

Le pneumatique : liaison au sol

Cette INFOTECH complète L'INFOTECH n°7 et évoque les phénomènes mis en jeu entre la bande de roulement et le sol pour expliquer certains comportements propres à la liaison pneumatique/sol.

Adhérence et Adhésion du pneumatique

Constitution du caoutchouc

C'est une matière particulière constituée de très longues chaînes (une chaîne comporte de 1000 à 10000 liaisons) faiblement liées entre elles qui glissent les unes sur les autres, ce qui fait qu'à l'état naturel il est très souple et très visqueux sans propriétés élastiques particulières. C'est la vulcanisation qui va lui donner les caractéristiques élastiques recherchées en créant des liaisons sous forme de "ponts" (par exemple par adjonction de soufre et cuisson) le long de ces chaînes. Une fois liées entre elles, ces chaînes peuvent échanger des efforts sans glisser les unes sur les autres (on réalise de l'ordre de un "pont" par cent unités monomères de base).⁽¹⁾

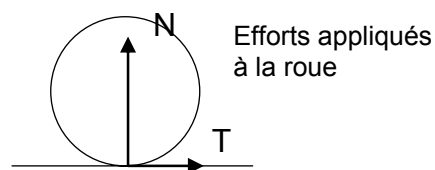
Le résultat est une matière incompressible, très élastique et possédant toujours une viscosité interne qui produit une dissipation de l'énergie lors des déformations.

Nous verrons plus loin que ces propriétés sont fortement dépendantes de la température.

La matière utilisée pour la fabrication des pneumatiques est un mélange de caoutchoucs naturel et synthétique, y sont ajoutées certaines charges permettant d'améliorer les caractéristiques de résistance à l'usure et à la rupture (en organisant le réseau de chaînes moléculaires autour des molécules des charges). Ces charges sont principalement à base de noir de carbone et plus récemment à base de silice sur les pneumatiques à faible résistance au roulement des nouvelles générations.

L'adhérence du pneumatique

Le coefficient d'adhérence global constaté comme étant le rapport T/N est la combinaison de plusieurs phénomènes bien distincts :



L'adhésion du caoutchouc

C'est le phénomène que l'on peut constater en faisant glisser un morceau d'élastomère sur une surface parfaitement lisse (plaque de verre par ex.). Là encore, on ne retrouve pas les conditions de frottement solide/solide : un maximum d'effort est atteint pour des vitesses de glissement de l'ordre de quelques cm/mn et est accompagné d'un bruit de crissement qui peut être audible.

Cette situation met en jeu des forces d'attraction inter-atomiques (forces de Van Der Waals de type électrostatique) qui créent des étirements puis des relaxations des longues chaînes moléculaires. Ces sollicitations dissipent

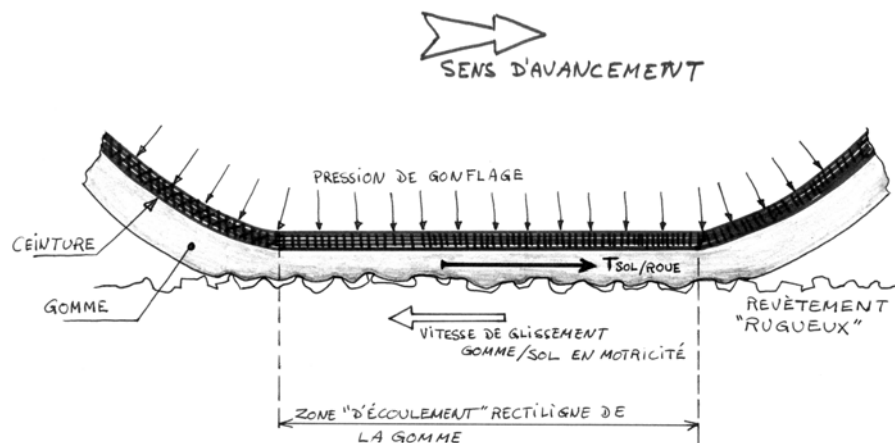
⁽¹⁾ plus on multiplie ces "ponts", plus on supprime des degrés de liberté, ainsi on peut obtenir un matériau très rigide : l'EBONITE qui est plus proche d'une matière plastique que d'un caoutchouc

l'énergie mise en jeu et créent ce "crissement". Le terme utilisé (adhésion) se démarque du terme générique adhérence et donne ainsi un rôle actif à la matière dans cette liaison au niveau microscopique (quelques angströms). Ces forces de liaisons ne seront plus opérationnelles dès qu'une pellicule d'eau éloignera les deux matières en contact. Pour un pneumatique cette situation sera atteinte dès qu'une fine couche (moins de 0,5 mm) résiduelle sera présente sur la surface de roulage. Le pneumatique sera en situation de viscoplanage et subira une chute de son adhérence disponible par rapport à une surface sèche.

□ L'indentation du caoutchouc sur les rugosités

Sur une surface de roulage réelle, la bande de roulement profite de son élasticité pour se déformer et épouser les aspérités du sol. Nous parlons ici de la macrorugosité des sols sur des ordres de grandeurs de quelques microns à quelques millimètres, au delà les sollicitations dépassent la bande de roulement et sollicitent toute la structure du pneumatique.

Supposons que l'adhésion caoutchouc/sol soit très faible (sol mouillé) et que le pneumatique soit sollicité en adhérence : il va se mettre à glisser sur le sol. Examinons les sollicitations de la gomme au contact sol/roue.



La ceinture est supposée parfaitement plane et parallèle au sol car les inégalités du revêtement sont totalement "absorbées" par la plasticité de la bande de roulement. La gomme peut être alors considérée comme un liquide visqueux (à fort amortissement interne) qui s'écoule entre une paroi plane (coté ceinture) et une paroi rugueuse (le sol). Cet écoulement ne peut se faire qu'avec de fortes pertes de charges, causées par la rugosité du sol le long de l'écoulement.

Ces pertes de charges impliquent que la gomme doit recevoir un travail moteur pour son écoulement. Ce travail est produit par des efforts échangés entre la ceinture et la bande de roulement. L'équilibre de la gomme implique qu'elle reçoit des efforts sol/roue de même valeur.

Ce raisonnement (qui n'a qu'une valeur pédagogique) montre comment des efforts d'adhérence sol/roue peuvent apparaître alors que l'adhésion du caoutchouc est inexistante, grâce à la rugosité du revêtement.

Pour favoriser ce phénomène qui est prépondérant par rapport au phénomène d'adhésion il faut rechercher des gommes très souples (faible module d'élasticité) et à fort amortissement interne (dites également à fort hystérésis).

Conséquences :

- Il est facile de comprendre que le froid va augmenter le module d'élasticité et réduire l'adhérence par indentation ce qui conduit à des formulations plus adaptées aux situations hivernales.
- La pression de gonflage elle aussi a son rôle à jouer puisque c'est elle qui règle la pression de contact sol/roue : une pression insuffisante réduit la pénétration de la gomme dans les rugosités du revêtement et réduit l'adhérence disponible (imprévisible avec les seules lois de coulomb appliquées au frottement).
- Une fabrication de revêtement de sols "haute adhérence" est envisageable en sélectionnant soigneusement les granulats sur leurs dimensions, leur forme et leur résistance à l'usure pour favoriser l'indentation. Ces revêtements existent et peuvent réduire les distances de freinage jusqu'à 30%, mais leur coût élevé les réserve à des zones prioritaires fortement accidentogènes.

En conclusion

Pour préserver l'adhérence du pneumatique dans toutes les situations, il faut privilégier le phénomène d'indentation, c'est à dire conserver un faible module d'élasticité à toutes les températures et choisir des gommés fortement dissipatives.

Cette caractéristique à pendant longtemps été contradictoire avec une faible résistance au roulement car les déformations répétées de la bande de roulement au contact du sol (10 à 20 fois par seconde) mettent également en jeu cet amortissement, ce qui amène une dépense énergétique significative⁽²⁾.

Les manufacturiers ont su faire évoluer ce compromis adhérence/résistance au roulement en utilisant les propriétés étonnantes des élastomères et disposent maintenant d'une gamme de produits "sur mesure" pour différentes applications.

Compromis adhérence – résistance au roulement

Pour comprendre les termes de ce compromis il faut expliquer les effets de la température sur l'élasticité et l'amortissement d'un caoutchouc lorsqu'il est sollicité de manière cyclique.

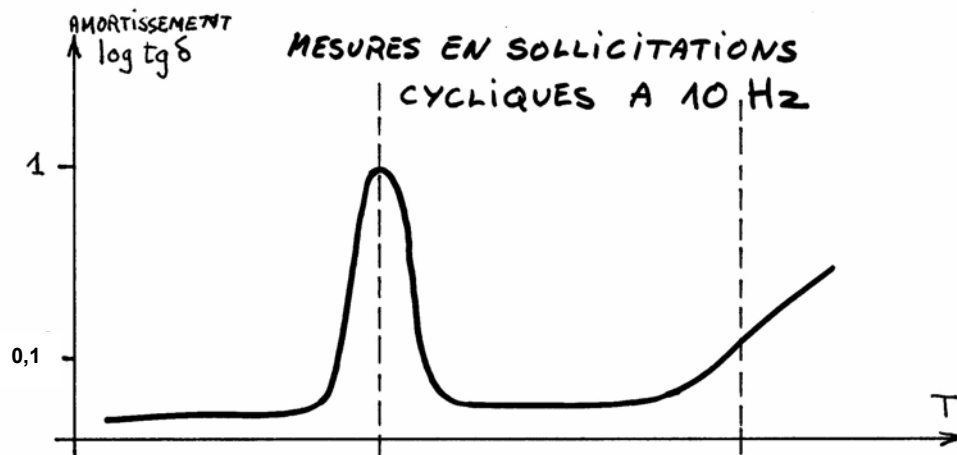
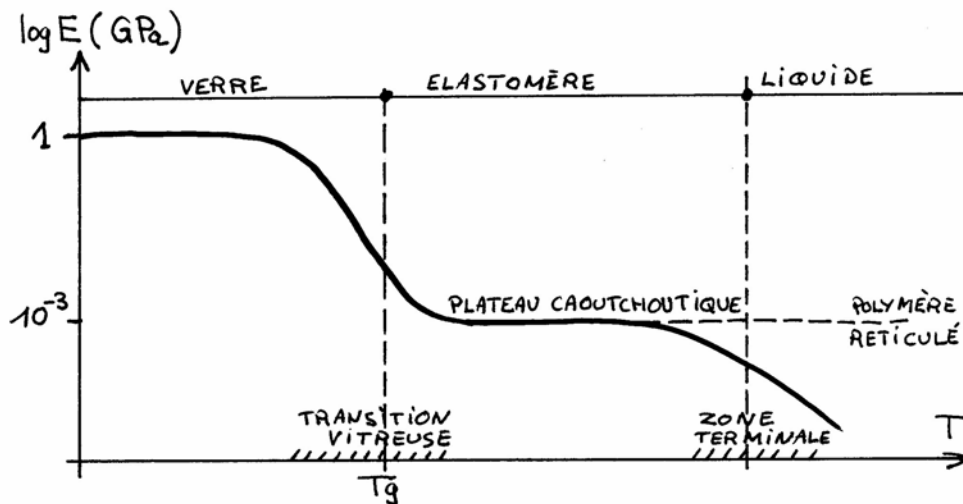
Evolution du comportement viscoélastique avec la température

Une machine d'essai sollicite un échantillon de caoutchouc par une excitation sinusoïdale à une basse fréquence (de l'ordre de 10 Hz). La déformation de l'échantillon (quelques % de sa longueur) et l'effort appliqué sont mesurés en continu. Les paramètres suivants sont caractérisés :

- Le module d'élasticité est chiffré par le rapport entre la contrainte appliquée (mesure d'effort) et la déformation : il sera noté E.
- L'angle de déphasage (noté δ) entre la contrainte et la déformation quantifie le caractère plus ou moins visqueux de l'échantillon
- La valeur $\text{tg}\delta$ représente l'amortissement du matériau (rapport entre l'énergie dissipée et l'énergie fournie).

Le graphe suivant montre l'évolution de E et $\text{tg}\delta$ au cours d'un essai à température variable.

⁽²⁾ Il faut savoir que l'énergie dissipée dans les pneumatiques représente à peu près 20% de l'énergie consommée pour l'avancement du véhicule pour une voiture et jusqu'à 40% pour un poids lourd. L'impact des recherches sur ces produits est donc évident sur la consommation



Si l'essai débute à très basse température, les interactions entre chaînes augmentent et elles n'ont plus de mouvement relatif : on obtient un verre⁽³⁾ ayant un très fort module d'élasticité (de l'ordre de 1Gpa) et cassant. Le passage du caoutchouc élastique au verre est appelé transition vitreuse. Les caoutchouc sont donc des polymères dont la température de transition vitreuse (notée souvent T_g pour g=glass, verre en anglais) est inférieure à la température ambiante alors que les thermoplastiques sont des polymères dont T_g est supérieure à la température ambiante.

Cette transition par échauffement s'étale sur quelques dizaines de degrés et divise E par mille environ ; d'assez longues portions de chaînes commencent à s'étirer mais le "frottement moléculaire" reste important et cette chute de E est accompagnée d'un pic d'amortissement important.

Au dessus de cette transition on retrouve l'état d'élastomère, E évolue faiblement sur une large plage de température : c'est le plateau caoutchoutique. La hauteur et la largeur de ce plateau dépendent de la structure du polymère (principalement de sa masse moléculaire).

En élevant toujours la température on atteint la zone liquide ou les chaînes sont totalement désenchevêtrées et sans cohésion. Cet état liquide ne sera **jamais atteint si le produit est vulcanisé** car les chaînes seront encore accrochées par les ponts chimiques réalisés. C'est dans cet état liquide que

⁽³⁾ le terme de "verre" est retenu car le matériau ne présente aucune structure cristalline, il se présente comme un liquide figé par une viscosité infinie et surtout le changement de comportement mécanique se produit sans changement de phase au sens thermodynamique du terme.

l'on pourra par exemple mouler un thermoplastique qui, une fois refroidi, retrouvera sa rigidité à température ambiante grâce à la transition vitreuse.

En conclusion : c'est bien la zone du plateau caoutchoutique à fort amortissement qui doit être visée pour la gomme d'un pneumatique si on veut privilégier l'adhérence par indentation. La conséquence est que le résultat sera optimal pour une fourchette assez étroite de température, cette contrainte est particulièrement vraie pour les pneumatiques de compétition à très haute adhérence.

Réponse en fréquence

Jusque là on ne voit toujours pas de compromis possible puisque cette viscosité recherchée pour produire de l'adhérence va dissiper de l'énergie à chaque déformation de la ceinture et ces pertes seront comptabilisées dans le facteur de résistance au roulement. Heureusement les élastomères présentent une réponse particulière aux déformations et leur comportement dépend beaucoup de la vitesse de déformation qu'on leur applique : la zone de transition vitreuse se trouve dans une fourchette de température qui évolue avec la fréquence d'excitation

Voici un graphe page suivante illustrant cette caractéristique, commentons en les conséquences :

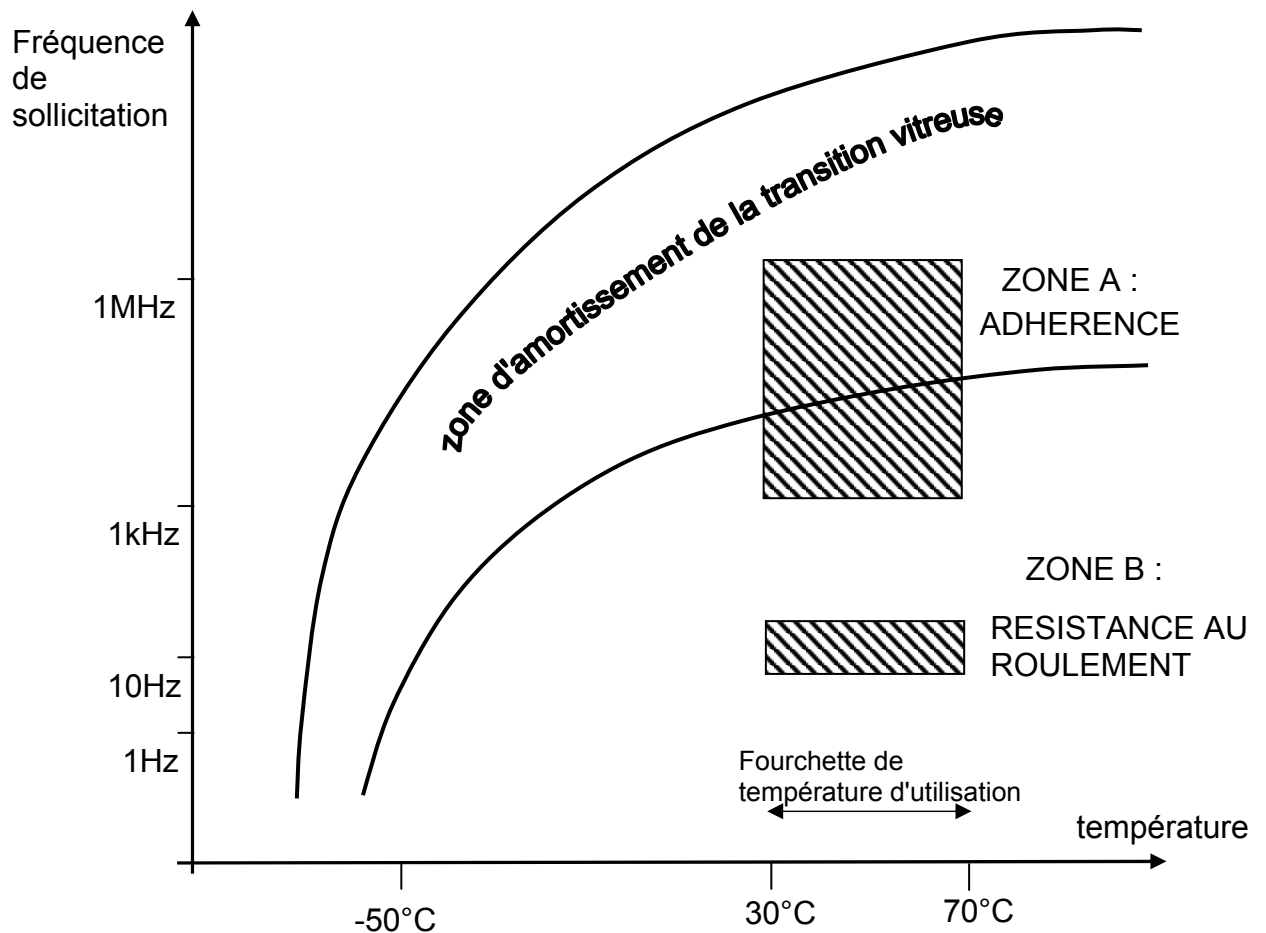
- Lorsqu'un pneumatique roule sa fréquence de rotation est au maximum de quelques dizaines de Hertz (par ex. à 130 km/h pour une dimension de 205/40R17 cette fréquence est de 20 Hz). Pour une température d'usage habituelle de 30° à 70°, cette sollicitation alternée se trouve en zone B au delà du pic d'amortissement de la transition vitreuse et les déformations consomment peu d'énergie. La situation est favorable à un faible coefficient de roulement.
- Si un faible glissement circonférentiel⁽⁴⁾ apparaît entre la roue et le sol une vitesse de glissement s'installe entre la gomme et le sol. Par exemple le même pneumatique 205/40R17 à 130 km/h et 2% de glissement produit 0,7 m/s de vitesse de glissement dans l'aire de contact : sur des rugosités allant du μm au mm la gomme se trouve alors sollicitée à des fréquences allant de 0,7kHz à 0,7MHz (bas de la zone A). Cette situation nous rapproche du pic d'amortissement et favorise grandement l'adhérence par indentation.
- Si ce même pneumatique évolue vers le blocage, la vitesse de glissement monte vers 36m/s et la gamme des fréquences approche la bande 36kHz/36MHz (haut de la zone A). Cette zone de fréquence utilise au mieux l'amortissement maximum du caoutchouc et garanti une bonne adhérence en situation d'urgence.

En conclusion :

Le pneumatique profite donc de manière remarquable des particularités des élastomères et le travail de développement des manufacturiers est de produire des mélanges aux caractéristiques adaptées a chaque utilisation. Depuis le début des années 90 l'introduction de charges de silice dans les gommés a

⁽⁴⁾ voir définition sur INFOTECH n°7

permis d'améliorer encore le compromis adhérence/roulement et ainsi de participer à la réduction des émissions de CO₂ sans affecter la sécurité active.



Aquaplanage du pneumatique

Tout ce qui vient d'être mis en évidence suppose un contact étroit entre le revêtement et la gomme, nous allons démontrer qu'une couche d'eau sur la route peut facilement éloigner la gomme du sol et ainsi supprimer toute possibilité d'adhérence : c'est la situation **d'aquaplanage**. La roue ne peut plus, dans cette situation, échanger le moindre effort avec le sol, la perte de motricité et de contrôle de la trajectoire est totale.

Pour recenser les paramètres mis en jeu nous allons directement réaliser une application numérique décrivant le phénomène.

- Reprenons notre roue de 205/40R17 gonflée à 2 bar et chargée d'un poids de 300daN (cas d'une roue AV d'une petite voiture). Supposons cette roue se déplaçant sur un sol recouvert de 4 mm d'eau à 30 km/h. Si nous isolons mécaniquement la partie de la bande de roulement en contact avec le sol, que nous négligeons la raideur des flancs et les efforts de flexion de la ceinture, alors nous sommes obligés de considérer que la pression moyenne sol/pneu dans l'aire de contact est de la même valeur que la pression de gonflage⁽⁵⁾.

⁽⁵⁾ Attention si cette hypothèse est tout à fait réaliste sur des voitures, elle est loin de la réalité dans le cas des pneumatiques moto.

(Il devient alors simple de calculer la surface de contact pneu/sol $S_{contact}=300/2 = 150 \text{ cm}^2$ soit un rectangle de 18cm par 8cm environ dans ce cas)

- ▶ Pour une largeur du contact sol roue de 18 cm (un peu moins de la largeur totale) le pneumatique doit évacuer un débit d'eau de 6 litres par seconde pour conserver son contact gomme/sol. Cette eau doit être évacuée vers l'arrière ou sur les côtés mais pas vers l'avant, sinon elle augmenterait la hauteur de la couche d'eau.
- ▶ Supposons que les seules sculptures de la bande de roulement soient 4 saignées parallèles sur la circonférence de la roue (à la manière des F1), chaque saignée présente une section de 1 cm^2 . Toute l'eau doit s'échapper (vers l'AR car il n'y a pas de saignées latérales) par ces 4 "conduits" de 1 cm^2 et la pression qui la chasse est fournie par le poids sur la roue. Si nous appliquons la loi de Bernoulli à cet écoulement nous arrivons à

$$P_{eau} = \frac{Q^2_{eau} \times \rho_{eau}}{2 \times S^2_{conduits}}, \text{ une application numérique donne } P_{eau} = 1,12 \text{ bar.}$$

Cette pression d'eau reste inférieure à la pression moyenne de contact donc elle est canalisée et évacuée : la gomme trouve le contact avec le revêtement.

- ▶ Mais le débit d'eau croît avec la vitesse et augmente la pression d'eau qui va vite atteindre la valeur de la pression de gonflage : l'eau s'immisce alors entre la gomme et le sol sans que la pression de contact sol/roue puisse s'y opposer. Avec notre application ceci se produit dès 40 km/h. Ce "coin" d'eau qui sépare progressivement la bande de roulement et le sol supprime toute adhérence.

En conclusion :

La réalité du phénomène est moins critique que notre calcul qui s'avère pessimiste par ses hypothèses. En réalité :

- Les sculptures de la bande de roulement autorise une circulation transversale de l'eau ce qui facilite sa sortie sur les cotés.
- Les macrorugosités du sol autorisent elles aussi la circulation de l'eau et atténuent le problème (des revêtements très granuleux sont souhaitables dans les zones à forte pluviométrie)
- La roue a un effet "d'étrave" qui repousse une partie de l'eau de part et d'autre de la bande de roulement et réduit la quantité entrant dans la zone de contact.

Ce petit calcul permet tout de même d'évaluer l'incidence de chacun des paramètres sur la vitesse limite où $P_{eau} = P_{gonflage}$ et où l'aquaplanage débute.

L'utilisation de l'équation précédente implique que la Vitesse limite est fonction de :

- La (pression de gonflage)^{1/2}, ce qui démontre qu'un sous gonflage favorise l'aquaplanage et un sur gonflage le repousse.
- La (section des sculptures)^{1/2}, cette section dépend du taux d'entaillage de la bande de roulement (le dessin à aussi son importance pour organiser la circulation de l'eau) et surtout elle diminue avec l'usure. La tendance à l'aquaplanage augmente donc au cours de l'usure : il est donc très important de respecter l'usure maxi indiquée par les témoins.
- La (largeur du pneu)⁻¹, ce qui indique que les pneumatiques les plus larges seront les plus sensibles à l'aquaplanage.

- L'(épaisseur d'eau)⁻¹, ce qui indique qu'il faut réduire sa vitesse proportionnellement à la quantité d'eau présente sur le sol.

Cas particuliers

La notion abordée plus haut, $P_{\text{contact pneu/sol}} \approx P_{\text{gonflage}}$, permet de raisonner sur des cas particuliers de contact pneu sol.

Sol meuble

Il s'agit par exemple du sable sec dans lequel la roue s'enfonce. Pour ne pas "pénétrer" ce sol il faut réduire la pression de contact jusqu'à des valeurs très faibles (quelques 0,1 bar) d'où un sous-gonflage très important pour arriver à être porté par ce type terrain. Cette stratégie peut être aussi adaptée à certains travaux agricoles où la pression de contact doit être limitée pour éviter le tassement du sol qui est préjudiciable aux cultures.

Pneu "à crampons"

Les Pneus tout terrains ou de travaux agricoles présentent des protubérances (crampons) pour obtenir un effet d'engrènement avec le sol et passer les efforts moteurs (il est impropre de parler d'adhérence dans ce cas). Ce résultat suppose que ces crampons peuvent poinçonner le sol. La pression doit être suffisamment élevée pour que le crampon pénètre le sol mais en l'augmentant on réduit la surface de contact pneu sol et le nombre de crampons "engrenés", ce qui peut limiter l'effort moteur. Le compromis nombre de crampons et pénétration de ceux ci est délicat à régler par la seule pression de gonflage ; il faut une forme et une densité des crampons adaptés à chaque type de sol.

Pneu à flèche contante

Certaines technologies de pneumatiques demandent à fonctionner avec un rayon sous charge constant quelle que soit la charge. Il s'agit principalement de produits destinés aux engins de TP dont les carcasses très rigides supportent mal des déformations excessives.

Dans la configuration habituelle (pneu gonflé à l'air se déformant à pression constante) une augmentation de la charge produit un écrasement qui augmente la surface de contact et rétablit ainsi l'équilibre.

Pour conserver un écrasement constant il faut rendre le pneumatique incompressible ce qui est fait en le remplissant à 100% d'eau après avoir aspiré la totalité de l'air contenu dans la chambre.

L'écrasement est réglé une fois pour toute par la quantité d'eau et ce pneumatique travaille alors à charge variable et pression variable au contact, mais à rayon sous charge constant.