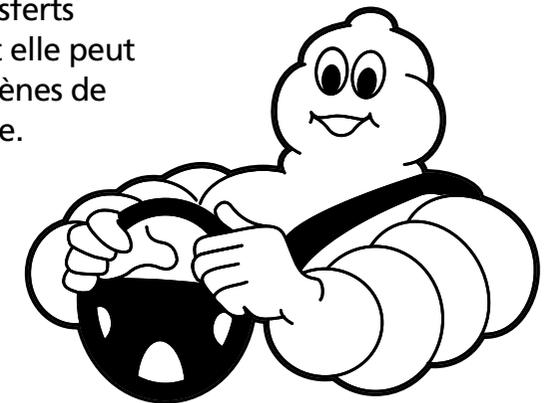




V *L'adhérence & le comportement du véhicule*

L'adhérence n'est pas une performance "isolée" du pneumatique. Elle interagit bien évidemment avec les autres performances et, notamment, avec le comportement.

Nous allons voir, par exemple, comment l'adhérence est influencée par les transferts de charge et comment elle peut influencer les phénomènes de survirage et sous-virage.

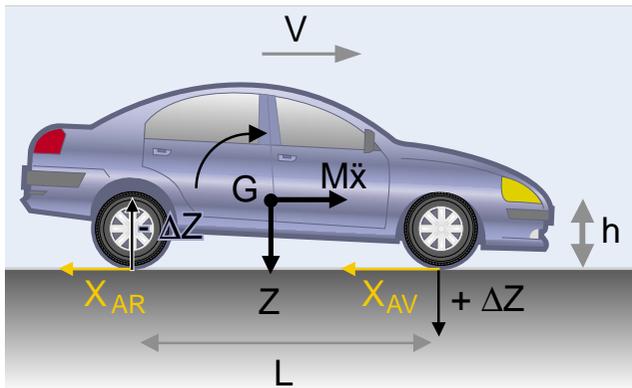


Les transferts de charge

LE TRANSFERT DE CHARGE LONGITUDINAL

Etant donné que le centre de gravité d'un véhicule est situé à une hauteur h au-dessus de la chaussée et que la force de frottement X du pneu sur le revêtement routier s'applique au niveau du sol, le freinage crée un **couple de basculement** qui provoque une **surcharge** ($+\Delta Z$) sur l'avant du véhicule et une **sous-charge** ($-\Delta Z$) à l'arrière. L'avant est alors "lesté" et l'arrière "soulagé" : c'est le **transfert de charge longitudinal**. Dans cette situation, si le couple de freinage était identique sur les 4 roues, celles de l'arrière se bloqueraient plus tôt que celles de l'avant. Le véhicule risquerait alors de chasser de l'arrière, voire de faire un tête-à-queue.

 C'est pour éviter cela que les véhicules sont équipés d'un correcteur de freinage, qui permet de freiner davantage sur l'avant que sur l'arrière.



G : centre de gravité du véhicule,
 M : masse du véhicule,
 \ddot{x} : accélération longitudinale,
 Z : charge,
 h : hauteur entre le centre de gravité et le sol,
 L : empattement (distance entre les roues avant et arrière).

Surcharge longitudinale : ordre de grandeur

On a : $X = X_{AR} + X_{AV} = \mu Z = M\ddot{x}$

et $X \cdot h = \Delta Z \cdot L$

d'où : $\Delta Z = X \cdot \frac{h}{L} = \frac{\mu \cdot Z \cdot h}{L}$

Pour donner un ordre de grandeur, on peut faire une application numérique avec :

$Z = 1400$ daN , soit, dans l'hypothèse d'équirépartition de la charge, 350 daN par roue
 $\mu_{sollicité} = 1$ (freinage puissant sur sol sec)
 $h = 0,5$ m
 $L = 2$ m

On obtient :

$\Delta Z = 350$ daN, soit 175 daN sur chaque roue avant, c'est-à-dire une **surcharge de + 50 %**.

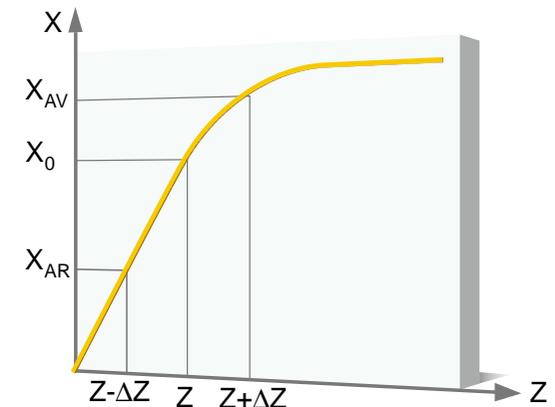
N.B.

- on fait l'hypothèse que μ dépend peu de la charge.
- X est représentée en force de réaction du sol sur le pneu.

Pour en savoir plus... 

Observons la courbe X(Z)

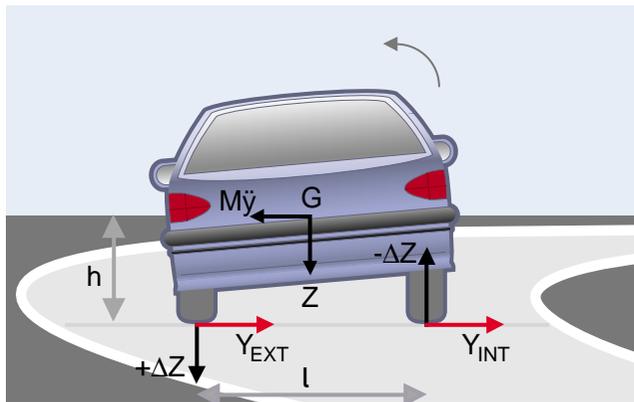
A taux de glissement constant, lorsque la charge augmente, l'effort longitudinal développé par le pneu augmente jusqu'à une valeur maximale avant de s'y stabiliser. Au moment du freinage, le phénomène de transfert de charge entraîne donc une augmentation des efforts au niveau des pneus avant (X_{AV}), et une diminution au niveau des pneus arrière (X_{AR}). Si la pression de freinage des roues arrière n'était pas corrigée par un limiteur automatique, le transfert de charge entraînerait un tête-à-queue par blocage des roues arrière.



LE TRANSFERT DE CHARGE TRANSVERSAL

Etant donné que le centre de gravité d'un véhicule est situé à une hauteur h au-dessus de la chaussée et que la force de frottement Y est appliquée aux roues au niveau du sol, la prise d'un virage crée un **couple de basculement** qui provoque une **surcharge** ($+\Delta Z$) du côté extérieur au virage et une **sous-charge** ($-\Delta Z$) du côté intérieur. Or, dans ce cas, la somme des efforts transversaux produits au niveau des 4 roues est inférieure à celle qui serait fournie si elles restaient soumises à la même charge : le **transfert de charge latéral pénalise l'adhérence transversale**.

 Pour limiter ce phénomène, le constructeur dispose de plusieurs solutions. Il peut, par exemple, augmenter la voie du véhicule et abaisser son centre de gravité.



G : centre de gravité du véhicule,
 M : masse du véhicule,
 \ddot{y} : accélération transversale,
 Z : charge,
 h : hauteur entre le centre de gravité et le sol,
 l : voie du véhicule (distance entre les roues droite et gauche).

Surcharge transversale : ordre de grandeur

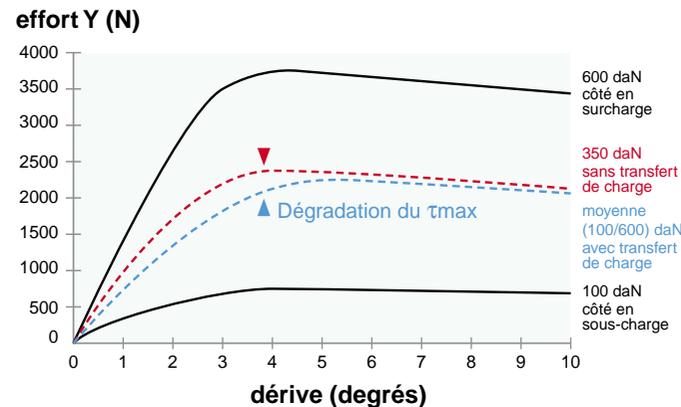
On a : $Y = \tau Z$

et $\Delta Z \cdot l = Y \cdot h$

d'où $\Delta Z = \frac{\tau \cdot Z \cdot h}{l}$

Ordre de grandeur : pour $Z=1400$ daN, soit 350 daN par roue, $\tau_{solllicité} = 1$, $h = 0,5$ m et $l = 1,5$ m, la surcharge sur chaque roue extérieure au virage, donc l'allègement sur chaque roue intérieure, est d'environ 250 daN, soit + 71 %.

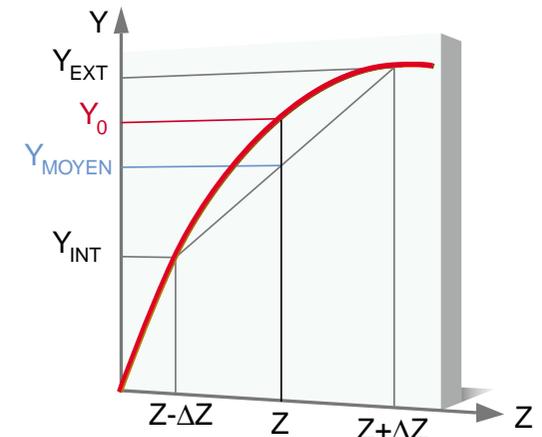
La moyenne des efforts transversaux développés par les 4 pneus est plus petite lorsqu'il y a transfert de charge (courbe bleue) qu'à l'équilibre (courbe rouge).



Pour en savoir plus... 

Observons la courbe $Y(Z)$

A dérive constante, lorsque la charge augmente, l'effort transversal développé par le pneu augmente, passe par un maximum, puis se détériore. C'est pourquoi, en virage, le phénomène de transfert de charge entraîne une diminution de l'effort Y résultant (Y_{moyen}).



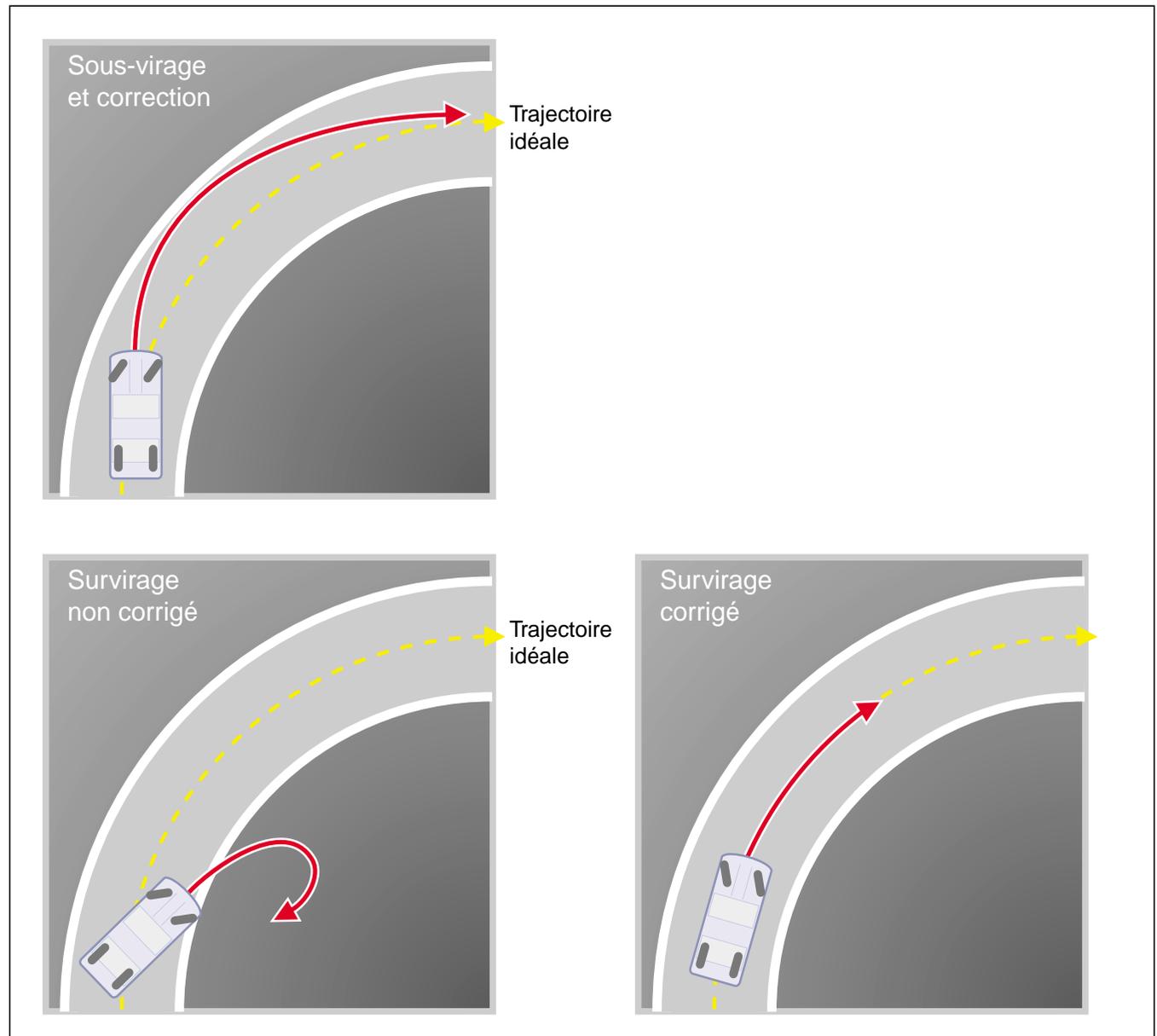
Sous-virage et survirage

Un **véhicule sous-vireur** est un véhicule qui, en courbe, a tendance à "aller tout droit" ou, plus exactement, à suivre une courbe moins serrée que la courbe souhaitée. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la vitesse à laquelle on aborde le virage est grande. Pour corriger la tendance, le conducteur doit augmenter l'angle de braquage et/ou ralentir.

Un **véhicule survireur**, lui, a tendance à suivre une trajectoire plus serrée que la courbe visée. Ici encore, le phénomène s'accroît avec la vitesse. Dans les faits, à grande vitesse, l'arrière du véhicule "chasse" et l'avant du véhicule se retrouve pointé vers l'intérieur du virage. Pour corriger la trajectoire, le conducteur doit débrayer (et, sur un véhicule traction avant, accélérer).

Les véhicules à traction avant sont naturellement plutôt sous-vireurs et les propulsions sont plutôt neutres à vitesse stabilisée et légèrement survireurs en cas de forte accélération.

Par souci de sécurité, les constructeurs automobiles favorisent la conception de véhicules sous-vireurs. En effet, dans un virage pris à une vitesse trop élevée, la manoeuvre de correction au volant consistera à braquer plus et à ralentir, ce qui est un réflexe naturel pour le conducteur, alors que débrayer (et accélérer) ne l'est pas. Par contre, les pilotes de courses préfèrent les véhicules survireurs, car ils leur permettent de virer au plus près de l'intérieur de la courbe.



Influence des variations des forces transversales sur le comportement du véhicule

Etat du véhicule	Y avant	Y arrière	Incidence sur le comportement général du véhicule*
Transfert de charge vers l'essieu arrière (coffre à bagages chargé)			sous-virage
Pneu arrière en sous-gonflage			survirage
Pneus plus étroits à l'arrière			survirage

Action du conducteur	Y avant	Y arrière	Incidence sur la trajectoire suivie**
Accélération sur véhicule traction			moins serrée
Accélération sur véhicule propulsion			plus serrée
Décélération (légère)			plus serrée
Freinage trop appuyé			moins serré
Braquage			plus serrée
Pneus avant sur plaque de verglas			le véhicule part tout droit !

* Pour un véhicule neutre au départ

** Tout autre facteur égal par ailleurs

Les phénomènes de sous-virage et de survirage sont dus à une différence des forces transversales (Y) développées à l'interface pneumatiques/sol sur les essieux avant et arrière.

Si $Y_{\text{arrière}} > Y_{\text{avant}}$, le véhicule est sous-vireur (les roues directrices ont moins de pouvoir directeur).

Si $Y_{\text{avant}} > Y_{\text{arrière}}$, le véhicule est survireur (l'arrière peut chasser sous l'effet de la force centrifuge).

Les facteurs pouvant donc influencer le survirage et le sous-virage sont ceux dont dépend la force Y, à savoir :

- la charge Z, qui peut varier d'un essieu à l'autre en fonction de la position du centre de gravité et des transferts de charge ;
- le coefficient d'adhérence τ , qui peut varier d'un essieu à l'autre si le type ou l'état des pneus n'est pas le même, ou, encore, si l'état de la route est différent. Il varie aussi en fonction des accélérations/décélérations (apparition d'un taux de glissement) ;
- la dérive δ , qui varie sur l'essieu avant et arrière en fonction des actions exercées par le conducteur sur le volant et l'accélérateur (ou le frein).



VI *Les essais d'adhérence*

Les tests d'adhérence doivent permettre de vérifier qu'un pneumatique, par son architecture, sa sculpture et la nature des mélanges qui le composent, satisfait aux besoins de l'utilisateur.



L'utilisateur a besoin d'adhérence pour rouler en sécurité dans des conditions très diverses : hiver comme été, qu'il fasse beau ou qu'il pleuve, qu'il emprunte une départementale ou une autoroute, que le revêtement routier soit lisse ou rugueux, sur une gamme extrêmement variée de véhicules et à différentes vitesses.

Il convient donc de définir une **grille de tests** d'adhérence qui tiennent compte avec pertinence de la variabilité de ces paramètres, afin de refléter toutes les conditions d'usage. En outre, ces tests doivent être reproductibles et discriminants. Les résultats sont ensuite exploités pour mettre au point de nouveaux pneus et les homologuer auprès des constructeurs et des pouvoirs publics.

Les paramètres pris en compte dans la définition d'un test d'adhérence sont les suivants :

- **les sollicitations** imposées au pneumatique :
 - **mode de sollicitation** (longitudinale, transversale ou composée) ;
 - **taux de glissement** (freinage avec anti-blocage de roues, freinage roues bloquées) ;
 - **dérive** ;
 - **vitesse du véhicule, accélérations ou décélérations** ;
 - **pression de gonflage** ;

- **les conditions de tests :**

- **type de sol** : macrorugosité , microrugosité, propriétés thermiques ;
- **état du sol** : sol sec, humide, mouillé, inondé, mais aussi enneigé ou verglacé, température du sol ;
- **choix du véhicule** (masse, importance des transferts de charge, du caractère survireur ou sous-vireur, véhicule analytique, etc.) ou de **la machine de test** ;

- **les grandeurs mesurées** : vitesses, distance de freinage, temps de parcours, accélération, décélération, taux de glissement, forces ...

Et le conducteur ?

Au cours de ces tests, le conducteur n'a qu'une influence très faible sur les résultats obtenus. En effet, les essayeurs professionnels savent "calibrer" leur conduite pour la rendre hautement reproductible. Le professionnalisme de l'essayeur élimine pratiquement tout effet conducteur.



Essayeur au volant d'un véhicule instrumenté lors d'un test d'adhérence transversale.

VI.1

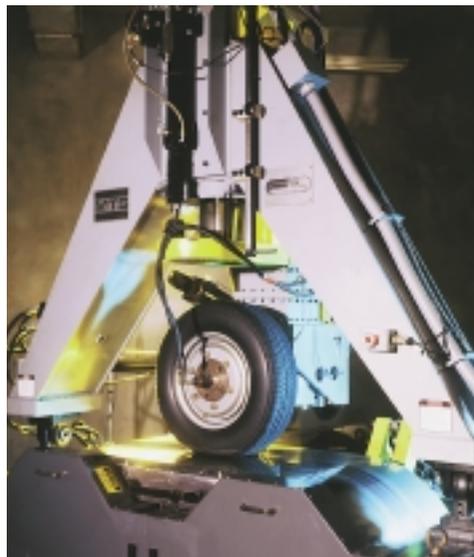
Tests d'analyse



Rouleuse en fonctionnement. Ici, le pneu roule à l'intérieur du "volant".



Rouleuse en fonctionnement. Ici, le pneu roule à l'extérieur du "volant".



Rouleuse à sol plan.

Il s'agit de tests où l'on applique une sollicitation sur un pneu isolé du contexte véhicule, en le faisant rouler sur une machine appelée rouleuse ou en utilisant un véhicule analytique équipé d'une roue instrumentée.

■ ROULEUSES

Les rouleuses sont des machines constituées d'un "volant" tapissé d'un sol artificiel ou d'une réplique de sol réel. On fait rouler le pneu sur ce volant en rotation.

Certaines rouleuses permettent de faire rouler le pneu à l'intérieur du volant (sol légèrement concave), d'autres à l'extérieur (sol légèrement convexe), afin d'appréhender au mieux la réalité d'un sol plan.

Il existe également des machines qui permettent de rouler sur un sol réellement plan. Beaucoup plus sophistiquées, elles sont moins répandues.

Les tests sur rouleuse présentent l'avantage majeur de maîtriser un certain nombre de paramètres qui ne peuvent l'être en extérieur et, notamment :

- la température ambiante et/ou la température du pneu,
- les conditions atmosphériques,
- la charge,
- couple moteur/freineur,
- le maintien de la vitesse de roulage, quelle que soit la puissance de freinage.

Ces tests permettent d'établir des courbes du coefficient d'adhérence en fonction de la charge, de la dérive, du taux de glissement, de la vitesse de roulage et de la température.

■ VÉHICULES ANALYTIQUES

Les véhicules analytiques sont équipés d'une roue instrumentée, indépendante du fonctionnement des roues du véhicule. C'est elle qui est l'objet des mesures. Ces tests sont réalisés sur pistes.

Principe de l'essai

Le véhicule roule à vitesse constante, en ligne droite, sur un sol réputé uniforme. Le pneumatique de la roue de mesure est soumis à une charge et à une pression déterminées.

On lui impose un couple freineur ou moteur, selon une progression dans le temps connue permettant de balayer un taux de glissement (G) allant de 0 (absence de couple) à 100% (roues bloquées). On peut également lui imposer une dérive (δ), fixe ou progressive.

Pendant le roulage, on mesure la force longitudinale (X) et la force transversale (Y) s'exerçant au niveau du moyeu, ainsi que le taux de glissement (G).

L'ensemble des paramètres imposés ou mesurés permet de calculer les coefficients d'adhérence longitudinale et/ou transversale μ et τ en fonction du taux de glissement et/ou de la dérive.

Les tests d'analyse sont indispensables à la compréhension des mécanismes de fonctionnement des pneumatiques. Cependant, ils ne sont pas représentatifs des sollicitations combinées auxquelles sont soumis les pneus des véhicules sur route. Pour reproduire les conditions réelles de sollicitation, des essais sur piste sont nécessaires.

Véhicule analytique, équipé d'une roue de mesure. Implantée au centre du véhicule, cette "5^e roue" est indépendante du fonctionnement des 4 autres.



Roue de mesure instrumentée

Conditions d'essais contrôlés :

- type de revêtement
- charge sur la 5^e roue
- couple moteur/freineur sur la 5^e roue
- dérive sur la 5^e roue
- pression de gonflage du pneu
- hauteur d'eau
- vitesse
- température

Valeurs mesurées :

- force longitudinale X
- force transversale Y
- taux de glissement G

Valeurs calculées :

- coefficient d'adhérence μ et τ en fonction du taux de glissement et de la dérive.



VI.2

Essais sur véhicules



Pistes d'essais de Ladoux, à Clermont-Ferrand (France).

Les tests sur véhicules sont réalisés sur des pistes d'essais, en extérieur.

Ces tests ont donc la particularité d'être soumis à un grand nombre de paramètres moyennement maîtrisables, comme le vent, l'ensoleillement, la pluie, la température ambiante, la température de la piste ou la variabilité des véhicules. Afin d'obtenir malgré cela des résultats exploitables, les tests sur piste sont toujours réalisés par rapport à un train de **pneumatiques témoin**. En outre, chaque essai implique le plus souvent plusieurs modèles ou variantes de pneus, ce qui permet de compléter les valeurs mesurées ou calculées par un classement relatif entre ces pneus. Enfin, chaque modèle de pneu subit l'essai à plusieurs reprises, ce qui permet d'établir un classement statistique fiable.

Exemple d'une séquence d'essais d'adhérence sur piste pour trois modèles de pneumatiques

1	2	3	4	5
Train témoin	Train A	Train B	Train C	Train témoin
n/2 passages	n passages	n passages	n passages	n/2 passages

- Chaque train fait plusieurs passages consécutifs afin de prendre plusieurs mesures.
- Les passages du témoin en début et en fin d'essai permettent d'évaluer la dérive dans le temps des conditions d'essais.
- La séquence est reproduite pour chaque type de sol considéré.

■ ESSAIS D'ADHÉRENCE LONGITUDINALE

Un test d'adhérence longitudinale courant consiste en une mesure de décélération. Il permet d'évaluer l'efficacité de freinage d'un pneumatique sur différents types de sols couvrant l'essentiel des situations routières.

Principe de l'essai

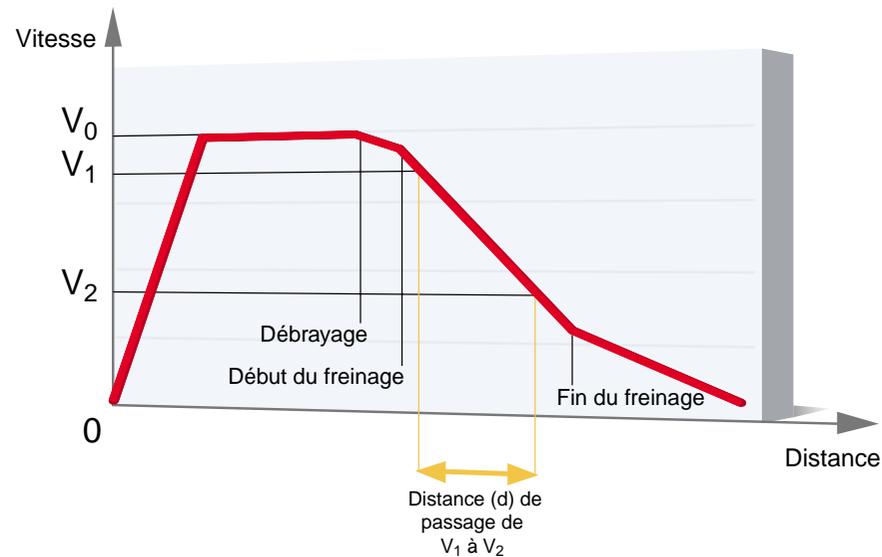
Un véhicule lancé sur un sol donné à une vitesse V_0 subit un freinage "roues avant bloquées*" ou sous ABR** (système Anti-Blocage des Roues). Il est équipé d'un système de mesure de vitesse et de distance***. Ce système relève la **distance de freinage** d lors du passage d'une vitesse V_1 (inférieure à V_0) jusqu'à une vitesse V_2 (inférieure à V_1).

On calcule ensuite le **coefficient d'adhérence longitudinal** moyen μ d'après les vitesses V_1 et V_2 et la distance de freinage d .

* Le circuit arrière de freinage est débranché afin de maintenir une stabilité directionnelle en ligne droite pendant le freinage.

** Pour les tests avec ABR, la vitesse V_2 n'est jamais inférieure à 10 km/h, car, le système ayant un fonctionnement différent à basse vitesse, le test risquerait d'être faussé.

*** Ce système est constitué d'une cinquième roue ou d'un radar, relié à un ordinateur embarqué.



Conditions d'essais contrôlées :

- hauteur d'eau
- charge du véhicule
- pression de gonflage des pneus

Conditions d'essais mesurées :

- vitesse et direction du vent
- température de la piste

Valeurs relevées :

- distance de passage de V_1 à V_2

Valeur calculée :

- coefficient d'adhérence longitudinale μ

Roue de mesure de distance et de vitesse montée à l'arrière d'un véhicule d'essai.



Pour en savoir plus...

sur le calcul du coefficient d'adhérence μ



L'énergie dissipée sur la distance de freinage d est égale à la perte d'énergie cinétique du véhicule :

$$\frac{1}{2} M.V_2^2 - \frac{1}{2} M.V_1^2 = M.\ddot{x}.d$$

On en déduit directement \ddot{x} , qui désigne la décélération du véhicule en m/s^2 .

Or cette décélération est due à deux composantes : la décélération "naturelle" du véhicule (résistance aérodynamique globale, frottements divers, résistance au roulement) et la force engendrée dans l'aire de contact par le couple freineur appliqué. On a donc :

$$F_{r1} + \mu.Z = M.\ddot{x}$$

où : F_{r1} est la force de ralentissement du véhicule en roue libre,
 μ , le coefficient de frottement moyen des pneus freinés,
 Z , la charge appliquée sur les pneus,
 M , la masse totale du véhicule.

Pour un test de freinage "deux roues avant freinées", la charge Z est la charge supportée par les deux roues freinées : c'est la charge sur l'essieu avant à laquelle s'ajoute le transfert de charge :

$$Z = Z_{av} + M.\ddot{x} \cdot \frac{h}{L}$$

où : Z_{av} est la charge sur l'essieu avant,
 h , la hauteur du centre de gravité du véhicule,
 L , l'empattement du véhicule.

On tire des deux relations ci-dessus une valeur moyenne du coefficient de frottement :

$$\mu = \frac{M.\ddot{x} - F_{r1}}{Z_{av} + M.\ddot{x} \cdot \frac{h}{L}}$$

Empiriquement, F_{r1} est donné par une relation de la forme :

$$F_{r1} = M.(A + B.V^2)$$

En pratique, on utilise dans le calcul de distance une valeur moyenne :

$$F_{r1} = M. \left[A + B. \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \right]$$

Les paramètres A et B caractérisent la traînée naturelle F_{r1} . Ils sont évalués lors d'un test préalable de décélération en roue libre.

On a donc accès à μ en connaissant les vitesses V_1 et V_2 et la distance de freinage d :

$$\mu_{\text{moyen}} = \frac{M. \left(\left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2d} \right] - \left[A + B. \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \right] \right)}{Z_{av} + M. \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2d} \right) \cdot \frac{h}{L}}$$

Pour un test de freinage "4 roues freinées",

l'effet des transferts de charge avant et arrière s'annule.

On a donc :

$$\mu_{\text{moyen}} = \frac{M. \left(\left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2d} \right] - \left[A + B. \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \right] \right)}{Z_{\text{total}}}$$

Les types de sols

Les tests sont réalisés sur sol sec, enrobé drainant humide, béton poli et béton bitumineux, avec des hauteurs d'eau de 5 ou 2 mm.

Chacun représente une réalité routière.

- Béton poli avec 2 mm de hauteur d'eau : conditions correspondant aux cas de fortes pluies sur revêtements routiers très fermés et usés qui évacuent mal l'eau.
- Béton bitumineux avec 5 mm de hauteur d'eau : conditions correspondant à des flaques d'eau ou à la présence d'ornières sur routes et autoroutes par temps de pluie.
- Enrobé drainant humide : quantité d'eau correspondant à des cas de sols humides (très faible hauteur d'eau) fréquemment rencontrés sur routes.

■ ESSAIS D'ADHÉRENCE TRANSVERSALE

Il existe trois types de tests d'adhérence transversale : les essais sur piste circulaire mouillée ou humide, les tests d'hydroplanage en courbe et les tests de synthèse sur circuit.

Essais sur pistes circulaires arrosées

Ces essais consistent à évaluer et mesurer le niveau d'adhérence transversale de différents trains de pneumatiques sur des pistes circulaires mouillées ou humides.

Principe de l'essai

Le véhicule d'essai effectue plusieurs tours de piste à vitesse maximale, c'est-à-dire à la limite d'adhérence.

On relève les temps au tour (ou sur une portion de piste). Connaissant le rayon de courbure, on en déduit la vitesse moyenne du véhicule et le niveau d'accélération transversale.

Les types de sols

- Les tests sont réalisés sur un revêtement macrolisse, recouvert de 1 à 2 mm d'eau, ce qui correspond, sur le réseau routier, à un revêtement usé mouillé.

Conditions d'essais contrôlés :

- rayon de courbe
- hauteur d'eau
- charge du véhicule
- pression de gonflage des pneumatiques

Conditions d'essais mesurées :

- température de l'air et du sol
- vitesse du vent

Valeurs relevées :

- temps au tour



Poids lourd sur piste circulaire arrosée

Essai d'hydroplanage en courbe

Le but de cet essai est d'évaluer et de mesurer le niveau d'adhérence transversale lors du passage dans une forte hauteur d'eau, comme celle que l'on peut rencontrer lors d'un orage ou au passage d'une ornière remplie d'eau.

Principe de l'essai

Cet essai est effectué sur une piste circulaire qui comporte un tronçon de 20 mètres de long constitué d'une cuvette remplie d'une hauteur d'eau de 7 mm. A chaque tour, le véhicule d'essai traverse cette "flaque" les 4 roues dans l'eau. Pendant la traversée de la flaque, l'essayeur maintient l'angle au volant.

Chaque tour de piste est effectué à vitesse stabilisée. A chaque nouveau tour, l'essayeur incrémente cette vitesse, jusqu'à atteindre la vitesse à laquelle le véhicule part en ligne droite dans la flaque. On relève, à l'aide d'un accéléromètre, l'accélération transversale subie par le véhicule à chaque passage, avant et dans la flaque.

On trace ensuite la courbe de variation de l'accélération transversale en fonction de la vitesse, puis on calcule, à partir de cette courbe :

- le niveau moyen de l'accélération transversale supportée ;
- le début du glissement (début de déviation de la trajectoire par rapport à la courbe) ;
- l'accélération maximale supportée et la vitesse correspondante ;
- la **vitesse de danger** (moment où l'hydroplanage est total et où le véhicule part en ligne droite) ;
- la progressivité du passage de l'accélération transversale maximale à l'hydroplanage total.

Conditions d'essais contrôlées :

- hauteur d'eau
- pression de gonflage des pneus
- vitesse avant la flaque
- angle au volant

Valeurs relevées à chaque passage :

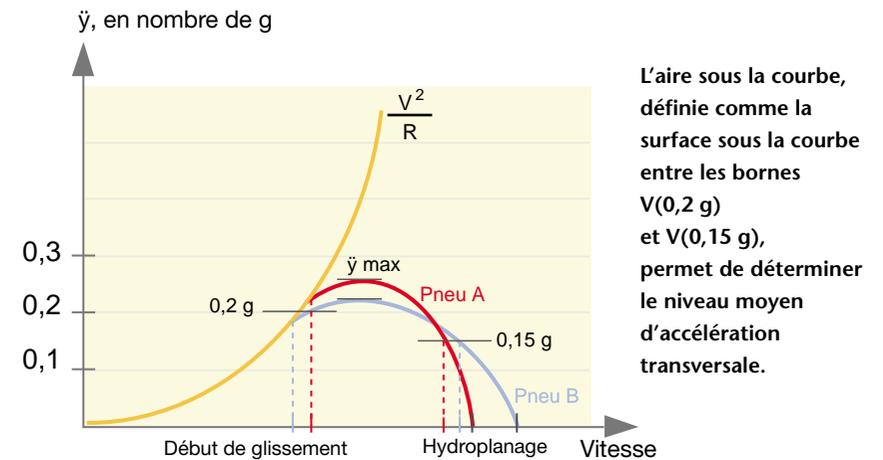
- temps de passage dans la flaque
- accélération moyenne avant et dans la flaque

Valeurs calculées :

- vitesse de passage dans la flaque
- aire sous la courbe (accélération transversale moyenne)
- accélération transversale maximale supportée
- vitesse à accélération transversale max.
- vitesse à accélération transversale nulle ("vitesse de danger")
- pente de la courbe après accélération transversale max.



Courbe de l'accélération transversale en fonction de la vitesse, tracée à l'issue de l'essai d'hydroplanage en courbe



Essai sur circuit de synthèse

Ces essais ont pour but de traduire la performance globale d'un ensemble pneu/véhicule, y compris ses aspects qualitatifs.

Principe de l'essai

Ces essais sont réalisés sur un circuit présentant une succession de virages de rayons décroissants (de la grande courbe à l'épingle), et différents revêtements routiers. Il représente des conditions de roulage très sévères.

On mesure le temps au tour et le temps de parcours par tronçon (transversal, mouillé, transversal humide, longitudinal forte hauteur d'eau, slalom mouillé).

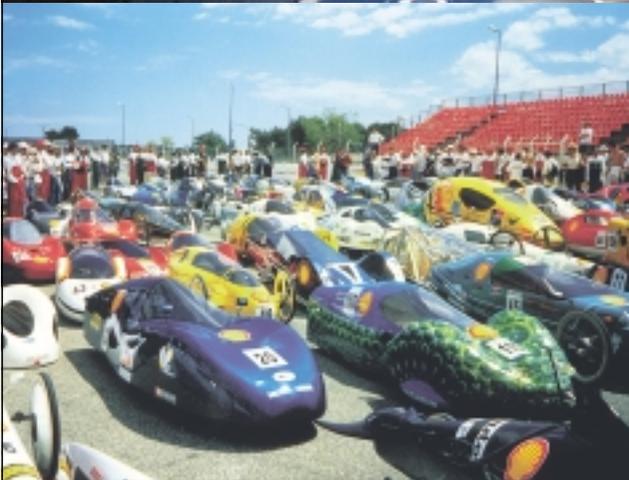
En fin d'essai, l'essayeur note le comportement sur sol mouillé du véhicule (motricité, freinage, sensibilité aux flaques en ligne droite, pouvoir directionnel, adhérence transversale, agrément de conduite, équilibre du véhicule), selon une grille de notation calibrée. Il note également la progressivité d'arrivée à l'adhérence maximale, ce qu'aucun test analytique ne permet de refléter.

N.B. Dans la plupart de ces tests, l'influence du véhicule est très importante. C'est pourquoi la notation du comportement par l'essayeur est indispensable à la compréhension des résultats.



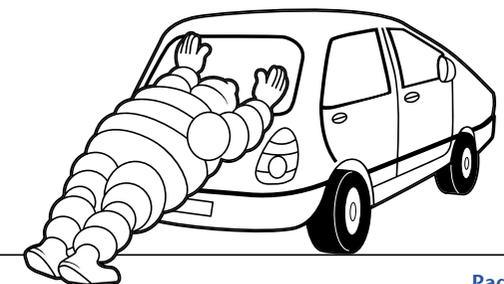
Circuit de synthèse du centre d'essais de Ladoux (France), appelé circuit du "Canard" d'après sa forme caractéristique. Ce circuit alterne grandes boucles, virages serrés et ligne droite.





VII *Et la résistance au roulement ?*

Comme l'adhérence, la résistance au roulement des pneumatiques est due à la visco-élasticité de la gomme. Cette propriété implique une perte d'énergie à chaque fois que le matériau subit une déformation. Rechercher toujours plus d'adhérence et moins de résistance au roulement semble donc contradictoire. Nous allons voir que, en réalité, il est possible de concilier ces deux performances.



Nous avons vu que les mécanismes de l'adhérence reposaient tous sur une caractéristique de la gomme - l'hystérèse - qui consiste en un retard de la déformation du matériau par rapport à la contrainte subie. C'est elle qui permet aux pains des pneumatiques d'enrober les indenteurs du sol dissymétriquement, de façon à générer des forces s'opposant au glissement. C'est elle aussi qui amplifie l'effet des forces d'adhésion moléculaires.

Mais voilà ! Nous avons vu également que l'hystérèse s'accompagnait systématiquement d'une déperdition d'énergie. On est donc tenté, a priori, de se demander si l'adhérence ne vient pas contrarier notre volonté de réduire la résistance au roulement ou, réciproquement, si les efforts de réduction de cette résistance au roulement n'entament pas la sécurité des passagers en grignotant leur potentiel d'adhérence.

Nous allons voir que, aujourd'hui, ce n'est plus vrai.

Si adhérence et résistance au roulement ont effectivement des points communs - l'hystérèse et la perte d'énergie - en revanche, les mécanismes qui les régissent sont, de par leur domaine fréquentiel, totalement différents, ce qui a permis de mettre fin à cet antagonisme.

Résistance au roulement



- Déformations dans la masse
- Basses fréquences
- Energie dissipée inutilement

Adhérence (résistance au glissement)



- Déformations de surface
- Hautes fréquences
- Energie dissipée utilement

■ D'OÙ VIENT LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT ?

A chaque tour de roue, sous l'effet de la charge (Z), le pneu se déforme sur toute sa largeur et toute son épaisseur, pour s'aplatir dans l'aire de contact. C'est cette **déformation de la structure** du pneu à l'entrée et à la sortie de l'aire de contact qui génère la perte d'énergie correspondant à la résistance au roulement. L'adhérence, qui correspond à une résistance au glissement, relève par contre de **déformations de surface** (sous l'effet des indenteurs) et même de déformations à l'échelle moléculaire (adhésion).



■ MAXIMISER L'ADHERENCE ET MINIMISER LA RESISTANCE AU ROULEMENT : UN VERITABLE DEFI A LA PHYSIQUE.

On peut se livrer à une analyse comparative simplifiée des deux phénomènes sur le plan de la **déperdition énergétique**.

L'énergie dissipée à chaque seconde par les mécanismes visco-élastiques peut être approchée par la relation :

$$E_{\text{dissipée instantanée}} \cong V \times h \times A \times Fr$$

avec :

V : volume de gomme déformé,
h : perte hystérétique de la gomme,
A : amplitude de la déformation,
Fr : fréquence de sollicitation.

Energie dissipée par les phénomènes d'adhérence et de résistance au roulement

	V	h	A	Fr	Energie dissipée instantanée $V \times h \times A \times Fr$
Adhérence	1	1	1	100	100
Résistance au roulement	10	1	10	1	100

V : volume de gomme déformé A : amplitude de la déformation
 h : perte hystérétique de la gomme Fr : fréquence de sollicitation

Les déformations par indentation sont des déformations de surface : on peut considérer que l'épaisseur de gomme concernée est de 1 mm. En revanche, les déformations de flexion et d'aplatissement dans l'aire de contact concernent toute l'épaisseur de la bande de roulement. Considérons, pour simplifier, que cette épaisseur est de 10 mm, soit un rapport de volume (V) de 1 à 10.

D'autre part, le rapport entre l'amplitude des déformations (A) est lui aussi de 1 à 10.

Cependant, le rapport des fréquences sollicitées (Fr) par les mécanismes d'adhérence et de résistance au roulement est de 100 à 1 en situation courante.

L'adhérence met donc couramment en jeu des dépenses d'énergie de même niveau que celles liées à la résistance au roulement.

Ces deux phénomènes, on vient de le montrer, sont directement liés au même paramètre fondamental : l'hystérèse de la gomme.

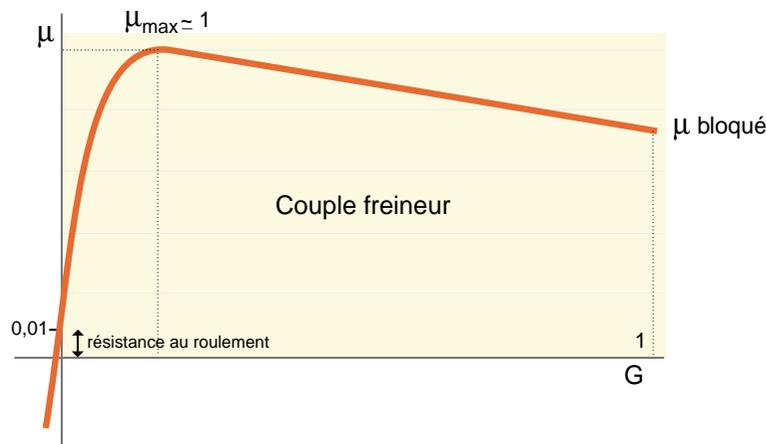
Il apparaît donc, au premier abord, impossible d'abaisser la résistance au roulement en diminuant l'hystérèse de la gomme sans compromettre le potentiel d'adhérence du pneu.

D'autant plus que les forces produites par les mécanismes d'adhérence sont très grandes comparées aux forces de résistance au roulement.

Nous avons déjà vu, en effet, en analysant la courbe du coefficient d'adhérence, que la résistance au roulement avait un μ freineur équivalent de 0,01 pour un pneu de véhicule de tourisme.

Pour une charge donnée, la force de résistance au roulement produite dans l'aire de contact est donc 100 fois plus petite que la force d'adhérence longitudinale maximale.

Loi $\mu(G)$ en couple freineur



La courbe ne passe pas par 0. Pour un glissement nul (roulage en roue libre), la roue finit par s'arrêter. Ceci correspond au phénomène de résistance au roulement, qui provient de la déformation du pneu à l'entrée et à la sortie de l'aire de contact à chaque tour de roue. Cette déformation présente un μ équivalent de l'ordre de :

- 0,01 (soit 10 kg/t) pour un pneu tourisme ;
- 0,005 (soit 5 kg/t) pour un pneu poids-lourd.



Si nous abaissons la résistance au roulement, n'abaissons-nous pas d'autant plus les forces d'adhérence ? Une analyse plus poussée des phénomènes fréquentiels a permis de résoudre cet antagonisme.

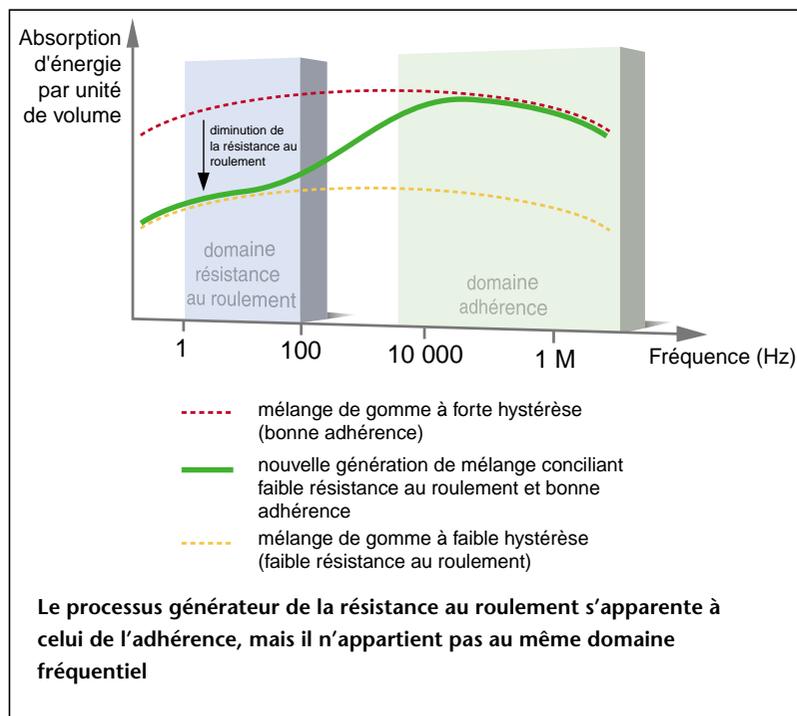
■ DEUX DOMAINES FRÉQUENTIELS DISTINCTS

Les déformations de surface, génératrices d'adhérence, se produisent à des fréquences comprises entre 10^3 et 10^{10} Hz, alors que les déformations de structure se produisent à chaque tour de roue, c'est-à-dire, pour une voiture roulant à 100 km/h, environ 15 fois par seconde. La résistance au roulement et l'adhérence ont donc deux territoires fréquentiels bien différents.

Là encore, une question vient naturellement à l'esprit : une gomme à forte hystérèse dans le domaine "utile" de l'adhérence ne présentera-t-elle pas une perte importante dans le domaine "inutile" de la résistance au roulement ?

Ce fut vrai, mais cela ne l'est plus.

La silice a permis de découpler les deux phénomènes. En effet, les gommages d'hier conféraient au pneu une courbe d'absorption d'énergie relativement plate. Résultat, ce que l'on gagnait en adhérence, on le perdait en résistance au roulement, et réciproquement. Mais aujourd'hui, les nouveaux mélanges à la silice apportent des solutions : leur courbe d'absorption d'énergie remonte fortement entre 100 et 10 000 Hz, ce qui permet de concilier les deux performances.



 Au point depuis 1993, les gommages à la silice - faisant partie de la technologie "pneu vert" ou Green X - permettent des gains de 20% en résistance au roulement sans aucune concession sur le niveau d'adhérence.



Pneu Green X avec bande de roulement à la silice.



A, B, C...



A

ABR : pp. 28, 39, 56, 57
Accélération : pp. 33, 56
Accélération centripète : p. 48
Adhérence longitudinale : Chap III.2
Adhérence transversale : Chap III.3
Adhésion : pp. 17, 18, 20, 22, 28, 29, 31, 60, 88
Aire de contact : pp. 33, 60, 61, 63, 65, 70
Aspérité (voir aussi Indenteurs) : pp. 17, 20, 22, 23

B

Bernoulli (équation de ~) : pp. 61, 62
Béton bitumineux drainant : pp. 24, 29, 31
Béton bitumineux : pp. 24, 29, 31
Bourrelet d'eau : pp. 61, 62

C

Caoutchoutique : voir comportement caoutchoutique
Circuit de synthèse : p. 86
Cisaillement, cisailer (voir aussi Pseudo-glissement) : pp. 34, 40, 42, 43, 45, 51, 52, 54
Coefficient d'adhérence, coefficient de frottement : pp. 23, 26, 27, 29, 30, 31
Coefficient d'adhérence longitudinale, coefficient de frottement longitudinal : pp. 26, 38, 43, 45, 55, 83
Coefficient d'adhérence transversale, coefficient de frottement transversal : pp. 26, 48, 50, 54, 55
Comportement caoutchoutique : pp.13, 14, 15, 19

Comportement vitreux : pp.13, 14, 15, 16, 19
Couple d'autoalignement : p. 52
Couple de basculement : pp. 72, 73
Couple de freinage : pp. 57, 72

D

Débit d'eau : p. 63
Décélération : voir Freinage
Déformation de structure : pp. 88, 90
Déformation de surface : pp. 88, 90
Déphasage : pp. 10, 12, 19
Dérive : pp. 46, 47, 50, 54, 56
Distance de freinage : pp. 82, 83
Drainage, drainer : pp. 22, 23, 29, 60, 61, 63, 64, 66, 67, 70

E

Elasticité, élastique (voir aussi Visco-élastique) : pp. 8, 11, 12, 13, 14
Elastomères : pp. 11, 17
Enduit superficiel : p. 24
Essais d'adhérence : Chap VI
Etrave, effet d'étrave, angle d'étrave : p. 62, 70
Evacuation (de l'eau) : pp. 61, 62, 63, 70

F

Fines : p. 24
Force centrifuge : pp. 46, 47, 54

Force centripète : p. 46, 54
Freinage, décélération : pp. 33, 38, 56, 72
Fréquence de sollicitation : pp. 13, 15, 16, 17, 18, 19
Front d'onde (voir aussi Bourrelet d'eau) : p. 62
Frottement de Coulomb : p.35

G

Glace : p. 30
Glissement, glisser : pp. 34, 35, 36, 37, 40, 42, 43, 45, 51, 52, 53, 54
Gomme : Chap I
Granulats : p. 24

H

Hauteur au sable : p. 23
Hauteur d'eau : p. 60, 63
Humide (zone ~) : pp. 60, 69
Hydrodynamique : pp. 60, 61, 65 (voir aussi Pression hydrodynamique)
Hydroplanage : pp. 61, 62, 63
Hydroplanage en courbe : p. 85
Hystérèse : pp. 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 19, 43, 53, 88

I

Indentation : pp. 17, 20, 22, 23, 28, 31, 60
Indenteurs (voir aussi Aspérités) : pp. 22, 23, 25, 88



L

Lamelle : pp. 60, 64, 66, 67, 68, 69, 70
 Liaisons de Van der Waals : p. 18
 Liant : p. 24
 Loi de frottement longitudinal : p. 39
 Loi de frottement transversal : p. 50
 Loi WLF : pp. 15, 16
 Longueur cisailée : pp. 34, 40, 41, 42
 Longueur glissée : pp. 34, 41, 42

M

Macrolisse : pp. 27, 31
 Macrorugosité : pp. 17, 23, 28, 29, 70
 Macrorugueux : pp. 27, 31
 Microlisse : pp. 27, 31
 Microglissement : voir Glissement
 Microrugosité : pp. 17, 23, 28, 29, 69
 Microrugueux : pp. 27, 31
 Module : pp. 12, 13, 14, 15

N

Neige : p. 30

P

Patinage sur place : p. 36
 Pendule SRT : p. 26
 Perte (d'énergie) : pp. 9, 10, 12, 19, 88, 89

Piste circulaire : pp. 84, 85
 Piston : pp. 9, 10, 19
 Pneumatique témoin : p. 81
 Polymère, polymérique : pp. 11, 12
 Ponts de soufre : pp. 11, 12, 14
 Pression hydrodynamique : p. 61
 Pseudo-glissement (voir aussi Cisaillement) : pp. 34, 35, 40, 43, 45, 52

R

Rainure : p. 64
 Relaxation : p. 13
 Repousser (l'eau) : pp. 60, 70
 Résistance au roulement : p. 43, Chap VII
 Ressort : pp. 8, 10, 19
 Revêtement routier : Chap II
 Rigidité : voir Module
 Roue bloquée, blocage : pp. 36, 43, 57, 72
 Roue de mesure, roue instrumentée : pp. 80, 82
 Rouleuse : p. 79

S

Sable : p. 24
 Sculpture (creux de ~) : pp. 60, 64, 65, 69, 70
 Silice : p. 90
 Sillon : p. 64
 Sous-charge : pp. 72, 73
 Sous-virage, sous-vireur : p. 74
 Stockage (de l'eau), stocker : pp. 22, 23, 29, 60, 65, 67, 70
 Surcharge : pp. 72, 73

Surface portante : pp. 23, 25, 28
 Survirage, survireur : p. 74

T

Taux de glissement : pp. 36, 45, 56
 Température : pp. 13, 14, 15, 43, 44, 52, 53
 Température de transition vitreuse : pp. 14, 15, 16, 19
 Temps de transfert : p. 65
 Tension superficielle : p. 69
 Transfert de charge latéral : pp. 47, 73
 Transfert de charge longitudinal : p. 72
 Transpercer (le film d'eau) : pp. 29, 60, 70

V

Véhicule analytique : p. 80
 Virage : pp. 33, 56
 Viscodynamique : pp. 60, 65
 Visco-élasticité, visco-élastique : pp. 8, 9, 13, 14, 17, 18, 19, 88
 Viscosité, visqueux : pp. 8, 9, 11, 12, 13
 Vitesse de danger : p. 85
 Vitesse de mobilité moléculaire : pp. 13, 14, 15
 Vitesse de sollicitation : pp. 13, 15
 Vitesse limite en virage : p. 49
 Vitreux : voir Comportement vitreux
 Vulcanisé : p. 11

