

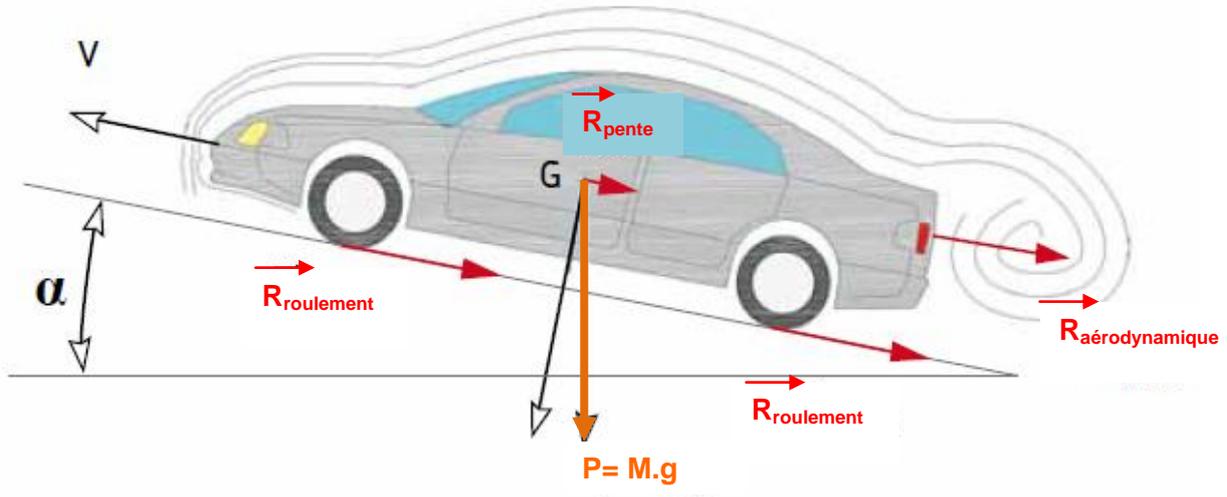
**Dynamique du véhicule électrique**

**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)
- $\rho$  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  $C_{Ra} = R_a \cdot r_{roue}$  avec  $r_{roue}$ , rayon des roues motrices.

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

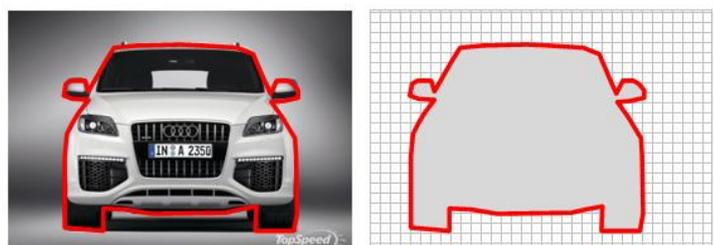
**Le coefficient de traînée  $C_x$**  : dépend de la forme globale du véhicule en mouvement. On peut obtenir des valeurs approchées grâce aux simulations aérodynamiques mais le  $C_x$  réel est finalement mesuré en soufflerie. Les formes qui présentent un  $C_x$  optimal, comme celle d'une goutte d'eau, 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.**

	$C_x$	$S_f \text{ (m}^2\text{)}$
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 ;  $g=9.81 \text{ m/s}^2$
- $\alpha$  Angle de la pente par rapport à l'horizontal en radians

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

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

ou  $C_{Rr} = M \cdot g \cdot \delta \cdot \cos \alpha$  avec  $\delta = c_{rr} \cdot r_{roue}$  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 ;  $g=9.81 \text{ m/s}^2$
- $\alpha$  Angle de la pente par rapport à l'horizontal en radians

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

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

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  $\gamma$  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  $\text{kg.m}^2$

$R$  Rayon des roues en  $\text{m}$

$\gamma$  accélération du véhicule supposée (constante) en  $\text{m/s}^2$

## 3. Couple moteur appliqué sur l'essieu moteur

Le couple moteur à exercer pour atteindre la vitesse  $V$  avec une accélération  $\gamma$  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 :  $k = \frac{\Omega_r}{\Omega_m}$

$\Omega_r$  vitesse de rotation des roues

$\Omega_m$  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  $\eta$  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

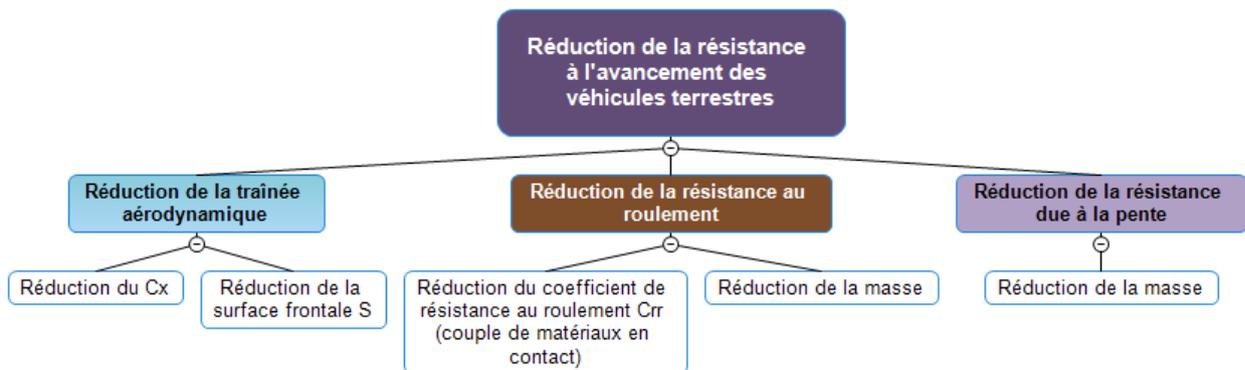
$\frac{1}{\eta} J_{tm} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt}$  Moment dynamique équivalent de la transmission ramené sur l'arbre moteur

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