

# MICHELIN

## RESISTANCE AU ROULEMENT

### DES

## PNEUMATIQUES DE TOURISME

2584

- ELEMENTS DE CALCUL ET DE MESURE
- ASPECTS PHYSIQUES
- INFLUENCE DES PRINCIPAUX PARAMETRES
- CONSEQUENCES SUR LA CONSOMMATION DE CARBURANT

Notes :

PROPRIETE MICHELIN - Ne peut être diffusé sans son accord préalable.

R.R.1-Ext.



### SOMMAIRE

#### 1 - INTRODUCTION : FORCES AGISSANT SUR LE VEHICULE

- 1.1 - Résistance à l'avancement du véhicule et résistance au roulement des pneus
- 1.2 - Part de la résistance au roulement des pneus dans les forces agissant sur le véhicule

#### 2 - ELEMENTS DE CALCUL ET DE MESURE DE LA RESISTANCE AU ROULEMENT D'UN PNEUMATIQUE

- 2.1 - Définition de la résistance au roulement
- 2.2 - Formalisation mathématique de la résistance au roulement
  - 2.2.1 - Résistance au roulement d'une roue libre
  - 2.2.2 - Résistance au roulement d'une roue non libre
    - . Forces et moments appliqués sur roue freinée
    - . Relation entre M et X sous couples moteurs et freineurs
  - 2.2.3 - Définition de la mesure de la résistance au roulement sur volant
  - 2.2.4 - Coefficient de résistance au roulement

#### 3 - ASPECTS PHYSIQUES DE LA RESISTANCE AU ROULEMENT D'UN PNEUMATIQUE

- 3.1 - Pertes hystérétiques du pneu
- 3.2 - Pertes par frottement pneu-sol
- 3.3 - Pertes aérodynamiques du pneu
  - 3.3.1 - Maître couple du pneu
  - 3.3.2 - Interactions pneu passage de roue
  - 3.3.3 - Couple aérodynamique du pneu
- 3.4 - Pertes diverses

Notes :

R.R.1-Ext.

SOMMAIRE (Suite)4 - FACTEURS INFLUENCANT LA RESISTANCE AU ROULEMENT

## 4.1 - Des machines à volant jusqu'aux réalités routières

- 4.1.1 - Vitesse
- 4.1.2 - Charge
- 4.1.3 - Pression intérieure
- 4.1.4 - Temps de roulage
- 4.1.5 - Diamètres des volants de mesure
- 4.1.6 - Température ambiante
- 4.1.7 - Carrossage
- 4.1.8 - Dérive - Pinçage - Ouverture
- 4.1.9 - Rapport H/S
- 4.1.10 - Diamètre au seat
- 4.1.11 - Remarque sur la profondeur de sculpture

## 4.2 - Sur sols réels

- 4.2.1 - Sol meuble
- 4.2.2 - Sol mouillé
- 4.2.3 - Sol inégal

## 4.3 - Combinaison de différents facteurs

5 - RELATION RESISTANCE AU ROULEMENT-CONSOMMATION DE CARBURANT

## 5.1 - Influence sur la consommation de carburant

## 5.2 - Formulation empirique du gain relatif

6 - CONCLUSION

Notes :

R.R.1-Ext.

PROPRIETE MICHELIN - Ne peut être diffusé sans son accord préalable.

Page : S2



## 1 - INTRODUCTION : FORCES AGISSANT SUR LE VEHICULE

### 1.1 - Résistance à l'avancement du véhicule et résistance au roulement des pneus

Un véhicule en mouvement est freiné sous l'influence de la RESISTANCE A L'AVANCEMENT.

Que recouvre cette notion de résistance à l'avancement ?

Pour répondre à cette question, considérons, par exemple, une voiture de tourisme lancée sur une piste horizontale, la boîte de vitesse étant au "point mort".

Dans la figure 1 ci-dessous, sont indiquées toutes les forces qui agissent jusqu'à l'arrêt du véhicule :

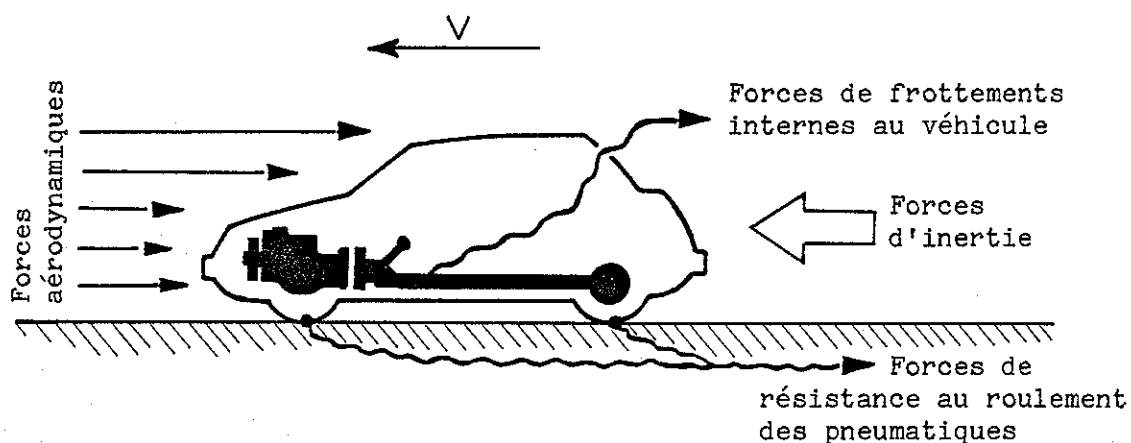


Fig. 1 - Forces de résistance à l'avancement

Notes :

R.R.1-Ext.



On dénombre, d'une part :

- Les forces aérodynamiques :

- . Ecoulement externe de l'air autour du véhicule (y compris autour des pneus)
- . Ecoulement de l'air dans les passages de roues
- . Ecoulements internes : du circuit de refroidissement, de l'aération...

- Les forces de résistance au roulement des pneumatiques

- Les forces de frottements internes du véhicule :

- . Frottements paliers et joints d'étanchéité
- . Frottements garnitures (plaquettes) de freins
- . Frottements transmission
- . Frottements amortisseurs
- . etc...

et, d'autre part, dans le sens du déplacement :

- Les forces d'inertie :

- . Masse du véhicule
- . Inertie de rotation des ensembles tournants

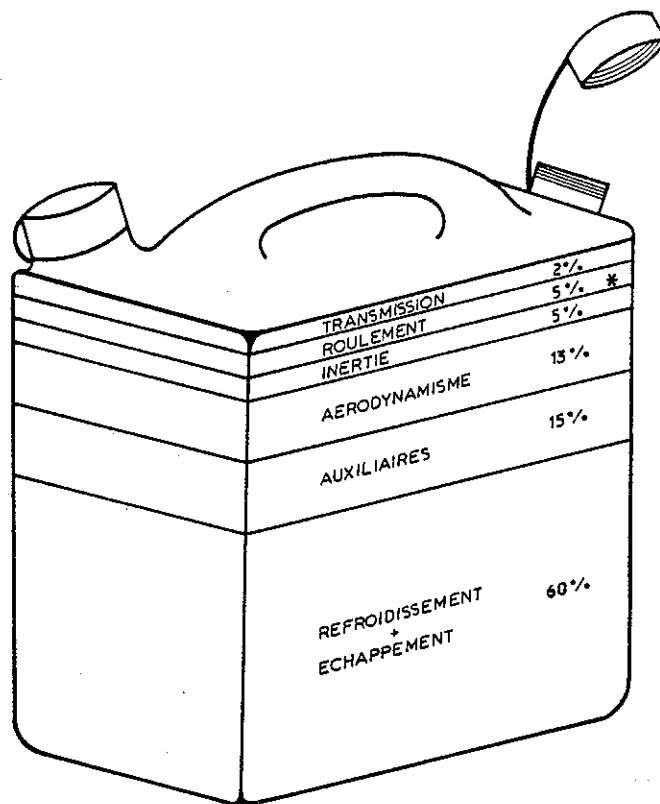
1.2 - Part de la résistance au roulement dans les forces agissant sur le véhicule

Dans la réalité d'un usage quotidien moyen d'un véhicule, une décomposition énergétique de la résistance à l'avancement est schématisée par la figure 2.

La part de la résistance au roulement des pneus s'élève à 4% de l'énergie totale qui est consommée. En tenant compte que seulement  $\frac{1}{4}$  de l'énergie consommée est utilisée pour l'avancement du véhicule, les 4% correspondent donc, en fait, à 16% de l'énergie consommée par la résistance à l'avancement.

Notes :

R.R.1-Ext.



\* Les 5% portés sur la fig.2 se décomposent ainsi :

4% pour les pneus  
+ 1% pour les moyeux

Fig. 2

- La recherche du pneu à faible résistance au roulement ne doit pas se réaliser au détriment de la sécurité, de l'agrément, de la durée et du coût du service attendu par l'utilisateur.
- Les gammes de pneus développées actuellement par Michelin obéissent à ces impératifs.

Le présent document tente de répondre aux questions suivantes :

- Qu'est-ce que la RESISTANCE AU ROULEMENT d'un PNEUMATIQUE ?
- Quels paramètres l'influencent ?
- Quelles en sont les conséquences sur la consommation de carburant ?

Notes :

R.R.1-Ext.



## 2 - ELEMENTS DE CALCUL ET DE MESURE DE LA RESISTANCE AU ROULEMENT D'UN PNEUMATIQUE

### 2.1 - Définition de la résistance au roulement

Le pneu est un produit déformable. Appliquons une charge verticale et un couple moteur à la roue : le pneu transmet une partie du travail fourni par le couple moteur par adhérence ; l'autre partie est transformée en énergie thermique.

On peut ramener la perte d'énergie à différents phénomènes :

- 1) Pertes hystérétiques du pneu dues aux déformations de ses constituants
- 2) Pertes aérodynamiques, par couple aérodynamique, dues aux frottements circonférentiels de l'air à la surface de l'ensemble tournant
- 3) Pertes, par frottement dans l'aire de contact, dues aux glissements induits par des différences de vitesses entre le sol et les zones du pneu à son contact.
- 4) Pertes par frottements entre pneu et jante (portage)
- 5) Pertes par frottements de l'air interne avec la surface intérieure du pneu

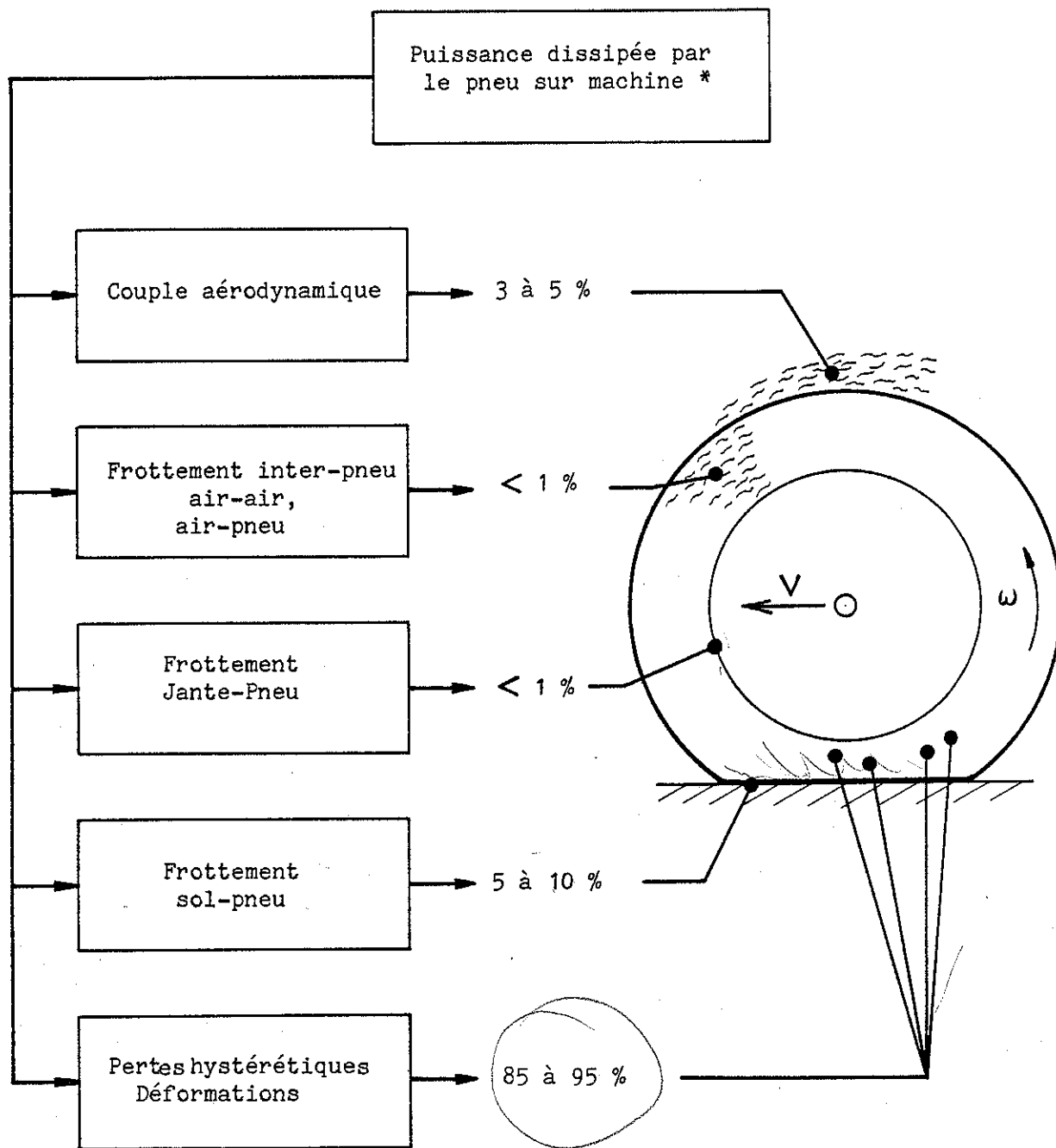
La perte d'énergie par unité de longueur parcourue par le pneu (déformations, frottements...), qui est une caractéristique de son architecture est définie comme étant la RESISTANCE AU ROULEMENT.

Cette perte d'énergie s'exprime également sous la forme d'un rendement, c'est-à-dire la capacité d'un pneu à transmettre un couple au sol avec la perte la plus faible possible.

La mesure exacte de chacun de ces phénomènes, pris isolément, n'étant pas possible en général, on ne peut obtenir qu'un ordre de grandeur de ces différentes pertes comme indiqué figure 3.

Notes :

R.R.1-Ext.



\* Pas de pénétration dans l'air

V = 80 Km/h

Fig. 3

Notes :

R.R.1-Ext.





## 2.2 - Formalisation mathématique de la résistance au roulement

2.2.1 - Résistance au roulement d'une roue libre - Schéma de principe

Pour créer une base de discussion, il est absolument nécessaire que le lecteur ait une image très claire des TORSEURS qui agissent sur le pneu.

Regardons le cas d'un pneu roulant sans glissement sur un sol plan et lisse (voir figure 4). Pour maintenir le pneu à une vitesse "V" constante, il faut appliquer une force  $F_o$  au centre roue. Dans l'aire de contact, s'établit la force  $X_o$ .

Cette force de résistance est, par définition, la force de résistance au roulement d'une roue libre.

En vitesse constante, on peut écrire :

$$|F_o| = |X_o|$$

Le pneu, avec sa pression intérieure, supporte la charge Q. La répartition de pression dans l'aire de contact, entre le pneu et le sol, produit une force de réaction du sol sur le pneu, qui équilibre la charge Q. Cette force Z a son point d'application décalé de  $\epsilon$  par rapport à la verticale passant par le centre roue. La résultante R de Z et  $X_o$  passe par le centre roue et équilibre la résultante -R des forces  $F_o$  et Q.

Les équations de la mécanique donnent :

$$|F_o| = |X_o|$$

$$|Q| = |Z|$$

$$|F_o \cdot R_e| = |\epsilon \cdot Z|$$

La puissance absorbée par le pneu vaut :

$$P_o = F_o \cdot R_e \cdot \omega_o$$

avec  $R_e$  = rayon écrasé

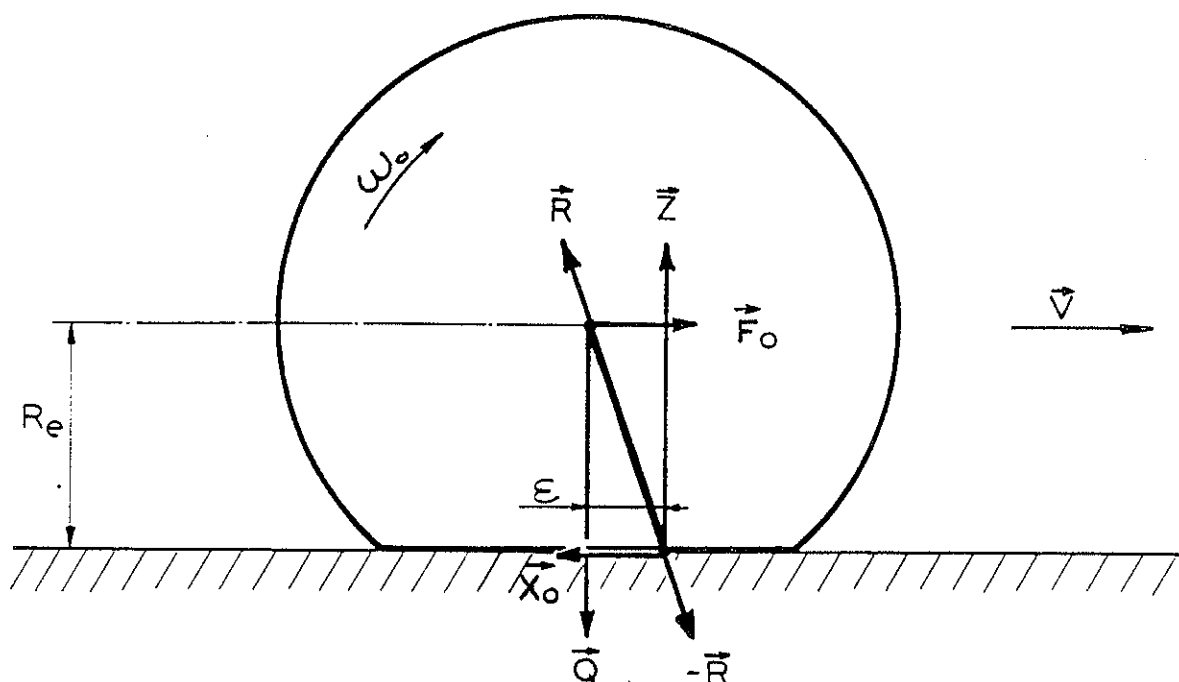


Fig. 4 - Résistance au roulement - Roue libre

Forces du moyeu sur le pneu

$F_0$  = Force pour maintenir la roue à une vitesse constante

$Q$  = Charge

$-R$  = Force résultante moyeu sur pneu

Forces du sol sur pneu :

$X_0$  = Force longitudinale dans l'aire de contact

$Z$  = Réaction de charge

$R$  = Force résultante sol sur pneu

$$X_0 + F_0 = 0 \quad Q + Z = 0$$

$$|X_0| = |F_0| = \text{Force de résistance au roulement d'une roue libre sans glissement}$$



### 2.2.2 - Résistance au roulement d'une roue non libre (Couple moteur ou freineur)

Pour compléter la formalisation du système de forces et de couples agissant sur le pneu, voyons le cas particulier de l'application d'un couple (M) moteur ou freineur.

Prenons, par exemple, la figure 5 qui décrit (dans l'hypothèse d'un carrossage et d'une dérive nuls) les forces longitudinales s'exerçant sur un pneu en déplacement, sous couple freineur, à l'instant t.

La force F est la force d'inertie longitudinale (motrice) appliquée par le véhicule au centre roue.

Le freinage produit des forces de frottement supplémentaires, dans l'aire de contact.

La somme de ces forces ajoutée à la résistance au roulement est notée X.

( $X_R$  est la partie de X représentant la résistance au roulement)

Ces différents éléments permettent d'établir un bilan énergétique ramenant au mètre parcouru l'énergie consommée par le pneu.

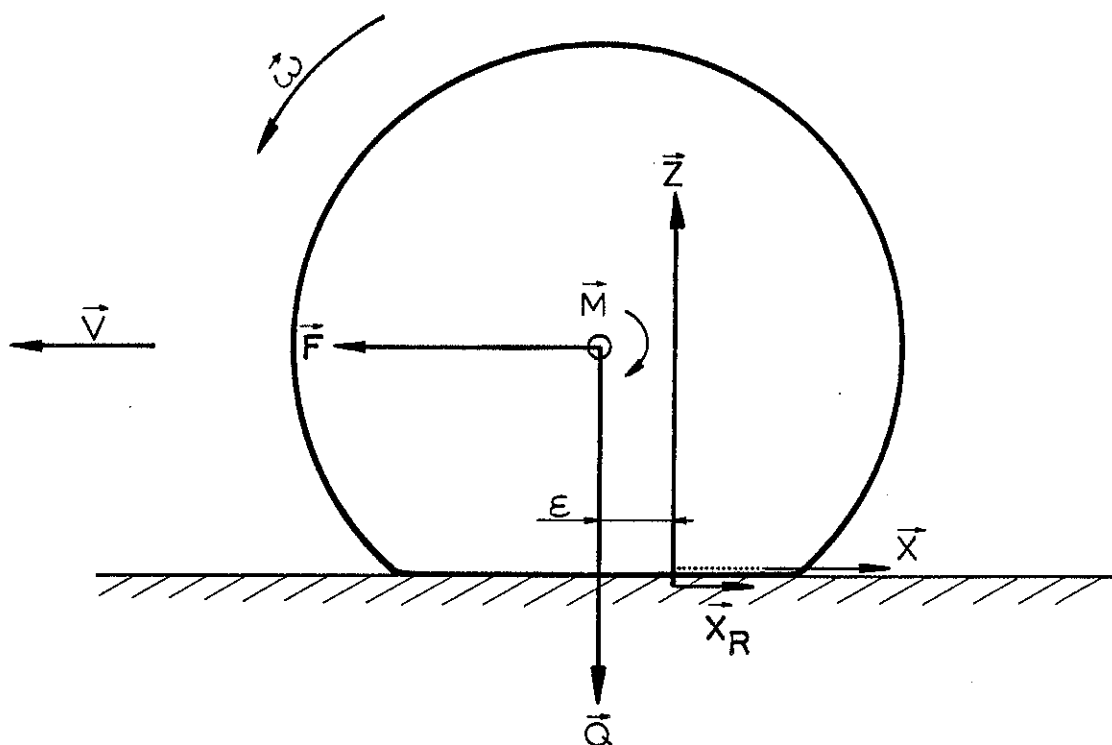


Fig. 5 - Forces sur roue freinée

$V$  = Vitesse

$\omega$  = Vitesse angulaire

$Q$  = Charge

$Z$  = Force de réaction à la charge

$F$  = Force d'inertie appliquée au centre roue

$X$  = Force dans l'aire de contact (du sol sur le pneu)

$X_R$  = Force de résistance au roulement (sol sur pneu)

$M$  = Couple freineur (appliqué par l'axe sur la roue)

$\epsilon$  = Décalage du point d'application de  $Z$  par rapport au centre roue

Notes :

R.R.1-Ext.



La relation entre le couple  $M$  et les forces agissant au centre roue (voir figure 6) est une droite d'équation :

$$M = X \cdot R_o + M_o$$

Cette équation est prouvée expérimentalement. Le point d'intersection  $X_o$  de la droite avec l'axe d'abscisse donne la résistance au roulement d'une roue libre.

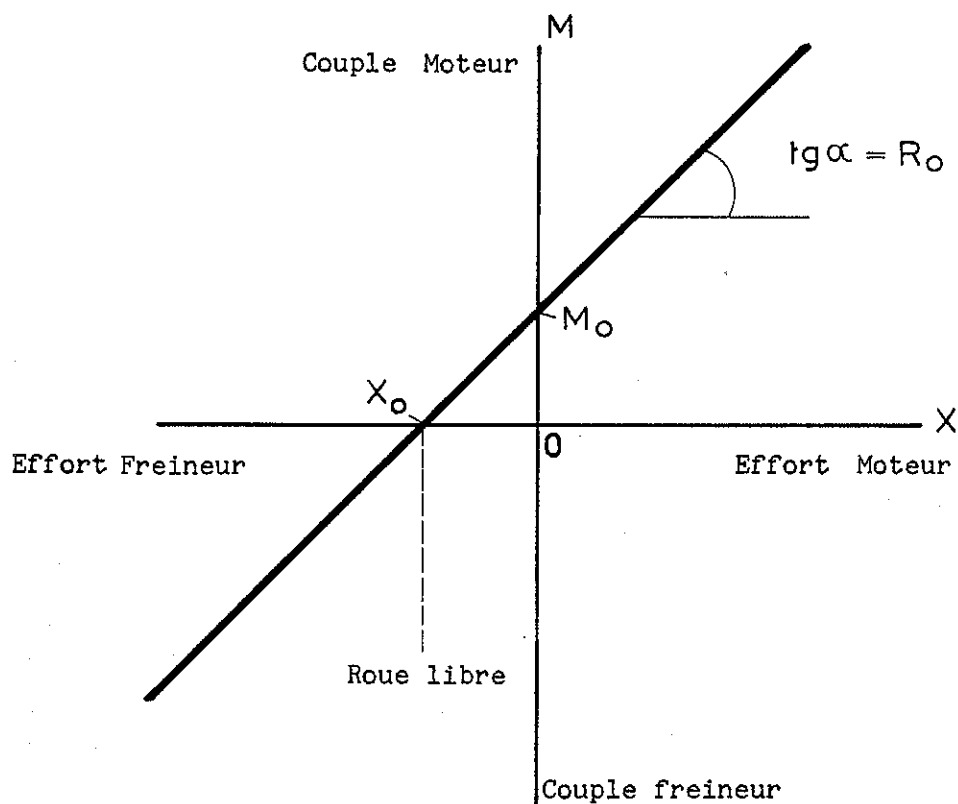


Fig. 6 - Relations entre  $M$  et  $X$  sous couples moteurs et freineurs

$M$  = Couple moteur ou freineur

$X$  = Force motrice ou retardatrice (sol sur pneu)

$X_o$  = Résistance au roulement (roue libre)

$M_o$  = Couple nécessaire pour maintenir la roue libre à vitesse constante (couple dû à la résistance au roulement)

$R_o$  = Rayon de roulement en roue libre (non soumise à un couple moteur)  
(Remarquer que  $R_o$  est plus grand que le rayon écrasé  $R_e$ )

Notes :

R.R.1-Ext.



### 2.2.3 - Définition de la mesure de la résistance au roulement sur volant

En général, on mesure la résistance au roulement d'un pneumatique sur un volant. Il est ainsi plus facile que sur sol réel d'étudier l'influence de certains paramètres.

Les méthodes de mesure déterminent la somme de toutes les énergies perdues lors du roulage \*, et l'on en déduit une force  $X$  conventionnelle appliquée dans l'aire de contact (voir figure 7).

$X_m$  désigne l'effort appliqué sur l'axe de la roue.

Appliquons le théorème des travaux virtuels au système pneu volant.

La force  $X_m$  se déplace tangentiellement à un arc de cercle de centre  $O'$  et de rayon  $R + R_e$ .

La force  $X$  se déplace tangentiellement à un arc de cercle de centre  $O'$  et de rayon  $R$ .

On peut alors écrire :

$$X.R = X_m (R + R_e)$$

$$\text{d'où} \quad X = X_m \frac{(R + R_e)}{R}$$

\* (Pertes hystérétiques, pertes par actions de contact avec le sol et avec l'air)

### 2.2.4 - Coefficient de résistance au roulement ( $C_R$ )

La définition d'un "coefficient de résistance au roulement"  $C_R$  permet la comparaison des valeurs de résistance au roulement des différents pneus.

$$C_R = \frac{X}{Z}$$

Nous exprimons :

$X$  en kg

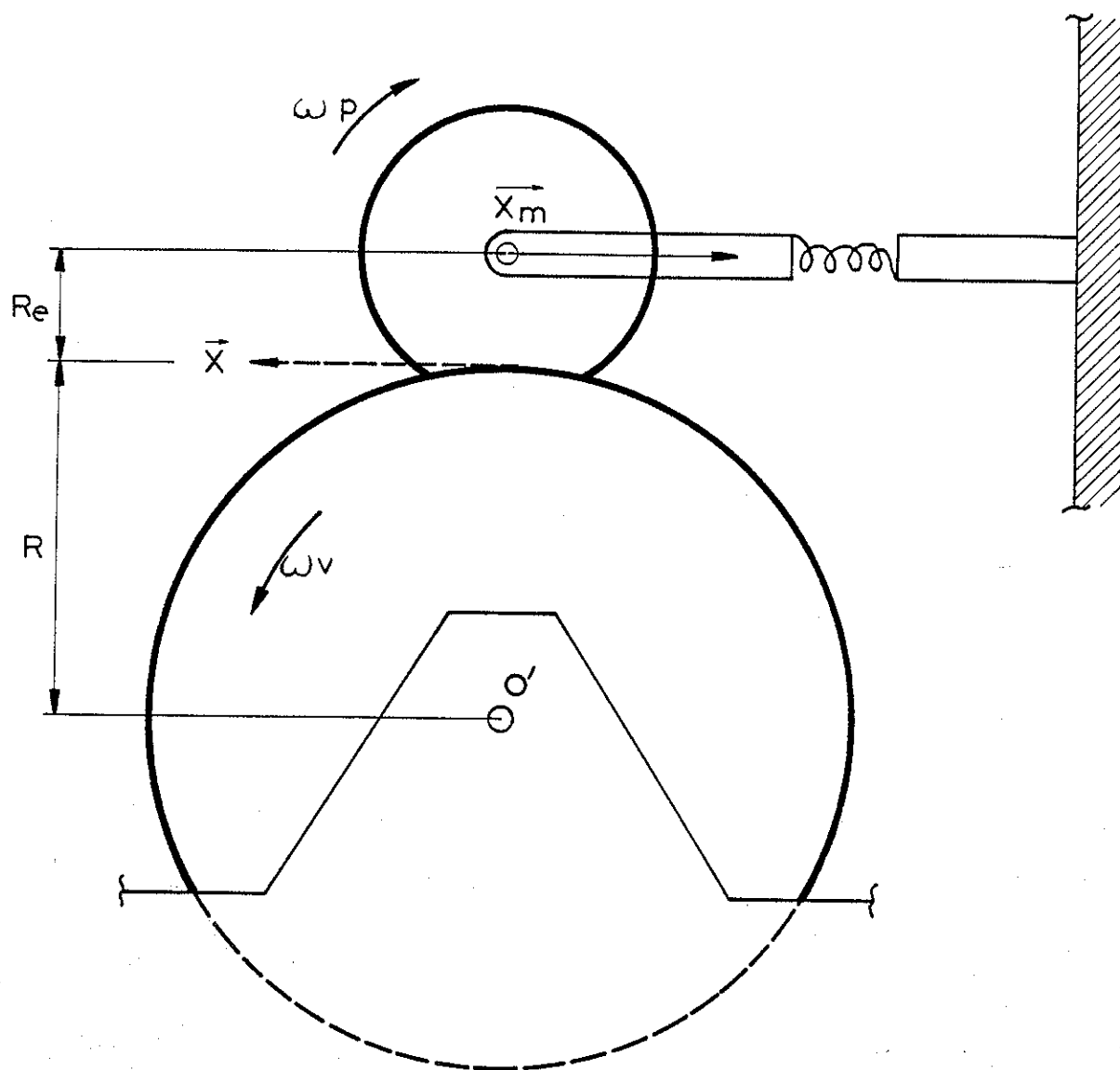
$Z$  en tonnes

Notes :

R.R.1-Ext



Fig. 7 - Résistance au roulement sur volant



$X_m$  = Force longitudinale au centre roue

$R$  = Rayon volant

$R_e$  = Rayon écrasé du pneu

$X$  = Force dans l'aire de contact (volant sur pneu)

Notes :

R.R.1-Ext.



### 3 - ASPECTS PHYSIQUES DE LA RESISTANCE AU ROULEMENT D'UN PNEUMATIQUE

Jusqu'à présent, nous avons examiné les aspects relevant de la résistance au roulement d'un pneu soumis à une vitesse de rotation mais sans vitesse de translation.

Dans ce paragraphe nous allons examiner la notion élargie de la résistance à l'avancement du pneu, ce qui implique une vitesse de translation non nulle.

#### 3.1 - Pertes hystérétiques du pneu

Lorsqu'un pneumatique se déforme, par exemple sous l'action d'une charge verticale, l'énergie mise en oeuvre n'est pas totalement restituée lorsque la déformation cesse : on observe des pertes hystérétiques.

Une modélisation simple d'un pneumatique en roulage permet d'imaginer ce phénomène (voir figure 8).

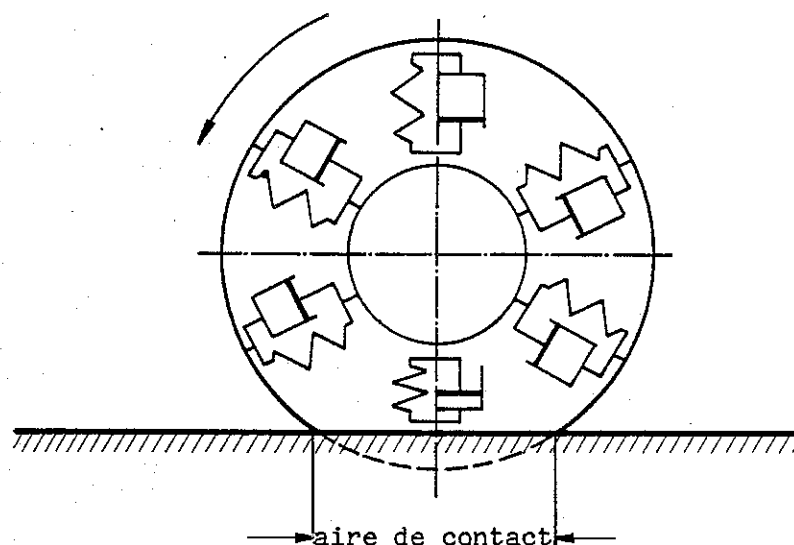


Fig. 8 - Modélisation du pneu

Notes :

R.R.1-Ext.





On assimile le pneumatique à un ensemble "d'éléments" constitué de ressorts disposés radialement avec, en parallèle, un amortisseur.

Lorsque le pneu tourne, chaque "élément" vient à tour de rôle en contact avec le sol. Le ressort est alors comprimé et une partie de l'énergie mécanique est transformée en énergie calorifique, à cause de l'amortisseur lié au ressort.

L'énergie ainsi perdue, lorsque le pneu parcourt une distance donnée, permet d'appréhender la résistance au roulement due au phénomène d'hystérésis, en divisant l'énergie par la distance.

$$F_R \text{ hyst.} = \frac{\text{Travail d'amortissement}}{\text{Distance}}$$

### 3.2 - Pertes par frottement pneu-sol

Dans l'aire de contact, ce sont les processus physiques d'adhésion et d'engrènement qui rendent possible la transmission des forces...

Adhésion et engrènement conjugués aux déformations de la mise à plat de la ceinture produisent des mouvements relatifs (glissements) dans l'aire de contact. Ces déplacements provoquent des pertes d'énergie par frottement.

### 3.3 - Pertes aérodynamiques du pneu

La traînée aérodynamique du véhicule peut être fictivement subdivisée en deux effets :

- . la traînée due à la caisse et à ses accessoires habituels, d'une part, et
- . la traînée due aux ensembles pneus/roues

Une mesure des multiples effets (caisse-pneu) est très difficile, car les effets des deux éléments pris séparément ne sont probablement pas additifs mais interactifs.

L'expérience nous a montré la part importante du pneu, tant par sa section frontale que par son coefficient de forme, dans la traînée aérodynamique du véhicule.

Mesurer le  $SC_x$  du véhicule, sans tenir compte des variations possibles du  $SC_x$  pneus, conduit à une erreur d'évaluation très sensible. Il faut en effet savoir que le  $SC_x$  pneus représente 1/5 du  $SC_x$  total du véhicule.

Le paragraphe suivant décrit très succinctement les différentes composantes de la résistance aérodynamique du pneu.

Notes :

R.R.1-Ext.

3.3.1 - Maître couple du pneu

Il est apparu, dans un premier temps, que la grosseur du boudin était le facteur prépondérant dans la part de la traînée aérodynamique relevant du pneu.

Un ensemble de résultats, relevés lors de nos propres expériences sur véhicules actuels, a permis d'établir la relation empirique suivante :

Variation en % du  $SC_x$  véhicule = 0.15 fois la variation de grosseur boudin  $x$  hors tout exprimée en mm

Ainsi, une augmentation de la grosseur du boudin de 20 mm entraînerait un accroissement de traînée aérodynamique du véhicule de 3%.

Ceci ne doit pas surprendre puisque la surface frontale des 4 pneus (les pneus arrière s'opposent eux aussi à l'écoulement de l'air) représente de 10 à 13% de la surface frontale totale du véhicule.

En regard de la force résistance de l'air, la forme aérodynamique du pneu (exprimée par le coefficient  $C_x$ ) a aussi une influence très grande. Des campagnes de mesures en soufflerie ont montré que le  $C_x$  des pneus écrasés et tournants était relativement élevé (de l'ordre de 0.60, alors que les véhicules actuels n'excèdent pas 0.45, et descendent même à moins de 0.30) et que les écarts relatifs de  $C_x$ , entre pneus SR de divers types, peuvent aller jusqu'à 10%.

Dans ces conditions, le  $SC_x$  pneu "pèse" environ 20% du  $SC_x$  total du véhicule.

On constate que le coefficient  $SC_x$  varie avec le rapport H/S

H/S	$SC_x$
0.80	0.61
0.70	0.58
0.60 à 65	0.55

}  $\pm 0,02$

Notes :

R.R.1-Ext.



### 3.3.2 - Interactions pneu-passage de roue

Le pneu est intégré dans le passage de roue. Il apparaît donc, dans la réalité, des phénomènes d'interactions pneu-passage de roue pour l'écoulement de l'air.

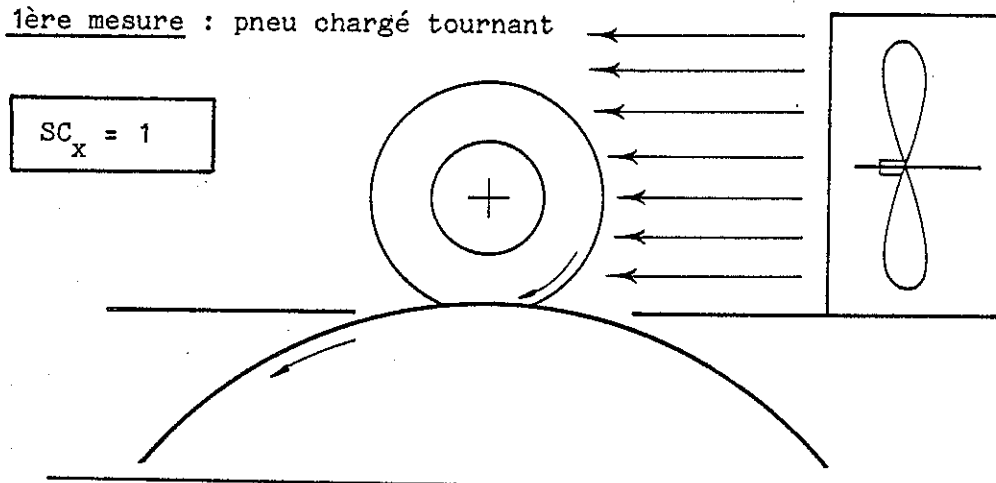
Si le pneu est caché à 50% par un capotage, son  $SC_x$  devrait être divisé par 2. Or, ce n'est pas le cas, car on obtient un  $SC_x$  apparent  $SC'_x \approx 0,68 SC_x$  initial (voir figure 9).

Ceci confirme l'interaction entre le pneu et la cavité de passage de roue.

Il est vraisemblable que cette interaction pourra être diminuée par une meilleure intégration du pneu dans l'espace roue.

#### Influence d'un capotage simulant une cavité de passage de roue sur le $SC_x$ d'un ensemble pneu-roue

1ère mesure : pneu chargé tournant



2e mesure : pneu chargé, tournant capoté à mi-hauteur

$SC'_x = 0,68$     On espérait  $SC'_x = 0,50$

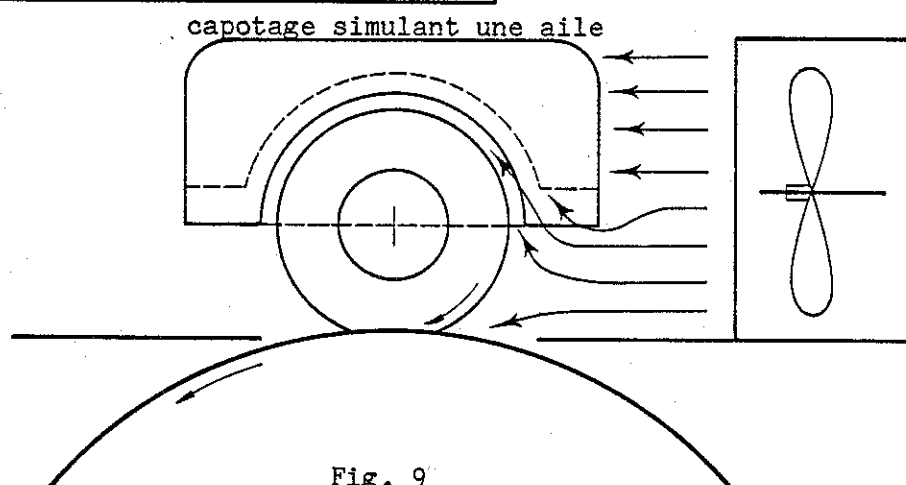


Fig. 9

Notes :

R.R.1-Ext.



En imaginant que l'on puisse ramener cette perturbation du  $C_x$  pneu de 35% à 0%, on gagnerait 7% sur le  $SC_x$  total du véhicule.

C'est donc ici que la collaboration entre le Constructeur et le Pneumaticien peut s'avérer très fructueuse.

### 3.3.3 - Couple aérodynamique du pneu

Une mention doit être faite au sujet du couple aérodynamique du pneu.

Ce couple résulte de la rotation du pneu et de la roue dans l'air calme, donc de la "rugosité" de cet ensemble.

Le mécanisme de ce phénomène n'est pas de même nature que la pénétration du pneu dans une veine d'air.

Toutefois, les faits expérimentaux montrent que le pneu en rotation qui génère un couple aérodynamique et le  $C_x$  de traînée pure sont assez étroitement liés. Ceci nous autorise à prendre, pour le pneu en rotation dans une veine d'air, un  $C_x$  forfaitairement majoré.

Mentionnons enfin qu'une roue et un enjoliveur adapté permettent de diminuer le couple aérodynamique de l'ensemble tournant et le  $C_x$  du véhicule, de façon très sensible.

### 3.4 - Pertes diverses

On les signalera pour mémoire puisqu'elles sont  $< 1\%$

- . Les pertes par frottements dues à l'air interne
- . Les pertes par frottements entre pneu et jante (au portage en particulier)

Notes :

R.R.1-Ext.

4 - FACTEURS INFLUENCANT LA RESISTANCE AU ROULEMENT4.1 - Des machines à volant jusqu'aux réalités routières4.1.1 - Vitesse

On mesure généralement l'influence de la vitesse sur un volant.

On constate une augmentation exponentielle de la résistance au roulement. Jusqu'aux environs de 100 km/h, la résistance au roulement varie très faiblement. On estime que ce fait découle de la superposition des phénomènes suivants comme indiqué figure 10.

- I - Effet de la diminution de l'hystérèse avec l'échauffement des mélanges
- II - Diminution de la résistance au roulement par l'accroissement de pression de l'air interne (à masse d'air constante)
- III - Effet de l'interaction entre la déformation du sommet par centrifugation et la courbure du sol
- IV - Effet du couple de frottement aérodynamique de l'ensemble pneu roue

Le diagramme (figure 10) indique que la valeur du  $C_R$  peut doubler entre 100 km/h et 180 km/h (pour un pneu de la catégorie S).

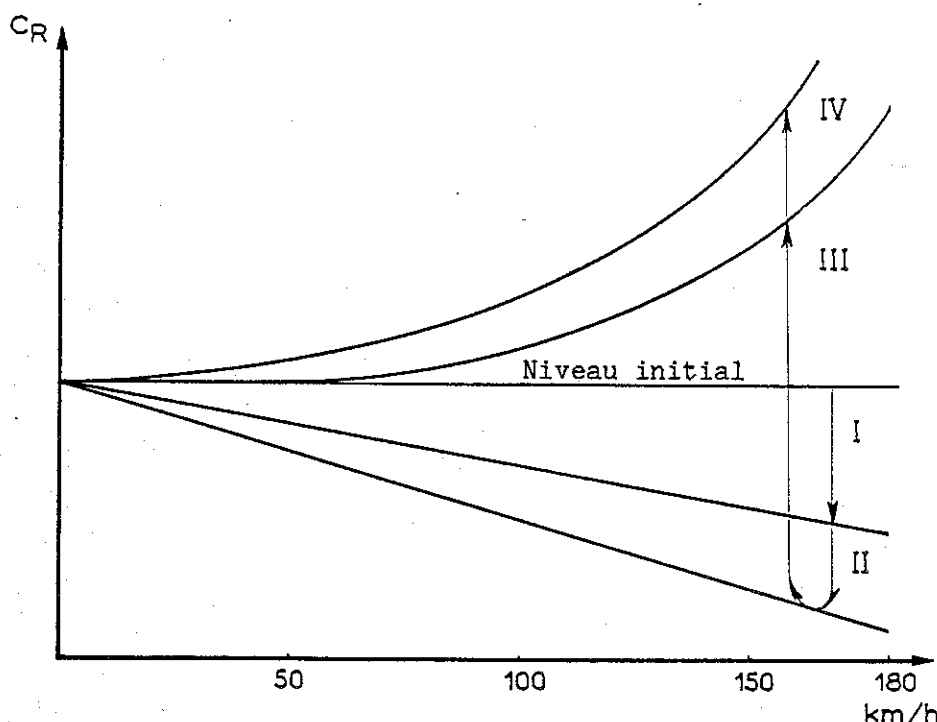


Fig. 10 - Effet de la vitesse sur la résistance au roulement

Notes :

R.R.1-Ext.

PROPRIETE MICHELIN - Ne peut être diffusé sans son accord préalable.

Page : 18/35



## 4.1.2 - Charge

Si la charge augmente, la force de résistance au roulement augmente mais plus lentement, donc le rendement s'améliore (figure 11).

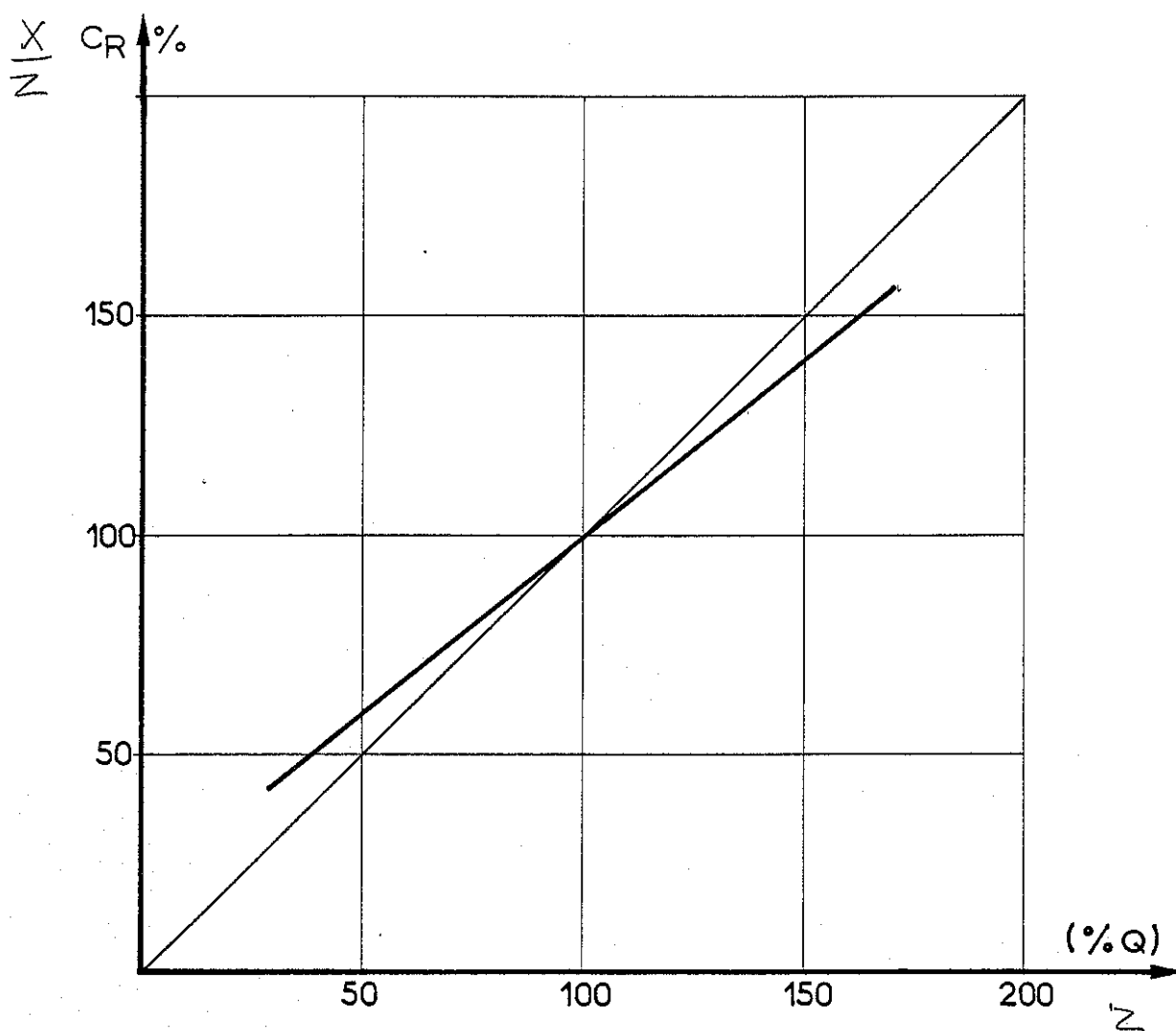


Fig. 11 - Effet de la charge

Notes :

R.R.1-Ext.



#### 4.1.3 - Pression intérieure

La pression du pneu est un des paramètres importants. Lors de la mesure de la résistance au roulement, deux possibilités existent :

- . Pression régulée
- . Pression en évolution libre

Dans le premier cas, on maintient la pression du pneu à une valeur constante. Ceci est plus rigoureux en terme d'analyse.

Toutefois, nous pensons que les mesures à évolution libre sont plus près de la pratique. De fait, l'utilisateur ne roule pas en réglant sa pression.

Remarque - Notre expérience nous montre qu'environ 40% à 60% des voitures roulent en sous-gonflage. Un sous-gonflage de 25% augmente la résistance au roulement d'environ 16% (figure 12). Plus la pression est élevée, plus la résistance au roulement est faible, d'où l'importance de la surveillance de la pression des pneus par l'utilisateur.

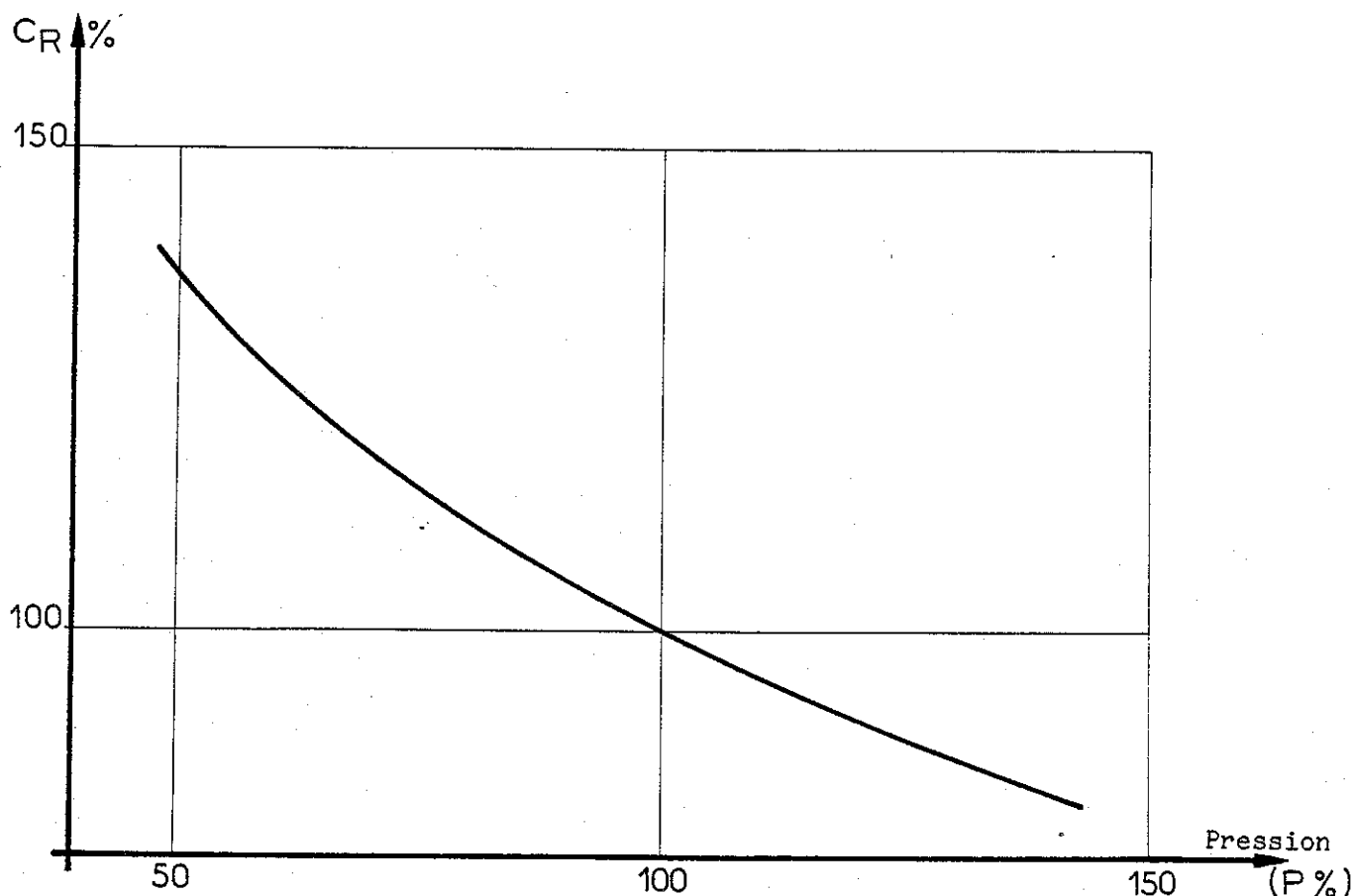


Fig. 12 - Effet de la pression

Notes :

R.R.1-Ext.

4.1.4 - Temps de roulage

Si on démarre pneu froid, et si on maintient la vitesse constante, on observe une décroissance exponentielle de la résistance au roulement. Pour les pneus de Tourisme, il faut environ trente minutes pour atteindre un régime stabilisé : température, pression et résistance au roulement.

Ceci s'observe aussi bien sur sol réel que sur machine.

Au démarrage, la résistance au roulement peut être de plusieurs dizaines de pourcents plus élevée qu'elle ne le sera en régime stabilisé. Ce résultat est important ; notons qu'en conduite urbaine, la majorité des véhicules n'atteint pas le régime stabilisé.

4.1.5 - Diamètres des volants de mesure

La puissance absorbée par le pneu -donc la résistance au roulement- et la température dans les pneus augmentent très vite lorsque la courbure des volants augmente.

Si l'on compare des résultats obtenus sur un diamètre infini (sol plan = base 100) à ceux obtenus sur un diamètre de 0,220 m (banc à rouleaux), on constate des variations de la résistance au roulement pouvant atteindre 200 à 300%.

Type de sol	Développement	Classement % à 100 km/h
Banc à rouleaux lisses acier	0,688 m	200 ... 300
Volant acier lisse Ø 1,7 m	5,34 m	121
Volant acier lisse Ø 2 m	6,30 m	117
Volant acier lisse Ø 2,7 m	8,50 m	112,5
Sol plan acier lisse		<span style="border: 1px solid black;">100</span> BASE

Les mesures montrent en particulier que la résistance au roulement sur banc à rouleaux peut être plusieurs fois supérieure à celle que l'on obtient sur sol plan.

L'énergie absorbée sur banc à rouleaux est tellement importante que les pneus peuvent être détruits sur place à très basse vitesse.

Ce qui est certain, c'est que les pneus ne travaillent pas dans les conditions de service normal.

Nous avons constaté qu'il en résulte fréquemment des inversions de classement des pneus...

Notes :

R.R.1-Ext





### 4.1.8 - Dérive, pinçage, ouverture

Les roulages avec réglages du parallélisme comportant un pinçage ou une ouverture sont assimilés à des roulages avec dérive.

La résistance au roulement augmente avec la valeur de la dérive donc du pinçage ou de l'ouverture.

L'influence de ces paramètres est variable d'un type de pneu à l'autre.

A titre d'exemple, voici quelques valeurs caractéristiques pour une roue de 14".

Parallélisme	0	$\pm 3$ mm	$\pm 6$ mm	$\pm 9$ mm	$\pm 12$ mm	$\pm 15$ mm	$\pm 18$ mm
Dérive correspondante	0	$\pm 15'$	$\pm 30'$	$\pm 45'$	$\pm 60'$	$\pm 75'$	$\pm 90'$
Croissance $C_R$	0	+ 1,5%	+ 5%	+ 10%	+ 17%	+ 25%	+ 34%

Retenons :

- que l'influence du parallélisme est négligeable dans la plage  $\pm 2$  à 3 mm
- qu'elle est en moyenne de l'ordre de 1% par mm pour les parallélismes forts (jusqu'à + 10 mm).

La figure 15 donne une idée de l'influence de la dérive sur la résistance au roulement ( $C_R = f(\text{angle de dérive})$ ).

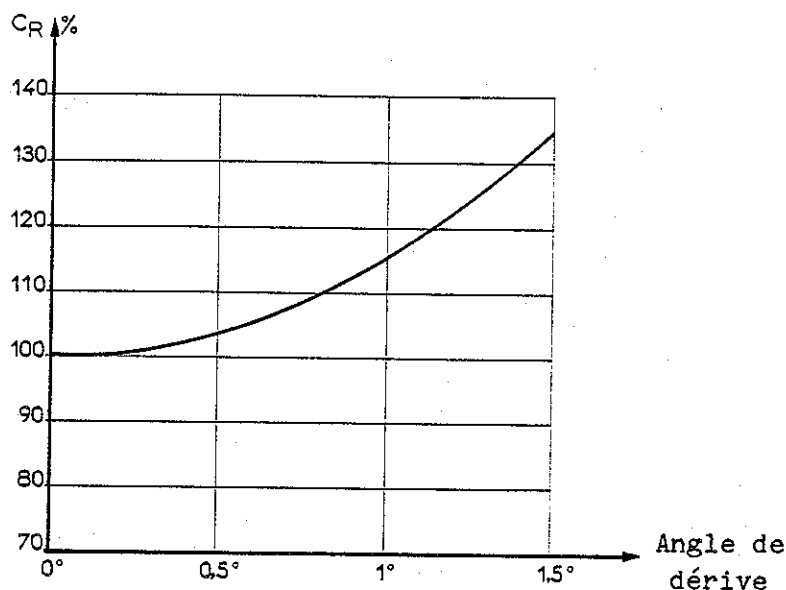


Fig. 15 - Effets de dérive, pinçage, ouverture

Notes :

R.R.1-Ext

4.1.9 - Rapport H/S

Nos expériences nous montrent une influence sensible sur la résistance au roulement. Entre les H/S 0.85 et 0.60, la résistance au roulement diminue d'environ 12%. Au-dessous de 0.60, nous observons de nouveau un accroissement de la résistance au roulement. (Voir figure 16)

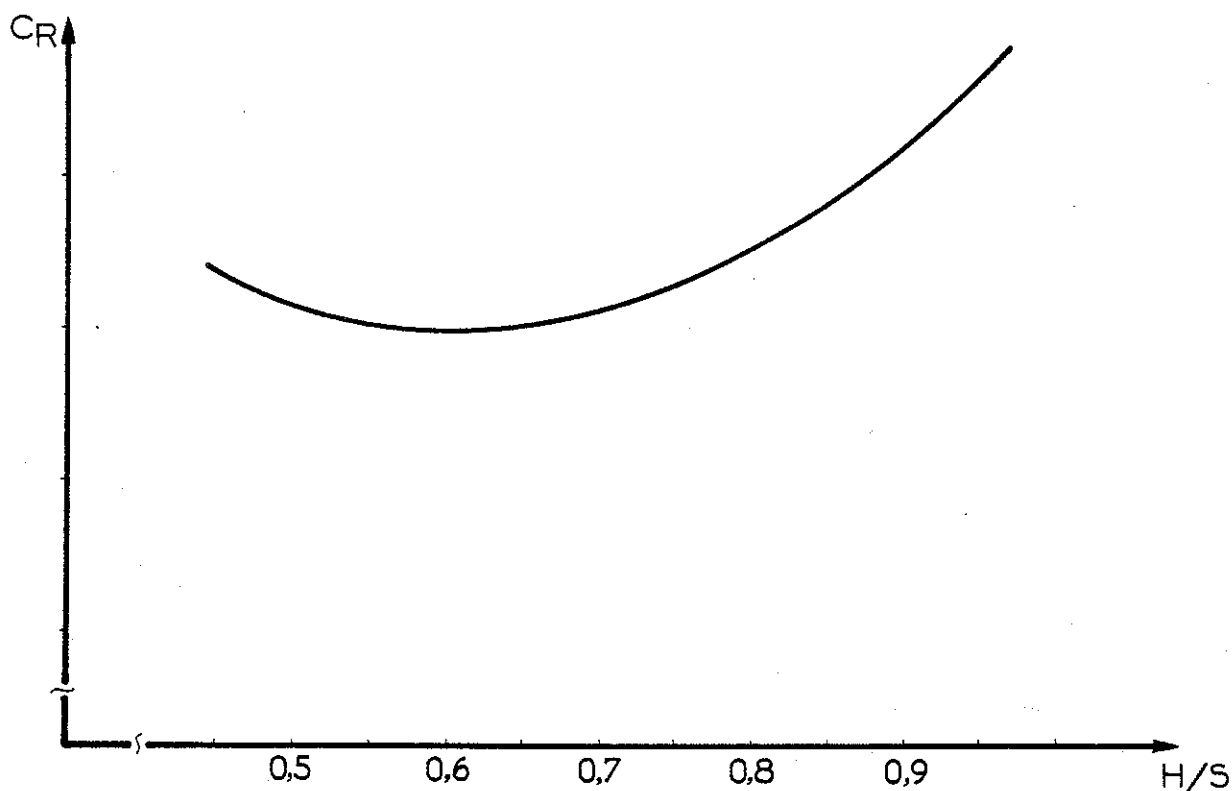


Fig. 16 - Effet du rapport H/S

4.1.10 - Diamètre au seat

Une augmentation du diamètre au seat améliore (à largeur de boudin équivalente) la valeur de la résistance au roulement. Nos mesures montrent que l'écart, entre un pneu 145 R 10 et un pneu 145 R 15, est d'environ 15%.

Notes :

R.R.1-Ext.



## 4.1.11 - Remarque sur la profondeur de sculpture

On peut aisément constater qu'un pneu usé a une résistance au roulement plus faible que le même pneu neuf (diminution de 4 à 5% par mm d'usure, soit un gain global d'environ 25 à 30%). Voir figure 17.

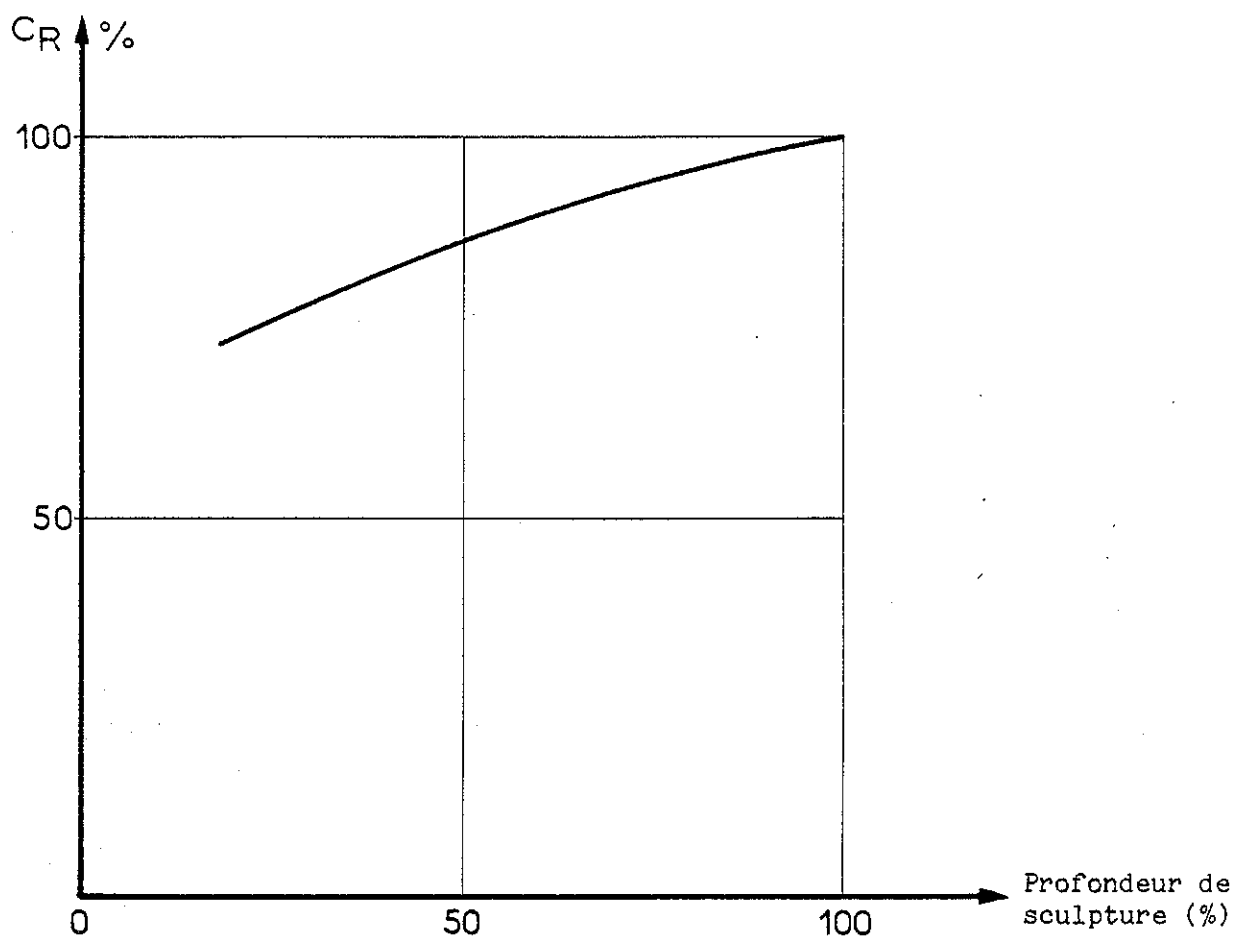


Fig. 17 - Effet du degré d'usure

Dans le domaine de la résistance au roulement, ce constat incite à réaliser des pneus à faible profondeur de sculpture mais, par ailleurs, de tels pneus (à architecture et matériaux identiques) subiraient une diminution de leur niveau d'adhérence sur sols fortement arrosés.

Les pneus de conception récente représentent un bon compromis adhérence-résistance au roulement obtenu par l'optimisation de la sculpture et des matériaux.

Notes :

R.R.1-Ext.



#### 4.2 - Sur sols réels

Les routes réelles diffèrent toujours du sol théorique : plan, sec et lisse.

On trouve :

- . des sols meubles
- . des sols mouillés
- . des sols inégaux

##### 4.2.1 - Sol meuble

Une roue lancée sur une piste déformable doit vaincre une résistance au roulement supplémentaire par rapport à un sol très rigide. Cette force résistante résulte de la compression et du déplacement du sol, ainsi que des frottements des flancs dans les ornières du sol (Voir figure 18). Une diminution de la compacité du sol produit une augmentation de la résistance au roulement (voir figure 19).

Cette forme particulière de la résistance au roulement concerne seulement les pays ayant une forte proportion de routes non revêtues et pour les usages "hors route".

Notes :

R.R.1-Ext.

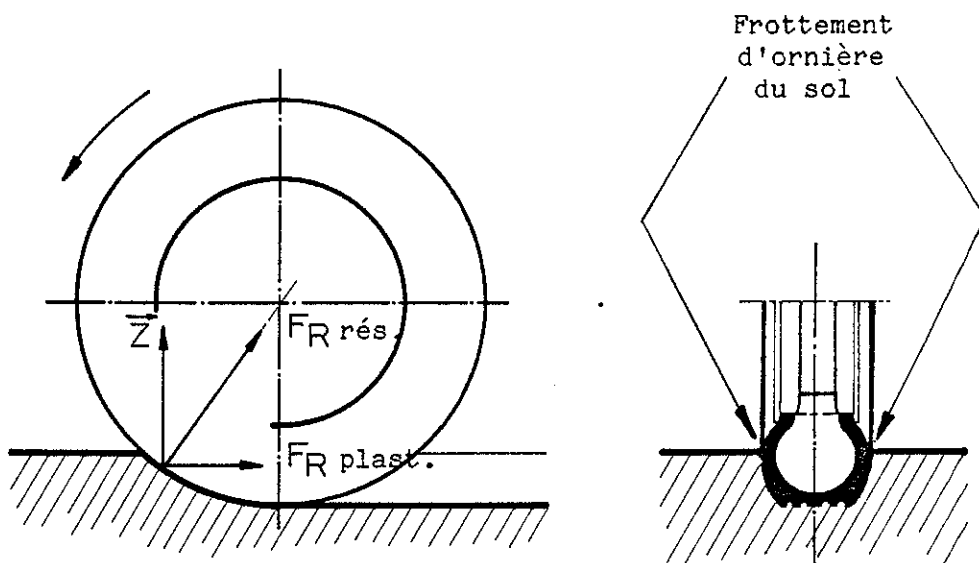


Fig. 18 - Force liée à la déformation et à l'ornière du sol

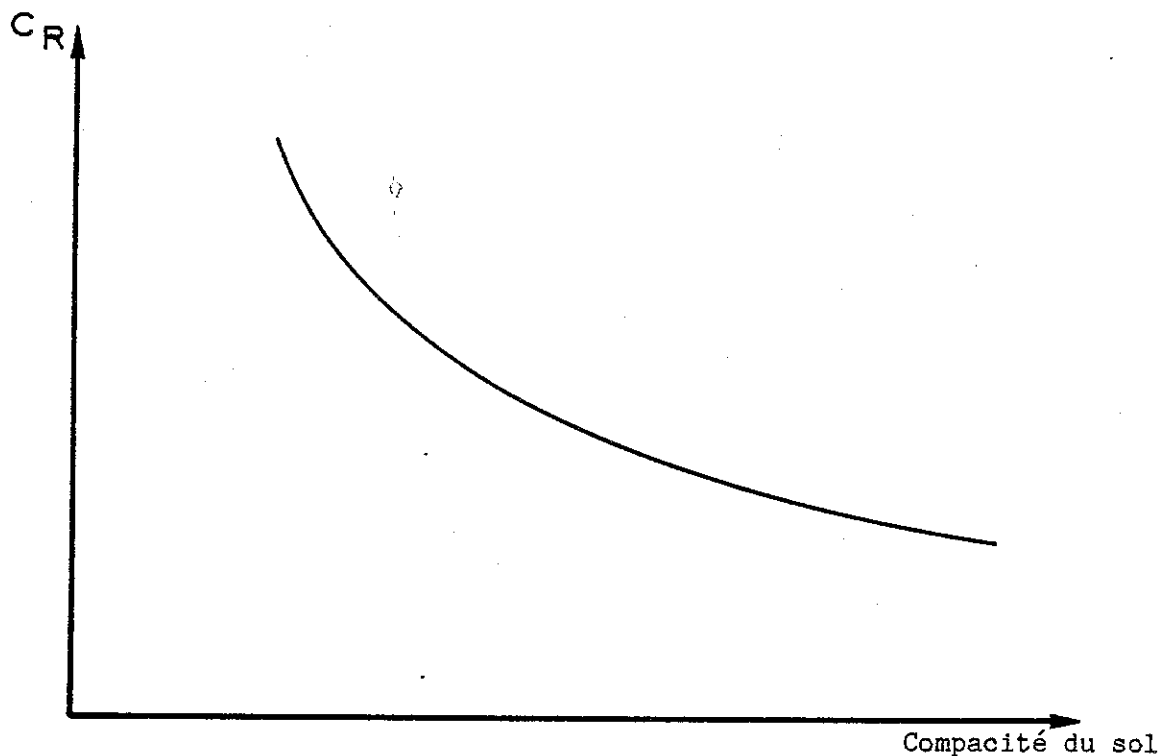
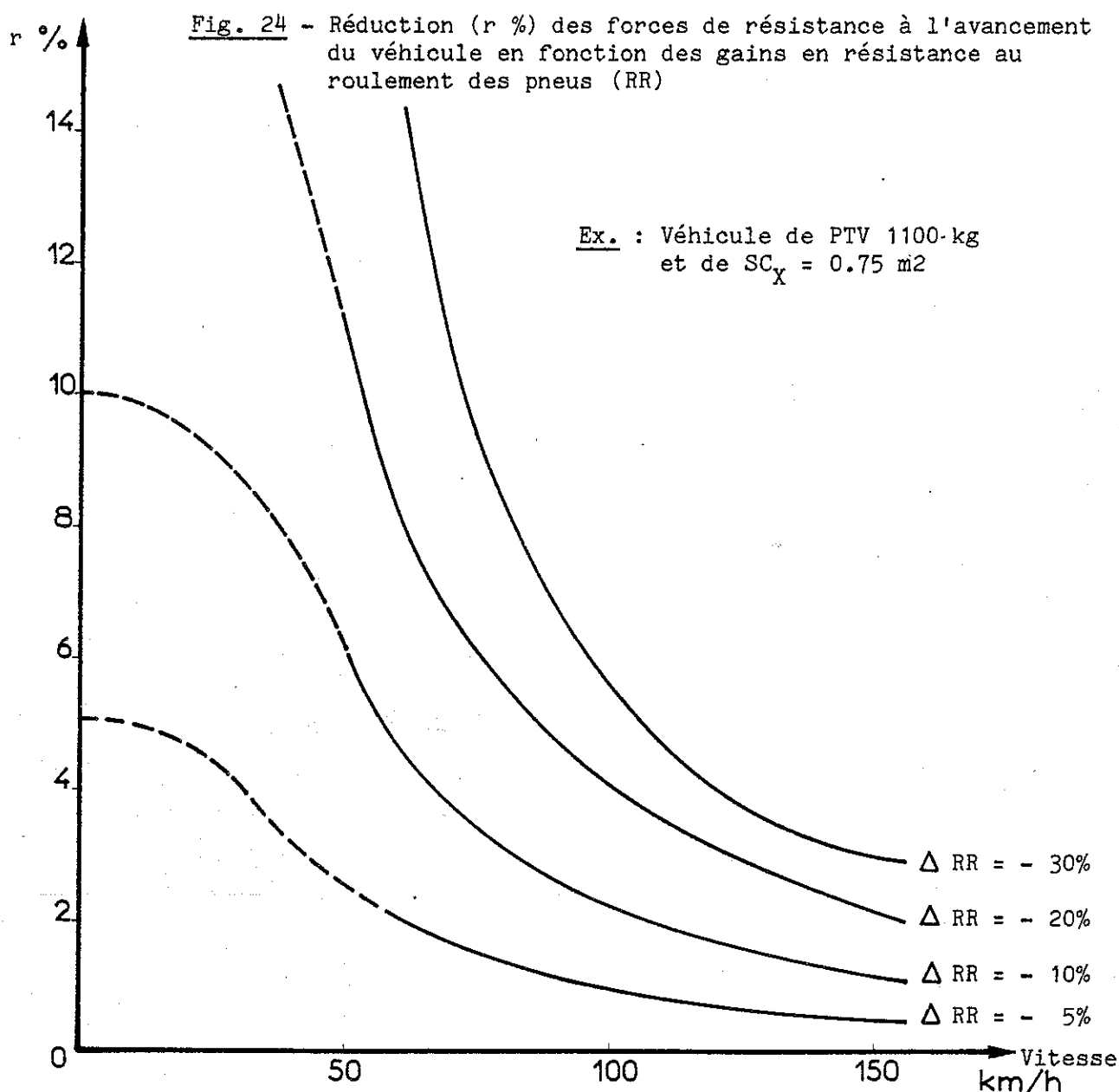


Fig. 19 - Influence de la compacité du sol

5 - RELATION RESISTANCE AU ROULEMENT - CONSOMMATION DE CARBURANT5.1 - Influence sur la consommation

Globalement, l'influence de la résistance au roulement sur la consommation d'essence dépend de son importance relative par rapport aux autres pertes de puissance.

Pour donner un ordre de grandeur, considérons la figure 24. Elle montre l'influence d'un gain en résistance au roulement sur la réduction des forces de résistance à l'avancement pour un véhicule donné. Naturellement, le gain en % sur les forces de résistance à l'avancement augmente si la vitesse est plus faible.



Notes :

R.R.1-Ext.



Si la vitesse augmente, les composantes, autres que la résistance au roulement des pneus, vont croître relativement plus vite que cette dernière.

Il en résulte que l'incidence de gains en résistance au roulement des pneus, sur la résistance à l'avancement du véhicule, s'amenuise progressivement avec l'augmentation de la vitesse.

Regardons par exemple un cas extrêmement favorable, de gain sur la résistance au roulement, de 30%.

On constate que le gain en résistance à l'avancement ne s'élève qu'à 3%, pour une vitesse de 150 km/h.

On ne peut donc attendre des miracles de la réduction de la résistance au roulement. La diminution de consommation qui en résulte est faible. Pourtant, en liaison avec d'autres innovations économiques, c'est un élément de réduction de la consommation totale.

5.2 - Formulation empirique du gain relatif en consommation  $\frac{\Delta C}{C}$  par  
rapport au gain en résistance au roulement  $\frac{\Delta RR}{RR}$

L'expérience de ces quinze dernières années nous permet d'écrire :

$$\frac{\Delta C}{C} = 0,1 \text{ à } 0,2 \quad \frac{\Delta RR}{RR} = 0,4 \text{ à } 0,9 \quad \frac{\Delta d}{d}$$

avec  $\Delta d$  = Variation du rapport de démultiplication de la chaîne cinématique, dans laquelle le pneu intervient par son rayon de roulement et non par son rayon libre ( $\frac{\varnothing \text{ extérieur}}{2}$ )



### 6 - CONCLUSIONS

L'évaluation de la résistance au roulement n'est pas chose aisée...

Les valeurs obtenues par divers Laboratoires, pour une même enveloppe, peuvent varier du simple au triple, pour les cas extrêmes.

Les causes en sont principalement des différences :

- . de terminologie
- . de méthodes et conditions de mesure

Nous espérons que le présent document,

- en précisant quelques définitions et
- en situant l'influence des principaux paramètres de mesure

contribuera à faciliter le dialogue technique entre Constructeurs et Manufacturiers...

Notes :

R.R1-Ext.