

## Théorie

Un véhicule est soumis à 2 types de forces de frottements :

- la traînée de frottement aérodynamique  $F_{aero} = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2$  en Newton où :
  - o  $\rho$  est la masse volumique de l'air : 1.2 kg / m<sup>3</sup> à 20°C
  - o  $S$  est la surface frontale du véhicule en m<sup>2</sup> (3.2 m<sup>2</sup>)
  - o  $C_x$  est le coefficient de pénétration dans l'air du véhicule (0.29)
  - o  $V$  est la vitesse relative de l'air par rapport au véhicule en m/s
- la traînée de résistance au roulement des pneus  $F_{rr} = C_{rr} m g$  en Newton où :
  - o  $C_{rr}$  est le coefficient de résistance au roulement du pneu (à déterminer)
  - o  $m$  la masse portée par le pneu
  - o  $g$  l'accélération de la pesanteur : 9,81 m/s<sup>2</sup>

## Protocole d'expérience

On cherche à mesurer la résistance au roulement d'une camionnette Citroën Berlingo Electrique équipée de pneus Michelin Agilis 175 / 65 R14 90T gonflés à la pression maximale recommandée (3,75 Bar à froid). La Citroën est équipé d'un GPS et d'un compteur de distance hectométrique. On applique les opérations suivantes sur une chaussée en bon état, peu ventée, sensiblement plate et goudronnée :

- 1) Lancement du véhicule à 20 km/h stabilisés au GPS : le GPS détecte ainsi les vitesses à 1km/h près,
- 2) Passage du levier de vitesse sur la position neutre (N) pour être en roue libre,
- 3) Mesure de la distance parcourue jusqu'à l'arrêt complet avec le compteur hectométrique,
- 4) Répétition de l'expérience dans les 2 sens de la même portion de chaussée, 5 fois.

## Bilan énergétique

On émet l'hypothèse que dans les conditions précitées, **le frottement aérodynamique est négligeable** et que seule la traînée de résistance au roulement contribue à stopper le véhicule sur une distance  $D$ .

*On vérifiera a posteriori que cette hypothèse est valable.*

Le théorème de l'énergie cinétique donne :  $\Delta E_c = W(\vec{F}_{rr}) \Rightarrow \frac{1}{2} m V^2 = F_{rr} D$  ; et  $F_{rr} = C_{rr} m g$

On en déduit :  $\frac{1}{2} m V^2 = C_{rr} m g D \Rightarrow C_{rr} = \frac{V^2}{2 g D}$

## Mesures et incertitudes

L'arrêt du véhicule répété impose environ  $D = 150$  m mesurée à 10 m près par le compteur hectométrique. La valeur brute mesurée est  $C_{rr} = 0.0105$  avec  $V = 5.55$  m/s

$$\text{Calcul d'incertitude : } C_{rr} = \frac{V^2}{2 g D} \Rightarrow \frac{\Delta C_{rr}}{C_{rr}} = 2 \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta D}{D} = 2 \frac{1}{20} + \frac{10}{150} = 0.1666$$

On majore l'incertitude relative à 20% (incertitude sur  $g$  négligée) :  $\Delta C_{rr} = 0.0105 \times 20\% = 0.00210$

**Résultat :**  $C_{rr} = 0.01 \pm 0.002$ , ou bien  $0.008 < C_{rr} < 0.012$

## Comparaison entre la traînée aérodynamique et la traînée de résistance au roulement

$$\text{On a } \frac{F_{aéro}}{F_{rr}} = \frac{\frac{1}{2} \rho S C_x V^2}{C_{rr} m g} = \frac{\rho S C_x V^2}{2 C_{rr} m g}$$

L'application numérique donne pour  $m = 1700 \text{ kg}$  ;  $SC_x = 0.92$  ,  $C_{rr} = 0.01$

$$\frac{F_{aéro}}{F_{rr}} \simeq 0.1 \text{ à } 5.55 \text{ m/s} = 20 \text{ km/h} \text{ et } \frac{F_{aéro}}{F_{rr}} \simeq 0.025 \text{ à } 2.775 \text{ m/s} = 10 \text{ km/h}$$

**Les forces aérodynamiques** représentent environ 5% du freinage du véhicule dans cette expérience, soit 4 fois moins que le cumul des incertitudes de mesure : **elles sont donc négligées légitimement.**

### Exemples de résistances au roulement d'autres pneus, commentaires

Colonne "RRC Average" extraite de *Green Report March 2003* : "Low Rolling Resistance Tires : fuel savings for America "

**TABLE 1: RECOMMENDED TIRE MODELS**

BRAND	MODEL	SIZE	RRC AVERAGE	PRICE	TRACTION COMPOSITE	WOULD BUY AGAIN	COMPOSITE TREAD WEAR	COMPOSITE PERFORMANCE SCORE
Bridgestone	B381	185/70R14	0.0062	\$62.00	8.00		5.96	6.98
Nokian	NRT2	185/70R14	0.0085	\$67.00	8.00		5.72	6.86
Sumitomo	HTR 200	185/70R14	0.0092	\$36.00	8.15	8.30	7.05	7.83
Dunlop	Graspic DS-1	185/70R14	0.0092	\$46.00	7.50	7.90	6.60	7.33
Dunlop	SP40 A/S	185/70R14	0.0103	\$41.00	8.00		7.18	7.59
Bridgestone	Blizzak WS-50	185/70R14	0.0103	\$68.00	7.91	8.70	6.04	7.55
Goodyear	VIVA 2	185/70R14	0.0104	\$47.96	7.00		6.52	6.80
Continental	ContiTouring Contact CH95	205/55R16	0.0083	\$64.00	7.46	6.10	7.29	6.95
Michelin	Pilot Alpine	205/55R16	0.0090	\$125.00	7.56	8.60	8.00	8.05
Michelin	EnergyMXV4 Plus	205/55R16	0.0090	\$118.00	7.64	6.00	6.87	6.84
Dunlop	SP Winter Sport M2	205/55R16	0.0102	\$98.00	8.55		7.80	8.17
Michelin	Arctic AlpineXL	235/75R15	0.0081	\$79.00	8.10	8.50	7.10	7.90
Dunlop	Axiom Plus WS	235/75R15	0.0088	\$43.00	8.00		5.88	6.94
BF Goodrich	Long Trail T/A	245/75R16	0.0092	\$76.00	7.94	6.20	7.11	7.08
Michelin	XPS Rib	LT245/75R16	0.0101	\$167.90	6.70	8.10	8.00	7.60
Michelin	LTX M/S	245/75R16	0.0103	\$139.00	7.97	8.30	7.37	7.88
Bridgestone	Dueler A/T D693	245/75R16	0.0103	\$104.00	8.00		7.20	7.60

NOTE: The lower the rolling resistance coefficient (RRC), the more efficient is the tire; all tires listed here meet Green Seal's criterion for rolling resistance of less than 0.0105 and are among the most efficient available in the market today. In contrast, the higher the value of Traction Composite, Would Buy Again, Composite Treadwear, and Composite Performance Score, the better in those measures the tire is; however, all tires listed here have a greater than average performance score in these respects.

©2003, Green Seal Inc. Use of this table for commercial purposes is prohibited. <http://www.wbdg.org/ccb/GREEN/REPORTS/cgtrirerollingresistance.pdf>

Le pneu *Michelin Agilis 175/65 R14 90T* n'est pas conçu prioritairement pour diminuer la résistance au roulement, mais pour une bonne adhérence sur le sec et le mouillé, notamment avec une charge élevée (spécifications usuelles pour les camionnettes).

Cependant, il obtient une performance correcte au roulage lorsqu'il est gonflé au maximum préconisé. Il convient donc pour un véhicule électrique où ce critère influe significativement sur l'autonomie (de l'ordre de 10%). L'idéal serait un pneu *Michelin Energy* qui comporte une gomme siliceuse plus dure et dont la conception donne la priorité à la réduction des effets dissipatifs dans et hors du pneu.

### Conclusions, et pour en savoir plus

Le modèle et l'expérience proposés ont mesuré un bon ordre de grandeur du  $C_{rr}$  sur une charge nominale (625 kg/pneu) et une vitesse basse. En réalité, le  $C_{rr}$  varie avec la charge, la pression, la température, la vitesse, l'état et le type des pneus, la nature du sol et bien d'autres facteurs. **Il est de nature essentiellement expérimentale.**

[http://www.profauto.fr/2-Apports\\_theoriques/Resistance\\_avancement.pdf](http://www.profauto.fr/2-Apports_theoriques/Resistance_avancement.pdf)

[http://www.tut.fi/plastics/tyreschool/moduulit/moduuli\\_8/hypertext\\_1/3/3\\_3.html](http://www.tut.fi/plastics/tyreschool/moduulit/moduuli_8/hypertext_1/3/3_3.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling\\_resistance](http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Rollwiderstand>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia\\_a\\_la\\_rodadura](http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_a_la_rodadura)

<http://www.wbdg.org/ccb/GREEN/REPORTS/cgtrirerollingresistance.pdf>