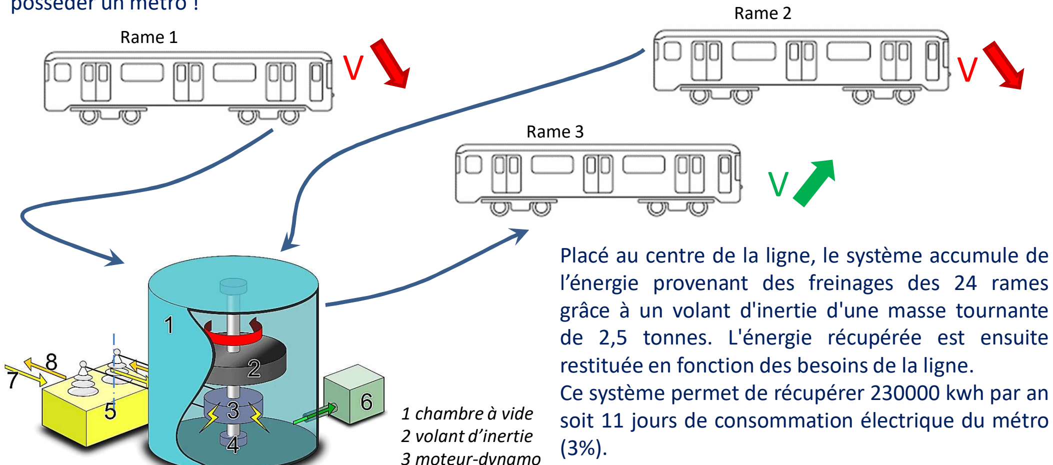
Dossier 5 – Energétique

Ce document est une synthèse du cours présenté

Le métro de Rennes (2011)

Un système à stockage inertiel (SSI) a été mis en place pour limiter les pertes liées au freinage des rames.
Une partie de cette énergie est transformée en électricité dans la rame même et stockée, via le réseau, dans un volant d'inertie central déporté en gare. Elle peut ensuite être restituée aux rames qui accélèrent.
Système unique en France en 2011 et très rare en Europe dans une ville qui fût longtemps la plus petite du monde à posséder un métro !



1 chambre à vide
2 volant d'inertie
3 moteur-dynamo
4 palier
5 transformateur
6 pompe à vide
7 réseau entrant
8 réseau sortant

Placé au centre de la ligne, le système accumule de l'énergie provenant des freinages des 24 rames grâce à un volant d'inertie d'une masse tournante de 2,5 tonnes. L'énergie récupérée est ensuite restituée en fonction des besoins de la ligne.
Ce système permet de récupérer 230000 kwh par an soit 11 jours de consommation électrique du métro (3%).

Volant d'inertie en carbone (Beacon Power USA)

Volant d'inertie en béton (Energiestro Belfort)

Le stockage de l'électricité est un enjeu stratégique de la transition énergétique.
Les volants d'inertie font aujourd'hui l'objet de nouveaux développements dans le but d'assurer le lissage de la production des énergies renouvelables (onduleurs, installation photovoltaïques…).
Différentes solutions ont été mises au point pour minimiser les pertes d'énergie pendant la phase stationnaire : l'utilisation de roulements à bille haute performance, l'enfermement du rotor dans une enceinte sous vide, la suspension magnétique de l'axe, etc…
Pour le volant, des matériaux nouveaux sont aussi mis en œuvre. Auparavant réalisés en fonte ou en acier, ils sont maintenant constitués de fibres de verre ou de carbone, de kevlar, ou bien même de béton !

Energie théorique récupérable lors de 3 freinage de rame

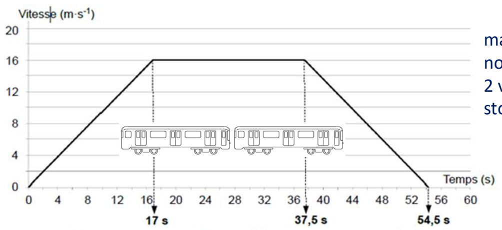
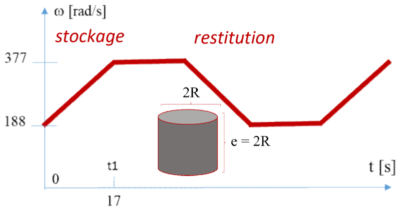


Figure 4 : loi de vitesse en mode « non dégradé » d'une rame en fonction du temps ($V=f(t)$)

masse d'une voiture, *mV*=14000 kg
nombre maxi. de passagers par voiture, 75, soit une masse *mP*=7500 kg
2 voitures par rame
stockage prévu pour 3 freinages

$$Ec = 3*2.\frac{1}{2}[mv + mp].[Vo^2 - Vf^2]$$
$$Ec = 33 \text{ MJ}$$

Détermination du volant d'inertie



TEC : P = dEc/dt → P.dt = dEc
On intègre entre les instants t1 et t2 en supposant que P est constante :
$\underbrace{P*[t2 - t1]}_{\text{Energie stockée}} = Ec(t2) - Ec(t1) = ½*J*(\omega2^2 - \omega1^2)$

AN : J = 2*33.10E6/(377²-188²)
J = 310 kg.m²

J cylindre = m.R²/2 = $\underbrace{\rho.e.\,\pi.R^2}_{\text{Volume}}.R^2/2 = \rho.\,\pi.R^5$ soit $R = \sqrt[5]{J/(\rho*Pi)}$

Quel matériau à la meilleure densité d'énergie [Wh/kg] ?

Densité énergétique = Energie stockée/masse [J/kg]

D = Ec/ (ρ.e.π.R²) = Ec/ (ρ.2.π.R^3)

- Dacier = 33.10E6/(7800*2*π* $0,42^3$) = 9,1 kJ/kg
- Dkevlar = 33.10E6 /(1800*2*π* $0,56^3$) = 16,6 kJ/kg
- Dbéton = 33.10E6 /(2500*2*π* $0,52^3$) = 14,9 kJ/kg

Uranium (fission) = 79 000 000 MJ/kg - Hydrogène = 123 MJ/kg - Essence = 47MJ/kg - Batterie lithium = 1,8 MJ/kg

Cependant un violant d'inertie possède un excellent rendement (restitution autour de 90%), est insensible aux températures et possède un nombre de cycle quasi infini.

Quel matériau est le moins cher en €/kJ pour 1 kg de matière ?

Prix de revient par kJ stocké pour 1 kg de volant
= prix de 1kg en [€]/densité[kJ/kg]

PDR = €/D

€ acier = 2 €/kg	PDR acier = 2/9,1 = 0,2 €/ kJ/kg
€ kevlar = 25 €/kg	PDR kevlar = 25 /16,6 = 1,5 €/ kJ/kg
€ béton = 0,25€/kg	PDR béton = 0,25/14,9 = 0,016 €/ kJ/kg

Le facteur véritablement limitant lors de la conception d'un volant d'inertie réside dans sa résistance.
En effet on conçoit que le volant doit tourner rapidement pour stocker un maximum d'énergie.
Or les forces d'inertie centrifuges qui opèrent sur les masses en mouvement circulaire deviennent colossales car l'accélération centripète devient très élevée.
Certains matériaux comme le béton ne supportent pas de travailler en extension et un volant en béton mal conçu est certainement voué à la dislocation.
Un procédé utilisé est alors de précontraindre en compression le volant lors de sa fabrication de manière à ce que la contrainte réelle lors de la rotation reste malgré tout négative (compression)…

Energie mécanique

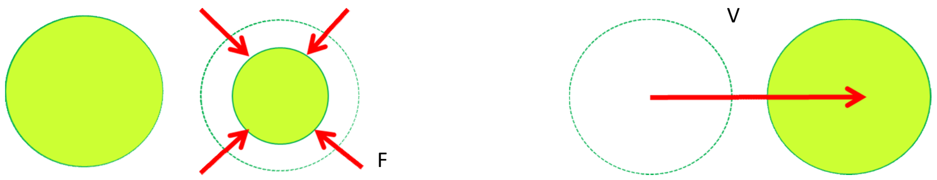
L'énergie mécanique permet à un corps de changer d'état, Elle possède 2 natures.

1/ Modification de la forme d'un corps

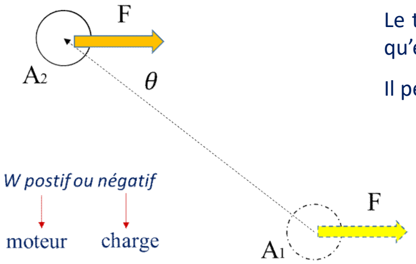
Énergie potentielle Ep

2/ Modification de la vitesse d'un corps

Énergie cinétique Ec



Travail d'une action mécanique



Le travail W d'une force sur un corps correspond à l'énergie qu'elle lui fournit quand son point d'application se déplace.

Il permet les déformations et/ou les mouvements.

W postif ou négatif

moteur charge

$\boxed{W = \vec{F}.\overrightarrow{A1A2}\ [J]}$

De même

$\boxed{W = \vec{C}.\vec{\theta}\ [J]}$

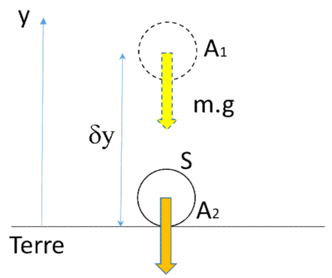
Puissance développée par une action mécanique

La puissance correspond à la quantité d'énergie (ou travail) libérée chaque seconde par les actions extérieures à S dans son mouvement dans un repère Ro

$$\boxed{P(\bar{S}/S,S/R) = \frac{\delta W(\bar{S}/S,S/R)}{\delta t} \quad [W]}$$

[1W → 1J/s]

Déformation du système « Terre + S »



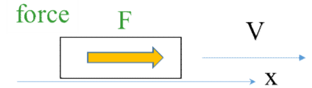
$\delta W = \overrightarrow{m.g}.\overrightarrow{A1A2} = mg * \overrightarrow{-y}.(\delta y)\overrightarrow{-y} = mg * \delta y$

Ep = mg.y +K (constante d'intégration)
Par convention, Ep = 0 si y = 0 → K = 0

$\boxed{Ep = m.g.h\ \ [J]}$

Ep positif ou négatif selon les cas.
Ec toujours positif !

Mouvement en translation de S

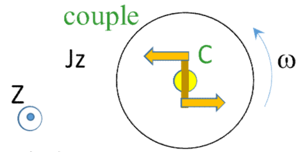


En projection :
PFD: F = m.dv/dt → δW = F. δx = m.dv/dt . v.dt = $\underbrace{m.v.dv}_{\text{Primitive } = v^2/2}$

$Ec = ½\ m.v^2$ +K Ec = 0 si v = 0 → K = 0

$\boxed{Ect = \frac{1}{2}.m.v^2\ \ [J]}$

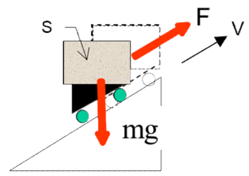
Mouvement en rotation de S



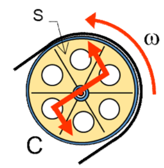
En projection
PFD: C = J.dω/dt → δW = C. δθ = J.dω/dt. ω.dt = J.ω.dω
Primitive = ω ²/2

$Ec = 1/2J\omega^2$ + K Ec = 0 si ω = 0 → K = 0

$\boxed{Ecr = \frac{1}{2}.Jz.\ \ ^2\ \ [J]}$



$\boxed{P(\bar{S}/S,S/R) = \overrightarrow{F(\bar{S}/S)}.\overrightarrow{V(S/R)} \quad [W]}$



$\boxed{P(\bar{S}/S,S/R) = \overrightarrow{C(\bar{S}/S)}.\overrightarrow{\omega(S/R)} \quad [W]}$

Théorème de l'énergie cinétique (TEC)

PFD appliqué à S :

$$\overrightarrow{F\left(\frac{\bar{S}}{S}\right)} = m.\overrightarrow{a\left(\frac{G}{Ro}\right)} = m.\frac{d\overrightarrow{v\left(\frac{G}{Ro}\right)}}{dt}/Ro$$

$$\overrightarrow{M\left(\frac{\bar{S}}{E}\right)} = J.\frac{d\overrightarrow{\omega\left(\frac{S}{Ro}\right)}}{dt}/Ro$$

Multiplication par $\vec{V}$

$$① \quad \underbrace{\overrightarrow{F\left(\frac{\bar{S}}{S}\right)}.\overrightarrow{v\left(\frac{G}{Ro}\right)}}_{\text{Puissance développée par F sur S}} = m.\frac{d\overrightarrow{v\left(\frac{G}{Ro}\right)}}{dt}.\overrightarrow{v\left(\frac{G}{Ro}\right)} = \frac{d}{dt}(1/2*mv^2)$$

Multiplication par $\vec{\omega}$

$$② \quad \underbrace{\overrightarrow{M\left(\frac{\bar{S}}{E}\right)}.\overrightarrow{\omega\left(\frac{S}{Ro}\right)}}_{\text{Puissance développée par M sur S}} = J.\frac{d\overrightarrow{\omega\left(\frac{S}{Ro}\right)}}{dt}.\overrightarrow{\omega\left(\frac{S}{Ro}\right)} = \frac{d}{dt}(1/2*J\omega^2)$$

① + ②

$$\boxed{P(\bar{S}/S, S/Ro) = \frac{d}{dt}Ec(S/Ro)}$$

La variation instantanée d'énergie cinétique d'un système est égale à la somme de toutes les puissances développées.

Le TEC étant issu du PFD
les deux écritures sont équivalentes

<u>Si P telle que P = - dEp/dt</u>

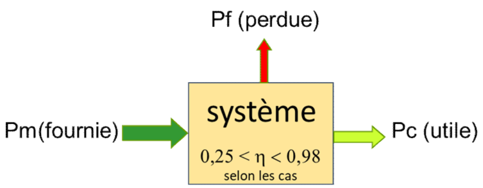
Alors le TEC devient : - dEp/dt = + dEc/dt

<u>Soit Ep + Ec = K</u>

L'énergie mécanique totale est conservée dans ce cas.

Notion de rendement

La puissance ne se conserve pas en présence de frottements.
Une partie de l'énergie est transformée en chaleur qui est échangée avec l'air ambiant.



$$\eta = \frac{Pc}{Pm}$$

Rendement [%]

La puissance Pf dissipée est alors :

$$\eta = \frac{Pc}{Pm} = \frac{Pm-}{Pm}$$

$$\boxed{Pf = Pm.(1-\eta)}$$

Couple des pertes ramené sur axe moteur

$Pf = Cf.\Omega f$ → *Mais c'est quoi Ωf ???*
→ *on exprime Cf soit sur l'arbre moteur (Ωm) soit sur l'arbre charge (Ωc).*

$Pf = Cfr.\Omega m$

r comme ramené, Cf est exprimé ici sur l'arbre moteur

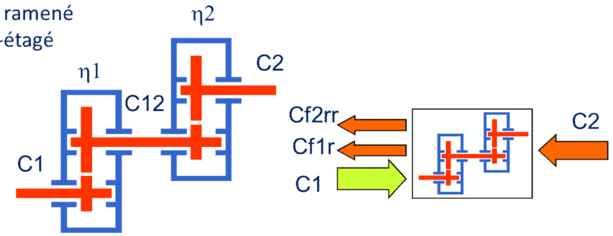
$Pf = Pm.(1-\eta) = Cfr.\Omega m$
$Cm.\ \Omega m\ .(1-\eta) = Cfr.\Omega m$

$\boxed{Cfr = Cm\ .(1-\eta)}$ *Cf ramené sur l'arbre moteur*

Ce couple vient pénaliser le système considéré initialement comme idéal.

Exemple

Couple de frottement ramené
Cas d'un réducteur bi-étagé



$Cf1r = C1.(1-\eta 1)$ sur arbre moteur

$Cf2r = C12.(1-\eta 2)$ sur arbre intermédiaire

Or $C12 = (1/k1)*(C1 - Cf1r)$

$Cf2rr = k1*Cf2r$ sur arbre moteur

Soit $Cf2rr = C1.\eta 1.(1-\eta 2)$