

Energie récupérable lors des ralentissements (2/2)



COCYANE

www.HKW-aero.fr - inter.action.free.fr - www.COCYANE.fr



Ce document propose une modélisation de l'énergie cinétique récupérable lors des ralentissements des véhicules. Cette modélisation prend en compte le coût énergétique de la masse à transporter du système de récupération de l'énergie cinétique.

Voir [« énergie récupérable lors des ralentissements \(1/2\) »](#)

Energie utile

Eum (énergie utile montées), le cycle Européen page suivante ne comprend pas de montées, donc ce terme = 0

Eua (énergie utile aérodynamique), dépend de :
S = surface frontale (m²)
Cx = coef efficacité aérodynamique

$$(1) \quad E_u = E_{ua} + E_{ur} + E_{ug} + E_{um}$$

Eur (énergie utile roulement), dépend de :
Cr = coef résistance au roulement
m = masse (kg)

Eug (énergie utile accélérations), dépend de : m = masse (kg)
Eug = énergie cinétique (Ec)

Rappel : Eu sur cycle Européen NEDC* (ou MVEG) en MJ au cent :

Eua (énergie utile aérodynamique)
S = surface frontale (m²)
Cx = coef efficacité aérodynamique

$$(1bis) \quad Eu^* = S.Cx.19,2 + Cr.m.0,82 + m.0,011$$

Eur (énergie utile roulement)
Cr = coef résistance au roulement
m = masse (kg)

Eug (énergie utile accélérations)
m = masse (kg)

* Voir « énergie utile au déplacement d'une voiture »

Véhicule classique (sans système de récupération de l'énergie cinétique) :

$$Eu_1 = Eua_1 + Eur_1 + Eug_1 \quad m_1 = \text{masse véhicule 1}$$

Nota : $Eug = \text{énergie cinétique } Ec$

Véhicule avec système de récupération de l'énergie cinétique :

$$Eu_2 = Eua_2 + Eur_2 + Eug_2 \cdot (1 - R_T) \quad m_2 = \text{masse véhicule 2}$$

$R_T = \text{rendement total du système de récupération d'énergie cinétique}$ (R_T est développé plus loin).

A noter que si $R_T = 1$, le troisième terme ci-dessus = 0.

Exprimons Eu_2 en fonction de Eua_1 , m_1 , m_2 , R_T

Eua_1 et Eua_2 n'ont pas de liens avec la masse du système de récupération de l'énergie cinétique Ec , nous pouvons alors écrire :

$$Eua_1 = Eua_2$$

Eur_2 et Eug_2 dépendent de la masse du véhicule et à fortiori de celle du système de récupération de l' Ec , nous pouvons alors écrire :

$$Eur_2 = Eur_1 \cdot (m_2/m_1) \quad \text{et} \quad Eug_2 = Eug_1 \cdot (m_2/m_1) \cdot (1 - R_T)$$

Nous pouvons alors écrire $Eu_2 = Eua_2 + Eur_2 + Eug_2 \cdot (1 - R_T) \Leftrightarrow$

$$(2) \quad Eu_2 = Eua_1 + Eur_1 \cdot (m_2/m_1) + Eug_1 \cdot (m_2/m_1) \cdot (1 - R_T)$$

Définitions :

m_{ST} = masse du système de stockage d'énergie.

$C_{ST \text{ corrigé}}$ = coefficient du système de stockage d'énergie = masse nécessaire pour accélérer 1 kg à une vitesse donnée.

Relation :

$$(3) m_{ST} = C_{ST \text{ corrigé}} \cdot m_2$$

Exprimons m_2 en fonction de m_1 , de C_{ST} et du coefficient spirale Cs^*

$$m_2 = m_1 + (m_2 - m_1) \quad \Leftrightarrow$$

$$m_2 = m_1 + \Delta m \quad \Leftrightarrow$$

$$m_2 = m_1 + m_{ST} \cdot Cs \quad \Leftrightarrow$$

$$m_2 = m_1 + C_{ST \text{ corrigé}} \cdot m_2 \cdot Cs \quad \Leftrightarrow$$

$$m_2 - C_{ST \text{ corrigé}} \cdot m_2 \cdot Cs = m_1 \quad \Leftrightarrow$$

$$m_2 (1 - C_{ST \text{ corrigé}} \cdot Cs) = m_1 \quad \Leftrightarrow$$

$$(3) \quad m_{ST} = C_{ST \text{ corrigé}} \cdot m_2$$

$$(4) \quad m_2 = m_1 / (1 - C_{ST \text{ corrigé}} \cdot Cs^*)$$

* Cs = coefficient spirale, voir « coefficient spirale »

Rendements :

Le rendement a deux composantes :

- le rendement de récupération de l'énergie cinétique : R_R
(rappel : énergie cinétique $E_c = E_{ug}$) ;
- le rendement de stockage et de restitution du système de récupération de l' E_c : R_{ST} .

R_R caractérise la quantité d' E_c récupérable ; $R_R = 0,6$ par exemple signifie que 60% de l' E_c est récupérable ;

R_{ST} caractérise le rendement de stockage et de restitution. $R_{ST} = 0,4$ par exemple signifie que 40% de l'énergie récupérée est restituable.

Exemples :

Si $R_R = 1$ et $R_{ST} = 0,40$: 100% de l'Ec est récupérable mais seuls 40% seront restitués pour relancer le véhicule ;

Si $R_R = 0,4$ et $R_{ST} = 1$: 40% de l'Ec est récupérable et 100% de cette énergie récupérée, soit 40% de l'Ec, permettrons de relancer le véhicule ;

Si $R_R = 0,7$ et $R_{ST} = 0,5$: 70% de l'Ec est récupérable mais seuls 50% de ces 70%, soit 35% ($0,7 \times 0,5 = 0,35$) ; permettrons de relancer le véhicule.

Rendement total R_T :

$$(5) R_T = R_R \cdot R_{ST}$$

Pourquoi nuancer R_R et R_{ST} ?

R_R permet de dimensionner le système de stockage, donc R_R influence la masse de ce système. C'est à dire que si R_R est faible, nous avons peu d'énergie à stocker donc la masse du système de stockage sera faible. A l'opposé, si R_R est élevé, notre système de stockage sera plus conséquent donc plus lourd.

Par contre, pour une énergie donnée, R_{ST} n'influence pas la masse du système de stockage.

C'est-à-dire que le système de stockage est dimensionné par R_R et non pas par R_{ST} . Ceci nous permet d'écrire :

$$(6) \ C_{ST \text{ corrigé}} = C_{ST \text{ NON corrigé}} \cdot R_R$$

Processus de calcul

Déterminer Eu_1 :

$$(1bis) \quad Eu_1 = S.Cx.19,2 + Cr.m_1.0,82 + m_1.0,011$$

Déterminer $C_{ST \text{ NON corrigé}}$: voir annexe

$$(6) C_{ST \text{ corrigé}} = C_{ST \text{ NON corrigé}} \cdot R_R$$

$$(4) m_2 = m_1 / (1 - C_{ST \text{ corrigé}} \cdot C_s)$$

en déduire m_2/m_1

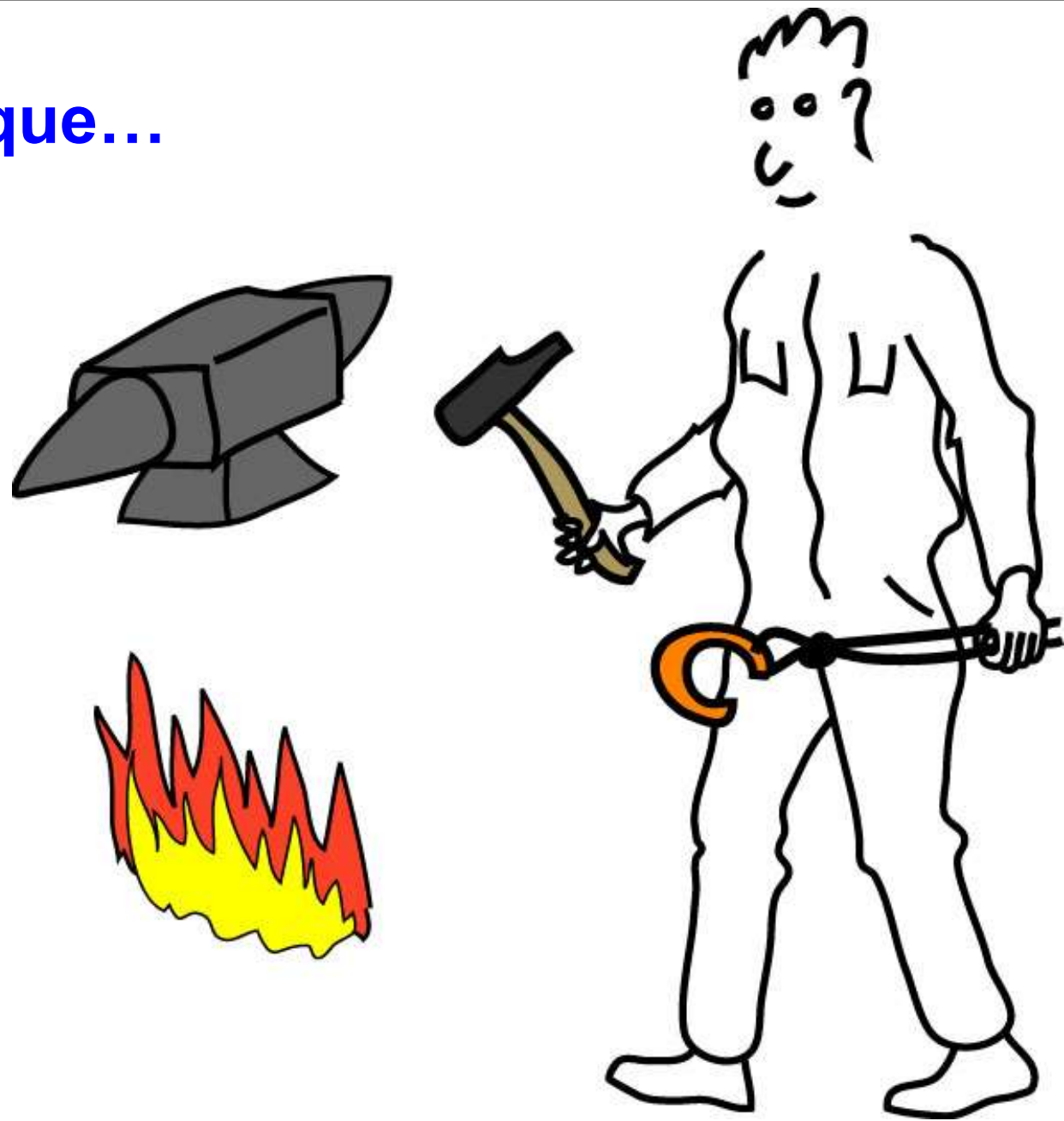
$$(5) R_T = R_R \cdot R_{ST}$$

$$(2) Eu_2 = Eua_1 + Eur_1 \cdot (m_2/m_1) + Eug_1 \cdot (m_2/m_1) \cdot (1 - R_T)$$

En déduire l'économie :

$$(7) \Delta\% = -100 \cdot (1 - Eu_2/Eu_1)$$

Mise en pratique...



S = surface projetée frontale = 2,2 m²

Cx = coefficient d'efficacité aérodynamique = 0,32

m = masse de référence = masse à vide 1390 kg
(plein à 90% compris) + 100 kg de charge = 1490 kg*

Cr = coefficient de résistance au roulement = 0,012

Eu cycle Européen NEDC =

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{S.Cx.19,2} \quad + \quad \mathbf{Cr.m.0,82} \quad + \quad \mathbf{m.0,011} = \\
 & \mathbf{2,2m^2.0,32.19,2} + \mathbf{0,012.1490kg.0,82} + \mathbf{1490kg.0,011} = \\
 & \mathbf{13,5 MJ + 14,7 MJ + 16,4 MJ = 44,6 MJ \text{ au cent}}
 \end{aligned}$$

* Les données ci-dessus sont des moyennes des caractéristiques de plusieurs voitures compactes actuelles. Voir document « données de calculs ».

Economies apportées par différents systèmes de récupération d'énergie lors des ralentissements.

Les technologies de récupération d'énergie ne sont pas détaillées. De plus les coefficients C_{ST} et les rendements R_R et R_{ST} sont difficiles à déterminer (voir annexe).

Ceci explique que le tableau page suivante est à prendre avec prudence. Toutefois, si vous disposez d'autres données, il vous est facile de calculer l'économie apportée associée à vos données.

* Les données du tableau page suivante sont pour l'essentiel issues du document http://sycomoreen.free.fr/syco_francais/Docs/stockage_dim%B0.pdf »

Rappel : les économies ($\Delta\% / Eu_1$) prennent en compte la dépense d'énergie entraînée par la masse du système de récupération.

$m_1 = 1490$ kg ; Coefficient spirale $C_s = 2,0$; $Eu_1 = 44,6$ MJ au cent

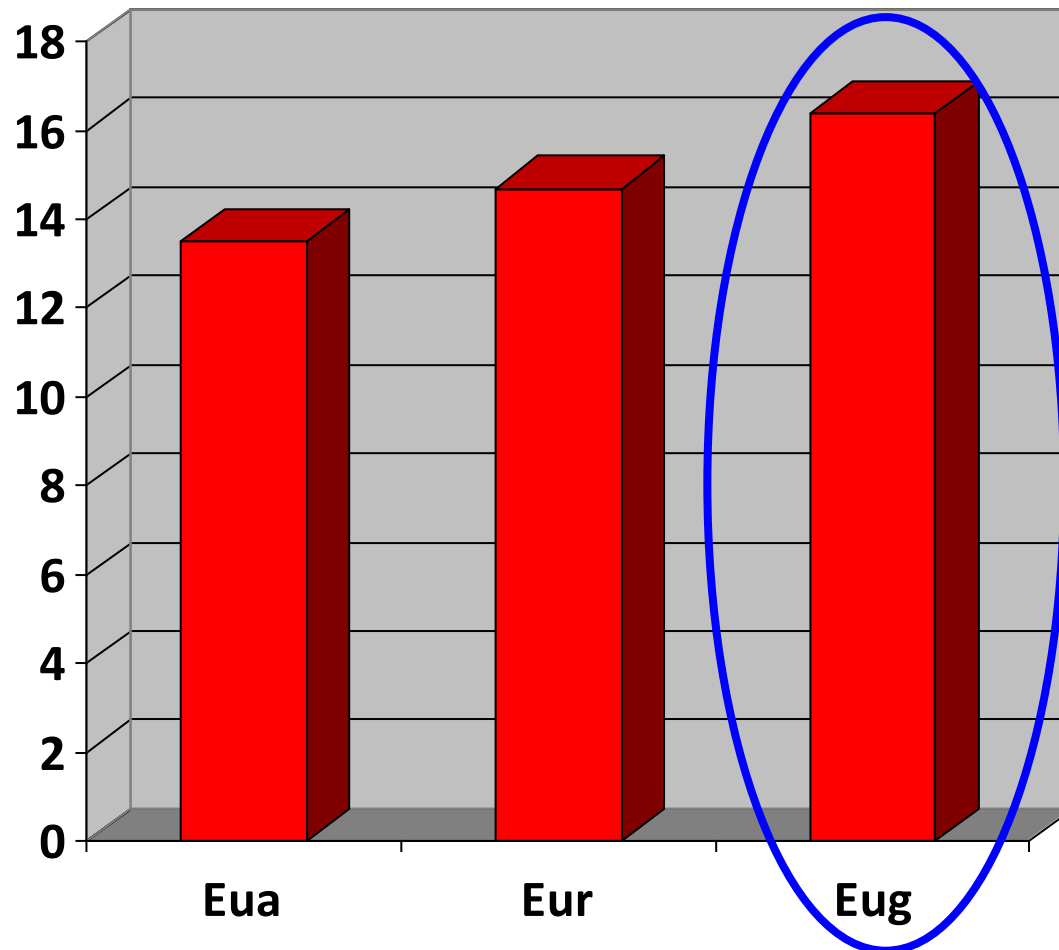
Solutions	C_{ST} NON corrigé	R_R	C_{ST} corrigé (6)	R_{ST}	R_T (5)	m_2 (4)	m_1/m_2	Eu_2 (2)	$\Delta\%$ / Eu_1 (7)
Pneumatique	0,140	0,80	0,112	0,90	0,72	1920	1,29	38,4	-14,0
Volant d'inertie	0,204	0,80	0,163	0,90	0,72	2212	1,48	42,1	-5,5
Batteries	0,029	1,00	0,029	0,50	0,50	1582	1,06	37,8	-15,2
Super condensateurs	0,060	0,90	0,054	0,90	0,81	1670	1,12	33,5	-24,9

Solution pneumatique : R_{ST} est donné sur une courte durée. Lorsque le véhicule s'arrête longtemps, le refroidissement du réservoir se traduit par une perte conséquente d'énergie, donc R_{ST} diminue fortement.

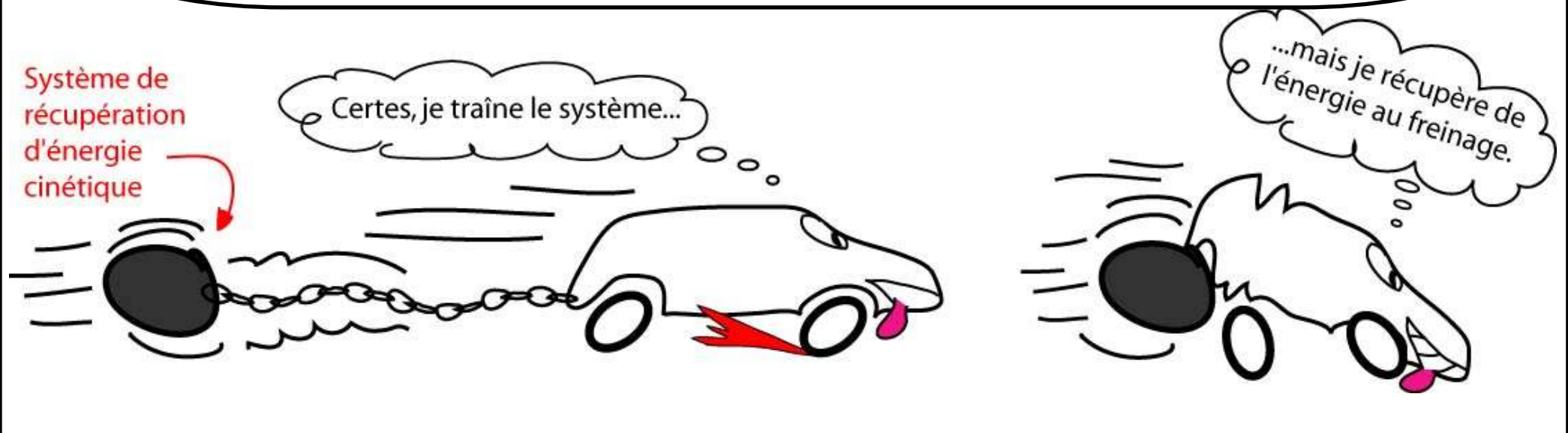
Solution batteries : voir l'explication de $R_R = 1$ et $R_{ST} = 0,5$ dans l'annexe.

Solution volant d'inertie : R_{ST} est donné sur une courte durée. Lorsque le véhicule s'arrête longtemps, le ralentissement du volant d'inertie est inéluctable ce qui dégrade R_{ST} .

Rappelons que sur cycle mixte NEDC, l'énergie cinétique représente 37% de la dépense d'énergie de notre véhicule référence.




En conclusion, sur cycle mixte et suivant la technologie retenue, nous pouvons espérer récupérer de 5 à 25% de l'Eu au véhicule référence (véhicule 1). Nous sommes donc loin des 37% représentés par l'Ec. Ces valeurs s'expliquent par le rendement et par le coût énergétique du transport des systèmes de récupération.



Donc nous ne récupérons qu'une fraction de l'énergie cinétique du véhicule référence sur cycle mixte. Et en usage route, cette économie tend vers zéro voire devient négative :



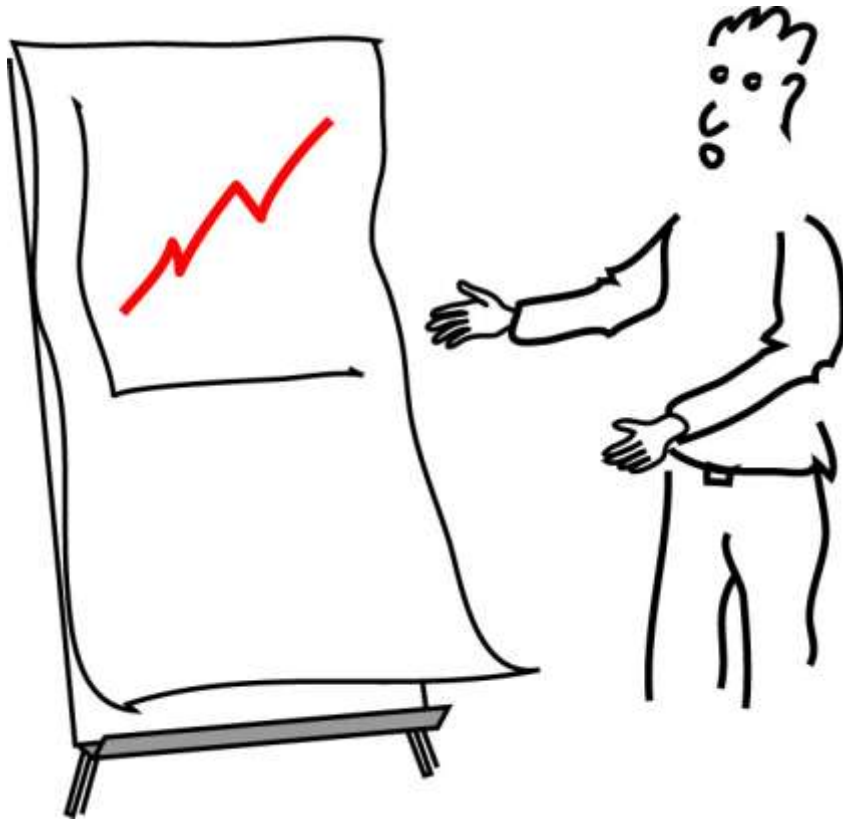


C'est-à-dire que récupérer l'énergie cinétique des véhicules, pourquoi pas en usage ville...

...mais alléger les véhicules au préalable, c'est nettement mieux !

FIN

Annexe



A propos des pages suivantes, si le lecteur dispose d'autres données, il ne manquera pas de déterminer les rendements avec ses propres données... Il lui faudra alors simplement refaire ces quelques calculs.

Les données pages suivantes sont issues pour une bonne part du document

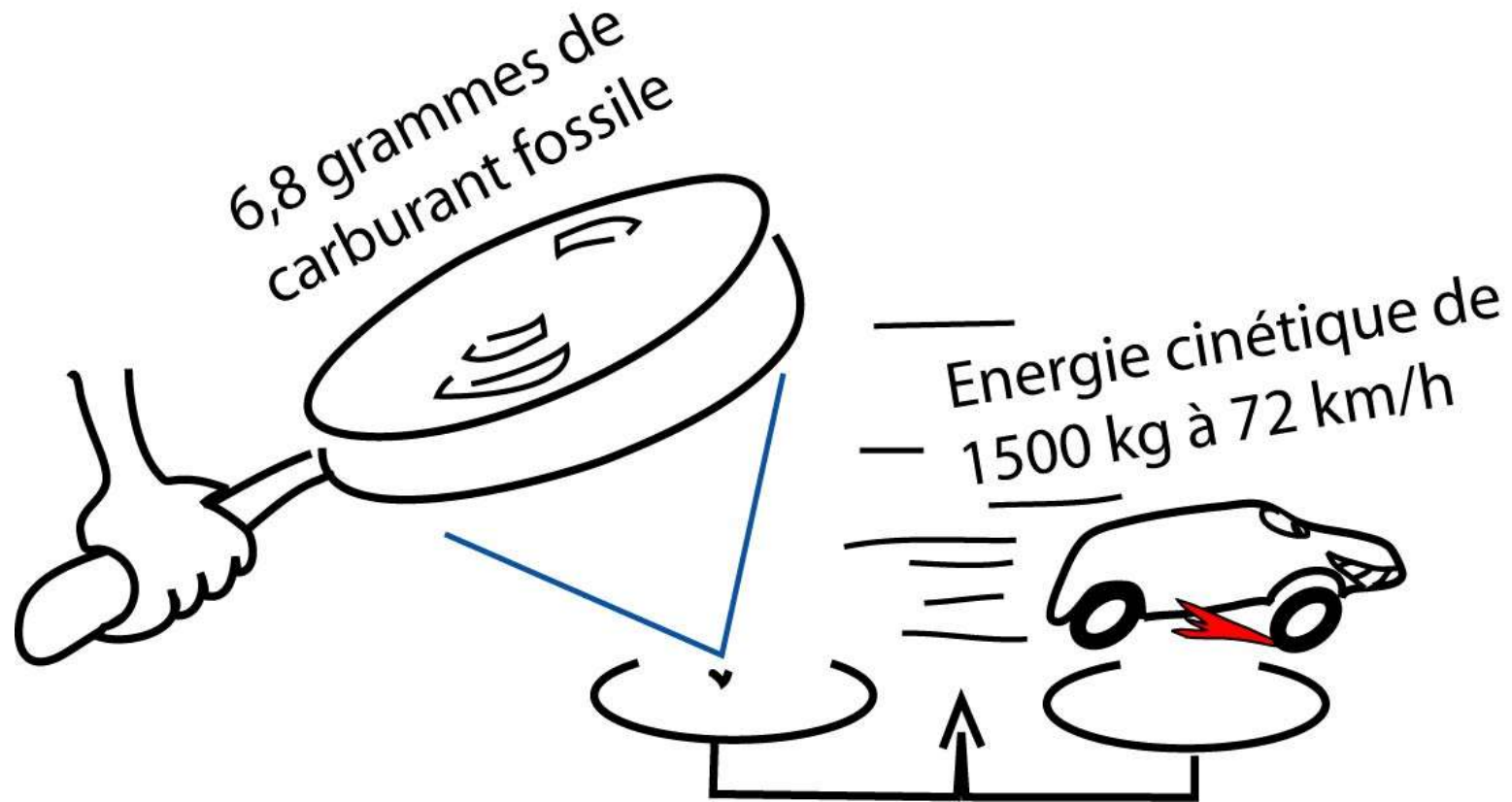
http://sycomoreen.free.fr/syco_francais/Docs/stockage_dim%B0.pdf

Les données de ce rapport sont établies pour un véhicule de 1000 kg lancé à 72 km/h (20 m/s). Ceci nous permet de déterminer C_{ST} NON corrigé par kg en vue de déterminer la masse réelle du système de stockage en fonction de la masse totale du véhicule (largement supérieure à 1000 kg).

L'énergie cinétique correspondante est de :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 20^2 = 0,2 \text{ MJ} \dots$$

...soit 6,8* grammes de carburant fossile pour un véhicule de 1500 kg !



*1500 kg à 20m/s (72km/h) $\Rightarrow E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1500 \cdot 20^2 = 0,30$ MJ. A raison de 44 MJ par kg d'essence, 0,30 MJ = 6,8 grammes d'essence. Toutefois, l'énergie nécessaire pour accélérer à cette vitesse doit tenir compte du rendement du véhicule lors de l'accélération ainsi que de la durée de l'accélération. La valeur obtenue dans ces conditions est sensiblement supérieure à 6,8 grammes.

Récupération de l'énergie cinétique par de l'air comprimé :

Postes	<u>Hypothèses masses</u>
400 litres à 50 bars	24 kg
Réservoir	80 kg
Compresseur. La compression est réalisée par un ou plusieurs cylindres, du moteur thermique, qui servent indifféremment à générer de la puissance ou à comprimer de l'air	20 kg
Divers	16 kg
Masse totale pour accélérer 1000 kg à 20m/s	140 kg
Masse pour accélérer 1 kg à 20m/s = $C_{ST\ NON\ corrigé}$	0,140
Rendement de récupération R_R	0,80
Masse pour accélérer 1 kg . R_R à 20m/s =	0,112
$C_{ST\ corrigé} = C_{ST\ NON\ corrigé} \cdot R_R$	

Récupération de l'énergie cinétique par un volant d'inertie :

Postes	<u>Hypothèses masses</u>
Volant : rayon 0,25 m, h = 0,1 m, $\omega = 293$ rd/s (2800 tr/mn) ; $J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2$; $E_c = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$	204 kg
Divers mécanique	50 kg
Masse totale pour accélérer 1000 kg à 20m/s	204 kg
Masse pour accélérer 1 kg à 20m/s = $C_{ST \text{ NON corrigé}}$	0,204
Rendement de récupération R_R	0,80
Masse pour accélérer 1 kg . R_R à 20m/s = $C_{ST \text{ corrigé}} = C_{ST \text{ NON corrigé}} \cdot R_R$	0,163

Récupération de l'énergie cinétique par des batteries :

0,2 MJ en 5'' \Leftrightarrow 40 kW \Rightarrow $I = P/U = 3333A$ en 12V ; 100A en 400V.
Ceci explique la difficulté de récupérer de l'énergie lors de freinages, cette récupération étant par contre possible lors des ralentissements. La quantité d'énergie récupérée par la Prius (cf. étude de l'INRETS) lors des ralentissements correspond à environ 50% de l'énergie cinétique.

Masse de la batterie nécessaire pour stocker 0,2MJ : à raison d'une capacité de stockage de 150 Wh/kg de batterie, nous obtenons $150 \cdot 3600 = 0,54$ MJ/kg. Par conséquent la masse des batteries est totalement négligeable.

Reste la masse du système de récupération. Nous pouvons l'estimer comme suit : Δ masse hybridation Prius – masse des batteries de la Prius = +70 kg - 30 kg = 40 kg. Prenons cette valeur pour déterminer $C_{ST\ NON\ corrigé}$:

$C_{ST\ NON\ corrigé} = 40\ kg / 1360\ kg = 0,029$. Mais comme nous sommes partis de valeurs réelles (ce qui est effectivement récupéré par la Prius), R_R est déjà compris dans cette valeur. Nous pouvons alors écrire $C_{ST\ NON\ corrigé} = C_{ST\ corrigé} \Rightarrow R_R = 1$. Toutefois, nous savons que la Prius ne récupère que 50% de l'énergie cinétique (cf. étude INRETS), nous devons alors afficher un rendement C_{ST} de 50%.

Récupération de l'énergie cinétique par des « super condensateurs » :

Postes	<u>Hypothèses masses</u>
34 kg permettent d'assurer 40 kW pendant $\approx 5''$, soit 0,2 MJ	34 kg
Divers	26 kg
Masse totale pour accélérer 1000 kg à 20m/s	60 kg
Masse pour accélérer 1 kg à 20m/s = $C_{ST\ NON\ corrigé}$	0,060
Rendement de récupération R_R	0,90
Masse pour accélérer 1 kg . R_R à 20m/s = $C_{ST\ corrigé} = C_{ST\ NON\ corrigé} \cdot R_R$	0,054