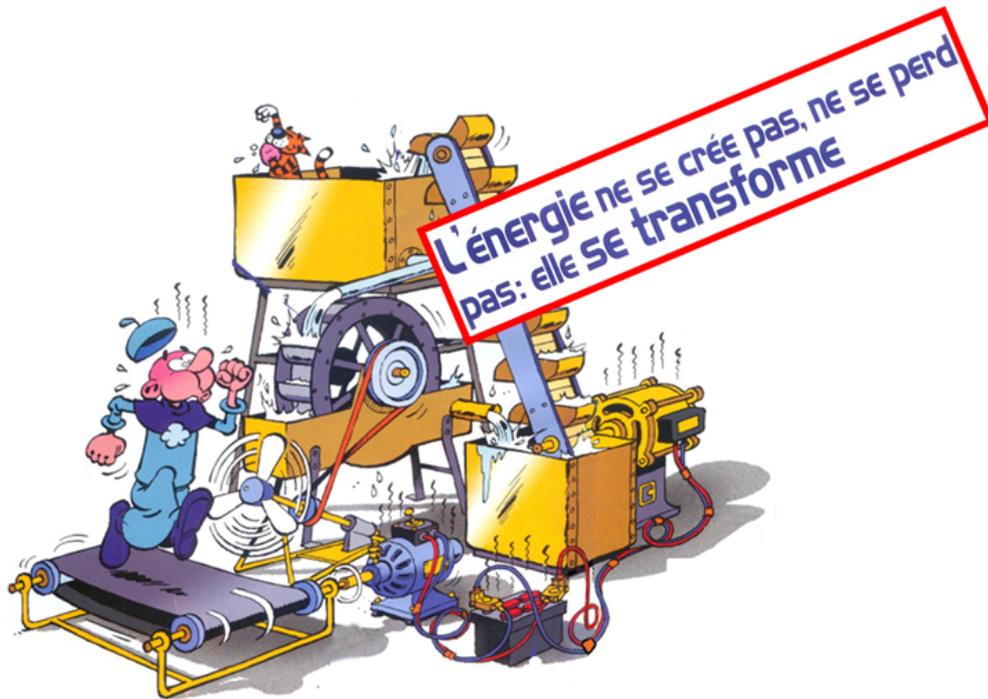


Cours :  
Caractériser les transferts d'énergie  
**Energies d'état et de transfert**

Le disciple courant sur le tapis de course à rouleaux **consomme** de l'énergie (nourriture transformée en énergie mécanique) qui est convertie successivement par la chaîne de puissance constituée de différents systèmes (machine électrique, moteur, roue à aubes, etc).

1.



## Définition de l'énergie

---

En physique, l'énergie est une mesure de la capacité d'un système :

- à modifier un état ;
- à produire un travail entraînant un mouvement ;
- à produire un rayonnement électromagnétique ;
- à produire de la chaleur.



L'énergie correspond à une **quantité** exprimée en Joules (J)

On comprend bien que lorsque le disciple n'aura plus d'énergie il s'arrêtera. Il en est de même pour les systèmes pluritechnologiques.

## 2. Unités de l'énergie (par ordre croissant)

### ↑ Energie

La Tonne équivalent pétrole (Tep) →  $1\text{Tep} = 42\text{GJ}$

La Tonne équivalent charbon (Tec) →  $1\text{Tec} = 0,7\text{ Tep}$

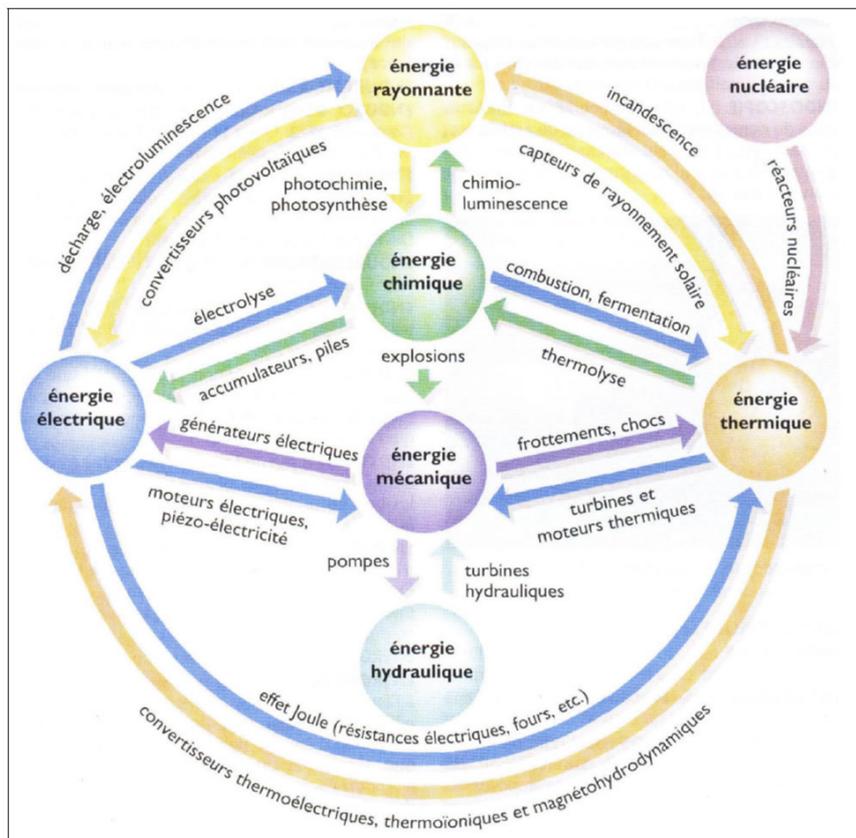
Le Wattheure (Wh) →  $1\text{Wh} = 3600\text{J}$

Le Joule (J)

La calorie (cal) →  $1\text{ cal} = 4,18\text{J}$

L'électron-volt (eV) →  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$

## 3. Les formes d'énergie



## 4. Interactions fondamentales

---

Pour "produire" de l'énergie il faut de la matière (de l'air, de l'eau, du charbon, du pétrole, de l'uranium etc...).

**Question** : De quelle quantité de matière avons nous besoin pour "produire" par exemple 1kWh ?

Illustration :

- ▶ 1kWh c'est l'énergie qu'il faut à un homme pour escalader le Mont Blanc depuis Chamonix



- ▶ 1kWh c'est l'énergie cinétique d'un camion de 10 tonnes qui roule à 100km.h<sup>-1</sup>



**Réponse** : il y en a plusieurs... tout dépend de l'interaction que l'on va utiliser !

L'interaction gravitationnelle

**1kWh  $\propto$  qlq 10 Tonnes de matière**

Illustration :

- ▶ 1kWh c'est l'énergie cinétique de 10 tonnes d'eau lâchée à 40 m d'altitude



- ▶ 1kWh c'est l'énergie cinétique de 20 000 m<sup>3</sup> d'air (27 tonnes) à 60 km.h<sup>-1</sup>



## L'interaction électromagnétique

**1kWh  $\propto$  qlq 1kg de matière**

Illustration :

- ▶ Combustion chimique : 1kWh c'est l'énergie délivrée par 0,1kg de carburant
- ▶ Biologique ou calorique : 1kWh c'est l'énergie d'un bon repas soit près d'1kg d'aliment.
- ▶ Calorifique : 1kWh c'est l'énergie nécessaire pour faire fondre 1kg de glace ou faire bouillir 1,5kg d'eau



## L'interaction nucléaire faible

### **Fission :**

Principe maîtrisé et utilisé dans les centrales nucléaires

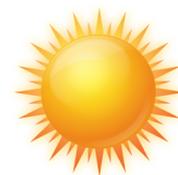
**1kWh  $\propto$  qlq 10mg d'uranium**



### **Fusion :**

Principe non maîtrisé

**1kWh  $\propto$  qlq 10 $\mu$ g d'uranium**



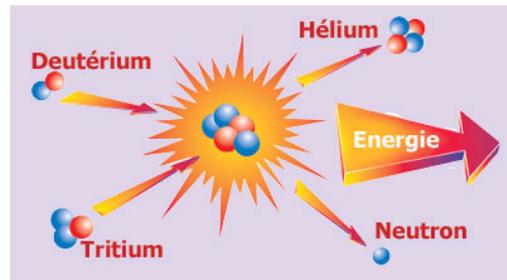
## L'interaction nucléaire forte

### Fusion :

Principe non maîtrisé

1kWh  $\propto$  qlq 1 $\mu$ g de combustible

exemple : 1,1g de Lithium et 320mg de Déutérium (présent dans 10 litres d'eau de mer) permettraient de produire 80GJ (consommation annuelle d'un Européen !!)



## 5. Energies d'état (ou stockables) et de transferts

### Trois lettres utilisées pour désigner l'énergie!!

" E " pour les Energies **stockables** ou de **forme d'état** (lié à son état : altitude, vitesse,...)

La phrase suivante a du sens : « Le système possède une énergie de 5kJ »

$$\Delta E = E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}}$$

" W " pour le **travail** (la quantité de travail transmis) et " Q " pour les **échanges** de chaleur (quantité de chaleur transmise) sont des Énergies de **transfert**.

La phrase suivante n'a aucun sens : « Le système possède 5kJ de travail ! »

La phrase suivante a du sens : « Le système 1 a échangé 5kJ avec le système 2 »

~~$$\Delta W = W_{\text{finale}} - W_{\text{initiale}}$$
$$\Delta Q = Q_{\text{finale}} - Q_{\text{initiale}}$$~~

W et Q > 0 : le système absorbe de l'énergie.

W et Q < 0 : le système cède de l'énergie

## 6. Premier principe de la thermodynamique

L'énergie ne se crée pas, ne perd pas : elle se transforme

$$\Delta E = E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}} = \Delta E_{cM} + \Delta E_{pM} + \Delta U = W + Q$$

avec :

$\Delta E_{cM}$  : variation d'énergie cinétique **M**acroscopique

$\Delta E_{pM}$  : variation d'énergie **p**otentielle **M**acroscopique

$\Delta U$  : variation d'énergie interne (variation d'énergie microscopique cinétique et potentielle d'interaction).

$W$  : travail des forces Extérieures non conservatives (essentiellement de pression, frottements). Le travail des forces conservatives est déjà présent dans  $\Delta E_{pM}$

$Q$  : quantité de chaleur.

Attention :

Dans cette relation  $W$  et  $Q$  sont algébrisés, c-à-d comptés positivement ou négativement selon que le système isolé reçoit ou perd de l'énergie (convention du porte-monnaie).

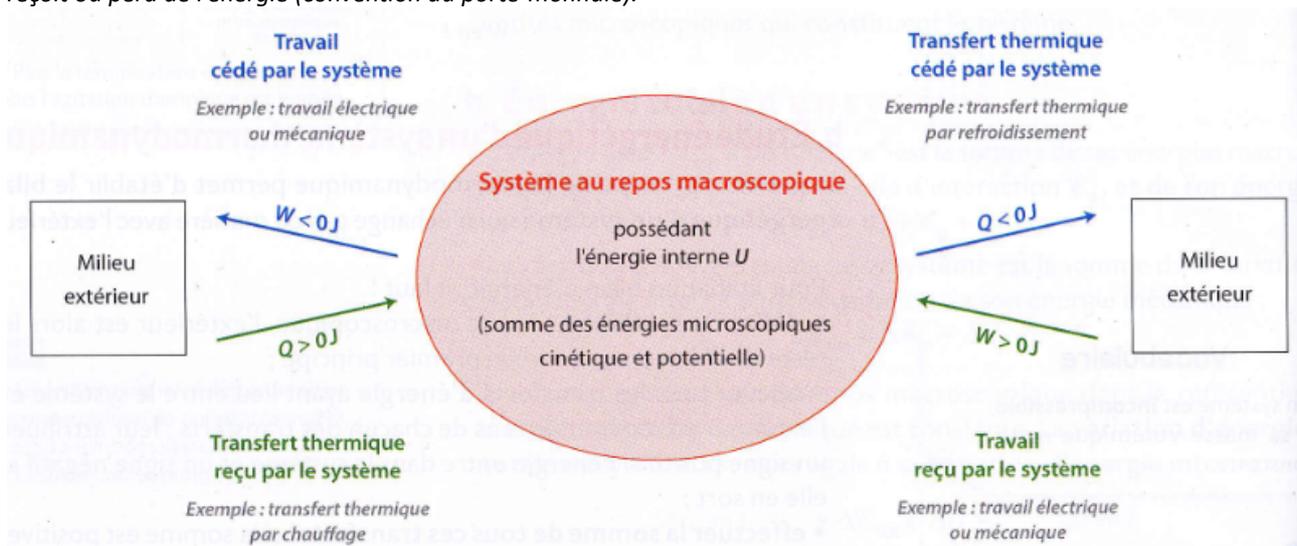
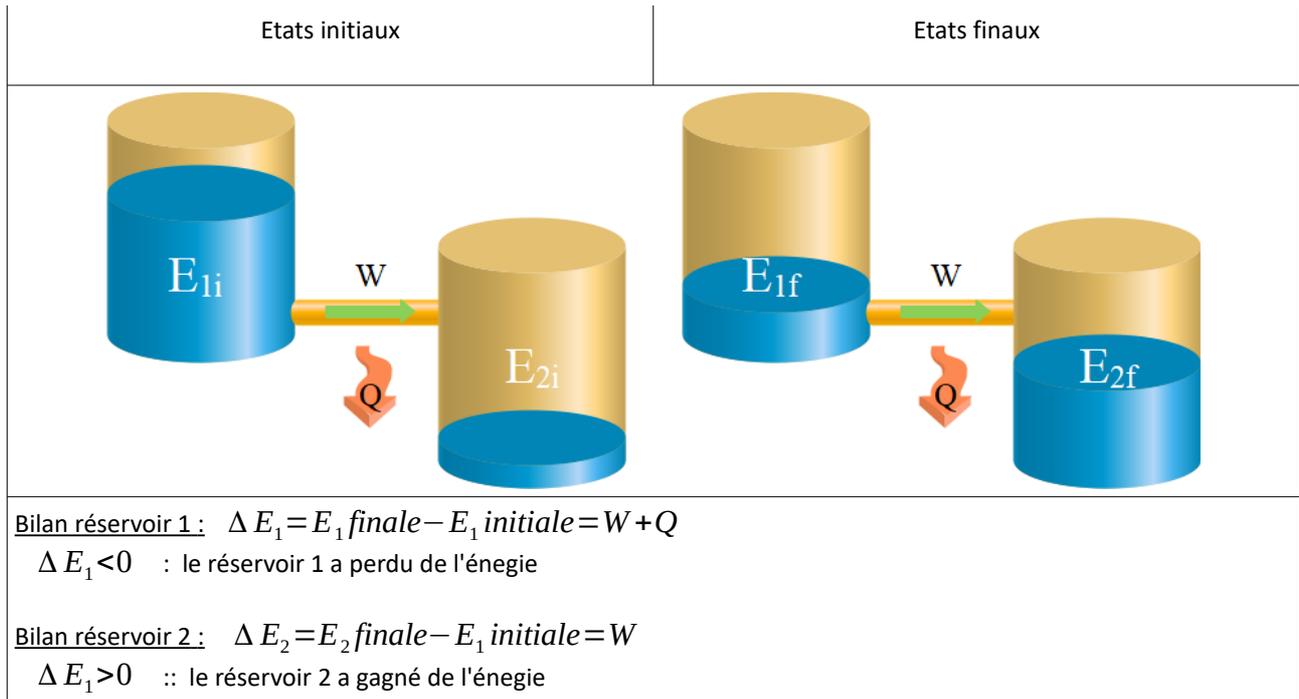


Illustration avec des réservoirs d'eau (il s'agit ici d'une analogie hydraulique destinée à conceptualiser).



## 7. Calculer les énergies d'état (ou stockables)

### Energies potentielles

Toutes les énergies sont exprimées en Joule [J] sauf indication contraire

#### De pesanteur

$$E = m \cdot g \cdot z$$

m : masse [kg]  
g : accélération de pesanteur  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$   
z : altitude [m]



Calculer l'énergie potentielle de 10 tonnes d'eau à 40m d'altitude.



#### Élastiques

##### En translation

$$E = \frac{1}{2} k \cdot X^2$$

X : allongement/raccourcissement [m]  $X = l_{tot} - l_0$   
k : constante de raideur [N/m]



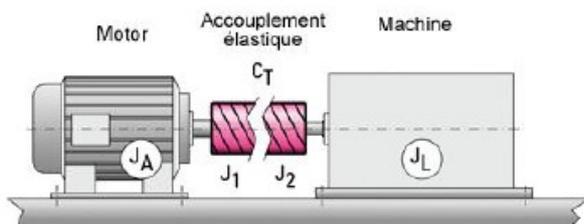
##### En rotation

$$E = \frac{1}{2} k \cdot \theta^2$$

$\theta$  : variation d'angle [rad]  $\theta = \theta_{tot} - \theta_0$   
k : constante de torsion [N.m / rad]



Calculer l'énergie potentielle d'un ressort comprimé de 10 cm dont la constante k vaut  $500 \text{ N.m}^{-1}$ .



Calculer l'énergie potentielle accumulée lorsque l'accouplement en rouge présente un angle de torsion de  $20^\circ$  pour une constante k de  $500 \text{ N.m.rad}^{-1}$

## De pression

$$E = p \cdot V$$

p : pression [Pa]

V : volume [m<sup>3</sup>]



Calculer l'énergie stockée dans une cuve de compresseur de 100 litres à la pression de 8 bars.

## Chimique

$$E = m \cdot PC_m$$

m : masse de combustible [kg]

PC<sub>m</sub> : pouvoir calorifique massique du combustible [J / kg]



$$E = V \cdot PC_v$$

V : volume de combustible [m<sup>3</sup>]

PC<sub>v</sub> : pouvoir calorifique volumique du combustible [J / m<sup>3</sup>]

Calculer l'énergie stockée dans 1kg d'essence dont le Pouvoir Calorifique PC<sub>m</sub> = 47,3MJ.kg<sup>-1</sup>

## Électrique

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

C : capacité du condensateur [F]

U : tension aux bornes [V]

Condensateur



Calculer l'énergie stockée dans le condensateur ci-dessus polarisé sous 230V dont la capacité est de 16μF.

Cas particulier des batteries électriques, piles et accumulateurs :

$$E = C \cdot U$$

Le produit C.U : énergie stockable [Wh]

C : capacité de la batterie [A.h]

U : tension nominale [V]

Batterie / Pile / Accumulateur



C'est un cas particulier :

- Cette formule permet de déterminer l'énergie stockable mais en aucun cas l'énergie stockée. (en d'autres termes, la simple mesure de U ne permet pas de déterminer l'état de charge de la batterie)
- La tension nominale est la valeur inscrite sur le produit



Vérifier l'indication de l'énergie stockée dans la batterie ci-dessus (BTY-L74)

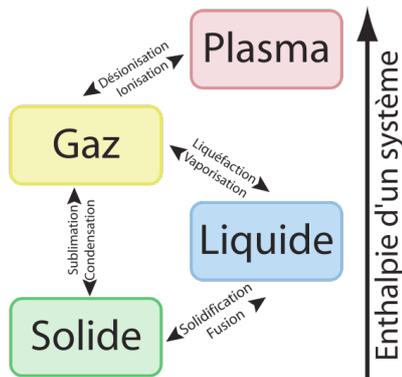
On mesure sur cette batterie une tension de 10,5 V. Peut-on calculer l'énergie contenue à cet instant dans la batterie ?

## Thermique

$$E = m \cdot H$$

m : masse de fluide [kg]  
 H : enthalpie du fluide à température et pression données [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

Fluide (ici de l'eau)



Dans le langage familier, nous utilisons facilement le terme de condensation pour exprimer le changement de phase de gaz à liquide ! Or la condensation correspond au passage de l'état gazeux (vapeur pour de l'eau) à l'état solide. Il faut en fait distinguer la **condensation liquide** (= liquéfaction) de la **condensation solide** (Condensation)

Y a t'il plus d'énergie dans un fluide à l'état gazeux qu'à l'état solide ?

Lorsqu'un fluide change de phase (ex : solide à liquide), celui ci gagne t'il de l'énergie ou en perd t-il ?

Faut -il fournir de l'énergie à un solide pour qu'il passe d'une phase liquide à solide ?

Un fluide qui opère une condensation liquide rétrocède t-il de la chaleur ou en gagne t'il ?

Déterminer l'enthalpie d'un volume d'eau de 5 L à l'état liquide (pression atmosphérique et température de 20°C) (ressources : [ThermExcel](#))

## Energies cinétiques

### Mécaniques

#### En translation

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

m : masse en translation [kg]  
v : vitesse de translation [m/s]



#### En rotation

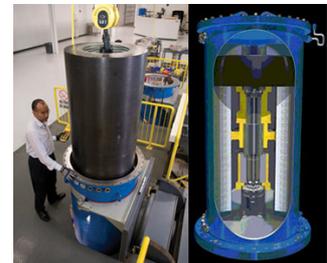
$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

J : moment d'inertie [kg.m<sup>2</sup>]  
 $\omega$  : vitesse de rotation angulaire [rad/s]



Calculer l'énergie cinétique d'un camion de 10 tonnes roulant à 100km.h<sup>-1</sup>

Calculer l'énergie cinétique (kWh) d'un volant d'inertie du Val de Rennes dont les caractéristiques sont les suivantes : J = 2500kg.m<sup>2</sup>, vitesse rotation de 1500tr.min<sup>-1</sup>



### Électriques

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2$$

L : inductance [H]  
i : intensité du courant [A]



## Calculer les énergies de transferts

Les énergies de transfert (W et Q) se déterminent de plusieurs manières.

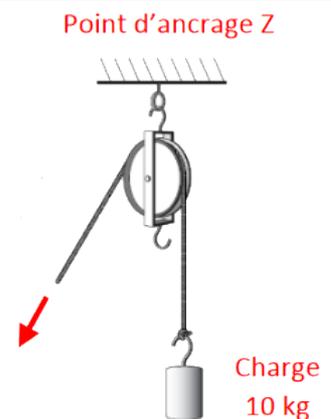
### Détermination par variation d'énergie d'état

$$\Delta E = E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}} = \Delta E_{cM} + \Delta E_{pM} + \Delta U = W + Q$$

**Exemple 1 :** déterminer le travail W nécessaire à faire passer une voiture d'1,2 tonne de 20km/h à 80 km/h  
*Hypothèses : on négligera les forces de frottement dues à la pénétration dans l'air (cette force s'appelle la traînée aérodynamique et elle travaille en toute réalité).*



**Exemple 2 :** déterminer le travail W nécessaire à élever une charge de 10 kg d'une hauteur de 10 m.  
*Hypothèses : on négligera les forces de frottement dues à la pénétration dans l'air ainsi que les couples de frottement sur la poulie.*

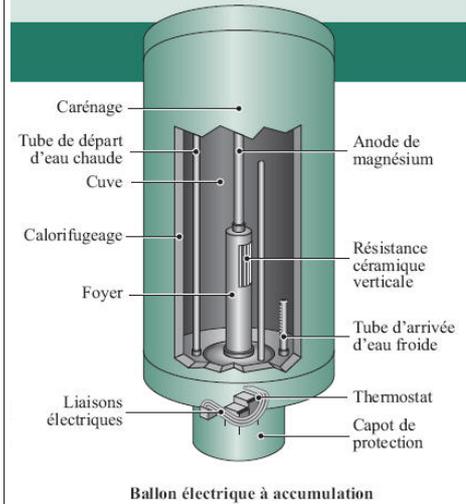
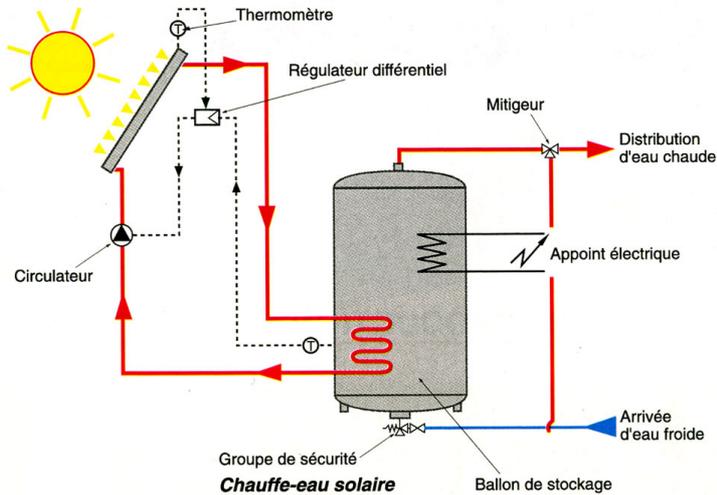


**Exemple 3 :** déterminer le travail W nécessaire à passer le cette cuve de 200 L de 1 bar à 8 bar.  
*Hypothèses : en réalité, l'air comprimé subit une élévation de température dû à sa compression, ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie interne U de l'air comprimé. Cette élévation de température (donc d'énergie interne U) sera négligée.*



**Exemple 4 :** déterminer la quantité de chaleur  $Q$  nécessaire à chauffer une ballon d'eau chaude sanitaire (ECS) de 300 L à la température de 80°C (température arrivée eau de ville dans le ballon de 15°C).

*Hypothèse : le calorifuge est parfait (pas de quantité de chaleur à sortir par les parois), pas de soutirage d'eau chaude pendant la mise en chauffe.*



**Aide pour la solution :**

La quantité de chaleur à transmettre pourrait être calculée en connaissant l'enthalpie de l'eau à 15°C et 80°C sous 3 bar (pression d'eau de ville en générale, donc pression régnant dans le ballon).

Cette solution est en fait occultée au profit de la suivante :

Pour un **fluide incompressible** (solide ou liquide) ne subissant pas de changement de phase (solide  $\leftrightarrow$  liquide  $\leftrightarrow$  gazeux) on préfère utiliser la formule suivante :

$$\Delta U = Q = m \cdot C \cdot \Delta T \quad \text{ou} \quad \Delta U = Q = m \cdot C \cdot \Delta \theta$$

$\Delta U$  : variation d'énergie interne (cinétique microscopique et potentiel d'interaction microscopique) [J]

$m$  : masse du fluide [kg]

$C$  : capacité thermique massique du fluide [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$\Delta T$  : écart de température [K]

$\Delta \theta$  : écart de température [°C]

**Résolution de l'exemple 4 :**

Détermination de l'énergie de transfert à partir de la puissance :

$$W = P \cdot \Delta t \quad \text{Et} \quad Q = \Phi \cdot \Delta t$$

W et Q : énergie de transfert [J] respectivement Travail et Quantité de chaleur.

P et  $\Phi$  : puissance et flux thermique [W].  $\Phi$  est parfois noté Pth pour puissance thermique.

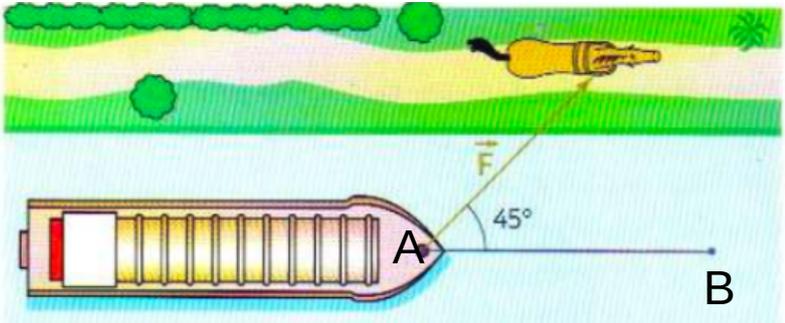
$\Delta t$  : temps de la mesure [s]

Cette définition sous-entend de connaître les puissances P et  $\Phi$ , ce qui sera vu l'hors du cours sur les puissances.

De manière générale, la puissance comme nous le verrons dans un cours ultérieur, est le produit d'une grandeur effort et d'une grandeur flux.

Détermination du travail (énergie de transfert) à partir du travail d'une force :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{l} \quad \text{Ou plus exactement :}$$

$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}$ <p>W : travail de la force F <u>non conservative</u> [J]                  F : force qui travaille [N]                  AB : chemin sur lequel la force se déplace [m]</p> <p><i>Ce prononce :</i> « Le travail de la force F le long du chemin AB est égal au produit scalaire de la force F par le chemin AB.</p>	 <p style="text-align: center;"> <math>\vec{F} \begin{pmatrix} 8000 \\ 8000 \end{pmatrix} \quad \vec{AB} \begin{pmatrix} 100 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \ \vec{F}\  = 11314 \text{ N} \quad (\vec{F}, \vec{AB}) = 45^\circ</math> </p>
---	---

**Rappel de mathématiques : le produit scalaire**

Il existe trois définitions mathématiques mais seules deux nous sont utiles en Sciences de l'ingénieur :

Définition 1 :  $\vec{u} \cdot \vec{v} = \|\vec{u}\| \cdot \|\vec{v}\| \cdot \cos(\vec{u}, \vec{v})$

Définition 2 :  $\vec{u} \cdot \vec{v} = u_x \cdot v_x + u_y \cdot v_y$

*Particularité :* le produit scalaire est nul si les deux vecteurs sont orthogonaux (Effectivement le  $\cos(\vec{u}, \vec{v}) = 0$  )

Application : déterminer le travail de la force F pour déplacer la péniche du point A au point B [AB]=100 m par les deux définitions du produit scalaire.

Hypothèse : on considère la péniche déjà lancée à vitesse initiale (la force F ne contribue donc pas augmenter l'énergie cinétique mais uniquement à compenser la force due à la traînée hydrodynamique  $T_{hydro}$ ).