

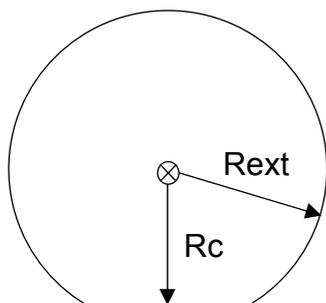
Le pneumatique : quelques aspects de son comportement

Cette nouvelle INFOTECH a pour objectif de décrire les aspects fonctionnels les plus importants du comportement du pneumatique. Ces contenus seront utiles pour expliquer les problèmes relatifs à la dynamique du véhicule (particulièrement le guidage), les stratégies anti-blocage de roues, ... ce qui peut amener à certaines démarches de diagnostic en après-vente.

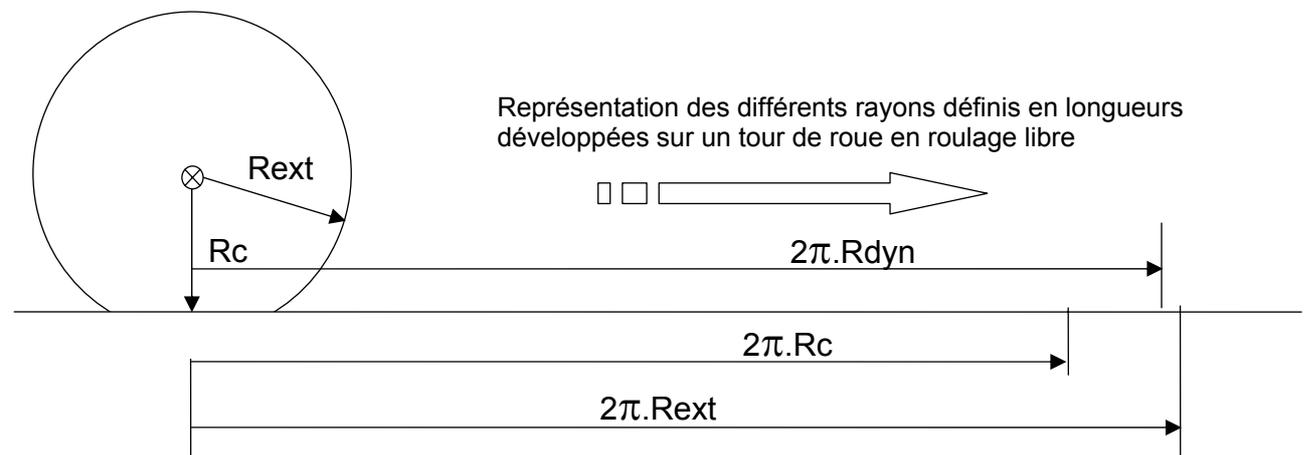
Les modèles théoriques proposés sont insuffisants pour rendre compte de manière exhaustive des phénomènes mis en jeu, ils permettent néanmoins de faciliter la compréhension en respectant la réalité du phénomène et peuvent être un outil pour les formateurs ayant à aborder ces sujets.

Rayon dynamique de roulement en roulage libre

Un pneumatique chargé se voit imposer une déformation qui permet d'installer une zone de contact pneu/sol. A cet endroit le rayon du pneumatique diminue de son rayon extérieur (R_{ext}) à son rayon sous charge (R_c)



Il n'est donc pas évident de connaître le rayon dynamique de cette roue qui va servir, par exemple, à calculer la vitesse du véhicule pour un régime moteur et un rapport de transmission donné. Nous trouvons fréquemment cette question résolue avec un calcul considérant que la longueur développée par tour vaut $2\pi.R_c$, ce qui est une erreur.



En réalité le rayon dynamique (R_{dyn}) est très proche du rayon extérieur et assez éloigné du rayon sous charge, ce qui produit des pertes très faibles entre le pneumatique et le sol. Il faut garder à l'esprit que la bande de roulement est "collée" sur la ceinture du pneumatique et que cette ceinture est très rigide en extension/compression (par contre très souple en flexion). A chaque tour de roue la totalité de cette ceinture est donc déroulée au sol (un peu à la manière d'une chenille) ; c'est ce comportement qui a permis au pneumatique radial de supplanter les structures diagonales en terme de résistance au roulement.

Le rayon dynamique est donc une caractéristique de fabrication qui est fournie par le constructeur, elle est annoncée pour une charge et une vitesse donnée. Pour un

calcul simple, en l'absence de donnée constructeur, nous pouvons utiliser le rayon extérieur qui en est une meilleure approximation que le rayon sous charge.

Conséquences

- Ce rayon dynamique est donc très peu influencé par la pression de gonflage puisque une variation de 1 bar de la pression de gonflage ne le fera varier que de 0,2% (valeur moyenne sur la production actuelle). Cette stabilité a entraîné un échec des recherches visant à détecter les sous gonflages en utilisant les capteurs ABS présents sur le véhicule. L'usure du pneumatique aura elle-même une influence négligeable sur le rayon dynamique ; une usure de 6 mm de la bande de roulement fera varier R_{dyn} de l'ordre de 0,15 mm (en l'augmentant puisque le couplage ceinture/ sol devient plus raide).
- Il est possible de faire admettre ce comportement un peu "inattendu" par une expérience simple à réaliser sur un sol plat en bon état :
 - Une roue d'un véhicule est mesurée en rayon de roulement (avec un régleur ou mieux avec un trusquin), sa pression est réglée à sa valeur nominale.
 - Un trait est marqué sur le pneumatique à la verticale de l'axe de roue et un repère est fait au sol exactement en face de ce trait.
 - Le véhicule est poussé de manière à réaliser un nombre tours de roues entier (5 à 10) puis la roue est nettement dégonflée de manière à mesurer un nouveau R_c plus faible.
 - Le véhicule est alors repoussé vers sa position de départ et arrêté après le même nombre de tours de roue, le trait du pneumatique est de nouveau sur la verticale passant par l'axe de roue.
 - Un nouveau repère est alors fait au sol en face du trait et l'écart avec le premier repère peut être mesuré.
 - Il est alors possible de conclure en comparant le pourcentage de réduction du rayon sous charge et le pourcentage de réduction du rayon dynamique chiffré par la distance entre les deux repères au sol divisée par la longueur de roulage du véhicule.

Glissement circonférentiel du pneumatique en motricité et freinage

Préambule : Le comportement du pneumatique étant souvent décrit avec des termes s'appliquant à la mécanique des solides rigides, il peut apparaître des confusions sur certains termes : frottement, glissement, adhérence.

Dans ce mouvement de roulement d'une enveloppe élastique sur un sol dur (ça se complique si le sol est ductile) il peut y avoir un glissement relatif de l'enveloppe par rapport au sol sans qu'il y ait frottement de la gomme sur le sol : le glissement n'est plus contradictoire avec l'adhérence. De même lorsque du frottement apparaît dans la zone de contact pneu/sol celui-ci peut ne concerner qu'une partie de la zone de contact. Nous pouvons même dire que lorsque le coefficient d'adhérence entre le sol et la gomme devient nul (au niveau microscopique) l'adhérence du pneumatique n'est pas nulle (au niveau macroscopique). Cette situation est même décrite par un nouveau terme, "l'adhésion" du pneumatique.

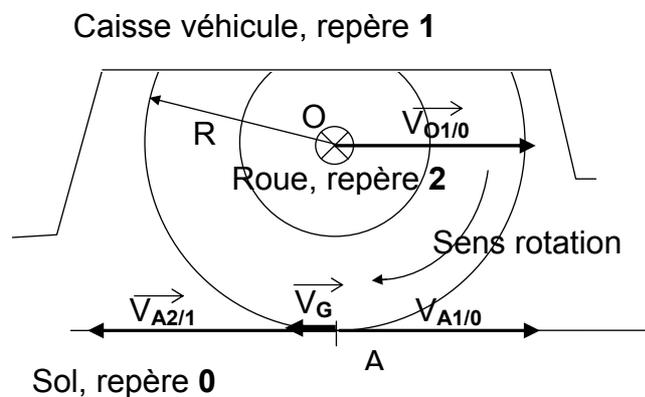
En conclusion il faut rester vigilant et ne pas transposer les modes de description habituels à un cas aussi complexe.

Définition du glissement circonférentiel.

Le pourcentage de glissement auquel font référence tous les documents expliquant les stratégies de régulation des systèmes ABS est rarement défini de manière satisfaisante puisqu'il s'appuie sur des termes tels que "vitesse de la roue" (qui n'est pas la vitesse de déplacement) ou "vitesse de rotation du véhicule". Ces termes peuvent être obscurs pour un lecteur qui découvre le problème et nous allons essayer d'utiliser un formalisme plus rigoureux (mais toujours accessible au plus grand nombre)

Vitesse de glissement au contact pneumatique/sol

Le point A est le centre de l'aire de contact pneu/sol



Notation utilisée : il faut lire $V_{A1/0}$ comme étant la vitesse du point A appartenant à 1 par rapport à un repère lié à 0

Nous pouvons dire que la vitesse de glissement en A (notée V_G) sera définie par :

$$\vec{V}_G = \vec{V}_{A2/0} = \vec{V}_{A2/1} + \vec{V}_{A1/0} \text{ ce qui donne en valeur scalaire } V_G = V_{A2/0} = V_{A2/1} - V_{A1/0}$$

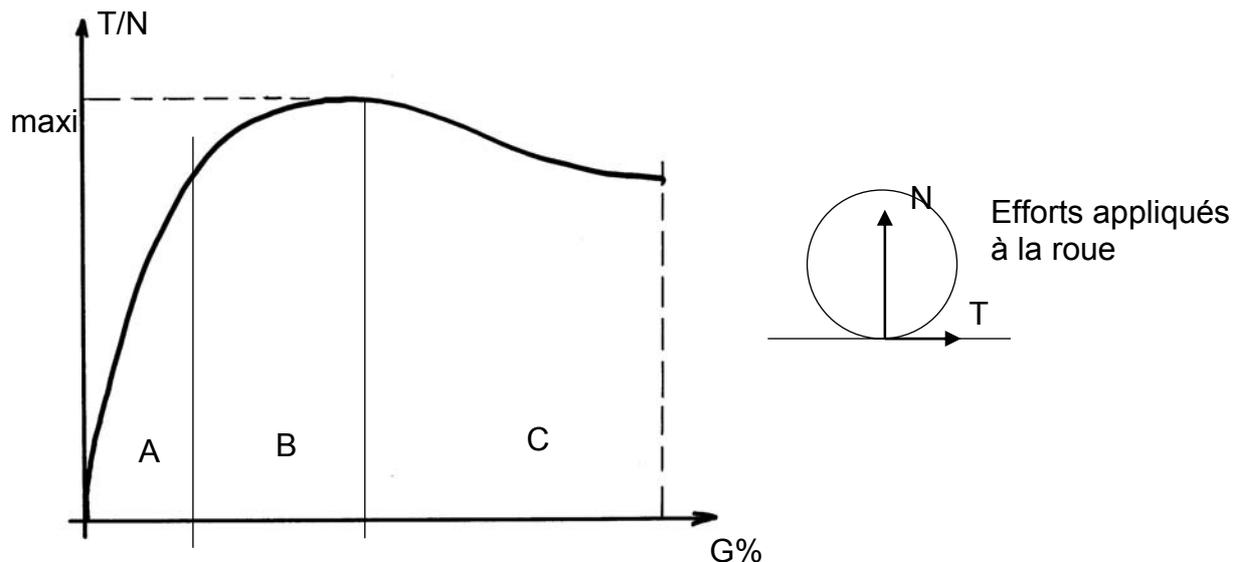
Dans cette différence, $V_{A2/1}$ est définie par $\omega.R$ (ω , vitesse de rotation de la roue) et $V_{A1/0}$ par la vitesse du véhicule (qui est également $V_{O1/0}$ puisque le véhicule est en translation). Nous comprenons maintenant que c'est la volonté de ramener ces deux termes dans la même grandeur physique (m/s ou rd/s) qui pousse certains à introduire les notions de vitesse de roue ($\omega.R$) ou de ω vehicule (vitesse véhicule/R) évoquées plus haut.

Glissement circonférentiel (ou pseudo-glissement)

Le glissement(G) est en général exprimé en pourcentage tel que :

$G = (V_{A2/0} / V_{A2/1}) * 100$, il prend une valeur nulle si $V_{A2/1} = V_{A1/0}$, une valeur +100% si $V_{A1/0} = 0$ (la roue tourne et le véhicule est à l'arrêt) et une valeur -100% si $V_{A2/1} = 0$ (la roue est bloquée et le véhicule avance). Le signe de G ne dépend que de la convention retenue sur le schéma.

C'est G(%) qui apparaît comme paramètre caractéristique pour les efforts de motricité et de freinage du pneumatique. Il a déjà été évoqué la particularité des corps en contact qui fait que des pourcentages assez élevés de G (5 à 10%) peuvent être atteints sans qu'il y ait de phénomènes de frottement gomme/sol. Le terme de pseudo-glissement est quelquefois préféré pour éviter les confusions.



Voici l'allure générale des efforts tangentiels à la roue en fonction de G ; les pneumatiques modernes ne présentent pas une symétrie des efforts à l'accélération ou au freinage mais l'allure générale et les commentaires suivants restent valables dans les 2 sens.

- Dans la zone A nous avons un pseudo-glissement strict puisque la totalité du glissement circonférentiel est "absorbée" par l'élasticité de la gomme de la bande de roulement. La gomme n'est pas soumise au frottement sur le sol.
- Comme la mise en déformation de la gomme se fait progressivement lors de son déplacement dans l'aire de contact, la partie arrière du pneumatique se trouve la plus sollicitée en adhérence (dans le cas du freinage) et c'est là que va apparaître en premier une friction de la gomme sur le sol. Le phénomène n'est plus purement élastique et la courbe s'infléchit nettement. Une partie de la zone de contact est en frottement alors que le reste est en adhérence. Le rapport T/N atteint un maximum qui sera simplement nommé **coef. d'adhérence du pneumatique**.
- La zone de friction s'étend progressivement à toute la zone de contact (le terme pseudo-glissement n'est plus adapté et le bruit de crissement va croissant si le sol est sec) pour atteindre 100%

En conclusion nous pouvons retenir qu'un pneumatique ne peut transmettre des efforts (motricité et freinage) que si son glissement est supérieur à 0, ce qui différencie radicalement le pneumatique du comportement des solides.

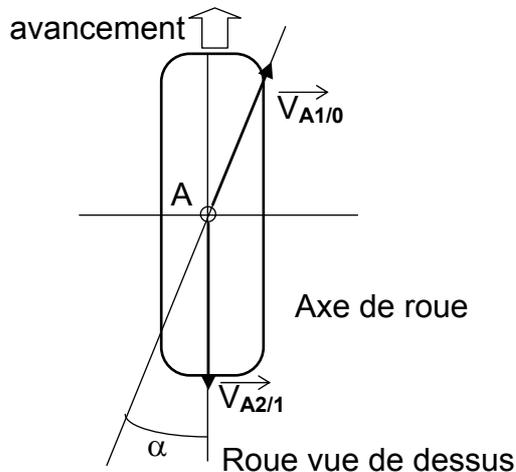
Réponse à un effort latéral, dérive du pneumatique et moment d'auto-alignement.

Préambule : le phénomène de dérive est abondamment traité dans la bibliographie spécialisée mais il est utile de rappeler les définitions formelles minimales et d'exposer un modèle permettant de comprendre l'apparition du moment d'auto-alignement qui est un paramètre très important dans le ressenti de la situation dynamique du véhicule.

Les explications s'appuieront sur un modèle très simplifié du pneumatique qui satisfait l'objectif de visualisation des principaux comportements et reste très

accessible. Il ne doit pas y avoir de confusion avec les modèles de calcul sophistiqués qui permettent de réaliser la simulation et la conception de ces produits.

Définition de l'angle de dérive



Nous reprenons les mêmes notations que dans le chapitre précédent mais cette fois les vecteurs vitesse sont représentés en projection sur le plan de roulement :

A centre du contact pneu/sol

Sol, repère 0

Véhicule repère 1

Roue, repère 2

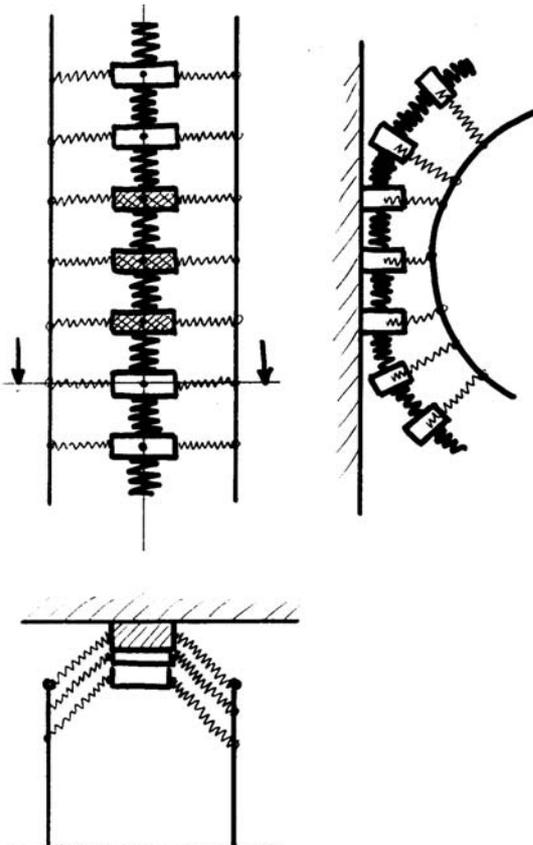
α , angle de dérive

Le pneumatique est dit en dérive si la direction de $V_{A2/1}$ n'est pas confondue avec celle de $V_{A1/0}$; l'angle dérive est donc formé par ces deux vecteurs vitesse.

Remarquons que $V_{A2/1}$ est une perpendiculaire à l'axe de roue (par définition du mouvement de rotation) et que $V_{A1/0}$ est la direction de déplacement du véhicule par rapport au sol. Ce recours au formalisme de la cinématique évite de faire appel à des notions de plan moyen de roue, direction théorique de déplacement de la roue, changement de direction ... toutes plus ou moins floues.

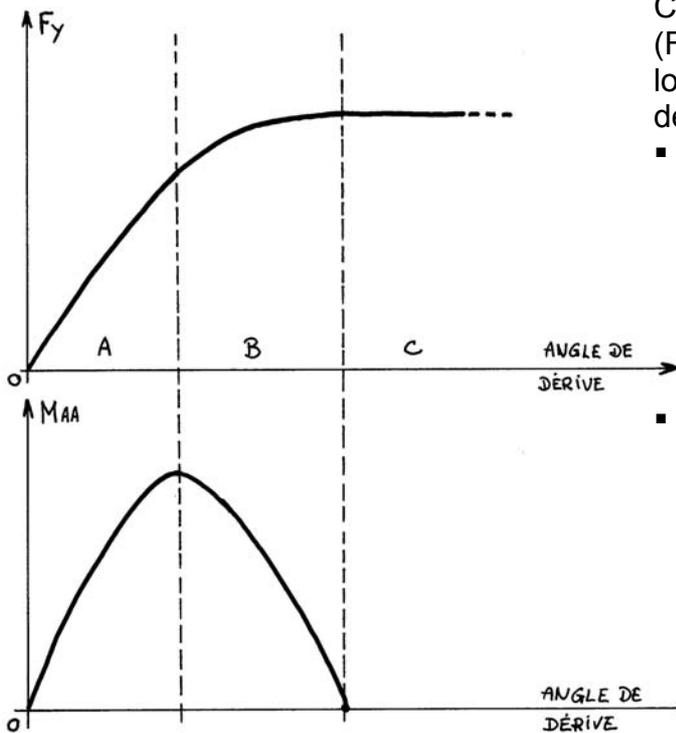
Pour l'instant nous ne faisons pas d'hypothèse sur les efforts appliqués à la roue puisque la définition est purement cinématique. Cherchons maintenant les causes de cette mise en dérive.

Réaction du pneumatique à une sollicitation latérale



Le schéma à gauche représente le pneumatique considéré comme une succession d'éléments séparés : ce sont les pains de gomme dont ceux en contact avec le sol sont hachurés (3 dans cet exemple). Les éléments sont solidaires entre eux par des liaisons élastiques très rigides qui représentent la ceinture du pneumatique et ils sont reliés à la jante par des liaisons de faible raideur qui représentent "l'enveloppe" du pneumatique rendue élastique par la présence de l'air de gonflage.

Dans un premier temps, comment réagit ce pneumatique immobile à un effort latéral appliqué par l'axe de roue ?



Ces graphes illustrent l'allure de l'effort latéral (F_y) et du moment d'auto-alignement (M_{AA}) lorsque la sollicitation latérale fait croître l'angle de dérive.

- Dans la zone A les pavés sont tous en adhérence sur le sol et la dissymétrie des sollicitations latérales qu'ils subissent fait croître M_{AA} . Cette zone est dite de dérive élastique car nous pouvons écrire $F_y = K_d \cdot \alpha$ où K_d est la raideur de dérive du pneumatique (en daN/d°)
- Au début de la zone B le pavé arrière atteint sa limite d'adhérence et commence à glisser : les efforts latéraux qui lui sont appliqués ne peuvent donc plus croître. Les efforts des pavés avant eux continuent de croître car F_y est croissant : le résultat est que la dissymétrie des efforts est atténuée et que $F_{\text{sol/roue}}$ se rapproche de l'axe de roue, M_{AA} diminue après avoir marqué un extremum.
- Arrivé en C toute la zone de contact est en glissement, et le moment d'auto-alignement est nul. Les limites du pneumatique sont atteintes et le guidage n'est plus assuré car l'angle de dérive est indéfini.

Conséquences : Le moment d'auto-alignement est une caractéristique importante du pneumatique pour la fonction guidage car le conducteur va ressentir ses variations par le moment qu'il applique sur le volant. Il pourra ainsi ressentir la baisse de M_{AA} qui annonce la mise en glissement d'une partie de la zone de contact et la proximité de la limite de guidage du pneumatique. Le pneumatique ainsi contribue largement à la sécurité active par son comportement.

Remarques :

- Dans certains cas M_{AA} peut devenir négatif à l'approche de la limite d'adhérence, c'est le résultat d'une composition des efforts latéraux (répartition dissymétrique dans la zone de contact) et des efforts verticaux (répartition symétrique en l'absence de couple moteur) qui produit un moment résultant changeant de sens.
- L'intensité de ce M_{AA} est quelquefois caractérisée par le constructeur par une cote en mm nommée "chasse du pneumatique". Ceci revient à remplacer la valeur du moment par la distance à laquelle il faut appliquer la valeur F_y pour produire M_{AA} . Cette notion permet de faire l'amalgame avec le déport latéral installé par le train avant et lui aussi nommé "chasse du train avant"⁽¹⁾ ; le moment renvoyé dans l'axe de pivot dépend alors de la somme algébrique de la chasse du train AV et de la chasse du pneumatique. Cette manière de voir le problème à au moins le

⁽¹⁾ Ce terme de chasse tombe actuellement en désuétude en automobile au profit de déport latéral mais il est encore très utilisé en motocycle sous le terme de chasse linéaire (par opposition à angle de chasse) le terme de déport est alors plutôt appliqué aux tés de fourche (et il agit sur la chasse linéaire)

mérite de montrer qu'un train AV est adapté à un type de pneumatique.

Conclusions

Après avoir pris connaissance de ce dossier, il faut vérifier que le modèle et les énoncés proposés permettent de retrouver et de mémoriser les facteurs incidents. Par exemple :

- *L'influence de la pression de gonflage sur la dérive ?* Augmenter la pression de gonflage revient à rigidifier les liaisons des pavés à la jante ce qui va réduire la déformation de la ceinture et donc la dérive (influence bien connue)
- *L'influence de la largeur du pneumatique ?* Un pneumatique plus large aura une ceinture plus large donc beaucoup plus difficile à fléchir latéralement (les liaisons entre les pavés deviennent beaucoup plus raides). La dérive sera réduite, c'est d'ailleurs un facteur de premier ordre sur la raideur de dérive.
- *L'influence de la pression de gonflage sur le moment d'auto-alignement ?* une diminution de la pression produit une modification de l'aire de contact pneu/sol qui s'allonge (plus de pavés en contact). La trace au sol étant plus longue (la ceinture est plus déformée) la dissymétrie des efforts AV et AR va produire des moments plus élevés. L'augmentation du moment d'auto-alignement sera effectivement ressentie comme une direction devenue "lourde" lors des appuis latéraux.
- *A vous de continuer selon vos besoins ...*

Une autre INFOTECH complétera bientôt ce document et traitera particulièrement du comportement de la gomme au contact du sol (compromis adhérence et résistance au roulement, le principe des pneumatiques "thermogomme") et des effets du choix de la pression de gonflage (sur l'aquaplanage, la motricité, ...)