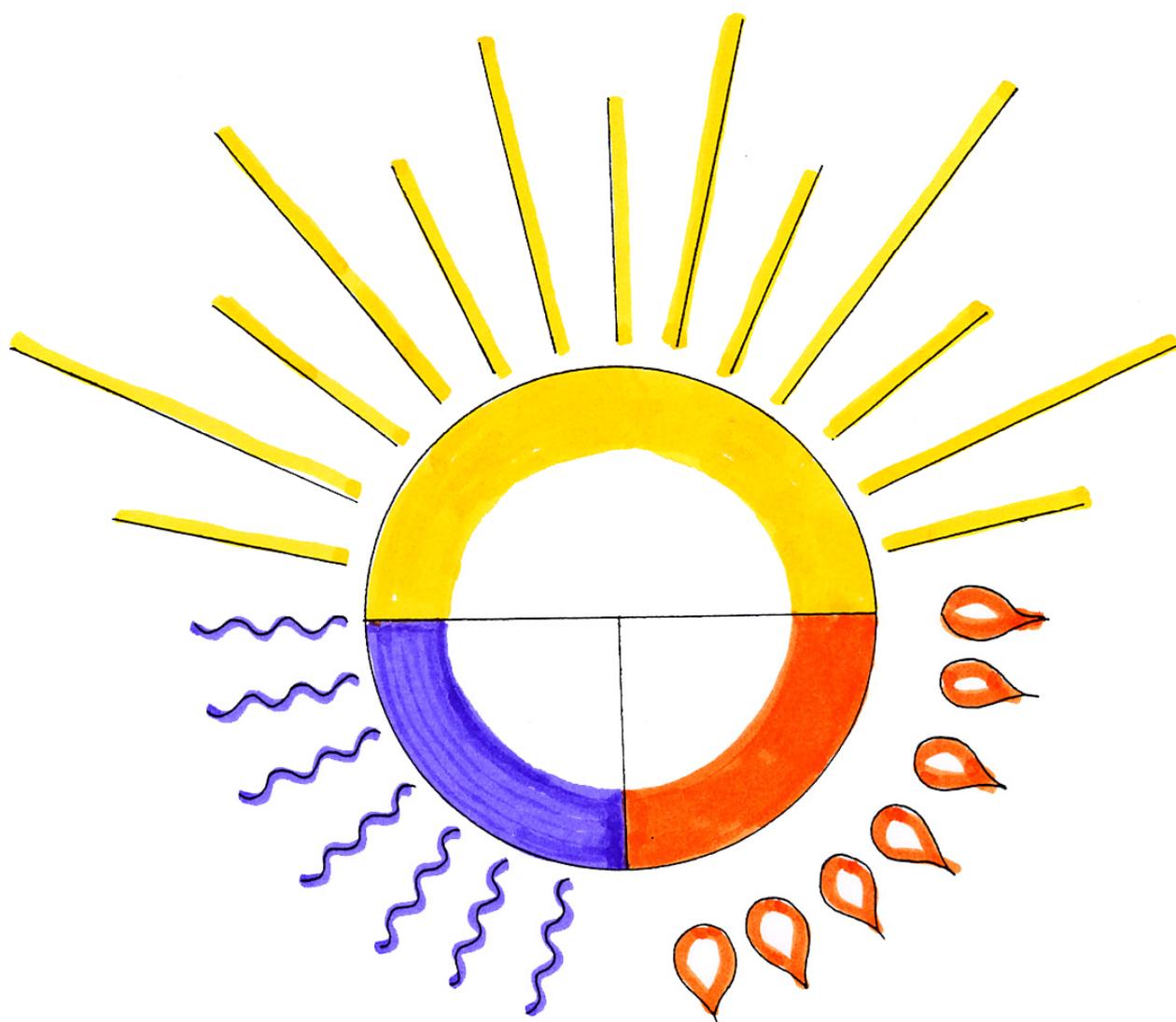


# L'énergie

un parcours



J.-E. Buchter

## Les transformations de l'énergie

Diverses chaînes de transformation de l'énergie sont montées dans la salle.  
L'énergie est **fournie, transformée, transportée, stockée, dispersée**.

Elle passe par les formes: **mécanique, électrique, élastique, rayonnante, calorique (chaleur), musculaire, chimique, potentielle (masse surélevée), cinétique (masse en mouvement), etc.**

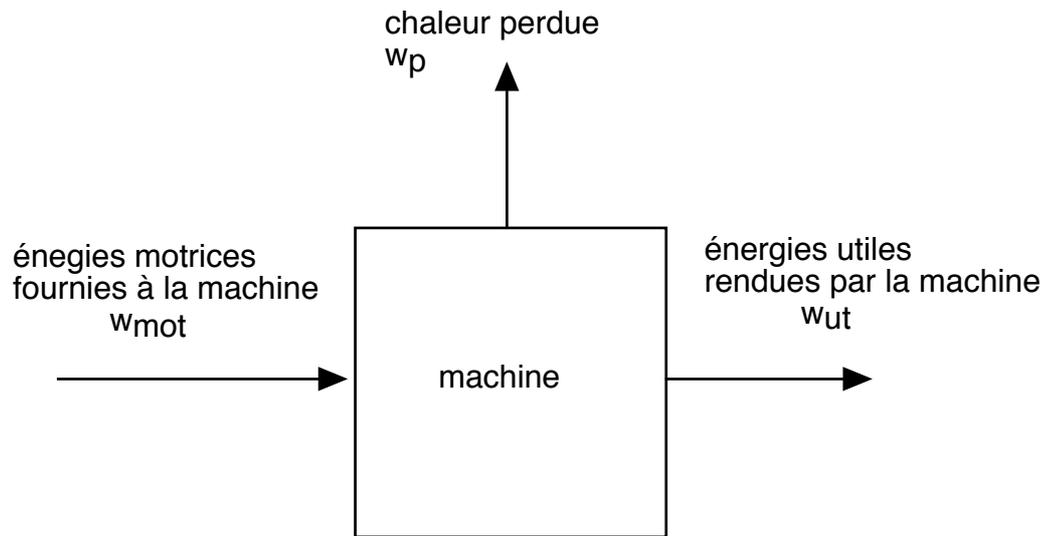
A chaque poste:

- a) indiquer les formes successives prises par l'énergie et les organes ou éléments de machines qui en sont le siège.
  - b) indiquer pour chaque organe ou élément s'il fournit, transforme, transporte ou stocke l'énergie.
  - c) indiquer si le procédé est réversible.
- 
- 1) **Manivelle - dynamo - cordons - moteur électrique.**
  - 2) **Dynamo - cordons - ampoule.**
  - 3) **Prise secteur - cordon - ampoule électrique - ballon noirci et rempli d'eau.**
  - 4) **Pendule.**
  - 5) **Billes suspendues de Newton.**
  - 6) **Catapulte** (ou engin moins perturbateur, par exemple rail guidant une bille lancée par un ressort tendu et percutant un objet déformable en fin de course).
  - 7) **Pile Volta** (avec lunettes de protection!).
  - 8) **Accumulateur au plomb** (idem).
  - 9) **Voltamètre** ( $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$ ).
  - 10) **Turbine à vapeur.**
  - 11) **Plongeur chauffant de l'eau puis la portant à ébullition.**
  - 12) **Capteur solaire photovoltaïque entraînant un ventilateur.**
  - 13) **Tambour à frottement** (frein à tambour ou appareil pour le TP «tambour»).
  - 14) **Palan à main hissant une charge.**

Après les expériences:

- d) imaginer d'autres chaînes énergétiques, les esquisser et les réaliser si possible par un montage.
- e) décrire les chaînes énergétiques naturelles dans le domaine des plantes, des animaux, de la météorologie, etc.

Utiliser ce schéma pour symboliser différentes machines, organes, usines, appareils ménagers, etc. et préciser ce qui entre et ce qui sort de la boîte carrée.

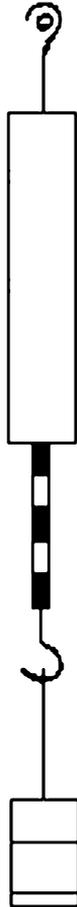


Nota: L'énergie sera symbolisée par **w** minuscule, symbole qu'il s'agira de ne pas confondre avec le **W** majuscule qui symbolisera le Watt, unité de puissance.

**Mesure d'une force, le dynamomètre**  
**Force de la pesanteur (poids)**

*Rappels et compléments:*

- *définition de la masse et de ses unités.*
- *observation d'un dynamomètre et de sa graduation en Newton.*

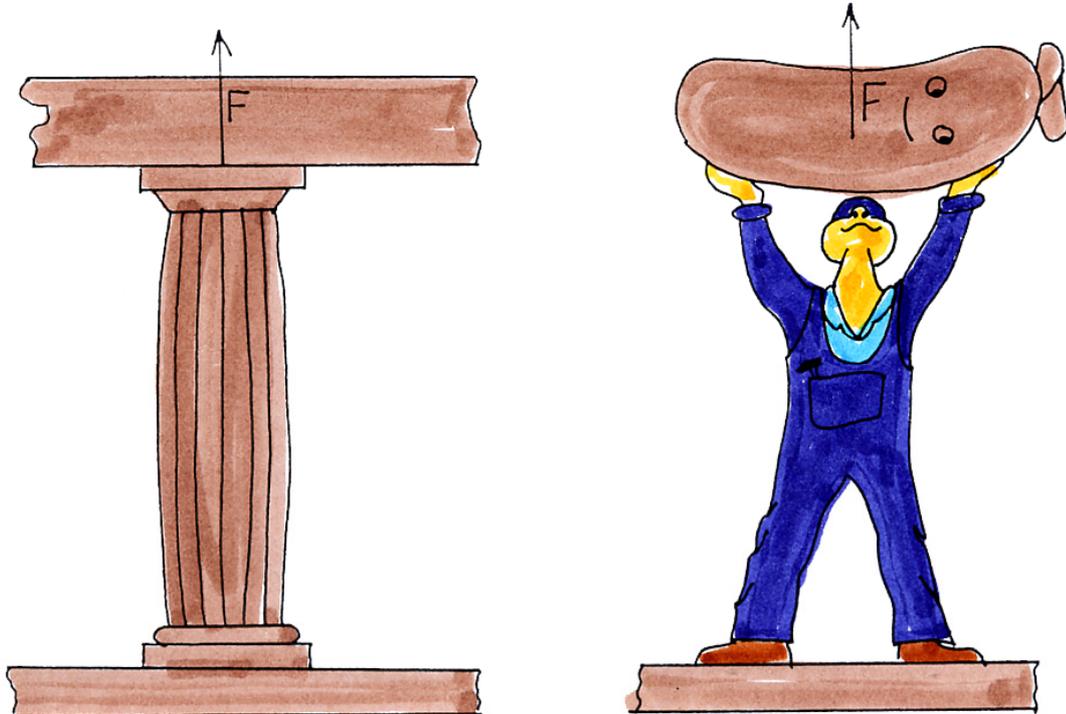


Suspendre une masse (quantité de matière) de 1 kg à un dynamomètre, après avoir appris à le **régler dans la position** où il va fonctionner.

Suspendre d'autres masses

- Quelle est la **force de la pesanteur (poids) par kg** de matière? (faire une moyenne sur plusieurs mesures)
- Si on tient le dynamomètre à la main, effectue-t-on un **travail** au sens physique du terme?
- Si on tient le dynamomètre à la main, effectue-t-on un travail au sens scolaire du terme?
- Quelle force de la pesanteur (poids) s'exerce sur une masse de 5 kg?  
Et sur une masse de 15 g?

## La force



La force en elle-même ne suppose pas qu'il y ait un mouvement ou un «travail». Elle peut provoquer une mise en mouvement, mais elle peut rester des siècles immobile, statique, soutenant par exemple le fronton d'un temple.

Un athlète soutenant une haltère ou un ouvrier tenant un sac exercent une force au repos. De même un ressort tendu.

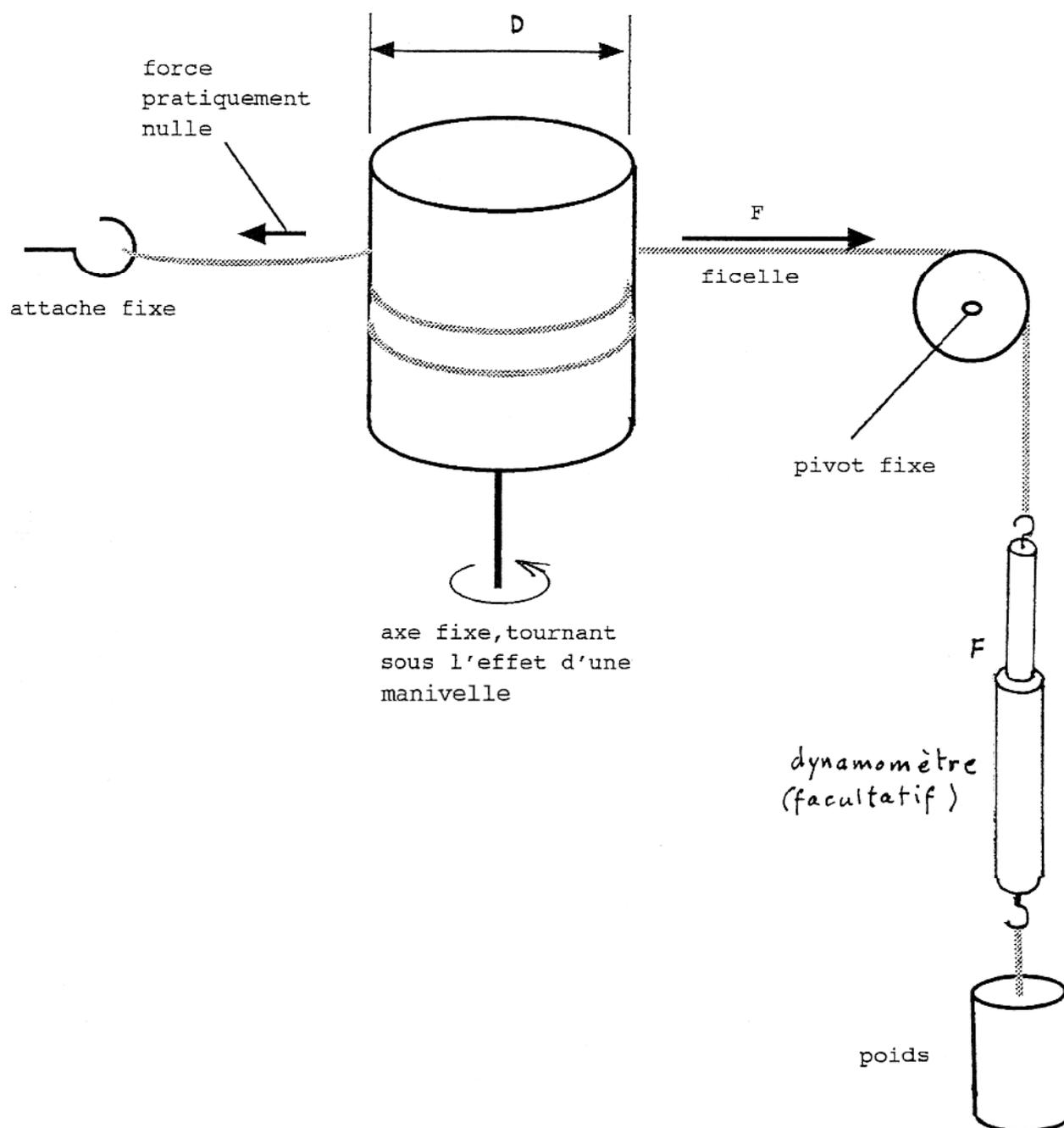
Unité de force:            **Le Newton [N]**

Sur Terre, la force de la pesanteur agissant sur une masse de un kilogramme est de

**9,81 N**

Def: On appelle **poinds** d'un corps la force que la pesanteur exerce sur lui.

## Le Tambour I

Conversion du travail en chaleur  
par le frottement

Le cylindre tournant contient une masse de liquide  $m$  et a un diamètre  $D$ . La ficelle, qui fait un ou deux tours autour du cylindre, subit la traction  $F$  de la part du poids. L'autre brin n'est pratiquement pas tendu, grâce au frottement.

On fait pivoter le cylindre en comptant le nombre de tours  $n$ . On mesure les températures du cylindre avant et après l'opération ( $T_1$  et  $T_2$ ).

TP tambour I, essais:

Etudier l'effet de la variation d'un «paramètre» sur la **montée de température  $\Delta T$**  du liquide.

$$(\Delta T = T_2 - T_1)$$

Prendre un liquide approchant la température ambiante (pourquoi?).

Ne **varier qu'un paramètre** à la fois et dresser un **tableau de mesures**.

En tirer un **graphe** de  $\Delta T$  en fonction de ce paramètre.

Avant les essais, formuler des **conjectures** sur le genre de dépendance entre  $\Delta T$  et le paramètre choisi:

- $\Delta T$  sera-t-il proportionnel au paramètre choisi?
- $\Delta T$  sera-t-il inversement proportionnel au paramètre choisi?
- $\Delta T$  sera-t-il dépendant du paramètre choisi, selon une loi autre que les précédentes?
- $\Delta T$  sera-t-il dépendant du paramètre choisi, sans qu'une loi ne puisse être énoncée?
- $\Delta T$  sera-t-il indépendant du paramètre choisi?

Exemple:

Etudier l'effet de la **force** de traction  $F$  sur  $\Delta T$ .

Si on double la force, puis on triple la force, etc., quel sera l'effet sur la montée de température? Essayer de s'imaginer le résultat avant de faire la mesure.

Autres exemples de paramètres dont l'influence peut être étudiée:

- **nombre de tours** de manivelle
- **masse de liquide** dans le tambour
- **nature du liquide** (caractérisée par quel paramètre?)
- nombre de **tours de ficelle** autour du tambour
- **temps d'exécution** de l'essai
- etc.

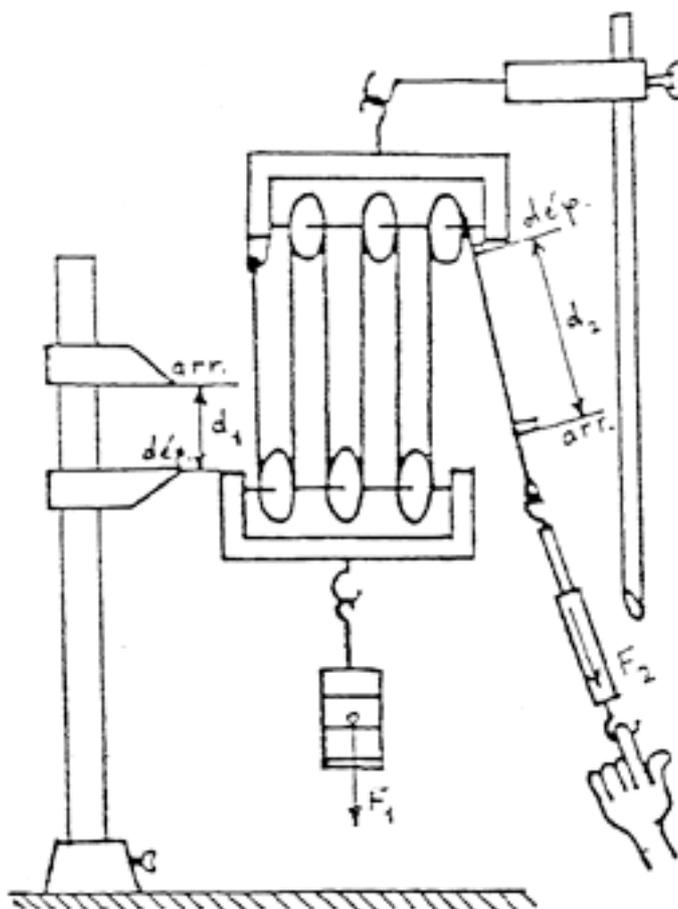
Chaque groupe de travail se concentrera sur l'étude de l'influence d'un paramètre. Puis chaque groupe vérifiera, amendera ou invalidera les conjectures qu'il aura faites au départ. On mettra alors les conclusions des essais à la disposition de toute la classe.

Toute la classe se mettra alors à réfléchir sur le thème suivant:

1. Quels sont les paramètres qui permettent de **quantifier l'énergie qui entre** dans la machine?
2. Quels sont les paramètres qui permettent de **quantifier la chaleur qui en résulte?**
3. Peut-on proposer des **pistes pour le calcul** de ces énergies?

## Le palan I

la transformation de l'énergie mécanique à frottement très faible



1) Décrire ce que vous ressentez lorsque vous soulevez une même masse

- avec une poulie
- avec un palan simple (une poulie par chape)
- avec un palan double
- avec un palan triple

2) Décrire le chemin que parcourt votre main pour faire monter la charge de 10 cm

- avec une poulie
- avec un palan simple
- avec un palan double
- avec un palan triple

3) Question:

Si on peut gagner de la force grâce au palan, cet avantage ne se «paie»-t-il pas?

**Conjecture:**

Essayer à ce stade déjà, d'énoncer une conjecture liant:

- la **force motrice** (donnée par la main), et la **force utile** (le poids soulevé),
- le **chemin de la force motrice** et le **chemin de la force utile**.

L'observation des ficelles, qui sont toutes tendues avec la même force (démontrer par une petite manipulation que la poulie ne change pas l'intensité de la force), peut guider vers une règle de calcul. De même, le fait que la longueur de ficelle tirée par la main est prise exactement sur le raccourcissement des brins entre les poulies.

**Essais:**

On peut vérifier cette conjecture, ou s'aider à en faire une, en procédant aux mesures suivantes:

Lorsque on tire sur un brin du palan, mesurer la force (**force motrice**) à l'aide d'un dynamomètre.

Evaluer aussi la force de la pesanteur agissant sur la charge utile (**force utile**) (en y incluant la masse de la chape mobile!)

Mesurer ensuite le chemin parcouru par la main (**chemin de la force motrice**).

Mesurer le chemin parcouru par la charge (**chemin de la force utile**)

Faire d'autres essais du même genre en variant les masses suspendues (doubler, tripler, etc.).

Varié aussi les déplacements.

Chaque groupe de travail utilisera un palan de type différent, ceci permettant de varier le genre et la démultiplication des palans.

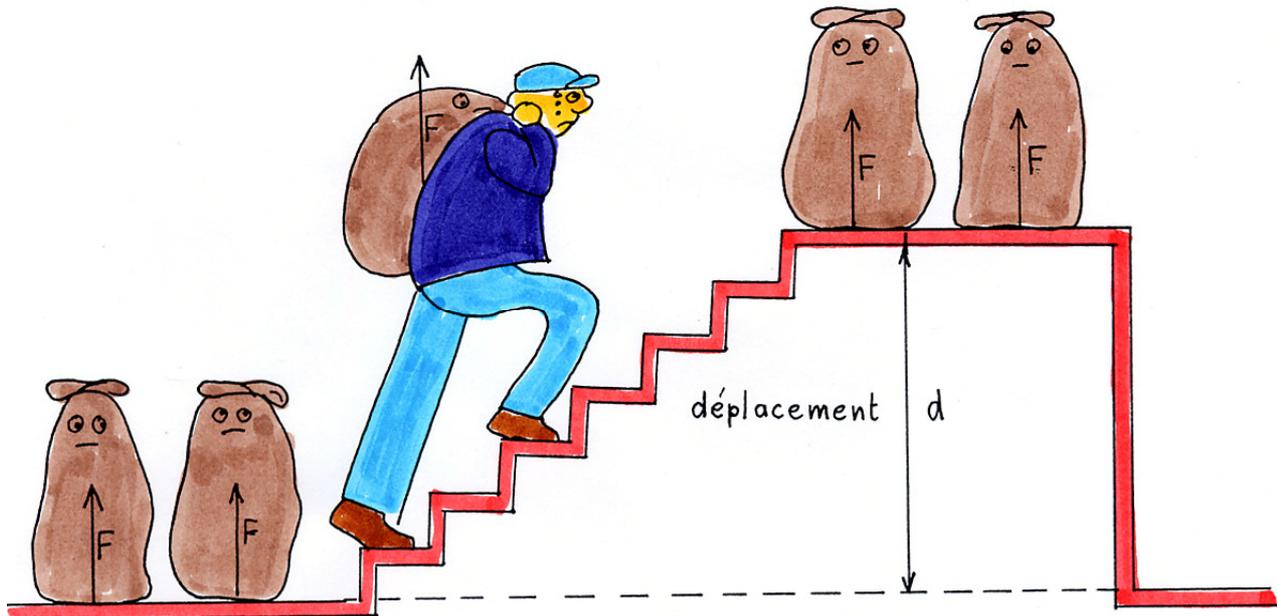
**Conclusion:**

Qu'avez-vous émis comme conjectures et dans quelle mesure les essais les ont-elles vérifiées ou invalidées?

\*\*\*

Un TP ultérieur permettra l'exploration plus systématique des relations entre force et déplacement. On y introduira l'évaluation de l'effet du frottement grâce à la notion de «rendement», ainsi que l'étude de l'inversion de la machine.

# Le Travail



$$\text{travail} = \text{force} \cdot \text{déplacement}$$
$$w = f \cdot d$$

Au moment où l'ouvrier se met à gravir un escalier, on peut parler de travail, consistant à élever un sac.

Le travail, au sens physique du terme, est le résultat de la multiplication de la force et du déplacement dans la direction de la force (ici l'élévation du sac).

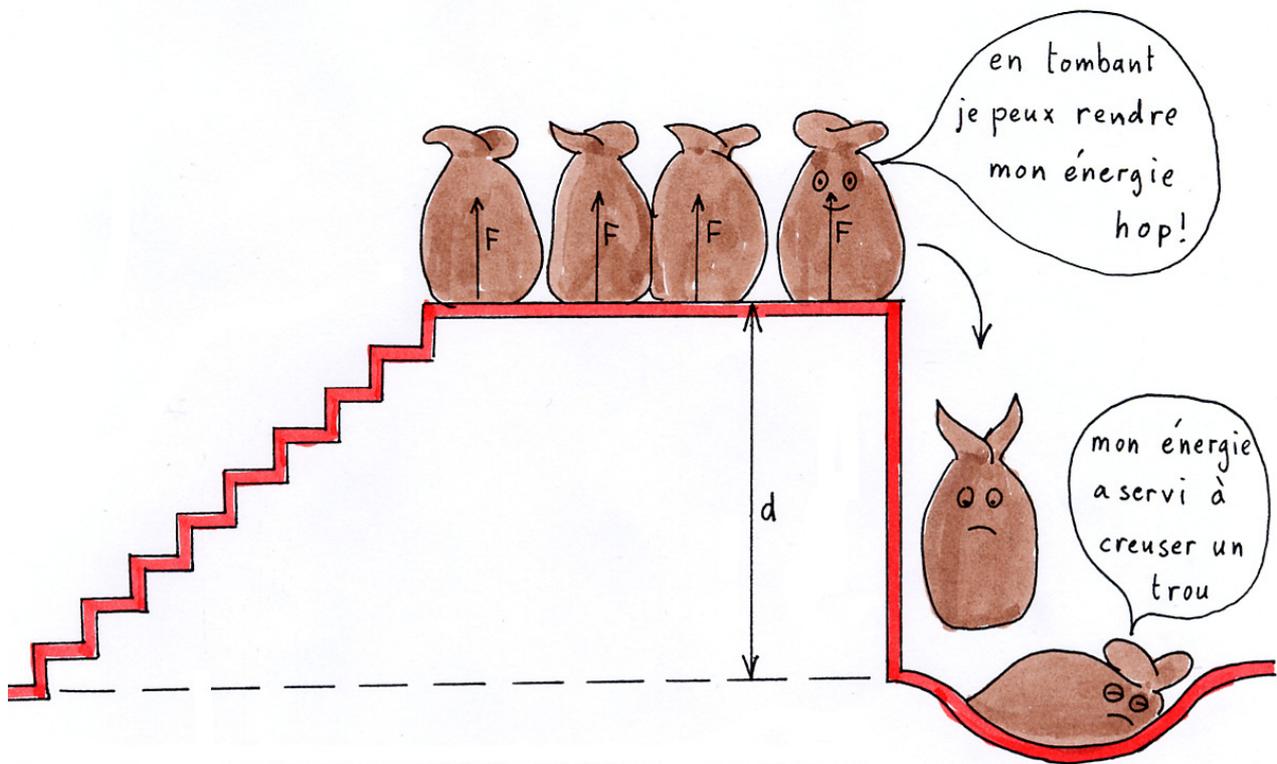
Unité de travail:

$$1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Joule [J]}$$

Donc, si un ouvrier soulève un sac de 20 kg, il emploie une force d'environ 200 N, et s'il monte un étage de 2,5 m, il aura fait un travail de:

$$w = 200 \text{ N} \cdot 2,5 \text{ m} = 500 \text{ Nm} = 500 \text{ J}$$

# L'énergie



énergie = travail  
qui peut être accumulé, rendu ou transformé

$$\text{ici: } e = f \cdot d \cdot \text{nombre de sacs} = f \cdot d \cdot n$$

L'énergie accumulée dans ces sacs est le travail que le porteur a accumulé en les hissant sur l'escalier.

### Commentaire de la planche sur «l'énergie»

L'énergie a la forme d'une **énergie potentielle** (résidant dans la hauteur de cette masse de sacs soumis à la pesanteur).

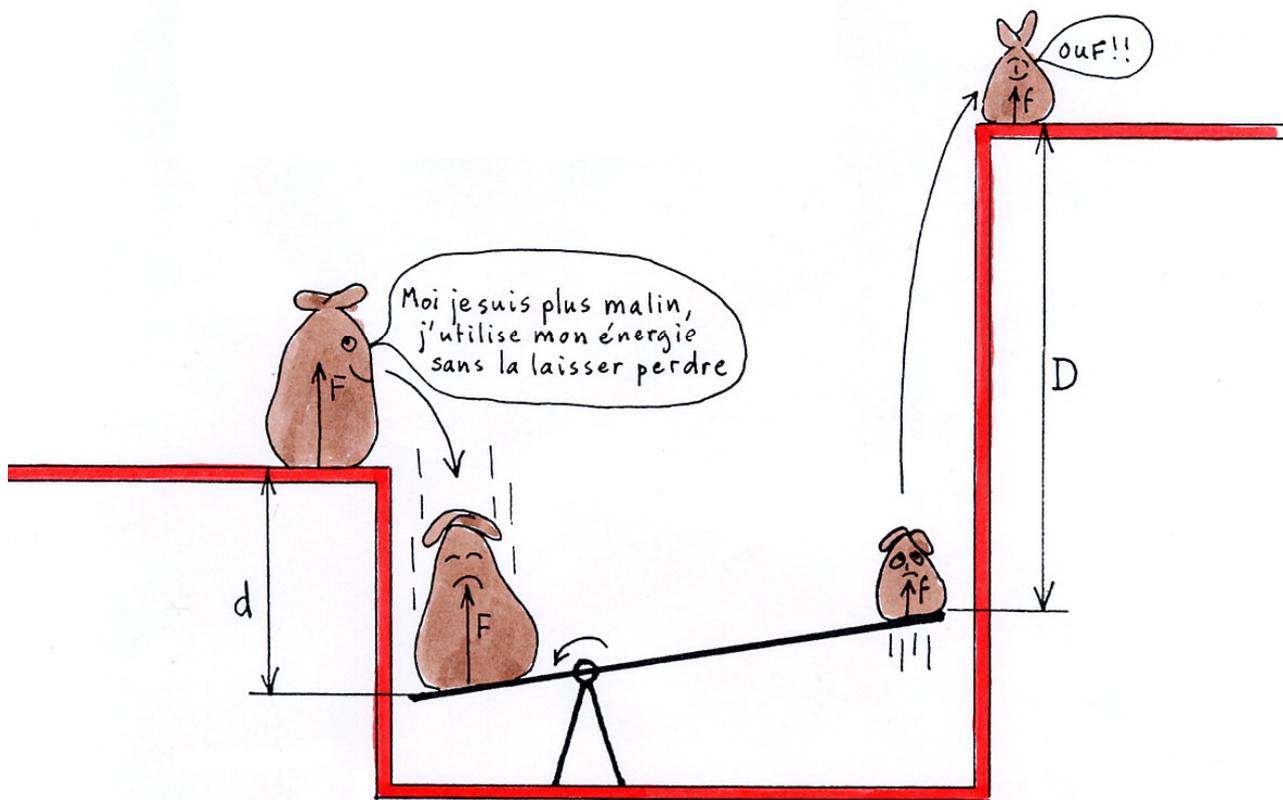
Elle peut se transformer en **énergie cinétique** (résidant dans la vitesse de chute de la masse des sacs).

Elle peut enfin se transformer en **chaleur** ou **énergie thermique** (résidant dans l'échauffement de la masse du sac, due au frottement à l'arrivée)

La suite du cours nous montrera de plus en plus clairement que la quantité d'énergie reste constamment la même au cours du temps, malgré ses transformations. Ici, elle reste égale à  $F \cdot d \cdot n$ . Elle ne s'anéantit jamais, même si elle se répand dans le cosmos. C'est la loi, ou plutôt le «postulat» de la **conservation** de l'énergie. Mais il y a une «**dégradation**» progressive ou brutale vers la chaleur.

L'**unité d'énergie** est évidemment l'unité de travail: le **Joule**.

# La transformation de l'énergie



$$F \cdot d = f \cdot D$$

énergie donnée = énergie rendue  
s'il n'y a pas de frottement!

L'énergie  $F \cdot d$  peut se transformer en une autre, par exemple  $f \cdot D$ , où  $f$  est plus petit que  $F$  et  $D$  plus grand que  $d$ .

### Commentaire de la planche «la transformation de l'énergie»

L'énergie peut aussi se transformer en une énergie électrique, ou en une énergie chimique, ou en énergie rayonnante, etc. mais elle correspondra toujours à un travail mécanique égal à  $F \cdot d$  s'exprimant en **Joules**. Les forces et les distances ne seront alors plus visibles, mais existeront à l'échelle d'atomes, de particules ou disparaîtront même des modes de représentation que notre vie courante nous permet d'imaginer, pour réapparaître peut-être sous une forme compréhensible!

Quand le sac est en-haut, son énergie réside dans sa hauteur, c'est l'«**énergie potentielle**»  $F \cdot d$ . Quand le sac tombe, son énergie réside dans sa vitesse, elle s'est transformée en «**énergie cinétique**».

Celle-ci peut se retransformer en énergie potentielle, égale à l'énergie de départ:  $f \cdot D = F \cdot d$

Cependant, une partie (minime dans le cas d'une «bonne» machine) de l'énergie initiale, se transforme en chaleur par le frottement. On a donc en réalité:

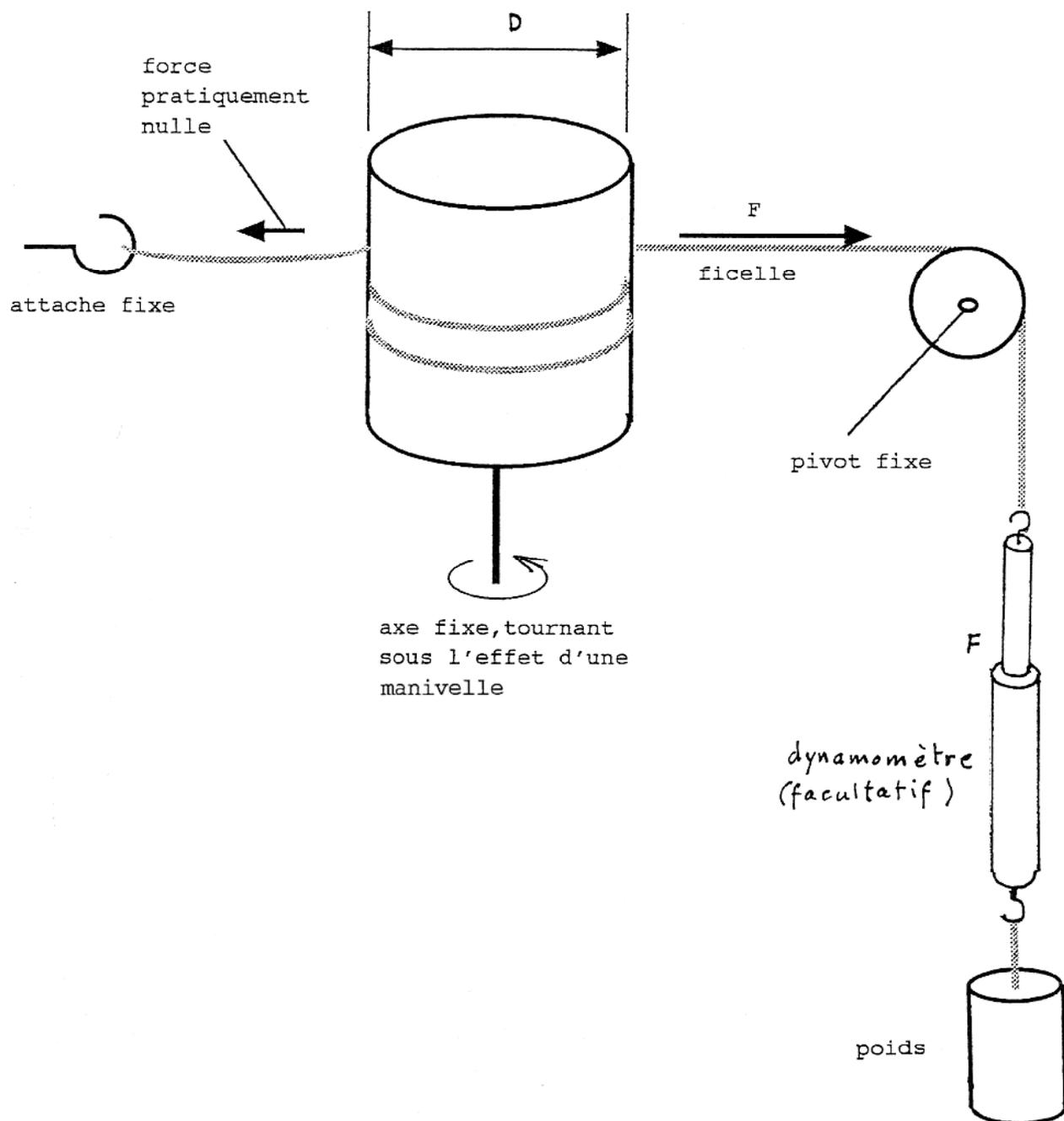
$$f \cdot D < F \cdot d$$

### Le travail (énergie mécanique)

1. Un cheval tire un char sur une distance de 350 m, exerçant sur celui-ci une force de 800 N. Quel travail effectue-t-il?
2. Pour armer une arbalète, on exerce perpendiculairement à la corde une force pratiquement constante de 120 N jusqu'à obtenir un déplacement de 14 cm le long du manche.
  - a) Quelle quantité d'énergie mécanique est ainsi emmagasinée?
  - b) Essayer de caractériser sous quelle forme elle est emmagasinée.
  - c) Sous quelle forme cette énergie sera-t-elle transformée lors du tir?
  - d) Sous quelle forme cette énergie sera-t-elle transformée lorsque la flèche percutera la cible?
3. Rappel: La pesanteur terrestre exerce sur 1 kg de matière une force de 9,81 N
  - a) Imaginer un travail mettant en œuvre **un Joule**.
  - b) Quelle est la quantité de travail consistant à élever une plaque de beurre de 100 g depuis le sol jusque sur une table de hauteur 1 m ?
  - c) Quelles formes prend successivement cette énergie si la plaque tombe de la table sur le sol?
4.
  - a) Quelle énergie doit-on donner à un bidon de mortier de masse 15 kg pour le monter de quatre étages, chaque étage ayant une hauteur de 3,2 m ?
  - b) A quelle hauteur peut-on amener ce bidon à l'aide d'une énergie de 2000 J ?
  - c) Quelle masse pourrait-on élever de 12 m à l'aide de 3000 J ?

### Le tambour II

Conversion du travail en chaleur par le frottement.  
Essais quantitatifs.



On se souvient des essais élémentaires déjà effectués sous «Tambour I».

Les essais suivants permettront de répondre très clairement aux questions qu'on s'était posées à l'issue de ce TP, en utilisant les notions de chaleur (quantifiées par la calorie) et de travail (quantifié par le J).

Le **travail** est donné par la main qui tourne la manivelle et il se transforme en chaleur par le frottement de la ficelle sur le tambour. Cette **chaleur** est prise par l'eau et on peut donc aisément la mesurer en calories.

Mais le travail est aussi mesurable en Joules grâce à la force de pesanteur (poids) donnée par la masse suspendue. Cette force, transmise à la ficelle, se déplace en frottant contre le tambour. Son chemin parcouru sur le tambour permettra de calculer le travail.

On va s'efforcer de voir si la chaleur produite est proportionnelle au travail donné, et, si c'est le cas, quel est le coefficient de proportionnalité.

Le cylindre tournant contient une masse d'eau **m** et a un diamètre **D**. La ficelle, qui fait un ou deux tours autour du cylindre, subit la traction **F** de la part du poids. L'autre brin n'est pratiquement pas tendu, grâce au frottement.

On fait pivoter le cylindre en comptant le nombre de tours **n**. On mesure les températures du cylindre avant et après l'opération (**T<sub>1</sub>** et **T<sub>2</sub>**).

Rappels:

def. Le **travail w** d'une force est le produit de l'intensité **F** de cette force et de son déplacement **d** dans sa propre direction.

$$w = F \cdot d \quad (w \text{ comme «work»!)$$

def. Unité: le **Joule [J]** est le travail fourni par une force de **1N** se déplaçant de **1m** (dans sa propre direction)

$$1 \text{ [J]} = 1 \text{ [N]} \cdot 1 \text{ [m]} = 1 \text{ [Nm]}$$

Calcul du **Travail**:

Le déplacement **d** de la force **F** sur la périphérie du cylindre est de:

$$\mathbf{d} = \pi \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{n}$$

Le **travail** de la force frottant sur le cylindre est de:

$$\mathbf{w} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d} = \mathbf{F} \cdot (\pi \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{n})$$

Calcul de la **chaleur**:

La chaleur qui permet de chauffer 1g d'eau de 1°C est le **calorie (cal)**

Le cylindre absorbe le travail de frottement et le transforme en chaleur.

Ce cylindre contient une masse **m** d'eau et il est isolé.

Soit  $\Delta T = T_2 - T_1$  la différence de température subie par l'eau.

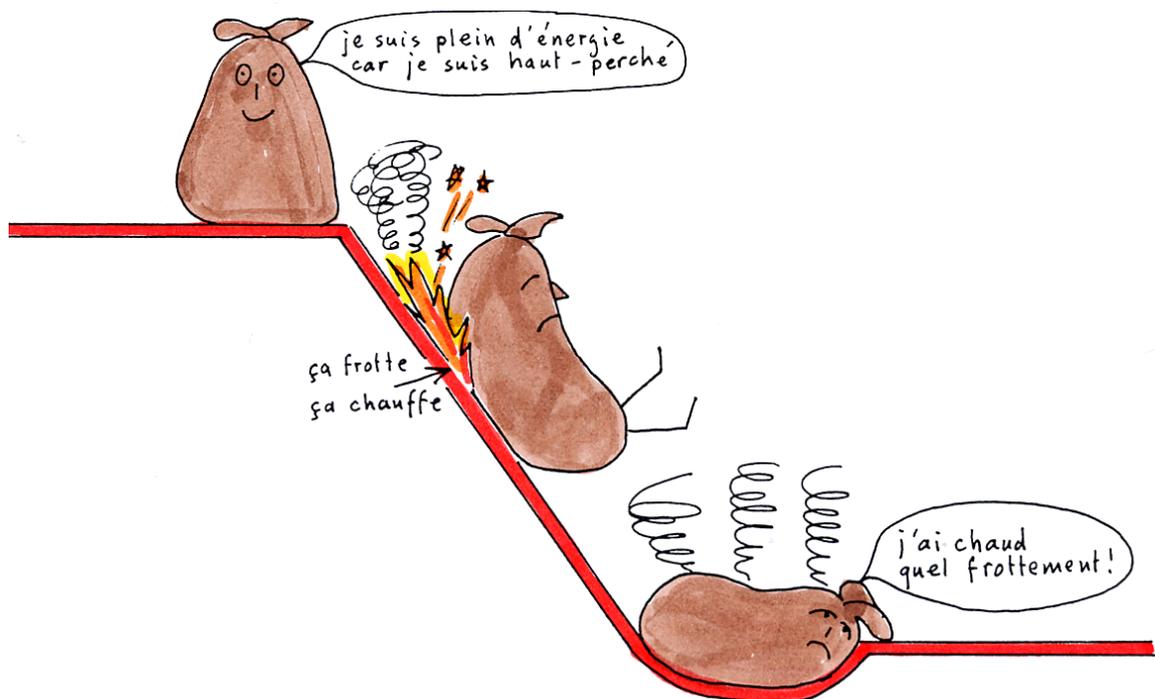
La **chaleur q** prise par l'eau est alors (en calories):

$$\mathbf{q} = \mathbf{m} \cdot \Delta T$$

**Questions:**

1. Calculer le **travail** de la force et la **chaleur** produite.
2. Calculer le rapport entre chaleur produite et travail dépensé ( $q / w$ ).
3. La valeur officielle donnée par les tables scientifiques est de **0,24 cal / J**.  
Calculer l'écart absolu et l'écart relatif entre cette valeur et la votre
4. Quelles peuvent être les **incertitudes de mesure** amenant cet écart? Essayer de les évaluer.
5. Quelles sources d'**erreurs systématiques** peuvent agir sur le résultat, et comment les constate-t-on? Agissent-elles dans un sens prévisible?

## La transformation de l'énergie en chaleur par le frottement



Tôt ou tard, toute énergie est transformée en chaleur par ce seigneur des enfers: le frottement

On a vu que:

$$1\text{J} \rightarrow 0,24 \text{ cal}$$

Autrement dit, une plaque de chocolat tombant d'une table provoque un échauffement capable d'élever la température de 1g d'eau ( $1\text{cm}^3$ ) de  $0,24^\circ\text{C}$  !

Nous allons maintenant franchir (audacieusement) un pas de plus: On émettra la conjecture que le travail et la chaleur qu'il produit sont deux formes de la même énergie. Même si, comme on le verra, ces deux formes ne sont pas équivalentes à tout point de vue, la quantité d'énergie contenue dans 0,24 cal sera considérée comme étant égale à 1 Joule. On pourrait alors dire que lors d'un frottement, aucune énergie n'a disparu! Cette affirmation sera étayée par plusieurs essais à venir. On posera alors l'égalité:

$$1\text{J} = 0,24 \text{ cal}$$

### Chaleur et énergie

1. On amène une chaleur de 500 cal dans 3 dl d'eau à 21° contenue dans un thermos. Quelle sera la température finale?
2. On refroidit ensuite cette eau en lui enlevant 700 J. Quelle température atteindra-t-elle?
3. Une casserole contient 2 litres d'eau qui montent de 20° à 82°. Calculer l'apport de chaleur
  - a. en cal
  - b. en J
  - c. en Wh, sachant que **1 Wh = 3600 J**
4. Calculer en kWh l'énergie électrique nécessaire au chauffage de 12° à 20° d'une piscine de dimensions 10m x 20m et de profondeur 2m. Quel est le coût de ce chauffage au tarif de 0,15 fr / kWh ?

5. **T.P.**

**Vérifier si la conversion  $1\text{ J} = 0,24\text{ cal}$  est valable pour l'énergie électrique.**

Décrire la méthode, les mesures et les calculs.

Evaluer l'écart entre votre valeur et la valeur officielle ci-dessus, calculer l'écart relatif et tenter de l'expliquer.

6. Vérifier la conversion  $1\text{ J} = 0,24\text{ cal}$  sur les données des emballages alimentaires.
7. Un moteur électrique a consommé 2,6 kWh pour faire un travail. Le 15 % de cette énergie a été transformée en chaleur. Il est refroidi par de l'eau qui entre dans son manteau à 15° et en sort à 22°. Quelle quantité d'eau a consommé son refroidissement?
8. Observation:  
Regarder des particules de fumée au microscope.  
  
Sur la base de cette observation, essayer de se faire une idée de ce qu'est la chaleur.
9. Une chute d'eau produit de l'électricité.  
En une seconde, il passe 3 m<sup>3</sup> d'eau qui proviennent de 400 m plus haut que la turbine. Les machines perdent 8% du travail en chaleur.
  - a. Quel est le travail de la chute en une seconde ?
  - b. Quelle est la chaleur produite ?
  - c. Quelle est l'élévation de la température de l'eau, si on suppose que toute la chaleur est prise par elle ?

### Diverses formes de l'énergie mécanique.

**L'énergie se transforme et s'accumule** sous des **formes** où le travail mécanique est visible, par exemple:

- ressorts tendus (énergie élastique)
- charges surélevées (énergie potentielle)
- vitesse de projectiles (énergie cinétique) (\*)

mais souvent le travail mécanique n'est plus directement perceptible, car il est réparti dans des particules microscopiques ou submicroscopiques (par ex. électrons ou molécules) qui exercent des forces et des mouvements imperceptibles par exemple:

- énergie chimique (combustibles, aliments, ...)
- énergie électrique
- énergie de vaporisation et de fusion
- chaleur (énergie cinétique désordonnée) (Expérience sur la fumée)

(\*) nota:

Lorsqu'un projectile est en mouvement uniforme, aucune force n'agit sur lui. Il ne travaille pas. Mais lorsqu'il change son mouvement, par exemple lorsqu'une auto percute un mur, on s'aperçoit que la modification de sa vitesse provoque des forces et des déplacements, donc du travail. L'énergie cinétique se transforme alors en un «travail de déformation» qui écrase la caisse de l'auto.

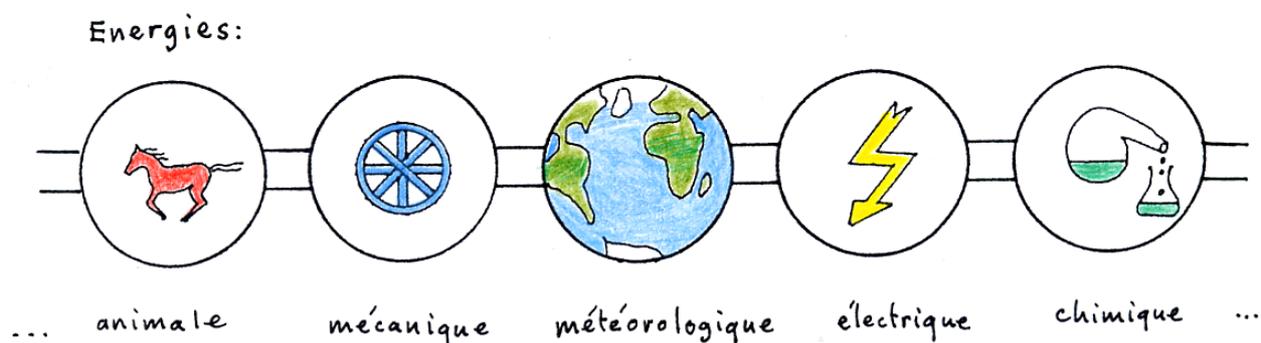
On pourra prouver plus tard que cette **énergie cinétique  $e_c$**  contenue dans une masse  $m$  en mouvement, vaut  $\frac{m \cdot v^2}{2}$

Nous allons tout au long de ce cours approcher de plus en plus un des principes fondamentaux de la nature:

### la conservation de l'énergie

Ce principe dit que:

**jamais une énergie ne peut apparaître ni disparaître. Elle ne peut que se transformer en une autre forme d'énergie.**



Les scientifiques n'ont jamais pu prouver ce «postulat». Ils n'ont pu que le constater sans cesse, en faisant des mesures de plus en plus précises. Ils n'ont jamais décelé d'exception.

Il y a bien d'autres principes de conservation, mais nous allons nous limiter dans ce cours au principe qui concerne l'énergie.

Nous allons faire comme les scientifiques et constater au travers de multiples expériences que plus nos mesures sont précises et plus ce principe apparaît nettement!

## La transformation inverse: chaleur — énergie

### La machine thermique

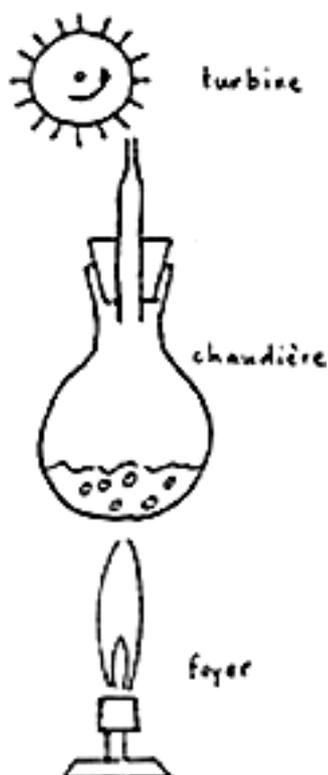
On a vu que toutes les machines produisent de la chaleur, même si ce n'est parfois qu'une petite partie de l'énergie transformée.

#### Questionnaire I (mental)

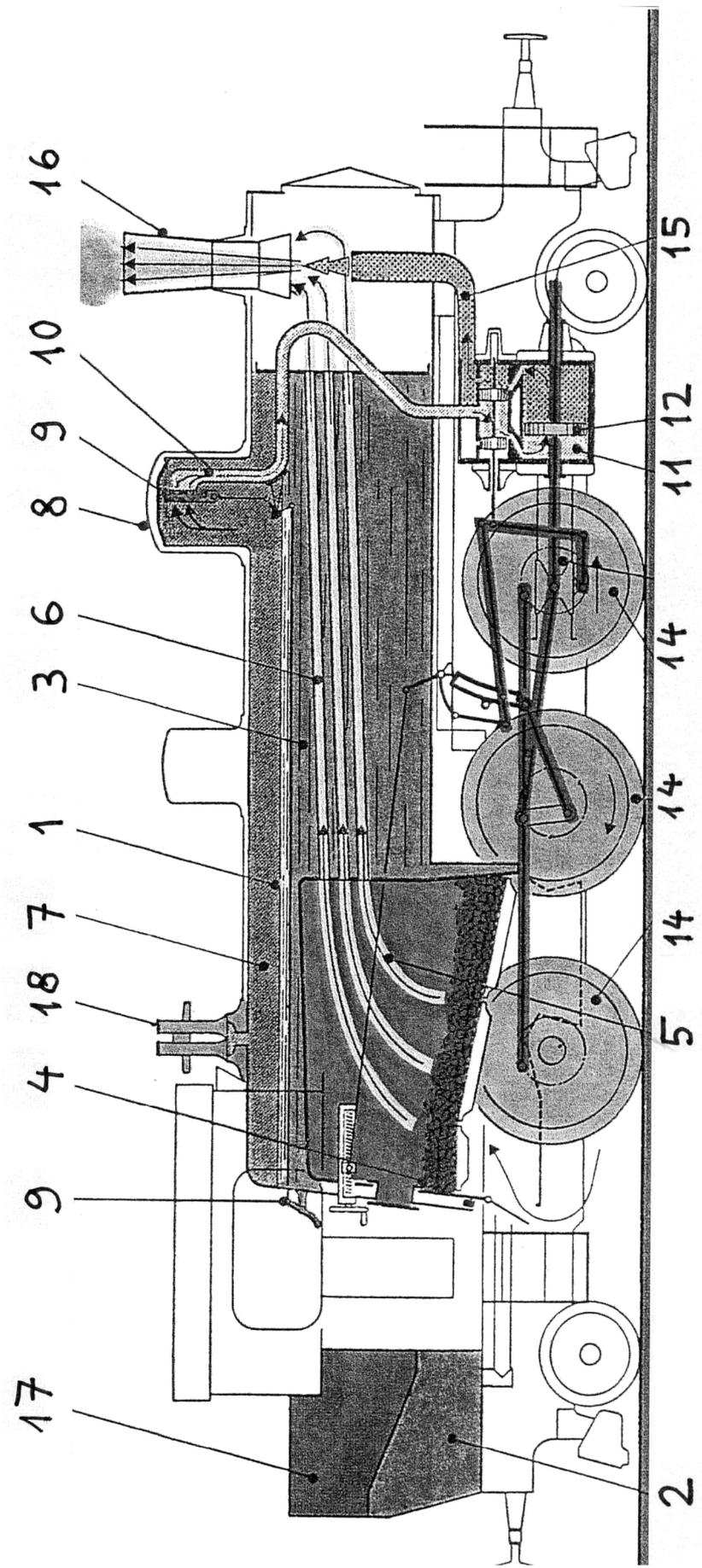
1. Est-il possible à votre avis de faire le contraire, c'est-à-dire de l'énergie mécanique à partir de la chaleur?
2. Est-il possible de re-transformer toute la chaleur perdue en énergie mécanique?
3. Peut-on utiliser la quantité fabuleuse de chaleur contenue dans les océans pour en faire de l'énergie? (forme de mobile perpétuel)

Questionnaire II (observation de la turbine à vapeur)

4. Quelle sorte d'énergie alimente la machine?
5. Quelles sortes d'énergies sont produites par la machine? Laquelle pourrait-on exploiter dans le cas d'une machine du même type, mais plus performante, pour en faire de l'énergie électrique?
6. Serait-il possible de ne pas laisser s'échapper la vapeur?
7. Si toute l'installation était mise dans un four étanche pour y être chauffée (sans le brûleur à gaz, évidemment), la machine fonctionnerait-elle longtemps?



Fonctionnement d'une locomotive à vapeur

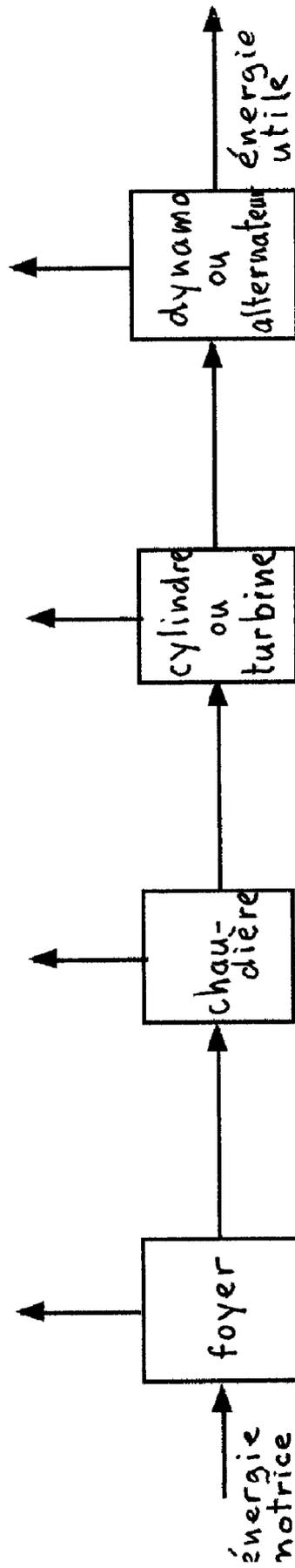


### Fonctionnement d'une locomotive à vapeur

- a. Le chauffeur emplit la chaudière 1 avec l'eau 3 provenant du réservoir d'eau 2 du «tender».
- b. Le chauffeur allume un feu dans le foyer 4.
- c. La chaleur provenant des gaz du foyer 5 passe à travers les tubes de fumée 6 et chauffe l'eau 3.
- d. L'eau chaude se transforme en vapeur 7.
- e. La vapeur s'accumule dans le dôme de vapeur 8.
- f. A l'aide du régulateur 9, le mécanicien ouvre l'admission de la vapeur 10.
- g. La vapeur va dans les cylindres 11 et pousse les pistons 12 en mouvement de va-et-vient.
- h. Les bielles de traction 13 se mettent en mouvement et entraînent les roues motrices 14.
- i. La vapeur utilisée et la fumée s'évacuent par la cheminée 16.

17 réserve de charbon  
18 soupape de sécurité

### Flux d'énergie dans la machine à vapeur



## Flux d'énergie dans la machine à vapeur

### Transports d'énergie.

En-dessus des flèches horizontales, indiquer la sorte d'énergie convoyée d'un organe à l'autre.

(Par exemple: mécanique, électrique, calorique, vapeur, chimique, ...)

En-dessous des flèches horizontales, indiquer par quel moyen technique cette énergie est convoyée.

### Chaleurs perdues.

Elles sont symbolisées par les flèches vers le haut.

L'une est beaucoup plus grande que les autres, et ne peut être annulée. Laquelle et pourquoi? (Allonger la flèche sur le schéma).

A côté des flèches verticales, indiquer à quoi est due la perte de chaleur.

(Par exemple frottements, conduction de chaleur ou sortie de vapeur, ...)

### Alimentation.

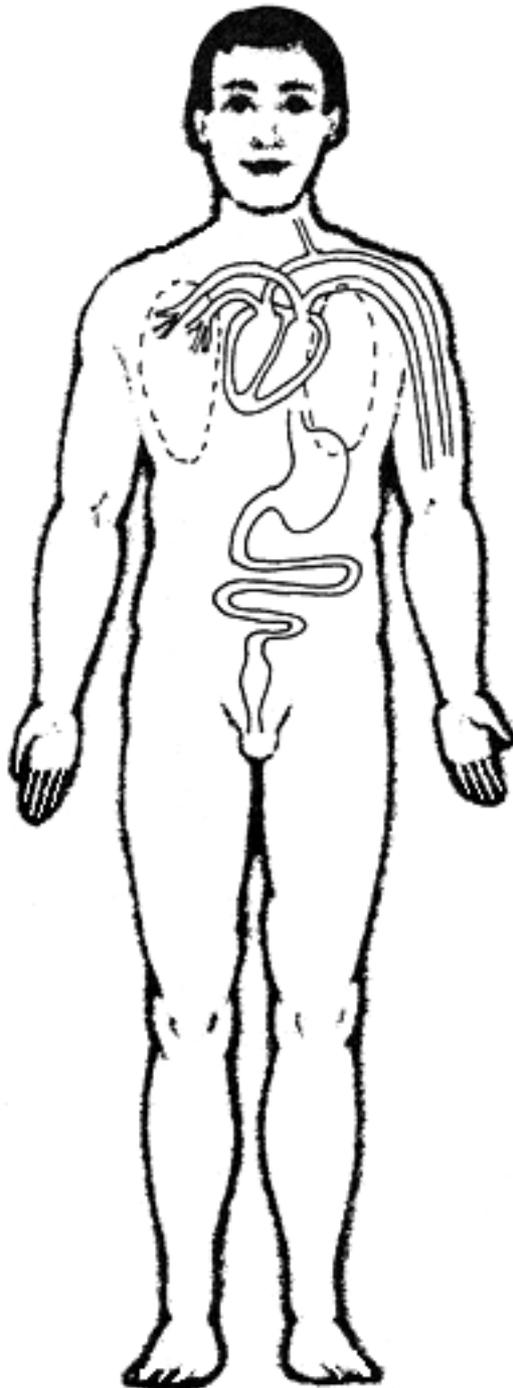
Comment une machine thermique réelle est-elle alimentée?

Le «tender» d'une locomotive à vapeur ne contient-il que du charbon?

Imaginer comment on pourrait mesurer l'énergie alimentant votre machine.

### Analogies entre le corps humain et la machine à vapeur

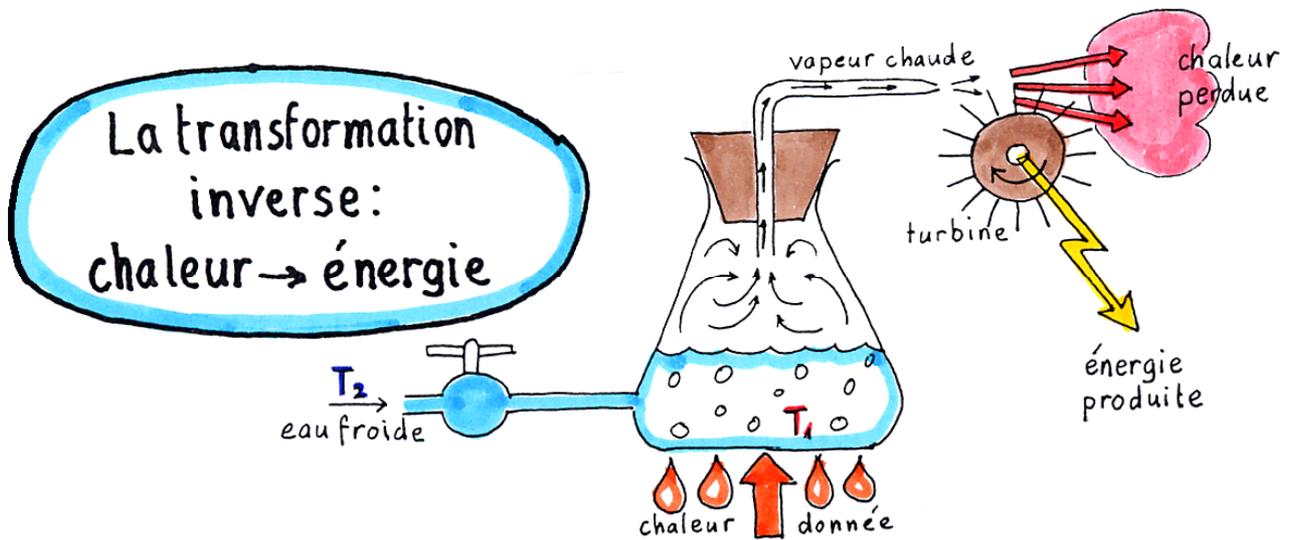
Compléter ce dessin au crayon en indiquant les organes correspondant au tableau qui suit. On peut ajouter des organes et des canaux.



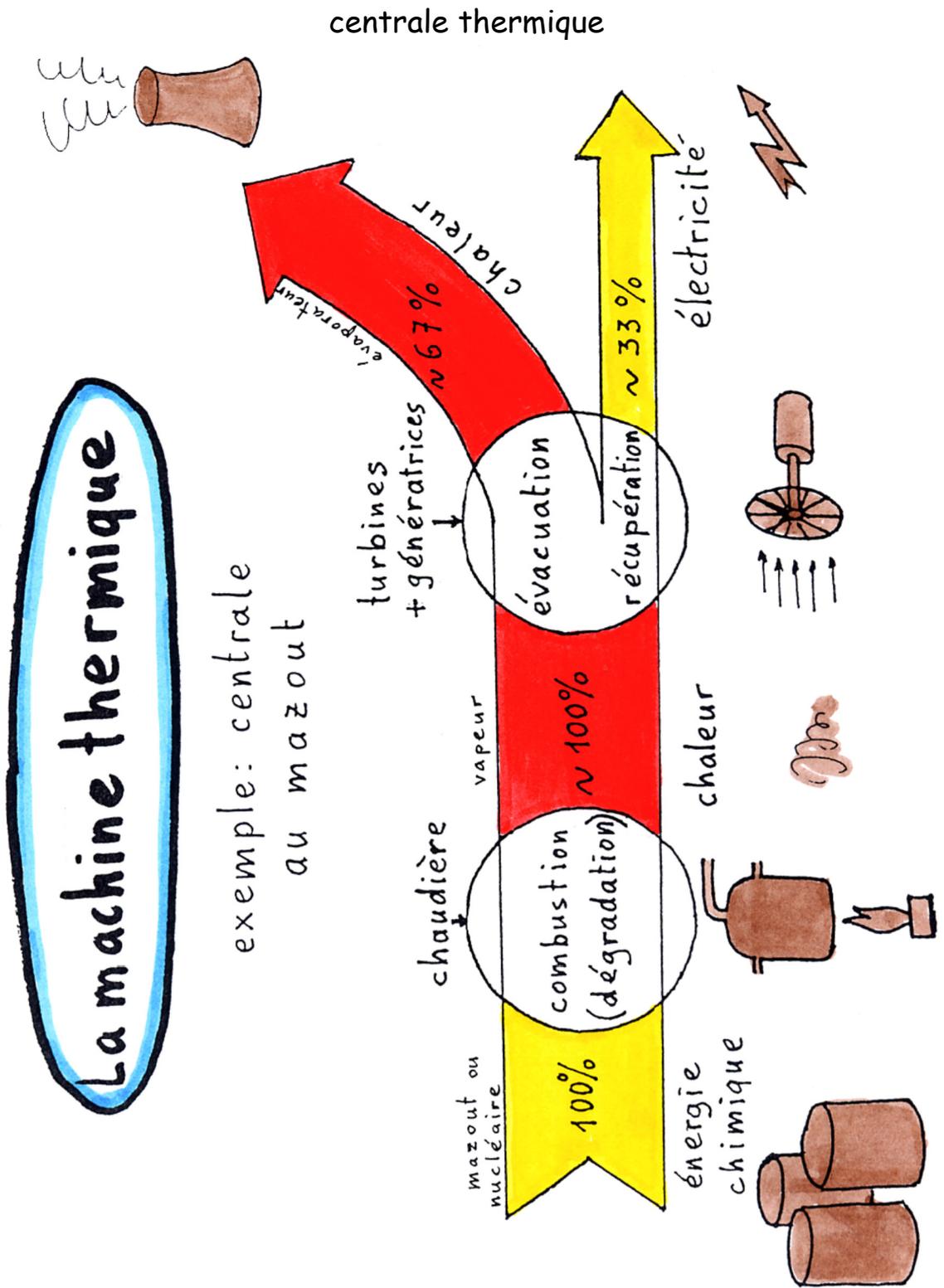
**Analogies entre le corps humain  
et la machine à vapeur**

<u>machine</u>	<u>corps humain</u>
<p><b>énergie chimique fournie à la machine</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- combustible</li> <li>- comburant</li> <li>- foyer</li> </ul>	
<p><b>énergie mécanique utile</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- piston</li> <li>- bielle-manivelle</li> </ul>	
<p><b>énergie calorique perdue</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- échappement de vapeur</li> <li>- fuites de chaleur</li> </ul>	
<p><b>transport d'énergie dans la machine</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- conduite de vapeur</li> </ul>	
<p><b>énergie non consommée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- gaz mal brûlés</li> </ul>	
<p><b>déchets évacués</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- scories, cendres</li> </ul>	
<p><b>gaz carbonique évacué</b></p>	

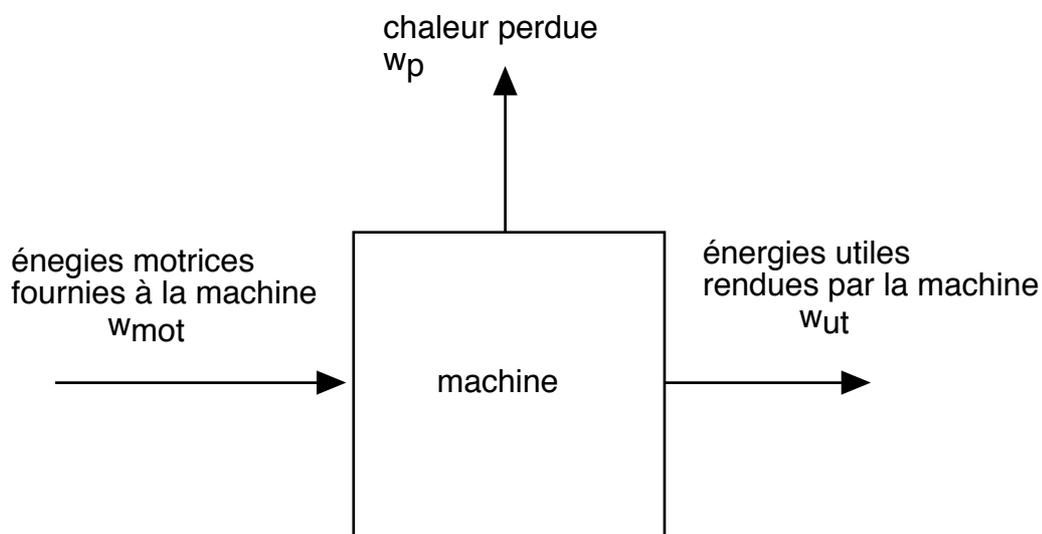
Nota: différence importante entre le corps humain et la machine à vapeur: L'énergie chimique des aliments ne passe pas par la chaleur **pour** se transformer ensuite en énergie mécanique. Ce n'est pas une machine «thermique».



La transformation inverse de la chaleur en énergie est possible, même artificiellement, à l'aide des machines thermiques (centrales thermo-électriques, machines à vapeur, moteurs à combustion de toutes sortes).  
Cependant jamais à 100%, le rendement maximum étant limité au «rendement de Carnot».



Reprenons le schéma déjà connu d'une machine:



L'égalité que nous allons tester est:

$$W_{mot} = W_{ut} + w_p$$

( $w_p$  étant la lettre symbole pour la chaleur perdue)

Ce qui veut dire que les énergies qui sortent d'une «machine» sont égales aux énergies qui y sont introduites.

Par ailleurs, une définition utile est:

def. Le **rendement**  $\eta$  d'une machine est le rapport entre l'énergie utile et l'énergie motrice (on peut l'exprimer en %).

$$\eta = \frac{W_{ut}}{W_{mot}}$$

Nous allons dès lors expérimenter plusieurs machines.

Un des objectifs est de se rendre compte que ces engins ont des rendements toujours inférieurs à 100%, mais approchant parfois cette valeur. C'est une des raisons qui nous amènent à croire au principe de la conservation de l'énergie. En particulier, l'essai sur les palans nous amènera près du 100% de rendement, pour des engins bien construits et bien lubrifiés, ayant un frottement très réduit.

## Le rendement des machines thermiques

$$\text{rendement de Carnot} = \frac{\text{énergie produite par la machine}}{\text{chaleur fournie à la machine}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

= toujours **moins que 100% !**

Cette valeur ne peut en aucun cas approcher le 1 (ou 100%), à cause du passage d'une grande partie de la chaleur dans le froid, sans conversion possible en énergie utilisable.

T1 étant la **température absolue** de la partie chauffée de la machine  
T2 étant la **température absolue** de la partie refroidie de la machine

la température absolue (notion à étudier plus tard) est la température Celsius + 273°  
Elle se note en degrés «Kelvin» (K).

Exemple de calcul du rendement de Carnot pour une centrale thermique moderne:  
(données de la centrale au fuel de Chavalon en Valais)

Température de la vapeur surchauffée:  
 $T_1 = 540^\circ\text{C} = (540 + 273)\text{K} = 813\text{K}$

Température de l'eau de réfrigération:  
 $T_2 = 14^\circ\text{C} = (14 + 273)\text{K} = 287\text{K}$

$$\text{Rendement de Carnot: } \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{813\text{K} - 287\text{K}}{813\text{K}} = \frac{526\text{K}}{813\text{K}} = 0,64 = 64\%$$

Ceci est le rendement théorique maximum.

En réalité, à cause des pertes par frottement, fuites de chaleur, pertes électromagnétiques, etc., le rendement global approche les 40%

Autres exemples de rendements globaux moyens de machines thermiques:

- centrales nucléaires: 33%
- moteurs d'automobiles à essence: 25%
- moteurs diesel: 36%

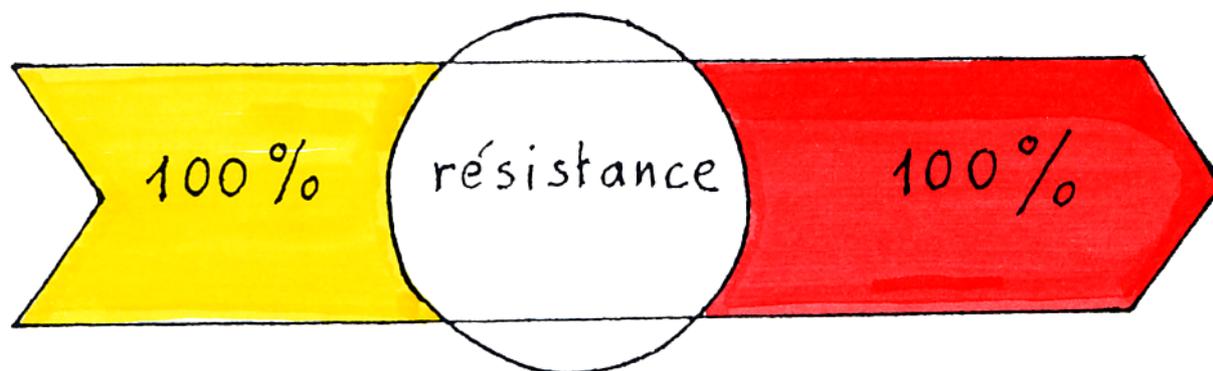
## Le chauffage électrique à résistance

Ce chauffage équivaut à un frottement du courant dans les fils, qui transforme **toute** l'énergie en chaleur.

En effet, aucune énergie autre que la chaleur ne sort du chauffage.

Le principe de conservation impose donc que 100% de l'énergie électrique soit convertie en chaleur.

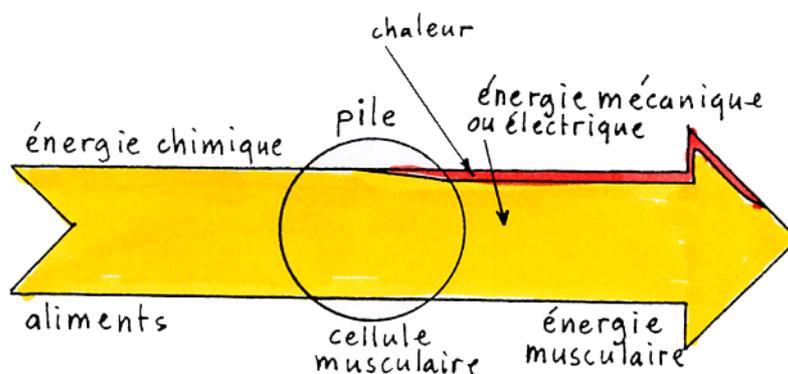
Rendement: **100%**



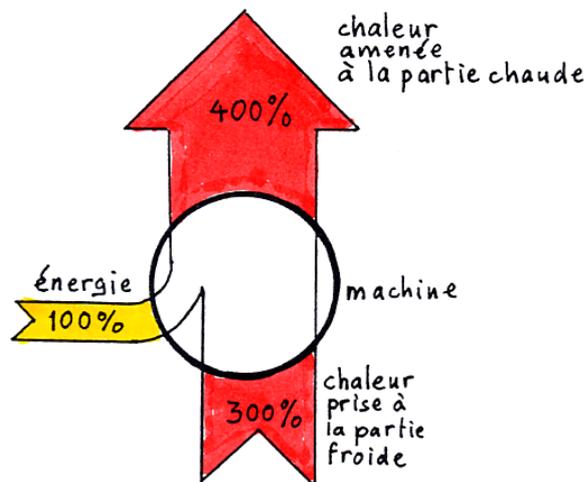
## La pile à combustible

Le principe de la pile à combustible, actuellement au stade expérimental et déjà utilisé sur des engins spatiaux, est celui de la transformation de l'énergie alimentaire (chimique) en énergie musculaire (électro-mécanique) dans le corps animal. Il permet de transformer l'énergie chimique directement en énergie électrique ou mécanique **sans passer par une transformation en chaleur**, donc avec un rendement maximum théorique de 100%.

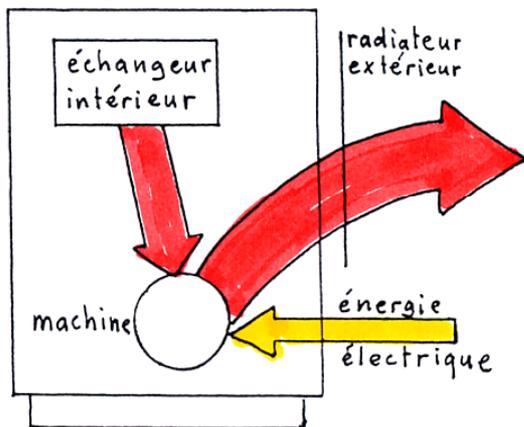
Un exemple courant et actuellement déjà fort utilisé est celui de la pile électrique et de l'accumulateur au plomb (batterie d'auto). Ces procédés, déjà fort anciens, pèchent par leur rapport très défavorable entre l'énergie accumulée et la masse de la pile, son prix et son impact sur l'environnement, mais de nouveaux procédés arrivent sur le marché.



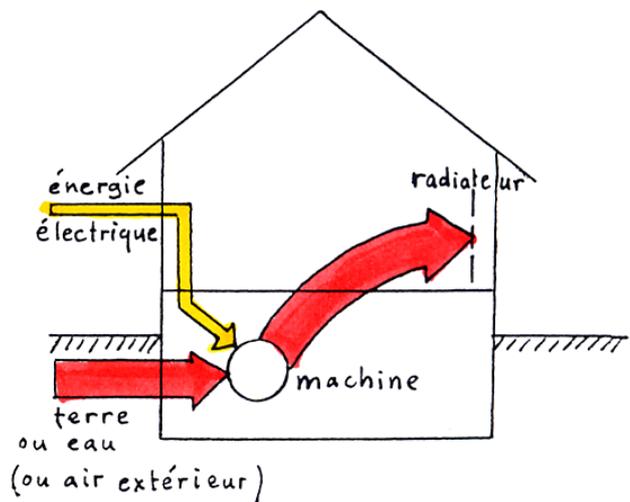
### La pompe à chaleur



Exemple:  
le frigorifique

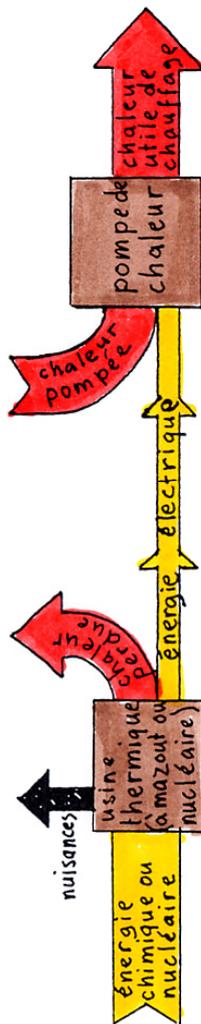


Exemple:  
chauffage domestique

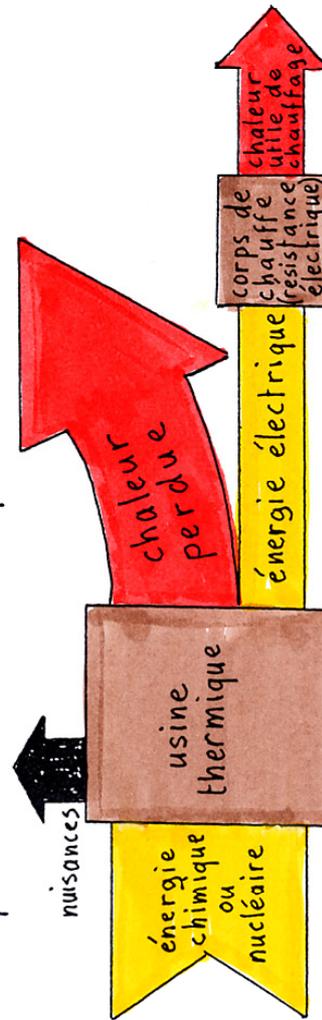


## Les chauffages

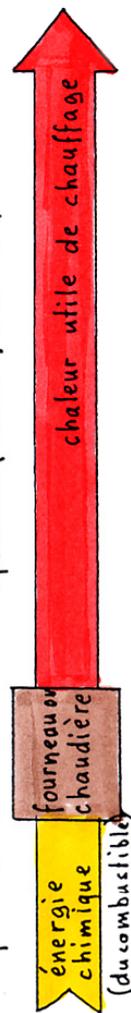
chauffage par pompe de chaleur entraînée par une usine thermique (à mazout ou nucléaire etc...)



chauffage par corps de chauffe électrique



chauffage domestique au combustible ← non polluant (bois, biogaz) représenté ci-dessous  
ou polluant (mazout, charbon)



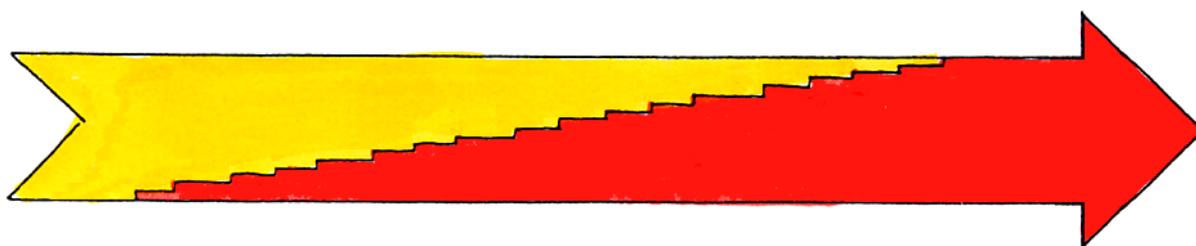
l'épaisseur des traits donne une idée des quantités d'énergie et de chaleur mises en jeu pour une même chaleur utile.

## La dégradation

Lors d'une transformation d'énergie en une autre, il y a toujours un peu d'énergie qui se transforme en chaleur («frottement» inévitable).

Cette chaleur est irrécupérable. Elle s'échappe, se diffuse dans la nature, et ne peut plus être récupérée dans une machine thermique. Elle ne fait que «tiédir» l'environnement.

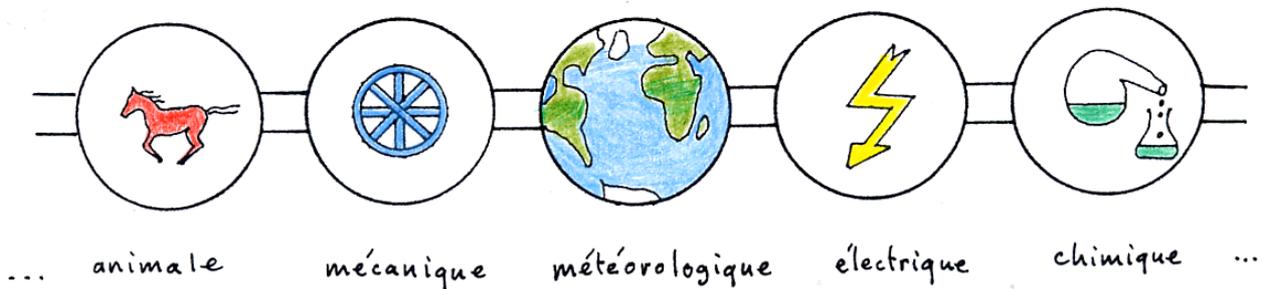
Donc, en définitive, lors de ses transformations successives, toute énergie finit tôt ou tard par se transformer en chaleur irrécupérable.



1<sup>re</sup> loi:

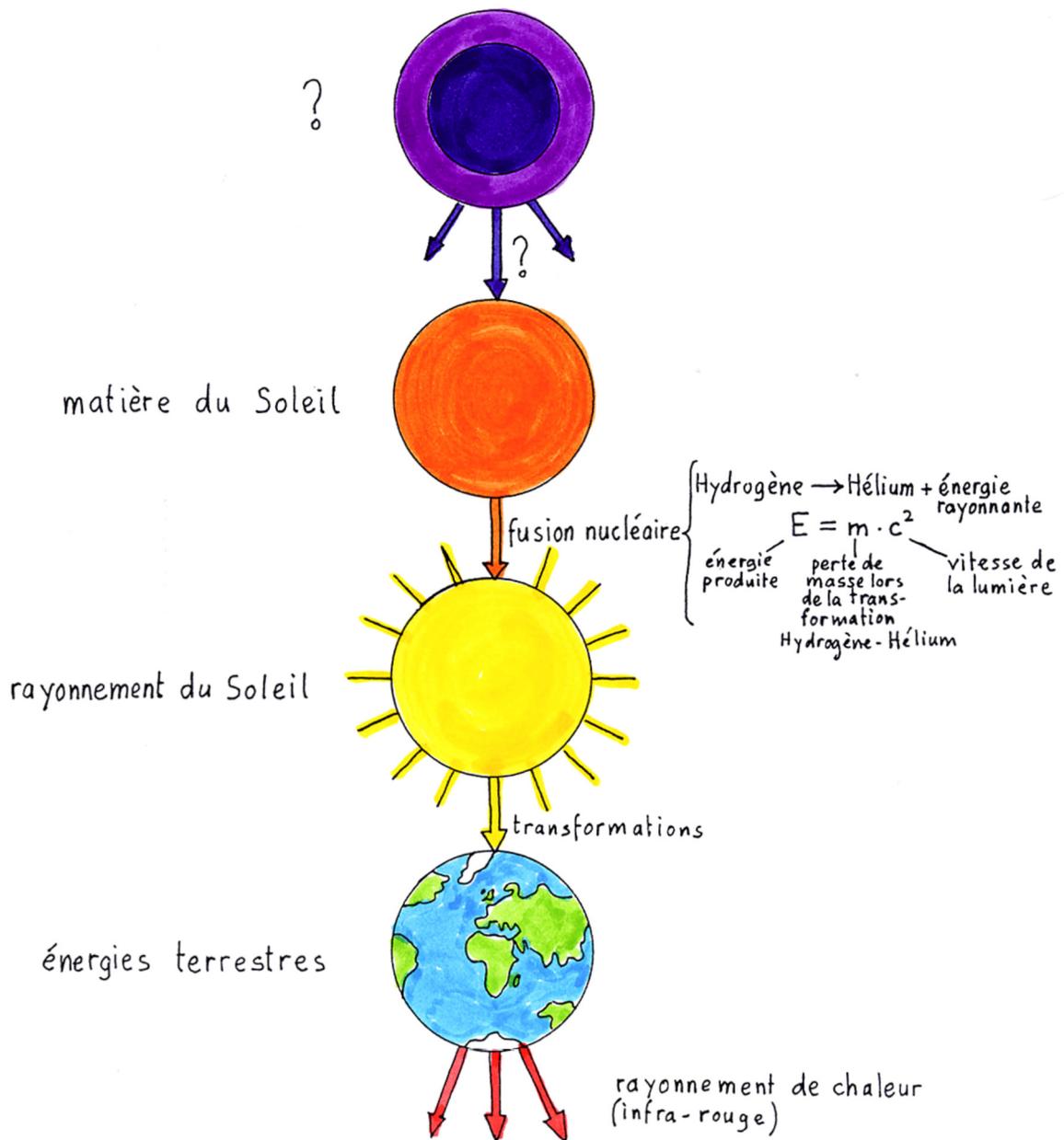
# La conservation de l'énergie

Energies:

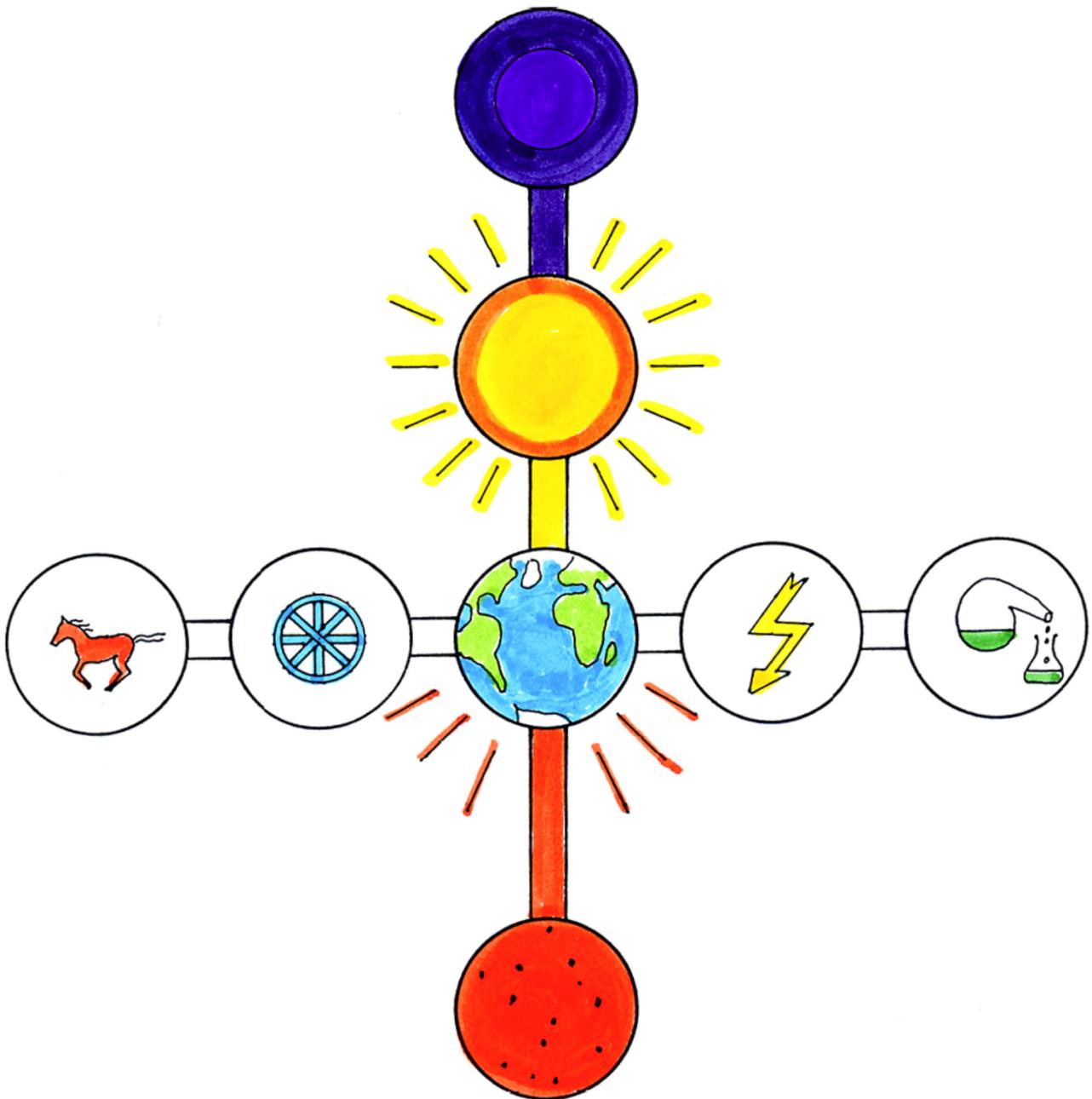


La 2<sup>e</sup> loi est:

Le flux d'énergie  
son origine naturelle  
Le Soleil



Les 2 lois  
la conservation et le flux



## Outils pour la mesure des énergies

On sait mesurer une **énergie mécanique (travail)** à l'aide d'un dynamomètre et d'une mesure de longueur.

On sait aussi mesurer l'**énergie calorique (chaleur)** à l'aide d'une masse d'eau et d'une variation de température.

Nous allons apprendre à mesurer l'**énergie chimique** contenue dans une matière.

Dans les machines artificielles, cette énergie (pétrole, charbon, etc.) passe souvent par une combustion qui donne de la chaleur. Cette chaleur doit ensuite être convertie en énergie mécanique par une machine thermique qui perd forcément beaucoup de chaleur.

Dans les organismes vivants, cette énergie (aliments) produit de l'énergie mécanique ou électrique sans passer par une machine thermique, ce qui limite les pertes en chaleur.

Certaines machines évitent aussi la transformation de l'énergie chimique en chaleur (piles, accumulateurs électriques)

L'énergie chimique des combustibles et aliments sera mesurée ici par l'intermédiaire de leur **pouvoir calorifique**.

L'énergie de **vaporisation-condensation** de l'eau, nécessaire notamment à l'évaluation des engins à vapeur sera aussi mesurée. (Dans un premier temps on ne mesurera pas l'énergie de fusion-solidification, qui est aussi une énergie de «changement d'état»)

On montrera que le principe de conservation de l'énergie entraînerait l'égalité des chaleurs de vaporisation et de condensation pour une masse donnée de matière.

\*\*\*

Il y a deux formes d'énergie que nous devons mesurer par l'intermédiaire de la puissance:

L'énergie **rayonnante**. On mesurera en particulier celle du Soleil.

L'énergie donnée par un **courant électrique continu**.

\*\*\*

Il faudra donc introduire la notion de puissance, c'est-à-dire de débit d'énergie avant l'acquisition de ces deux outils!

### **Pouvoir calorifique k d'un combustible**

- Comment peut-on quantifier de façon adéquate la capacité d'un type de combustible à produire de la chaleur?
- Donner une méthode de mesure pour un produit donné.
- Appliquer cette méthode pour mesurer le pouvoir calorifique de différents produits.  
(p. ex. gaz butane, cire de bougie, alcool, «meta», pétrole lampant...)
- Comparer le résultat à une valeur connue (p. ex. celle donnée par le fabricant).  
Effectuer un calcul d'écart relatif.
- Comparer entre elles les valeurs trouvées pour les différents combustibles
- Critique des essais:
  - Quelles précautions faut-il prendre pour que les essais soient fiables?
  - A défaut d'une bonne fiabilité absolue, quelles précautions prendre pour que les essais soient au moins comparables entre eux?
  - Distinguer les sources d'écart systématiques et les sources d'écart aléatoires.
  - La valeur obtenue est-elle proche de la valeur réelle, ou est-elle une limite inférieure ou supérieure? (argumenter)

### TP. Chaleur latente de vaporisation-condensation

def. La **chaleur latente de vaporisation  $c_v$**  d'une matière donnée est la chaleur nécessaire pour vaporiser un kilogramme de cette matière.

$$c_v = q / m$$

cette valeur permettra de calculer la chaleur de vaporisation:  $q = c_v \cdot m$

1. Quelle est l'unité dans laquelle s'exprime une chaleur latente de vaporisation?
2. Montrer que si le principe de la conservation de l'énergie est vrai:  
la chaleur latente de vaporisation = la chaleur latente de condensation.
3. Déterminer la chaleur latente de vaporisation-condensation d'une matière donnée en imaginant et en réalisant des expériences. (Attention aux liquides inflammables! Pas de liquides explosifs!!)
  - Imaginer une méthode utilisant un thermoplongeur.
  - Autre exemple de méthode, voir page suivante.

Laquelle de ces deux méthodes détermine la chaleur latente de vaporisation et laquelle la chaleur latente de condensation?
4. Comparer les deux valeurs entre elles, puis les comparer aux valeurs des tables. Faire une critique:
  - faire un calcul d'écart relatif
  - préciser notamment si les valeurs trouvées sont des limites inférieures ou supérieures, et pourquoi
  - indiquer les sources principales d'incertitude
  - indiquer les sources d'erreurs systématiques
5. Prolongement:  
Imaginer et réaliser des expériences pour déterminer la chaleur latente de fusion-solidification de l'eau.

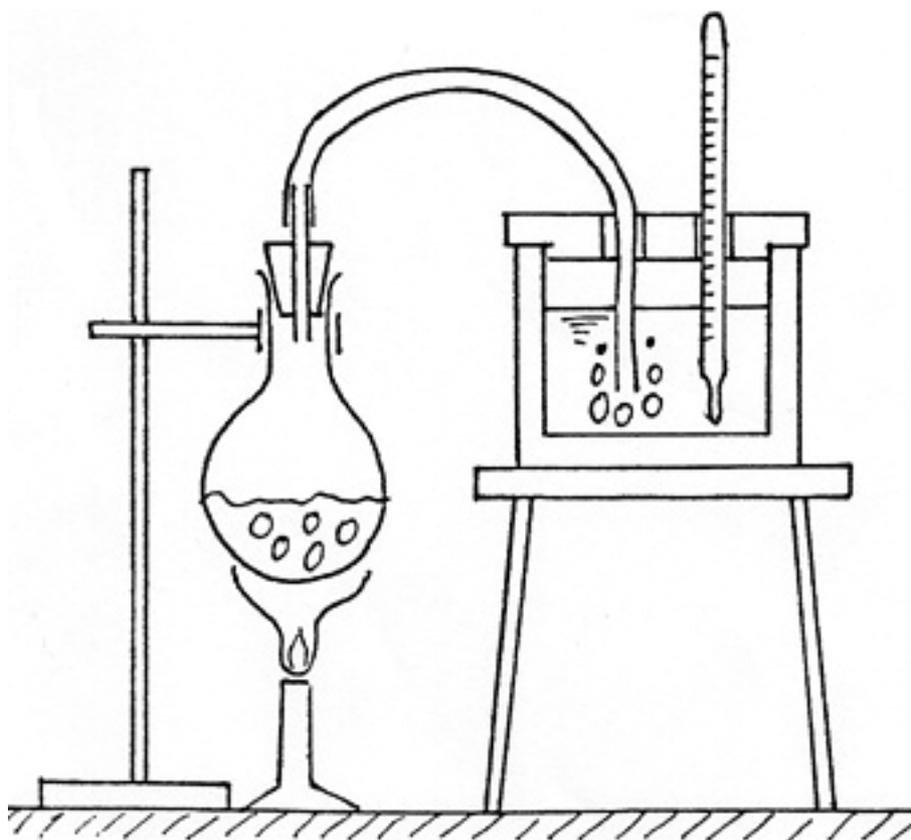
**Exemple de détermination d'une chaleur latente de condensation.**

(utiliser de l'eau pour des raisons de sécurité!)

Injecter de la vapeur d'eau dans un calorimètre contenant de l'eau froide. Observer la masse d'eau condensée et l'augmentation de température dans le calorimètre.

- Prendre les mesures nécessaires.
- Critiquer l'essai selon le schéma de la question 4

Nota: pour interrompre l'injection de vapeur, retirer le tube souple qui plonge dans le calorimètre avant d'éteindre le brûleur. Si, au contraire, on interrompt l'essai sans retirer le tube, mais en éteignant le chauffage du ballon, un phénomène surprenant se produit, qu'il serait intéressant de décrire et de tenter d'expliquer!



**Pouvoir calorifique et  
Chaleur de vaporisation-condensation**

1. Quelle est l'énergie journalière consommée par une centrale d'incinération qui brûle 2,5 tonnes de mazout par jour?
2. Le wagon «tender» d'une locomotive à vapeur contient 4,3 t d'eau.
  - a) quelle est l'énergie nécessaire pour transformer cette eau en vapeur?
  - b) quelle est la masse de charbon correspondante, à charger sur le tender?
3. Une installation de distillation condense 350 litres d'eau par jour.
  - a) caractériser l'évacuation de chaleur nécessaire.
  - b) cette chaleur est évacuée par circulation d'eau. L'eau entre dans le manchon refroidisseur à 14°C et en sort à 56°C.  
Quel est le débit de l'eau de refroidissement?

## La puissance

def. La **Puissance P** d'un «moteur» est le rapport entre le travail qu'il effectue et le temps qu'il met pour le faire.

$$P = \frac{w}{t} = \frac{F \cdot d}{t}$$

def. Unité: le **Watt [W]** est la puissance d'un «moteur» qui effectue un travail de 1J en 1 seconde.

$$1 [W] = 1 \frac{[Nm]}{[s]} = 1 \frac{[J]}{[s]}$$

On se souviendra de la définition du rendement d'une machine:

$$\eta = \frac{w_{ut}}{w_{mot}}$$

Avec ce corollaire exprimant la conservation de l'énergie:

$$w_{mot} = w_{ut} + w_p$$

ces deux formules nous amènent leurs analogues pour la puissance, en opérant des divisions par le temps t, qui est le même du côté moteur et du côté utile de la machine:

$$\eta = \frac{w_{ut}}{w_{mot}} = \frac{w_{ut}/t}{w_{mot}/t} = \frac{P_{ut}}{P_{mot}}$$

et:

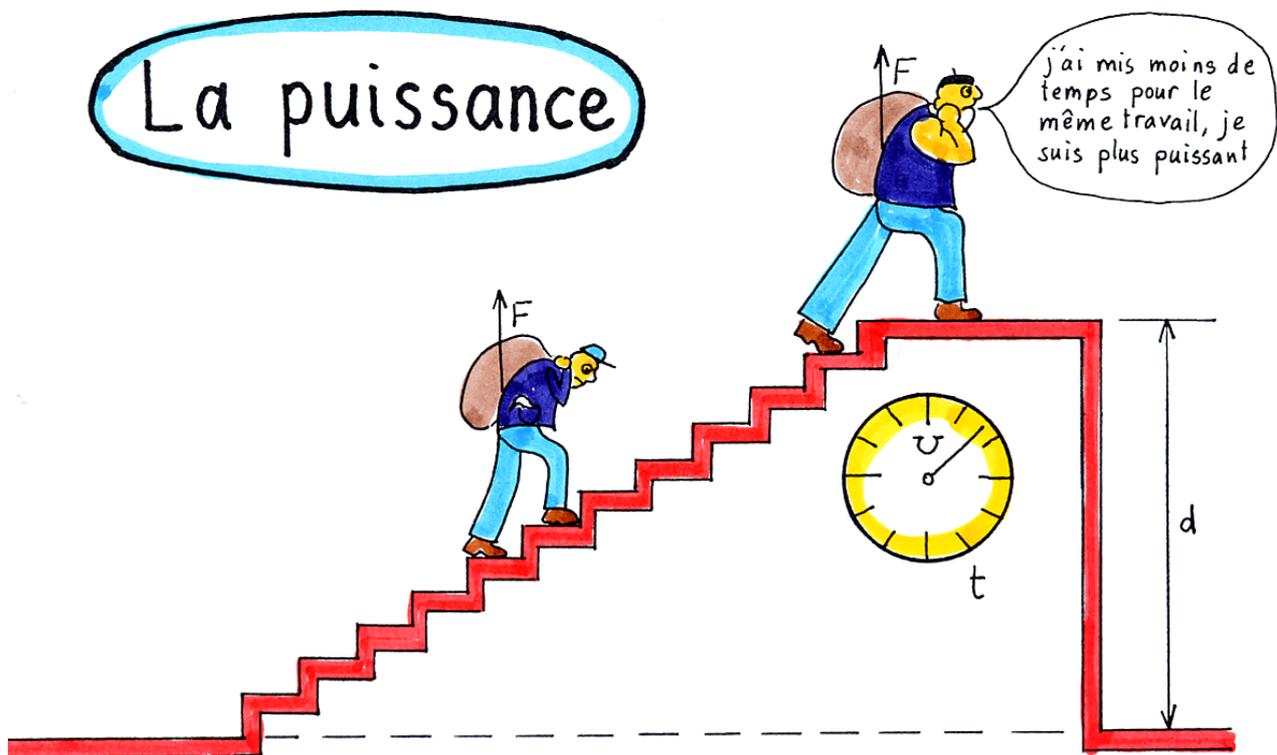
$$w_{mot} = w_{ut} + w_p$$

$$w_{mot}/t = w_{ut}/t + w_p/t \quad \text{donc:} \quad P_{mot} = P_{ut} + P_p$$

finalement:      rendement:  $\eta = \frac{P_{ut}}{P_{mot}}$

$$P_{mot} = P_{ut} + P_p$$

(P<sub>p</sub> étant la puissance calorifique perdue)



La puissance est le travail qu'on fait en un temps donné.

Plus un travail est vite fait, plus on est puissant.

$$p = \frac{w}{t} = \frac{F \cdot d}{t} \quad \left( \frac{d}{t}, \text{ mais c'est la vitesse!} \right)$$

Le **Watt** (W) est l'unité internationale de puissance.

1(W) est la puissance d'un «moteur» qui déplace une force de 1(N) sur une distance de 1(m) en un temps de 1(s).

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ N} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### Puissance et rendements

1. A l'aide d'un compteur électrique d'énergie, mesurer l'énergie produite par un appareil électrique quelconque et la puissance consommée. Vérifier si les indications concordent!
2. Sur une bicyclette de salle de fitness, on pédalera un certain temps en maintenant une puissance aussi constante que possible. On mesurera le travail effectué à la fin de l'exercice, et le temps écoulé pendant l'effort. Calculer votre puissance moyenne.
3. Lire la puissance indiquée sur quelques appareils ou sur des prospectus d'appareils (appareils électriques, perceuses, ampoules, automobiles, chaudières, ...). Ces puissances sont-elles utiles ou motrices? Mesurer quelques-unes des puissances indiquées et comparer à l'indication du fabricant. Comparer aussi à la puissance d'un cycliste, obtenue à l'exercice précédent.
4. Quelle est la puissance d'un moteur élevant une charge de 3,5 t à la vitesse de 2 m/s?
5. Quel temps met un moteur de 15 W pour tirer une charge sur une longueur de 30 m à l'aide d'une force de 7 N ?
6. Quel est le rendement d'une boîte d'engrenages entraînée par un moteur de 2000 W et qui perd 100 W en frottements?
7. Un chauffage central véhicule 10 litres d'eau à la minute. L'eau entre dans la chaudière à 23° et en sort à 52°. Quelle est la puissance calorifique de la chaudière?
  - en cal / min
  - en cal / s
  - en cal / h
  - en J / s (nom de cette unité?)
  - en kJ / h
8. Une boîte à vitesses transmet vers les roues une puissance de 30 000 W. Son échauffement est de 2400 cal/min. Quel est son rendement?

9. Quelle est la consommation horaire de gaz d'une centrale thermique au gaz naturel de rendement 32%, qui produit 55 MW ?
10. Un train est propulsé par des moteurs consommant une puissance électrique de 1,2 MW. Le rendement de l'ensemble moteurs + transmission est de 92%.
- Quelle puissance calorifique doit être évacuée par le refroidissement?
  - Ce refroidissement se fait par une circulation d'eau, celle-ci entrant à 10°C et sortant à 36°C. Quel doit en être le débit en litres/min?
11. Un moteur électrique est alimenté par une puissance de 2200W. Il est refroidi par une circulation d'eau de débit 1,5 litres/min. L'eau entre à 12°C et sort à 19°C. Quel est le rendement de ce moteur?
12. Sur un banc d'essais pour moteurs de voitures, un moteur de 70 chevaux donne son énergie mécanique à une masse d'eau de 500 kg par l'intermédiaire d'un frein sur l'axe.
- Quelle est par seconde l'augmentation de température de l'eau dans le bac?
  - Si le frein utilisé est refroidi par une circulation d'eau entrant à 12° et sortant à 50°, quel doit être le débit d'eau (en kg / s puis en litre / min)?
13. Un moteur électrique a une déperdition de chaleur de 2350W. On sait que son rendement est de 97,5%.  
Calculer la puissance électrique qu'il absorbe et la puissance mécanique qu'il produit.  
  
(poser un système de deux équations et essayer de le résoudre)
14. Le niveau de l'eau dans un barrage se situe à une altitude de 1250m. La turbine est à 730 m. Le débit de la chute est de 3,2m<sup>3</sup> par seconde.
- Quelle est la puissance développée par la chute d'eau?
  - Si le rendement global de l'usine électrique est de 91%, quelle est la puissance électrique produite?
15. Quel est en m<sup>3</sup>/s le débit d'une chute d'eau de 12 m entraînant une centrale électrique au fil de l'eau produisant 25 MW électriques avec un rendement global de 89%?
16. Une pompe élève de l'eau à raison de 35 litres/minute d'une hauteur de 36 m. Le rendement est de 85%. Quelle est la puissance électrique nécessaire?
17. Barrage de l'Hongrin, centrale électrique de Veytaux (près de Montreux)  
Pendant les heures de faible consommation électrique, la station de Veytaux pompe l'eau du Léman dans le Lac de l'Hongrin.  
Dénivellation: 860m  
Débit: 25 m<sup>3</sup>/s  
Rendement global: 82%
- Quelle est la puissance électrique absorbée par les pompes?
  - Quel est l'échauffement de l'eau?

## Unités du système international (S.I.)

grandeur phys.	distance	masse	temps	force	énergie	puissance
symbole	d	m	t	F	w	P
unité	mètre m	kilogramme kg	seconde s	Newton N	Joule J	Watt W

## Unités usuelles hors du S.I.

Masse: la **tonne (t)** =  $10^3$  kg

Force: le **kilogramme-poids (kp)** ou **kilogramme-force (kgf)** est la force équivalant au poids de 1 kg sur Terre.  
**1 kp = 9,81N**

la **tonne-poids (tp)** =  $10^3$  kp

Energie: la **calorie** est l'énergie qui chauffe 1g d'eau de 1°C  
**1 J = 0,24cal**      1cal = 4,185 J

le **kilowattheure (kWh)** est l'énergie fournie par un moteur de puissance 1 kW fonctionnant pendant 1h.

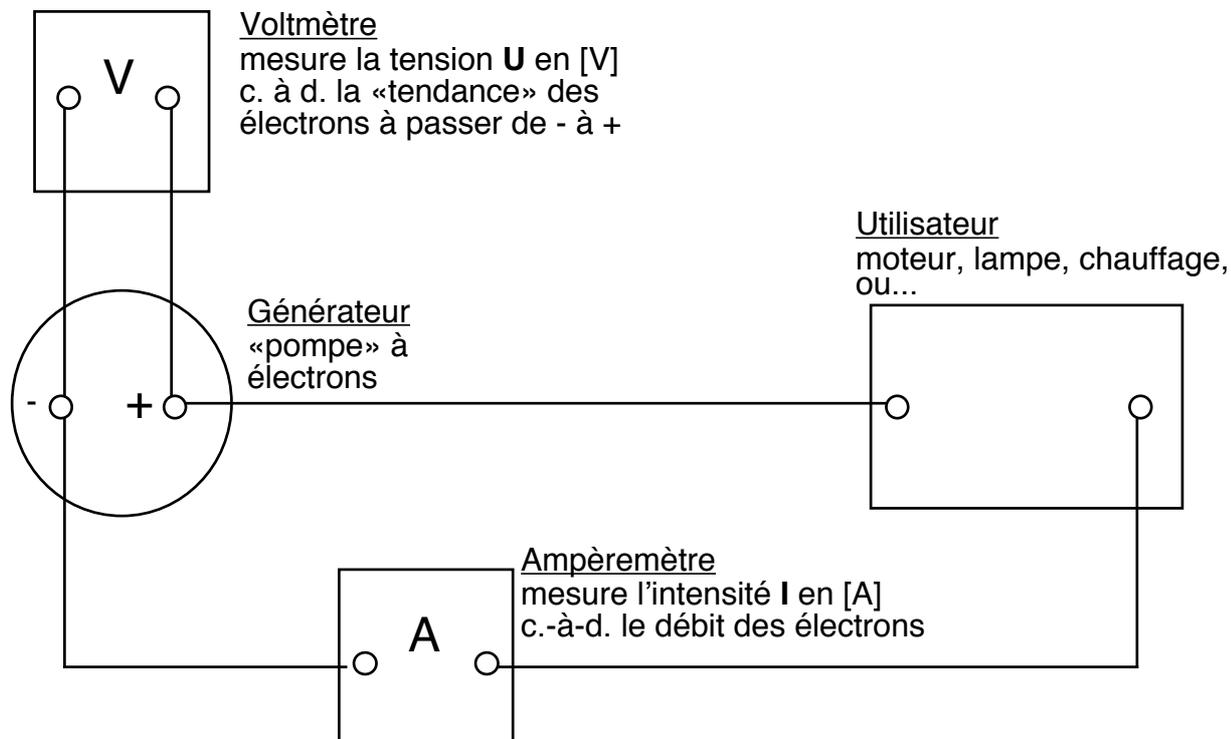
**1 kWh = 1000 Nm/s · 3600 s = 3,6 · 10<sup>6</sup> Nm = 3,6 MJ**

Puissance: le **cheval (ch ou PS ou...)** = **0,735 kW**

### Energie et physiologie humaine

1. Lorsque vous êtes au lit, la force de pesanteur de votre corps travaille-t-elle? Pourquoi avez-vous tout de même besoin d'énergie alimentaire?
2. Lorsque vous sciez du bois, votre main travaille-t-elle? On donne 100 coups de scie d'une course de 40 cm avec une force de 80 N dans un seul sens. Quel est le travail accompli?
3. Quel est le pouvoir énergétique (calorifique) du glucose?
4. Soit une personne alitée pendant une longue période. Se renseigner sur l'énergie alimentaire qu'elle doit absorber par jour et sur le dégagement de chaleur de son corps. En déduire l'énergie non utilisée et préciser où cette énergie passe. Quelle est en [W] sa puissance dispersée en chaleur?
5. Quel est le rendement du fonctionnement d'un athlète du type cycliste faisant un effort journalier d'une étape.  
Pour répondre à cette question, se renseigner sur la nourriture absorbée, la quantité transpirée, l'effort fourni, lors de simulations sur des vélos de laboratoire.  
  
En déduire le bilan énergétique du corps de l'athlète, et son rendement .
6. Sur la base des données récoltées à la question 5, on répondra à la question suivante:  
  
Un alpiniste dont la masse avec équipement est de 95 kg entreprend une ascension de dénivellation 1500 m. Prévoir la quantité de nourriture à absorber, et la quantité d'eau à boire.
7. Lors d'un effort intense, le cœur d'un athlète débite ..... litres de sang à la minute. La quantité de glucose dans le sang rouge est de ..... g/cm<sup>3</sup> et dans le sang bleu ..... g/cm<sup>3</sup>.  
Quelle est la puissance véhiculée par le sang sous forme de glucose?

## Mesure de la puissance d'un courant électrique continu



On opère les branchements dans l'ordre suivant:

générateur+, utilisateur, ampèremètre, générateur-

comme on le voit, le courant passe par l'ampèremètre qui conduit le courant.

Puis on branche le voltmètre aux bornes du générateur. Le voltmètre est isolant. Il est hors du circuit et aucun courant ne le traverse.

**Le voltmètre mesure la tension  $U$  en Volt [V]**  
**L'ampèremètre mesure l'intensité  $I$  en Ampère [A]**

Règle pour la mesure de la puissance délivrée par le générateur, consommée par l'utilisateur et véhiculée par le circuit:

$$P = U \cdot I$$

où  $P$  est en [W],  $U$  en [V] et  $I$  en [A]

### TP:

La règle ci-dessus sera prouvée dans un cours d'électricité. Cependant, il est possible de la vérifier maintenant avec les notions et les outils acquis!

Question: imaginer et réaliser une expérience permettant de vérifier cette règle.

Nota: le maître indiquera comment confectionner un corps de chauffe à l'aide d'un fil de constantan.

## Mesure de la puissance de l'irradiation solaire

### Mesure de la puissance de l'irradiation solaire par mètre carré de surface éclairée (irradiance)

Cette valeur est obtenue à l'aide d'un «pyranomètre».

A défaut d'un tel instrument, on peut obtenir une mesure par un luxmètre modifié par un diaphragme et dont l'indication est convertie en  $[W/m^2]$  à l'aide d'une courbe d'étalonnage.

Pour obtenir la puissance reçue par un capteur solaire, on multipliera cette valeur par l'aire efficace du capteur.

Si on ne possède aucun instrument de mesure, on peut tabler sur une valeur approximative de l'irradiance solaire de **1 kW/m<sup>2</sup>** par beau temps à midi sous nos latitudes et en été.

Ce chiffre, particulièrement facile à retenir, est frappant par sa valeur très élevée. Cela signifie qu'avec un rendement de 100%, on pourrait faire fonctionner deux perceuses électriques à pleine puissance sur un mètre carré de capteur! Ceci permet de toucher du doigt les espoirs que l'énergie solaire peut susciter!

- Mesurer la puissance irradiée par une lampe.
- Comparer cette puissance à la puissance d'alimentation électrique, et à l'indication du fabricant
- Etablir le rendement de la lampe

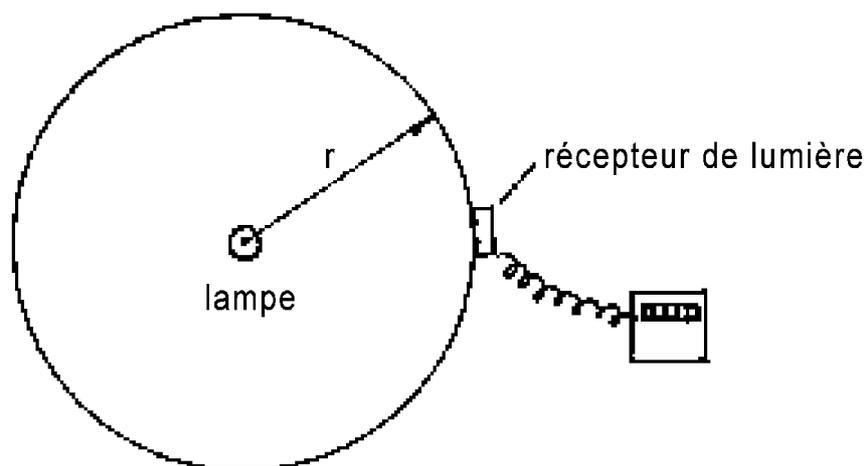
Indications:

L'appareil fournit une mesure  $y$  de puissance par unité de surface (en  $W/m^2$ ). Il est situé à une distance  $r$  de la lampe.

Toute la puissance rayonnante de la lampe passe à travers une sphère imaginaire de rayon  $r$ , et si la lampe éclaire de façon uniforme dans toutes les directions, on peut dire que sa puissance rayonnante vaut le produit de l'indication  $y$  et de l'aire de la sphère.

Aire d'une sphère:  $4 \pi r^2$

Puissance irradiée:  $y \cdot 4 \pi r^2$



## Introduction aux travaux pratiques sur les «appareils»

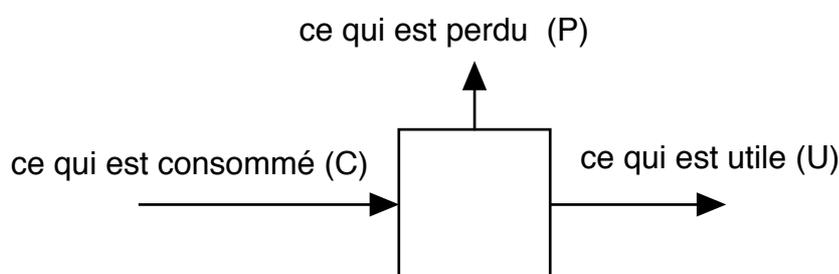
### Mesure des énergies, puissances et rendements des machines et des organismes.

Nous sommes maintenant outillés pour maîtriser les **mesures d'énergie**, de puissance, de rendement, sur quantités d'installations énergétiques, appareils ménagers, etc.

Nous sommes aussi capables de prendre des mesures pour quantifier l'énergie, de **monter des installations** et de proposer des **améliorations**, notamment en vue d'augmenter leur rendement, leur puissance, etc.

Nous allons faire des mesures précises sur la machine à vapeur et en tirer des conclusions importantes pour les implications économiques et écologiques de l'énergie. On pourra aussi pousser plus loin les analogies avec le corps humain.

Dans son sens le plus large, le schéma de la «boîte mystérieuse», qui représente notre appareil, a la signification suivante:



Dans les cas qui nous intéressent, C, P et U sont des énergies.

Si on divise toutes les énergies par le temps, on obtient des puissances, et on voit que le schéma de la «boîte mystérieuse» et les deux égalités qui s'y rapportent sont encore valables, mais pour des puissances.

C est souvent qualifié de «moteur»

U est souvent qualifié de «utile»

P est souvent qualifié de «calorifique»

Mais il y a des cas où on doit se dégager de ces qualificatifs, comme on l'a vu notamment pour les pompes de chaleur. Il faudra alors appliquer le schéma dans sa signification la plus générale.

## Quelques TP «appareils»

### 1re série, chauffages d'eau.

- Rendement d'un chauffage d'eau par plongeur électrique
- Rendement d'un chauffage d'eau par plaque électrique
- Rendement d'un chauffage d'eau par brûleur de camping

Comparer les trois systèmes en envisageant plusieurs critères. Normaliser les conditions d'expérience en vue de cette comparaison.

### 2e série, capteurs solaires photovoltaïques.

Mesurer la puissance utile et le rendement de différents capteurs solaires photovoltaïques par beau temps, puis les comparer entre eux, selon différents critères judicieux.

- Comparer les résultats avec les indications du fabricant, et rédiger un rapport critique.
- Evaluer le rendement de la surface cristalline
- Evaluer le rendement des panneaux constitués

Classer les types de cristaux de silicium (amorphes, monocristallins, polycristallins) par catégorie d'efficacité.

### 3e série, lampes.

Mesurer le rendement de plusieurs types de lampes et les comparer (lampes à incandescence, tubes fluorescents, lampes halogènes, lampes à filament de carbone)

### 4e série, humidificateurs.

Mesurer la consommation et le rendement d'un humidificateur d'appartement

- a) modèle à vaporisation
- b) modèle à pulvérisation

Comparer les résultats avec les données du fabricant.

Comparer les enjeux écologiques et économiques des deux systèmes.

**5e série, frigorifiques.**

Comparer les rendements de deux systèmes frigorifiques:

- système traditionnel à circuit de gaz
- système à éléments «Peltier» (pour glacières d'automobiles p. ex.)

Comparer avec le rendement théorique maximum ( $T_{sup} / \Delta T$ ) d'une pompe de chaleur.

**6e série, capteurs solaires.**

Comparer les performances des capteurs solaires suivants: (voir les fiches à suivre)

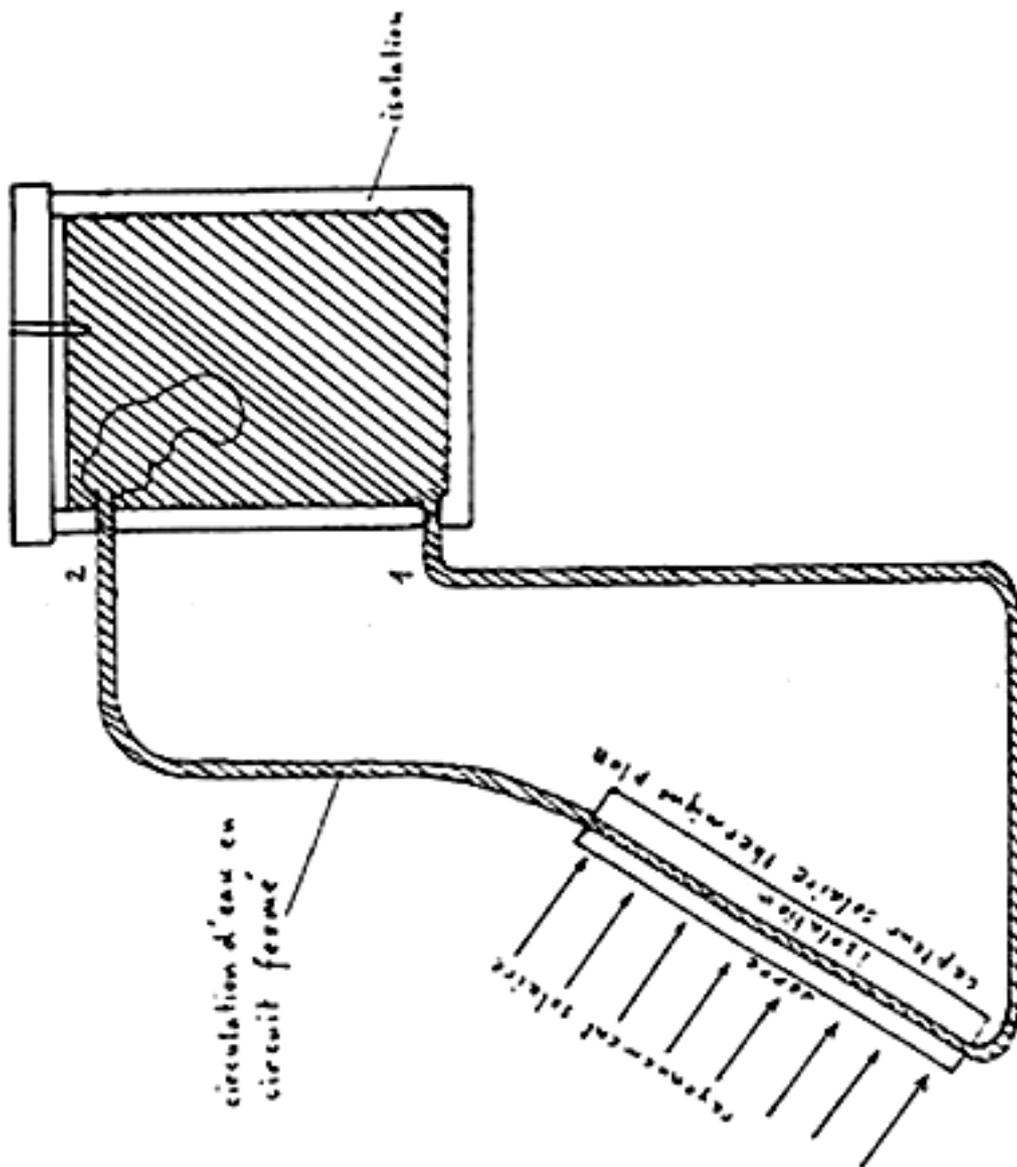
- thermique plan
- thermique parabolique
- photovoltaïque

**7e série, installations diverses.**

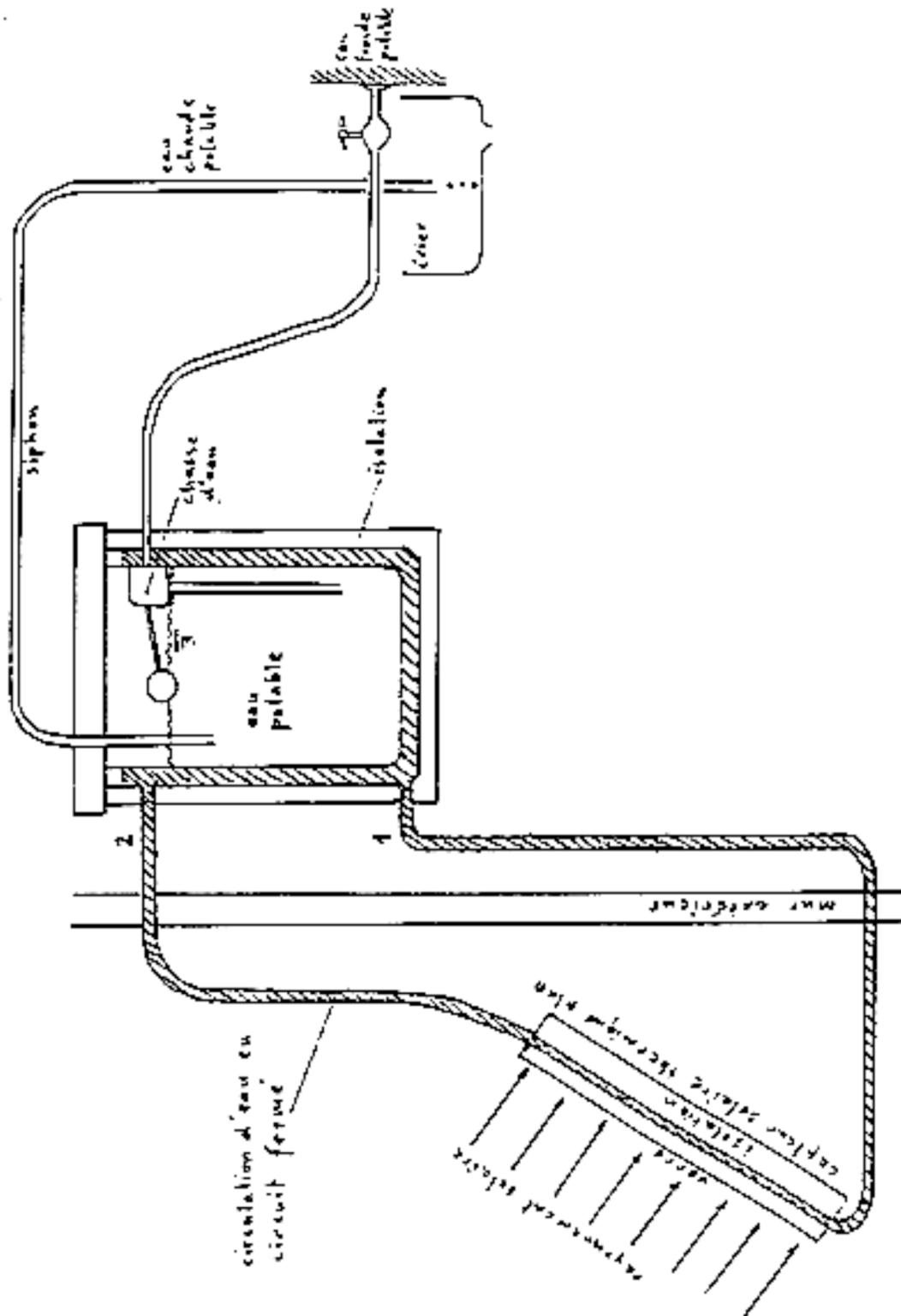
Déterminer la puissance à différents niveaux et déterminer divers rendements dans les installations suivantes:

- machine à vapeur
- production d'hydrogène photovoltaïque
- distillation
- production d'électricité hydraulique

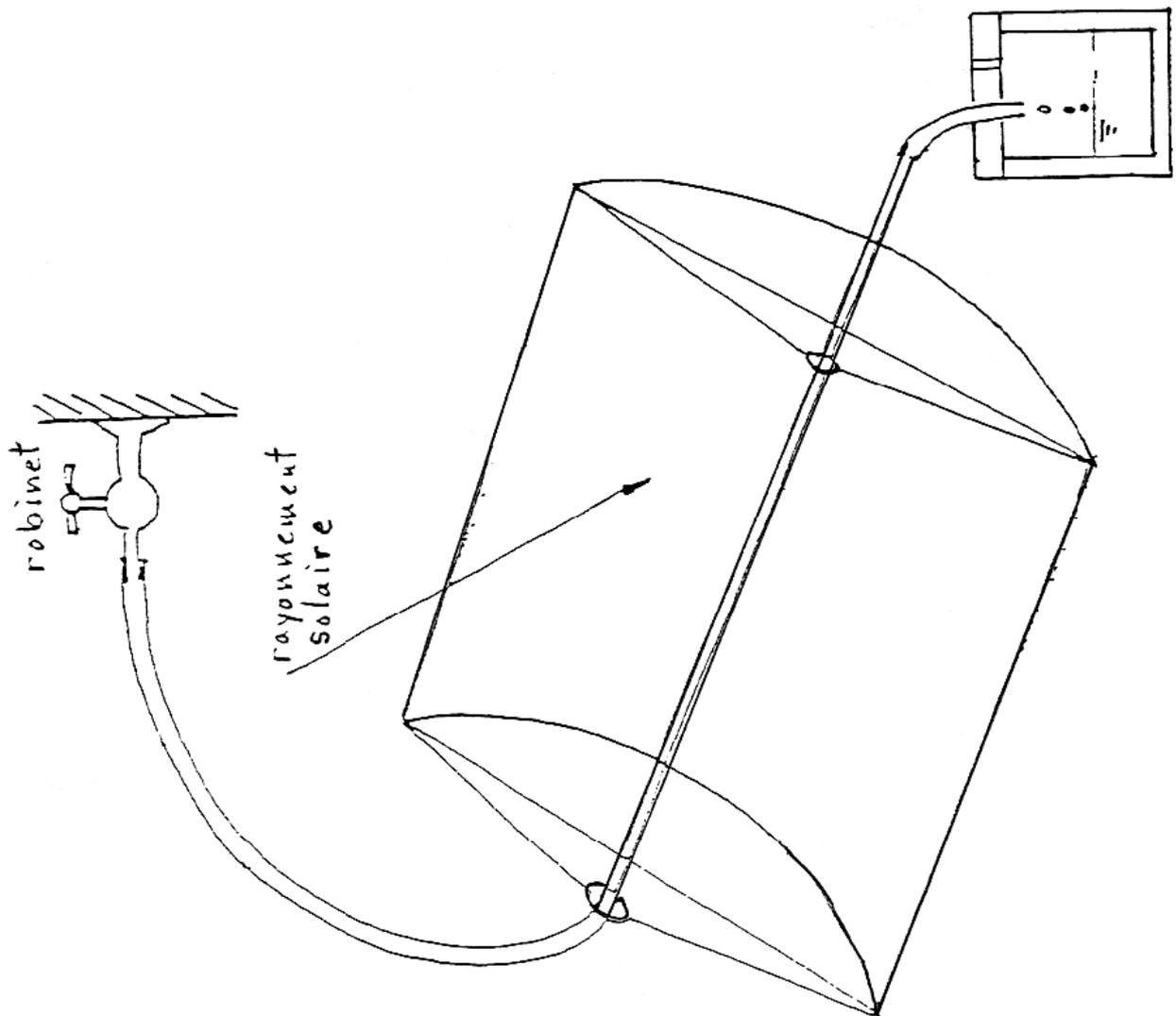
Détermination des performances d'un  
chauffe-eau solaire à capteur plan  
Montage 1 (sans eau potable)



### Détermination des performances d'un chauffe-eau solaire à capteur plan Montage 2 (avec eau potable)



Détermination des performances d'un capteur solaire parabolique



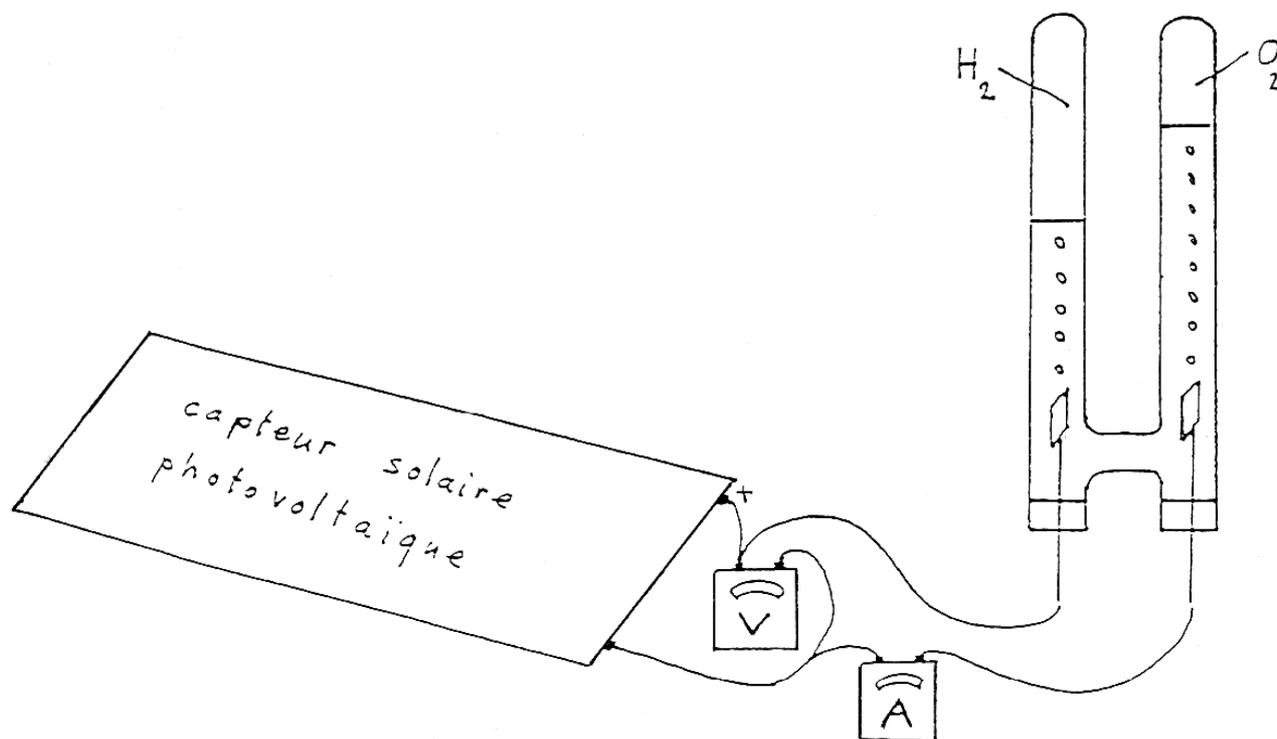
### Installation solaire de production d'hydrogène par capteur photovoltaïque.

Données:

pouvoir calorifique de l'hydrogène:  $12 \cdot 10^6 \text{ J / kg}$

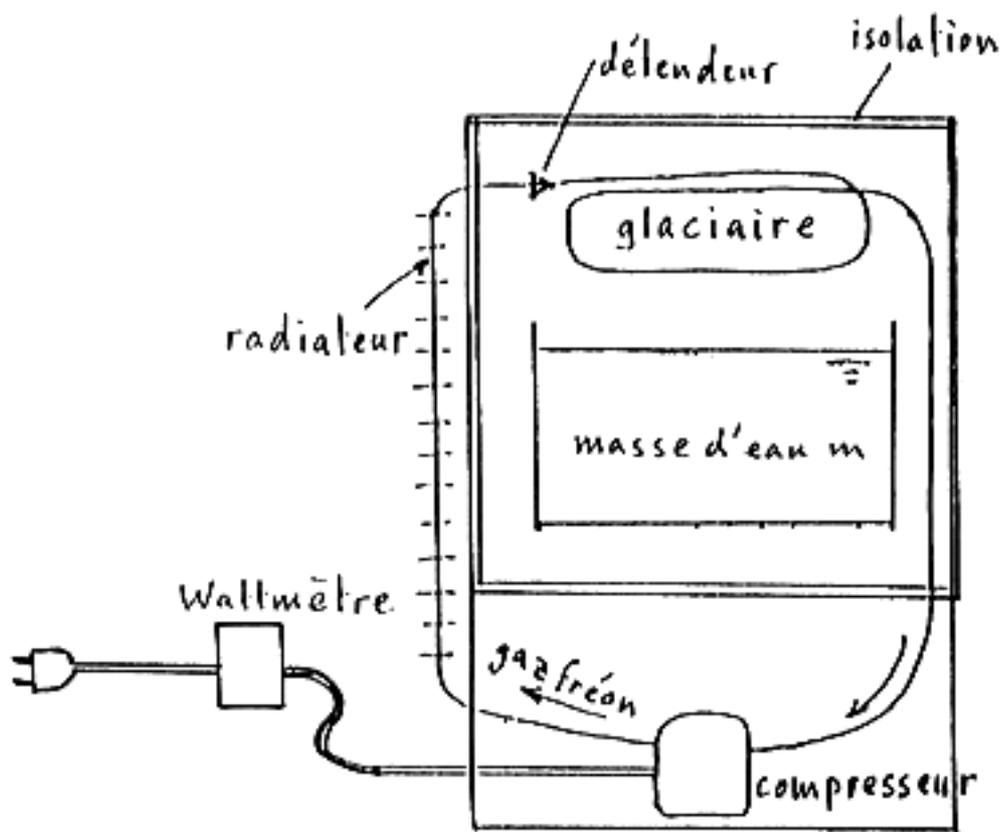
masse volumique de l'hydrogène:  
(approximation pour des conditions normales)  $0,09 \text{ kg/m}^3$

irradiance solaire maximum par beau temps: environ  $1 \text{ kW / m}^2$   
(valeur à préciser si on dispose d'un pyranomètre)

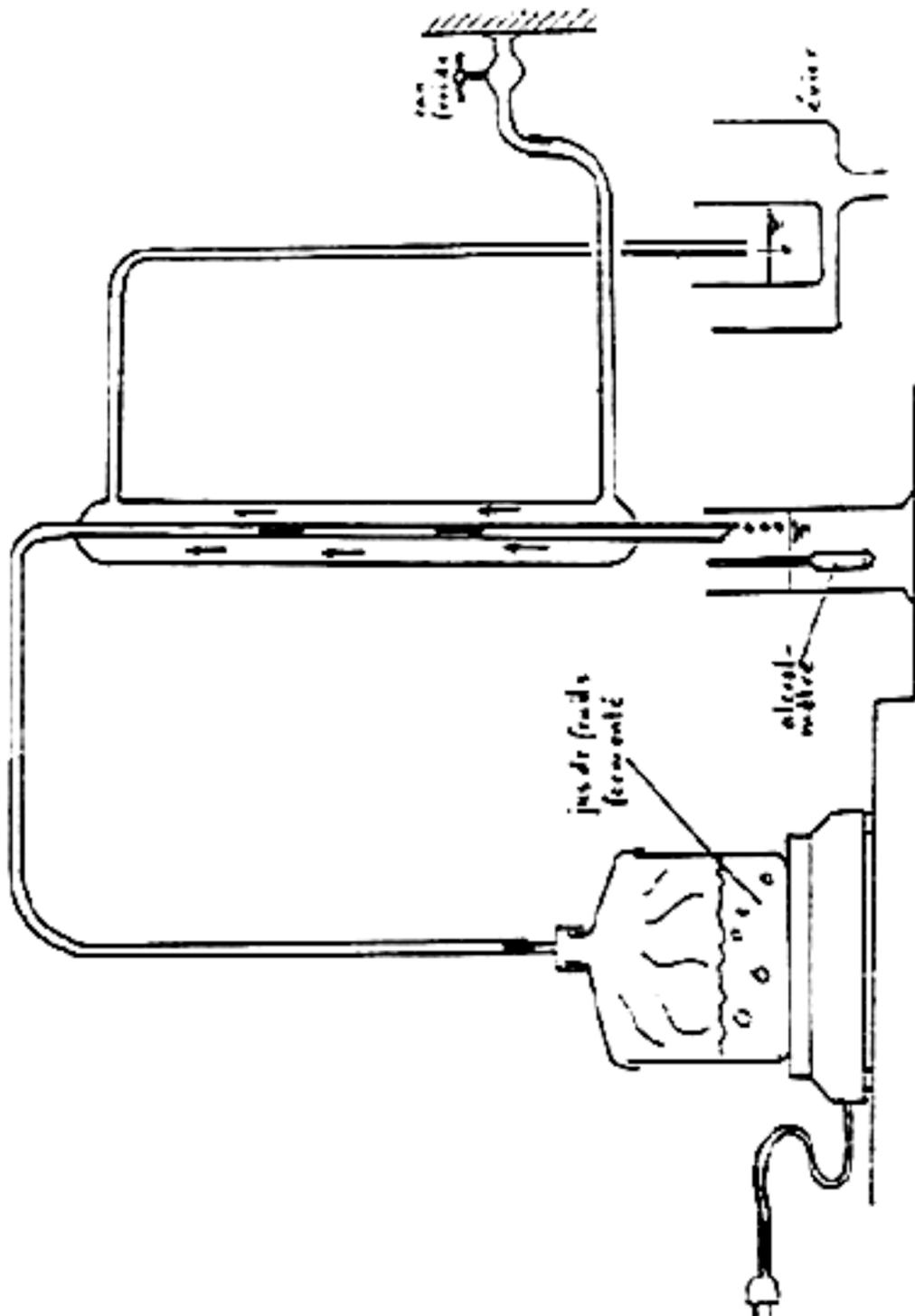


### Détermination du rendement d'une installation à pompe de chaleur (frigo)

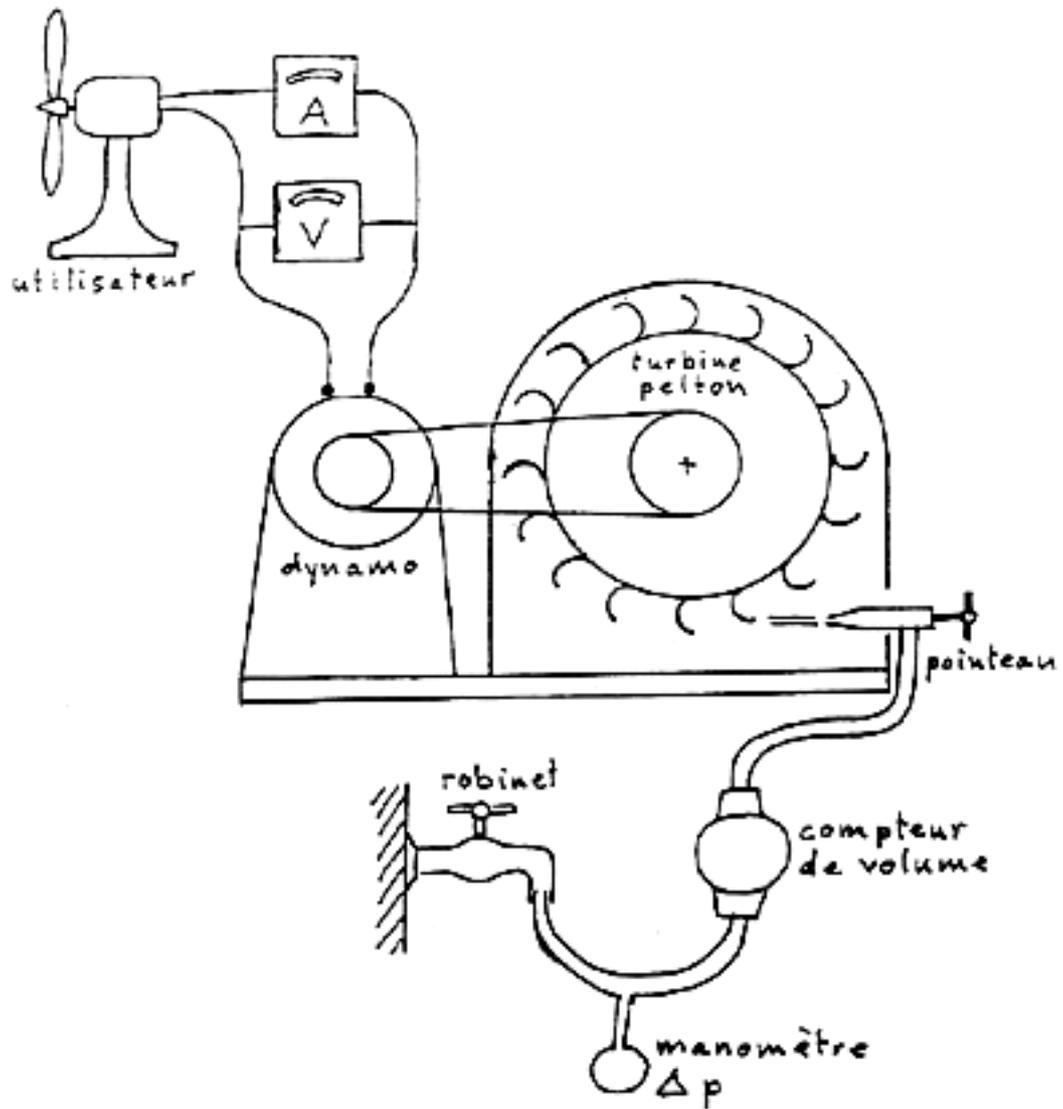
(Effacer le wattmètre et le bac d'eau)

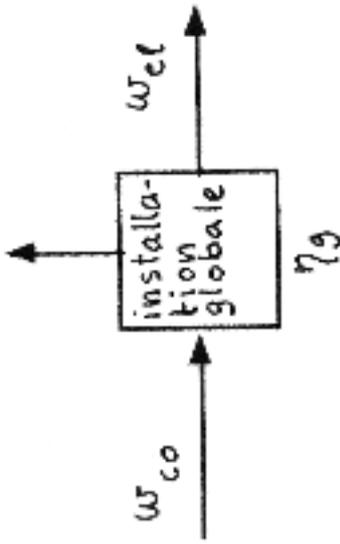


Dans une installation de distillation, comparer les puissances:  
- du chauffage - du refroidisseur - de la condensation

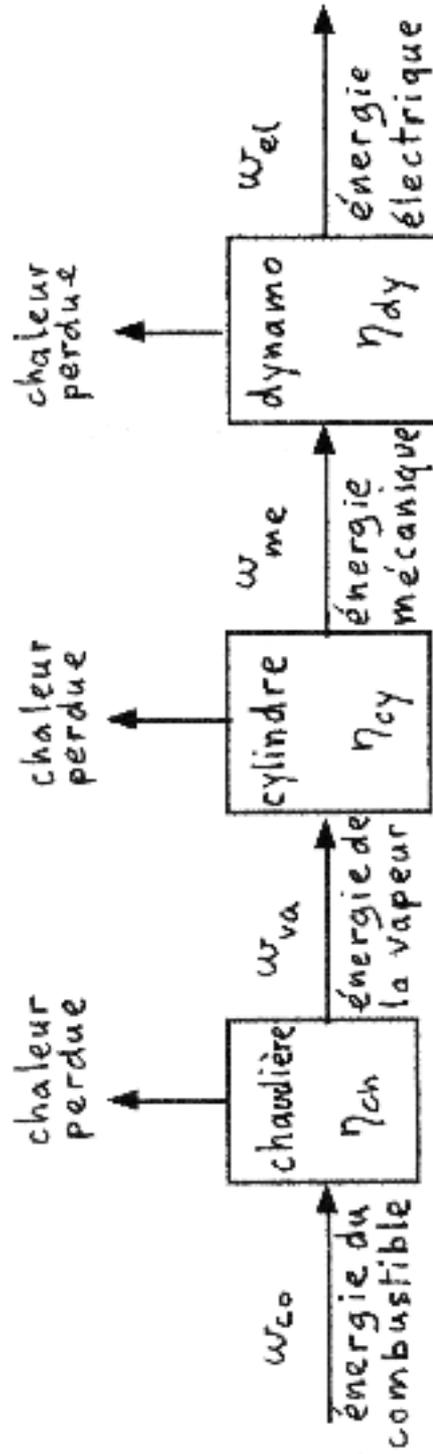


Détermination du rendement d'une centrale électro-hydraulique





La chaîne des rendements d'une centrale thermique



$$\eta_{ch} \cdot \eta_{cy} \cdot \eta_{dy} = \frac{w_{va}}{w_{co}} \cdot \frac{w_{me}}{w_{va}} \cdot \frac{w_{el}}{w_{me}} = \frac{w_{el}}{w_{co}} = \eta_g$$

Conclusion: Le rendement global est le produit des rendements partiels

## Planches symboliques

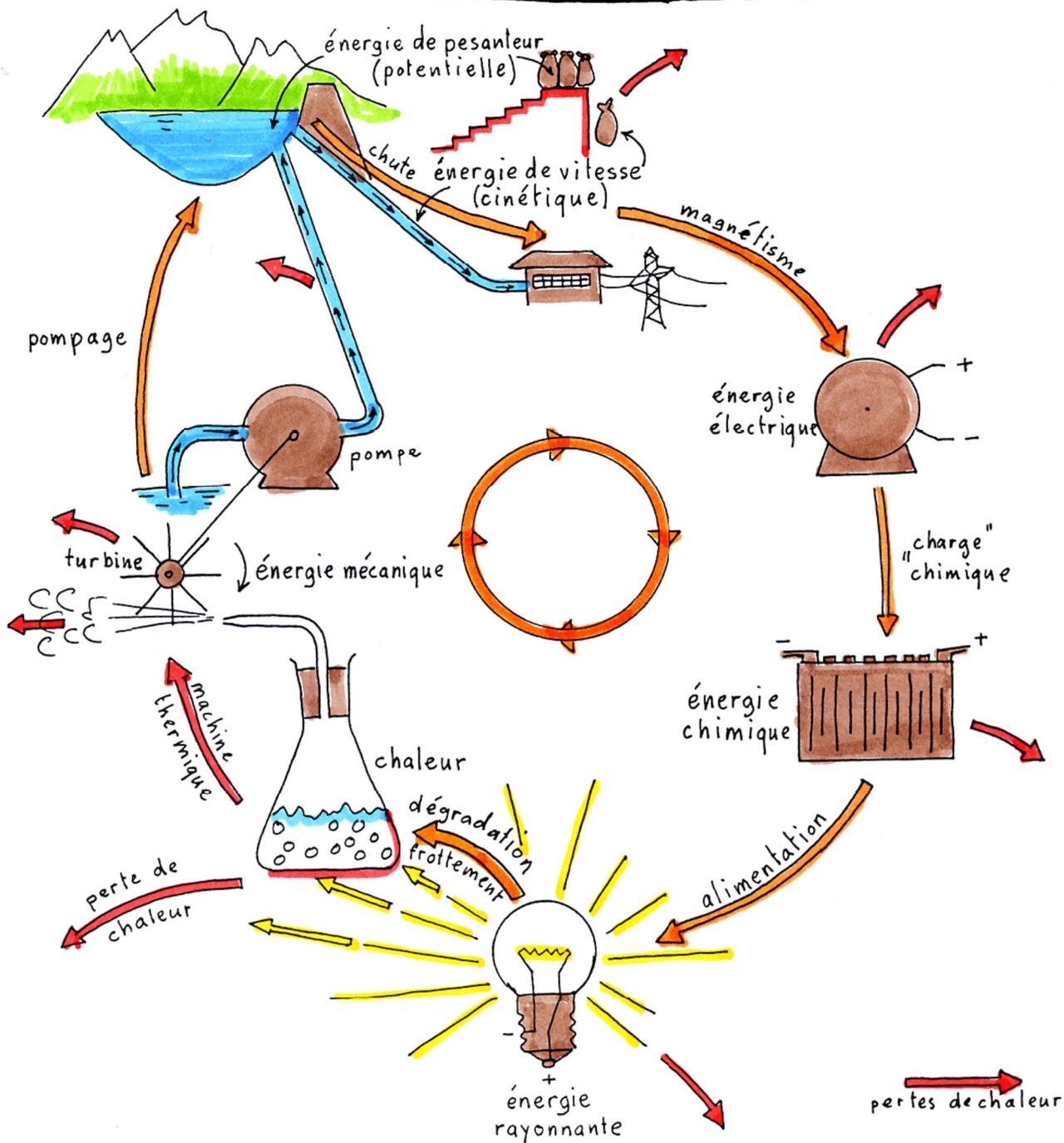
# Les sources de l'énergie

Ces planches permettent de comprendre globalement les questions de l'énergie et leurs implications économiques et écologiques, en élevant le point de vue au niveau des **sources**.

A cet égard, il est utile de faire remarquer que l'électricité, si souvent citée comme source, n'en est pas une, mais uniquement un moyen de transport, ou éventuellement de stockage de l'énergie.

# Le Cycle

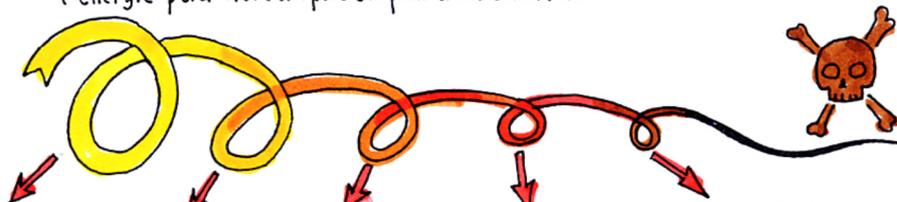
des transformations de l'énergie  
exemples de leurs diverses formes



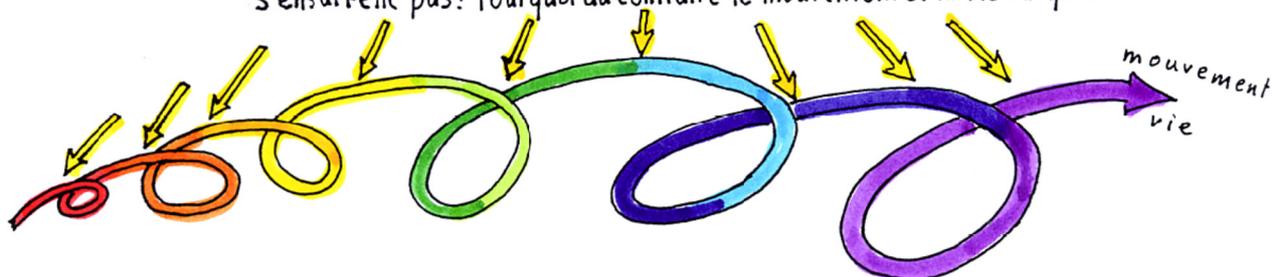
# La spirale



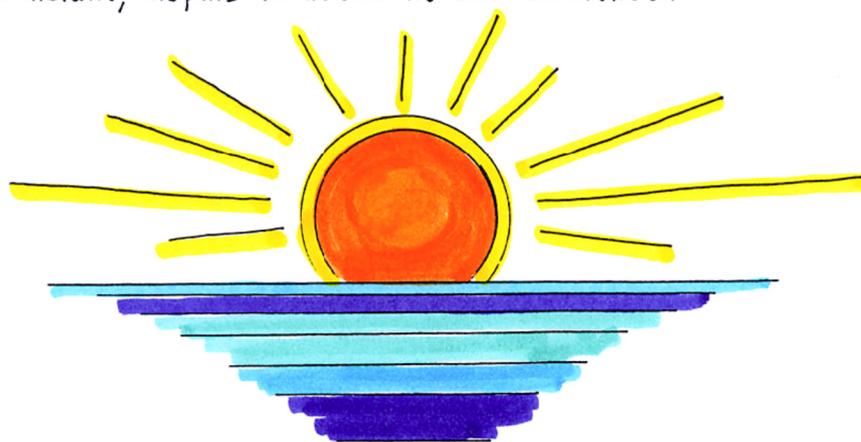
A chaque transformation se superpose un peu de „frottement“ qui donne de la chaleur, en partie irrécupérable. Le cycle des transformations de l'énergie perd donc de plus en plus d'intensité.



Pourquoi la mort, non seulement de toute vie mais même de tout mouvement ne s'ensuit-elle pas? Pourquoi au contraire le mouvement et la vie s'amplifient-ils?

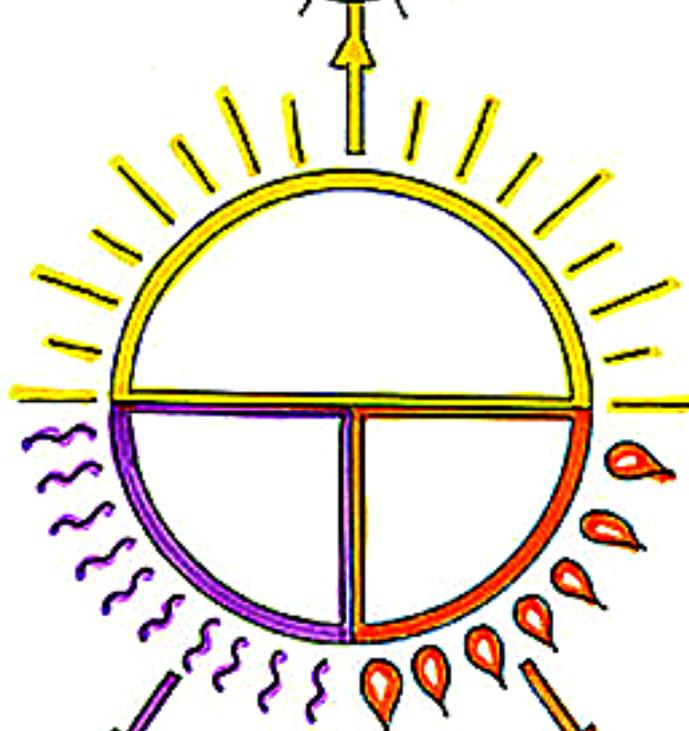


La Terre reçoit un flux d'énergie sous forme rayonnante, chaque instant, depuis le début de son existence.



# Les 3 sources

le Soleil direct



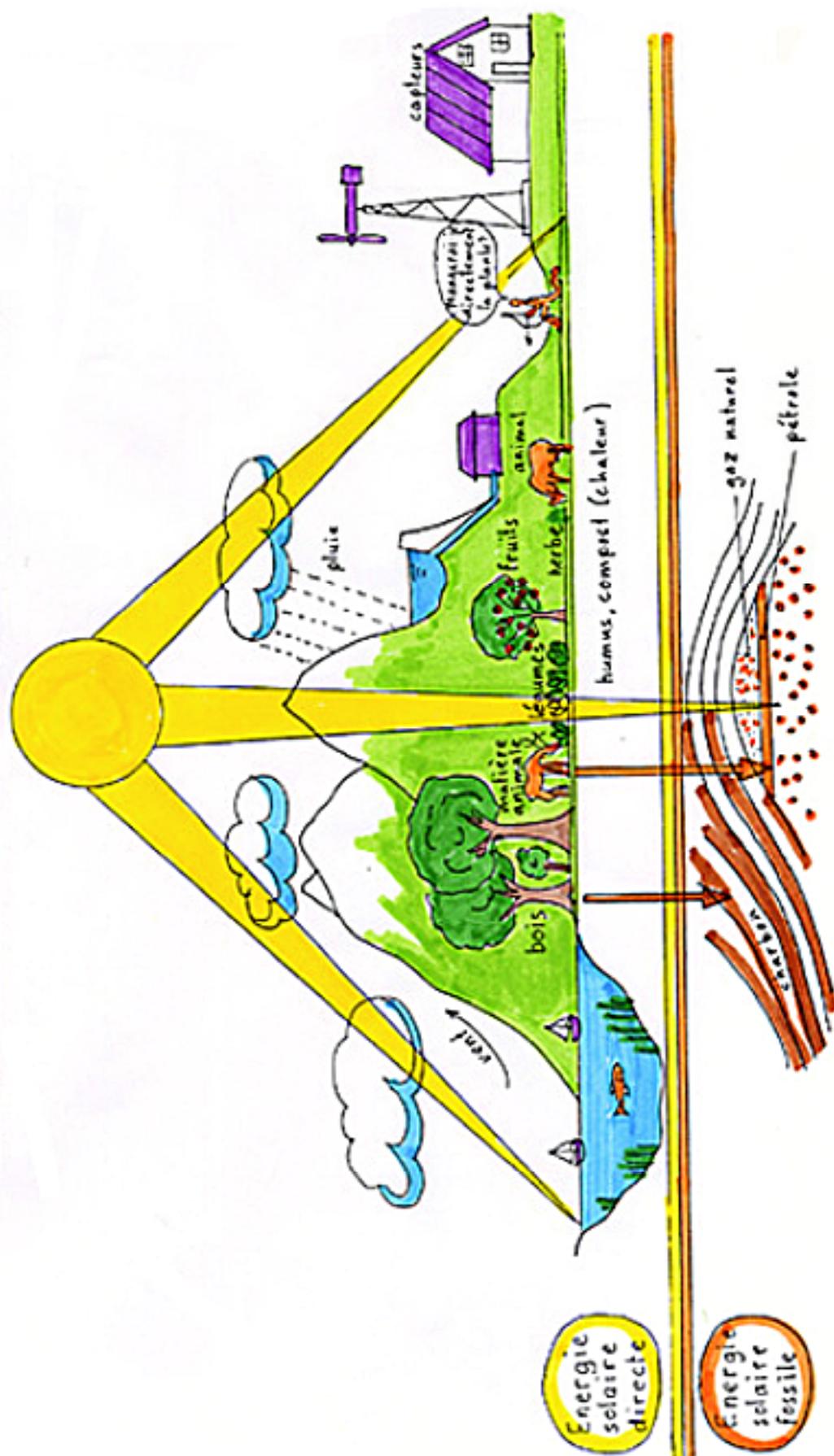
le Soleil artificiel  
énergie produite par  
fission ou fusion  
nucléaire



le Soleil fossile  
énergie accumulée  
pendant des millions  
d'années

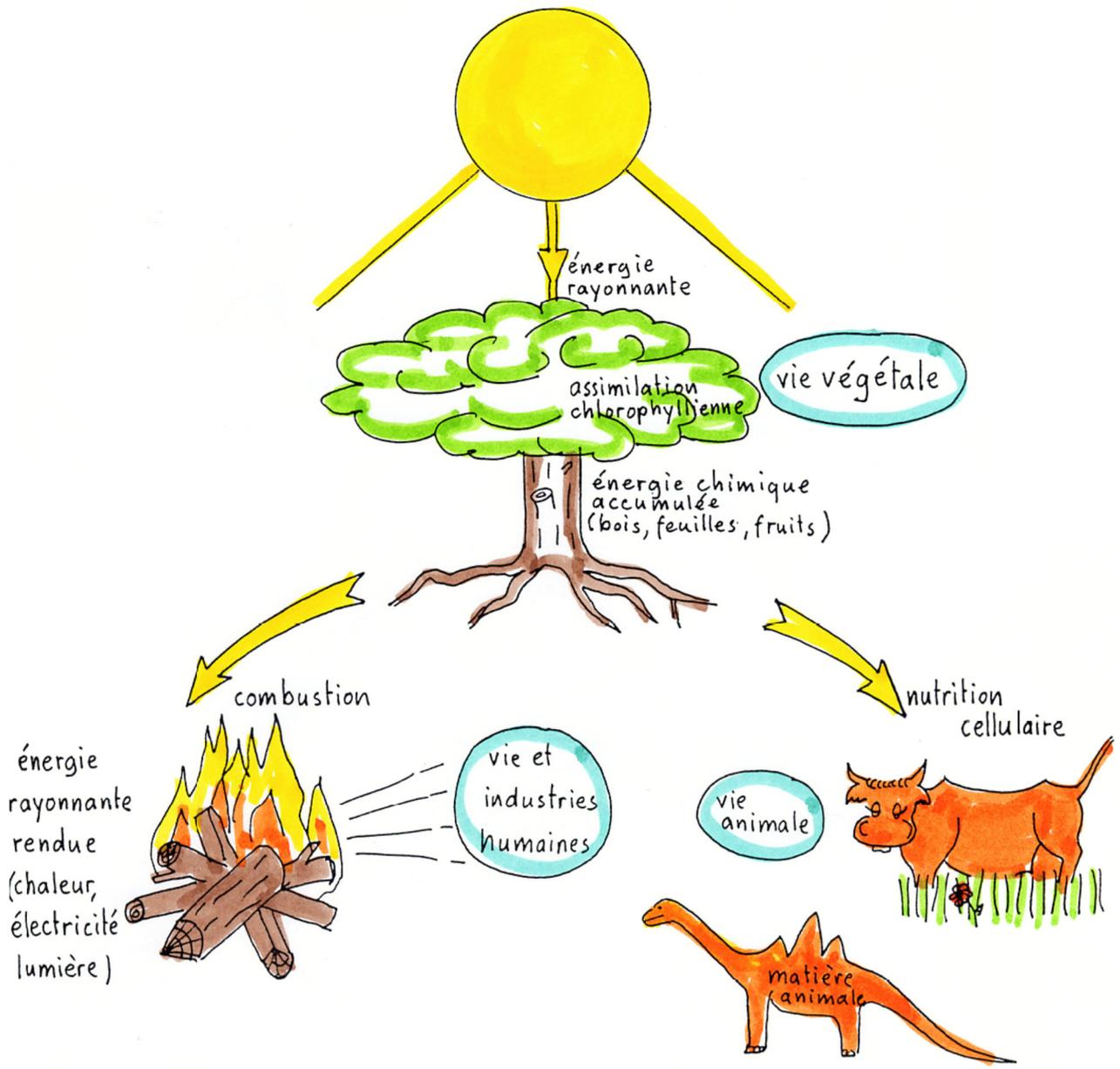
# La pyramide de l'énergie solaire

## Les deux sortes d'énergie solaire



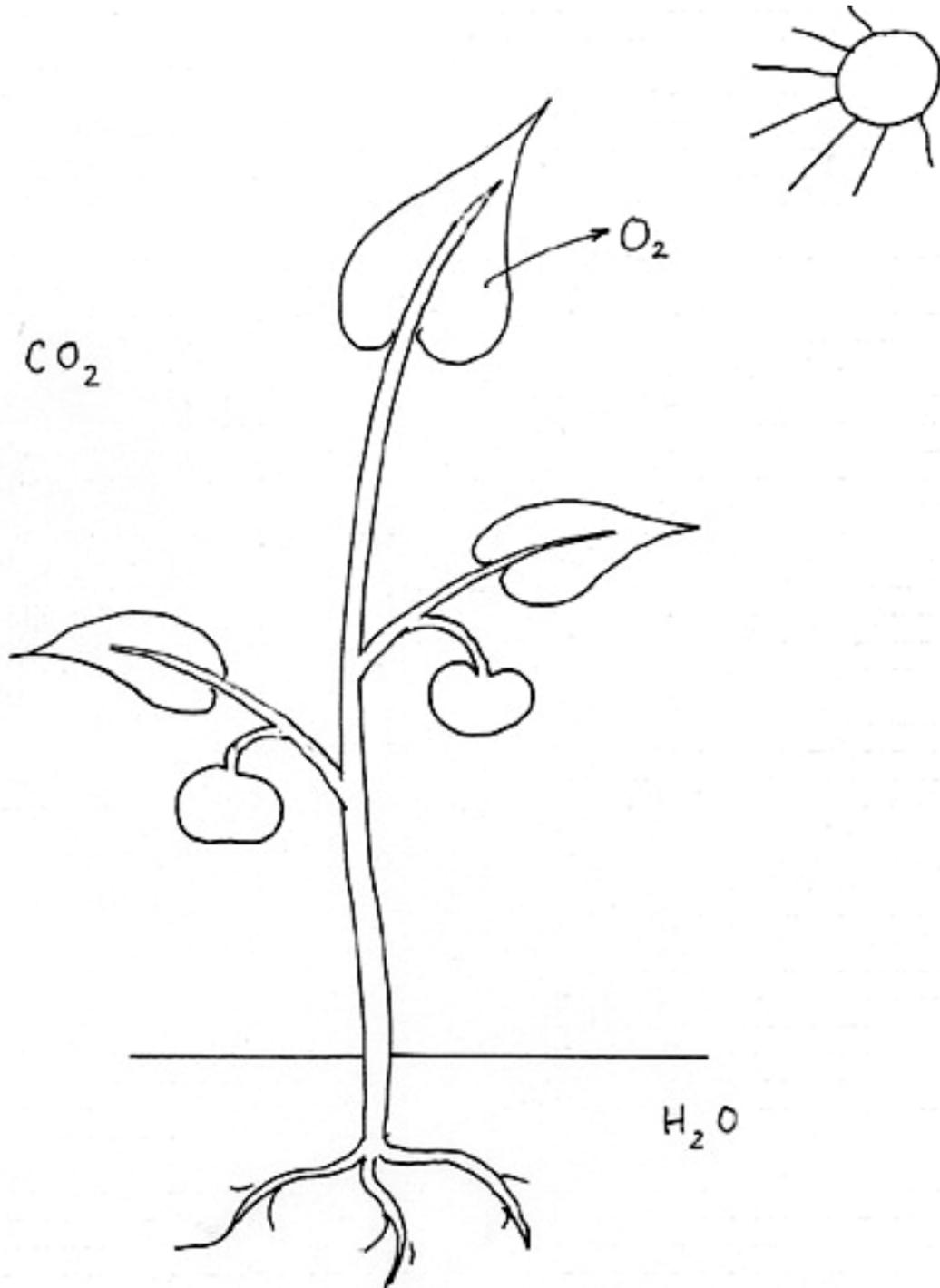
énergie  
solaire  
directe

les transformations les plus  
naturelles:  
l'assimilation chlorophyllienne  
et les règnes végétal, animal et humain



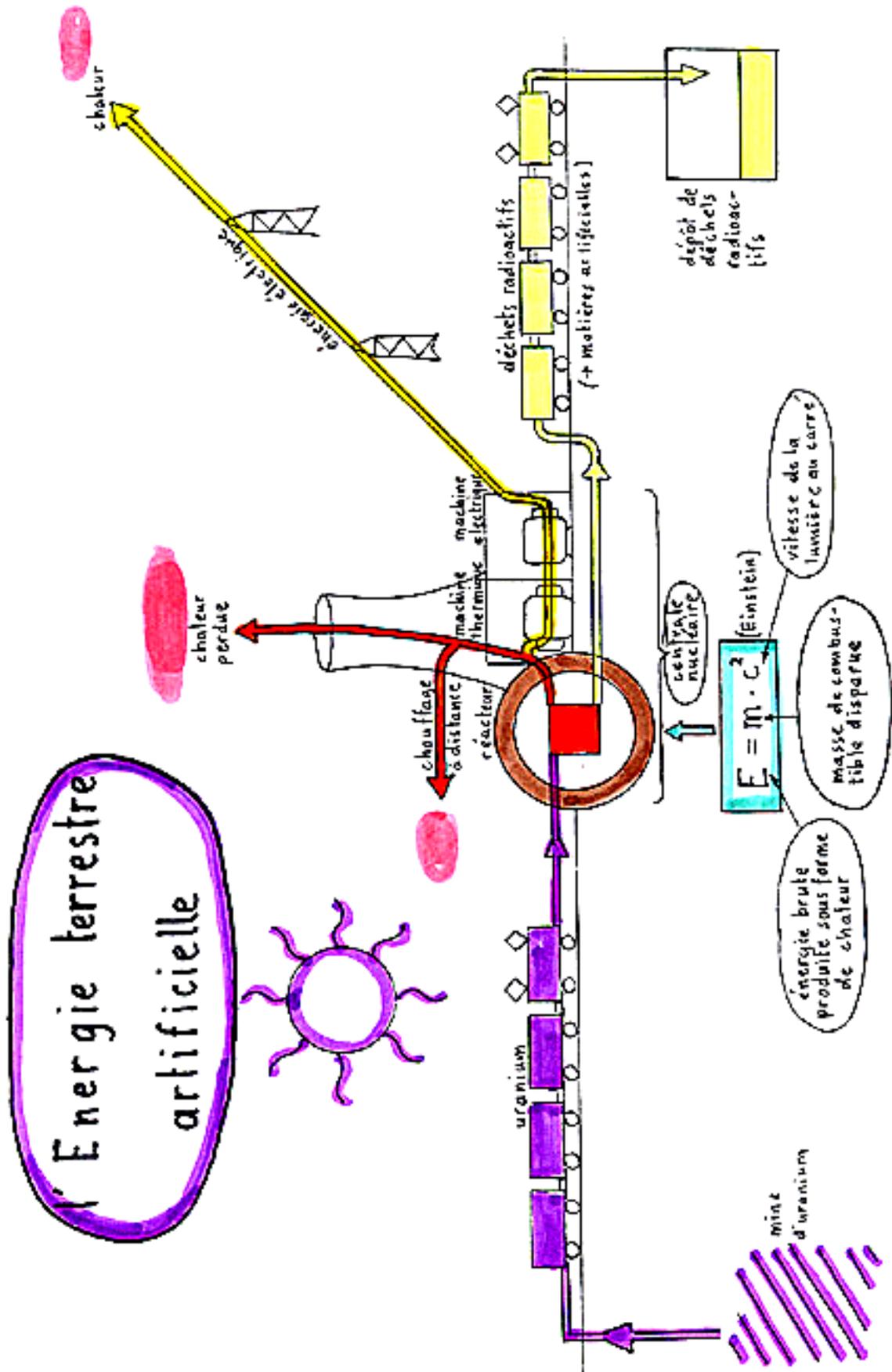
### Analogies entre la plante verte et le générateur solaire d'hydrogène

Compléter le dessin au crayon de couleur, notamment en indiquant clairement les divers canaux de sève.

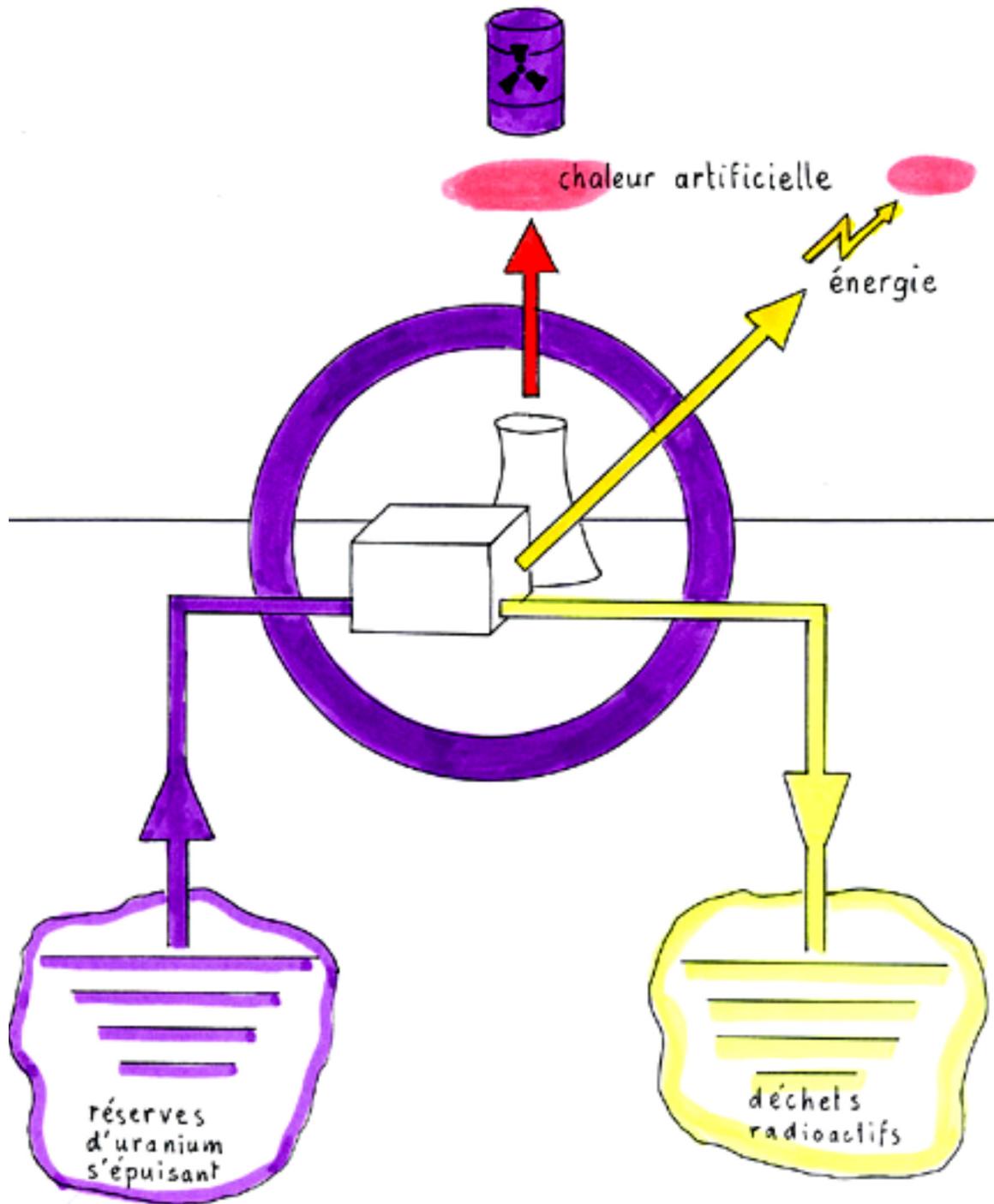


### Analogies entre la plante verte et le générateur solaire d'hydrogène

générateur	plante
Soleil	
capteur	
fils électriques	
hydrogène (pouvoir énergétique = .....)	
eau	
oxygène	



# le Soleil artificiel bilan



# le Soleil fossile bilan

