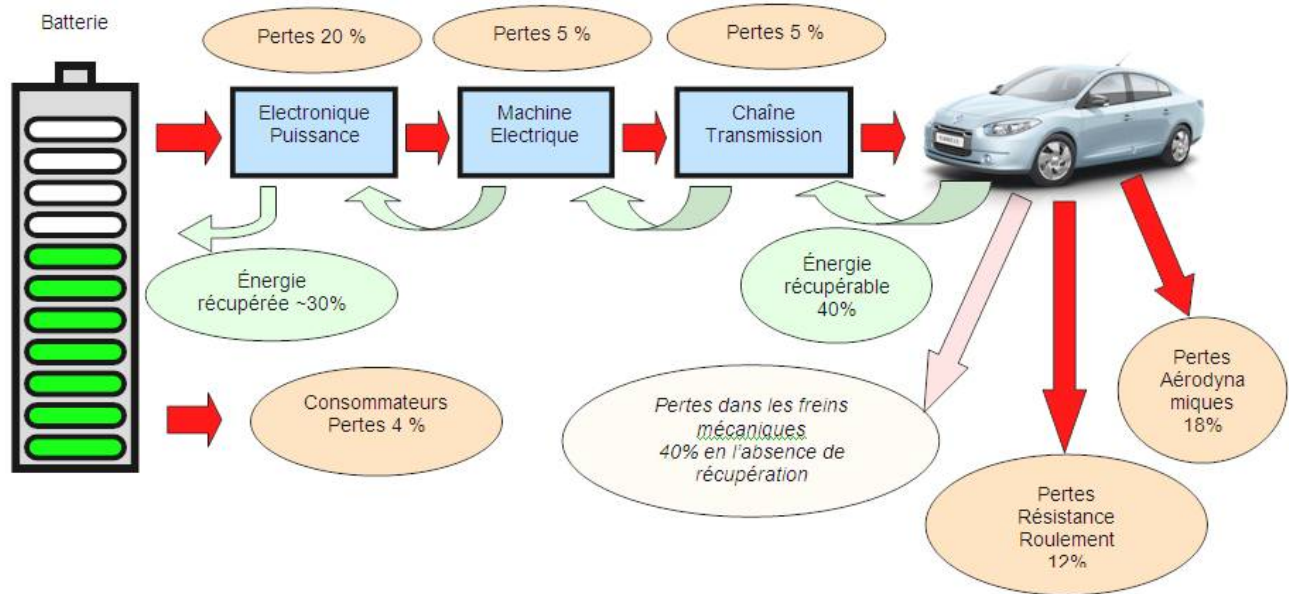


**Dynamique : Frein à récupération d'énergie** (Centrale MP 12)

Pour réduire l'empreinte carbone du secteur transport des particuliers, plusieurs constructeurs automobiles développent des véhicules électriques avec des systèmes de récupération d'énergie au freinage.

Le principe de récupération d'énergie est identique chez tous les constructeurs mais la réalisation et les algorithmes diffèrent quelque peu. Le support utilisé comme illustration de ce principe innovant est la Renault « Fluence Zéro Émission » commercialisée courant 2012 en Europe.



**Vérification de la pertinence de la récupération d'énergie au freinage.**

Objectif : Valider la pertinence d'un système de récupération d'énergie au freinage et mettre en évidence les limites d'un freinage purement électrique.

Afin de minimiser la consommation électrique des véhicules électriques, une solution consiste à récupérer l'énergie cinétique et/ou potentielle du véhicule lors des phases de freinage. Pour cela, on exploite la réversibilité de la chaîne d'énergie électrique en faisant fonctionner l'actionneur électrique de la chaîne de transmission en mode générateur. Le système de récupération d'énergie lors des freinages obéit au cahier des charges suivant :

Fonctions	Énoncé	Critères	Niveaux
FS1	Assurer la décélération du véhicule imposée par le conducteur	Freinage nominal en cycle urbain	Route horizontale
		Vitesse initiale	50 km·h <sup>-1</sup>
		Distance d'arrêt	50 m
FS2	Récupérer une quantité optimale d'énergie dans la batterie	Minimum d'énergie économisée par rapport à un véhicule électrique traditionnel sur une <i>séquence urbaine type</i>	25 % d'énergie économisée
FS3	Assurer le confort du conducteur et de ses passagers	Décélération en régime permanent à la levée du pied	2 m·s <sup>-2</sup>
		Limitation des à-coups	Premier dépassement en décélération inférieur à 50% de la valeur en régime permanent, lors d'un freinage nominal

		Limitation des vibrations	Moins de 5 oscillations en décélération en dehors de la bande $\pm 5\%$ autour de la courbe gabarit
<b>FS4</b>	Arrêter le véhicule en toute sécurité	Mode freinage mécanique privilégié lors d'un freinage d'urgence	Pour une vitesse initiale de $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , la distance d'arrêt maximale doit être de 15 m

On appelle *séquence urbaine type*, un trajet entre deux feux tricolores, en ligne droite, sur une route horizontale et composé :

- ✓ D'une phase d'accélération de  $0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  à  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (durée  $t_1 - t_0 = t_a$ ).
- ✓ D'un parcours de  $500 \text{ m}$  à une vitesse constante de  $V_0 = 50 \text{ km}/\text{h}$  (durée  $t_2 - t_1$ ).
- ✓ Puis d'une phase de décélération (durée  $t_3 - t_2 = t_f$ ) avec arrêt au feu à l'instant  $t_3$  en respectant la situation de freinage nominal évoquée précédemment.

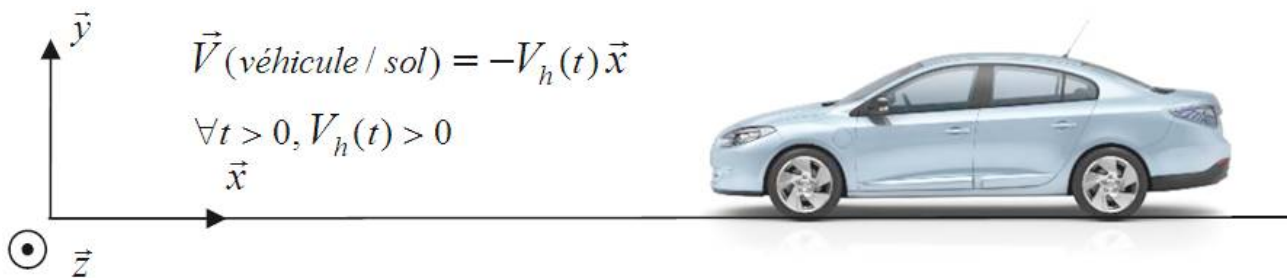
La décélération commandée par la levée du pied de la pédale d'accélérateur, correspond au « frein moteur » d'un véhicule thermique.

Pour des raisons de confort et d'habitude de conduite, elle est choisie proche de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Cette valeur est légèrement supérieure à celle obtenue par le frein moteur d'un véhicule thermique. De plus, cette décélération a l'avantage d'être très reproductible, contrairement à celle d'un véhicule thermique qui est fonction notamment de la vitesse engagée.

**Q1.** Indiquer trois raisons incitant les usagers des véhicules électriques à décélérer sans utiliser la pédale de frein, par rapport aux habitudes de conduite d'un véhicule thermique.

### Étude de la séquence urbaine type

On adopte un modèle ramené dans le plan, dans la mesure où l'on considère que le véhicule se déplace en ligne droite horizontale.



- On note :
- $\vec{V}(\text{véhicule} / \text{sol}) = -V_h(t) \vec{x}$  la vitesse du véhicule par rapport au sol.
  - $\vec{\gamma}(\text{véhicule} / \text{sol}) = -\gamma(t) \vec{x}$  l'accélération du véhicule par rapport au sol.

**Q2.** Dans le cas d'un freinage nominal,  $\gamma(t) = \gamma_n = -2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , déterminer la distance parcourue en partant d'une vitesse initiale  $V_0 = 50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Conclure au regard des critères du cahier des charges.

Pour simplifier, on considère que la phase d'accélération de  $0$  à  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  se fait avec l'accélération  $\gamma(t) = (-\gamma_n) = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

**Q3.** Tracer l'évolution temporelle de la vitesse  $V_h(t)$  du véhicule par rapport au sol en fonction du temps sur la séquence urbaine type et définir son expression en fonction de  $\gamma_n$ ,  $V_0$  et  $t_2$  sur chaque intervalle de temps  $[t_0, t_1]$ ,  $[t_1, t_2]$  et  $[t_2, t_3]$ . Donner les valeurs numériques des durées  $t_1 - t_0 = t_a$ ,  $t_2 - t_1$  et  $t_3 - t_2 = t_f$ .

## Pertinence de la récupération d'énergie au freinage.

### Paramétrage des sources dissipatrices d'énergie.

Pour valider la pertinence d'un système de récupération d'énergie au freinage, on se propose d'évaluer la quantité d'énergie fournie par la batterie puis restituée à la batterie au cours d'une séquence urbaine type.

Le véhicule étudié a une masse  $M = 1600 \text{ kg}$ .

La chaîne d'énergie est constituée d'une électronique de puissance, d'une machine électrique et d'une transmission mécanique.

La puissance perdue par la chaîne d'énergie utilisée en mode traction du véhicule s'exprime sous la forme :

$P_{perdue\ directe} = -(1 - \eta) P_{elec}$ , où  $P_{elec}$ , ( $P_{elec} > 0$ ) est la puissance électrique fournie par la batterie et  $\eta$  le facteur de perte avec  $\eta = 0,7$ .

Pour cette même chaîne d'énergie utilisée en mode récupération de l'énergie au freinage (tout électrique), la puissance perdue s'exprime sous la forme :

$P_{perdue\ inverse} = \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) P_{elec}$ , où  $P_{elec}$ , ( $P_{elec} < 0$ ) est la puissance électrique récupérée par la batterie.

On suppose par ailleurs qu'un effort résistant de type visqueux, correspondant d'une part aux frottements aérodynamiques, et d'autre part à la résistance au roulement, s'oppose à l'avancement du véhicule et dont la norme s'exprime sous la forme :  $f V_h(t)$ , avec  $f = 16 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ .

### Énergie fournie par la batterie pendant la phase d'accélération.

**Q4.** En précisant clairement le théorème utilisé et les hypothèses considérées, déterminer l'expression de la puissance fournie par la batterie,  $P_{elec}(t)$ , pour accélérer le véhicule de 0 à  $V_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  en fonction de  $M$ ,  $f$ ,  $\eta$ ,  $V_h(t)$  et  $\gamma_n$ .

**Q5.** En déduire l'expression de l'énergie fournie par la batterie pendant cette phase d'accélération en fonction de  $M$ ,  $f$ ,  $\eta$ ,  $V_0$  et  $\gamma_n$ . Faire l'application numérique.

Énergie fournie par la batterie pendant la phase à vitesse constante.

**Q6.** En utilisant la même démarche, déterminer l'énergie fournie par la batterie pendant la phase à vitesse constante  $V_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Énergie récupérable par la batterie pendant la phase de freinage.

- ✓ Pour le modèle avec effort résistant de type visqueux, l'énergie récupérée dans la batterie, si l'on exploite la réversibilité de la chaîne de transmission lors d'un freinage nominal, est égale à  $E_{50-0elec} = -103 \text{ kJ}$ .
- ✓ Pour un modèle sans effort résistant de type visqueux, l'énergie récupérée dans la batterie, si l'on exploite la réversibilité de la chaîne de transmission lors d'un freinage nominal, est égale à  $E'_{50-0elec} = -108 \text{ kJ}$ .

**Q7.** Comparer ces deux résultats et conclure.

**Q8.** En déduire alors la pertinence du système de récupération d'énergie électrique.

Limites du freinage électrique.

On note :

- ✓  $\overset{\mathbf{1}}{C}_F = -C_F(t) \overset{\mathbf{r}}{z}$ , le couple de freinage uniquement exercé sur la paire de roues avant du véhicule. La chaîne d'énergie du véhicule étudié entraîne uniquement l'essieu avant. En phase de freinage  $C_F(t) > 0$ .
- ✓  $R_r$ , le rayon des quatre roues,  $R_r = 0,3 \text{ m}$ .

Hypothèses :

- ✓ On néglige l'inertie des roues pour cette pré-étude.
- ✓ On suppose que les roues ne glissent par rapport au sol.
- ✓ L'effort résistant de type visqueux est désormais négligé pendant la phase de freinage.

**Q9.** En précisant bien le(s) théorème(s) utilisé(s) et les hypothèses considérées, déterminer le couple de freinage  $C_F(t)$  lors d'un freinage nominal. Faire l'application numérique.

Pour le véhicule étudié et pour la phase de freinage nominale, la composante verticale de la résultante de l'action du sol sur l'ensemble des deux roues avant s'exprime sous la forme :

$$F_{AV} = M(-0,26\gamma_n + 0,48g), \text{ avec } g \text{ la constante gravitationnelle.}$$

Le facteur d'adhérence au contact des pneumatiques avec le sol est d'environ 0,9.

**Q10.** Vérifier que le véhicule peut s'arrêter sans glisser lors d'un freinage nominal.

On peut montrer que le cahier des charges impose une décélération du véhicule

$$\gamma(t) = \gamma_u = -6,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ en freinage d'urgence.}$$

**Q11.** Vérifier que le véhicule ne peut pas s'arrêter sans glisser lors d'un freinage d'urgence.