

Étude des pneus pour tricycles carénés à faible consommation

ARNAUD SIVERT, JOSÉ CLAUDON, FRANCK BETIN, BRUNO VACOSSIN, JOËL ACCART [1]

Les pneus sont les seuls points de contact d'un véhicule avec le sol. Ils doivent assurer une faible résistance au roulement, une certaine longévité, l'amortissement, une faible nuisance sonore et permettre une bonne accélération, un bon freinage, ainsi qu'une certaine tenue de route...

Le choix de pneus polyvalents pour réaliser un véhicule électrique à faible consommation est primordial. Aujourd'hui, avec internet et l'étiquetage européen des pneus, cela devrait être facile, *a priori*, de faire ce choix à partir des données des constructeurs. En effet, l'étiquetage donne une idée du coefficient résistif, de l'adhérence sur route humide et du bruit des pneus. Le marquage sur le pneu fournit une information sur la vitesse maximale, l'indice de charge, la structure et la pression. Néanmoins, les constructeurs ne donnent pas ou peu d'informations sur le niveau d'adhérence sur route sèche, en condition hivernale ou sur chemin de terre, ni même sur la protection anticrevaison, la longévité, l'adhérence latérale ou encore l'amortissement. (Remarquons que les pneus motos et vélos ne sont pas soumis à l'étiquetage européen). Par conséquent, faire le bon choix peut s'avérer très compliqué !

De nombreuses questions se posent alors. Quel diamètre de roue choisir ? Quelle vitesse peuvent supporter le pneu et la jante ? Quelle largeur doit avoir le pneu ? Quel design externe en fonction du terrain ? Quelle est la consommation d'un pneu ?

Cet article va s'attacher à montrer comment faire différents tests pour caractériser un pneu et faire un choix rationnel de pneumatique pour un véhicule électrique à faible consommation.

Le pneu, un produit en constante évolution

Lors de la création d'un nouveau prototype de véhicule, l'ingénieur engage sa responsabilité dans le choix des pneus au même titre que l'équipementier.

En France, l'Utac (Union technique de l'automobile et du cycle) réalise l'homologation des pneus. Seule la

Mots-clés

pneu, freinage, modélisation, énergie, amortissement, nuisance sonore, post-bac, projet

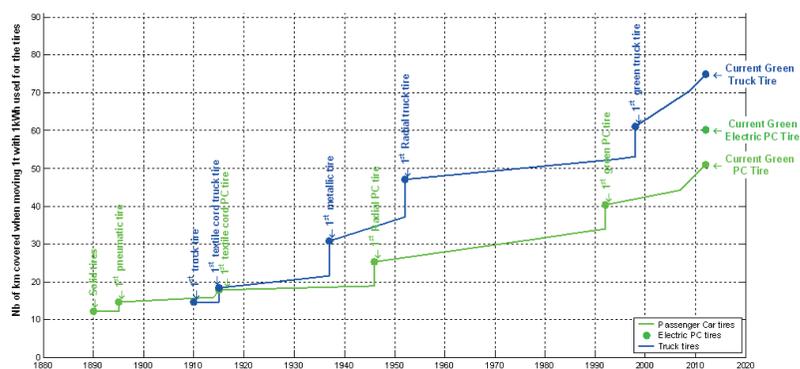
presse spécialisée propose des tests supplémentaires, même si un syndicat lié aux pneumatiques (distributeurs et fabricants) existe et édite des livres blancs sur la réglementation [5].

Le choix d'un pneu est crucial pour un véhicule électrique à faible consommation. En effet, la consommation des pneus peut atteindre 20 à 50 % du véhicule en fonction de sa vitesse moyenne et de l'aérodynamisme.

La production mondiale de pneus de voitures et de camions réunis dépasse 1,2 milliard de pièces par an et représente un marché de plus de 100 milliards de dollars, avec une croissance moyenne en volume de 6 à 8 %. En 2015, le marché européen du pneu de voiture et de camionnette est de 252 millions, avec une croissance de 2 %, représentant ainsi 21 % de la production mondiale.

Le marché du pneu de vélo doit probablement être très conséquent, sinon il n'y aurait pas 260 possibilités de pneus au catalogue du fabricant Schwalbe ! Ajoutons à cela qu'il se vend 130 millions de vélos par an dans le monde (15 millions sont vendus en Europe dont 3 millions en France). En France, le vélo est utilisé à 60 % en loisir, 27 % pour la mobilité quotidienne et 13 % pour le sport.

La recherche et le développement sur les pneus sont des investissements importants de la part des équipementiers et apportent des améliorations significatives au cours du temps [1].

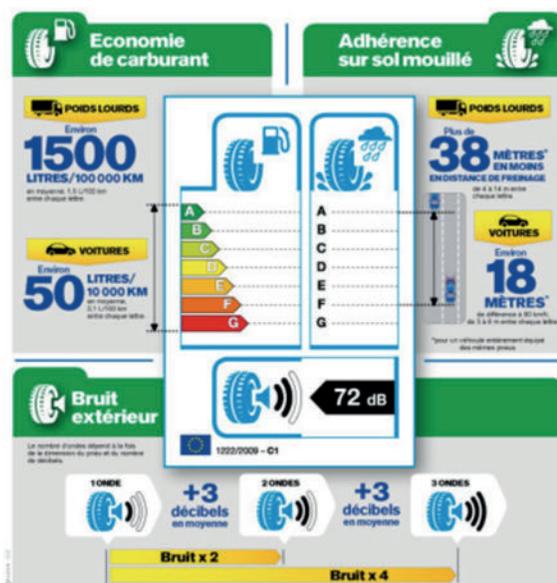


1 Nombre de kilomètres parcourus avec un véhicule d'une tonne avec 1 kWh en fonction des décennies pour les camions et les voitures [1]

[1] Université de Picardie Jules Verne, Institut universitaire de technologie de l'Aisne GEII et GMP, Laboratoire des technologies innovantes (LTI), Soissons

Depuis 2012, l'initiative de la Commission européenne pour l'étiquetage des pneus semblait être un bon moyen pour aider les particuliers à faire leur choix [2]. Les trois critères de choix retenus sont nécessaires, mais sont-ils suffisants ?

Dans la réalité, c'est une autre affaire, car les pneus doivent répondre à plusieurs dizaines de critères concernant la tenue de route et le freinage en ligne droite mais aussi en virage, le maintien lors des



2 Étiquetage obligatoire pour la commercialisation des pneus : test à une vitesse de 80 km/h (bruit à 7,5 m) [2]



3 Informations données par certains constructeurs de pneus

sollicitations longitudinales et transversales, l'usure, le confort, la déformation... Donc, répondre à seulement trois critères (résistance au roulement, adhérence sur route humide et bruit) ne garantit pas d'avoir un pneu véritablement performant [3, 4]. Il est possible de concevoir des enveloppes particulièrement adaptées aux épreuves exigées, au détriment des autres critères non moins importants. D'ailleurs, la résistance au roulement est aujourd'hui devenue l'obsession des manufacturiers. Si l'étiquette d'un pneu a l'avantage d'apporter un premier niveau d'information pour les consommateurs, elle ne garantit pas une sûreté maximale en fonction de son usage.

À ce jour, aucun étiquetage des pneus motos et vélos n'a été prévu. Pour les vélos électriques, des homologations en fonction de la vitesse ont été demandées correspondant à l'ECE R75 pour des tests à une vitesse supérieure à 45 km/h. Or, en descente, n'importe quel vélo peut dépasser les 80 km/h. Certains manufacturiers de vélos ne donnent que des informations relatives [3].

Quelles sont les valeurs de références ?

Parfois, il y a l'information de la dureté de la gomme en utilisant l'échelle *Shore durometer*.

Pour les vélos, les pneus peuvent passer de largeurs de 22 mm avec une pression de 7 à 8 bars (vélo de course) à 47 mm avec une pression de 3,5 à 5 bars (vélos tout chemin, VTC) à 100 mm avec une pression de 0,5 à 1 bar (*fat bikes* [1]).

Ces derniers pneus permettent de s'affranchir de suspensions. En revanche, ils ne sont pas du tout aérodynamiques et ils sont bruyants. Enfin, certains constructeurs ont aussi développé des pneus dits de faible amortissement, avec une pression inférieure à 2 bars pour les VTC.

Les véhicules à faible consommation

Les véhicules électriques à faible consommation énergétique [2] deviennent des acteurs de nos déplacements quotidiens. Ce type de véhicule a vu le jour

[1] Les pneus des *fat bikes* permettent d'avoir un fort amortissement, de pouvoir rouler dans le sable mou et de monter ou de descendre des escaliers facilement, donc pour faire du tout-terrain.

[2] Voir l'article « Véhicule électrique à faible consommation », *Technologie* n° 199, septembre-octobre 2015.

aux challenges écomarathon et répond à la demande de la transition énergétique future et d'une minimisation de l'émission de CO₂. Ces véhicules disposent d'une autonomie de 250 km, pour des vitesses moyennes de 45 km/h et des vitesses de pointe de 80 km/h sur du plat. Ils ont une masse de 50 à 85 kg et peuvent emporter une personne de 100 kg avec 20 kg de bagages. Ce sont des tricycles avec des roues de 16 à 20 pouces de diamètre à l'avant et à l'arrière, ce qui leur permet d'avoir un centre de gravité relativement bas.

En 20 pouces, il existe des pneus pour les vélos d'enfants et les BMX, donc des pneus qui sont peu adaptés pour les vélomobiles demandant un faible coefficient résistif et une bonne adhérence en freinage. Le département Génie électrique de l'IUT de l'Aisne a réalisé de nombreux prototypes à faible consommation électrique **4**. La répartition des masses d'un des prototypes avec l'électrification correspond au tableau **5**.

Étant donné qu'un pneu de vélo peut supporter entre 60 et 130 kg en fonction de sa fabrication, il est possible d'utiliser ceux-ci sur les tricycles carénés électrifiés.

Avec un freinage provoquant une décélération de -10 m/s², la force de la liaison sol-roue pour chaque roue avant atteint 1 300 N [6].

Certains manufacturiers ont développé une gamme de pneus pour les vélos électriques avec une densité de carcasse renforcée que l'on appelle communément EPI ou TPI (*ends per inch* ou *thread per inch*, soit le nombre de fibres par pouce) pouvant supporter une charge plus importante.



4 Différentes réalisations de cycles électriques motorisés entièrement carénés (de 50 à 85 kg) [6, 7, 8, 9]

	Roue arrière	AV droit	AV gauche	Total
À vide (2,5 kg d'outils, 1,5 kg d'eau)	25 kg	17 kg	17 kg	59 kg
+ Pilote de 80 kg	59 kg	40 kg	40 kg	139 kg
+ Pilote de 80 kg + 20 kg de bagages	71 kg	44 kg	44 kg	159 kg

5 Répartition des masses

Le nombre de couches de fibres joue aussi un rôle important, ainsi que les matériaux utilisés. Les carcasses en coton et en soie affichent un meilleur confort grâce à leur souplesse (le pneu sautille moins sur les aspérités de la route que les pneus à carcasse en nylon).

Enfin, remarquons que la masse du pneu n'est pas un élément primordial pour un véhicule motorisé.

Quel sera le meilleur choix de pneus de vélo ?

Voici une liste non exhaustive de fabricants de pneus de vélos : Schwalbe, Maxxis, Hutchinson, Nokian, Kenda, Specialized, Michelin, Tioga, Panaracer, Continental, Bontrager, IRC, Delitire, Vittoria, Veerubber, CSTires, 45nrth, Shoveetireco, Vredestein, Innovatives, L-Guard, Nutrak, Cheng Shin Tire CST, Tannus, Ritchey, Hangzhou, Mitas, Chaoyang, Durotire, Dongyue, Challenge, Airfreetires, Marvelcompoundtires...

Les arguments technico-marketing concernant les pneus de vélos sont simplifiés à l'extrême, au point de devenir plus marketing que techniques et il est difficile de faire des comparaisons et des choix.

Pourtant, il est important de mener une réflexion sur le pneu en ce qui concerne la taille, la résistance au roulement, le confort, le glissement lors du freinage ou lors de virages par temps sec et humide... Aussi, le constructeur importe moins que les caractéristiques recherchées par rapport à un besoin.

Caractéristiques et choix des pneus

La caractéristique mécanique d'un pneu repose sur trois éléments : la carcasse, la tringle et la bande de roulement en caoutchouc qui comprend une ceinture de protection anticrevaison. En fonction de la structure et du type de gomme, un pneumatique peut être caractérisé par son coefficient de frottement longitudinal μ , latéral τ et son coefficient de résistance au roulement C_r .

Ces trois coefficients dépendent du couple de matériaux gomme-sol et de l'état de surface à l'instant considéré (température, propreté, présence d'eau, pression, etc.). Pour un couple gomme-sol donné, le coefficient d'adhérence μ dépend faiblement de la masse du véhicule, mais varie fortement en fonction du taux de glissement correspondant à l'équation :

$$g = \frac{\omega \times R - V}{V}$$

avec R le rayon de la roue (en m), ω la vitesse angulaire de la roue (en rad/s) et V la vitesse du véhicule (en m/s).

Un glissement de 100 % (blocage) sur les roues avant entraîne une perte complète de la direction du véhicule. Si le glissement à 100 % intervient plus rapidement sur l'arrière que sur l'avant, il y a un risque de tête à queue.

Un freinage appuyé comporte deux phases :

- une montée vers une décélération maximale, qui correspond à une montée vers un coefficient de frottement maximal μ_{\max} qui sera atteint pour un taux de glissement voisin de 0,1 (soit 10 %) ;

• puis une diminution du coefficient de frottement vers une valeur dite $\mu_{\text{bloqué}}$.

Sur la figure 6, le coefficient de roulement C_r d'un pneumatique est présenté par un coefficient d'adhérence non nul lorsque le glissement est nul. Ce coefficient résistif est en moyenne de 0,01, mais pourra atteindre 0,003 dans le meilleur des cas.

La force résistive F_r (en N) et la puissance résistive P_r (en W) du pneu sont déterminées par les équations :

$$F_r = M \cdot g \cdot C_r$$

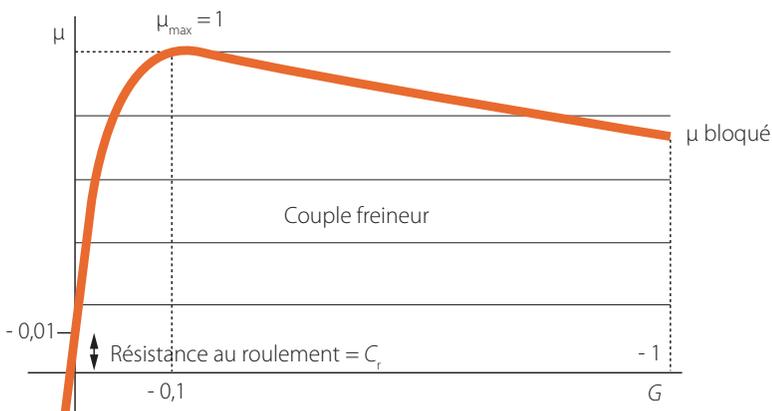
$$P_r = F_r \cdot V / 3,6$$

Exemple : pour un véhicule ayant une masse totale de 100 kg et un C_r de 0,005, la force de résistance au roulement F_r sera de 5 N à 45 km/h et la puissance perdue sera de 62 W.

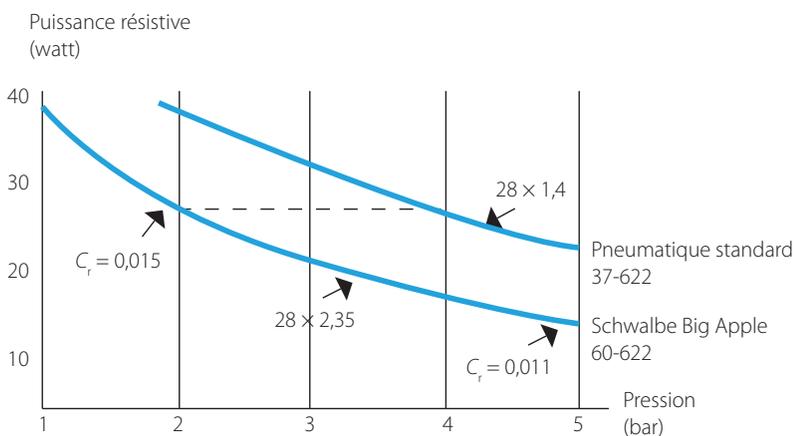
Le coefficient C_r peut être déterminé par une décélération naturelle pour une vitesse inférieure à 15 km/h avec l'équation :

$$C_r = \frac{1}{2 \times \text{distance arrêt} \times g} \times \frac{V_{\text{initiale}}^2}{3,6^2}$$

En effet, à 15 km/h, la puissance résistive de l'aérodynamisme du véhicule est négligeable.



6 Coefficient d'adhérence en fonction du glissement du pneu avec le coefficient résistif C_r [1]



7 Puissance résistive de deux pneus de largeurs différentes sous différentes pressions [11]; $M = 40$ kg, $V = 15$ km/h

Type, marque Dimension (pouces)	Prix (€) Masse (g)	Pression C_r	Pression C_r
Energizer Schwalbe 26 x 1,75	27 € 875 g	5 bar 0,0076	3 bar ?
Big Apple Schwalbe 26 x 2,00	36 € 675 g	5 bar 0,011	2 bar 0,0155
Deltire SA 206 26 x 1,75	10 € 700 g	5,5 bar 0,009	2,5 bar 0,017
Country rock 26 x 1,75 Michelin	12 € 560 g	5,5 bar 0,0085	2,5 bar 0,0098
Ground control 26 x 4,6	70 € 1,2 kg	1,2 bar 0,012	0,5 bar 0,016
Innova 26 x 4,0	18 € 1,2 kg	2 bar 0,0147	0,7 bar 0,0177

8 Comparatif du coefficient résistif C_r en fonction de la pression de différents pneus

La puissance résistive dépendra aussi de la granulométrie de la chaussée, du gonflage, de la largeur du pneu, de sa surface de contact au sol et de sa déformation. On peut observer sur la figure 7 la puissance résistive en fonction de la largeur du pneu (60 mm et 37 mm) et de sa pression. Le pneu le plus large a une résistance plus faible que le pneu étroit.

Seize pneus de VTC ont été testés [9, 10] en fonction de la pression. Quelques données représentatives de différents pneus sont présentées dans le tableau 8. Notons qu'il existe des bancs de test et des blogs spécialisés dans la puissance résistive des pneus de vélo [14].

On peut remarquer que pour le pneu Country rock, malgré la différence de pression, le coefficient résistif ne change presque pas. Par contre, il y a une grosse différence pour le pneu Deltires. Mais, ces deux pneus n'apportent pas d'amortissement à faible pression.

En revanche, à 2 bars, il y a une atténuation des vibrations à basse pression pour le pneu big Apple, mais une augmentation de 1,5 entre la pression haute et basse au niveau du coefficient résistif 7. À cette pression de 5 bars, le pneu big Apple perd ses qualités de confort. On remarquera que le coefficient résistif des pneus *fat bikes* est relativement faible malgré la largeur du pneu et la faible pression qui permet de bien amortir les perturbations de la route.

Le profil du pneu de vélo n'est pas très important sur route. En effet, un pneu slick adhère même mieux qu'un pneu profilé, car la surface de contact est plus grande, que ce soit sur route sèche ou mouillée. Le profil d'un pneu est surtout important pour évacuer l'eau en roulant sur une route inondée et pour éviter le phénomène d'aquaplaning sur le bitume. La vitesse maximale d'hydroplanage dépend de l'équation :

$$V = \sqrt{\frac{2 \times \text{Pression hydro}}{\rho}}$$

avec ρ la masse volumique de l'eau ; la pression hydrodynamique correspond à la pression du pneu en pascals (Pa).

Avec 500×10^3 Pa correspondant à 5 bars de pression, le risque d'aquaplaning pour un pneu vélo se situe à 113 km/h ; avec une pression de 2 bars, la vitesse limite est de 72 km/h.

Ces vitesses sont rarement atteintes sur route inondée par un vélomobile. Par conséquent, le profil du pneu n'est pas crucial sur route ; en revanche, sur terre, le profil empêche le glissement du pneu et améliore l'accroche.

Il existe des pneumatiques carrés à flancs durs adaptés aux tricycles. Ces produits permettent de consommer moins d'énergie que des pneumatiques à flancs ronds, car ces derniers s'écrasent davantage sous charge et en virage. (On rappelle qu'un tricycle ne se penche pas en virage comme le fait un cycle à deux roues). De manière générale, la grande dureté d'un pneumatique réduira la résistance au roulement, mais pénalisera les performances en virage et en freinage.

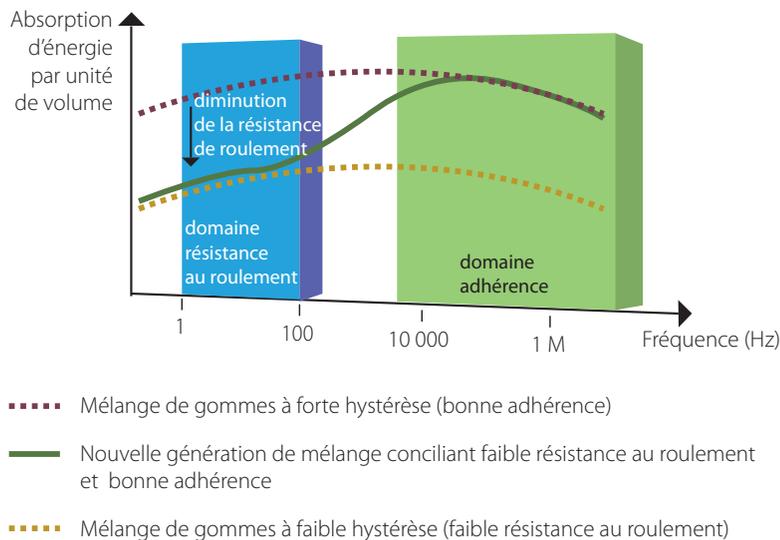
Les constructeurs de pneumatiques font ainsi un compromis entre le coefficient de roulement et l'adhérence de leurs gommes pour caractériser leurs produits. Sur un tricycle, la présence d'un carrossage important sur les roues avant ne permettra pas d'utiliser des pneus à flancs droits (« carrés »).

Les pertes des pneumatiques dues aux mécanismes viscoélastiques peuvent être approchées par la relation :

$$Perte_{dissipée} \approx Vol \cdot hys \cdot A \cdot F_r$$

avec Vol le volume de gomme déformée, hys la perte hystérétique de la gomme, A l'amplitude de la déformation et F_r la fréquence de sollicitation.

Chaque pneumatique peut être modélisé par un système ressort-amortisseur. Comme on peut le voir sur la figure 9, il y aura donc une perte d'énergie en fonction de la fréquence.



9 Absorption de l'énergie d'un pneu en fonction de la fréquence de la route [1]

Selon la figure 6, le coefficient d'adhérence μ sur route sèche est d'environ 1, alors que sur route mouillée il passe à 0,5.

Donc, en théorie, un pneumatique pourra provoquer une force de freinage sans glissement correspondant aux deux équations précédentes :

$$F_{freinage} = M \cdot \mu \cdot g = M \cdot \frac{dv}{dt}$$

La décélération sans glissement est indépendante de la masse et ne pourra atteindre que -10 m/s^2 sur route sèche et -5 m/s^2 sur route humide.

Par conséquent, des freins surdimensionnés vont provoquer des glissades si leur dosage n'est pas maîtrisé à la manière d'un ABS (*anti-lock braking system*) sur une voiture.

Comment détermine-t-on le coefficient d'adhérence d'un pneu ?

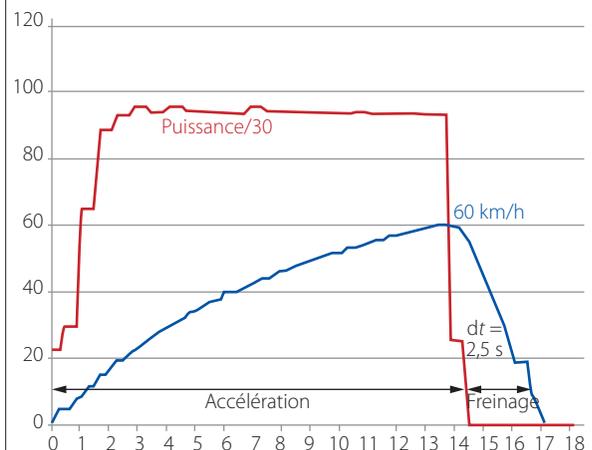
L'objectif est de connaître pour quelle valeur de décélération le véhicule va glisser à 100 % et ne sera plus contrôlé sur sol sec et mouillé...

Une première solution est de bloquer les freins et de tirer avec un peson sur le véhicule pour déterminer la force de frottement longitudinal, puis d'en déduire le coefficient d'adhérence.

Une deuxième solution consiste à rouler à une certaine vitesse, puis à freiner jusqu'à la perte d'adhérence. Un enregistrement avec un odomètre permet de connaître la décélération et de déterminer le glissement 10.

Lorsqu'il y a glissement, la vitesse devient nulle brusquement puisque la roue ne bouge plus, alors que le véhicule est toujours en mouvement.

Cette deuxième solution est fatale pour le pneu, car un plat est créé sur le pneu à cause de la gomme laissée sur le bitume lors du freinage sur sol sec. Par contre, sur route mouillée, le pneu échappe à la destruction. Lors de ces essais, la distance d'arrêt est mesurée pour différentes conditions météorologiques et des vidéos ont été effectuées [13]. Malgré la largeur des pneus *fat bikes*, lors de fortes décélération, il y a des gros dérapages. Un autre phéno-



10 Puissance et vitesse en fonction du temps

mène se produit, le rebond vertical, qui est provoqué par les crampons, d'où une perte d'adhérence de la roue sur le sol.

Par conséquent, le coefficient d'adhérence sans banc d'essais n'est pas facile à déterminer.

La notion de confort

Un pneu est comme une suspension. Il permet d'atténuer les vibrations du véhicule dues aux irrégularités de la route par dissipation d'énergie. Un pneu peut être modélisé simplement par un coefficient de raideur k (N/m) et un coefficient d'amortissement c (N/(m/s)).

Pour étudier le confort d'un pneu, il y a des modélisations en trois dimensions. Cela peut être relativement complexe comme sur la figure 11. Par simplicité, le pneu ne sera modélisé que suivant un axe vertical avec deux valeurs k_w et c_w en bloquant la suspension mécanique, donc k_s et c_s ne seront pas pris en compte.

Un pneu réagit différemment en fonction de la fréquence comme on peut l'observer sur la figure 12. L'amortissement permet d'améliorer le confort du conducteur en filtrant les perturbations hautes fréquences générées par le revêtement de la chaussée. Cette fréquence (f en Hz) dépend de la vitesse du véhicule (V en m/s) et de la largeur des obstacles (l en m) et s'exprime par l'équation :

$$f = (V/3,6) / (l \cdot 2)$$

Avec de gros pneus à faible pression (de 0,5 à 1 bar « suspension par coussin d'air ») et avec des flancs spécifiques, le coefficient d'amortissement sera plus important qu'un pneu gonflé à forte pression.

Pour tracer la fonction de transfert de l'amplitude du mouvement d'un véhicule en fonction de la fréquence, il faut un banc d'essai avec une sollicitation forcée à fréquence variable.

Avec le capteur d'accélération d'un smartphone, des mesures dynamiques lors de la descente d'un trottoir peuvent être effectuées, permettant de déterminer le coefficient de raideur et d'amortissement d'un pneu.

Le régime d'un pneu est pseudopériodique, l'accélération, la vitesse, la position en fonction du temps peuvent être approximées par les équations suivantes, avec $\omega_r > 1/\tau_a$:

$$acce_y \approx (hauteur \cdot \omega_r^2) \cdot e^{-t/\tau_a} \cdot \cos(\omega_r \cdot t)$$

$$vit_y \approx (hauteur \cdot \omega_r) \cdot e^{-t/\tau_a} \cdot \sin(\omega_r \cdot t)$$

$$deplacement_y \approx hauteur \cdot e^{-t/\tau_a} \cdot |\cos(\omega_r \cdot t)|$$

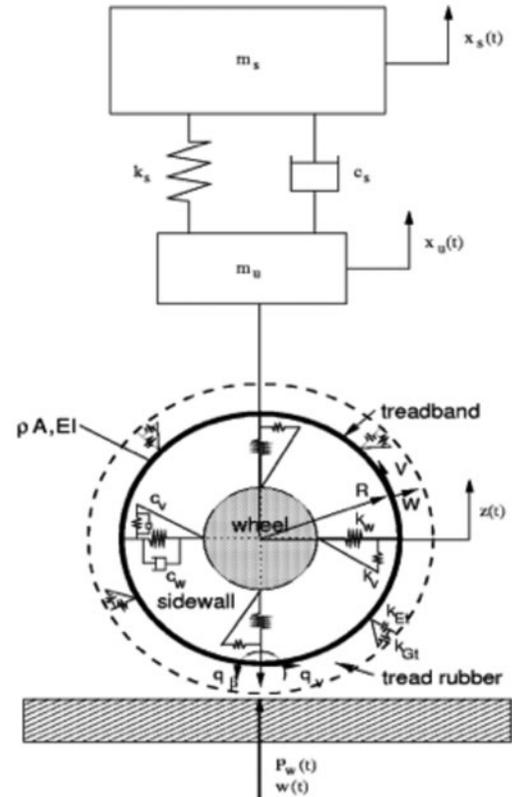
La constante de temps de l'amortissement τ_a (en s) et la pulsation de la pseudopériode correspondent aux équations suivantes :

$$\tau_a = 2 \cdot M/c \quad \omega_r \approx \omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{T_0}$$

À partir de ces équations, il est possible d'identifier approximativement les caractéristiques de la suspension du pneu. Avec un régime pseudopériodique, la raideur k et le coefficient d'amortissement correspondront aux équations suivantes :

$$k = (2 \cdot \pi/T_0)^2 \cdot M$$

$$c = 2 \cdot M/\tau_a$$



11 Complexité de la modélisation d'un pneu avec la suspension

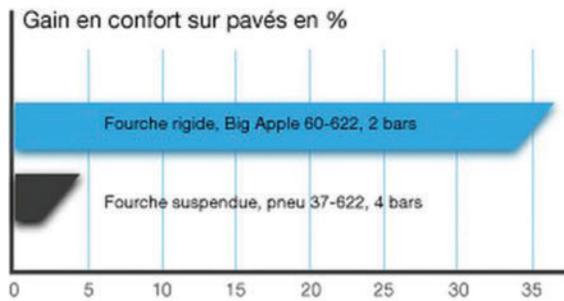
Pour l'essai suivant, le pneu big Apple de chez Schwalbe, qui est prévu pour amortir les vibrations de la route à 2 bars, a été utilisé [11].

Le constructeur fournit les données en confort de la figure 13, mais comment est mesuré ce gain par le constructeur ? Est-ce un rapport de l'amplitude en hauteur à une certaine sollicitation de fréquence ou sur une bande passante ?

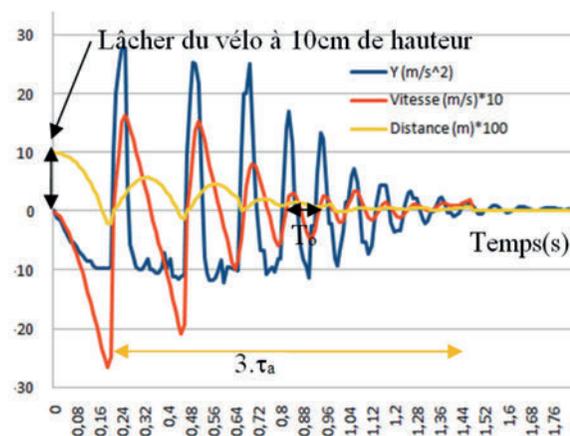
Sur la figure 14, la période T_0 et la constante de temps τ_a peuvent être observés lors d'un lâcher à 10 cm de hauteur pour deux pressions différentes. L'application utilisée est *Accelerometer monitor*, la vitesse et le déplacement sont déterminés par intégration numérique [12].



12 Comportement d'un pneu de voiture en fonction de la fréquence [source michelin.fr]



13 Gain de confort du pneu big Apple [11]



14 Dynamique du pneu big Apple avec une pression de 2 bars, un lâcher à hauteur de 10 cm, masse arrière (7,8 kg) ; $c = 42 \text{ N/(m/s)}$, $k = 25\,450 \text{ kN/m}$ [15]

On peut remarquer que, lors de la descente du vélo, il y a bien l'accélération terrestre à $-9,81 \text{ m/s}^2$. Lors du rebond, l'accélération est très importante, ce qui sature le capteur du smartphone à $+25 \text{ m/s}^2$. Cette saturation fausse les valeurs des intégrations qui permettent d'obtenir la vitesse et la position, qui doivent donc être réajustées à chaque rebond. On peut observer que étant donné que le rebond est supérieur à $+10 \text{ m/s}^2$, l'accélération n'est pas sinusoïdale : c'est seulement à partir de $0,96 \text{ s}$ que les courbes sont sinusoïdales. La période T_0 est de $0,11 \text{ s}$, ce qui permet d'établir la raideur du pneu à $25\,450 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Lorsqu'une personne de 80 kg est sur un vélo de 15 kg , la masse sur la roue arrière passe à 60 kg . Par conséquent, la pulsation propre ω_0 passe à une valeur

Coefficient confort du pneu	2 bars	5 bars
$k \text{ (N/m)}$	25 450	85 540
$c \text{ (N/m/s)}$	42	33
$\omega_0 \text{ (rad/s)}$	20,6	37
$\tau_a \text{ (s)}$	2,85	3,59

15 Pulsation propre et coefficient pour une masse de 60 kg sur la roue arrière

de $20,6 \text{ rad/s}$ et la constante de temps de l'amortissement passe à $2,85 \text{ s}$.

Le tableau 15 synthétise les résultats en fonction de la pression pour le pneu big Apple.

Remarques :

- plus la pulsation ω_0 est faible (raideur faible, masse grande, amortissement grand), plus le pneu atténuera les vibrations ;

- sur un véhicule, il serait intéressant de connaître le confort au niveau de la personne. Donc, pour un vélo, au niveau du guidon et de la selle, et non sur la roue comme ont été effectuées les mesures précédentes ;

- la raideur peut être déterminée en fonction de l'écrasement (hauteur du pneu) pour une certaine pression et en fonction du poids.

Depuis 2013, des vélos *fat bike* utilisent des pneus en $26 \times 4,00$ gonflés entre $0,5$ et 1 bar 16 qui remplacent les systèmes de suspensions relativement chers et lourds des VTT traditionnels. Un compromis entre pression, confort et coefficient résistif est effectué par le manufacturier du pneu.

L'amortissement c d'une suspension provoque une perte d'énergie et un échauffement qui peuvent être déterminés par l'équation suivante :

$$Perte_y = c \cdot V_y^2$$

De même, lors d'un glissement, il y a une puissance perdue sur le pneu qui peut être déterminée par l'équation suivante :

$$Perte_g = F_y \cdot (V_{\text{moteur}} - V_{\text{véhicule}}) = F_y \cdot g \cdot V_{\text{moteur}}$$

avec F_y le poids de la roue sur la chaussée, V la vitesse (en m/s), g le glissement.

Exemple de calcul : lors d'une glissade à 100% à 60 km/h , sur une distance de 19 m pendant $2,5 \text{ s}$ avec un poids de 400 N sur les roues avant, la puissance moyenne est de $3\,330 \text{ W}$ sur chaque roue. Cette puissance provoque l'élévation de température de la gomme sur le sol et entraîne sa destruction, car elle devient plus tendre.

Remarque : pour un véhicule motorisé, la masse et les pertes de puissance d'une suspension ne sont



16 Fat bike sans suspension, mais avec des pneus de 10 cm de large ($0,5 \text{ bar}$) pour un bon amortissement

pas cruciales. Donc, si le pneu atténue faiblement les perturbations de la chaussée, ce n'est pas fondamental puisque les suspensions vont permettre d'améliorer ce confort [6].

Le confort acoustique d'un vélo

La déformation de la chaussée et le frottement du pneu provoquent des vibrations à l'intérieur et à l'extérieur du carénage et donc créent un bruit.

Le vélo ayant un carénage, il renvoie un bruit important (caisse de résonance) relativement gênant : la pollution sonore est importante.

L'aérodynamisme du carénage minimise le bruit de l'écoulement de l'air sur le véhicule.

Des applications sonomètres (*Sound meter* et *Digi+analyser*) ont été utilisées. Le smartphone doit être vérifié et calibré en fonction du microphone, de sa chaîne d'amplification et de sa bande passante. Lorsqu'on roule vite avec la visière d'un vélo ouverte, le déplacement de l'air ajoute du bruit à partir de 35 km/h. L'utilisation d'un casque de moto ou de bouchons d'oreille permet d'atténuer le bruit.

Les valeurs acoustiques internes d'un de nos vélos à 45 km/h sont de 88 dB SPL (*Sound Pressure Level*). Pour connaître le désagrément du véhicule provoqué sur un piéton, le bruit externe a été mesuré à 1,8 m du sol et à 1,5 m du véhicule : 68 dB ont été mesurés lors du passage du véhicule à 45 km/h. Le niveau de référence de la pression acoustique est de 20×10^{-6} Pa (seuil d'audibilité). À partir de l'équation suivante, le nombre de décibels en fonction de la pression acoustique peut être déterminé :

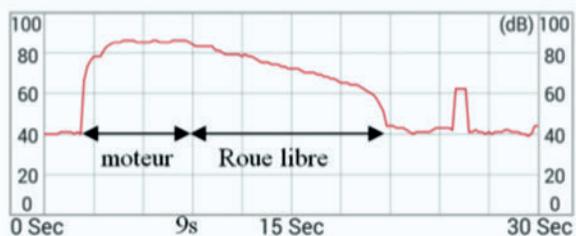
$$\text{Nombre dB} = 20 \times \log(1/20 \times 10^{-6}) = 94 \text{ dB SPL}$$

1 Pa correspond à 94 dB, donc au bruit du métro ou d'une tronçonneuse. Le nombre de décibels en fonction de la pression est donné dans la documentation des microphones, ce qui permet de connaître la tension efficace en fonction du bruit.

Exemple : un micro $-54,5$ dBV/Pa fournira une tension efficace correspond à l'équation suivante :

$$\text{Tension micro} = 10^{-54,5 \text{ dBV}/20} = 1,88 \text{ mV/Pa}$$

À partir de cette amplitude, il est facile de déterminer le bruit en dB SPL. De nombreux sonomètres remplacent les dB SPL par des dBA qui donnent moins d'importance aux basses fréquences, mais qui correspondent mieux à la sensibilité de l'oreille.



17 Bruit du moteur roue (40 dB correspond au bruit dans une bibliothèque, 84 dB correspond à une rue animée)

La mesure avec un smartphone est difficile, le moindre vent faisant passer le bruit de 40 à 60 dB. Une bonnette doit être utilisée même sur un sonomètre ou sur un micro avec une prise jack sur PC. Un PC portable est mieux qu'un smartphone ; avec un logiciel puissant tel qu'Audacity ou Arta, on peut filtrer les bruits et permettre de mieux calibrer la chaîne de mesure.

Sur la figure 17, un micro a été placé à 30 cm du moteur pour mesurer le bruit de la roue. À 75 km/h, le moteur roue du vélo tourne à 600 tr/min et produit un bruit de 84 dB. Puis, de 9 à 20 s, le moteur est en roue libre et le bruit diminue de façon logarithmique.

À quelques tours par minute, le bruit est seulement de 60 dB (correspondant au bruit d'une conversation normale à 1 m).

Pour minimiser le bruit interne et les vibrations du vélo, un tissu en feutre peut être posé à l'intérieur de la coque.

Métrologie

Avec un smartphone (GPS, micro, accéléromètre) et des applications enregistreuse, il est possible d'enregistrer la vitesse et la distance parcourue, le bruit, les accélérations et donc d'obtenir des données permettant de déterminer les caractéristiques d'un pneu et la nuisance du véhicule. Évidemment, la précision est relativement faible.

Par exemple, lors de la mesure du coefficient résistif C_r , on compte une erreur de 1 km/h sur la vitesse initiale de 15 km/h et le coefficient résistif est déterminé avec une erreur de 13 %.

Si on veut améliorer la précision, il faudra mettre en place une métrologie meilleure, avec un odomètre et de l'appareillage adapté. Cependant, un simple smartphone permet d'avoir déjà des données objectives et de maîtriser les principales grandeurs qui caractérisent un pneu.

La durée de vie d'un pneu de vélo

Quand peut-on considérer qu'un pneu est usé ? Combien de kilomètres peut-on raisonnablement parcourir avec chaque type de pneu ?

Difficile de répondre à ces deux questions, car cela dépend du pilotage, des freinages, des vitesses, du diamètre de la roue, de l'épaisseur et de la dureté de la gomme... La durée de vie peut passer du simple au double. Des forums de discussions permettent d'estimer que la durée de vie d'un pneu se situe entre 5 000 et 9 000 km. Mais certains pneus dits de « mauvaises qualités » ne font pas plus que 1 000 km. Lorsque le renfort anticrevaison ou la toile du pneu apparaît, il devient impératif de changer le pneu, car le renfort anticrevaison a un très mauvais coefficient d'adhérence.

Remarque : pour la même distance, un pneu de 20 pouces fera plus de tours qu'un pneu de 26 pouces et sera donc usé plus vite.



18 Prototype de tricycle électrique pendulaire avec pneu classique renforcé à faible consommation d'énergie



19 Prototype de tricycle avec pneu passe-partout et fortement amortisseur

De même, un pneu de faible largeur s'usera plus vite qu'un pneu plus large.

Un pneu avec une grosse épaisseur de gomme devrait avoir une longévité accrue et être moins sensible aux crevaisons, mais sera un peu plus lourd.

Conclusion

Cet article a présenté la manière de déterminer les caractéristiques des pneus avec un simple smartphone, sans banc de test particulier, de façon à pouvoir faire un bon choix.

De nombreuses expérimentations simples permettent de faire des essais et d'obtenir des données objectives afin de bien cerner la complexité technique des pneus.

L'étudiant va aussi comprendre que toutes les applications sur smartphone ne se valent pas et ne remplacent pas un appareil de mesure. En conséquence, il faut tester l'application dans un premier temps et souvent retravailler les données en fonction des capteurs (étalonnage, calibrage, linéarisation, filtrage, traitement numérique...). Il y a très peu d'informations sur les applications des smartphones, sur leur précision, les méthodes de mesures... Cependant, il est très pédagogique de tester de telles applications ou de réaliser sa propre application.

Le pneu est un support d'étude permettant d'aborder toutes les problématiques relatives au recyclage, à l'impact sur l'environnement et aux émissions de CO₂ dans le domaine des transports.

Lors de l'achat d'une automobile, il y a plein d'options à choisir, mais jamais le choix des pneumatiques chez un concessionnaire. Il en va de même lors de l'achat d'une bicyclette dans une boutique spécialisée ou dans la grande distribution.

Les fabricants de pneus de vélo devraient mieux communiquer sur leurs produits aux distributeurs. Afin que le choix ne repose pas simplement sur un prix, mais sur un gain de vitesse pour le même effort, sur une distance de freinage minimale et une longévité accrue. La qualité est un gage de confiance dans une marque. Cet aspect est à prendre en compte aujourd'hui plus que jamais, car les clients exigeants utilisent aussi les réseaux sociaux pour faire part de leurs retours d'expérience. ■

Références bibliographiques

- [1] Michelin « le pneu l'adhérence » <http://activaclubfrance.free.fr/Doc%20technique/Adherence%20du%20pneu.pdf>
- [2] www.michelin.fr/pneus/decouvrir-partager/guide-dachat/etiquetage-des-pneus-qui-determine-leur-grade-et-comment
- [3] www.quechoisir.org/auto/actualite-pneus-l-etiquetage-est-a-revoir
- [4] www.largus.fr/actualite-automobile/test-exclusif-la-verite-sur-les-pneus-verts-4287380.html
- [5] www.lesprofessionnelsdupneu.com/www.tnfpf.fr/pdf/divers/Reglementation-LB-To-2012.pdf www.barneaudonline.com/fiche_pdf/LIVRE%20BLANC%20DU%20PNEU.pdf
- [6] A. Sivert, J. Claudon, F. Betin, B. Vacossin, J. Accart, « Véhicule électrique à faible consommation (éco marathon). Problématique mécanique des tricycles carénés : caractérisation avec smartphone » *Technologie*, septembre 2015
- [7] A. Sivert, F. Betin, B. Vacossin, T. Lequeu, « Optimisation de la masse en fonction de la vitesse, puissance, autonomie, prix, centre de gravité, frein d'un véhicule électrique à faible consommation (vélo, vélomobile, voiture électrique) » *Revue 3EI*, n° 80, avril 2015
- [8] A. Sivert, T. Lequeu, « Je construis mon véhicule électrique », Dunod, 2013, 140 p.
- [9] <http://velorizontale.bbfr.net/t17956-velomobile-electric-leiba-x-stream-iut-aisne>
- [10] <http://velorizontale.bbfr.net/t18840-test-de-pneu-velo-adherence-et-coefficient-de-roulement>
- [11] www.schwalbe.com/fr/rollwiderstand.html
- [12] A. Sivert, K. Lebel, « [Tuto] étude suspension avec accéléromètre de smartphone » 2015, www.fichier-pdf.fr/2015/05/06/tuto-etude-suspension-avec-accelerometre-de-smarthphone/
- [13] Trois vidéos sur le freinage youtube playlist : IUTGEII+sivert https://www.youtube.com/watch?v=tE0y--6-LXk&list=PLfZunVn_gcq7EOurXuWU2sRFmh6CbiUil&index=26
- [14] www.bicyclerollingresistance.com/the-test