

# Leçon 14 – 10/04/2025

## 4. Énergie

- 4.2 Énergie cinétique et travail
- 4.3 Puissance

## *4.2.5-8 Forces conservatives et énergie : remarques*

---

Remarque :

### 4.2.5-8 Forces conservatives et énergie : remarques

---

- Le travail d'une force conservative  $\mathbf{F}^{\text{cons}}$  (poids, force de gravitation, force élastique, force électrique) s'écrit comme une différence d'énergie potentielle :

$$W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{cons}}) = E_{\text{pot}}(1) - E_{\text{pot}}(2) \quad (4.22)$$

Remarque :

## 4.2.5-8 Forces conservatives et énergie : remarques

---

- Le travail d'une force conservative  $\mathbf{F}^{\text{cons}}$  (poids, force de gravitation, force élastique, force électrique) s'écrit comme une différence d'énergie potentielle :

$$W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{cons}}) = E_{\text{pot}}(1) - E_{\text{pot}}(2) \quad (4.22)$$

- Si toutes les forces sont conservatives, le théorème de l'énergie cinétique devient :

$$E_{\text{cin}}(2) - E_{\text{cin}}(1) = W_{1 \rightarrow 2} = E_{\text{pot}}(1) - E_{\text{pot}}(2)$$

ou encore

$$E_{\text{cin}}(1) + E_{\text{pot}}(1) = E_{\text{cin}}(2) + E_{\text{pot}}(2) \quad (4.23)$$

Remarque :

## 4.2.5-8 Forces conservatives et énergie : remarques

---

- Le travail d'une force conservative  $\mathbf{F}^{\text{cons}}$  (poids, force de gravitation, force élastique, force électrique) s'écrit comme une différence d'énergie potentielle :

$$W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{cons}}) = E_{\text{pot}}(1) - E_{\text{pot}}(2) \quad (4.22)$$

- Si toutes les forces sont conservatives, le théorème de l'énergie cinétique devient :

$$E_{\text{cin}}(2) - E_{\text{cin}}(1) = W_{1 \rightarrow 2} = E_{\text{pot}}(1) - E_{\text{pot}}(2)$$

ou encore

$$E_{\text{cin}}(1) + E_{\text{pot}}(1) = E_{\text{cin}}(2) + E_{\text{pot}}(2) \quad (4.23)$$

### Remarque :

Si les forces sont conservatives, la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle est une constante.

## ***4.2.9 Énergie mécanique***

---

## 4.2.9 Énergie mécanique

---

- L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle :

$$E_{\text{méc}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} \quad (4.24)$$

## 4.2.9 Énergie mécanique

---

- L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle :

$$E_{\text{méc}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} \quad (4.24)$$

- Une force est conservative si elle conserve l'énergie mécanique, et elle est dissipative dans le cas contraire.



## 4.2.9 Énergie mécanique

---

- L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle :

$$E_{\text{méc}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} \quad (4.24)$$

- Une force est conservative si elle conserve l'énergie mécanique, et elle est dissipative dans le cas contraire.

- Si ttes les forces sont conservatives, l'énergie mécan. est conservée,  $E_{\text{méc}} = \text{cste}$ .

## 4.2.9 Énergie mécanique

---

- L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle :

$$E_{\text{méc}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} \quad (4.24)$$

- Une force est conservative si elle conserve l'énergie mécanique, et elle est dissipative dans le cas contraire.

- Si ttes les forces sont conservatives, l'énergie mécan. est conservée,  $E_{\text{méc}} = \text{cste}$ .

- Équivalences

1.  $\mathbf{F}$  est conservative.
2.  $W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F})$  ne dépend que des positions initiale  $\mathbf{r}_1$  et finale  $\mathbf{r}_2$ .
3.  $W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}) = E_{\text{pot}}(\mathbf{r}_1) - E_{\text{pot}}(\mathbf{r}_2)$ .
4. Le travail de  $\mathbf{F}$  sur un chemin fermé, i.e.,  $\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1$ , est nul.

## 4.2.9 Énergie mécanique

---

Expérience :



## 4.2.9 Énergie mécanique

---

Expérience : Yo-yo



## 4.2.9 Énergie mécanique

---

Expérience : Yo-yo



- En négligeant les frottements, l'énergie mécanique du yo-yo est conservée.
- Lorsque le yo-yo se trouve à la hauteur maximale, l'énergie potentielle de gravitation est maximale et l'énergie cinétique est minimale.
- Lorsqu'il se trouve à la hauteur minimale, c'est le contraire!

### ***4.2.10 Vitesse de libération***

---

### ***4.2.10 Vitesse de libération***

---

La vitesse de libération est la vitesse minimale qu'il faut donner à un objet pour qu'il s'échappe définitivement du champ d'attraction de la terre et s'en éloigne indéfiniment.

## 4.2.10 Vitesse de libération

---

La vitesse de libération est la vitesse minimale qu'il faut donner à un objet pour qu'il s'échappe définitivement du champ d'attraction de la terre et s'en éloigne indéfiniment.

- L'énergie mécanique de l'objet est constante car la force de gravitation est conservative :

$$E_{\text{méc}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \text{cste} \quad (4.25)$$



## 4.2.10 Vitesse de libération

---

La vitesse de libération est la vitesse minimale qu'il faut donner à un objet pour qu'il s'échappe définitivement du champ d'attraction de la terre et s'en éloigne indéfiniment.

- L'énergie mécanique de l'objet est constante car la force de gravitation est conservative :

$$E_{\text{méc}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \text{cste} \quad (4.25)$$

- À l'infini, i.e.,  $r \rightarrow \infty$  et  $v \rightarrow 0$ . Ainsi,

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = 0 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (4.26)$$

## 4.2.10 Vitesse de libération

---

La vitesse de libération est la vitesse minimale qu'il faut donner à un objet pour qu'il s'échappe définitivement du champ d'attraction de la terre et s'en éloigne indéfiniment.

- L'énergie mécanique de l'objet est constante car la force de gravitation est conservative :

$$E_{\text{méc}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \text{cste} \quad (4.25)$$

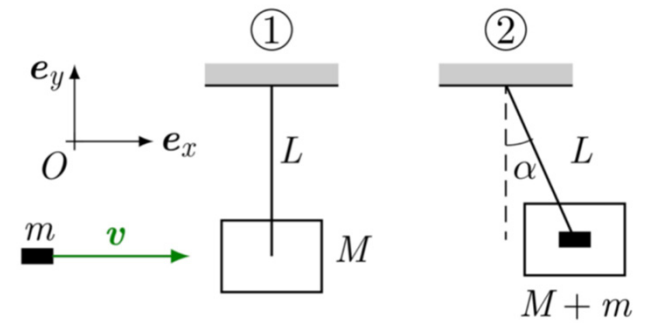
- À l'infini, i.e.,  $r \rightarrow \infty$  et  $v \rightarrow 0$ . Ainsi,

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = 0 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (4.26)$$

- Terre :  $r = 6371 \text{ km}$ ,  $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$   
 $v = 1,12 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} = 40,32 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

## 4.2.11 Tir d'une balle de fusil

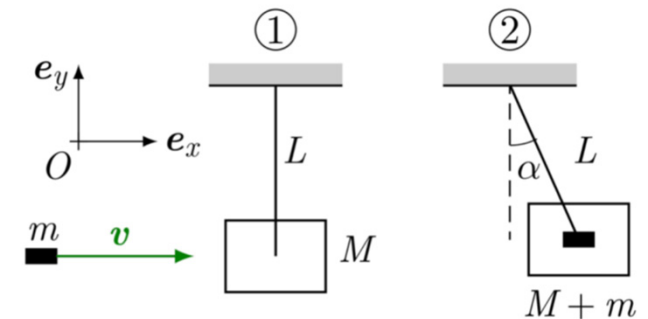
---



### 4.2.11 Tir d'une balle de fusil

---

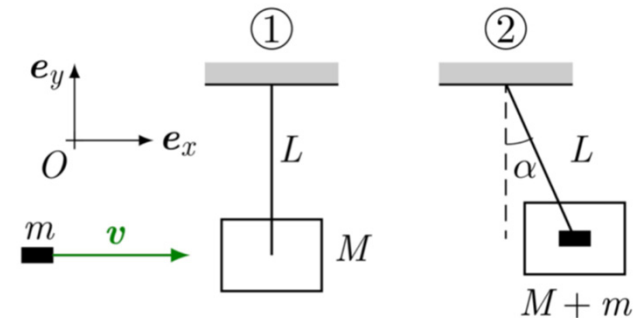
Une balle de fusil de masse  $m$  est tirée horizontalement dans un bloc de bois de masse  $M$  suspendu à un fil. La balle se loge dans le bloc et le fil s'incline d'un angle  $\alpha$ . On cherche à déterminer la vitesse initiale de la balle (connaissant  $L$  et  $\alpha$ ).



### 4.2.11 Tir d'une balle de fusil

Une balle de fusil de masse  $m$  est tirée horizontalement dans un bloc de bois de masse  $M$  suspendu à un fil. La balle se loge dans le bloc et le fil s'incline d'un angle  $\alpha$ . On cherche à déterminer la vitesse initiale de la balle (connaissant  $L$  et  $\alpha$ ).

- Il y a conservation de la quantité de mouvement de l'objet (balle + bloc) lors du choc. Selon  $\mathbf{e}_x$  :  $mv = (M + m)V$  (4.27)



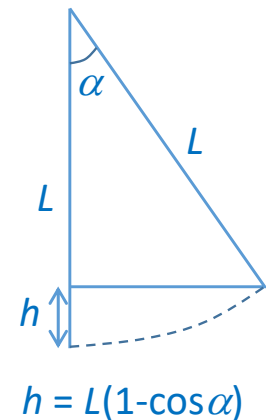
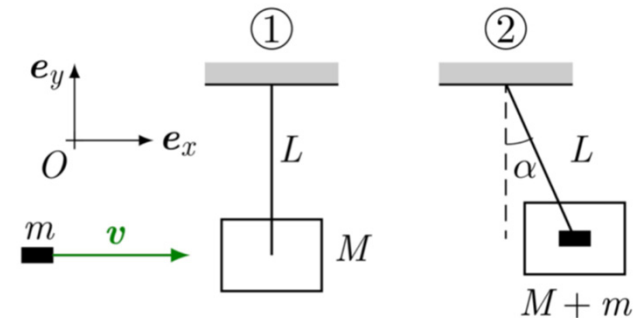
## 4.2.11 Tir d'une balle de fusil

Une balle de fusil de masse  $m$  est tirée horizontalement dans un bloc de bois de masse  $M$  suspendu à un fil. La balle se loge dans le bloc et le fil s'incline d'un angle  $\alpha$ . On cherche à déterminer la vitesse initiale de la balle (connaissant  $L$  et  $\alpha$ ).

- Il y a conservation de la quantité de mouvement de l'objet (balle + bloc) lors du choc. Selon  $\mathbf{e}_x$  :  $mv = (M + m)V$  (4.27)

- La tension dans le fil  $\mathbf{T}$  ne travaille pas. Ainsi, il y a conservation de l'énergie mécanique après le choc.

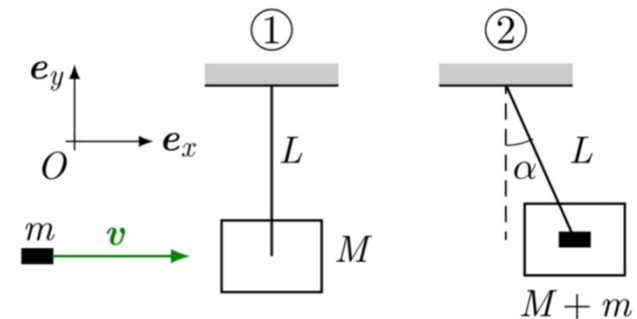
$$\frac{1}{2}(M + m)V^2 = (M + m)gL(1 - \cos\alpha) \quad (4.28)$$



## 4.2.11 Tir d'une balle de fusil

Une balle de fusil de masse  $m$  est tirée horizontalement dans un bloc de bois de masse  $M$  suspendu à un fil. La balle se loge dans le bloc et le fil s'incline d'un angle  $\alpha$ . On cherche à déterminer la vitesse initiale de la balle (connaissant  $L$  et  $\alpha$ ).

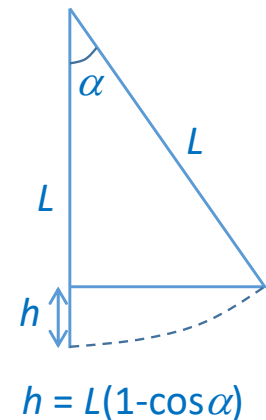
- Il y a conservation de la quantité de mouvement de l'objet (balle + bloc) lors du choc. Selon  $\mathbf{e}_x$  :  $mv = (M + m)V$  (4.27)



- La tension dans le fil  $\mathbf{T}$  ne travaille pas. Ainsi, il y a conservation de l'énergie mécanique après le choc.

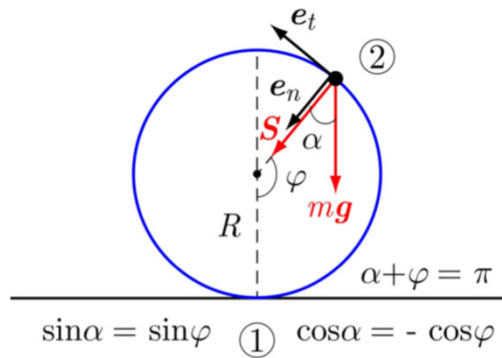
$$\frac{1}{2}(M + m)V^2 = (M + m)gL(1 - \cos \alpha) \quad (4.28)$$

- Ainsi, (4.27) et (4.28)  $\Rightarrow v = \frac{M + m}{m}V = \frac{M + m}{m}\sqrt{2gL(1 - \cos \alpha)}$  (4.29)



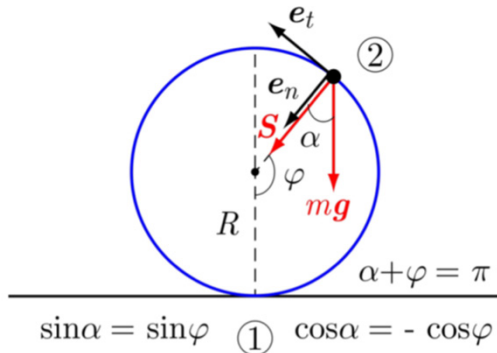
## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical

---





## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical

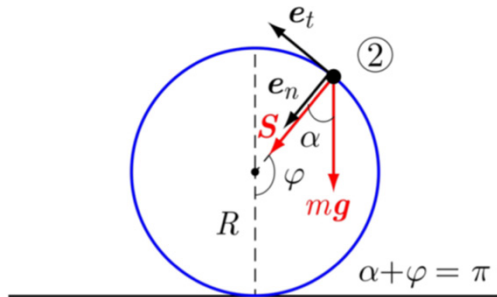


- Objet : masse  $m$
- Forces : poids  $m\mathbf{g}$ , soutien  $\mathbf{S}$
- Newton :  $m\mathbf{g} + \mathbf{S} = m\mathbf{a}$

Selon  $\mathbf{e}_n$  :  $-mg\cos\varphi + S = ma_n = m\frac{v^2}{R}$  (4.30)

Selon  $\mathbf{e}_t$  :  $-mg\sin\varphi = ma_t$

## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical



$$\sin \alpha = \sin \varphi \quad (1) \quad \cos \alpha = -\cos \varphi$$

Théorème de l'énergie cinétique :

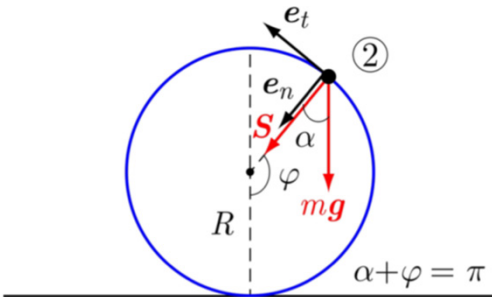
$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -mg(h_2 - h_1) = -mgR(1 - \cos \varphi) \quad (4.31)$$

- Objet : masse  $m$
- Forces : poids  $mg$ , soutien  $S$
- Newton :  $mg + S = ma$

Selon  $\mathbf{e}_n$  :  $-mg \cos \varphi + S = ma_n = m \frac{v^2}{R} \quad (4.30)$

Selon  $\mathbf{e}_t$  :  $-mg \sin \varphi = ma_t$

## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical



$$\sin \alpha = \sin \varphi \quad (1) \quad \cos \alpha = -\cos \varphi$$

Théorème de l'énergie cinétique :

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -mg(h_2 - h_1) = -mgR(1 - \cos \varphi) \quad (4.31)$$

- Au point de décrochement  $D$  (où  $\pi/2 \leq \varphi_D \leq \pi$ ) :

- Objet : masse  $m$
- Forces : poids  $mg$ , soutien  $S$
- Newton :  $mg + S = ma$

Selon  $\mathbf{e}_n$  :

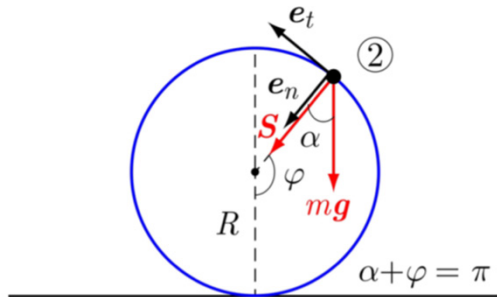
$$-mg \cos \varphi + S = ma_n = m \frac{v^2}{R} \quad (4.30)$$

Selon  $\mathbf{e}_t$  :

$$-mg \sin \varphi = ma_t$$

$$S = 0 \quad (4.32)$$

## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical



- Objet : masse  $m$
- Forces : poids  $mg$ , soutien  $S$
- Newton :  $mg + S = ma$

$$\sin \alpha = \sin \varphi \quad (1) \quad \cos \alpha = -\cos \varphi$$

Théorème de l'énergie cinétique :

Selon  $\mathbf{e}_n$  : 
$$-mg \cos \varphi + S = ma_n = m \frac{v^2}{R} \quad (4.30)$$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -mg(h_2 - h_1) = -mgR(1 - \cos \varphi) \quad (4.31)$$

Selon  $\mathbf{e}_t$  : 
$$-mg \sin \varphi = ma_t$$

- Au point de décrochement  $D$  (où  $\pi/2 \leq \varphi_D \leq \pi$ ) :

$$S = 0 \quad (4.32)$$

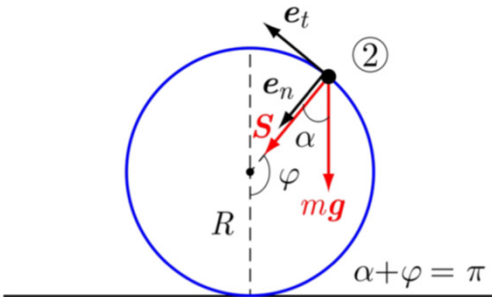
$$(4.30) : mv_D^2 = -mgR \cos \varphi_D \quad \text{où } v_D = v = v_2 \text{ et } \varphi_D = \varphi$$

$$(4.31) : mv_D^2 - mv_1^2 = -2mgR(1 - \cos \varphi_D)$$

$$\Rightarrow mv_1^2 = -3mgR \cos \varphi_D + 2mgR \Rightarrow$$

$$\cos \varphi_D = \frac{2gR - v_1^2}{3gR} \quad (4.33)$$

## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical



$$\sin \alpha = \sin \varphi \quad (1) \quad \cos \alpha = -\cos \varphi$$

Théorème de l'énergie cinétique :

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -mg(h_2 - h_1) = -mgR(1 - \cos \varphi) \quad (4.31)$$

- Au point de décrochement  $D$  (où  $\pi/2 \leq \varphi_D \leq \pi$ ) :

$$(4.30) : mv_D^2 = -mgR \cos \varphi_D \quad \text{où } v_D = v = v_2 \text{ et } \varphi_D = \varphi$$

$$(4.31) : mv_D^2 - mv_1^2 = -2mgR(1 - \cos \varphi_D)$$

$$\Rightarrow mv_1^2 = -3mgR \cos \varphi_D + 2mgR \Rightarrow$$

$$\cos \varphi_D = \frac{2gR - v_1^2}{3gR} \quad (4.33)$$

- Condition (vitesse initiale  $v_1$ ) :  $\pi/2 \leq \varphi_D \leq \pi \Rightarrow -1 \leq \cos \varphi_D \leq 0$

$$\Rightarrow 2gR \leq v_1^2 \leq 5gR \quad (4.34)$$

- Objet : masse  $m$
- Forces : poids  $mg$ , soutien  $S$
- Newton :  $mg + S = ma$

Selon  $\mathbf{e}_n$  :

$$-mg \cos \varphi + S = ma_n = m \frac{v^2}{R} \quad (4.30)$$

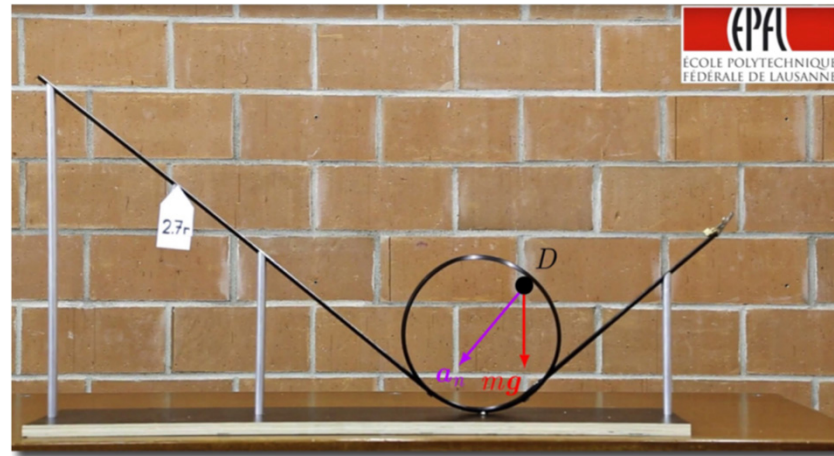
Selon  $\mathbf{e}_t$  :

$$-mg \sin \varphi = ma_t$$

$$S = 0 \quad (4.32)$$

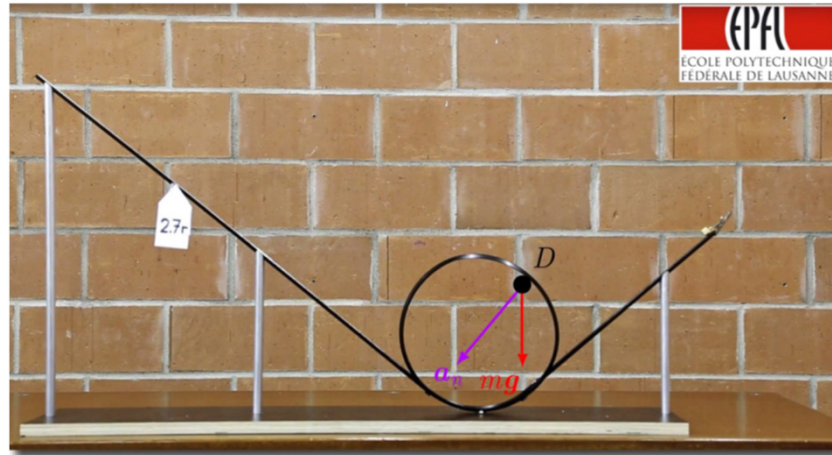
## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical

Expérience :



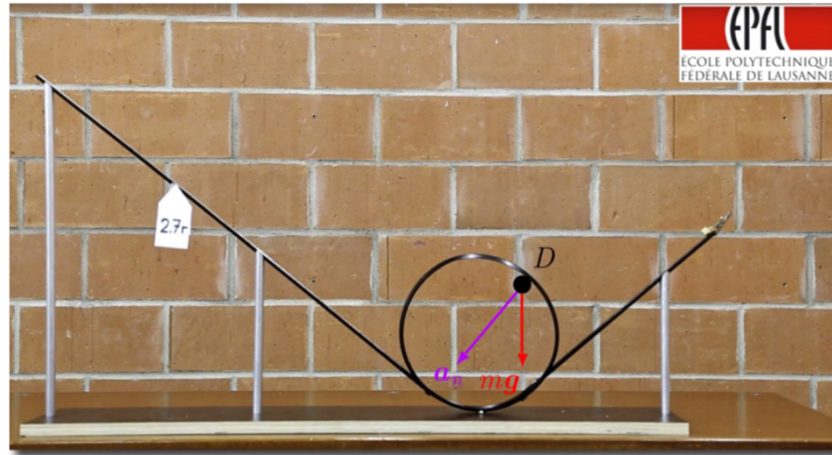
## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical

Expérience : Décrochement d'une bille sur un looping



## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical

Expérience : Décrochement d'une bille sur un looping

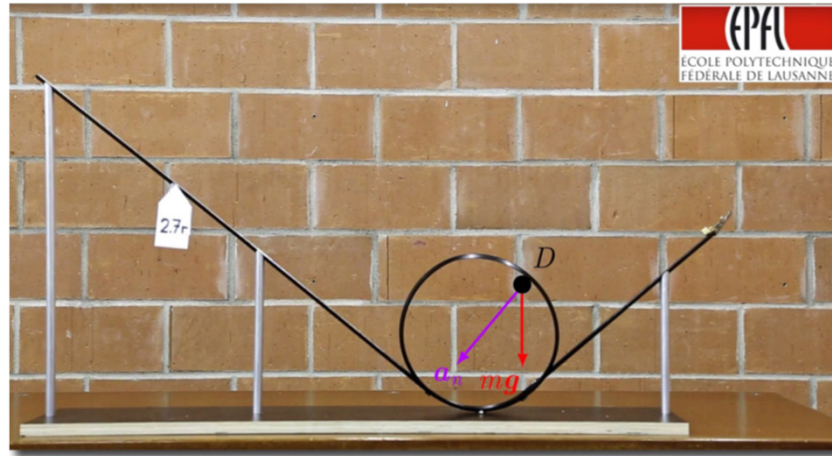


- Au point de décrochement  $D$  de la bille sur la glissière, la force de soutien de la glissière s'annule :  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$



## 4.2.12 Décrochement d'un rail circulaire vertical

Expérience : Décrochement d'une bille sur un looping



- Au point de décrochement  $D$  de la bille sur la glissière, la force de soutien de la glissière s'annule :  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$
- Pour que le point de décrochement  $D$  se trouve sur le demi-cercle supérieur de la glissière, la vitesse initiale  $v_i$  doit être comprise entre  $\sqrt{2gR} < v_i < \sqrt{5gR}$  où  $R$  est le rayon de courbure de la glissière.

### ***4.2.13 Théorème de l'énergie mécanique***

---

### 4.2.13 Théorème de l'énergie mécanique

---

- Soit une force extérieure résultante:  $\mathbf{F}^{\text{ext}} = \mathbf{F}^{\text{cons}} + \mathbf{F}^{\text{dis}}$  où  $\mathbf{F}^{\text{cons}}$  est une force conservative et  $\mathbf{F}^{\text{dis}}$  une force dissipative.

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{cin}} &= E_{\text{cin}}(2) - E_{\text{cin}}(1) = \int_1^2 \delta W^{\text{ext}} = \int_1^2 \mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{CM}} \\ &= \int_1^2 \mathbf{F}^{\text{cons}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{CM}} + \int_1^2 \mathbf{F}^{\text{dis}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{CM}} \\ &= W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{cons}}) + W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{dis}}) \\ &= -\Delta E_{\text{pot}} + W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{dis}})\end{aligned}$$

### 4.2.13 Théorème de l'énergie mécanique

---

- Soit une force extérieure résultante:  $\mathbf{F}^{\text{ext}} = \mathbf{F}^{\text{cons}} + \mathbf{F}^{\text{dis}}$  où  $\mathbf{F}^{\text{cons}}$  est une force conservative et  $\mathbf{F}^{\text{dis}}$  une force dissipative.

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{cin}} &= E_{\text{cin}}(2) - E_{\text{cin}}(1) = \int_1^2 \delta W^{\text{ext}} = \int_1^2 \mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{CM}} \\ &= \int_1^2 \mathbf{F}^{\text{cons}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{CM}} + \int_1^2 \mathbf{F}^{\text{dis}} \cdot d\mathbf{r}_{\text{CM}} \\ &= W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{cons}}) + W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{dis}}) \\ &= -\Delta E_{\text{pot}} + W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{dis}})\end{aligned}$$

Ainsi,

$$\Delta E_{\text{méc}} = \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}} = W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{dis}})$$

$$\Delta E_{\text{méc}} = W_{1 \rightarrow 2}(\mathbf{F}^{\text{dis}})$$

---

# Quelques points essentiels concernant la dynamique

## *3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points*

---

### ***3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points***

---

- Une force de soutien est toujours orthogonale au support de l'objet considéré  $\forall t$ .

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- Une force de soutien est toujours orthogonale au support de l'objet considéré  $\forall t$ .
- La norme  $T$  de la tension d'un fil inextensible reste la même quelle que soit la portion considérée du fil (vrai en l'absence de rotation, cf. cours 6 à venir) mais celle-ci peut être une fonction du temps.



### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- Une force de soutien est toujours orthogonale au support de l'objet considéré  $\forall t$ .
- La norme  $T$  de la tension d'un fil inextensible reste la même quelle que soit la portion considérée du fil (vrai en l'absence de rotation, cf. cours 6 à venir) mais celle-ci peut être une fonction du temps.
- Si un système est composé de plusieurs objets, il existe une relation linéaire entre les équations du mouvement (i.e., les 2<sup>èmes</sup> lois de Newton) établies pour chaque objet pris individuellement. Leur somme sera égale à l'équation du mouvement obtenue pour le système complet et les forces internes à ce système complet s'annuleront une à une en vertu de la loi d'action-réaction.

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- Une force de soutien est toujours orthogonale au support de l'objet considéré  $\forall t$ .
- La norme  $T$  de la tension d'un fil inextensible reste la même quelle que soit la portion considérée du fil (vrai en l'absence de rotation, cf. cours 6 à venir) mais celle-ci peut être une fonction du temps.
- Si un système est composé de plusieurs objets, il existe une relation linéaire entre les équations du mouvement (i.e., les 2<sup>èmes</sup> lois de Newton) établies pour chaque objet pris individuellement. Leur somme sera égale à l'équation du mouvement obtenue pour le système complet et les forces internes à ce système complet s'annuleront une à une en vertu de la loi d'action-réaction.
- Dans le domaine élastique, l'élongation d'un ressort est proportionnelle à la force appliquée. C'est la loi de Hooke.

## *3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points*

---

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- La somme des forces extérieures agissant sur un objet et sa quantité de mouvement sont reliées par l'expression générale :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m\dot{\mathbf{v}} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \dot{\mathbf{P}} \Rightarrow \mathbf{F} = \dot{\mathbf{P}} \quad (3.11)$$

et

$$\mathbf{F}^{\text{ext}} = \dot{\mathbf{P}} = m\mathbf{a}_{\text{CM}} \text{ si } m = \text{cste} \quad (3.23)$$

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- La somme des forces extérieures agissant sur un objet et sa quantité de mouvement sont reliées par l'expression générale :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m\dot{\mathbf{v}} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \dot{\mathbf{P}} \Rightarrow \mathbf{F} = \dot{\mathbf{P}} \quad (3.11)$$

et

$$\mathbf{F}^{\text{ext}} = \dot{\mathbf{P}} = m\mathbf{a}_{\text{CM}} \text{ si } m = \text{cste} \quad (3.23)$$

- En l'absence de force extérieure résultante, la quantité de mouvement totale est constante. On dit qu'elle est conservée.

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- La somme des forces extérieures agissant sur un objet et sa quantité de mouvement sont reliées par l'expression générale :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m\dot{\mathbf{v}} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \dot{\mathbf{P}} \Rightarrow \mathbf{F} = \dot{\mathbf{P}} \quad (3.11)$$

et

$$\mathbf{F}^{\text{ext}} = \dot{\mathbf{P}} = m\mathbf{a}_{\text{CM}} \text{ si } m = \text{cste} \quad (3.23)$$

- En l'absence de force extérieure résultante, la quantité de mouvement totale est constante. On dit qu'elle est conservée.
- La pression moyenne est définie comme le rapport de la norme de la force normale et de la surface :

$$p_{\text{moy}} = \frac{\|\mathbf{F}_n\|}{S} \quad (3.33)$$

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- La somme des forces extérieures agissant sur un objet et sa quantité de mouvement sont reliées par l'expression générale :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m\dot{\mathbf{v}} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \dot{\mathbf{P}} \Rightarrow \mathbf{F} = \dot{\mathbf{P}} \quad (3.11)$$

et

$$\mathbf{F}^{\text{ext}} = \dot{\mathbf{P}} = m\mathbf{a}_{\text{CM}} \text{ si } m = \text{cste} \quad (3.23)$$

- En l'absence de force extérieure résultante, la quantité de mouvement totale est constante. On dit qu'elle est conservée.
- La pression moyenne est définie comme le rapport de la norme de la force normale et de la surface :

$$p_{\text{moy}} = \frac{\|\mathbf{F}_n\|}{S} \quad (3.33)$$

- La pression locale est définie par la relation :

$$p(\mathbf{r}) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\|\Delta \mathbf{F}_n\|}{\Delta S} = \frac{dF_n}{dS} \quad (3.35)$$

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- La somme des forces extérieures agissant sur un objet et sa quantité de mouvement sont reliées par l'expression générale :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m\dot{\mathbf{v}} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \dot{\mathbf{P}} \Rightarrow \mathbf{F} = \dot{\mathbf{P}} \quad (3.11)$$

et

$$\mathbf{F}^{\text{ext}} = \dot{\mathbf{P}} = m\mathbf{a}_{\text{CM}} \text{ si } m = \text{cste} \quad (3.23)$$

- En l'absence de force extérieure résultante, la quantité de mouvement totale est constante. On dit qu'elle est conservée.
- La pression moyenne est définie comme le rapport de la norme de la force normale et de la surface :

$$p_{\text{moy}} = \frac{\|\mathbf{F}_n\|}{S} \quad (3.33)$$

- La pression locale est définie par la relation :

$$p(\mathbf{r}) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\|\Delta \mathbf{F}_n\|}{\Delta S} = \frac{dF_n}{dS} \quad (3.35)$$

- La pression est un scalaire positif,  $p \geq 0$



## *3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points*

---

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- Loi de Pascal : L'intensité de la force exercée par un fluide sur une surface ne dépend pas de l'orientation de cette surface. Elle ne dépend que de l'étendue de la surface et de sa position  $\mathbf{r}$  dans le fluide. Il suffit donc de connaître la pression (force par unité de surface) du fluide  $p(\mathbf{r})$ . Cette force est orthogonale à la surface.

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- Loi de Pascal : L'intensité de la force exercée par un fluide sur une surface ne dépend pas de l'orientation de cette surface. Elle ne dépend que de l'étendue de la surface et de sa position  $\mathbf{r}$  dans le fluide. Il suffit donc de connaître la pression (force par unité de surface) du fluide  $p(\mathbf{r})$ . Cette force est orthogonale à la surface.
- Loi de l'hydrostatique : Pour un fluide homogène, la différence de pression entre deux niveaux  $h_1$  et  $h_2$  est due au poids du fluide par unité de surface compris entre ces niveaux (avec  $h_2 - h_1 > 0$ ).

$$p(h_1) - p(h_2) = \rho_{\text{fl}} g (h_2 - h_1) \text{ si } \rho_{\text{fl}} = \text{cste} \quad (3.39)$$

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- Loi de Pascal : L'intensité de la force exercée par un fluide sur une surface ne dépend pas de l'orientation de cette surface. Elle ne dépend que de l'étendue de la surface et de sa position  $\mathbf{r}$  dans le fluide. Il suffit donc de connaître la pression (force par unité de surface) du fluide  $p(\mathbf{r})$ . Cette force est orthogonale à la surface.
- Loi de l'hydrostatique : Pour un fluide homogène, la différence de pression entre deux niveaux  $h_1$  et  $h_2$  est due au poids du fluide par unité de surface compris entre ces niveaux (avec  $h_2 - h_1 > 0$ ).

$$p(h_1) - p(h_2) = \rho_{\text{fl}} g (h_2 - h_1) \text{ si } \rho_{\text{fl}} = \text{cste} \quad (3.39)$$

- La pression augmentant avec la profondeur, un corps immergé subit une résultante des forces de pression dirigée vers le haut, appelée poussée d'Archimède  $\mathbf{F}_A$ .

**Poussée d'Archimède**

$$\mathbf{F}_A = -\rho_{\text{fl}} V_{\text{im}} \mathbf{g} \quad (3.40) \quad \text{où } V_{\text{im}} \text{ est le volume immergé du corps.}$$

### *3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points*

---

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- En tout point de la trajectoire  $\Gamma$  d'un objet, la vitesse est toujours tangente à la trajectoire et s'écrit :  $\mathbf{v} = v\mathbf{e}_t$  où  $v$  est la composante scalaire de la vitesse le long de la trajectoire  $\Gamma$  et  $\mathbf{e}_t$  est le vecteur unitaire tangent. La vitesse scalaire est définie comme la dérivée temporelle de l'abscisse curviligne  $s$ .

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \dot{s} \quad (3.50)$$

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- En tout point de la trajectoire  $\Gamma$  d'un objet, la vitesse est toujours tangente à la trajectoire et s'écrit :  $\mathbf{v} = v\mathbf{e}_t$  où  $v$  est la composante scalaire de la vitesse le long de la trajectoire  $\Gamma$  et  $\mathbf{e}_t$  est le vecteur unitaire tangent. La vitesse scalaire est définie comme la dérivée temporelle de l'abscisse curviligne  $s$ .

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \dot{s} \quad (3.50)$$

- L'accélération tangentielle scalaire est l'accélération le long de la trajectoire et donc la dérivée de la vitesse scalaire par rapport au temps.

$$a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \dot{v} = \ddot{s} \quad (3.52)$$

### *3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points*

---



### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- L'accélération normale scalaire est la dérivée de la direction de la vitesse  $v$  par rapport au temps.

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (3.53) \quad \text{où } R \text{ est le rayon de courbure de la trajectoire à un instant donné.}$$

### 3.11 Dynamique : l'essentiel en quelques points

---

- L'accélération normale scalaire est la dérivée de la direction de la vitesse  $v$  par rapport au temps.

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (3.53) \quad \text{où } R \text{ est le rayon de courbure de la trajectoire à un instant donné.}$$

- Condition de décrochement : Si l'objet quitte le support, le soutien  $\mathbf{S}$  devient nul au point de décrochement  $D$  :  $\mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (3.54)$

---

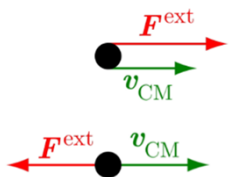
## 4.3 Puissance

## 4.3 Puissance

---



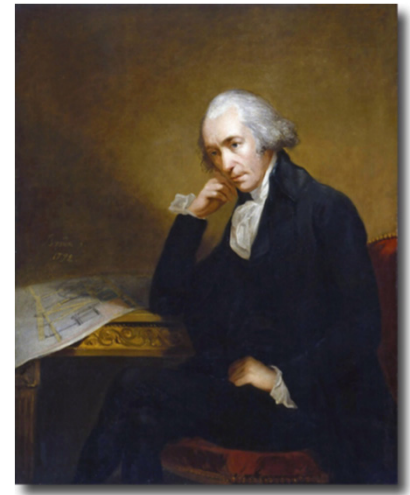
James Watt



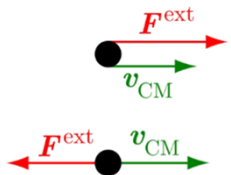
## 4.3 Puissance

Pour un système donné, l'énergie sous une forme donnée  $E$  (mécanique, électrique, thermique, ...) peut changer au cours du temps. La puissance  $P$  mesure l'énergie échangée avec l'extérieur par unité de temps :

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt} = \dot{E} \quad (4.35)$$



James Watt



## 4.3 Puissance

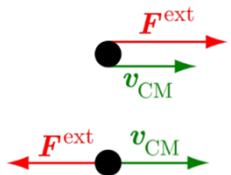
Pour un système donné, l'énergie sous une forme donnée  $E$  (mécanique, électrique, thermique, ...) peut changer au cours du temps. La puissance  $P$  mesure l'énergie échangée avec l'extérieur par unité de temps :

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt} = \dot{E} \quad (4.35)$$

- Unité physique (SI) : le Watt [W] = [kg.m<sup>2</sup>.s<sup>-3</sup>]



James Watt



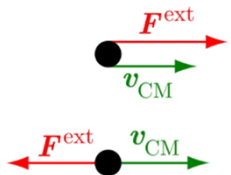
## 4.3 Puissance

Pour un système donné, l'énergie sous une forme donnée  $E$  (mécanique, électrique, thermique, ...) peut changer au cours du temps. La puissance  $P$  mesure l'énergie échangée avec l'extérieur par unité de temps :

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt} = \dot{E} \quad (4.35)$$

- Unité physique (SI) : le Watt [W] = [kg.m<sup>2</sup>.s<sup>-3</sup>]
- La puissance due au travail infinitésimal  $\delta W$  d'une force extérieure s'écrit :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{\delta W}{dt} = \mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot \frac{d\mathbf{r}_{\text{CM}}}{dt} = \mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot \mathbf{v}_{\text{CM}} \quad (4.36)$$



James Watt

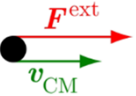
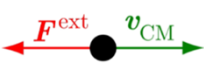
## 4.3 Puissance

Pour un système donné, l'énergie sous une forme donnée  $E$  (mécanique, électrique, thermique, ...) peut changer au cours du temps. La puissance  $P$  mesure l'énergie échangée avec l'extérieur par unité de temps :

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt} = \dot{E} \quad (4.35)$$

- Unité physique (SI) : le Watt [W] = [kg.m<sup>2</sup>.s<sup>-3</sup>]
- La puissance due au travail infinitésimal  $\delta W$  d'une force extérieure s'écrit :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{\delta W}{dt} = \mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot \frac{d\mathbf{r}_{\text{CM}}}{dt} = \mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot \mathbf{v}_{\text{CM}} \quad (4.36)$$

1.   $\mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot \mathbf{v}_{\text{CM}} > 0 \Rightarrow P > 0$  (accélération)
2.   $\mathbf{F}^{\text{ext}} \cdot \mathbf{v}_{\text{CM}} < 0 \Rightarrow P < 0$  (freinage)

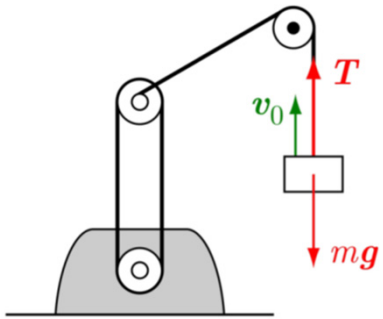


James Watt



### 4.3.1 Puissance d'un moteur électrique

---

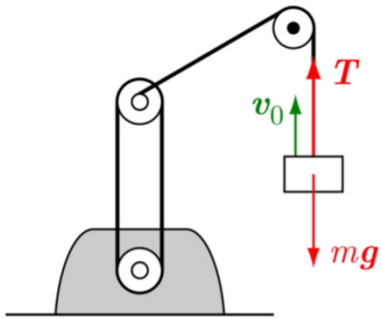


Remarque :

### 4.3.1 Puissance d'un moteur électrique

---

On considère un moteur électrique qui soulève une masse  $m$  à vitesse  $\mathbf{v}_0 = \text{cste}$ . L'énergie potentielle gravitationnelle de la masse  $m$  augmente dû au travail effectué par le moteur pour s'opposer au poids :

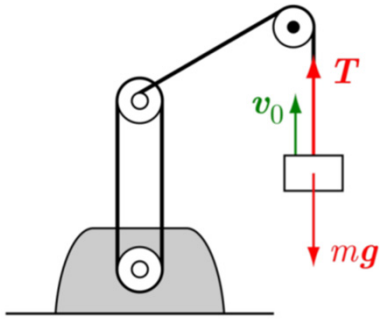


Remarque :

### 4.3.1 Puissance d'un moteur électrique

---

On considère un moteur électrique qui soulève une masse  $m$  à vitesse  $\mathbf{v}_0 = \text{cste}$ . L'énergie potentielle gravitationnelle de la masse  $m$  augmente dû au travail effectué par le moteur pour s'opposer au poids :

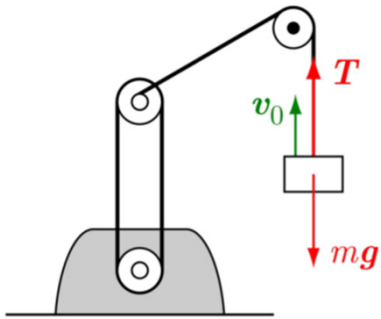


$$\begin{aligned} P &= \frac{dE}{dt} = \frac{\delta W(\mathbf{T})}{dt} = \frac{\delta W(-m\mathbf{g})}{dt} = (-m\mathbf{g}) \cdot \frac{d\mathbf{r}_{\text{cm}}}{dt} \\ &= -m\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_0 = mgv_0 > 0 \quad (4.37) \end{aligned}$$

Remarque :

### 4.3.1 Puissance d'un moteur électrique

On considère un moteur électrique qui soulève une masse  $m$  à vitesse  $\mathbf{v}_0 = \text{cste}$ . L'énergie potentielle gravitationnelle de la masse  $m$  augmente dû au travail effectué par le moteur pour s'opposer au poids :



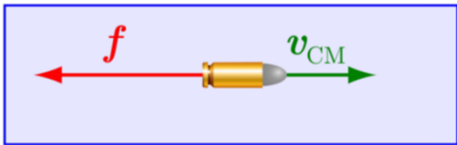
$$\begin{aligned} P &= \frac{dE}{dt} = \frac{\delta W(\mathbf{T})}{dt} = \frac{\delta W(-m\mathbf{g})}{dt} = (-m\mathbf{g}) \cdot \frac{d\mathbf{r}_{\text{cm}}}{dt} \\ &= -m\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_0 = mgv_0 > 0 \quad (4.37) \end{aligned}$$

#### Remarque :

Comme le moteur fournit de l'énergie potentielle gravitationnelle au système, sa puissance est positive.

### 4.3.2 Puissance d'une force de frottement

---

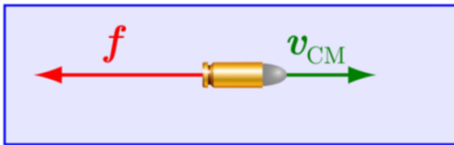


Remarque :

### 4.3.2 Puissance d'une force de frottement

---

On considère l'action d'une force de frottement visqueux  $\mathbf{f} = -\lambda \mathbf{v}_{\text{CM}}$  où  $\lambda > 0$  sur un projectile dont le mouvement est rectiligne. On néglige son poids.

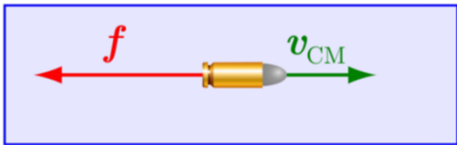


Remarque :

### 4.3.2 Puissance d'une force de frottement

---

On considère l'action d'une force de frottement visqueux  $\mathbf{f} = -\lambda \mathbf{v}_{\text{CM}}$  où  $\lambda > 0$  sur un projectile dont le mouvement est rectiligne. On néglige son poids.



- La puissance due à l'action de la force de frottement est :

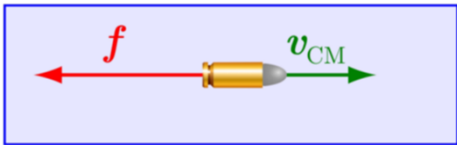
$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{\delta W(\mathbf{f})}{dt} = \mathbf{f} \cdot \frac{d\mathbf{r}_{\text{CM}}}{dt} = -\lambda \mathbf{v}_{\text{CM}} \cdot \mathbf{v}_{\text{CM}} = -\lambda v_{\text{CM}}^2 < 0$$

Remarque :

### 4.3.2 Puissance d'une force de frottement

---

On considère l'action d'une force de frottement visqueux  $\mathbf{f} = -\lambda \mathbf{v}_{\text{CM}}$  où  $\lambda > 0$  sur un projectile dont le mouvement est rectiligne. On néglige son poids.



- La puissance due à l'action de la force de frottement est :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{\delta W(\mathbf{f})}{dt} = \mathbf{f} \cdot \frac{d\mathbf{r}_{\text{CM}}}{dt} = -\lambda \mathbf{v}_{\text{CM}} \cdot \mathbf{v}_{\text{CM}} = -\lambda v_{\text{CM}}^2 < 0$$

#### Remarque :

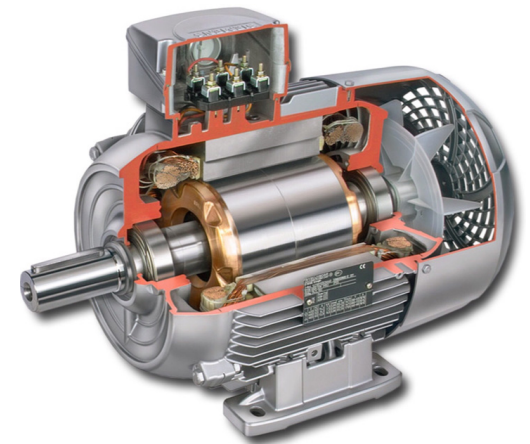
Comme la force de frottement dissipe l'énergie cinétique du projectile, sa puissance est négative.



### 4.3.3 Rendement

---

Exemple :



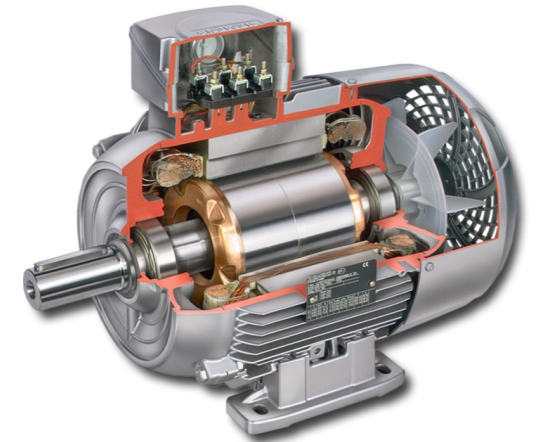
### 4.3.3 Rendement

---

- Le rendement  $\eta$  est une grandeur sans unité physique définie comme le rapport entre la puissance utile (puissance que la machine délivre) et la puissance fournie (puissance que la machine reçoit initialement).

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}}$$

Exemple :



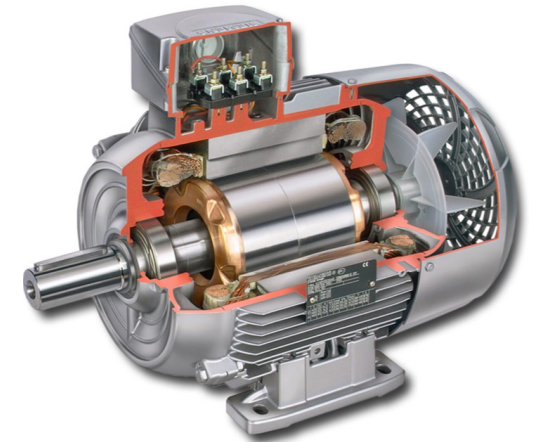
### 4.3.3 Rendement

---

- Le rendement  $\eta$  est une grandeur sans unité physique définie comme le rapport entre la puissance utile (puissance que la machine délivre) et la puissance fournie (puissance que la machine reçoit initialement).

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}}$$

Exemple : Moteur électrique



### 4.3.3 Rendement

---

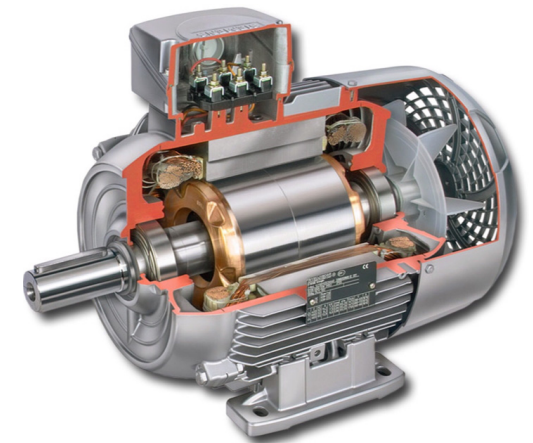
- Le rendement  $\eta$  est une grandeur sans unité physique définie comme le rapport entre la puissance utile (puissance que la machine délivre) et la puissance fournie (puissance que la machine reçoit initialement).

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}}$$

**Exemple :** Moteur électrique

Le moteur reçoit une puissance électrique  $P_{\text{él}}$  de la prise murale et il la convertit en puissance mécanique  $P_{\text{méc}}$  (mouvement de rotation de l'axe).

$$\eta = \frac{P_{\text{méc}}}{P_{\text{él}}}$$



### 4.3.3 Rendement

- Le rendement  $\eta$  est une grandeur sans unité physique définie comme le rapport entre la puissance utile (puissance que la machine délivre) et la puissance fournie (puissance que la machine reçoit initialement).

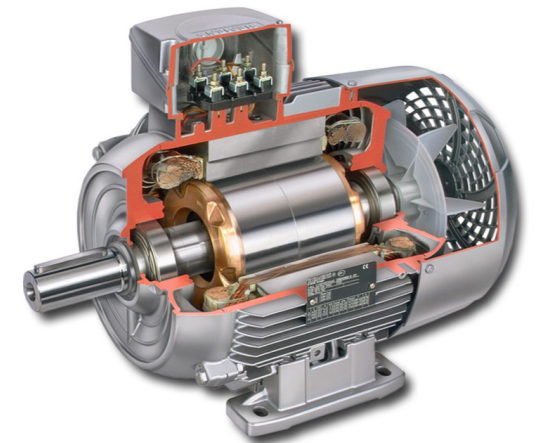
$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}}$$

**Exemple :** Moteur électrique

Le moteur reçoit une puissance électrique  $P_{\text{él}}$  de la prise murale et il la convertit en puissance mécanique  $P_{\text{méc}}$  (mouvement de rotation de l'axe).

$$\eta = \frac{P_{\text{méc}}}{P_{\text{él}}}$$

Le second principe de la thermodynamique requiert que  $0 \leq \eta \leq 1$ .

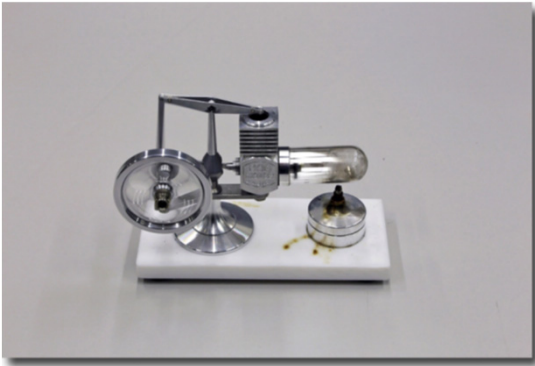


### 4.3.3 Rendement

---

Expérience :

1.



2.



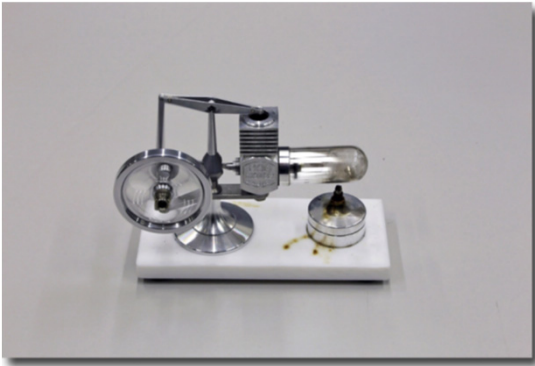
Robert Stirling

### 4.3.3 Rendement

---

Expérience : Moteur de Stirling

1.



2.



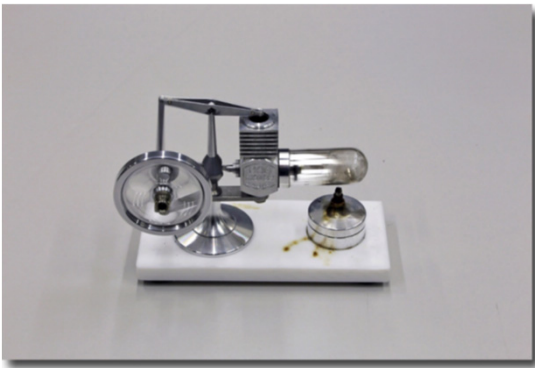
Robert Stirling



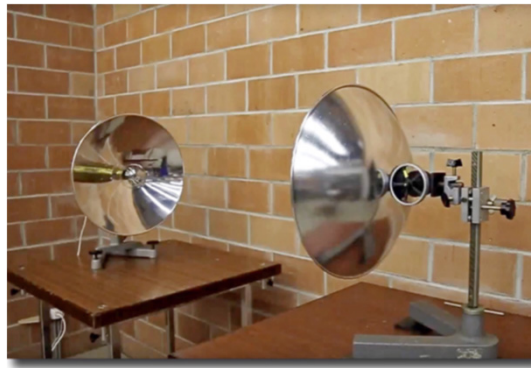
### 4.3.3 Rendement

#### Expérience : Moteur de Stirling

1.



2.



Robert Stirling

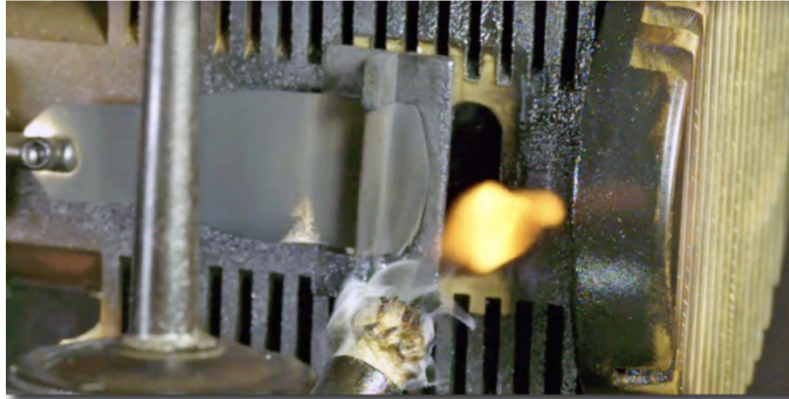
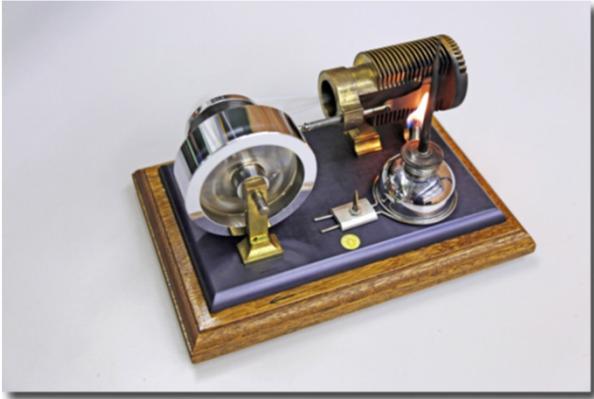
1. Un brûleur rempli d'alcool chauffe l'air contenu dans un cylindre, fournissant ainsi de la chaleur au moteur qui est activé par le lancement de la roue.
2. Une lampe qui se situe au foyer gauche d'un système de miroirs paraboliques éclaire et chauffe un corps noir qui se trouve au foyer droit. La différence de température de part et d'autre de la roue à droite entraîne son mouvement.



### 4.3.3 Rendement

---

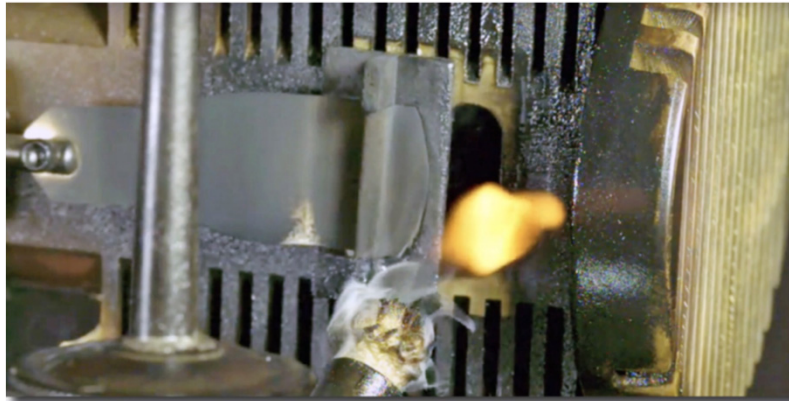
Expérience :



### 4.3.3 Rendement

---

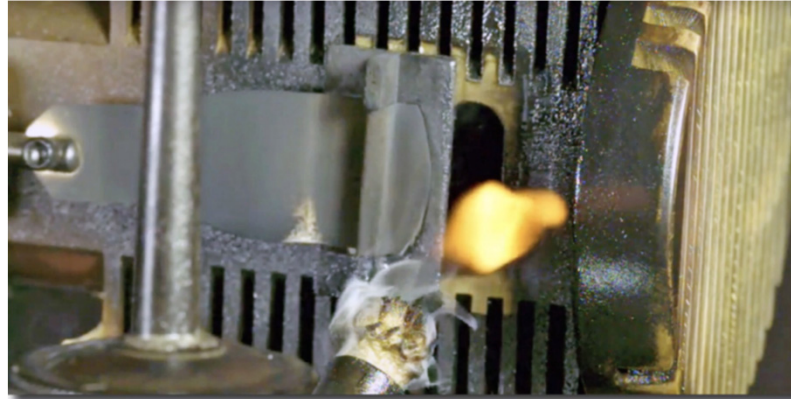
Expérience : Moteur à dépression



### 4.3.3 Rendement

---

#### Expérience : Moteur à dépression



- Le moteur à dépression est un moteur à air chaud qui aspire une flamme au moyen d'un clapet entraîné par le mouvement de la roue. La flamme réchauffe l'air contenu dans un cylindre ce qui provoque le déplacement de la bielle et entraîne le mouvement de rotation de la roue.

## 4.3.3 Rendement

Expérience :



### 4.3.3 Rendement

Expérience : Oiseaux buveurs (exemple de machine thermique)



### 4.3.3 Rendement

Expérience : Oiseaux buveurs (exemple de machine thermique)



- L'oiseau est constitué de deux réservoirs reliés par un tube. Un liquide volatile est enfermé dans l'oiseau.
- Lorsque le bec de l'oiseau est en contact avec de l'eau froide, le liquide redescend dans le tube ce qui fait basculer l'oiseau en position verticale.
- L'évaporation de l'eau sur le bec provoque une contraction de l'air dans le tube, ce qui fait monter le liquide et basculer l'oiseau.