistance au roulement. Comme le poids d'un véhicule s'exprime facilement en tonne, C_r est souvent exprimé en **daN/t**.

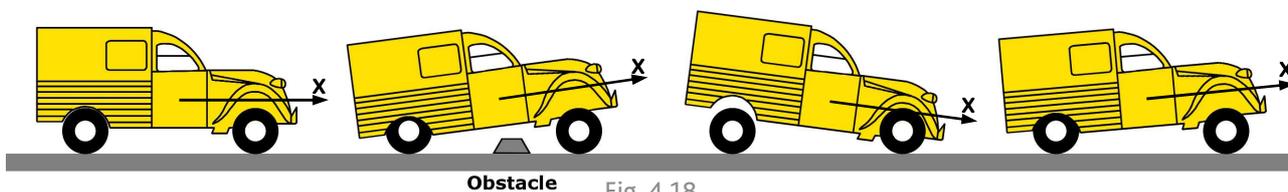


Fig. 4.18

Mouvement de galop.

La R_r dépend de la :

- **Vitesse** du véhicule. Cf. fig. 4.19
- **Charge** portée par le pneumatique, donc du poids du véhicule.
- **Pression** de gonflage.
- **Nature** du sol.

mais également :

- Des **dimensions et du type de pneumatique**. Plus grand sera le diamètre extérieur, plus faible sera la R_r , car à aire de zone de contact identique, la déformation est moindre. De même, le nombre de tours de roue sera moindre à égalité de distance parcourue, ce qui revient à dire que le nombre de déformation sera plus réduit.

- Du **taux d'entaille** ou fragmentation de la sculpture. Plus petits seront les pavés, plus faible sera la R_r . Les pavés de faible dimension ont une plus grande indépendance lors du positionnement dans la zone de contact, ce qui réduit les mouvements de tension dans la sculpture. Mais comme ces pavés sont nombreux, ce que l'on gagne en R_r , on le perd en stabilité directionnelle par un mouvement accru des pavés par rapport à la carcasse.

- De la **composition des mélanges** de caoutchouc et principalement de celui de la bande de roulement. Plus faible sera l'hystérésis du matériau, plus faible seront les pertes. La silice, introduite partiellement en lieu et place du noir de carbone est un composant réduisant la R_r , de même que certaines molécules de polyéthylène à haut poids moléculaire.

- De l'**usure** des sculptures. Cf. fig. 4.19
- De la **dérive**. Cf. fig. 4.20

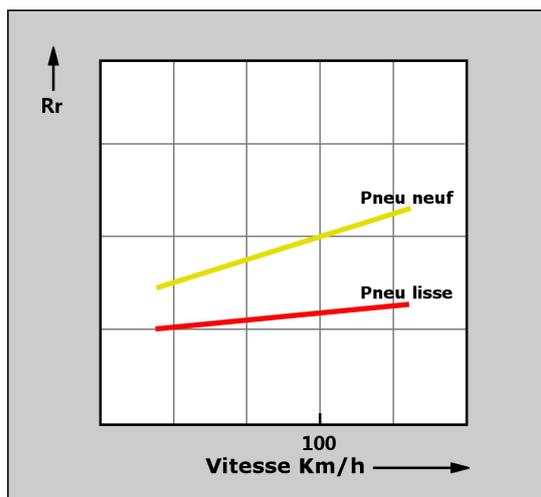


Fig. 4.19

Usure et résistance au roulement.

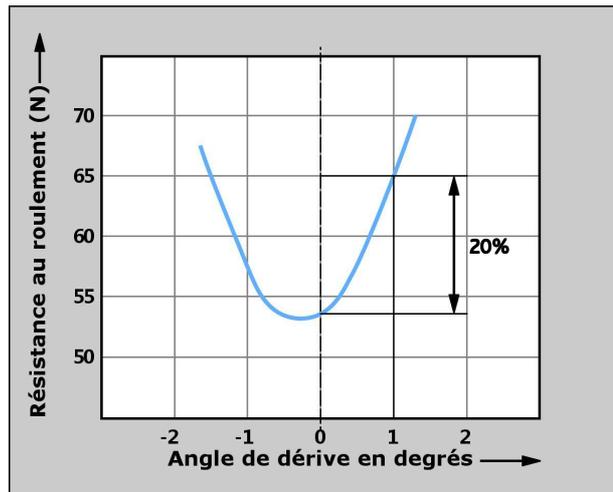


Fig. 4.20

Résistance au roulement en fonction de la dérive.

- De la **température**. Cf. fig. 4.21

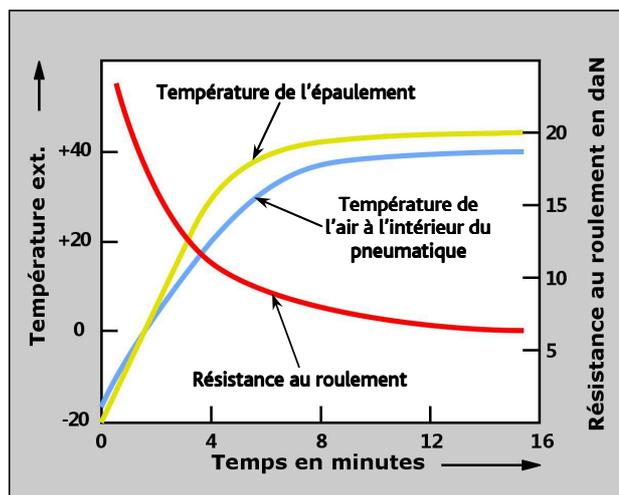


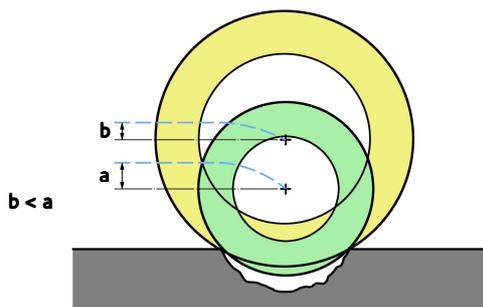
Fig. 4.21

Incidence de la température sur la résistance au roulement.

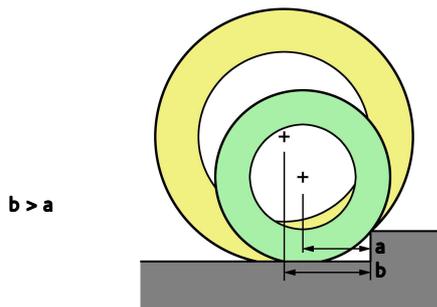
Pneumatique : 195-95/14, charge à la roue : 540 daN, Pression de gonflage : 2.7bar à 20°C, vitesse de roulage : 80Km/h.

La R_r est un élément de la signalétique du pneumatique. Pour cela, elle est mesurée sur un banc à rouleau suivant la procédure normalisée : ISO 28580. Les conditions de base pour la mesure sur un pneumatique de tourisme : 30mn de roulage pour échauffement, vitesse équivalent à 80Km/h, charge verticale (80% de la charge maxi correspondant à une pression de gonflage de 2,1 bars pour le pneumatique considéré.)

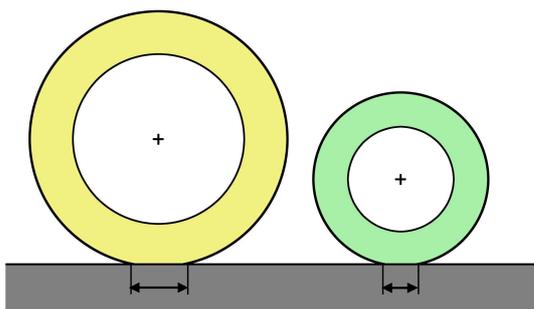
k) Le passage d'obstacle et le « Pouvoir Absorbant » du pneumatique. Verticalement, le pneumatique est assimilable à un ressort de rigidité constante. Pour chaque valeur de la pression de gonflage, la déflexion d'écrasement varie linéairement avec la charge verticale. Cette « loi » n'est en fait applicable que pour des déformations du sol qui s'étendent sur une longueur suffisante par rapport à la surface de contact du pneumatique. La roue va alors suivre le profil de la route.



a) Au passage d'un trou.



b) Au passage d'une marche.



c) Ecart de longueur d'empreinte au sol.

Fig. 4.22a

Influence du diamètre sur le passage d'obstacle.

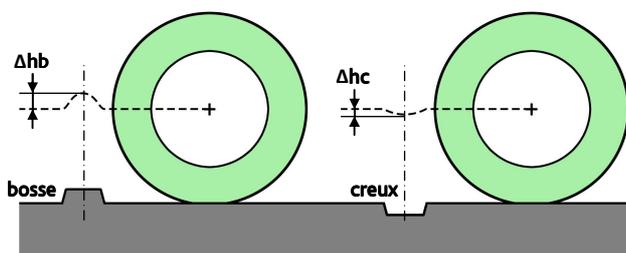


Fig. 4.22b

Dissymétrie de trajectoire du moyeu selon l'obstacle.

$$\Delta hc < \Delta hb$$

Lorsque l'obstacle prend de l'importance, par sa hauteur ramenée à sa longueur, il est nécessaire d'introduire la notion de « **Pouvoir Absorbant** ». Le pneumatique a la particularité, par son potentiel de déformation, de pouvoir « envelopper » l'obstacle par une déformation locale sans provoquer de mouvement vertical de la suspension. Le pneumatique « boit » l'obstacle, « nivelle » la route.

Le « **Pouvoir Absorbant** » se définit comme le mécanisme d'absorption d'obstacles courts à front raide. Selon que l'obstacle se présente en creux ou en saillie par rapport au niveau moyen de la route, le comportement de la roue sera différent. Un creux pourra être franchi sans réponse notable de la roue alors que la bosse pourra générer un choc, d'où une dissymétrie de fonctionnement, avec prédominance d'action des bosses.

La bosse va induire non seulement une réaction verticale mais également une réaction horizontale. Cf. fig. 4.23 La réaction verticale est facilement absorbée par le pneumatique. Mais il n'en est pas de même de la réaction horizontale. Vu l'architecture de la carcasse et des nappes sommet, cette réaction est peu absorbée par le pneumatique. D'où l'introduction dans l'architecture des trains roulants d'une **SHR** (Suspension Horizontale de Roue), sous forme d'articulation élastique des triangles sur le châssis.

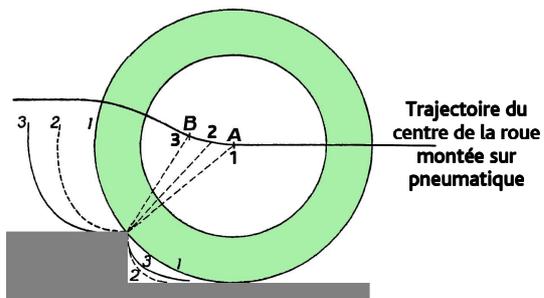
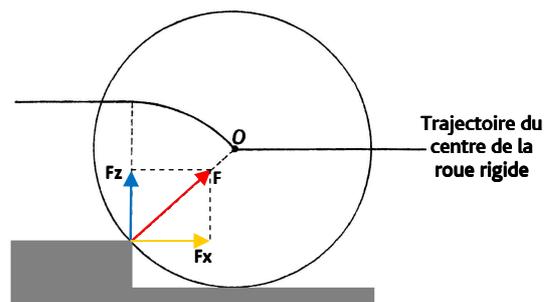


Fig. 4.23

Le pneumatique atténue le choc. Le point anguleux en O de la roue rigide est remplacé par une courbe AB.

Le « **Pouvoir Absorbant** » du pneumatique dépend de :

- La **pression de gonflage**. La part de l'air est prépondérante et le « **Pouvoir absorbant** » diminue lorsque la pression augmente.

- La **dimension** et plus particulièrement de la **Série**. Plus la hauteur de flanc sera faible par rapport à la largeur (cas des pneumatiques taille basse), plus faible sera le pouvoir absorbant. Cf. fig. 4.24

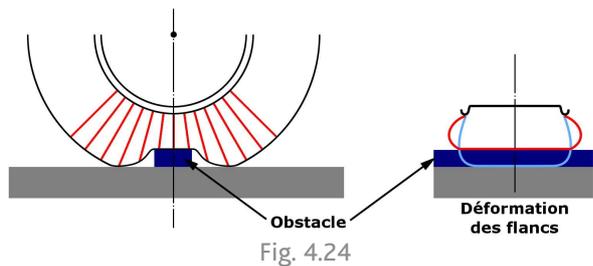


Fig. 4.24

Incidence de la hauteur de flanc.

- **L'écrasement initial**, c'est-à-dire de la charge verticale portée par le pneumatique.
- La **forme de l'obstacle**. Une forme aplatie, plus longue que haute, provoquera une impulsion plus faible qu'une section carrée.

Si l'obstacle dépasse certaines dimensions, en fonction du pneumatique considéré, il peut provoquer un pincement du flanc entre l'obstacle et la jante ou une destruction des nappes sur la bande de roulement. Cf. figs. 6.14, 6.17, 6.18, 6.19

En conséquence, la monte pneumatique doit être adaptée aux obstacles que le véhicule doit franchir. Un pneu Tourisme n'a pas pour vocation de franchir régulièrement des trottoirs.

l) La chasse. Il s'agit un angle qui caractérise une roue AV directrice d'un véhicule. Il se définit comme l'angle formé par la verticale et l'axe du pivot, dans le plan longitudinal xGz .

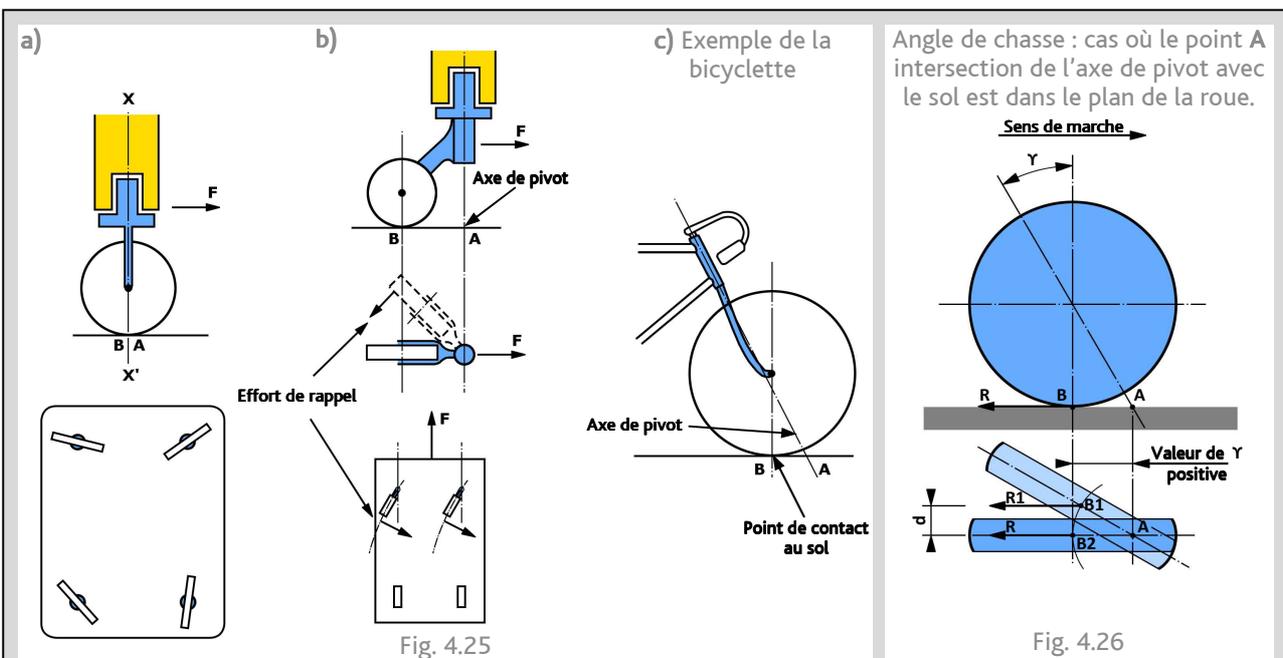


Fig. 4.25

Fig. 4.26

Pourquoi un angle de chasse ?

Le but est de stabiliser une roue qui possède la possibilité d'être braquée dans le plan horizontal. Si l'axe du pivot, axe autour duquel la roue peut être braquée, passe par le point de contact de la roue avec le sol, lors du déplacement du véhicule, la roue ne pourra avoir une position stable Cf. **a)**. Par contre si l'axe du pivot est déplacé de manière telle que son intersection avec le sol se trouve en avant du point de contact de la roue avec le sol, la roue sera soumise à un effort de rappel qui va l'obliger à se mettre dans la direction du mouvement du véhicule. La roue est ainsi « tirée » Cf. **b)**, l'intersection de l'axe du pivot avec le sol devenant un point de traction virtuel. Voir fig. 4.26

L'angle de chasse peut-être :

- **Positif**, lorsque le point de contact de l'axe du pivot au sol est en avant de la verticale passant par l'axe de rotation de la roue. L'auto stabilité ainsi créée sera d'autant plus grande que :
 - ⇒ l'angle sera grand. Mais une limite est à définir pour ne pas « alourdir » la réaction de la direction. L'angle de chasse usuel est de l'ordre de 2 à 3°.
 - ⇒ la vitesse du véhicule sera importante.
- **Nulle**, lorsque ce point de contact est confondu avec la verticale. Cela peut créer une instabilité.
- **Négatif**. Lorsque le point de contact est en AR. C'est un cas d'instabilité.

4-B.3 PARAMÈTRES DANS LE PLAN TRANSVERSAL yGz ET ROTATION AUTOUR DE Ox : LE ROULIS.

a) **Le centrage transversal.** Cf. fig. 4.27 Le Centre de Gravité est généralement considéré dans l'axe longitudinal de symétrie du véhicule mais ce n'est pas systématiquement le cas, notamment en fonction du chargement.

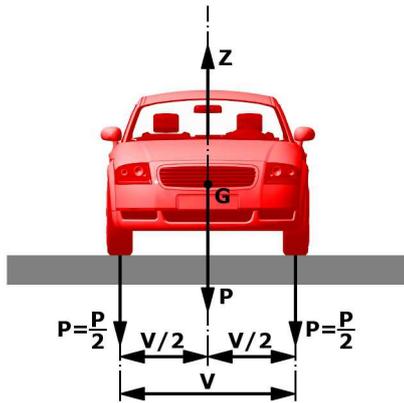


Fig. 4.27

Centrage transversal.

b) **L'élasticité transversale du pneumatique.** Si l'on applique, sur une roue équipée d'un pneumatique, chargée verticalement et au repos, un effort transversal F_y au niveau de son centre de rotation, le plan médian de la roue va se déplacer latéralement par rapport à la zone de contact au sol, pour se positionner dans un plan parallèle au plan de départ, et distant de dy .

Cela est dû à l'élasticité transversale du pneumatique. Cf. figs. 4.28 + 4.29 et courbes 4.30 + 4.31 Cette élasticité va induire une dissymétrie des efforts agissant sur les flancs : l'un sera comprimé, l'autre en extension. En transversal et au repos, le pneumatique se comporte comme un ressort de raideur :

$$R_y = \frac{F_y}{dy}$$

Cette raideur est fonction des nappes de ceinture, de l'épaisseur, de la largeur et du taux d'entaille de la bande de roulement.

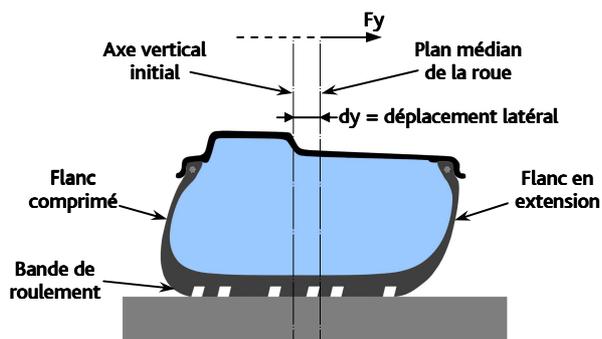


Fig. 4.28

Déformation d'un pneumatique sous effort transversal.

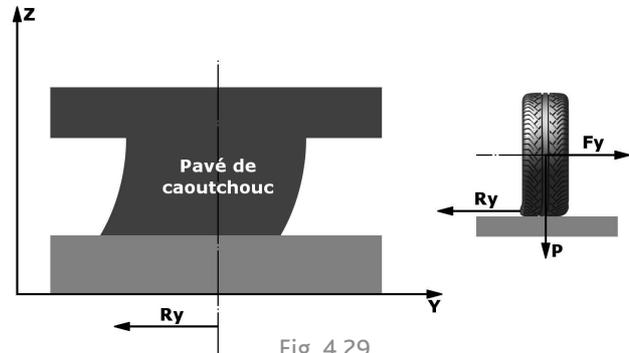


Fig. 4.29

Déformation du pavé de caoutchouc.

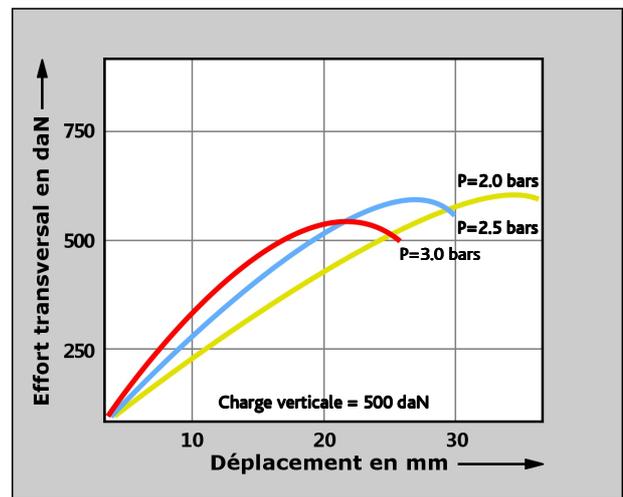


Fig. 4.30

Raideur transversale : influence de la pression de gonflage.

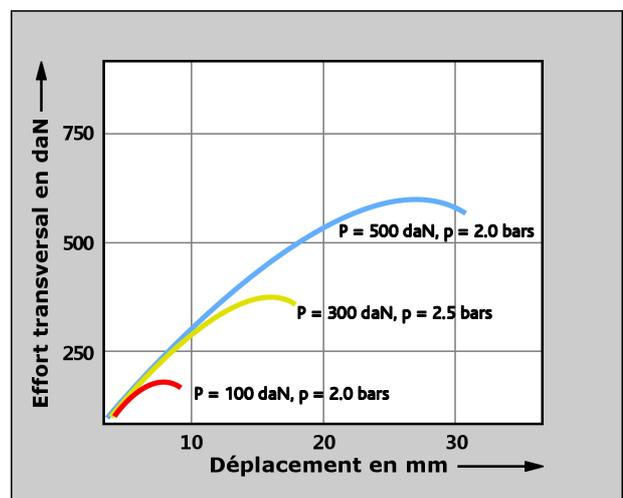


Fig. 4.31

Raideur transversale : influence de la charge verticale.

Si maintenant, nous faisons tourner la roue tout en appliquant notre effort transversal F_y , nous constatons que sa trajectoire ne suit pas la direction du plan médian de la roue. Ce phénomène, lié à l'élasticité transversale du pneumatique est appelé : La **dérive**. Cf. figs. 4.32, 4.33. Sous l'effet de la force latérale F_y , la roue suit une trajectoire réelle formant un angle δ avec la trajectoire théorique définie par le plan de roue.

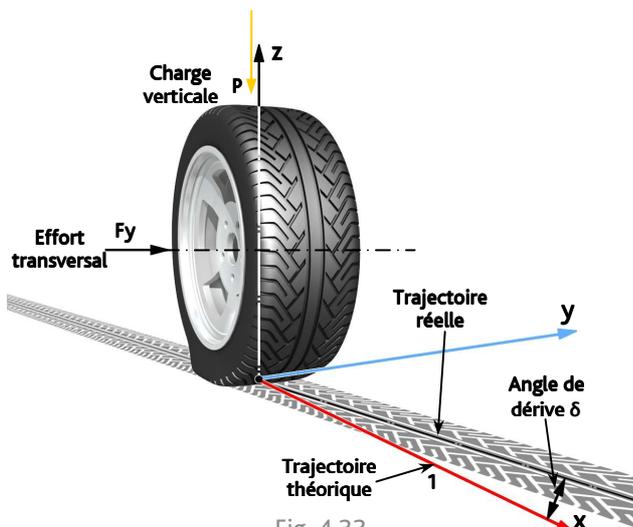


Fig. 4.32
La dérive.

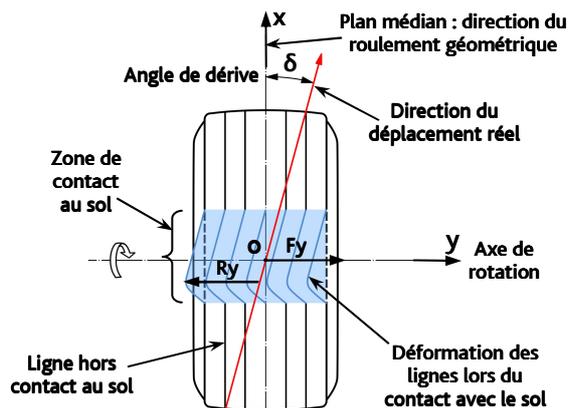


Fig. 4.33

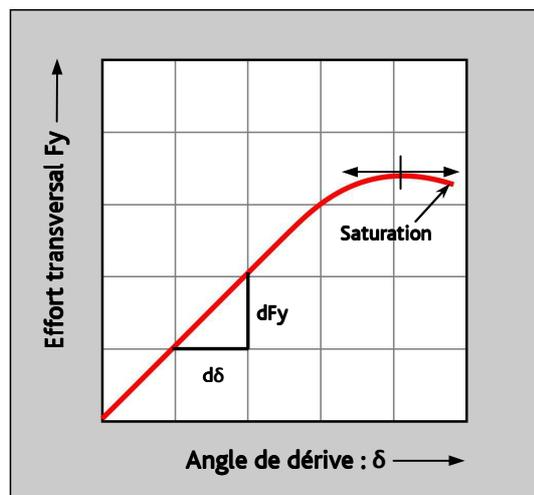


Fig. 4.34

La rigidité de dérive.

Les caractéristiques de la dérive sont les suivantes :

- Comme pour tout phénomène élastique, il est défini une rigidité : La **rigidité de dérive** Cf. fig. 4.34 définie par :

$$D = \frac{dF_y}{d\delta}$$

La courbe : $F_y = f(\delta)$ se caractérise par un départ assimilable à une droite pour ensuite s'incurver et présenter un maximum avant de décroître au fur et à mesure que δ continue d'augmenter. Le maximum correspond à une « **saturation** » du pneumatique. Cela a pour effet, que passé ce maximum, plus l'angle de braquage augmentera, plus faible sera l'effort de guidage.

La triangulation des nappes sommet formant la ceinture est un facteur de rigidité de dérive. Pour un angle de dérive donné, la réaction transversale de dérive sera d'autant plus grande que l'angle des nappes par rapport au plan médian du pneumatique sera plus aigu. Cf. figs. 2.4 et 2.11

- La dérive est fonction de la **pression de gonflage** et de la **charge** appliquée sur le pneumatique. Cf. fig. 4.35 Pour une même charge verticale, l'effort latéral F_y va augmenter, d'une part avec la dérive et d'autre part avec la pression de gonflage jusqu'à atteindre un maximum dépendant des caractéristiques du pneumatique.

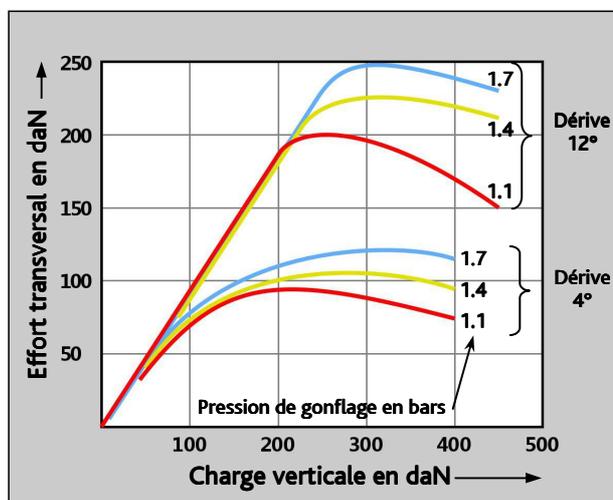


Fig. 4.35

Incidence de la pression de gonflage sur la dérive.

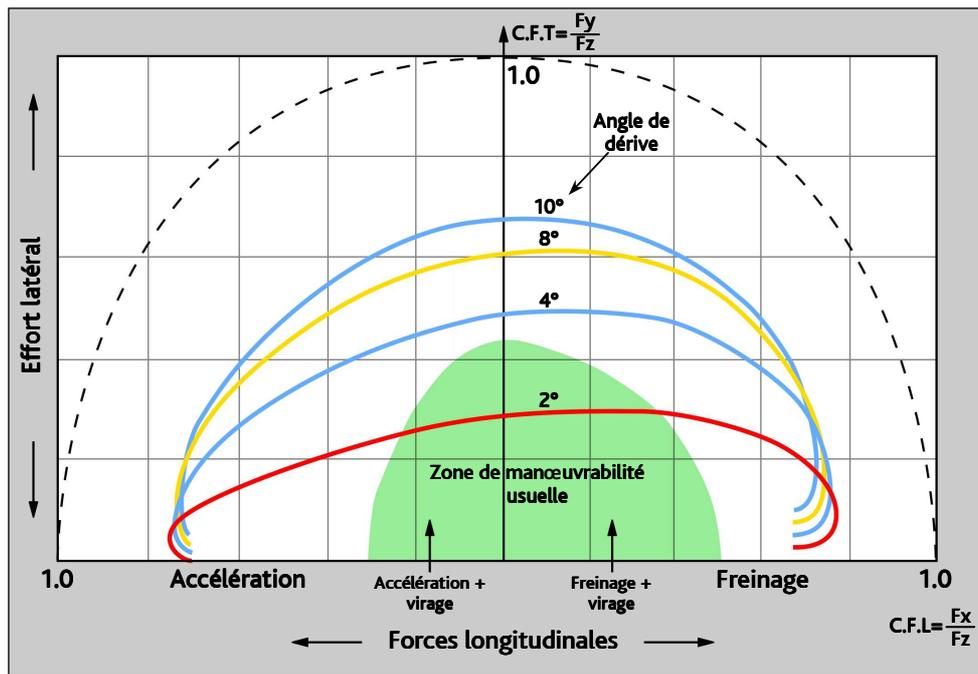


Fig. 4.36

Potentiel de manœuvrabilité.

- La dérive est fonction de la **largeur du pneumatique**. Elle va décroître lorsque la largeur du pneumatique va augmenter. En conséquence, le rapport Hauteur/Largeur, soit la Série est une donnée importante sur le potentiel de dérive. Un pneumatique de série 80 aura tendance à plus dériver qu'un autre de série 40, pour un diamètre de roulement identique.

- La dérive est fonction de l'**usure** de la bande de roulement. Plus l'usure sera importante, moins les pavés de caoutchouc auront de mobilité et plus faible sera la dérive.

- La dérive ne doit pas être confondue avec le **dérapiage**. Il s'agit un phénomène élastique qui modifie la trajectoire du pneumatique, mais nous restons dans le domaine adhérent, à l'intérieur du cercle d'adhérence. Le dérapage se produit lorsque la résultante des efforts appliqués dans la zone de contact dépasse la valeur d'adhérence donnée par les caractéristiques du sol.

- Pour les petits angles, la **rigidité** de dérive augmente par le montage d'une jante plus large. Mais cette « loi » a une limite correspondant au changement de pente de l'inclinaison des flancs. Cf. fig. 4.37

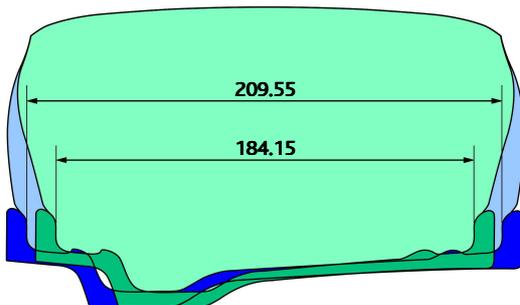


Fig. 4.37

Influence de la largeur de jante.

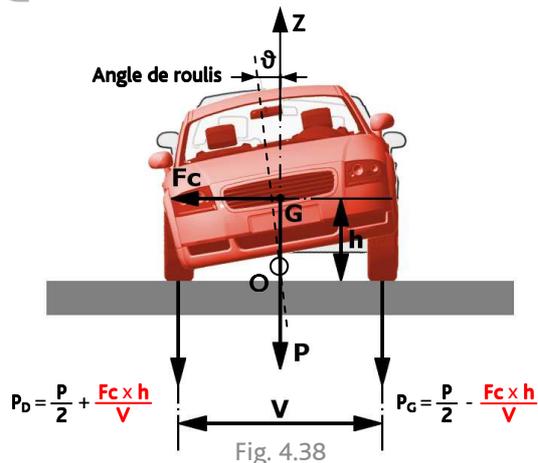
- L'application d'un **effort longitudinal F_x** : accélération ou freinage s'ajoutant à un effort transversal F_y , modifie la rigidité de dérive. Pour un angle de dérive donné, soit à isodérive, la courbe $F_y = f(F_x)$, a une forme ressemblant à une ellipse Cf. fig. 4.36 et représente le couplage entre le longitudinal et le transversal.

Si nous ramenons pour chaque point, les efforts longitudinaux et transversaux à la charge verticale correspondante, nous obtenons $C.F.T = f(C.F.L)$, soit les courbes du potentiel de manœuvrabilité ou d'équiadhérence dans les conditions définies.

L'expérience montre qu'un conducteur, lors de l'utilisation habituelle de son véhicule est loin d'utiliser son potentiel de manœuvrabilité.

- L'effet de la dérive dépend de la **position** exacte et à chaque instant de la roue par rapport au sol. Toute évolution de son plan médian en raison de braquages induits, de variations de carrossage va modifier l'état élastique du pneumatique et influencer sur les efforts transmis. Le parallélisme initial donné à un essieu imposera une dérive initiale.

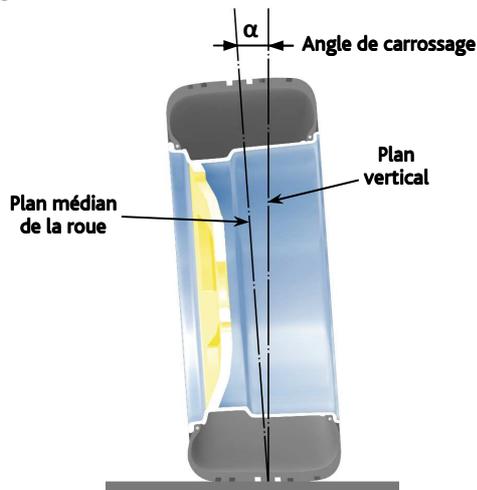
c) **L'effet de la force centrifuge : Le Roulis**
Cf. fig. 4.38 Dans un virage, le braquage des roues crée un effort centrifuge appliqué au centre de gravité du véhicule. Sous l'effet de cet effort, le véhicule va s'incliner vers l'extérieur du virage par application du principe de la stabilité tabulaire. Cf. 4-A.5. En fait, la géométrie des éléments de guidage des roues dans le plan transversal, définit un centre instantané **O** de rotation du véhicule dans ce plan. L'inclinaison du véhicule est une rotation autour de ce point **O**, appelé : **Centre de Roulis**, terme emprunté au vocabulaire appliqué aux bateaux. L'inclinaison est un phénomène appelé : le **Roulis**.



Transfert de charge en roulis.

L'effort centrifuge appliqué en G, provoque une rotation autour d'un axe de roulis défini par la géométrie des essieux. L'axe de roulis est une droite joignant les centres de roulis des essieux AV et AR. Cette rotation induit un transfert de charge qui va accroître la charge verticale des roues côté extérieur du virage.

d) **Le Carrossage.** Il s'agit un angle formé par la verticale et le plan médian de la roue, dans le plan zGy. Cf. figs. 4.39, 4.40, 4.41

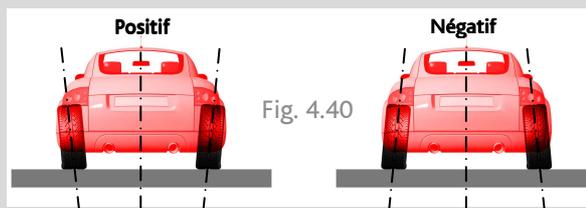


Définition du carrossage.

Incidence du carrossage sur le fonctionnement du pneumatique.

Le plan médian de la roue est perpendiculaire à la fusée, axe de rotation. En conséquence, la fusée aura un angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de la même valeur que le carrossage.

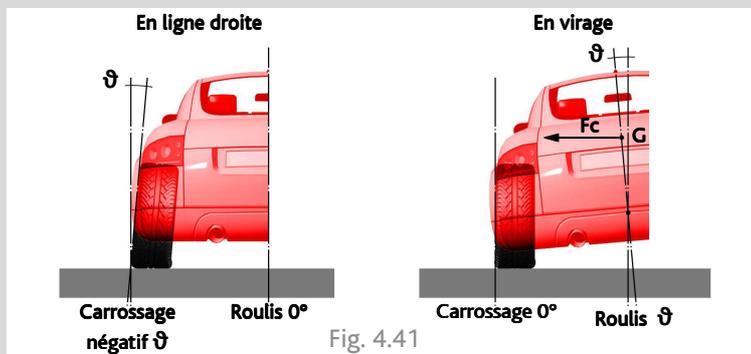
Selon l'inclinaison du plan médian de la roue par rapport à la verticale, le carrossage sera : Cf. fig. 4.40.



- **Négatif** si le sommet de la roue est incliné vers le centre du véhicule.
- **Positif** dans le cas contraire, le sommet sera incliné vers l'extérieur.
- **Nul** si la roue est parfaitement verticale.

Influence réciproque du carrossage et du roulis.

Le compromis entre confort et tenue de route d'un véhicule impose un axe de roulis ne passant pas par le centre de gravité G. Lors d'un virage, la mise en roulis résultante va modifier la position verticale du plan de la roue et introduire une variation de carrossage. Pour utiliser ce phénomène afin de faire travailler le pneumatique dans les meilleures conditions possibles en virage, il peut être installé par construction un carrossage négatif pour contrer la prise de roulis du châssis.



Selon les éléments de guidage de la roue dans le plan transversal et la raideur des éléments de suspension, sous l'effet d'un effort latéral appliqué en G, le véhicule va s'incliner vers l'extérieur du virage (par application de principe de la stabilité tabulaire). Le fait de mettre un carrossage négatif initial réduit l'effet de l'inclinaison du châssis, ce qui permet à la roue de garder une position aussi verticale que possible. Le pneumatique garde ainsi une plus grande surface de contact au sol en virage. Cf. fig. 4.41



Suite

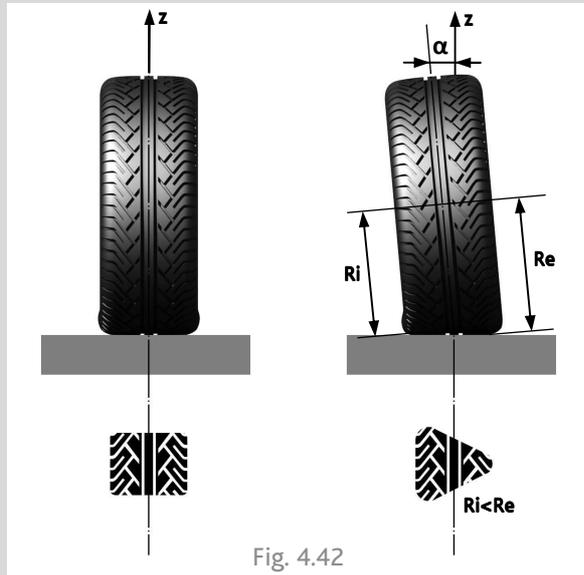


Fig. 4.42

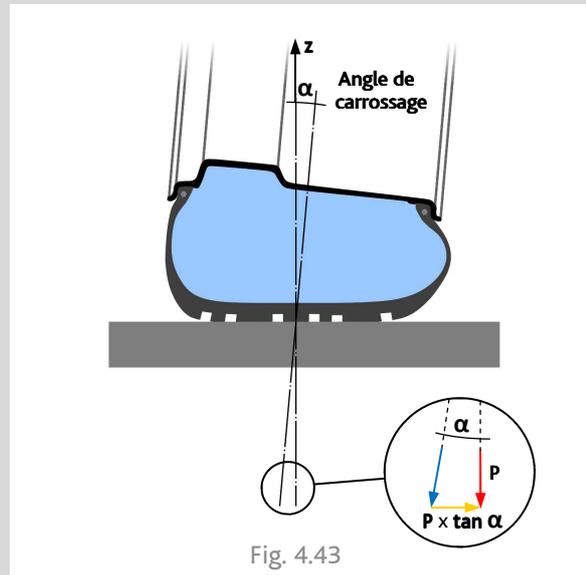


Fig. 4.43

- Le carrossage modifie la forme de la zone de contact du pneumatique au sol. D'où en cas de dérive une déformation particulière de la zone de contact du pneumatique au sol et une modification du moment d'autoalignement. Cf. fig. 4.42

- Les rayons de roulement intérieur et extérieur sont différents. Le flanc situé côté de l'inclinaison fléchit plus, avec pour conséquence : fatigue et échauffement supplémentaire. Cf. fig. 4.42

- La **poussée de carrossage**. Cf. fig. 4.43 L'inclinaison de la roue crée une dissymétrie de répartition des efforts dans la zone de contact du pneumatique au sol et dans les flancs. En l'absence de dérive, cette dissymétrie va générer une poussée transversale, orientée vers l'intérieur du véhicule dans le cas d'un carrossage négatif. Cette poussée de carrossage de valeur : $F_{yc} = P \times \tan \alpha$, va se retrancher de la dérive lors d'un virage. Cela signifie que pour tout virage, et sur une roue présentant du carrossage, il se créera une conjugaison dérive-carrossage.

Ex : Soit un poids sur la roue de 300daN, un angle de carrossage de 6°, soit environ 1/10° de radian, $F_{yc} = 300 \times 1/10 = 30\text{daN}$.

L'expérience montre qu'un carrossage initial légèrement négatif est favorable au comportement global du véhicule.

e) Le déport au sol est la distance entre le plan médian de la roue et l'intersection de l'axe de pivot avec le sol. Cf. fig. 4.44. **d**= déport au sol.

Pour des questions d'architecture, notamment dans le cas de l'implantation des freins dans la roue, de déport au sol est quasi systématique sur une roue directrice.

- la distance **d** est un porte-à-faux.

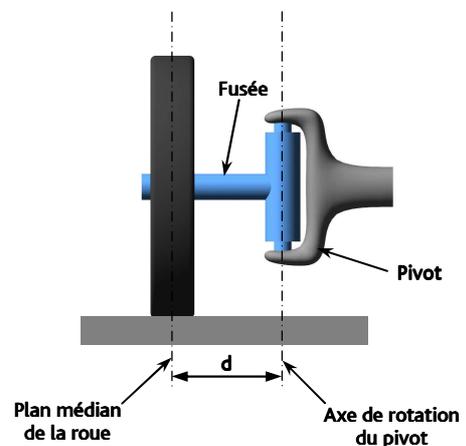


Fig. 4.44

Définition du déport au sol.

L'incidence du déport au sol et de l'inclinaison de l'axe du pivot.

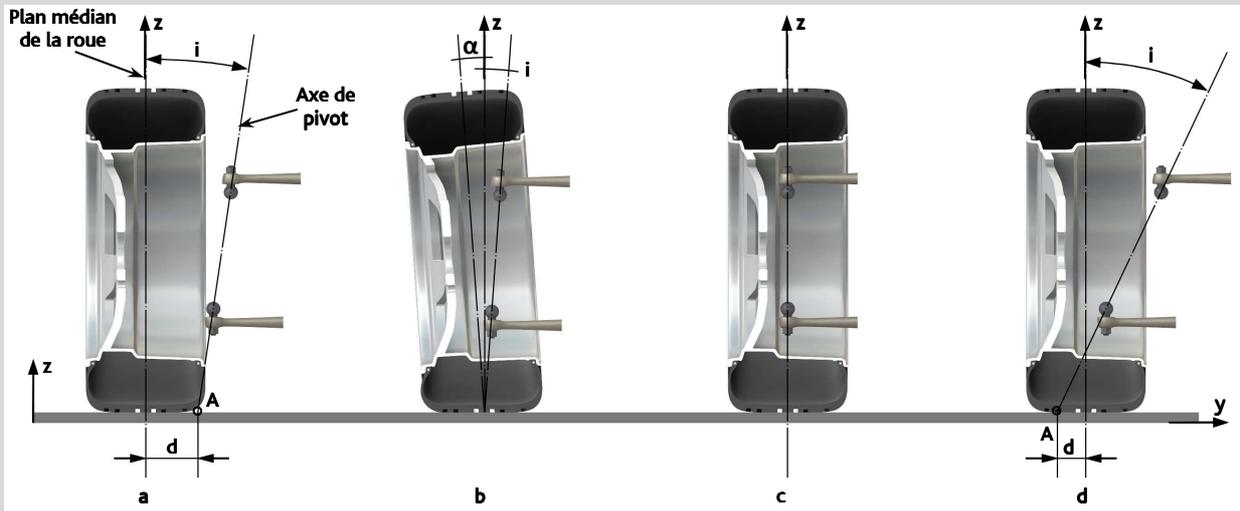


Fig. 4.45

-a : architecture habituelle, le déport est positif : le point d'intersection A de l'axe du pivot avec le sol est à l'intérieur des voies (distance séparant les plans médians de deux roues d'un même essieu). L'axe du pivot est incliné et forme avec le plan de la roue un angle i appelé : angle d'inclinaison de l'axe du pivot. Voir également la fig. 4.47a

-b : cas d'un déport nul, par combinaison de l'angle de carrossage et d'inclinaison de l'axe de pivot.

-c : cas particulier d'un déport nul. L'axe du pivot est contenu dans le plan médian de la roue (nous retrouvons cette particularité sur le train avant de la Citroën DS19).

-d : déport négatif, le point A est à l'extérieur de la voie.

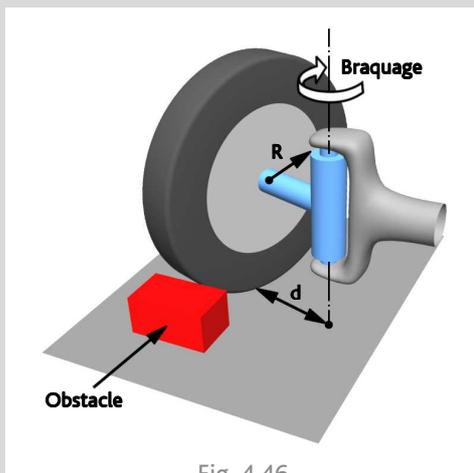


Fig. 4.46

Déport au sol et passage d'obstacle.

Lors du passage de la roue sur un obstacle, le porte-à-faux que constitue le déport au sol produit un moment : $R \times d$. Ce moment va créer un braquage autour de l'axe du pivot et introduire une réaction dans le volant via les organes de direction.



Suite

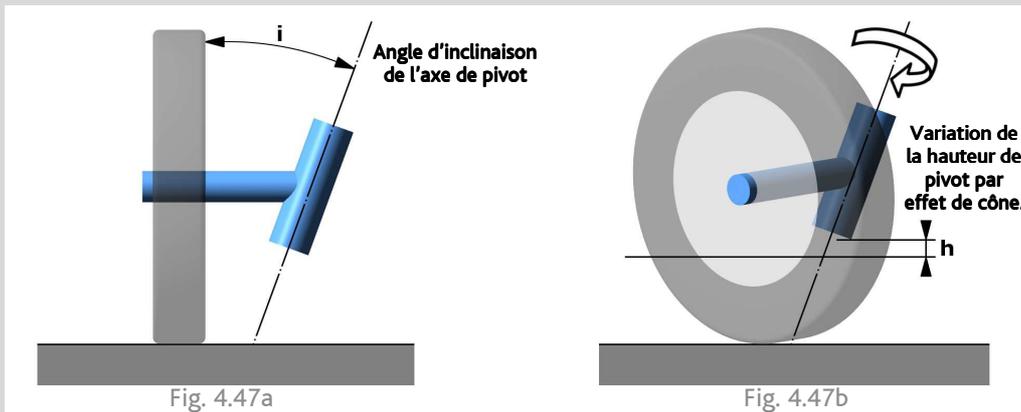


Fig. 4.47a Position du pivot en ligne droite.

Fig. 4.47b Braquage du pivot au sol.

Incidence de l'inclinaison de l'axe du pivot : l'effet de cône.

L'angle que forme l'axe du pivot avec le plan de la roue introduit un effet de cône lors du braquage. Lors de ce braquage, la roue va tourner autour de l'axe de pivot, mais comme le sol est un plan fixe par rapport au véhicule, celui-ci va subir un mouvement vertical qui aura tendance à le lever. Il s'agit d'un effort supplémentaire demandé à la direction lors du braquage, ce qui peut ajouter une sensation de « lourdeur » dans la direction. Lors du retour de la roue en ligne droite, cet effet de cône va s'inverser et le poids du véhicule va produire un rappel s'ajoutant à celui de la chasse. Cet effet de cône est directement proportionnel à l'angle d'inclinaison de l'axe du pivot, du déport au sol et du poids supporté par la roue.

4-B.4 PARAMÈTRES DANS LE PLAN HORIZONTAL xGy ET ROTATION AUTOUR DE Gz : LE CHANGEMENT DE DIRECTION.

a) le changement de direction est un enchaînement d'opérations initialisé par le conducteur lorsqu'il tourne le volant. Via le système de direction, les roues vont prendre un angle de braquage. Sous l'effet de cet angle, le déroulement de la roue va être modifié et induire simultanément une demande d'adhérence transversale et générer un effort centrifuge. Cf. fig. 4.56 Sous l'effet combiné de ces deux forces, le véhicule va changer de direction et sera soumis à une accélération latérale.

Cette manœuvre ne sera possible que si l'adhérence transversale est suffisante pour répondre à la demande.

Sous l'effet de cette demande d'adhérence transversale, notre pneumatique va être soumis au phénomène de dérive. C'est le fait d'avoir donné un angle de braquage au pneumatique qui va induire un effort latéral F_y et provoquer une dérive.

Cette manœuvre, faisant intervenir, depuis le volant jusqu'au contact du pneumatique sur le sol, plusieurs mécanismes de masse et d'élasticité non nulles, bien que rapide, ne sera pas immédiate. La réaction des élasticités de chaque organe à la sollicitation du braquage va créer un temps de réponse, temps nécessaire pour déformer toutes les pièces élastiques, y compris le pneumatique jusqu'à ce que soit atteinte une situation stable. Cf. figs. 4.48, 4.49 Ce temps de réponse est un facteur de **l'agrément de conduite** d'un véhicule, dont le pneumatique est un paramètre important.

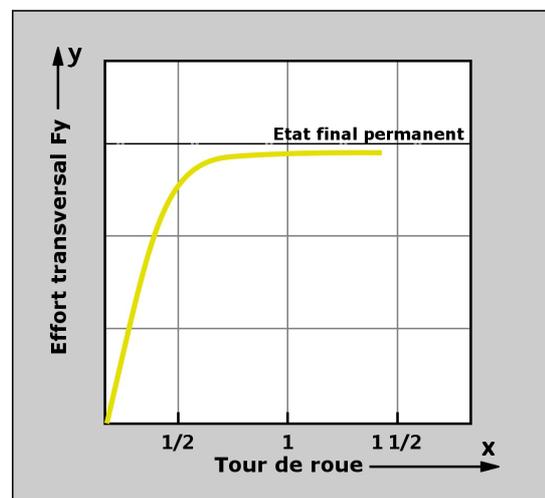


Fig. 4.48

Délai de réponse du pneumatique au braquage.

Quelques éléments de réflexion sur **l'agrément de conduite** : Dans le mouvement du véhicule, l'initiateur est le conducteur, il est donc fondamental qu'il y ait une totale cohérence entre la manœuvre voulue par celui-ci et la réponse du véhicule, en terme de délai et en terme de résultat. Notre conducteur dispose de ses propres capteurs (ses sens) pour mesurer son action et le résultat. L'action sera le braquage du volant, visualisé par l'angle du volant, par la position des bras, et

incrémentée par l'effort musculaire fourni. Le résultat sera la perception du changement de direction par :

- Une évolution de son **champ visuel**,
- L'intervention de l'**oreille interne** comme capteur de déplacement,
- Les efforts plus ou moins importants que son **corps** va ressentir durant la manœuvre, comme l'accélération latérale et l'angle de roulis que va prendre le véhicule. Cf. fig. 4.49

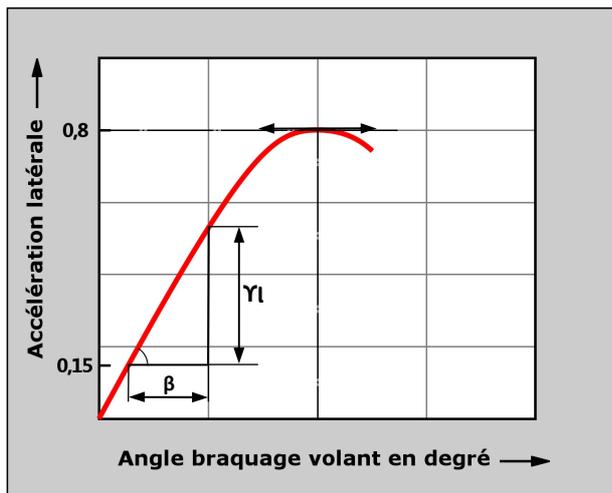


Fig. 4.49

Réponse au volant $\gamma_l = f(\beta^\circ)$

- La valeur maxi de γ_l correspond à la capacité maxi du pneumatique sur le véhicule considéré.

- $\frac{\gamma_l}{\beta}$ = sensibilité de la réponse volant.

- Le retour que va lui donner le **système de direction** sur le déroulement de sa manœuvre.

Instinctivement, notre conducteur va comparer la situation du moment à son expérience, à son vécu, qui lui feront corriger ou non l'ampleur de la manœuvre. La compétence, la dextérité, le sens du risque, de notre conducteur restent des facteurs fondamentaux du bon résultat de la manœuvre, donc de sa sécurité.

b) le moment d'auto-alignement Cf. figs. 4.33, 4.50
La surface de contact avec le sol peut être décomposée en surfaces élémentaires. Lors de la sollicitation transversale, les réactions engendrées au niveau du sol, provoquent des déformations, appliquées à chacune de ces surfaces élémentaires. L'analyse montre que ces déformations vont en augmentant dans le sens du déroulement de la roue, de l'avant vers l'arrière de la zone de contact au sol. La résultante R_y de ces réactions, va de ce fait se trouver en arrière de l'axe de rotation de la roue, d'une distance d . Ce décalage induit un moment : $M_a = R_y \times d$ appelé : **Moment d'auto-alignement**. Ce moment a tendance à s'opposer au braquage de la roue et s'ajoute à l'effet de l'angle de chasse. Ce moment est quelque fois appelé : « **la chasse pneumatique** ».

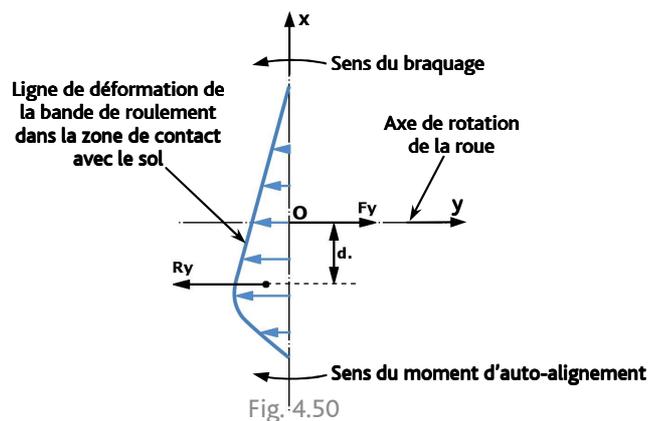


Fig. 4.50

Moment d'auto-alignement.

En fonction de l'effort latéral appliqué, ce moment passe par un maximum. Cf. fig. 4.51. Dans la zone du maximum, F_y augmente alors que M_a varie très peu. Comme M_a est transmis au volant via la direction, le conducteur perd du « ressenti » sur le comportement du véhicule.

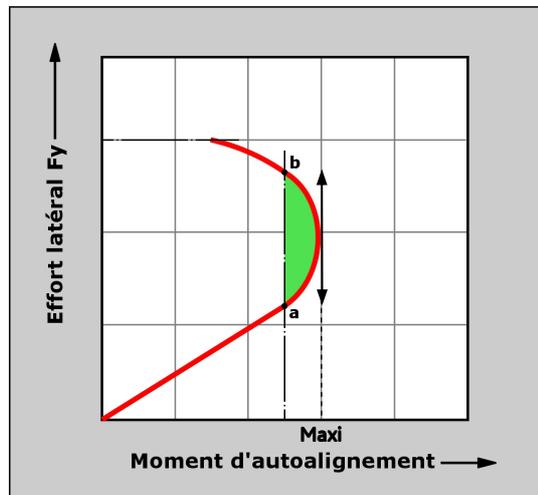


Fig. 4.51

Effort latéral et moment d'auto-alignement.

Dans la zone **a-b**, l'effort latéral augmente alors que le moment d'auto-alignement varie peu.

La fig. 4.52 superpose effort latéral et moment d'auto-alignement lors de situations de freinage ou d'accélération et pour deux cas de dérive différents : 4° et 8°. Les courbes obtenues montrent les maxi atteints pour chaque cas d'effort longitudinal.

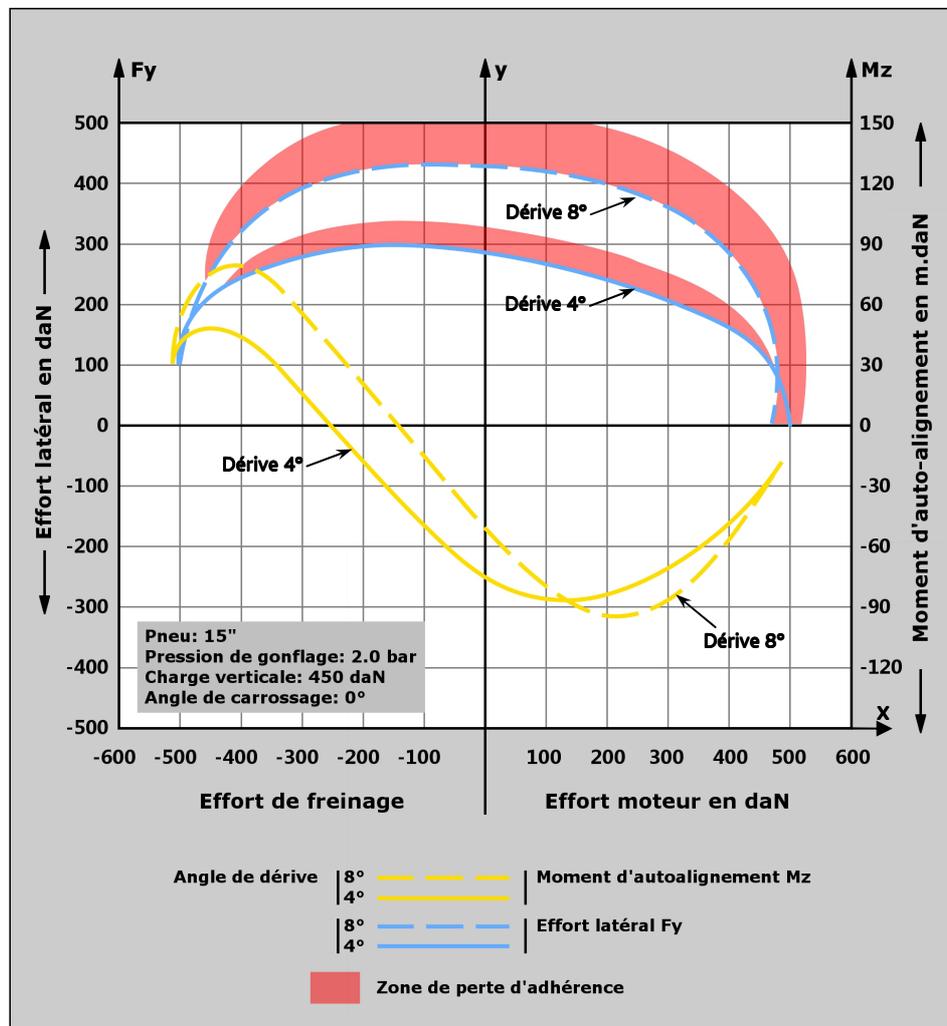


Fig. 4.52

Effort latéral et moment d'auto-alignement en fonction de l'effort longitudinal à isodérive.

Les paramètres clés du moment d'autoalignement :

- La **structure** du pneumatique et l'élasticité des matériaux utilisés.
- Il va augmenter au fur et à mesure de l'**usure**, car la carcasse s'assouplit sous les flexions répétées et la surface de la zone de contact avec le sol s'accroît.
- Il va diminuer avec l'accroissement de la **pression de gonflage**, à F_y constant.
- Il est fonction de la **charge verticale**, si elle augmente, le moment augmente, pour atteindre un maxi et décroître ensuite.
- Il se compose avec la **chasse** mécanique et le **déport** au sol de l'essieu.

c) glissement et adhérence. Si la sollicitation transversale augmente, notamment avec l'accroissement de l'angle de braquage, la limite d'adhérence sera d'abord atteinte à l'arrière de la zone de contact, puis s'étendra progressivement. Avant d'atteindre cette limite, il se produira un phénomène de glissement dans laquelle subsistent des réactions transversales, mais de valeur unitaire réduite. Cf. fig. 4.53 Cela explique la modification de la forme de la surface de contact du pneumatique sur le sol.

Ce glissement se produit dans le plan horizontal et ne doit pas être confondu avec le glissement relatif lors de la rotation du pneumatique au sol.

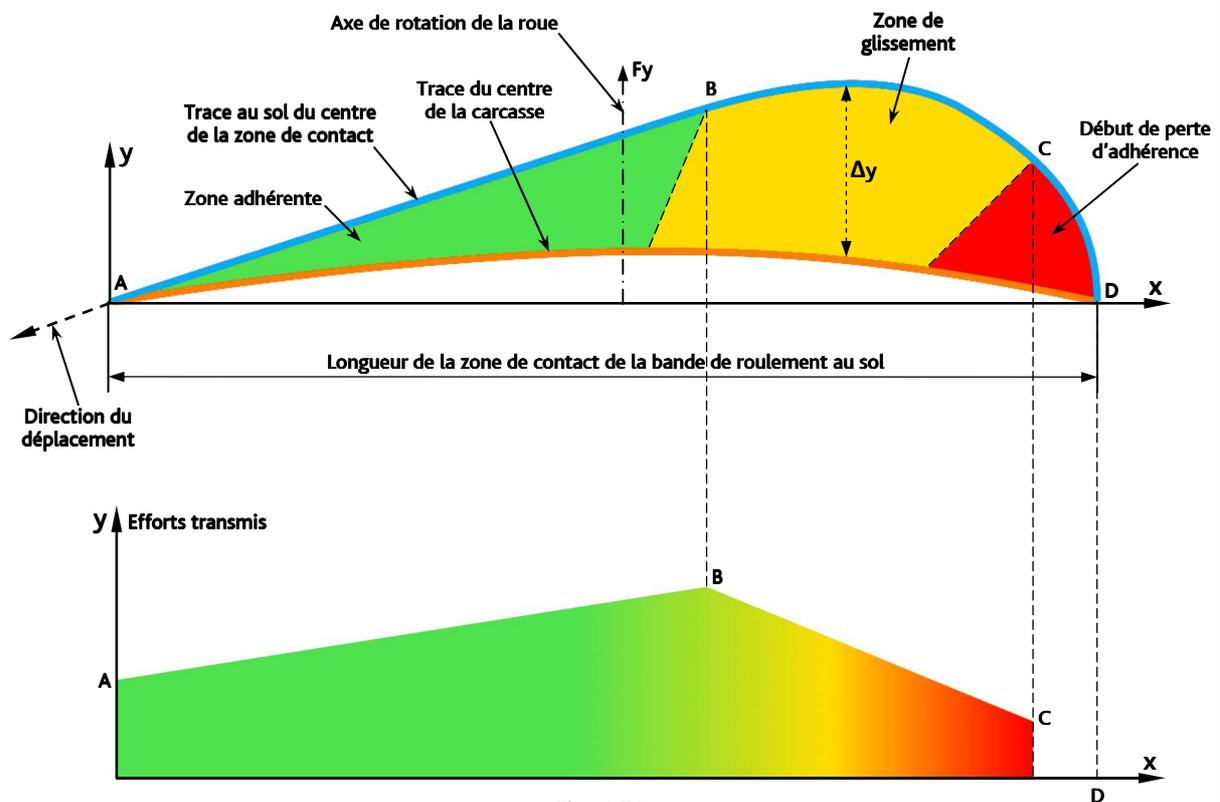
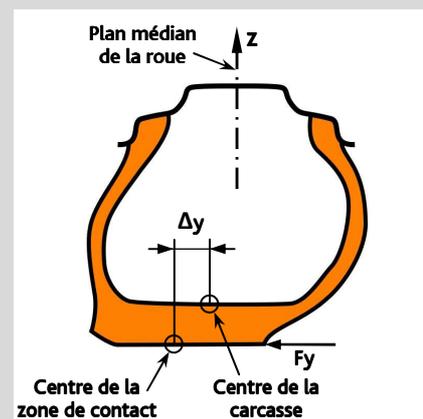


Fig. 4.53

Glissement et adhérence.

- L'écart Δy entre la trace au sol du centre de la zone de contact et la trace du centre de la carcasse correspond à la déformation de la bande de roulement et des nappes carcasse.
- Dans la zone adhérente, il n'y a pas de mouvement relatif entre la bande de roulement et le sol.
- Dans la zone de glissement, il y a des mouvements relatifs, une sorte de « ripage » entre la bande de roulement et le sol. Le niveau des efforts transmis diminue progressivement au fur et à mesure vers l'arrière de la zone de contact.
- Dans la zone de perte d'adhérence, il y a « décrochage », aucun effort n'est transmis.



d) le virage, centre instantané de rotation, épure de **Jeantaud**. A l'époque de la traction animale, caractérisée par des vitesses peu élevées, les charrettes disposaient d'un essieu AV directeur selon le principe de la « **cheville ouvrière** ». Cf. fig. 4.54 Ce système définit un centre instantané de rotation **I** de la charrette situé à l'intersection des perpendiculaires aux plans des roues.

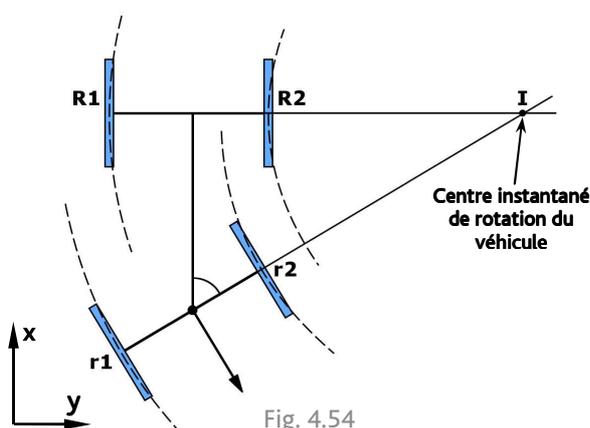


Fig. 4.54

Direction à cheville ouvrière.

Pour des véhicules plus rapides, ce système introduit une instabilité, mais surtout une lourdeur de manœuvre. D'où le système introduit par **Jeantaud** en 1878, dans lequel chaque roue dispose de sa « cheville ouvrière » appelée **axe de pivot**. Il permet de coupler les deux roues par une liaison composée de leviers et biellettes dont le déplacement dans l'espace va définir « l'épure de **Jeantaud** ». Cf. fig. 4.55

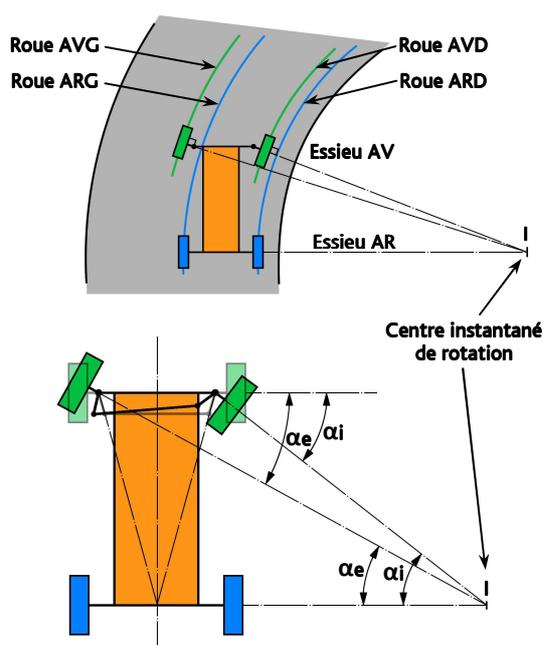


Fig. 4.55

L'épure de JEANTAUD.

Pour obtenir le centre instantané de rotation du véhicule dans le virage, la combinaison des leviers doit permettre à la roue intérieure au virage d'afficher un angle supérieur à la roue extérieure. Pour obtenir ce résultat, **Jeantaud** a démontré que le prolongement des axes des leviers de direction sur le pivot devait se couper au milieu de l'essieu AR, sur l'axe de symétrie du véhicule. Dans la réalité, et pour tenir compte de la dérive appliquée sur chaque pneumatique AV, rares sont les cas de cette situation « idéale », et un véhicule peut être conçu avec ce point d'intersection en AV de l'essieu AR, nous sommes alors en « sous-Jeantaud », ou en AR de l'essieu AR, nous sommes alors en « sur Jeantaud ». Ceci se détermine par le relevé des angles de braquage de chaque roue. Ces angles sont retranscrits sur un abaque appelé : **courbe d'erreur**, lequel permet de vérifier si la roue intérieure braque ou non selon le braquage théorique.

Cette épure de **Jeantaud** est appelée épure d'**Ackermann** dans la littérature anglo-saxonne.

e) le virage, effort centrifuge. Dans le plan horizontal, l'effort centrifuge est appliqué au centre de gravité **G**. La ligne d'application de cette force **Fc** passe par **I** centre instantané de rotation du véhicule dans le virage. Vu la position de **I**, il en résulte une décomposition de cet effort en une composante transversale **Fy** et une composante longitudinale **Fl**. Cette dernière composante **Fl** sera reprise par la roue AV directrice. Cf. fig. 4.56

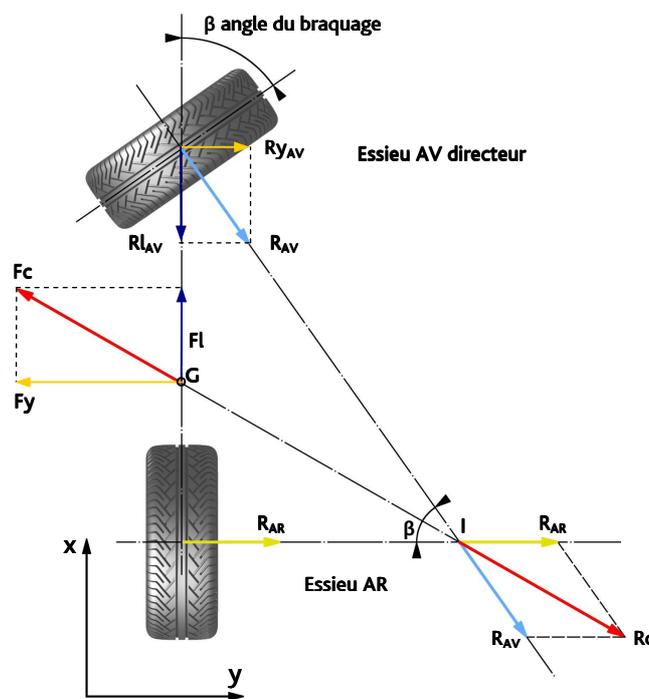


Fig. 4.56

Application de l'effort centrifuge. Cas d'une voiture neutre sans dérive.

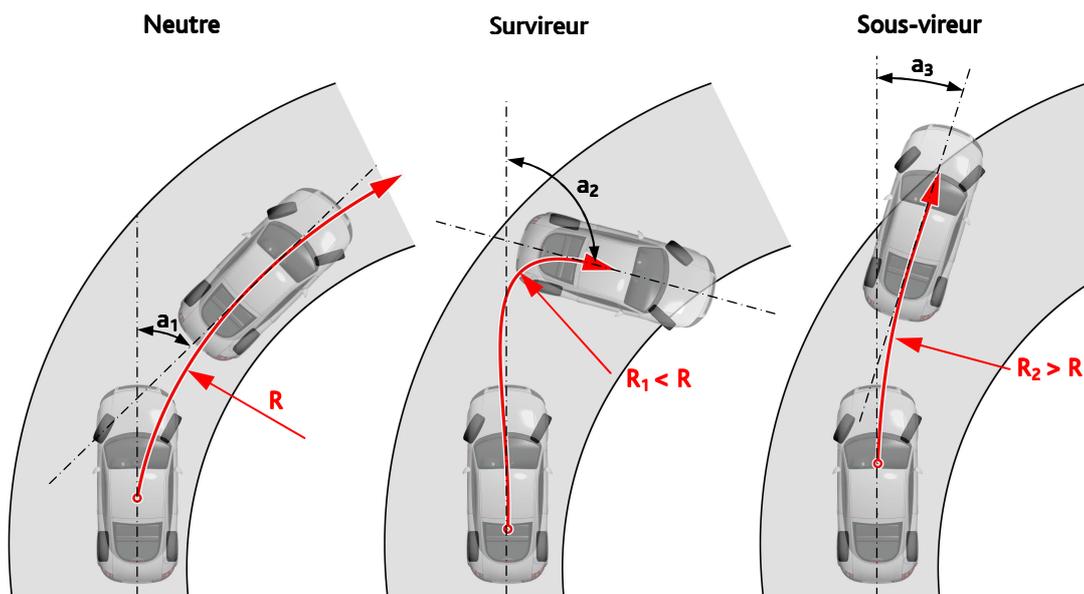


Fig. 4.57

Effet de la dérive des essieux sur le comportement du véhicule.

f) **L'incidence de la dérive.** Le comportement d'un véhicule en virage, vu le nombre de paramètres intervenants est complexe, du fait de l'inégalité de la répartition des charges sur chaque roue Cf. fig. 3.25. C'est le résultat d'une part du centrage initial des masses, et d'autre part des transferts, lors des phases : - de freinage, d'accélération, - de virage. La conséquence est que chaque pneumatique va prendre un angle de dérive différent. Le résultat de cette différence se répercutera sur chaque essieu dont la dérive globale sera différente entre l'AV et l'AR, ce qui influera sur le comportement du véhicule, Cf. fig. 4.57 et amènera à définir :

- Un véhicule **Neutre** aura la même dérive sur l'essieu AV et l'essieu AR. Le véhicule va suivre la trajectoire affichée par le braquage des roues et voulue par le conducteur.

- Un véhicule **Sous-vireur** aura une dérive de l'essieu AV $>$ à la dérive de l'essieu AR. Le véhicule aura tendance à élargir le virage, c'est-à-dire prendre un virage de rayon plus grand que celui voulu par le conducteur. Par souci de sécurité, les véhicules de grande série sont conçus sous vireur.

- Un véhicule **Survireur** aura une dérive le l'essieu AV $<$ à la dérive de l'essieu AR. Ce sera le comportement inverse du précédent. Un tel véhicule demande une attention particulière dans sa conduite et s'adresse à des conducteurs déjà expérimentés.

Dans ces deux derniers cas, cet effet de dérive sur chaque essieu modifie le braquage affiché par le conducteur. La dérive agit sur l'angle de lacet comme le montre la fig. 4.58

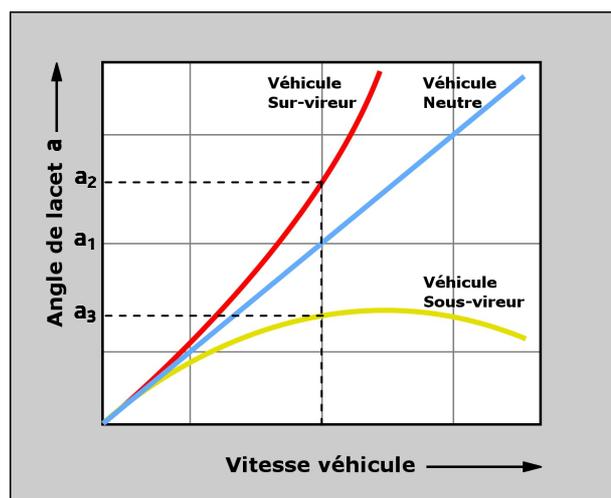


Fig. 4.58

Survirage - Sous-virage

La dérive globale de l'essieu explique la nécessité de monter en priorité sur chaque essieu des pneumatiques identiques.

Comme cette dérive globale dépend des transferts de charge, cela impose que le pneumatique choisi soit compatible avec le véhicule : centrage des masses, géométrie des essieux, raideur et taux d'amortissement de la suspension.

g) **le parallélisme.** Le parallélisme se définit, sur les roues d'un essieu, comme la différence d'écartement entre l'AR et l'AV, la mesure étant prise dans un plan horizontal passant par le centre de rotation de la roue. Cf. fig. 4.59

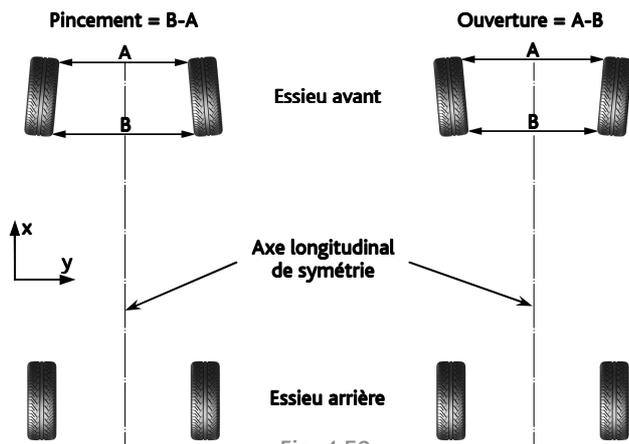


Fig. 4.59

Définition du parallélisme.

L'utilité du parallélisme :

Lorsqu'une roue est en rotation, pour éviter toute déformation parasite, il est nécessaire qu'elle roule parfaitement suivant son plan. Mais cette roue est déjà affectée par la définition de l'essieu de caractéristiques géométriques perturbant son déroulement :

- Le carrossage va créer un effet de cône,
- Le déport au sol va créer une divergence lors de l'accélération ou du freinage selon que le véhicule sera à propulsion ou traction. Cf. fig. 4.60

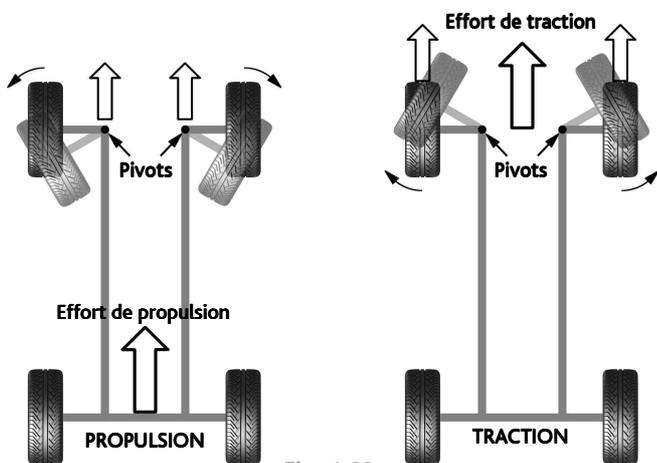


Fig. 4.60

Le parallélisme initial.

- Sur une propulsion, les roues AV sont poussées, donc auront tendance à prendre de l'ouverture.
- Sur une traction, les roues AV sont tirées, donc auront tendance à prendre du pincement.

- Les éléments de guidage ainsi que les leviers de direction ont toujours un léger jeu et une élasticité.

Aussi pour compenser, et limiter les ripages parasites du pneumatique sur le sol, les essieux sont conçus avec

une valeur initiale de parallélisme. Les valeurs de ce parallélisme initial sont déterminées lors des essais de mise au point et participent à la qualité du comportement du véhicule.

Selon la flexibilité de la suspension, autrement dit de l'ampleur des débattements de la roue par rapport au véhicule, et la géométrie des éléments de guidage, lors des mouvements verticaux de la roue, le parallélisme va varier soit dans le sens de l'ouverture, soit dans le sens du pincement. Ce phénomène, systématique sur un véhicule est un **braquage induit**, ou braquage parasite. Lors d'un mouvement de pompage, les deux roues de l'essieu vont varier dans le même sens, ouverture ou pincement, par contre lors d'une mise en roulis en virage, une roue monte, pendant que l'autre descend. Chacune des roues va varier en sens inverse de l'autre, par ex ; l'une prendra de l'ouverture pendant que l'autre prendra du pincement.

Le parallélisme, braquage d'une roue par rapport à son plan de roulement, introduit une dérive initiale du pneumatique. Lors d'un braquage géométrique et selon le choix, ouverture ou pincement, ce parallélisme ne sera pas neutre dans le délai de réaction du véhicule. Une roue AVG en ouverture, donc avec une dérive initiale dirigée vers l'extérieur, soumise à un braquage géométrique vers la droite va devoir successivement annuler la dérive initiale pour passer à une dérive orientée vers l'intérieur du véhicule, orientation nécessaire pour prendre le virage souhaité. Ce passage d'une dérive extérieure même faible à une dérive intérieure plus importante va demander un délai de réaction du pneumatique, délai qui se ressentira par une certaine paresse à changer de direction.

h) l'axe de marche. Cf. fig. 4.61

Il s'agit d'une conséquence du parallélisme d'un essieu : les plans des roues vont former un angle de la valeur de l'angle de parallélisme, matérialisé par l'intersection des plans de roue avec le sol. Cet angle possède une bissectrice qui définit l'axe de marche de l'essieu correspondant. Comme une voiture dispose de roues directrices sur l'essieu AV, les plans des roues AR seront fixes et définissent l'axe de marche du véhicule. C'est selon cet axe que se dirige le véhicule, volant libre.

Mais que devient l'axe de marche de l'essieu AV ? Grâce à l'angle de chasse, les roues AV prendront automatiquement une position moyenne qui amènera l'axe de marche de l'essieu AV à se positionner parallèlement à l'axe de marche du véhicule. Plus le décalage entre ces deux parallèles sera grand, et plus le véhicule roulera en « crabe ». Le véhicule parfait est celui qui dispose de deux axes confondus. Cela explique pourquoi, sur les machines de réglage des essieux, le train AV est toujours réglé en référence au train AR.

4 — [LE VÉHICULE ET LE PNEUMATIQUE]

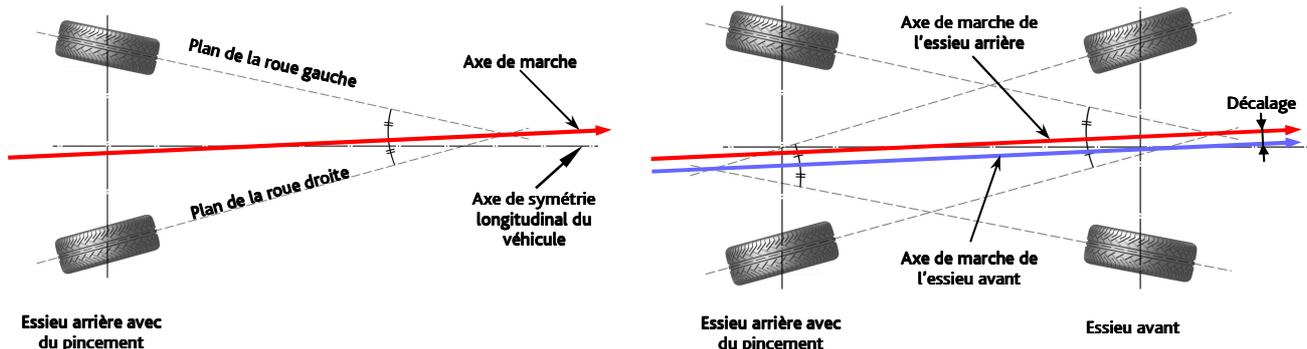


Fig. 4.61

L'axe de marche d'un véhicule.

4-C LES CRITÈRES DE JUGEMENT D'UN PNEUMATIQUE SUR UNE VOITURE.

- La **tenue de cap** et la fidélité de trajectoire sur différents types de route. Aux angles de braquage du volant doivent correspondre la trajectoire correspondante.

- La **réponse au coup de volant**, lors d'une manœuvre d'évitement (test de l'Élan). Le retard entre l'ordre donné et la réaction du véhicule doit être minimale. Un éventuel retard perturbe les réactions du conducteur, surtout si ces retards se cumulent lors de braquages et contre braquages successifs créés par un dérapage ou une perte de contrôle du véhicule. Un conducteur averti pourra anticiper ce retard et commencera à corriger au volant le mouvement de son véhicule, avant qu'il n'ait inversé son mouvement.

- L'**efficacité et le maintien de la trajectoire** au freinage en courbe et lors du « levier de pied », opération qui consiste à annuler brutalement le couple moteur en relevant le pied de l'accélérateur et à passer en frein moteur.

- La **motricité** sur sol sec, humide, verglacé.

- La **percussion** sur un obstacle isolé.
(Pouvoir Absorbant)

- Le **bruit** de roulement.

- Le **confort** lors des sollicitations verticales.

4-D LA ROUE.

Il s'agit du support du pneumatique, chargé de faire le lien avec le véhicule, via le moyeu, le pivot et les éléments de guidage de la suspension. Roue et pneumatique sont deux organes inséparables et la roue a aussi un rôle prépondérant dans la transmission des efforts et le maintien des caractéristiques du pneumatique.

4-D.1 COMPOSITION D'UNE ROUE.

Une roue se compose : Cf. fig. 4.62

a) d'un voile, (ou disque) partie verticale par laquelle se fait la fixation sur le moyeu. Ce voile est soumis à des efforts de flexion rotative qui vont impacter la tenue de la roue dans le temps. Sa rigidité est un facteur non négligeable pour la qualité de la tenue de route, toute flexion parasite ajoutant un effet de dérive au guidage du véhicule.

Le voile vient en appui sur le moyeu de roue et les efforts transitent par plaquage. C'est par le voile que la roue est fixée sur le moyeu. Le diamètre de la

circonférence de perçage des fixations est une caractéristique importante d'une roue.

b) et d'une jante, partie horizontale, perpendiculaire au voile et qui comporte deux bordures latérales de chaque côté du plan de roue, dans lesquelles viennent s'accrocher les talons du pneumatique. Une jante est dite à base plate ou creuse. La base plate est utilisée sur les Poids Lourds et quelques utilitaires. Elle nécessite un anneau amovible sur un côté pour permettre le démontage du pneumatique.

La base creuse est utilisée pour les voitures de tourisme. Le « creux » sert à la pose et dépose du pneumatique sur la jante, en assurant le décalage des talons pour permettre de passer le pneumatique sur les bordures fixes. Cf. fig. 4.64

Le profil de jante montre quelques particularités :

- Une bosse appelée **Hump** qui vient coincer le talon

du pneumatique sur le rebord. Cf. fig. 4.63 En cas de crevaison, cela retarde le moment où le talon va sortir de son logement. Ce **Hump** peut prendre plusieurs formes.

- Une **contre-pente**, forme relevée ayant fonction similaire au **Hump**. Cf. fig. 4.63

Un même profil peut combiner ces particularités.

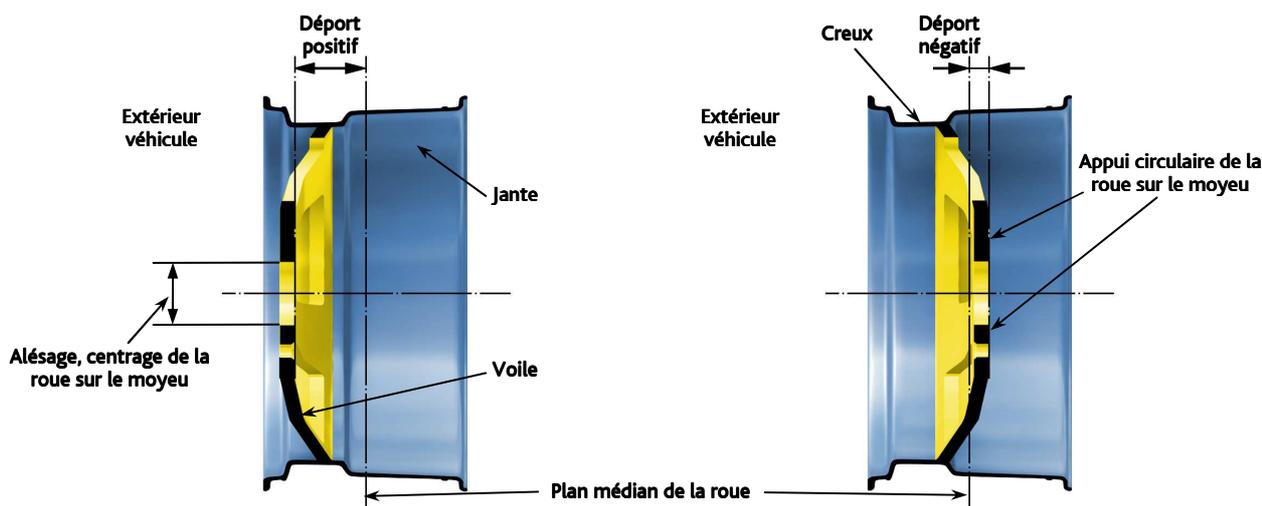


Fig. 4.62

La roue

Le déport est aussi appelé Ecuanteur.

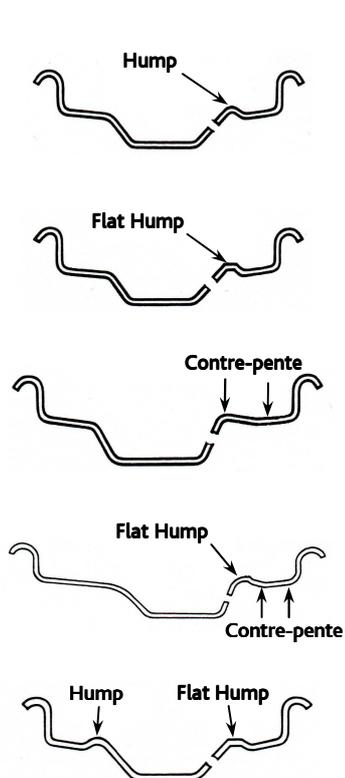


Fig. 4.63

Exemples de profil de jante.

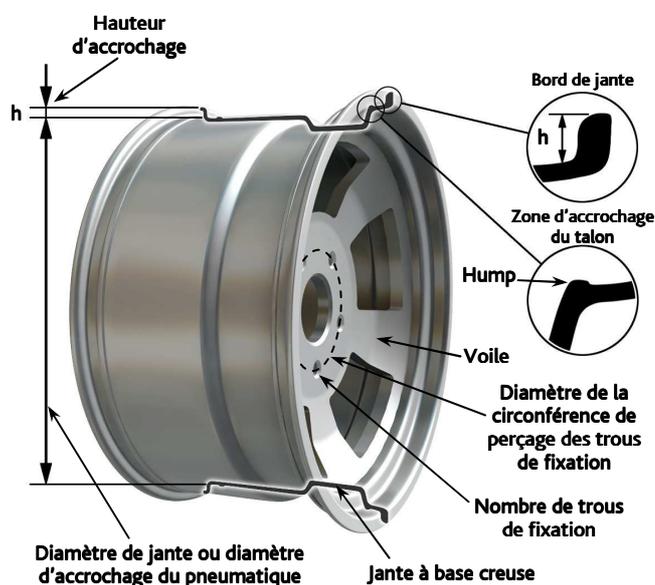


Fig. 4.64

Caractéristiques d'un roue.

Les jantes sont différenciées suivant le type de pneumatique utilisé : avec ou sans chambre à air (tubeless).

Il est prudent de vérifier que la forme du talon du pneumatique soit compatible avec la forme de l'appui sur la jante.

4-D.2 LE CENTRAGE D'UNE ROUE.

La roue est centrée sur le moyeu, soit par :

- a) un **alésage central**, surtout utilisé sur les véhicules rapides et performants, Cf. fig. 4.62
- b) Soit par les **fixations**, technologie utilisée sur les véhicules légers, lents, peu chargés. Une exception toutefois, les roues Poids Lourds sont centrées par les vis.

4-D.3 LE MATÉRIAU.

Une roue est soit en :

- **tôle**, emboutie pour le voile, roulée pour la jante, les deux parties étant soudées ou rivetées,
- soit en **alliage léger** coulée sous pression. La roue est alors monobloc.

Dans le choix du matériau et du procédé de fabrication, la roue sera un compromis entre le poids, la résistance aux efforts, à la flexion rotative, aux chocs et le coût.

4-D.4 LE MODE DE FIXATION DE LA ROUE SUR LE MOYEU.

Le mode de fixation de la roue sur le moyeu se fait par :

- **goujons** vissés dans le moyeu plus un **écrou**,
- ou par **vis**, vissée directement dans le moyeu.

Le nombre de points de fixation varie, 3, 4 ou 5 pour un véhicule de tourisme. Une fixation à 5 vis permet un meilleur placage sur le moyeu et une meilleure tenue du voile en flexion rotative. Le rôle rempli par la fixation dépend du mode de centrage de la roue :

- Par l'alésage central, la fixation sert essentiellement au placage. Les tolérances d'usinage sur le moyeu et la roue doivent tenir compte de ce mode d'assemblage. Cf. fig. 6.8

- Par les vis, là aussi les tolérances d'usinage doivent être déterminées pour ne pas avoir d'interférence de centrage d'une vis avec une autre.

Les formes d'appui des fixations dépendent du matériau de la roue, généralement plate pour l'alliage léger, conique ou en « cul d'œuf » pour la tôle.

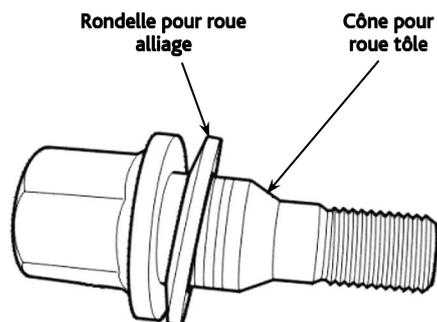


Fig. 4.65
Vis multi-usage.

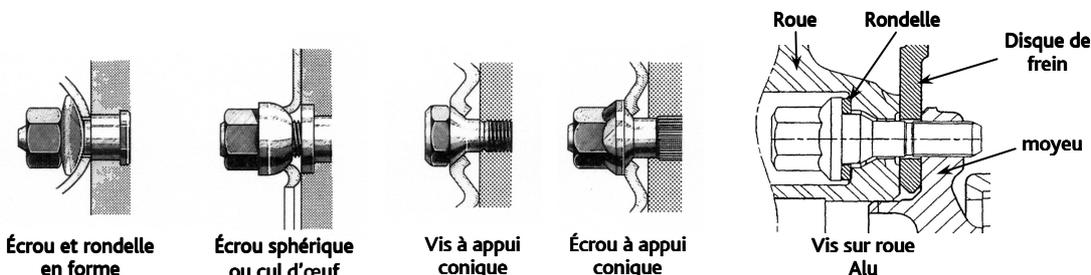


Fig. 4.66

Types de fixation de roue.

Citons, pour mémoire la fixation par **écrou central**. Cet écrou unique, de grand diamètre est à portée conique et vient appuyer la roue directement sur le moyeu, les efforts de rotation étant repris par des ergots fixés dans le moyeu et venant se positionner dans la roue. C'est

un montage courant en compétition.

La roue est aussi un élément de décoration entrant dans le style de la voiture soit directement si elle est en alliage léger, soit par l'intermédiaire d'un enjoliveur rapporté pour la roue tôle.

4-D.5 DÉSIGNATION, MARQUAGE.

Il existe de nombreuses formes et dimensions de roue, répondant à une normalisation : ISO, AFNOR, E.T.R.T.O.

Exemple de désignation : **4 J 15 3 30**

- **4** = largeur de la jante en pouce.
- **J** = lettre précisant la hauteur d'accrochage du talon sur la jante. $J = 17,3\text{mm}$
- **15** = diamètre d'accrochage du talon sur la jante ou diamètre au seat, en pouce. Ce diamètre doit correspondre exactement à celui du pneumatique.
- **3** = Nombre de fixations de la roue sur le moyeu.

- **30** = Ecuateur ou déport du voile par rapport au plan médian de la roue. Cet écuateur peut être nul, positif ou négatif. Cette valeur a une influence sur la voie du véhicule. En cas de changement de monte et de roue, cette valeur doit être vérifiée pour éviter les interférences entre le pneumatique et le passage de roue. Cela peut aussi être une valeur d'ajustement pour éviter cette interférence. Cf. fig. 4.62

Cette désignation est inscrite sur la roue, généralement côté intérieur.

4-E LE CAS DU PNEUMATIQUE MOTO.

La moto a un comportement dynamique différent de celui de la voiture. Le pneumatique doit s'adapter à cette différence.

4-E.1 LA DIFFÉRENCE DE STABILITÉ.

Une voiture, posée au sol par quatre appuis distincts a une stabilité « tabulaire », et le véhicule prend du roulis en s'inclinant vers l'extérieur du virage. Une moto posée au sol sur deux appuis, a une stabilité pendulaire, et pour tourner, s'incline vers le centre du virage au lieu de

prendre du roulis. Comme son centre de gravité est au dessus du sol, c'est-à-dire au-dessus de la ligne de contact, notre pendule est instable. Pour tourner, une moto doit disposer d'une vitesse minimum.

Cf. § 4-A.5 l'équilibre - la stabilité et fig. 4.68

4-E.2 LA CONSÉQUENCE.

Sur une voiture, on recherche davantage la verticalité du pneumatique en fonctionnement. Sur une moto, l'inclinaison de la roue est une contrainte de roulage. En conséquence, pour avoir une surface de contact aussi grande que possible, la forme en coupe du pneumatique sera différente du pneumatique automobile par sa forme en V. En virage, un pneumatique moto travaille

essentiellement sur l'épaule de la bande de roulement. Pour accentuer cette différence, le caoutchouc disposé au centre, soit au sommet du V est souvent un mélange privilégiant l'usure, alors que le mélange positionné sur les épaules sera différent et privilégiera l'adhérence pour une meilleure tenue en virage. Cf. fig. 4.67



Fig. 4.67

Forme en V.

La largeur est fonction du poids et de la puissance de la machine.

La notion de série s'applique aussi au pneumatique moto.

4 — [LE VÉHICULE ET LE PNEUMATIQUE]

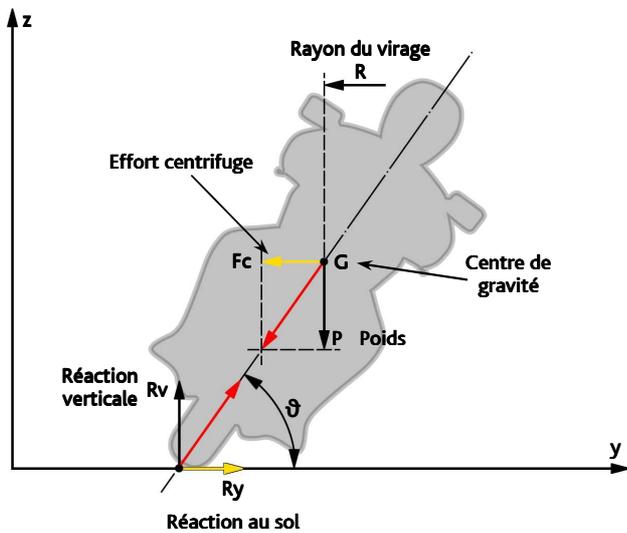


Fig. 4.68

Équilibre de la moto en virage.

A noter que le premier pneu radial pour la moto ne fût mis en service qu'en 1984.

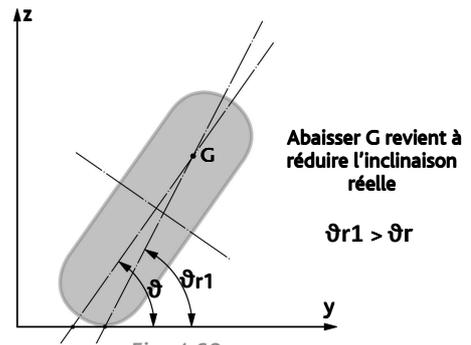
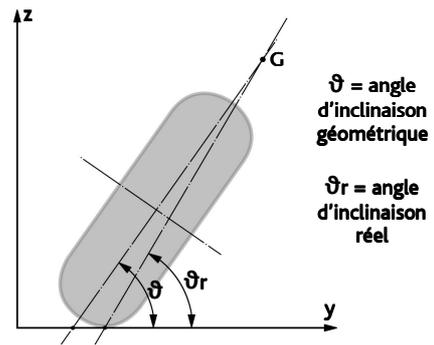


Fig. 4.69

Importance de la position du centre de gravité sur l'inclinaison réelle, pour un même pneumatique.

4-E.3 LE MOUVEMENT DE LA CHARGE.

Dans une voiture, la charge est normalement fixe. Il n'en est pas de même sur une moto, les mouvements du pilote ne sont pas neutres. Il peut déplacer, toutefois dans certaines limites, le centre de gravité de sa machine en déplaçant son corps sur la selle, à gauche ou à droite, en avant ou en arrière.

4-F LA SPÉCIFICITÉ DU PNEUMATIQUE « POIDS LOURDS ».

Le transport de marchandises dans un rayon de 150kms est fait quasi exclusivement par camion. C'est un moyen rapide, flexible, efficace, fiable et économique. La contrainte d'un tel pneumatique est la charge transportée, imposant un dimensionnement de carcasse bien particulier. Le coût au km, que ce soit en usure ou en consommation de carburant sont deux paramètres majeurs pour les transporteurs.

Longtemps les essieux porteurs furent équipés de roues jumelées, ce qui était contraignant en termes de volume. Progressivement, ce montage est abandonné pour une simple monte. Un tel équipement permet d'élargir le volume de charge et d'abaisser la plateforme de chargement. Dans le cas de remorques équipées de « tridem », soit trois essieux, lors de manœuvres imposant des virages serrés, le centre instantané de rotation de la remorque peut être très proche de la roue intérieure au virage. Cela provoque un ripage latéral des autres pneumatiques et des contraintes latérales très fortes sur l'ensemble pneumatique plus roue, à de très faibles vitesses de rotation.



Une carcasse de pneumatique poids lourds peut être millionnaire en kms. Il est donc très souvent :

- « **Recreusé** ». Il s'agit, arrivé à un niveau d'usure déterminé de la bande de roulement, de reprendre le fond des sculptures en entaillant les canaux à l'aide d'un fer chauffé de forme adaptée au canal considéré. Ce recreusage est possible grâce à l'épaisseur initiale de la bande de roulement. Lors de la confection du pneumatique, il n'est pas donné aux sculptures la hauteur maxi possible pour éviter une trop grande mobilité des pains de caoutchouc. Mobilité qui serait préjudiciable à la tenue de route.

- « **Rechapé** ». Si le pneumatique n'a pas été l'objet d'incident majeur : crevaison, déchirure, etc., une carcasse en bon état est rechapée. Cf. § 6-B.2

La bonne gestion d'un pneumatique poids lourds impose de tenir compte de :

- sa **position sur le véhicule**. L'usure ne sera pas identique s'il est monté sur un essieu :

- porteur et directeur,
- porteur et moteur,
- ou porteur seul.

- du type de **parcours** effectué : routier, autoroutier, urbain, montagne, chantier, etc. Vu les charges transportées et les vitesses atteintes, un incident sur un pneumatique poids lourds peut avoir des conséquences dramatiques, d'où l'impérieuse nécessité de respecter les conditions de charge et de vitesse, et d'opérer un contrôle fréquent de l'état.

5 — [LA FABRICATION D'UN PNEUMATIQUE]

La fabrication d'un pneumatique consiste à façonner puis à assembler les différents constituants : Cf. fig. 5.1
Composants de base :

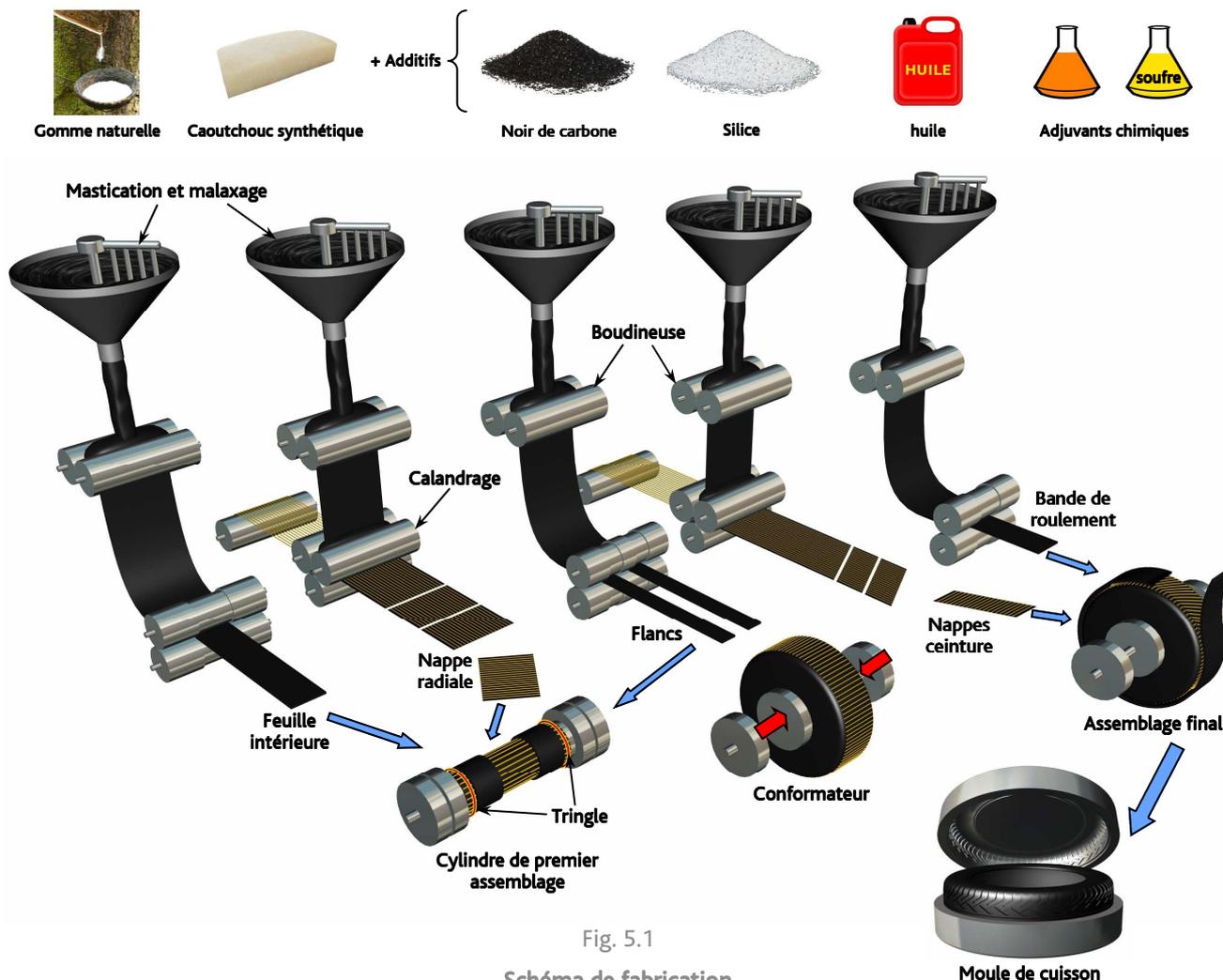


Fig. 5.1

Schéma de fabrication.

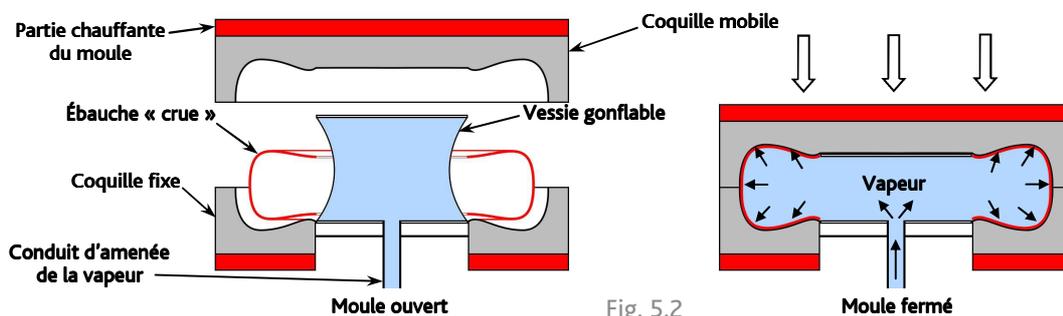


Fig. 5.2

Principe de fonctionnement du moule.

5-A LA PRÉPARATION DES DIFFÉRENTS MÉLANGES DE CAOUTCHOUC.

Le caoutchouc « cru », qu'il soit d'origine naturelle ou synthétique est livré en « balles » de 20 à 100kgs. Ces « balles » doivent d'abord être découpées en morceaux, pour ensuite être traitées, mécaniquement par différents procédés.

Cette préparation se fait dans de grands bacs mélangeurs, à l'image du pétrin d'un boulanger, capable de « fabriquer » plusieurs tonnes de mélange à la fois. Elle comporte une suite d'opérations.

5-A.1 LA MASTICATION.

La matière des « balles » est coupée en morceaux puis broyée pour rendre le caoutchouc suffisamment souple et malléable.

5-A.2 LE MALAXAGE.

Le but de cette opération est d'obtenir une masse uniforme, homogène. Le malaxeur est constitué d'au moins deux cylindres, d'écartement variable et tournant à des vitesses différentes. C'est lors de cette opération que sont ajoutés les additifs.

5-A.3 LES ADDITIFS.

Selon les propriétés finales recherchées pour un mélange, il est ajouté des additifs lors de l'opération de malaxage. Ce sont :

a) Des **charges de renforcement**. Le but est d'accroître la résistance à l'abrasion et au déchirement. Nous en retiendrons quatre :

- le **Noir de Carbone**, principal additif de renforcement. C'est lui qui donne sa couleur noire au pneumatique. Il se présente sous forme de poudre d'un carbone quasiment pur. Il agit par renforcement des liaisons intermoléculaires de la chaîne de polymères.

Deux paramètres vont intervenir :

- ⇒ Le **taux de noir de carbone** ou quantité ajoutée. Le facteur de renforcement est proportionnel à la quantité, mais jusqu'à une limite fonction de la taille des particules. Cf. fig. 5.3 A noter, une autre limite : l'élasticité, qui chute avec la quantité. Le taux de noir de carbone sera un compromis entre le renforcement et les pertes d'énergie en flexion (avec une incidence sur l'hystérésis).

- ⇒ La **dimension des particules**. Pour chaque dimension, il existe une quantité optimale selon la chaîne polymère utilisée. La dimension intervient dans le facteur de renforcement et par conséquent, joue un rôle majeur dans la résistance à l'usure. Cf. fig. 5.4

- le **talc**. Cette charge de renforcement a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques : rigidité, résistance à l'impact, et la stabilité dimensionnelle. Il intervient également pour améliorer l'imperméabilité aux gaz. Il est présent particulièrement dans les mélanges à base d'halobutyl, utilisés à l'intérieur du pneumatique à chambre incorporée (ou « Tubeless »). Cela permet de réduire l'épaisseur de ce revêtement, donc de gagner du poids.

- la **silice**, améliore la tenue à la rupture par un effet de durcissement. Ce durcissement limite les déformations d'où son emploi dans le pneumatique de génie civil, très sollicité aux agressions extérieures.

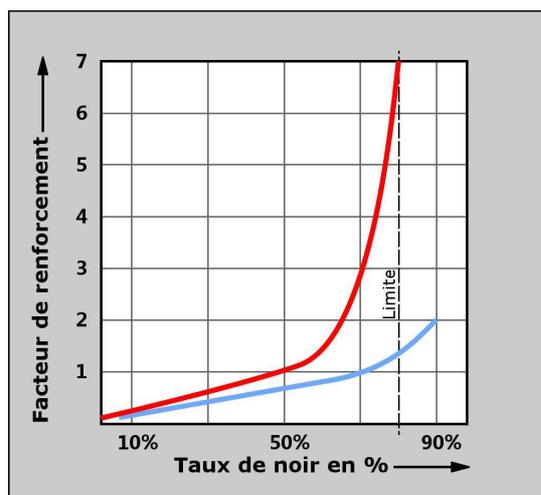


Fig. 5.3

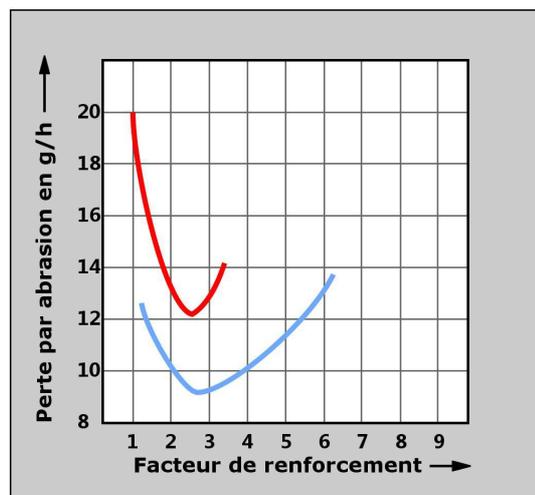


Fig. 5.4

Incidence de la dimension des particules de noir de carbone et de la quantité ajoutée sur le facteur de renforcement et l'usure. Ces courbes sont le résultat d'essais réalisés sur machine. Le mélange (rouge) a une dimension de particules > à celle du mélange (bleu).

La silice intervient en remplacement partiel du noir de carbone dans les pneumatiques « verts ». Cet additif réduit l'hystérésis, donc les pertes, et diminue la résistance au roulement, d'où un gain en consommation.

b) Des agents de vulcanisation. Il s'agit essentiellement de soufre. Cf. § 5.F

c) Des huiles et des agents lubrifiants, dans le but d'améliorer :

⇒ La **viscosité du mélange.** L'huile intervient comme un lubrifiant intermoléculaire lors du malaxage.

⇒ La **résilience et l'hystérésis en roulage.**

Par contre, ces additifs réduisent la résistance à la déchirure et à l'abrasion. Les huiles sont d'origine végétale : huile de palme, de ricin, ou minérales : issues du raffinage du pétrole. Les plus employées sont à base aromatique. Les agents lubrifiants se présentent sous forme de cire ou de savons à base d'acides gras.

d) Des produits additionnels spécialisés :

⇒ Des **charges « inertes »** : argile, craie, blanc de Meudon, pigments, etc... pour améliorer la cohésion et la dureté.

⇒ Des **anti-oxygène et anti-ozone,** agissant sur le vieillissement et les effets de l'exposition à la lumière.

⇒ Des **peptisants,** pour favoriser le malaxage.

⇒ Des **accélérateurs** afin de réduire les temps de fabrication.

Quelques exemples :

⇒ Pour augmenter la limite élastique, il sera ajouté de la magnésie, de l'oxyde de zinc, du carbonate de calcium.

⇒ S'il s'agit d'améliorer la charge de rupture, il pourra être ajouté : de la chaux, de la glycérine, de l'oxyde de zinc.

Un mélange peut contenir de 20 à 30 additifs distincts selon l'utilisation qui va être faite du produit final.

e) Exemple de composition d'un mélange pour un pneumatique :

-25% de caoutchouc synthétique.

-18% de caoutchouc naturel.

-27% de noir de carbone.

-8% de silice.

-22% de produits additionnels spécialisés, dont le % et la composition dépendent des savoir-faire et des secrets de fabrication de chaque fabricant. A noter qu'un tel mélange ne contient que 43% de caoutchouc.

Dans un même pneumatique, plusieurs types différents de mélanges sont utilisés, selon leur fonction :

- Caoutchouc de nappe, - de flanc, - de revêtement intérieur, - de bande de roulement. Chacun de ces mélanges nécessite des moyens de préparation spécifiques, adaptés à la caractéristique propre du mélange. Cf. fig. 5.1

5-A.4 LA BOUDINEUSE.

L'opération consiste à rendre le mélange compact, homogène et le mettre sous forme de bandes, dont l'épaisseur dépendra de sa position, donc de sa fonction, sur le pneumatique.

5-A.5 LE CALANDRAGE.

Cette opération a pour but de constituer les nappes d'armature et nappes sommet. La calandre est une sorte de laminoir, constituée d'une ou plusieurs paires de cylindres parallèles, dont l'écartement est réglable. La matière à travailler passe entre les cylindres de chaque paire, ce qui lui fait subir une compression. C'est lors de cette opération que se fait l'imprégnation des fils de renfort par le caoutchouc provenant de la

boudineuse. Le passage entre les rouleaux fait entrer en force le caoutchouc dans les interstices des fils. Le réglage de l'écartement permet de calibrer l'épaisseur finale de la nappe.

La mise en œuvre des mélanges de caoutchoucs demande un équipement lourd et consomme une grande quantité d'énergie.

5-A.6 LES TESTS D'ÉVALUATION.

Tout nouveau mélange de gomme, doit être soumis avant son emploi à des tests d'évaluation dont le but est de vérifier les propriétés physiques et chimiques. Ces tests doivent également définir le mode de

vulcanisation à utiliser pour obtenir les résultats escomptés.

Exemples de tests :

5 — [LA FABRICATION D'UN PNEUMATIQUE]

- Elasticité** : allongement et résistance à la rupture, module d'élasticité, fluage, relaxation, déformation rémanente.
- Vieillessement** : résistance à l'ozone, à l'oxygène, aux rayons Ultra-violet, à la fatigue en flexion, formation de craquelures.
- Résistance** à l'abrasion, au déchirement, à l'effritement.

- Intervalle des **températures** de fonctionnement : mini-maxi.
- Résistance** aux huiles, solvants et produits chimiques.
- Perméabilité** à l'air et aux gaz.

5-B LE FAÇONNAGE DES DIFFÉRENTS TISSUS, FILS, ET LEUR PRÉ-IMPRÉGNATION.

Ces tissus, pré-imprégnés sont ensuite coupés en bande selon l'angle de fil choisi pour la nappe considérée, Cf. fig. 2.11 pour former une « nappe de câblés ».

5-C LA PRÉPARATION DE LA BANDE DE ROULEMENT: LARGEUR, ÉPAISSEUR.

Cette opération se fait sur une boudineuse.

5-D LA PRÉPARATION DES ÉLÉMENTS COMPLÉMENTAIRES: FEUILLE D'ÉTANCHÉITE INTÉRIEURE, TRINGLES, BOURRELETS DE TALON, MÉLANGE POUR LES FLANCS, etc...

Le « savoir-faire » et de nombreux secrets de fabrication permettent de définir les formes, les épaisseurs, les matières en fonction de l'utilisation du produit.

5-E ASSEMBLAGE ET MISE EN FORME.

L'**assemblage** se fait en trois phases :

-1°) L'opérateur met en place, à plat sur le cylindre de conformation, dans un ordre précis les différentes épaisseurs : « liner » d'étanchéité, armature radiale, tringles et talons, flancs. Cela forme une ébauche cylindrique.

-2°) Ensuite, en gonflant la vessie et en rapprochant les tringles, l'ébauche cylindrique prend la forme d'un tore. Cette opération dite de « conformation » met l'armature en tension.

-3°) Enfin, sur la forme de tore obtenue, sont ajoutés les éléments de la ceinture : nappes sommet (avec les fibres orientées selon l'angle défini et en évitant tout « plissage », nappes renfort éventuelles et en dernier la bande de roulement.

Parce qu'ils sont inextensibles, les éléments de ceinture sont installés en dernier. Ils ne pourraient suivre le changement de forme lors de la « conformation ».

L'assemblage des nappes demande un parfait alignement et les raccords d'extrémité nécessitent une grande précision d'exécution pour éviter toute surcharge locale de caoutchouc. Les différents éléments peuvent être enduits de solvants pour mieux adhérer les uns aux autres.

Pendant toutes ces opérations, la propreté est cruciale, aucun corps étranger, aucune poussière, ni bulle d'air ne doivent pouvoir venir perturber le contact entre les différents composants.

5-F LA VULCANISATION OU CUISSON.

Il s'agit de faire passer notre pneumatique de l'état « cru » et plastique à l'état « cuit » et élastique. Cette opération se fait dans un moule métallique, composé de segments circulaires, fermé hermétiquement et dans lequel on applique chaleur et pression. Pour être

uniforme, chaleur et pression sont appliquées via une vessie dans laquelle sera introduite de la vapeur, sous pression 10 à 20 bars et dont la température dépendra du processus de cuisson choisi. Cf. fig. 5.2

La partie circulaire de l'intérieur du moule possède en

« négatif » le dessin des sculptures de la bande de roulement. Cette partie est également chauffée.

Sous l'effet de la pression et de la malléabilité à chaud du mélange, la bande extérieure de caoutchouc va s'incruster dans les formes du moule, pour donner le dessin final des sculptures.

La chaleur va permettre la réaction chimique, et ainsi donner au mélange ses caractéristiques élastiques. Cette opération dépend beaucoup du savoir-faire des opérateurs. La durée de vulcanisation dépend de nombreux facteurs, tels que la taille du produit, le type de mélange, des produits vulcanisants, de la présence d'activateurs. Il est aussi nécessaire de tenir compte d'un écart de composition du mélange entre flanc et bande de roulement.

Le procédé de vulcanisation le plus utilisé consiste à

ajouter du Soufre au mélange de caoutchoucs et de chauffer l'ensemble. La présence de soufre permet de renforcer les liens chimiques entre les monomères. Les chaînes de molécules, enchevêtrées et non rectilignes, se transforment en un réseau tridimensionnel unique. La plasticité du mélange diminue au fur et à mesure de la densification de ce réseau.

Certains caoutchoucs synthétiques n'ont pas de doubles liaisons, ce qui rend difficile la vulcanisation par le soufre seul. Il faut alors changer d'élément chimique et utiliser des peroxydes (oxydes en excès d'oxygène).

Le temps nécessaire à l'assemblage sur machine automatique et à la vulcanisation est d'environ 60' pour un pneumatique Tourisme. Ce temps peut atteindre 15h pour un pneumatique de génie civil de grande dimension.

5-G LES CONTRÔLES DE FABRICATION.

Après la vulcanisation, notre pneumatique va subir une série de contrôles et de tests :

a) Le premier est purement visuel,

b) Puis suivent des tests sur machines automatiques. Ces tests ont la particularité d'être reproductibles, donc de permettre de hiérarchiser les produits finis selon leur niveau de qualité. Ex de test : le passage en

machine d'équilibrage pour définir sa position de montage sur la roue,

c) Et enfin des tests sur voiture, par prélèvement. Ces tests sont plus proches de la réalité d'usage du client final que ceux sur machine. Mais les conditions d'essais sont plus aléatoires et tiennent grandement compte de la finesse de jugement du pilote.

5-H LES DÉFAUTS DE FABRICATION.

Pour remplir sa fonction, un pneumatique doit présenter d'indispensables qualités d'uniformité, pour ne pas interférer par son comportement sur celui du véhicule. Les défauts d'uniformité créent des forces parasites lors

du déroulement du pneumatique et sont le résultat de tolérances dans le procédé de fabrication.

Nous mentionnerons :

5-H.1 LES VARIATIONS DE FORCES RADIALES.

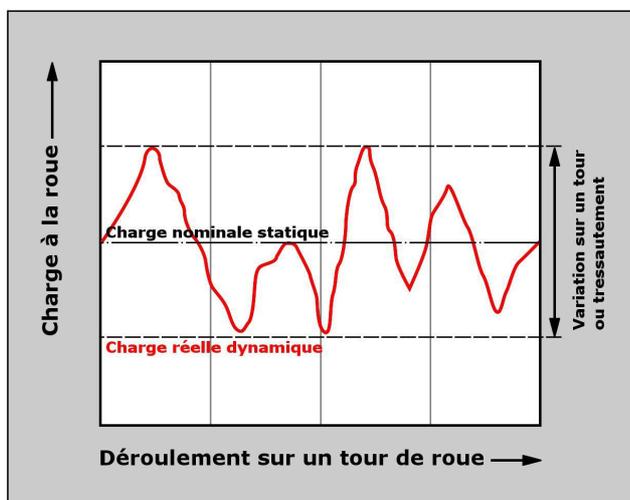


Fig. 5.5

Variation de la charge radiale.

Un pneumatique équipant un véhicule, en roulage, présente sur un tour de roue des variations de charge verticale entre le moyeu de roue qui définit son axe de rotation, et le sol, surface de roulement. Cf. fig. 5.5

Les causes de ces variations :

a) des écarts de **dimension**. La géométrie du pneumatique n'est pas parfaite.

b) Une différence ponctuelle de **masse**, par une variation d'épaisseur sur une nappe, sur la bande de roulement ou les flancs. Ces défauts de masse peuvent se corriger par une opération d'équilibrage lors du montage de la roue.

c) Des hétérogénéités de **raideur** sur le pourtour du pneumatique. Lorsqu'une « tranche » du pneumatique arrive dans la zone de contact au sol, flanc et carcasse vont se déformer. Tout écart de raideur entre deux « tranches » consécutives va modifier ces déformations et introduire un écart de charge.

Ces variations de forces radiales qui apparaissent sur le tour de roue induisent des perturbations cycliques, encore appelées : « **Tressautement** », représentée par une sinusoïde d'amplitude constante mais de fréquence variant avec la vitesse.

Souvent, ce défaut de construction fait l'objet d'un

marquage particulier, donnant une indication de montage dont le but est de corriger les effets négatifs en utilisant la présence de la valve, poids additionnel excentré.

La valeur moyenne de cette force radiale est de 5 à 7 daN.

5-H.2 LES VARIATIONS DE FORCES LATÉRALES.

Ces variations sont encore appelées : « **Serpentage** » ou « **dandinement** ».

Il s'agit d'une sorte de dérive sans braquage de la roue, modifiant la tenue de cap du véhicule. La cause en est la superposition de deux défauts :

a) **L'effet de cône**, Cf. fig. 5.6 dû à une différence de raideur verticale entre le côté droit et le côté gauche d'un même pneumatique. Il aura tendance à rouler comme un disque conique, vers le plus petit rayon, qui correspond au côté de la paroi la plus faible. Plus rarement, la cause peut-être un écart de diamètre entre chacun des côtés.

b) **L'effet d'angle**, Cf. fig. 5.7 est un effort latéral créé par un manque d'homogénéité de l'angle des nappes lors du déroulement du pneumatique. Il apparaît lorsque la ceinture passe dans la zone de contact. Elle va se déformer dans la direction de la moindre résistance, qui est celle correspondant à l'angle le plus grand. Cette irrégularité d'angle crée une variation de l'effort de guidage F_y . Ce défaut a le plus souvent pour origine un manque de précision dans le positionnement d'une nappe lors de l'assemblage du pneumatique. L'effet d'angle est facilement compensé sur le train AV par un léger braquage des roues. Par contre, à l'AR, le tirage latéral sera permanent et modifiera la position de l'axe de marche du véhicule. Cf. § 4-B.4h

L'effet de cône et l'effet d'angle se mesurent sur machine.

Ces deux défauts introduisant une dérive parasite, n'ont pas le même effet sur le comportement du véhicule suivant le sens de rotation, donc de la position de la roue sur le véhicule.

L'effet de cône s'applique du même côté, quel que soit le sens de rotation. Par contre, l'effet d'angle s'inverse lorsque le sens de rotation change. En conséquence, ces deux défauts peuvent s'additionner ou se retrancher. Cf. fig. 5.8

La valeur moyenne de cette force latérale est de 3 à 5 daN.

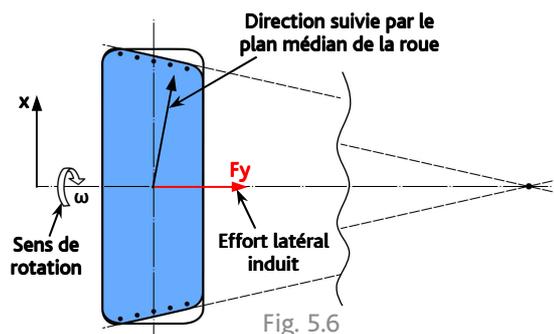


Fig. 5.6

Effet de cône.

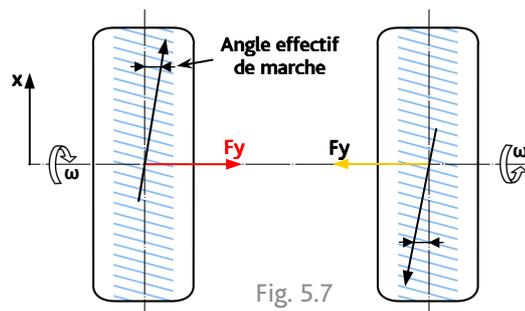


Fig. 5.7

Effet d'angle.

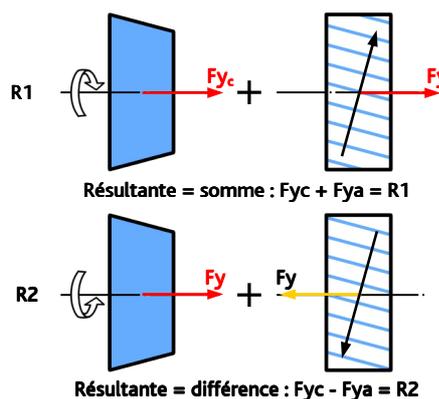


Fig. 5.8

Superposition de l'effet de cône et de l'effet d'angle, selon le sens de rotation de la roue.

5-H.3 LES PREMIERS KILOMÈTRES.

Pour permettre le démoulage après vulcanisation, les parois lisses du moule sont enduites d'un lubrifiant. A la sortie du moule, cet agent de démoulage reste partiellement sur la surface du pneumatique. Surface lisse

donnée au caoutchouc par le moule plus les restes de l'agent de démoulage ne permettent pas au pneumatique neuf de délivrer ses pleines qualités d'adhérence, il faut attendre l'abrasion des premiers kilomètres.

La sécurité des déplacements est fortement impactée par le bon entretien des pneumatiques, et ce, d'autant plus que l'automobiliste a tendance à « oublier » ses pneumatiques. Bien que sa durée de vie se compte en

dizaine de milliers de kms, le pneumatique est un consommable qu'il est nécessaire de surveiller et qu'il ne faut pas hésiter à remplacer.

6-A LA DISTRIBUTION.

6-A.1 LA VENTE PREMIÈRE MONTE.

Elle se fait directement entre le manufacturier et le constructeur. Ce dernier est un professionnel et définira en liaison avec le manufacturier un compromis dans le choix de la monte pour le véhicule concerné, choix qui sera un savant équilibre entre les performances et le coût. Ce choix influera sur la vie du véhicule et son

comportement dynamique. Conséquence : lors du remplacement de l'équipement pneumatique, l'utilisateur aura tendance à reconduire le Manufacturier d'origine. Le succès ou l'échec commercial d'un modèle impacte le constructeur, mais aussi le ou les fournisseurs de pneumatiques.

6-A.2 LE REMPLACEMENT.

Par contre, lors de cette phase de remplacement et pour l'entretien, l'utilisateur se trouve face non plus au constructeur à qui il a acheté le véhicule, mais face à un réseau de distribution faisant intervenir des acteurs divers :

a) les négociants, qui représentent environ 30% de l'activité. Ce sont souvent des réseaux, ou des succursales des manufacturiers, implantés dans une zone géographique. Ils négocient des quotas de pneumatique avec les manufacturiers. Ces réseaux spécialisés prennent en charge la réparation du pneumatique, son remplacement, les vérifications et réglages des trains roulants et de plus en plus souvent, l'entretien des freins et du système de suspension.

b) les accessoiristes, qui représentent environ 10% de l'activité. Leur marché principal est l'accessoire avec en priorité la roue. C'est un marché orienté vers le style, et le « tuning ».

c) les stations-services, qui représentent environ 20% de l'activité. La station-service est un endroit usuel de fréquentation, qui garde encore une activité « d'urgence » en cas d'incident. Avant d'aller dans le réseau d'un négociant, l'automobiliste a plus souvent le réflexe de s'arrêter dans une station-service. Mais leur nombre diminue progressivement.

d) les garages MRA (Mécanicien Réparateur Automobiles), regroupent les garages indépendants, ne faisant pas partie d'un réseau constructeur. Ils représentent environ 10% de l'activité et sont fréquents en zone rurale. Ce sont des ateliers de mécanique et le pneumatique est une activité complémentaire de service au client.

e) les concessionnaires et agents dépendant d'un réseau de Marque automobile. Ils représentent environ 8% de l'activité. Comme pour les MRA, le pneumatique est un service complémentaire afin de satisfaire le client et offrir un service complet.

f) les divers, pour plus de 10%.

La commercialisation d'un produit complexe, et maintenant banalisé (voir trop banalisé), est un acte de vente particulier, essentiellement par ses conséquences en cas de mauvaise utilisation.

Ces systèmes de distribution, dans lesquels les notions de compétence, de service, de qualité et pertinence des conseils, sont importantes, se heurtent à une pénurie de personnel formé à la spécificité de l'emploi du pneumatique. Il est souhaitable que la lecture de ces lignes déclenche quelques vocations.

6-A.3 L'ESTHÉTIQUE.

Le pneumatique intervenant avec la roue dans l'esthétique du véhicule, sera l'objet des tendances de la mode. Cela signifie que les manufacturiers, sous la pression des constructeurs et du « design » doivent faire évoluer leurs produits, donc leurs moyens de production pour suivre ces tendances, qui évoluent de plus en plus rapidement. Comme le véhicule a une durée de vie qui s'allonge, il est parfois difficile, quatre ou cinq ans

après sa sortie de trouver un pneumatique de remplacement dans la série considérée.

Le pneumatique et la roue sont aussi l'objet d'une activité particulière : « le tuning ». De nombreux accessoiristes proposent des roues, de forme, de dimension, différentes permettant de personnaliser le véhicule. Il en découle un changement de monte pneumatique.

6-A.4 LA FIN DE VIE : Recyclage, destruction, rechapage, protection de l'environnement.

Le **rechapage** peut donner une deuxième vie à une carcasse en bon état. Cf. § 6-B.2

Le **recyclage** est maintenant obligatoire. Cela passe par une organisation de la collecte et ensuite par un traitement :

- La majorité des pneumatiques usagers est utilisée comme **combustible** dans des chaudières industrielles ou dans les fours de cimenterie, gourmands en énergie.

- Progressivement se développe des méthodes de **récupération des composants**. Cela demande des moyens de démantèlement du pneumatique pour séparer le caoutchouc sous forme de granulés, des renforts et nécessite ensuite de trouver des débouchés de réemploi. Les granulés peuvent être utilisés tel quel, dans la confection, par ex. : de routes, soit retraités. Mais les

procédés de retraitement se heurtent au fait que le caoutchouc a déjà subi une cuisson ayant figé la chaîne polymères. Cela complique le processus. Un nouveau procédé semble prometteur et débute son industrialisation : la **pyrolyse**. Cf. fig. 6.1 Cette pyrolyse consiste à chauffer fortement le caoutchouc en l'absence d'oxygène. Cela provoque la rupture des chaînes polymères, et l'absence d'oxygène évite toute combustion. Le carbonisat obtenu est un composé contenant une forte proportion de Noir de carbone. Il est réutilisable directement et dans une certaine proportion pour la réalisation d'un nouveau mélange.

- Les renforts acier, repartent dans le circuit de récupération des ferrailles et les renforts textiles sont le plus généralement brûlés dans des fours.

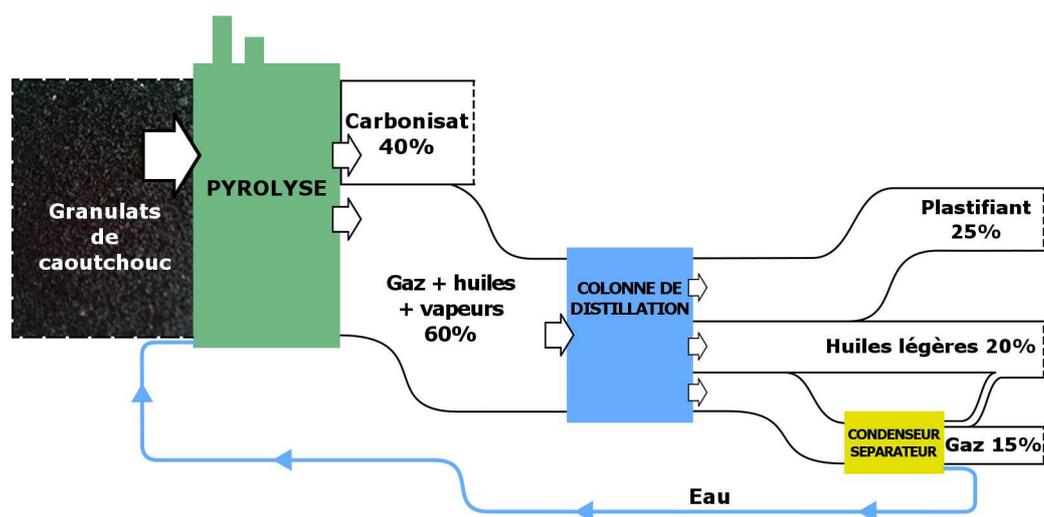


Fig. 6.1

Recyclage du caoutchouc vulcanisé par pyrolyse.

6-B LES RECOMMANDATIONS NÉCESSAIRES À L'USAGE D'UN PNEUMATIQUE.

6-B.1 LA DÉFINITION DU BESOIN.

Il s'agit de déterminer la dimension et le type de pneumatique. Pour cela, il convient de tenir compte :

- Du type de véhicule : poids, vitesse, etc.
- Des conditions d'utilisation : conditions météo, nature des routes et des sols, région d'utilisation : plaine, montagne, etc.

Cela conditionnera le type, la dimension, et la sculpture de la bande de roulement. A chaque fois, ce seront les conditions maximales qui seront prises en compte.

6-B.2 LE CHOIX.

a) S'il s'agit d'un **remplacement**, il sera tenu compte de la monte d'origine et de ses caractéristiques. Le nouveau pneumatique devra répondre aux mêmes critères de sécurité : même dimension, même capacité de charge, même catégorie de vitesse, même type d'utilisation. Il sera dans la gamme compatible avec la largeur de la jante.

b) S'il s'avérait nécessaire d'installer une **monte différente** :

- Il est impératif de choisir un pneumatique dont l'**indice de vitesse** est supérieur à la vitesse maximale du véhicule.

- La nouvelle **pression de gonflage** de fonctionnement tiendra compte de la **charge maxi** d'utilisation sur l'essieu correspondant et de la vitesse maxi du véhicule. Cf. fig. 6.2

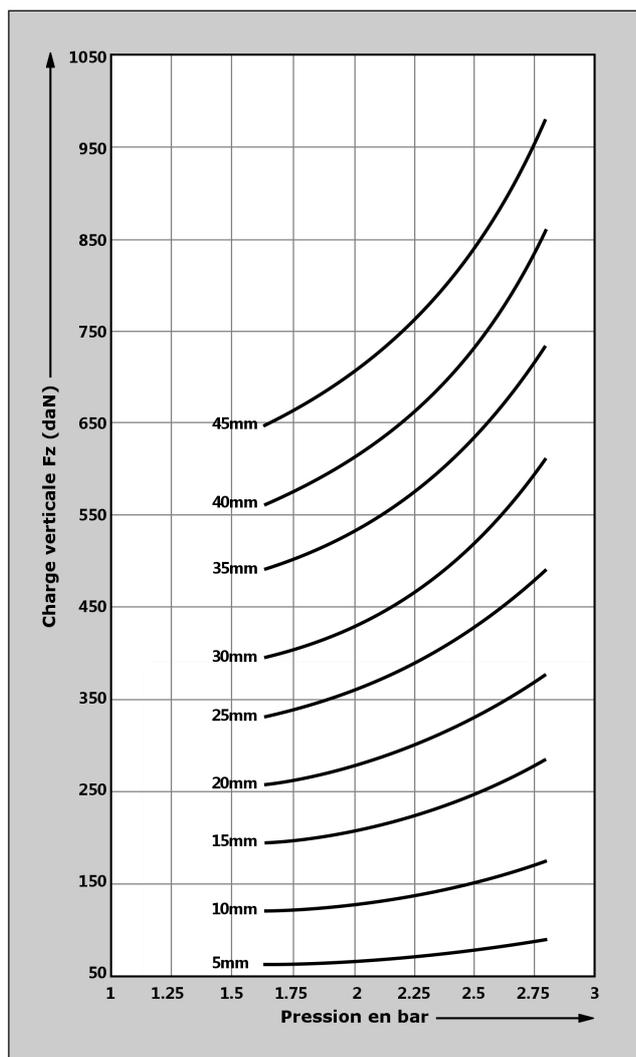


Fig. 6.2

Courbes isoflèches

Pneumatique : 175 - 60 - 15

- Le **diamètre de roulement** devra être respecté avec une tolérance inférieure à 1% pour ne pas influencer sur les indications du compteur de vitesse.

- Si la **roue d'origine** est utilisée, il est préférable que la jante soit plus large que trop étroite. Cf. fig. 4.37

- Si une **autre dimension** de roue est utilisée, il y a lieu de tenir compte que plus le N° de la série descendra (ex : 65 à 50, Cf. fig. 2.27 correspondant à une augmentation du diamètre d'accrochage : ex : 16" à 17"), plus il en résultera une augmentation de la largeur, avec le risque : a) d'une dégradation du confort de roulage, b) de réactions dans la direction, c) d'un décrochage plus brutal par réduction de l'angle de dérive. Pour chaque type de véhicule, il y a un compromis à respecter pour éviter de trop modifier le comportement du véhicule.

c) En matière de **prix**, il est utile de ne comparer que des choses comparables, la rentabilité d'un pneumatique correspond à un coût/kilomètre ou coût d'utilisation, et ne doit pas être ramenée au seul prix d'achat.

Dans tous les cas, il est recommandé de consulter la notice d'utilisation fournie par le constructeur du véhicule.

Il existe un marché de pneumatiques neufs, « déclassés », majoritairement pour défaut d'aspect. Ils doivent être marqués du sigle « D.A » ou « SeKunDA ».

Il existe également un marché du pneumatique rechapé. L'opération de **rechapage** (mettre une nouvelle chape) s'applique à un pneumatique usé, remis en état, soit par le remplacement de la bande de roulement, soit par le remplacement de la bande de roulement et des garnitures de flancs. Pour les pneumatiques destinés aux véhicules légers, c'est en général cette seconde solution qui est choisie. L'aspect « sécurité » est primordial et la qualité d'un pneu rechapé dépend d'un minimum de 3 facteurs :

- L'**état** de la carcasse à recharger. C'est la partie conservée du précédent pneumatique. Son état dépend des conditions d'utilisation lors de la première vie. Cette carcasse ne doit présenter aucune trace de perforation ni de cassure de nappe. Avant rechapage, la sélection par un examen minutieux de cette carcasse est primordiale.

- La **qualité** des caoutchoucs utilisés par l'entreprise de rechapage. Ces caoutchoucs doivent parfaitement adhérer au caoutchouc primitif, et ne pas demander une température de cuisson trop élevée.

- Le **soin**, la **compétence**, l'**expérience** du recapeur. A ce stade, nous ajouterons la conscience professionnelle de l'entreprise. Recharger un pneumatique est un risque, donc une responsabilité à assumer.

Très fréquemment, après une telle opération, les pneumatiques remis sur le marché sont déclassés d'un cran en indice de vitesse ou indice de charge.

6-B.3 LES CONDITIONS DE STOCKAGE.

Certaines dimensions particulières, au marché restreint, peuvent avoir été stockées. Les conditions de stockage sont importantes pour le vieillissement et peuvent influencer sur la qualité de service. Dans cette optique, il est utile de vérifier la date de fabrication. Au-delà de cinq années de stockage, un pneumatique nécessite un examen approfondi avant d'être monté sur un véhicule.

Le caoutchouc est une matière qui nécessite d'être conservée dans des conditions appropriées. Un local de stockage pour pneumatique doit rester : sec, frais (température <20°C) et disposer d'une ventilation naturelle. Pour un délai inférieur à un mois, les pneumatiques peuvent être stockés à plat et en pile, à raison de quatre unités par pile. Pour une durée plus longue, ils seront stockés en position verticale en rack, en vérifiant que le support ne déforme pas la bande de roulement.

Après fabrication, deux agents physiques peuvent faire évoluer l'état du caoutchouc :

- **L'ozone.** Dans le local de stockage, il est recommandé d'éviter tout matériel générateur d'ozone : lampes fluorescentes, à vapeur de mercure, machines électriques pouvant produire des arcs électriques. Par

extension, il ne sera entreposé aucun produit chimique.

- Les **rayons Ultra-violet**s, ce qui implique que le local soit aussi sombre que possible.

L'un et l'autre activent l'oxydation et provoquent la rupture des chaînes polymères. Cela se traduit par des fissurations locales et un durcissement général du caoutchouc. Les conditions de stockage sont fondamentales pour ne pas provoquer un vieillissement prématuré du pneumatique.

Un pneumatique, en dehors de son usage en service a une durée de vie limitée dépendante de sa destination. Un pneu hiver disposant d'une qualité de caoutchouc adaptée au froid aura une durée de vie plus limitée comparé à un pneumatique d'été.

Une attention particulière sera portée aux pneumatiques, montés sur véhicule et qui roulent peu. Ces conditions sont plus défavorables que si le pneumatique était simplement stocké, car il est soumis aux agents extérieurs et subit les contraintes mécaniques du véhicule.

6-B.4 L'ENTRETIEN ET LA SURVEILLANCE EN UTILISATION.

La surveillance, éventuellement par un homme de l'art, est un facteur de sécurité fondamental. Il convient de :

- **examiner** régulièrement l'aspect de l'usure pour détecter le plus tôt possible toute apparition de défauts, comme une dégradation du train avant ou de la suspension.

- **vérifier** le ou les pneumatique(s) qui auraient eu un problème : choc trottoir ou avec une pierre, blocage d'une roue lors d'un freinage, etc. Cf. figs. 6.18, 6.19

- **vérifier** régulièrement la pression de gonflage. Un pneumatique est susceptible de perdre légèrement en pression avec le temps et quel que soit l'usage. Cf. fig. 6.3

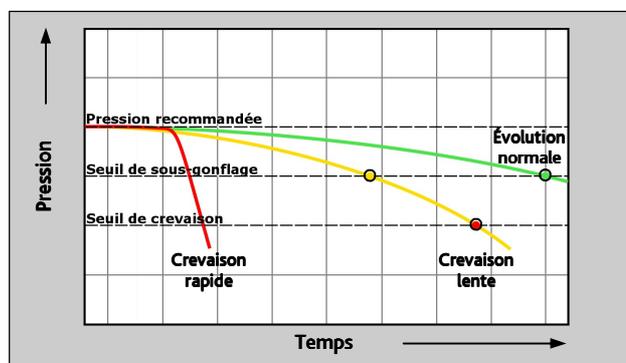


Fig. 6.3

Évolution de la pression de gonflage.

6-B.5 QUAND FAUT-IL REMPLACER UN PNEUMATIQUE ?

a) Lorsque l'**usure** de la bande de roulement arrive au niveau des témoins d'usure. Ces témoins sont situés en fond de gorge, le plus souvent dans les rainures longitudinales. Ce témoin est en élévation d'une hauteur de 1,6 mm par rapport au fond de gorge. Rouler avec une profondeur de sculpture inférieure à 1,0mm est une infraction au code de la route. Cf. fig. 2.30

Plus généralement la « lecture » de la bande de roulement est riche d'enseignements. L'analyse faite de son examen va permettre d'en déduire : le mode de con-

duite du conducteur, et l'état mécanique de la suspension.

b) Bien sûr et cela va de soi, dès qu'il y a un **doute**, suite à un incident de roulage : choc, roulage sur un obstacle, etc...

Le remplacement devra conserver l'**homogénéité** de la monte pneumatique sur le véhicule. Un pneu radial sera remplacé par un pneu radial et de préférence de même marque.

6-C LE MONTAGE.

Les professionnels utilisent dans la majorité des cas des machines semi-automatique pour réaliser les différentes opérations, d'abord de dépose de l'ancien pneumatique puis de pose du nouveau.

Il est recommandé de porter une attention particulière à la roue, notamment aux bords d'appui du talon, pour s'assurer qu'ils n'aient aucun défaut de forme provoqué

par un choc et qu'ils soient parfaitement propres. En effet, lors du travail de flexion et d'étirement des flancs, des poussières, de la boue, du sable peuvent venir se fixer dans la zone d'appui du talon. Il ne faut pas oublier que la totalité des efforts transmis par le pneumatique à la roue passe par cette surface.

6-D L'ÉQUILIBRAGE.

Le pneumatique est solidaire d'une roue et cet ensemble roue/pneumatique tourne autour d'un axe défini par le moyeu de roue. Dans le cas particulier d'une roue directrice, cet ensemble tourne également autour de l'axe du pivot. Une roue directrice, est soumise à deux mouvements de rotation :

1°) une rotation autour de l'axe défini par le moyeu, c'est le roulement du pneumatique.

2°) une rotation autour de l'axe défini par le pivot, c'est le braquage nécessaire à tout changement de direction.

Un ensemble roue/pneumatique a la forme générale d'un disque épais, qui, dans sa configuration parfaite, possède un centre de gravité situé sur son axe de rotation qui est aussi un axe de symétrie. Cela signifie qu'un ensemble parfait, sollicité autour de son axe de rotation est en permanence en équilibre indifférent.

Le système roue/pneumatique est un assemblage de masses distinctes. Dans un tel montage devant tourner autour d'un axe commun, il y a risque d'oscillations parasites. Les principales causes sont :

6-D.1 LES BALOURDS.

Ils proviennent de défauts dans la répartition des masses sur l'ensemble : roue/pneumatique. Sur véhicule, ce défaut induit des vibrations verticales, sensibles sur le plancher, le tableau de bord et les sièges. Plus un défaut sera éloigné de l'axe de rotation, plus il sera perturbant. Ces défauts peuvent être localisés :

a) dans le plan médian de l'ensemble. Cf. fig. 6.4

Le centre de gravité du système n'est plus sur l'axe de rotation, ce qui crée un déséquilibre statique. Sous l'effet de la pesanteur, la roue oscille comme un pendule, jusqu'à trouver son équilibre lorsque la partie la plus lourde se trouvera au plus bas, sur la verticale passant par l'axe de rotation. Lors de la rotation, ce balourd, encore appelé **balourd statique** va créer une force centrifuge :

$$F_c = m \times \frac{\omega^2}{R}$$

proportionnelle au carré de la vitesse de rotation.

m = Masse de du balourd.

ω = vitesse angulaire de rotation.

R = rayon et dans notre cas, distance entre ce balourd et l'axe de rotation.

b) dans un plan qui n'est pas contenu dans le plan médian. Cf. fig. 6.5

Les masses composant ce balourd, encore appelé **balourd dynamique**, n'étant pas dans le plan médian, et étant soumises à la force centrifuge vont provoquer une oscillation dans un plan perpendiculaire à ce plan médian. Cette oscillation est aussi appelée : « shimmy ». Ce défaut se traduit sur le véhicule par des oscillations du volant. Cf. fig. 6.6

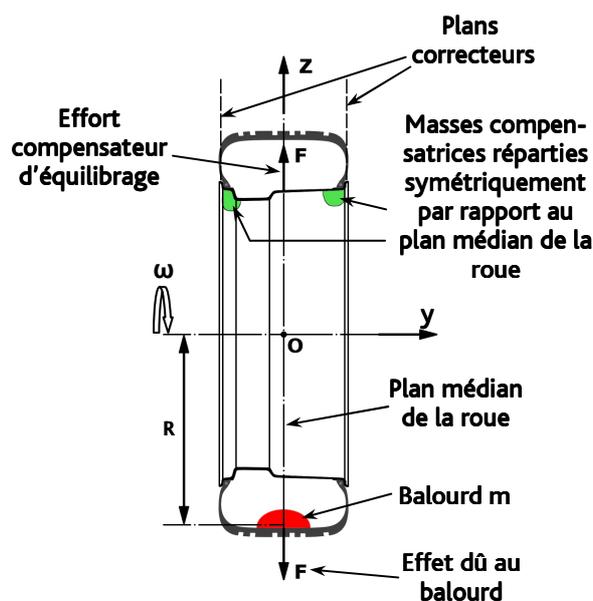


Fig. 6.4

Balourd statique et sa compensation.

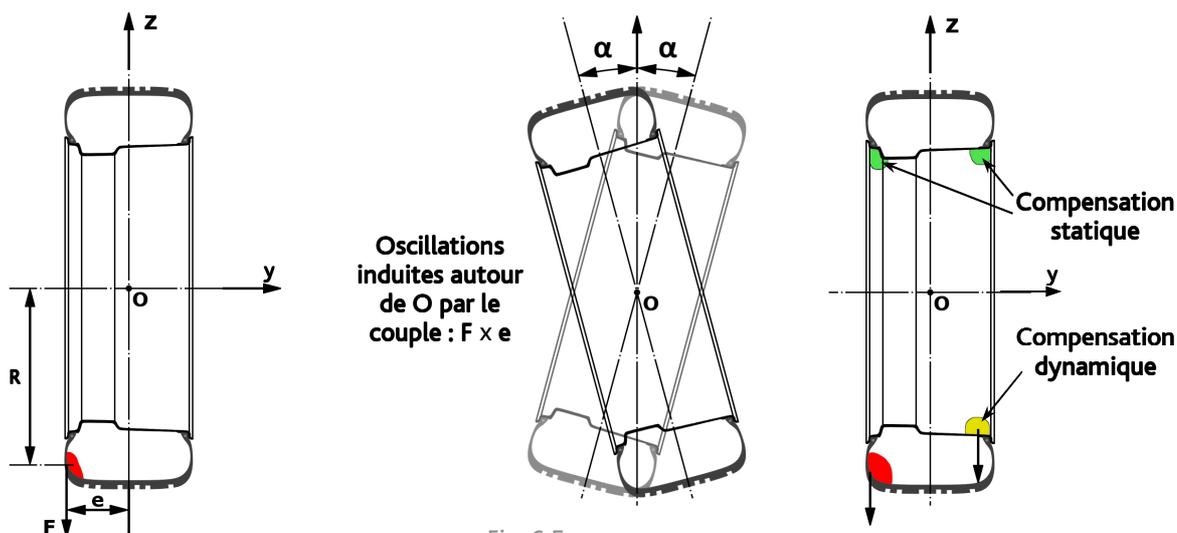


Fig. 6.5

Balourd dynamique et sa compensation.

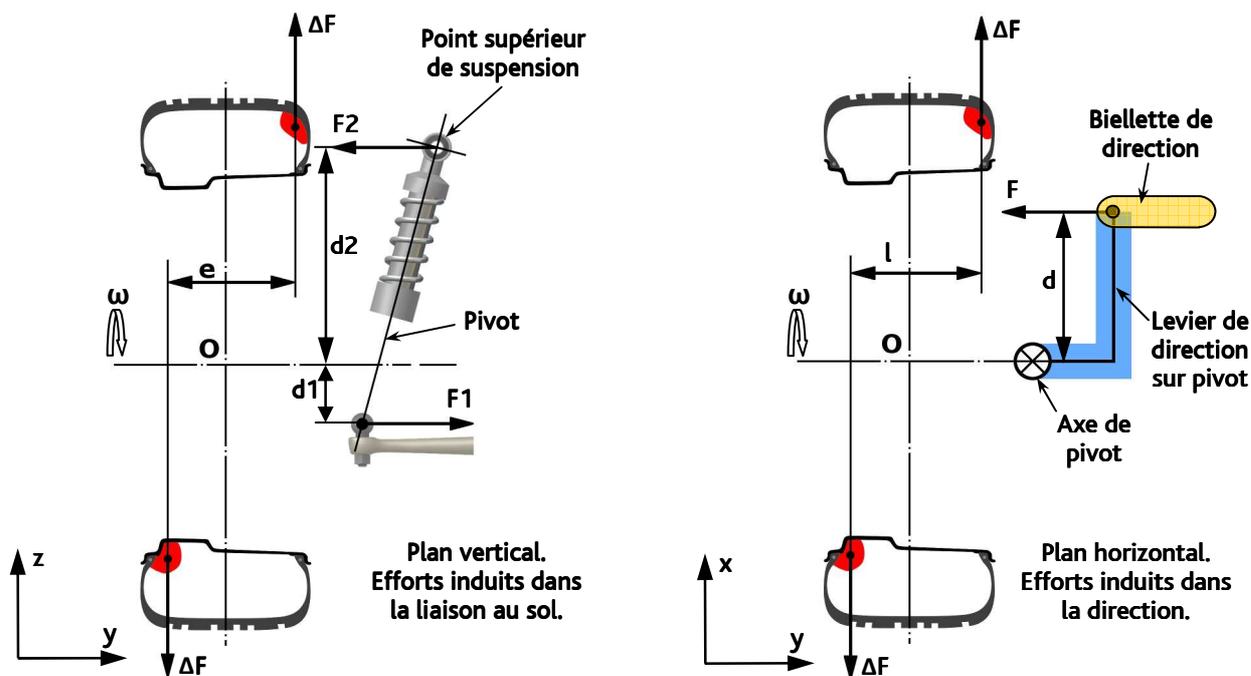


Fig. 6.6

Effet de balourd dynamique sur la suspension et la direction.

6-D.2 LES FAUX-RONDS.

Il s'agit des défauts géométriques sur le rayon qui affectent le pneumatique et la roue. Cf. fig. 6.13 Ces défauts sont induits par les tolérances de fabrication. Lorsque l'ensemble roue/pneumatique tourne autour de l'axe de rotation du moyeu, la pose d'un comparateur sur la périphérie du pneumatique fait apparaître un rayon maxi et un rayon mini. Ce défaut s'ajoute au balourd statique.

Le défaut de faux-rond inclut le défaut de centrage de la roue sur le moyeu, centrage qui est réalisé de deux

méthodes distinctes : Cf. § 4-D.2

a) Par les vis de fixation, c'est la méthode la plus ancienne qui, par les imprécisions qu'elle crée ne permet pas une vitesse de rotation importante.

b) Par un alésage central, qui est devenu la méthode la plus courante. Le voile de roue dispose d'un alésage qui vient s'encaster sur un promontoire circulaire du moyeu. Cette disposition permet une plus grande précision de centrage. Les vis ne servant alors qu'à la fixation de la roue sur le moyeu. Cf. fig. 6.8

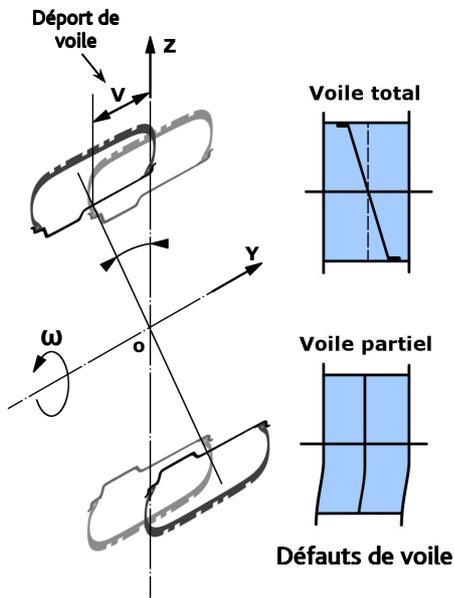


Fig. 6.7

Oscillation induite par un voile de roue.

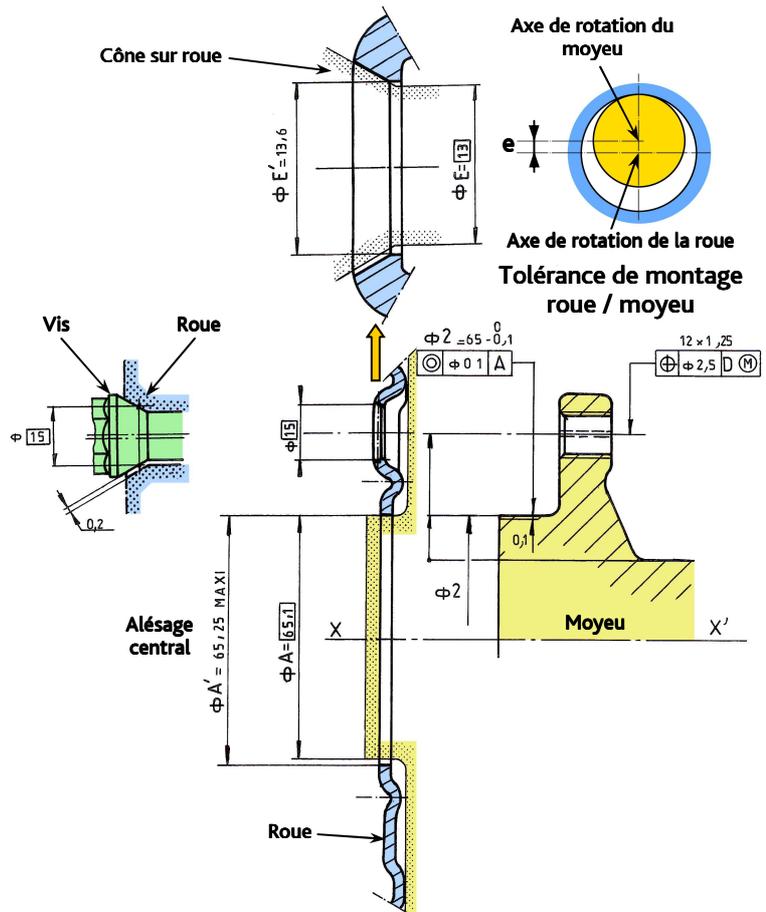


Fig. 6.8

Tolérances.

6-D.3 LE VOILE DE ROUE.

Une roue est composée d'une jante, partie circulaire qui va supporter le pneumatique et d'un voile, partie « plane » sur laquelle est fixée la jante et qui permet la fixation de l'ensemble roue/pneumatique sur le moyeu. Selon le type de roue, en tôle ou en métal coulé, la

fabrication impose des tolérances de positionnement de ces deux éléments. Ces tolérances ont pour effet de provoquer sur un tour de roue une oscillation du plan médian identique à celui produit par un balourd dynamique. Cf. figs. 6.7 et 6.9

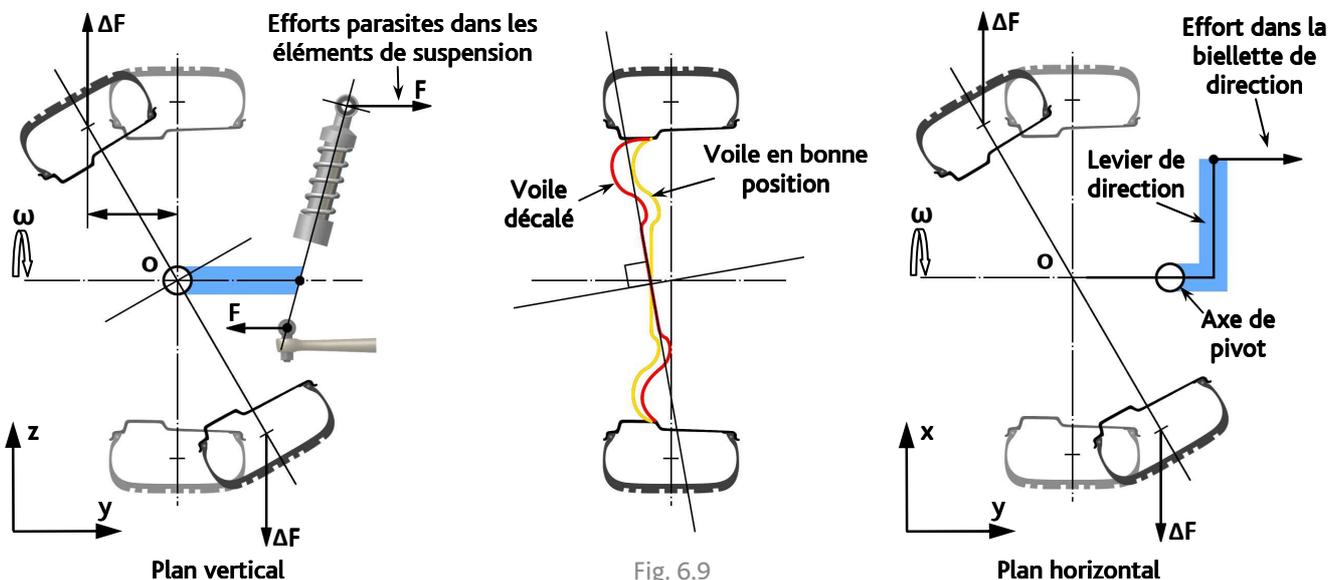


Fig. 6.9

Effet d'un défaut de voile sur la suspension et la direction.

6-D.4 L'INFLUENCE DE CES DÉFAUTS.

L'ensemble de ces défauts va entraîner des perturbations lors du roulement du véhicule. Ces perturbations vont se ressentir selon les **deux degrés de liberté** qu'autorise la liaison au sol du véhicule : Cf. figs. 6.6 et 6.9

a) **Verticalement** suivant le mouvement de la suspension. Selon l'ampleur des défauts, cela se ressentira sur le confort par des tressautements. Cela provoquera une fatigue anormale des éléments de suspension avec, en priorité, l'amortisseur.

b) **Horizontalement**, se manifestant par une rotation autour de l'axe de pivot. Cela va introduire, via le système de direction des oscillations du volant, particulièrement désagréables et une fatigue anormale des rotules et autres composés du système de direction.

Ces deux mouvements parasites vont faire varier la position du plan de la roue en rotation et ainsi induire un **effet gyroscopique**. Cf. fig. 6.10

Cet effet gyroscopique s'explique par l'observation du comportement d'une bicyclette sur la route, guidon libre. Tant que le poids du cycliste est à la verticale de l'axe de contact des deux roues au sol, la bicyclette avance en ligne droite. Si le cycliste se penche d'un côté. Cela provoque un décalage entre la verticale du poids et l'axe de contact. Ce décalage crée un couple perturbateur qui va agir sur les roues, animées d'une inertie de rotation. Mais la roue AV a la possibilité d'un mouvement de rotation supplémentaire, en tant que roue directrice. L'effet gyroscopique appliqué à l'inertie de rotation de la roue AV, va provoquer son braquage

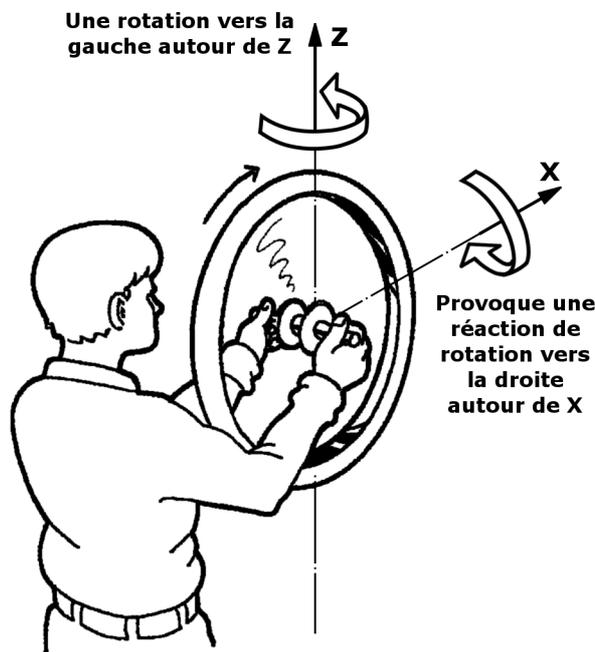


Fig. 6.10

Effet gyroscopique.

dans le sens de l'inclinaison. Ce phénomène est appelé : **précission**. Si le cycliste se penche sur la droite, la roue AV va braquer vers la droite et inversement si le cycliste se penche sur la gauche.

6-D.5 LA CORRECTION DE CES DÉFAUTS.

La première chose à faire est de chiffrer l'ampleur du défaut, ensuite la solution dépendra du véhicule utilisé, de son poids, et en priorité de sa vitesse. Un véhicule de 2,0t, avec 300ch et roulant à 200km/h demandera une précision et une réduction des tolérances qui n'auront rien de comparable avec une voiture sans permis de 400kg, avec 30ch et roulant à 50km/h.

Bien sûr, l'opération d'équilibrage se fera sur une roue parfaitement propre, nettoyée s'il le faut et exempte de tout défaut : chocs, déformations notamment sur les bords de jante, fissurations dans le cas des roues en alliage.

a) **l'équilibrage peut se faire selon deux méthodes distinctes :**

- L'ensemble roue et pneumatique déposé du véhicule. Cet ensemble est positionné sur une machine d'équilibrage, plus ou moins automatique, qui définira les opérations à effectuer.

- L'ensemble roue + pneumatique reste en place sur le véhicule. La roue est maintenue soulevée du sol par

un support positionné aussi près que possible du pivot. Ce support comporte un capteur d'effort qui va enregistrer les variations de charge lorsque la roue sera mise en rotation par un galet extérieur.

Cette solution présente l'avantage de vérifier l'équilibrage de l'ensemble de la partie tournante, roue et pneumatique, mais aussi moyeu et disque de frein. Donc la mesure est plus complète et intègre les tolérances de montage de la roue sur le moyeu.

Dans le cas d'un essieu propulseur, cela fait tourner la transmission et le différentiel, ce qui peut perturber la mesure. De même, si la roue doit être déposée pour une intervention mécanique, par ex. sur les freins ou la suspension, sa position sur le moyeu doit être repérée pour être remontée dans la même position.

La mesure se faisant roue décollée du sol, il sera nécessaire de prendre la précaution de ne pas trop lever la roue, pour que la cinématique de suspension ne modifie que légèrement le carrossage. Pour être fiable, une telle méthode doit conserver un plan de roue aussi proche de la verticale que possible.

b) **le défaut de voile.** Selon l'ampleur, ce sera le remplacement de la roue.

c) **le défaut de faux-rond.** Il s'agit de définir d'où vient le défaut : de la roue ou du pneumatique ou des deux. Cela se vérifie à l'aide d'un comparateur placé sur la périphérie du pneumatique. En faisant tourner l'ensemble roue/ pneumatique autour d'un axe de référence, il est relevé la position géographique du rayon le plus grand et du plus petit. Ensuite, le pneumatique est déposé pour faire la même opération sur la roue. La confrontation des valeurs sera une orientation de la conduite à tenir : déplacer le pneumatique sur la roue, pour compenser les deux faux ronds, ou changer de composants. Cf. fig. 6.11

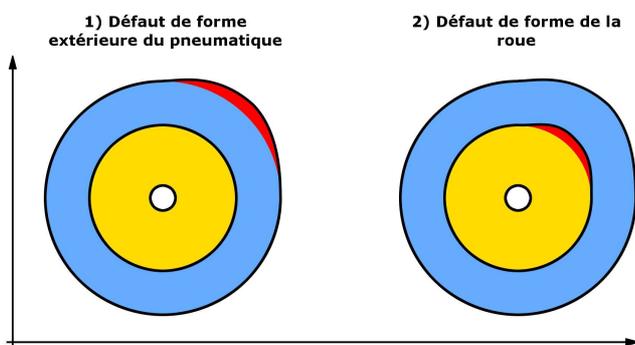


Fig. 6.11

Défauts géométriques.

Il sera prudent de vérifier la fixation de la roue sur le moyeu afin que les axes de rotation, moyeu d'une part et roue d'autre part, ne soient pas trop différents. C'est une source souvent oubliée de faux-rond. Cf. fig. 6.8

d) **le défaut de balourd.** C'est le plus simple à résoudre. Il s'agit d'ajouter des masses en grandeur et position pour contrer l'effet du balourd. Mais il y a tout de même une difficulté à résoudre : où positionner ces masses additionnelles ? En pratique, ces masses sont situées dans les deux plans correcteurs que forment les deux rebords de la roue. Mais comme ces deux plans sont distincts du plan médian, toute masse ajoutée créera un balourd dynamique, qu'il faudra compenser.

Un balourd statique devra être compensé par deux masses dont la somme sera équivalente à celle du balourd, une dans chacun des plans correcteurs, et situées diamétralement opposées au balourd à corriger. En rotation, les forces induites par le balourd et par les masses de compensation s'équilibreront.

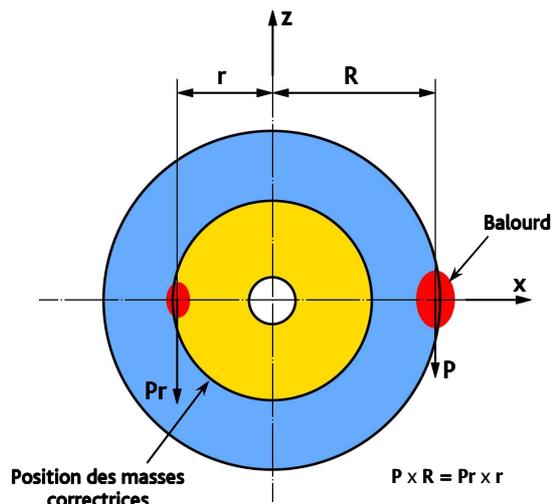


Fig. 6.12

Équilibrage statique.

Un balourd dynamique est un peu plus complexe, car il faut d'abord compenser la force centrifuge du balourd mais aussi le couple créé par le fait que ce balourd n'est pas dans le plan médian, mais dans un plan qui se situe entre ce plan médian et le plan correcteur. Le principe consiste à équilibrer statiquement le balourd en plaçant une masse identique diamétralement opposée et du même côté par rapport au plan médian et une deuxième masse, sur l'autre plan correcteur pour compenser l'effet de couple induit par la masse rapportée et le balourd. Cf. figs. 6.5, 6.12, 6.13

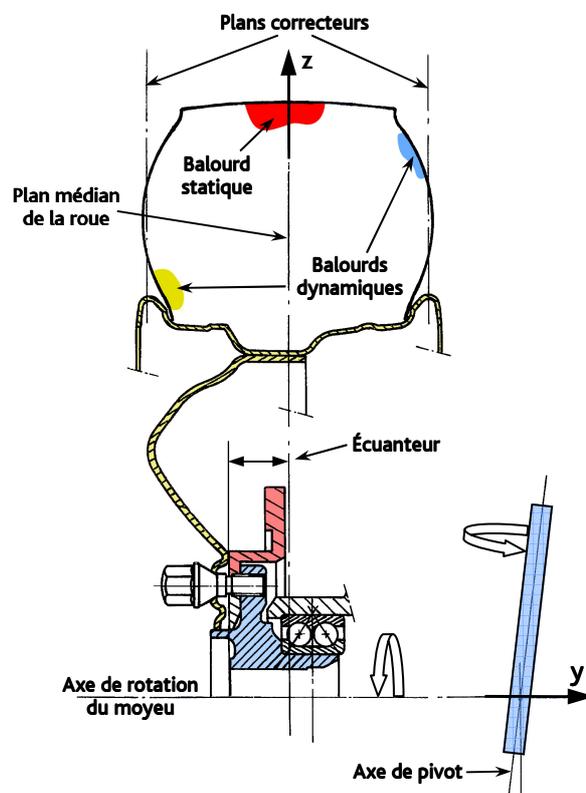


Fig. 6.13

Montage d'une roue AV sur son moyeu et position des plans correcteurs.

6 — [L'ENTRETIEN ET LA MAINTENANCE]

Les machines d'équilibrage actuelles définissent directement les masses à ajouter et l'endroit sur la périphérie de la roue où elles doivent être ajoutées.

e) les masses d'équilibrage. Elles servent à contrer les balourds, il est donc choisi un matériau de forte densité, comme le plomb. Ces masses doivent être solidement fixées dans le plan correcteur pour ne pas se décrocher sous l'effet de la force centrifuge créée par la rotation de la roue.

La forme de la masse, son type d'accrochage vont dépendre de la roue : emboutie en tôle ou en alliage. La forme géométrique d'accrochage dans les plans correcteurs ne seront pas les mêmes et chaque fois adaptée à la spécificité de la roue.

Ces masses sont disponibles de 5 grs en 5 grs., jusqu'à un maxi de 85 grs. En effet, s'il est nécessaire d'installer une masse supérieure, cela signifie un problème majeur sur l'ensemble roue + pneumatique.

6-E LES INCIDENTS, CAUSES D'USURE ANORMALE ET DE DÉTÉRIORATION.

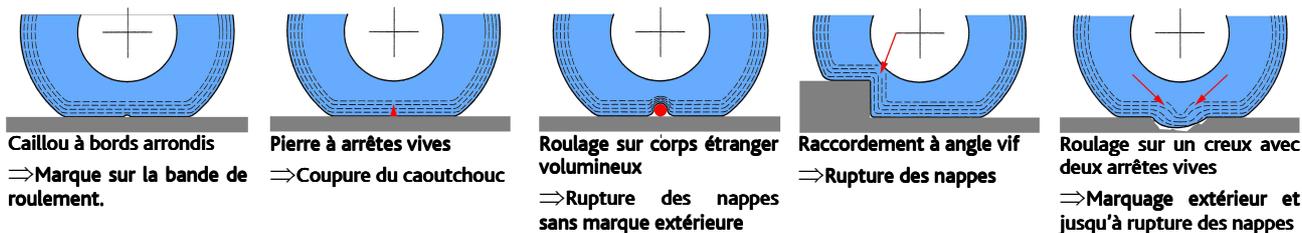


Fig. 6.14

Les principaux types de blessures.

L'objectif de ce chapitre est de passer en revue les principaux incidents pouvant se produire sur et autour d'un pneumatique, et leurs conséquences. Ces incidents touchent : -le pneumatique, -la roue, -le véhicule et sa conduite.

6-E.1 LA CREVAISON OU CHUTE DE PRESSION DE GONFLAGE.

Il s'agit de l'incident le plus fréquent, bien que statistiquement, le nombre de crevaisons par véhicule ne cesse de diminuer.

Les différents cas de perte de pression de gonflage.

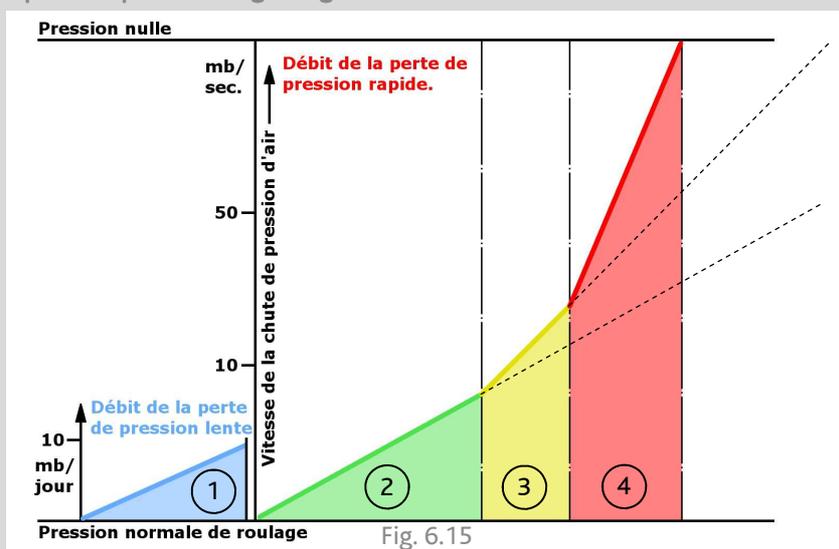


Fig. 6.15

Zone 1 : Perte lente considérée comme normale et due à :
 - la porosité du caoutchouc.
 - l'étanchéité de la valve.
 - l'absence de bouchon de valve.

Zone 2 : Perforation par un objet de faible diamètre : < 2mm et restant prisonnier dans le pneumatique. La rapidité de perte de pression va dépendre du diamètre de l'objet.

Zone 3 : Perforation par un objet de gros diamètre ou perte de l'objet perforateur.

Zone 4 : Endommagement rapide : coupure d'un flanc par choc, par pincement avec la roue en cas de sous gonflage.

a) La crevaison. La crevaison se caractérise, par un défaut d'étanchéité, sous forme d'une fuite plus ou moins rapide de l'air contenu dans le pneumatique Cf. figs. 6.3 et 6.15. La fuite est provoquée par le perçage de la bande de roulement ou d'un flanc par un objet extérieur, clou, pierre, etc. sans affecter la carcasse.

La chute de pression qui en résulte reste une panne sérieuse par les conséquences sur le comportement dynamique du pneumatique, notamment l'augmentation de sa dérive. Cette augmentation de dérive peut rendre le véhicule instable et dangereux. Une chute de pression sur une roue AV se ressent par un alourdissement progressif de la direction, et l'augmentation de la dérive aura un effet sous-vireur. La même chute de pression sur une roue AR se traduit par une tendance à l'embarquée par augmentation de la dérive sur l'essieu AR, et donnera au véhicule une tendance sur-vireuse. .

Une crevaison, due à un clou de petite dimension, peut généralement se réparer, à condition que le véhicule s'arrête immédiatement une fois l'incident constaté. Pour un pneu Tubeless, cette réparation consiste à coller une cheville dans la perforation. Bien sûr, aucune pièce vitale du pneumatique ne doit être touchée. Cette opération doit se faire dans un atelier spécialisé.

b) Une chute brutale de pression, encore appelée « **éclatement** ». Il s'agit d'une rupture totale, risquant de provoquer une soudaine perte de contrôle du véhicule, car la surprise peut être totale pour le conduc-

teur. Le véhicule s'affaisse instantanément du côté de la roue défectueuse et cela s'accompagne d'un bruit anormal. A l'AV, cela produit une perte de direction de la roue touchée et à l'AR, la perte du guidage latéral avec un risque d'embarquée. L'éclatement peut être la conséquence d'un roulage prolongé en sous gonflage ou en surcharge. Le phénomène est aggravé sous forte chaleur.

c) Une chute plus lente souvent appelée « **crevaison lente** » pourra alerter le conducteur par une évolution plus progressive du comportement. Selon les statistiques, 74% des crevaisons ont une durée de deux heures environ, temps écoulé entre une pression normale de roulage et une pression zéro.

L'expérience montre qu'un conducteur ne se rend compte d'une perturbation que lorsque la pression atteint 1,0 bar. Cela a amené les manufacturiers et équipementiers à proposer des moyens de contrôle installés directement dans l'ensemble roue/pneumatique : les **SSPP** (Système de Surveillance de la Pression des Pneumatiques). Ces systèmes constitués de capteurs mesurent la pression et envoient l'information, toutes les minutes, à un récepteur situé dans le passage de roue. L'alerte est donnée lorsqu'un seuil mini prédéterminé est atteint.

Ces systèmes SSPP deviennent obligatoires et à partir de novembre 2012, la réglementation européenne ECE/324 impose aux constructeurs d'équiper leurs nouveaux modèles de cet équipement

6-E.2 LES DÉCHIRURES.

Les déchirures sont des coupures et entailles plus ou moins profondes qui affectent la carcasse et le caoutchouc, qui se produisent suite au roulage sur un obstacle : pierre, débris, etc... La chute de pression peut être brutale.

Un autre exemple de ce type d'incident est le choc contre un trottoir Cf. fig. 6.16 La bordure de ce trottoir, particulièrement tranchante, vient découper le flanc extérieur du pneumatique. La déchirure sera d'autant plus accentuée qu'il pleuvra, l'eau étant un excellent lubrifiant de coupe du caoutchouc.

Un incident très proche peut arriver en cas de choc avec une pierre de bonne taille. Le flanc se déforme et se trouve « pincé » entre la pierre et le bord de jante, ce qui provoque une déchirure verticale. Plus la hauteur du flanc est réduite, et la pression basse, plus le risque d'un tel incident sera grand. Cf. fig. 6.17 et 6.18



Fig. 6.16

Blessure sur une bordure de trottoir.

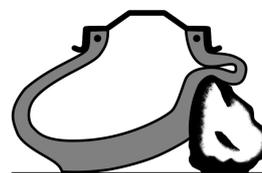


Fig. 6.17



Fig. 6.18

Pincement d'un flanc entre une pierre et la jante.



Fig. 6.19

Roulage sur un objet volumineux : risque de rupture de nappe.

6-E.3 LA HERNIE.

Un roulage sur un obstacle peut provoquer un choc, sans que soit constatée une perte de pression. Mais la carcasse peut être endommagée. Cela se traduit par l'apparition d'une boursouflure sur le flanc une **hernie**. Elle a l'aspect d'une bosse rectangulaire, allant du talon

à l'épaule. Cela signifie un déplacement, voire une rupture de fils dans la nappe radiale et un passage de l'air entre la carcasse et la peau du flanc. Un tel incident nécessite le remplacement du pneumatique.

6-E.4 LES COUPURES ET ARRACHEMENTS DE CAOUTCHOUC.

Il est surtout possible d'identifier ce type d'incidents lors de roulage sur sol meuble, gravillonneux et pierreux, ou encore sur les routes dont la couche de roulement est détériorée ou mal entretenue et qui présentent des trous, sillons, etc...

Il s'agit de petites entailles, allant jusqu'à de petits arrachements ponctuels du caoutchouc de la bande de roulement par des pierres à bords coupants. Le phénomène se produit plutôt lors des démarrages et lors des freinages. L'humidité et un excès de pression facilitent ces incidents.



Fig. 6.20

Détérioration par arrachement local et coupures.

6-E.5 LA DÉLAMINATION.

La délamination est la rupture d'adhésion entre deux couches de renfort de la ceinture. La cause en est une charge et une température trop élevées. Cet incident n'est pas toujours visible de l'extérieur et se ressent par le comportement du véhicule.

6-E.6 LES USURES.

Tout pneumatique qui roule s'use et cette usure est proportionnelle au nombre de contacts du pavé de caoutchouc sur la route. Il en résulte qu'une roue de petit diamètre, 13" par exemple, s'usera plus rapidement qu'une roue de 16" à vitesse véhiculaire identique, car la roue de 13" effectuera un nombre de tours plus important. Différents cas d'usures anormales peuvent apparaître :

a) Une usure régulière mais prématurée. L'usure est visuellement normale sur la bande de roulement, mais le kilométrage est particulièrement faible. Cela peut être dû à plusieurs causes parmi lesquelles dans la majorité des cas, le pneumatique est concerné :

- La charge et la pression de gonflage. Un pneumatique a un facteur de charge maxi défini auquel correspond une pression de gonflage. Un pneumatique, surchargé de 20% ou sous-gonflé de 20% voit sa durée de vie réduite de 30%.

- Les conditions de roulage : conduite sportive sur des parcours sinueux et abrasifs ou routes de montagne. Dans ce cas, un examen du besoin s'impose et le choix d'une taille supérieure de pneumatique est à envisager.

- Le non-respect de l'indice de vitesse. Sur chaque pneumatique est inscrit son indice de vitesse. Ne pas le respecter induit une usure prématurée et même un risque d'éclatement. Là aussi, le choix d'une autre monte sera à envisager.

- La température. L'expérience montre qu'un pneumatique donné, monté sur une voiture roulant à 80 km/h, usera trois fois plus de caoutchouc à 30°C qu'à 4°C. C'est un nouvel exemple nécessitant la remise en cause de la dimension.

b) Une usure anormale. Cf. fig. 6.21 Les causes sont multiples. Cela peut concerner le pneumatique comme le véhicule et sauf dans le cas d'un pneumatique inadapté à son emploi, la cause majeure est un défaut d'entretien.

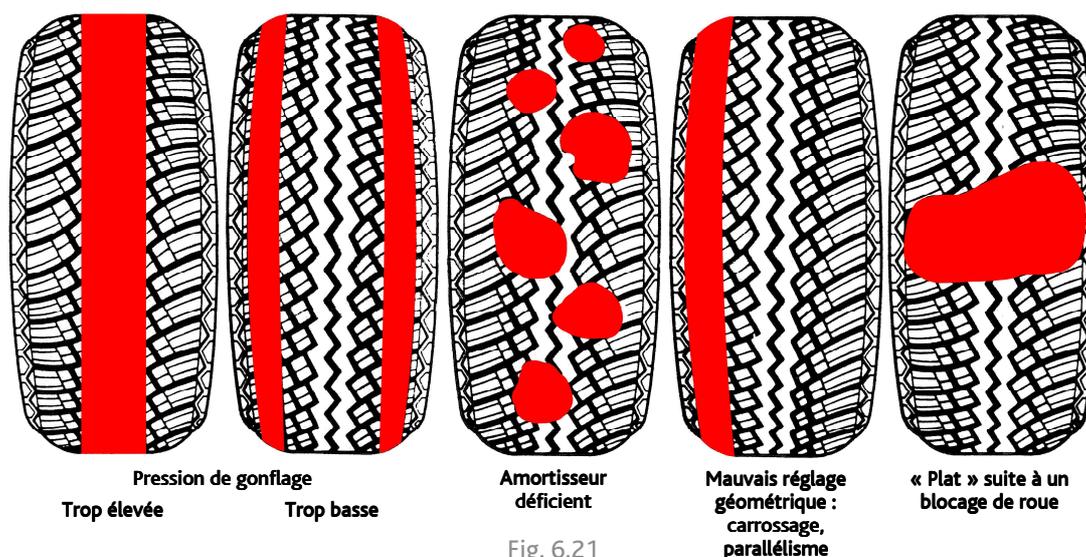


Fig. 6.21

Différents cas d'usure anormale.

- Une **pression** non conforme : Sur et sous-gonflage. Un sous-gonflage va provoquer une usure prématurée des épaules, alors qu'un sur-gonflage provoquera l'inverse, l'usure du milieu de la bande de roulement. Si le sous-gonflage est important et sur une longue période, l'échauffement résultant peut provoquer une détérioration de la carcasse avec un délaminage des nappes et des modifications dans les chaînes de polymérisation du caoutchouc.

- Un **blocage** de roue. La roue ne tourne pas, mais le véhicule garde une vitesse. Il y a usure localisée de la bande de roulement, il se forme un « plat ». Le résultat est une irrégularité de déroulement au tour de roue et un balourd provoquant une excitation de la suspension. A la vitesse de résonance, cela peut être destructeur pour l'amortisseur.

- Le **décollement** de la bande de roulement. C'est un défaut rare, qui affecte un pneumatique très sollicité provoquant des élévations de température concentrées sur un épaulement, en général du côté extérieur. Cf. fig. 6.23



Fig. 6.23

Début de décollement de la bande de roulement sur une épaule



Fig. 6.22

Exemple d'usure par forte charge allié à une température élevée du sol.



Fig. 6.24

Sur l'épaulement extérieur, la sollicitation déforme le pavé de caoutchouc, duquel il ne reste qu'une fine languette de bordure.

Exemples d'usure due à une utilisation extrême.

- Un **défaut** du véhicule, provenant : Cf. fig. 6.21

- D'un **défaut de parallélisme**, avec excès de pincement ou d'ouverture. L'usure apparaît plus rapidement sur une épaule, extérieure pour un excès de pincement et intérieure pour un excès d'ouverture.

- Du **jeu** dans les organes de guidage. C'est le cas d'articulations de triangles ou de rotules, usées et ayant pris un jeu excessif. Les usures sont alors irrégulières, par vagues.

- Des **amortisseurs** fatigués ou hors d'usage. Les mouvements de la roue n'étant plus freinés, elle rebondit comme une balle sur la route. Ces rebonds provoquent de nombreuses variations de charges verticales à chaque tour de roue. Lorsque la charge augmente, la pression au sol augmente donc l'usure. Cela se traduit par une usure en « facettes », par zones distribuées irrégulièrement sur la circonférence.

Ces deux derniers cas deviennent de plus en plus rares grâce au contrôle technique régulier et obligatoire des véhicules.

- D'un excès de **carrossage**, positif ou négatif. Un excès de carrossage positif va provoquer une usure excessive de l'épaulement extérieur et de l'épaulement intérieur pour un excès de carrossage négatif.

c) La permutation. Selon la position du pneumatique sur le véhicule et en dehors de tout défaut, l'usure ne sera pas identique selon qu'il sera : **1°**) porteur, **2°**) porteur et moteur, **3°**) porteur, moteur et directeur. C'est cette dernière configuration, celle de tous les véhicules à traction AV, qui est la plus pénalisante.



Fig. 6.25

L'usure de ce pneumatique montre des arrachements de la bande de roulement et une usure excessive de l'épaule intérieure. Il est sous dimensionné pour son usage et a roulé avec un excès de pression de gonflage et un excès de carrossage négatif.

La permutation consiste à régulièrement, par exemple tous les 10.000kms, changer la position d'un pneumatique sur le véhicule, afin d'équilibrer les usures. Un pneumatique qui vient de rouler à l'AV est placé à l'AR et réciproquement. Cette pratique très utilisée par le passé est quasiment abandonnée.

6-F COMMENT POURSUIVRE SA ROUTE ?

Ces incidents (crevaisons, éclatements, déchirures, etc.) ne permettent pas de poursuivre sa route. Rouler avec un pneumatique dont la pression d'air est nulle ne lui permet plus de remplir sa fonction pneumatique. L'absence de pression d'air supprime le maintien des talons dans les bords de jante ; il y a dès lors risque de déjantage. La bande de roulement ne peut plus se dérouler dans le plan de la roue et les flancs n'ont plus de rigidité. Rouler dans ces conditions amène la destruction très rapide du pneumatique, avec le risque d'irréparabilité.

Poursuivre sa route nécessite de remplacer la roue endommagée. C'est le rôle de la roue de secours.... si toutefois votre véhicule en est encore doté. En effet, une roue de secours, c'est du poids, un volume, un outillage de remplacement : cric, manivelle, et un coût, que l'on « promène » trop souvent sans l'utiliser.

Par contre, lorsqu'elle existe, il est toujours utile de vérifier que la roue de secours est en état de fonctionner

6-F.1 LE KIT DE RÉPARATION.

Progressivement, la roue de secours est remplacée par le kit de réparation, lequel est constitué d'une bombe sous pression contenant une mousse à base de latex et de polymères, qui vient obstruer l'orifice de fuite et regonfler le pneumatique. Cette réparation est prévue durer le temps nécessaire pour rejoindre une station

permettant de procéder à une réparation définitive. Malheureusement, pour être définitivement réparé, le pneumatique doit être nettoyé de cette mousse, opération fastidieuse et qui prend du temps. Aussi, le réparateur proposera très souvent un pneumatique neuf.

6-F.2 LA ROUE GALETTE.

Une roue de dimension réduite encore appelée « **Roue galette** ». La réduction de taille répond au besoin de réduire le volume pris par cette roue dans le coffre à bagages, mais ne supprime pas l'outillage. Cette roue qui possède une structure très renforcée est gonflée à une forte pression : 7 à 8 daN / cm². Une fois

montée sur le véhicule en remplacement de la roue crevée, il est possible de rouler, mais à allure réduite, le temps de trouver un garage pour procéder à la réparation. Une roue « galette » est une roue temporaire à usage restreint.

6-F.3 L'APPUI CENTRAL.

Le véhicule peut être équipé d'origine, d'un système installé à l'intérieur du pneumatique, qui lui permet de rouler sans pression. Il s'agit d'un « **appui** », une sorte de deuxième roue pleine en élastomère. Un tel système par ses contraintes de montage, nécessite une jante spécifique. En cas de crevaison, lors de l'affaissement des flancs, l'appui vient au contact de la face interne de la carcasse, celle qui est recouverte d'une pellicule de caoutchouc chargée d'assurer l'étanchéité à l'air. Le déroulement de la roue est assuré par ce contact. L'affaissement étant réduit, l'échauffement s'en trouve limité. Le montage du système permet le maintien des talons en position.

Un tel système permet de parcourir une distance variable selon sa hauteur et son volume : voisine de 100kms mais à vitesse réduite, et sans trop perdre en caractéristiques dynamiques : tenue de route, freinage. Autre avantage, le conducteur n'est pas obligé de s'arrêter sur le bord de la route pour changer la roue. Il garde la possibilité de rejoindre un réparateur.

Par contre, sa réparation demande souvent un outillage spécialisé qui n'est pas disponible dans tous les centres de réparation. L'augmentation de la masse semi-suspendue est sensible, ce qui ne sera pas neutre pour le comportement de la suspension.



Fig. 6.26

Système à appui central.

6-F.4 LE RENFORCEMENT DES FLANCS.

En cas de perte de pression, les flancs ne s'écrasent pas. Par contre, en roulage normal, ce principe pénalise la résistance au roulement et les caractéristiques de confort.

Pour plus de sécurité, il est recommandé d'installer sur les roues équipées de ces systèmes un indicateur de pression dans le véhicule de façon à prévenir le conducteur de la situation.

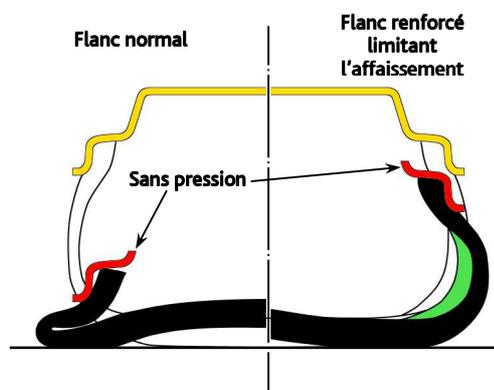


Fig. 6.27

Renforcement des flancs.

ANNEXE A. Tableau des indices de vitesse.

Indice	Vitesse
L	120
M	130
N	140
P	150
Q	160
R	170
S	180
T	190
U	200
H	210
V	>210

Tableau 7.1

ANNEXE B. Tableau d'équivalence Pouces (ou inchs) et Millimètres.

En pouces	En mm
10	254
12	305
13	330
14	356
15	381
16	406
17	432
18	457
19	483
20	508

Tableau 7.2

ANNEXE C. Tableau des indices de charge.

Indice de charge	Charge par pneu correspondante (Kg)	Indice de charge	Charge par pneu correspondante (Kg)	Indice de charge	Charge par pneu correspondante (Kg)	Indice de charge	Charge par pneu correspondante (Kg)
50	190	68	315	86	530	104	900
51	195	69	325	87	545	105	925
52	200	70	335	88	560	106	950
53	206	71	345	89	580	107	975
54	212	72	355	90	600	108	1000
55	218	73	365	91	615	109	1030
56	224	74	375	92	630	110	1060
57	230	75	387	93	650	111	1090
58	236	76	400	94	670	112	1120
59	243	77	412	95	690	113	1150
60	250	78	425	96	710	114	1180
61	257	79	437	97	730	115	1215
62	265	80	450	98	750	116	1250
63	272	81	462	99	775	117	1285
64	281	82	475	100	800	118	1320
65	290	83	487	101	825	119	1360
66	300	84	500	102	850	120	1400
67	307	85	515	103	875		

Tableau 7.3

ANNEXE D.

L'hystérésis (d'une racine grecque signifiant : Retard) est un phénomène qui apparaît sur un corps élastique. Un pavé de caoutchouc soumis à un effort de compression, va se déformer. L'enregistrement de l'effort = f (déformation) montre que la courbe de charge ne suit pas la droite **OA**, mais se trouve au dessus est qu'à la décharge, les courbes charge-décharge ne coïncident pas. Cf. fig. 7.4. Les points **B** et **D** correspondant à un effort nul ne sont pas confondus avec **O**, point de départ. Comme ces courbes ne coïncident pas, elles vont délimiter une surface qui représente l'hystérésis du matériau. Dès que l'effort cesse, le pavé reprend sa forme initiale mais avec un temps de retard. Ce phénomène entraîne une « perte d'énergie » : l'énergie dépensée pour produire la déformation n'est pas entièrement restituée lors de la phase retour. L'énergie perdue se transforme en chaleur dans la masse du matériau. La perte est proportionnelle à l'aire délimitée par les courbes : charge-décharge. L'expérience montre que l'hystérésis est fonction du temps (dans les sens de la durée) mis dans l'application de l'effort et de la température du matériau. L'hystérésis est une composante de l'adhérence d'un pneumatique sur le sol.

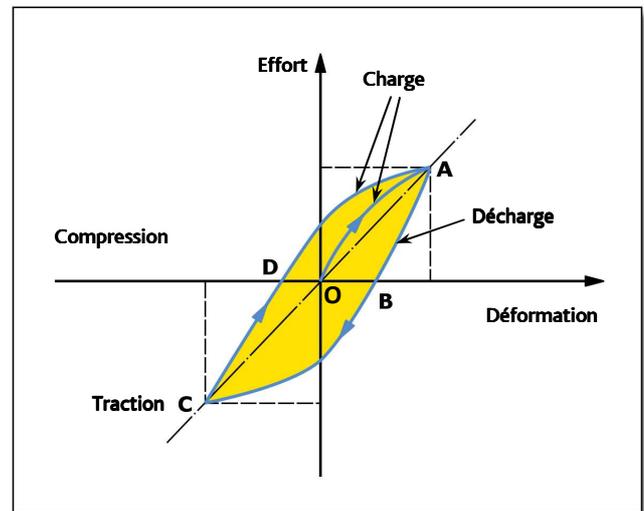


Fig. 7.4

8-1 SUPPORTS PÉDAGOGIQUES.

- MONATH François, Notes personnelles de l'auteur et son cours à l'Ecole de la Performance : « Châssis Automobile, Dynamique du Véhicule ».
- GATINAUD Fabien. Ecole de la Performance. Cours : « Dynamique Motocycles ».
- Alpha Encyclopédie. Grange Batelière. 1972.
- Techniques de l'ingénieur B800. BIGRETRoland. « Equilibrage des rotors ».
- CETIM. « Notion de matériaux à plusieurs composants de structure différente. Intérêt des matériaux composites ».
- Citroën. Documents du service Presse.
- Encyclopédie Intégrale Michelin 1984. « Le pneumatique de tourisme ».
- Goodyear. Documents techniques.
- Cours CLESIA 1968. HORDONNEAU F. « La dynamique du véhicule ».
- International Institute of synthetic rubber 1973. « Le caoutchouc synthétique, histoire d'une industrie ».
- Michelin. Divers documents techniques dont 2003 : « Le pneu : Résistance au roulement et basse consommation. l'adhérence ».
- Normes françaises enregistrées : BNA./AFNOR.
- Ecole des Mines de Douai. PABIOT J. 1989. « Particularités techniques des polymères et composites ».
- Pirelli. Divers documents techniques.
- Cours CLESIA. SIMON J. « L'adhérence ».
- EAEC International Congress 1995. WOHANDA U., ESSERS U. « Influence of water thickness on tyre force and moment characteristics measured on public roads ».

8-2 OUVRAGES.

- ADAMS Herb. HP Books. 1993. « Châssis engineering »
- ALEXANDER Don. Motorbooks International. 1991 ; « Performance handling ».
- ARAKI Kazuo et associés. SAE 960996. Study of tire model consisting of theoretical and experimental equations for vehicle dynamics analysis. Part 2 : « Under the condition of various velocity on the asphaltic road surface ».
- BASTOW Donald et HOWARD Geoffrey. Pentech Press et SAE 1993. « Car suspension and handling ».
- BROSSARD Jean Pierre. Presse polytechnique et universitaire romandes 2006. « Dynamique du véhicule, modélisation des systèmes complexes ».
- CAMPBELL Colin. Robert Bentley Inc 1991. « New directions in suspension design ».
- DELANNE Yves. LCPC. « Potentiel d'adhérence du couple pneumatique/chaussée ».
- DEUTSCH Charles. ONSER 1970. « Dynamique des véhicules routiers ».
- DIXON John C. Cambridge university Press 1991. « Tyres, suspension and handling ».
- DOVAT François. « Les pneumatiques ».
- FOALE Tony 2006 « Motorcycle Handling and Chassis Design ».
- GILLESPIE Thomas D. SAE 19992. « Fundamentals of vehicle dynamics ».
- HALCONRUY Thierry E.T.A.I. 19995. « Les liaisons au sol ».
- PACEJKA Hans B. Elsevier 2004. « Tyre and vehicle dynamics ».
- PIERRE J. ENSTA 1982. « Véhicules routiers ».
- PUHN Fred. HP Books 1901. « How to make your car handle ».
- RUTISHAUER J. Dunod 1941. « Roues élastiques ».
- SMITH Caroll. Aero Publishers Inc. 1978. « Tune to win ».
- WADE Allen R. SAE Technical paper 950312. « Tyre modeling requirement for vehicle dynamics simulation ».

8-3 REVUES PÉRIODIQUES.

- Auto-Concept fev-mars 99. « Alerte pression pneu ».
- La recherche aérospatiale N°6 1989. BARDON J.P. « Thermique des matériaux composites et des interfaces : situation et perspectives ».
- Décision Atelier. Juillet-août 2008 n°32 : « Michelin : le génie en héritage ».

- ATZ 102/2000. BECHERER Thomas. « The sidewall torsion sensor SWT ».
- Motor. January 1, 1983. « Cold rubber ».
- ATZ 95. BOKESH Alfred, DIECKMANN M., FREY A. « Deformation of tyre contour ».
- Automobil Industrie 1/87. BSCHORR Oskar. « Reduction in tyre noise ».
- SIA janv.février 87. DESCORNET G. « Influence des caractéristiques de surface sur la résistance au roulement ».
- Matériaux et Technique 97. DJEBBAR A., SALVIA M., DJELIL M. « Etude du comportement mécanique d'un matériau composite à fibres courtes sollicité au flambement ».
- Revue générale des routes et aérodrome. GARNIER M. « La météorologie française et la viabilité hivernale ».
- Le Premier Magazine de l'Automobiliste mars 1997 n°32. GOSSELIN Jean Pierre. « Les mots clés de la tenue de route ».
- SIA septembre 97. GRATIA M. « Résultats et méthodes nouvelles pour l'étude de la glissance des chaussées ».
- Auto-Concept mars-avril 96. GUYOT Roger. « Le pneu Michelin radial 50ans ».
- Auto-Concept février-mars 99. GUYOT Roger. « Pression pneumatique, une information de grande sécurité ».
- Le Moniteur de l'automobile n°1416 20/03/2008. HALCONRUY Thierry. « Qu'est-ce que l'agrément de conduite ».
- Automobil Industriem 4 1983. HEIMS Heiko. « Schwingungen vierrädriger Kraftfahrzeuge infolge unebener fahrbahnen ».
- ATZ Autotechnology 01-02-2008 vol8. KUCHLER Gregor et BEERSTECHE Ralf. « ITS the tyre information system of the future ».
- SIA Janv-fév 87. LEES G. « Rolling resistance. Some aspects of the effects of tyre construction, tyre pattern, and tyre compound ».
- Génie mécanique du caoutchouc 1997. LE MAITRE Olivier. « Influence du comportement viscoélastique des matériaux sur la résistance au roulement des pneumatiques ».
- Pétrole et Technique n°318 août-septembre 1985. LESAGE J. « Qu'est ce qu'une route ».
- SAE 1995. MILIKEN William F. et DOUGLAS L. « Race car vehicle dynamics and Chassis design principles and analysis ».
- Rubber world. June 1986. MULLER E. « Tire requirements from car manufacturer's point of view ».
- Race Car Engineering février 2008. ORTIZ Mark. « Radically speaking ».
- Le Figaro Magazine 5 sept 1998. RIZET Dominique, CHABOT Michel. « Le temps des pionniers ».
- Auto Hebdo 16 février 2005. « Le pneu sous pression ».
- Revue Automobile n°49 29.11.1990. « Il faut aussi roder les pneus ».
- Aviation et Pilote n° 231 1993. « Attention Pistes Glissantes ».
- L'Automobile Oct. 2011. « La roue de secours, elle nous manque déjà ».
- Auto Plus n°515 28.07.98. « Les roues ».
- Caoutchoucs et Plastiques n°826 Nov. 2004. « Contact pneumatique-route lors du roulement ».
- Le Journal de l'Automobile n°568 21.03.97. « Michelin a-t-il réinventé le pneu ».
- L'observatoire-véhicule-entreprise avril 2011. « Le grading : nouvelle réglementation sur l'étiquetage des pneumatiques ».
- Revue Le Pneumatique.
- Motor Janvier 1993. « Cold rubber ».
- Qualitique n° 48 avril 1993. « Les composites ».
- Race car vol 3 n°6.
- SIA n° 810 février 2011. « Repousser les limites de la résistance au roulement de pneumatiques ».
- SIA n° 818 juin 2012. « SSPP le schisme technologique ».
- SIA n° 728 avril 99. « Conti sur la voie du pneu intelligent avec le SWT ».
- Revue technique Automobile : - n° 421 avril 82. « Le réglage du train AV ». -n° 507 sept. 89. « Les facteurs du déséquilibre des roues ». -n° 611 novembre 98. « Dossier contrôle des trains ». -n° 586 juillet-août 1996. « Equipements, les pneumatiques grimpent 4 à 4 ».
- Voiture Ecologique mai-juillet 2012. « Enfin une solution pour recycler les pneus ».
- Pétrole et Technique n° 318 août-septembre 1985. « Le rôle du bitume sur la route ».
- Quattroruote fév. 1975. SCHRUF Werner. « Ogni auto ha la sua curva ».
- Road and Track vol 4 n°19 Mai 1996. SIMANAITIS Dennis. « Compound interest ».
- L'Usine Nouvelle : -n° 3073 18 octobre 2007. « Dossier caoutchouc, le renouveau d'une matière ». -n° 2549 15 mai 1996. « L'aluminium cherche à s'imposer dans la fabrication des roues ».
- Race car engineering sept.1995. VAN VALKENBURG Paul. « Pyro maniacs ».
- Automotive Engineering. September 1995. WOERHLE William. « A history of passenger car tire ».



[SIÈGE NATIONAL]

→ ANFA

41-49 rue de la Garenne
92313 Sèvres Cedex
Tél. : 01.41.14.16.18 ; fax : 01.41.14.16.00
www.anfa-auto.fr

[DÉLÉGATIONS RÉGIONALES]

→ ANFA Aquitaine, poitou-Charentes

Parc technologique de Canteranne
15 avenue de Canteranne - 33600 Pessac
Tél. : 05.56.85.44.66 ; fax : 05.56.49.34.02
e-mail : bordeaux@anfa-auto.fr

→ ANFA Auvergne, Limousin

1 rue Képler - 63100 Clermont-Ferrand
Tél. : 04.43.76.10.50 ; fax : 04.73.92.13.25
e-mail : clermont@anfa-auto.fr

→ ANFA Bretagne, pays de la Loire

(Dpt : 22, 29, 35, 44, 49, 53, 56, 72, 85)
2 cours des Alliés - CS 21242 - 35012 Rennes Cedex
Tél. : 02.22.74.14.80 ; fax : 02.99.05.92.26
e-mail : rennes@anfa-auto.fr

→ ANFA Centre, Basse-Normandie, Haute-Normandie

(Dpt : 14, 18, 27, 28, 36, 37, 41, 45, 50, 61, 76)
Parc d'Activité de la Saussaie
98 rue des Hêtres - Saint Cyr en Val -
45075 Orléans Cedex 2
Tél. : 02.18.84.23.63 ; fax : 02.38.57.26.10
e-mail : orleans@anfa-auto.fr

→ ANFA Franche-Comté, Bourgogne

Le Forum - 5 rue Albert Thomas - 25000 Besançon
Tél. : 03.70.72.12.45 ; fax : 03.81.82.17.38
e-mail : besancon@anfa-auto.fr

→ ANFA Île-de-France

41-49 rue de la Garenne - BP 93 - 92313 Sèvres Cedex
Tél. : 01.41.14.13.07 ; fax : 01.41.14.16.56
e-mail : sevres@anfa-auto.fr

→ ANFA Languedoc-roussillon, midi-pyrénées

(Dpt : 09, 11, 12, 30, 31, 32, 34, 46, 48, 65, 66, 81, 82)
570 cours de Dion Bouton - 30899 Nîmes
Tél. : 04.30.92.18.53 ; fax : 04.66.21.32.01
e-mail : nimes@anfa-auto.fr

→ ANFA Lorraine, Alsace, Champagne-Ardenne

7 rue Jean-Antoine Chaptal - 57070 Metz
Tél. : 03.55.35.10.70 ; fax : 03.87.74.21.29
e-mail : metz@anfa-auto.fr

→ ANFA picardie, Nord-pas-de-Calais

Immeuble Sanelec - ZAC La Vallée
Rue Antoine Parmentier - 02100 Saint-Quentin
Tél. : 03.64.90.12.60 ; fax : 03.23.64.30.36
e-mail : stquentin@anfa-auto.fr

→ ANFA provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse

Parc Club des Aygalades - 35 boulevard du Capitaine
Gèze - Bâtiment D - 13014 Marseille
Tél. : 04.86.76.15.70 ; fax : 04.91.67.33.23
e-mail : marseille@anfa-auto.fr

→ ANFA rhône-Alpes

ZAC La Fouillouse - Parc des lumières
6 rue Nicéphore Niepce
69800 Saint Priest
Tél. : 04.72.01.43.93 ; fax : 04.72.01.43.99
e-mail : lyon@anfa-auto.fr