

## Economiser de l'énergie

### I L'énergie et sa conservation ou sa non conservation en mécanique

#### 1) Travail d'une force

##### a) Activité pour la découverte de l'expression du travail d'une force

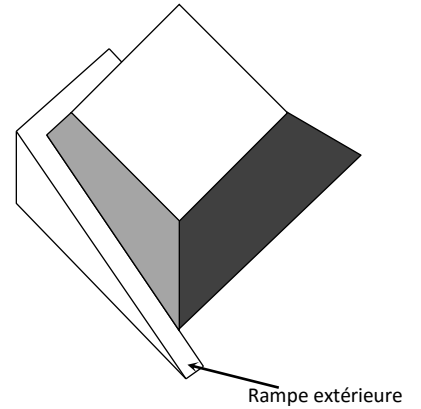
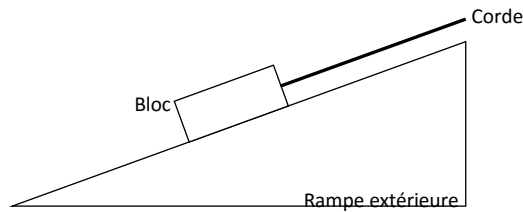
Dans l'Antiquité, les Égyptiens ont bâti des pyramides sans utiliser ni roues ni poulies. Pour construire des tels édifices, ils ont dû élever des blocs de pierre d'une dizaine de tonnes grâce à la force humaine. Pour quantifier l'effet d'une force sur l'énergie d'un système, on utilise une grandeur appelée travail.

*Comment calculer le travail d'une force constante ?*

Pour expliquer la construction de la pyramide de Khéops (haute de 137 m), édifiée en Égypte il y a plus de 4 500 ans, de nombreuses théories ont été avancées. Celle de l'architecte Jean-Pierre HOUDIN, développée en 2000, est basée sur l'utilisation d'une rampe extérieure enduite de boues humides, longue de plusieurs centaines de mètres avec une pente de 8 %. Cette rampe aurait permis d'acheminer les blocs de pierre pour la construction des 43 premiers mètres de hauteur.

Dans les questions qui suivent, on s'intéresse à la rampe extérieure.

1) Le schéma ci-dessous représente un bloc de pierre sur la rampe extérieure.



Compléter ce schéma en représentant les forces qui agissent sur le bloc de pierre lorsqu'il est tiré sur la rampe.

2) On considère un bloc de pierre immobile au pied de la rampe, puis ce même bloc de pierre à 43 m de hauteur.

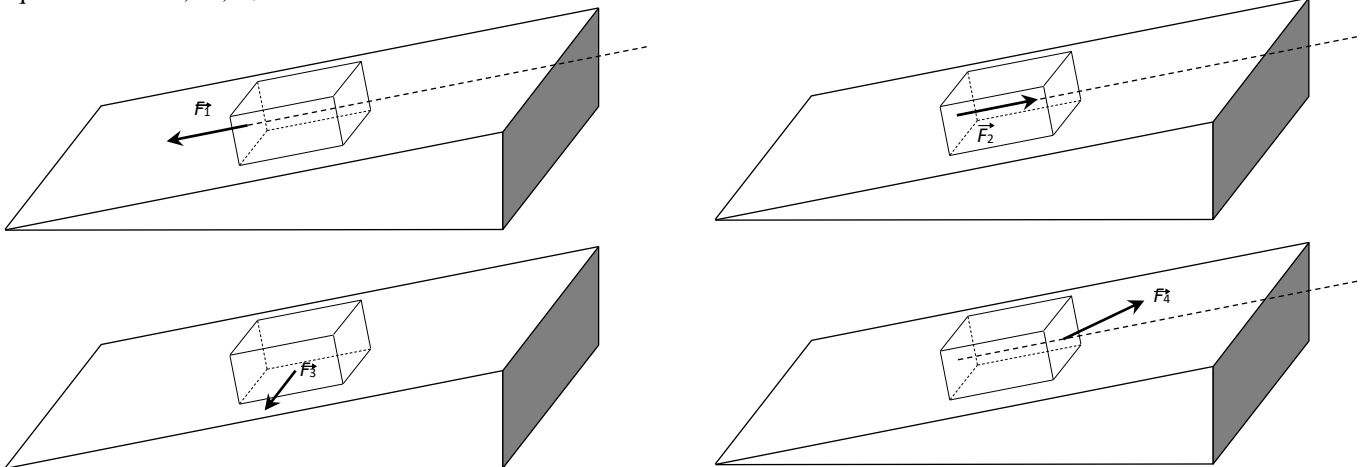
Quelle forme d'énergie a varié entre ces deux positions du bloc de pierre ? À quoi peut-on attribuer cette variation d'énergie ?

.....  
.....  
.....

3) Un ouvrier vient apporter de l'aide aux ouvriers qui tirent le bloc de pierre, mais il ne sait pas où se placer.

Le document ci-dessous représente les forces qu'il est susceptible d'exercer selon l'endroit où il se trouve.

Les quatre forces  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  et  $F_4$  ont la même intensité.



a. Quel est l'effet de chacune de ces forces sur le bloc de pierre ?

.....  
.....

b. Commenter leur efficacité.

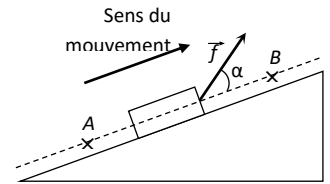
.....  
.....

4) Le travail d'une force a la dimension (ou s'exprime avec la même unité) qu'une énergie. On envisage le cas général d'une force constante  $f$  dont le point d'application se déplace d'un point  $A$  vers un point  $B$  (voir schéma en bas de page). On note  $\alpha$  l'angle entre cette force et le vecteur  $AB$ . Une des relations suivantes permet de calculer le travail, noté  $W_{AB}(f)$ , de cette force :

a.  $W_{AB}(f) = \frac{f}{AB \cdot \cos \alpha}$       b.  $W_{AB}(f) = f \cdot AB \cdot \sin \alpha$       c.  $W_{AB}(f) = f \cdot AB \cdot \cos \alpha$       d.  $W_{AB}(f) = \frac{AB \cdot \cos \alpha}{f}$

Par une analyse dimensionnelle et à l'aide du schéma ci-contre, déterminer l'expression correcte du travail d'une force.

Schématisme, dans le plan du mouvement, d'une force de traction s'exerçant sur un objet placé sur un plan incliné.



**b) Expression du travail d'une force constante**

Le travail  $W_{AB}(\vec{F})$  d'une force constante  $\vec{F}$  (même direction, même sens, même norme au cours du ..... ) lors d'un déplacement de son point d'application de A vers B, est égal au produit scalaire de la force  $\vec{F}$  par le vecteur déplacement  $\vec{AB}$ .

$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} (= \vec{AB} \cdot \vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos(\alpha)$  avec  $\alpha$  l'angle algébrique  $(\vec{F}; \vec{AB})$

$W_{AB}(\vec{F})$  est en Joule (J), F en Newton (N) et AB en mètres (m).

Expression analytique : si, dans un repère choisi  $(Oij)$   $\vec{F}$  a pour coordonnées  $(F_x, F_y, F_z)$ , A a pour coordonnées  $(x_A, y_A, z_A)$  et B  $(x_B, y_B, z_B)$  alors  $\vec{AB}$  a pour coordonnées..... Et donc  $W_{AB}(\vec{F})$   
=.....

cas 1

cas 2

cas 3

Si  $W_{AB}(\vec{F}) > 0$ , le travail est dit....., la force a globalement favorisé au déplacement et  $\alpha$

Si  $W_{AB}(\vec{F}) < 0$ , le travail est dit .....

Si  $W_{AB}(\vec{F}) = 0$ , cela signifie que  $\cos(\alpha) = 0$  donc que ..... La réciproque est vraie

**c) Expression du travail du poids**

On considère une région au voisinage de la Terre où le champ de pesanteur .... est uniforme c'est-à-dire .....

On considère un point matériel de masse m qui se déplace d'un point A à un point B dans ce champ de pesanteur.

**d) Expression du travail d'une force électrique constante (système dans un champ électrique uniforme)**

**e) Travail d'une force de frottement**

*i) Force  $\vec{R}$  modélisant l'action de contact entre le système et un support*

si le système ne dérape pas : (roule sans glisser par exemple) :

dans le cas contraire :

*ii) Force de frottement due à un fluide lorsque le système se déplace dans le fluide*

*ii Travail des forces correspondantes*

La composante normale ne travaille pas car .....

Dans le cas d'une **force de frottement  $\vec{f}$  d'intensité constante lors d'un déplacement rectiligne de A vers B :**

**2) Travail des forces et énergie du système**

**a) Force conservative**

Définition :

Exemples :

**b) Energie potentielle associée à une force conservative**

On montre que le travail d'une force conservative entre deux points A et B correspond à l'opposé de la variation d'une grandeur appelée énergie potentielle :

Au poids est associée l'énergie potentielle de .....

A la force électrique est associée l'énergie potentielle .....

Energie potentielle	expression	Variation entre deux point A et B de l'énergie potentielle	Opposé de la variation entre deux points A et B de l'énergie potentielle	Correspondance avec le travail de la force .....

### c) Interprétation physique d'une force conservative

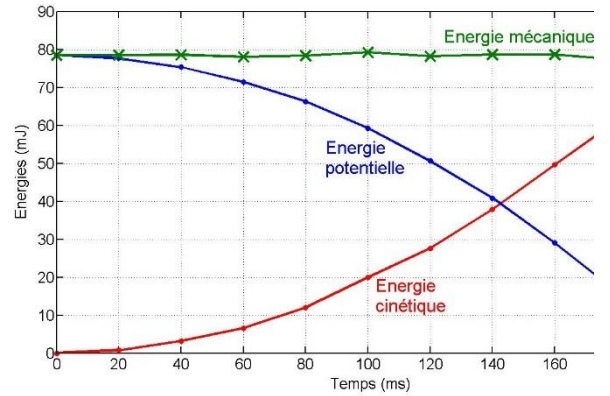
- Cas de la chute de la balle de golf lâchée sans vitesse initiale depuis une hauteur  $h$  (voir TP de 1S sur l'obtention éventuelle d'étoiles filantes) :

Rappel de la définition d'une chute libre :

Dans ce cas, quelle énergie est conservée ?

Il y a bien perte d'énergie potentielle durant la chute. Est-ce que pour autant l'énergie mécanique de la balle diminue ?

Expliquer le terme de « force conservative » appliquée au poids

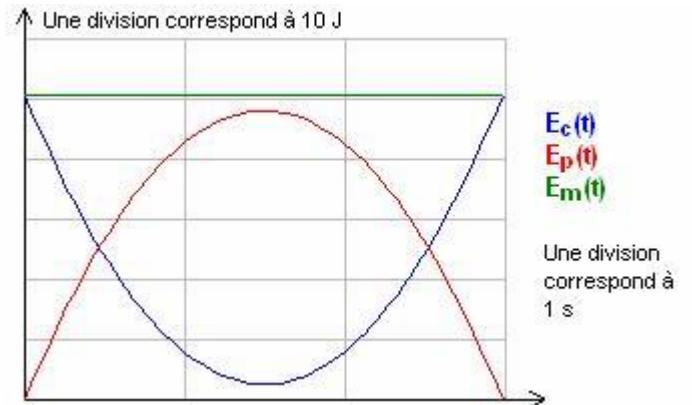


- Cas d'une balle lancée dans le champ de pesanteur uniforme, vers le haut, en chute libre :

Identifier l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et l'énergie mécanique, justifier

L'énergie cinétique ne s'annule pas. Pour quelle raison ?

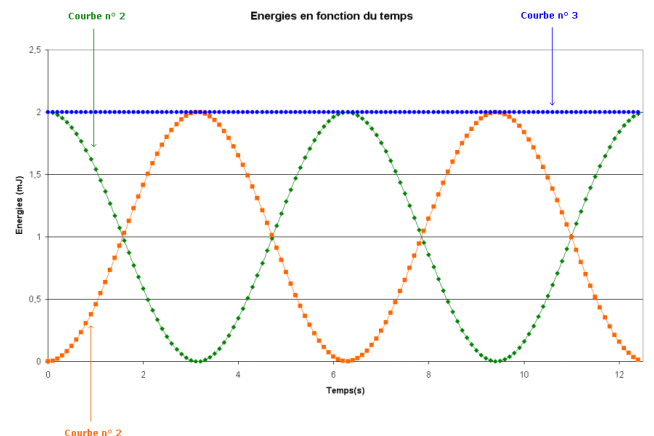
Retrouve-t-on que le poids est une force conservative dans cet exemple ?



- Cas des oscillations libres d'un pendule en l'absence de frottement, le pendule étant lâché sans vitesse initiale d'un angle  $\theta$ .

Identifier l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et l'énergie mécanique, justifier

Retrouve-t-on que le poids est une force conservative dans cet exemple ?



#### **d) Force non conservative**

- Lorsqu'on lâche une balle de ping-pong dans l'air (ou même une balle de golf même si cela se fait moins sentir), l'étude énergétique mène aux graphiques suivants :

L'énergie mécanique n'est pas conservée.

Quelle différence, en terme de force existe-t-il entre ce cas et le premier cas du c) ?

Pourquoi la force de frottement est dite « non conservative » ?

- Cas d'une balle lancée dans le champ de pesanteur uniforme, vers le haut, avec frottement
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Cas des oscillations libres d'un pendule en l'absence de frottement, le pendule étant lâché sans vitesse initiale d'un angle  $\theta$ .

### **3) Comment éviter une perte d'énergie mécanique non désirée d'un système ?**

## II L'énergie mécanique précédemment présentée est-elle le seul type d'énergie d'un système ?

*Introduction* : Albert Einstein et Leopold Infeld « L'évolution des idées en physique », les montagnes russes p. 46-50

« Considérons le mouvement de ce jeu populaire qui donne le frisson et qu'on appelle montagnes russes. [...] Pour l'expérience idéalisée, nous pouvons imaginer que quelqu'un soit arrivé à éliminer entièrement le frottement qui accompagne toujours le mouvement. [...] Suivons le mouvement de la voiture idéalisée sur les rails idéalisés à partir du moment où elle commence à descendre. A mesure qu'elle se meut, sa distance au sol diminue mais sa vitesse augmente. [...] L'énergie potentielle augmente avec la hauteur, tandis que l'énergie cinétique devient de plus en plus grande à mesure que la vitesse augmente. [Dans cet exemple idéalisé] la somme des deux quantités reste invariable. L'énergie totale, cinétique plus potentielle, peut être comparée à une substance, disons à l'argent, qui reste intact quant à la somme, mais qui peut être continuellement converti d'une monnaie en une autre, par exemple de dollars en livres et inversement, selon des cours des valeurs bien définies.

Dans les montagnes russes réelles, où le frottement empêche la voiture d'atteindre un point aussi élevé que celui d'où elle est partie, il y a toujours échange continu entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Ici cependant, la somme ne reste pas constante, mais devient plus petite. Maintenant il est nécessaire de faire un pas important et courageux de plus pour relier entre eux l'aspect mécanique et l'aspect thermique du mouvement. [...]

Quelle chose de plus que l'énergie cinétique et l'énergie potentielle est maintenant impliqué dans le mouvement, c'est la chaleur produite par le frottement. Cette chaleur correspond-elle à la diminution de l'énergie mécanique, c'est-à-dire de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle ? Une nouvelle conjecture est imminente. Si la chaleur peut être regardée comme une forme d'énergie, peut-être la somme des trois énergies thermique, cinétique et potentielle, reste-t-elle constante. Ce n'est pas la chaleur seule mais celle-ci et les autres formes d'énergie prises ensemble qui sont indestructibles comme une substance. C'est comme si un homme s'octroyait à lui-même une commission en francs pour avoir converti des dollars en livres et mettait cette monnaie aussi de côté, de sorte que la somme des dollars, des livres et des francs est un total fixe conformément à un certain cours des valeurs. »

### Questions :

a) Einstein et Infeld parlent de « substance » qu'il faut entendre comme une grandeur qui se conserve au cours du temps pour un système particulier. Pour quel système et dans quelles conditions l'énergie mécanique est-elle une « substance » ?

.....  
.....

b) Que faut-il ajouter à l'énergie mécanique afin de retrouver une « substance » dans le cas général ? Quel est le système considéré ?

.....  
.....  
.....

### 1) Energie interne d'un système

Ce qu'appellent « chaleur » Einstein et Infeld dans leur ouvrage grand public correspond, en sciences physiques et plus particulièrement en thermodynamique, à l'énergie interne  $U$  du système considéré.

#### a) Système thermodynamique : aspect microscopique et aspect macroscopique

Le système en thermodynamique est **un ensemble macroscopique** (gaz, liquide et/ou solide) composé de  $N$  particules (atomes, ions ou molécules) **délimité par des .....** (réelles ou fictives).

Exemple : de l'eau au fond d'une casserole. On peut définir comme systèmes :

Un système est considéré comme macroscopique si le nombre de particules  $N$  le composant est plus grand ou du même ordre de grandeur que le **nombre d'Avogadro**  $N_A$ .

Rappel (par cœur) : le nombre d'Avogadro, noté  $N_A$ , correspond au nombre d'atomes présents dans 12 grammes de carbone 12. Il sert de définition à la mole puisqu'une mole contient  $N_A$  entités avec  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (se rappeler de l'ordre de grandeur).

Les moyens actuels de microscopie permettent de « visualiser » les entités au niveau microscopique. Le microscope à force atomique est un de ces moyens.

*Questions* : Vous êtes un conférencier qui présente le microscope à force atomique. Vous devez répondre aux questions suivantes de votre auditoire en vous appuyant sur les documents qui suivent :

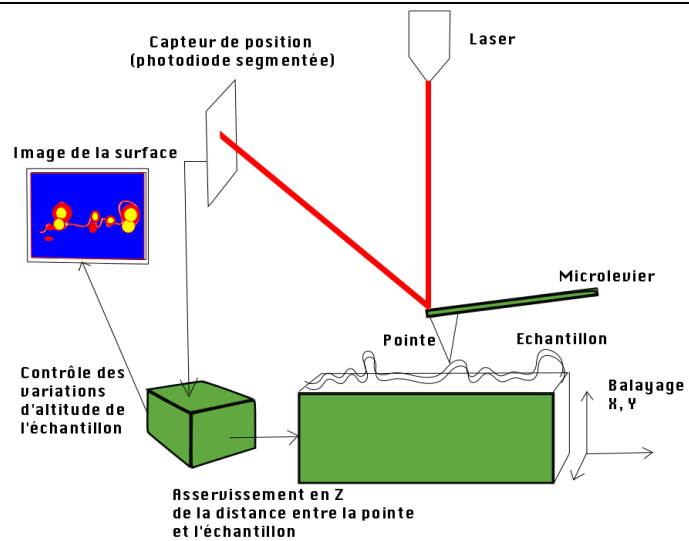
- 1) Quel est le rôle du balayage et de l'ensemble {laser+photodétecteur} ?
- 2) Quel est l'ordre de grandeur de la dimension de la pointe du levier ? Peut-on se piquer le doigt avec ?
- 3) Quel est l'ordre de grandeur du relief enregistré par ce type de microscope ?
- 4) Qu'est ce qui limite la résolution de ce microscope ?
- 5) Pourrait-on observer le mouvement de particules dans un fluide avec ce type de microscope ?
- 6) Ce microscope qui peut fonctionner par contact entre la pointe du levier et la surface à analyser ne présente-t-il pas certains inconvénients (en réalité, cette question est probablement posé par un non néophyte pénible qui veut vous tester...) ?

## Document 1 : principe du microscope à force atomique

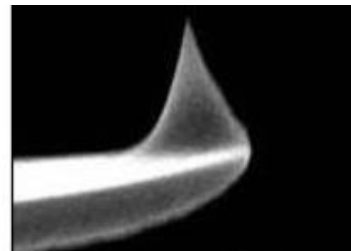
Le microscope à force atomique ou AFM (pour Atomic Force Microscope) est un instrument permettant d'analyser le relief à l'échelle atomique. Doté d'une pointe à extrémité métallique de rayon très faible placée sur un levier flexible, l'AFM enregistre les interactions entre les atomes de la pointe et ceux de la surface à analyser. Il se produit soit une attraction, appelée force de Van des Waals, soit une répulsion (à très faible distance). Ces forces provoquent des déplacements de la pointe, entraînant des déviations du levier qui sont enregistrées via la déviation d'un laser et traitées par ordinateur pour donner le relief.

## Document 2 : schéma du dispositif

(site de l'ENS Lyon)



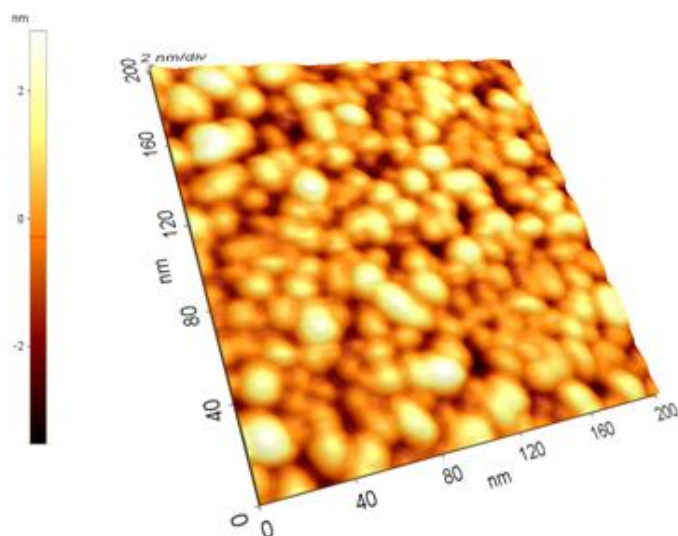
## Document 3 : visualisation du levier et de sa pointe



L'image de gauche a une largeur de 100  $\mu\text{m}$  dans la réalité

(source : [http://senghor-lyc.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/annexe\\_f\\_microscopie\\_a\\_force\\_atmique.pdf](http://senghor-lyc.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/annexe_f_microscopie_a_force_atmique.pdf))

## Document 4 : mesure sur des nanoparticules d'or obtenue par microscopie à force atomique

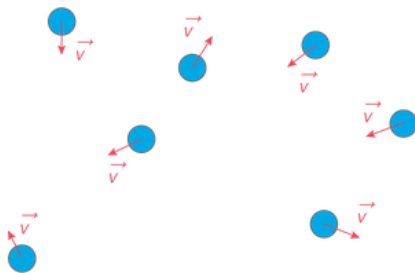


<http://nano.univ-tln.fr/fr/2009/05/microscope-a-force-atmique/>

## Document 5 : un autre type de microscopie : le microscope à effet tunnel

Vidéo du CEA : <http://portail.cea.fr/comprendre/jeunes/Pages/multimedia-editions/videos/technologies/voir-infiniment-petit-outils-pour-nanomonde.aspx>

Pour étudier un système macroscopique, on pourrait appliquer les lois de Newton à chaque entité le constituant. Chacune a une trajectoire avec un vecteur vitesse à chaque instant :



Chaque entité possède alors, dans le référentiel du système considéré :

- une énergie cinétique due à son mouvement. L'énergie cinétique moyenne des particules définit la température du système.
- une énergie potentielle d'interaction due à l'interaction d'ordre ..... entre particules proches.

On ne fait pas cette étude de chaque entité car :

- .....
- .....

### b) Grandeurs d'étude d'un système thermodynamique

- des grandeurs intensives (non proportionnelles au volume occupé par le système) :
  
- des grandeurs énergétique extensives :
- L'énergie mécanique macroscopique du système composée de :
  - L.....
  - L.....
- **L'énergie interne du système notée U** qui est, au niveau macroscopique, la somme de toutes les énergies microscopiques des entités qui composent le système :

C'est l'énergie du système sans que ce dernier ne soit .....et sans qu'il ne .....

Exemple d'un ballon de foot rempli d'air qui chute depuis un balcon :

### c) Variation de l'énergie interne U et température d'un système solide ou liquide indilatable

Au cours de l'évolution d'un système, la variation de l'énergie interne est liée à la variation de la température par la relation suivante :

C dépend de la température en toute rigueur mais peu pour les intervalles de température considéré.

C, par contre, est directement proportionnel à la .....

On définit ainsi la capacité thermique massique  $C_m$  par

Exemples :

substance	Capacité thermique massique (J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )
eau	4185
Aluminium solide	897
huile	2080

Signification :

Remarque : pour un système qui peut se dilater (gaz notamment), un terme en pression intervient dans  $\Delta U$ . Voir supérieur.



**d) Energie totale d'un système**

L'énergie totale d'un système est la somme de toutes les énergies macroscopiques de ce système :

Dans l'exemple d'Einstein et Infeld des montagnes russes réelles, cette énergie totale était constante à condition de prendre comme système .....  
 Mais cette énergie n'est pas forcément constante, elle peut varier.

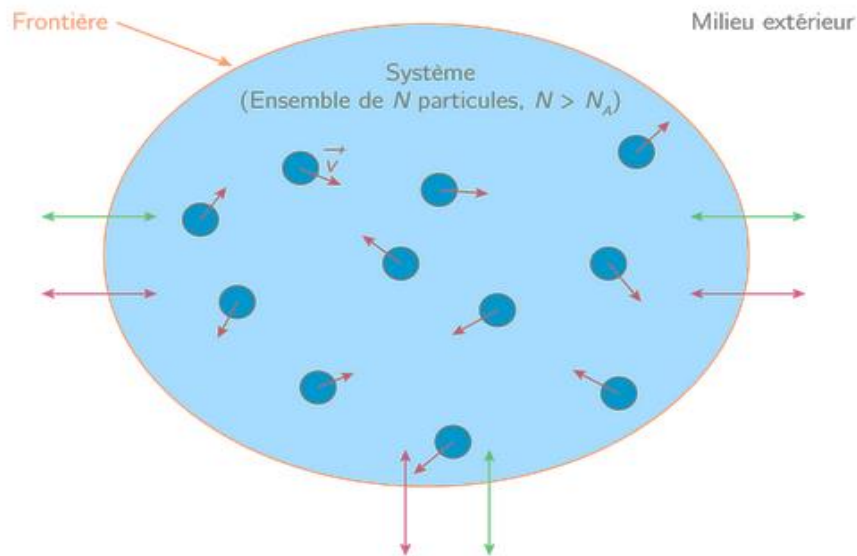
**2) Variation d'énergie totale d'un système (approche du 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique)**

**a) Convention : tout transfert d'énergie est dirigé toujours vers le système et est alors algébrique :**

Une énergie cédée au milieu extérieur est ainsi comptée .....  
 Une énergie reçue du milieu extérieur est comptée .....

**b) Enoncé :**

La variation de l'énergie totale lors de l'évolution d'un système correspond aux échanges d'énergie qui ont lieu aux frontières du système. Elle est donnée par la relation suivante :



$$\Delta E_{\text{totale}} = W + Q = \Delta E_p^{\text{macro}} + \Delta E_c^{\text{macro}} + \underbrace{\sum_{i=1}^n (\Delta E_{c,i}^{\text{micro}} + \Delta E_{p,i}^{\text{micro}})}_{\Delta U = C \cdot \Delta T = C_m \cdot m \cdot \Delta T}$$

- ↔ Echanges énergétiques dues aux travaux des forces  $W$
- ↔ Echanges énergétiques dues aux transferts thermiques  $Q$
- Particule  $i$  possédant l'énergie cinétique  $E_{c,i}^{\text{micro}}$  et l'énergie potentielle d'interaction  $E_{p,i}^{\text{micro}}$

(source : kartable.com)

Remarque : l'année dernière, il n'était question que du cas simpliste suivant :

**c) Terme d'échange n°1 : travail des forces non conservatives**

Voir paragraphe I de ce chapitre

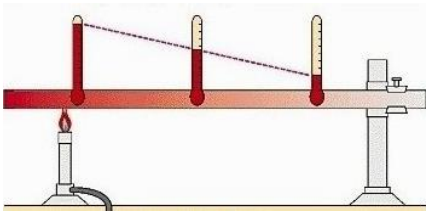
**d) Terme d'échange n°2 : transfert thermique Q**

*i) Irréversibilité*

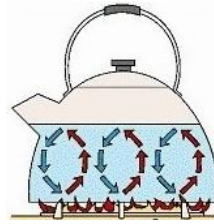
Un transfert thermique est un échange d'énergie thermique **irréversible** qui a lieu d'une source chaude vers une source froide uniquement :

*Remarque* : le caractère irréversible de ce transfert est à la base du 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique (voir supérieur) jusqu'à définir le sens d'écoulement du temps.

*ii) Les ..... transferts thermiques possibles*



Cas 1 : considérer le transfert thermique dans la tige métallique



cas 2 : considérer le transfert thermique dans l'eau



( <http://www.thermoradiances.ch> )

Cas 3 : considérer le transfert thermique émanant du soleil

autre mode ?

Nom du transfert	Transfert par.....	Transfert par .....	Transfert par .....
Illustration			
Description macroscopique			
Description microscopique			

iii) Transfert thermique et flux thermique

Lorsqu'un système reçoit un transfert thermique  $Q = 160 \text{ kJ}$ , il faut différencier le cas où il le reçoit durant  $\Delta t_1 = 35 \text{ min}$  ou  $\Delta t_2 = 2,5 \text{ h}$ .

On introduit alors le flux thermique noté  $\Phi$  (lettre grecque ..... ) défini par :

Calculer les deux flux des deux cas précédents et interpréter les deux situations

.....

.....

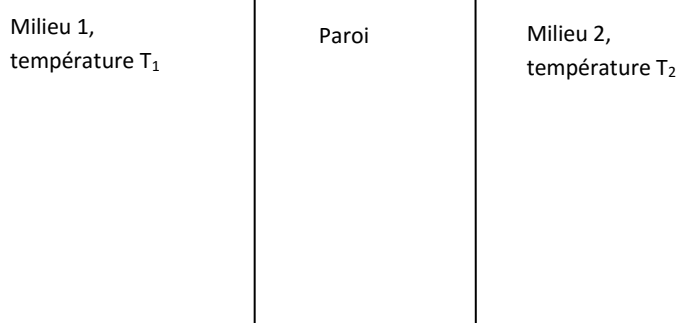
.....

.....

.....

iv) Origine du flux thermique

On considère une paroi séparant deux milieux de température  $T_1$  et  $T_2$  avec  $T_2 > T_1$ , ces températures étant considérées comme fixes. Après une certaine durée de régime transitoire, un régime permanent s'établit avec échange d'énergie entre les deux milieux de température différente via .....



- Dessiner le flux  $\Phi$  positif reçu par la paroi et le flux  $\Phi'$  négatif qu'elle reçoit. Que peut-on dire de ces deux flux en régime permanent ?
- Dessiner alors plutôt le flux  $\Phi$  positif reçu par la paroi et le flux  $\Phi$  positif qu'elle perd.
- Le flux  $\Phi$  semble ainsi traverser la .....
- Instinctivement, quelle est l'origine (ou la cause) de ce flux thermique ?  
.....
- Analogie avec le flux de charge en électricité :
  - On considère une tige d'un certain matériau d'extrémité A et B et on observe un flux de charge (positive donc un flux positif) se dirigeant de B vers A : comment s'appelle un flux de charge ?.....



- Instinctivement, quelle est l'origine (ou la cause) de ce flux de charge ? (voir aussi Einstein et Infeld) ?  
.....
- Quelle relation existe-t-il entre la cause (ici ..... ) et la conséquence (.....) ?  
.....

conduction	électrique	thermique
Phénomène observé	Transfert de	Transfert de
Cause de ce phénomène		
Conséquence de la cause		
Introduction du rapport : <u>cause du phénomène</u> <u>conséquence du phénomène</u>		
Nom de ce rapport		
Ce rapport traduit		

v) *Un peu plus loin avec la résistance thermique : dépendance des caractéristiques de la paroi*

A travers une paroi, en régime permanent,

$$\Phi = \dots\dots\dots$$

Or, intuitivement, de quoi dépend le flux thermique ?

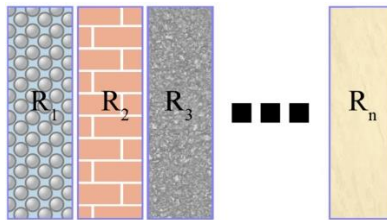
- 
- 
- 
- 

matériau	Conductivité thermique (dans le SI $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
sapin	0,15
placoplâtre	0,46
béton	1,4
Laine de verre	0,04

$\Phi$  se met ainsi sous la forme, très souvent, (loi phénoménologique de Fick unidimensionnelle) :

La résistance thermique de la paroi prend alors pour expression :

vi) *Plus loin avec les résistances thermiques : association de « parois » les unes sur les autres.*



Remarque : double vitrage

