

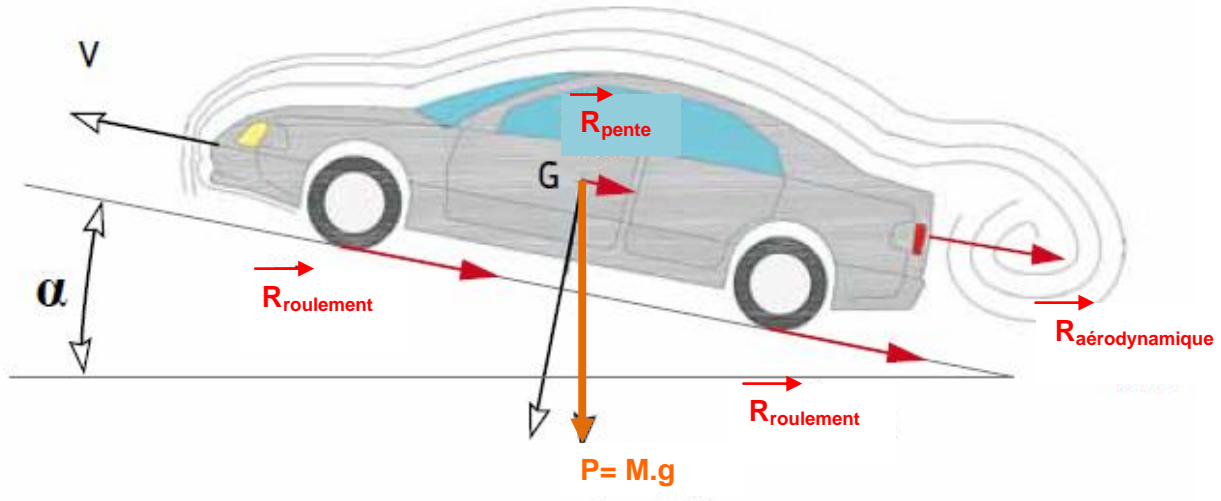
Dynamique du véhicule électrique

A. Equation du couple moteur

1. Les actions qui s'opposent au mouvement

Un véhicule en mouvement est soumis à plusieurs actions qui s'opposent à ce mouvement que l'on qualifiera de forces résistantes.

Ces forces résistantes peuvent être exprimées ensuite sous forme de couple résistant sur l'essieu moteur.



1. La résistance aérodynamique R_a dont l'expression est :

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_x \cdot S_f \text{ en N}$$

C_x coefficient de traînée (coefficient de forme)

ρ masse volumique de l'air ($\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$)

S_f Maître couple du véhicule (surface projeté suivant le plan perpendiculaire au déplacement) en m^2

V Vitesse de déplacement en m/s

Le couple associé est $C_{Ra} = R_a \cdot r_{\text{roue}}$ avec r_{roue} , rayon des roues motrices.

$$C_{Ra} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_x \cdot S_f \cdot r_{\text{roue}} \text{ en N.m}$$

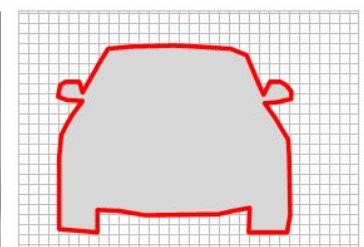
Le coefficient de traînée C_x : dépend de la forme globale du véhicule en mouvement. On peut obtenir des valeurs approchées grâce aux simulations aérodynamiques mais le C_x réel est finalement mesuré en soufflerie. Les formes qui présentent un C_x optimal, comme celle d'une goutte d'eau, ne sont pas forcément applicables à la carrosserie d'une voiture. De plus, toute excroissance, même minime, comme un joint de pare-brise, est susceptible de perturber l'écoulement de l'air et de dégrader le C_x .



Fig.1 Test aérodynamique en soufflerie

La surface frontale S_f : aussi appelée "maître couple" représente la projection de la surface du véhicule orientée perpendiculairement au sens de déplacement (voir figure ci-dessous).

Fig.2 véhicule - vue de face et sa surface frontale



Exemples

Pour un cycliste de tourisme: $C_x=1,1$ et $S_f = 0,5 \text{ m}^2$
 Pour le prototype Polyjoule : $C_x=0,11$ et $S_f= 0,3 \text{ m}^2$

Activité : Impact de S_f et C_x sur la puissance de la résistance aérodynamique pour des véhicules de type berline : Toyota Prius, Citroën C4, Peugeot 407.

	C_x	$S_f (\text{m}^2)$
Peugeot 407	0,29	2,23
Citroën C4	0,31	2,21
Toyota Prius	0,25	1.8

Comparer les C_x et S_f de ces trois véhicules.
 Calculer le produit $S_f.C_x$. En déduire un classement de ces véhicules par ordre de résistance aérodynamique croissante
 Calculer le gain de puissance aérodynamique (et donc le gain de consommation) à 130 km/h pour la voiture la moins résistante par rapport à la plus résistante.

2. La résistance au roulement R_r dont l'expression est

$$R_r = c_{rr} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha \text{ en N}$$

c_{rr} Coefficient de résistance au roulement
 M Masse du véhicule
 g accélération de la pesanteur ; $g=9.81 \text{ m/s}^2$
 α Angle de la pente par rapport à l'horizontal en radians

Le couple associé est $C_{Rr} = R_r \cdot r_{\text{roue}}$ avec r_{roue} , rayon des roues motrices.

$$C_{Rr} = c_{rr} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot r_{\text{roue}} \text{ en N.m}$$

ou $C_{Rr} = M \cdot g \cdot \delta \cdot \cos \alpha$ avec $\delta = c_{rr} \cdot r_{\text{roue}}$ en m

La masse m : dépend du nombre de composants et des matériaux utilisés.

Le coefficient de résistance au roulement C_{rr} : dépend du matériau et de la forme des pneumatiques et du matériau et de l'état de la route.

Exemples

On peut prendre:

- pour une voiture "classique" $C_{rr}= 0,01$
- pour un vélo: $C_{rr}=0,005-0,007$

Le prototype Polyjoule a un $C_{rr}=0,0015$

3. La résistance due à la pente dont l'expression est

$$R_p = M \cdot g \cdot \sin \alpha$$

M Masse du véhicule
 g accélération de la pesanteur ; $g=9.81 \text{ m/s}^2$
 α Angle de la pente par rapport à l'horizontal en radians

Le couple associé est $C_{Rp} = R_p \cdot r_{\text{roue}}$ avec r_{roue} , rayon des roues motrices.

$$C_{Rp} = M \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot r_{\text{roue}}$$

Expression du couple résistant total sur l'essieu moteur

$$C_R = C_{Ra} + C_{Rr} + C_{Rp}$$

2. Résultante dynamique et Moment dynamique

La résultante dynamique F_{ma} correspond à la force nécessaire pour obtenir l'accélération A d'une masse M .

$$F_{ma} = M.A \text{ en N}$$

Le moment dynamique C_{ma} à exercer sur l'essieu moteur pour obtenir une accélération γ est

$$C_{ma} = (4.I + M.R^2) \frac{A}{r_{\text{roue}}} \text{ en N.m}$$

I Inertie d'une roue par rapport à son axe de rotation en kg.m^2

R Rayon des roues en m

γ accélération du véhicule supposée (constante) en m/s^2

3. Couple moteur appliqué sur l'essieu moteur

Le couple moteur à exercer pour atteindre la vitesse V avec une accélération γ est

$$C_{me} = C_{ma} + C_R \text{ en N.m}$$

A vitesse constante C_{ma} s'annule, le couple moteur sur l'essieu est égal au couple résistant $C_{R..}$

4. Couple moteur C_m

La transmission entre l'arbre moteur et l'essieu peut se faire par engrenages ou système poulies-courroie.

Soit k le rapport de transmission : $k = \frac{\Omega_r}{\Omega_m}$

Ω_r vitesse de rotation des roues

Ω_m vitesse de rotation du moteur

En général, on utilise une configuration de type réducteur ($k < 1$) pour la transmission afin d'augmenter le couple sur l'essieu moteur.

Soit η le rendement de la transmission.

Le couple moteur aura donc pour expression

$$C_m = \frac{k.C_{me} + J_{tm} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt}}{\eta} \text{ ou } C_m = \frac{k.C_{me}}{\eta} + \frac{1}{\eta} J_{tm} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt}$$

C_{me} Couple sur l'essieu moteur

$k.C_{me}$ Couple sur l'essieu moteur ramené sur l'arbre moteur

$\frac{d\Omega_m}{dt}$ accélération angulaire du moteur

J_{tm} Inertie équivalente de la transmission ramenée sur l'arbre moteur

$J_{tm} = J_{pr}.k^2 + J_{pm} + J_m$ avec

J_{pm} , moment d'inertie poulie motrice ou pignon moteur

J_{pr} , moment d'inertie poulie réceptrice ou pignon récepteur

J_m , moment d'inertie du moteur

$\frac{1}{\eta} J_{tm} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt}$ Moment dynamique équivalent de la transmission ramené sur l'arbre moteur

On peut encore exprimer C_m en fonction du couple résistant C_R et du moment dynamique total du système {Voiture, roue, transmission} équivalent ramené sur l'arbre moteur

$J_{eq} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt}$:

$$C_m = \frac{k \cdot C_R + J_{eq} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt}}{\eta} \quad \text{avec} \quad J_{eq} = (4.I + MR^2)k^2 + J_{tm}$$

B. Réduire la résistance à l'avancement des véhicules

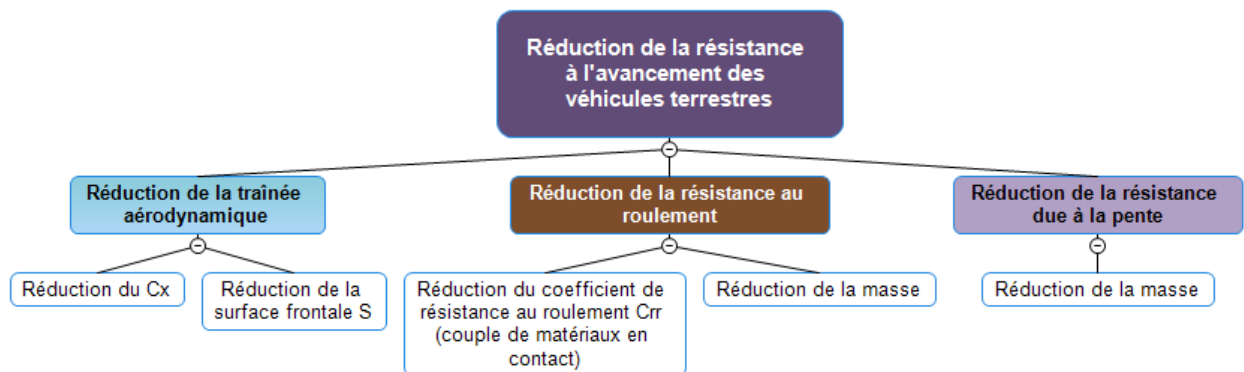


Fig.3 Paramètres à optimiser pour réduire la résistance à l'avancement des véhicules

C. Démarche de détermination des performances d'un véhicule électrique

Vous devez calculer le couple C_m et la puissance P_m pour les trois configurations suivantes:

1. Calcul à vitesse constante maximale sur le plat

2. Calcul pour atteindre la vitesse maximale à partir de l'arrêt

3. Démarrage en côte