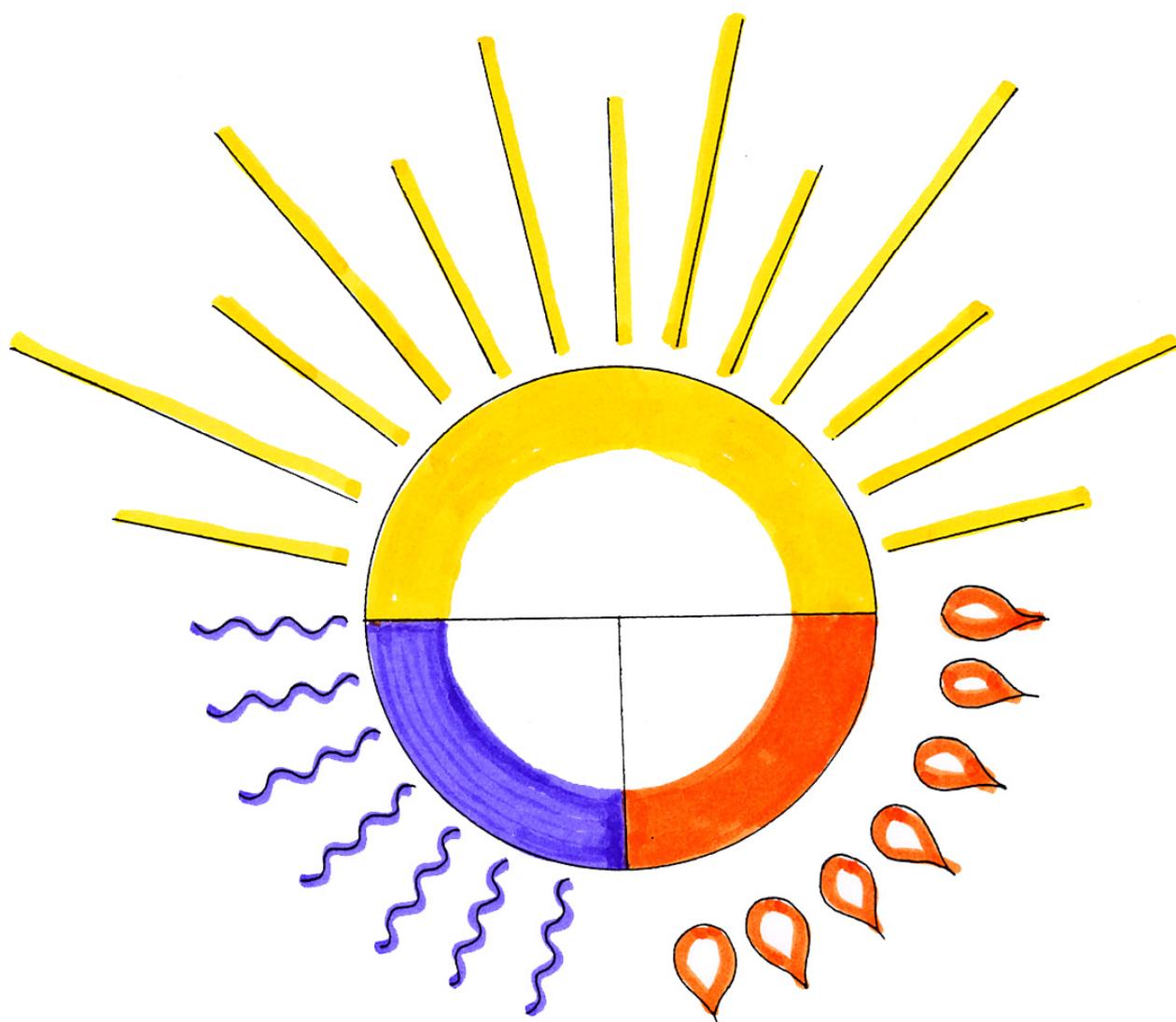


L'énergie

un parcours



J.-E. Buchter

Introduction

Ce parcours expérimental doit conduire des élèves de l'enseignement secondaire dans le monde de l'énergie, si mystérieux et pourtant si quotidien, en tenant un certain nombre de paris:

- Partir de **situations qui sont connues d'eux-mêmes**, de questions qui se posent dans la vie courante, d'idées qu'ils se font, d'expériences de sensibilisation déjà faites en classe, etc.

- Transposer ces questions en **situations de laboratoire**, et en obtenir des confirmations, des infirmations, des découvertes et probablement de nouvelles questions.

- En arriver à des **situations réelles** et concrètes du monde ménager, technique ou anatomique, etc. dans lesquelles ils apprennent à s'orienter, à mobiliser leurs connaissances, à **exercer des compétences**. L'activité prend alors plus de sens. La motivation s'en trouve renforcée, et bien des élèves comprennent à ce stade!

- En arriver enfin à une vision globale, une **synthèse**, qui permette de voir tout le thème dans son imbrication avec des questions économiques, écologiques, biologiques, etc.

- Chemin faisant, **construire une charpente** aussi claire et succincte que possible, support indispensable d'une maîtrise logique et si possible quantitative du sujet. Eviter trop de digressions qui ne concourraient pas à une compréhension de l'essentiel. Etayer par quelques exercices gradués.

- Intéresser des **élèves de tous types**: «scientophiles», techniciens et artistes, rationnels et intuitifs, etc. en débouchant sur des «**appareils**» qui excitent la curiosité de chacun et qui les relie à des situations réelles, voire futuristes.

- Pouvoir moduler le cours selon le **type de classe**, en abordant les sujets de façon plus ou moins qualitative ou quantitative, en approfondissant plus ou moins.

Les premiers **TP** sont destinés à l'**approche** des deux notions cardinales: la relation travail-chaleur et la conservation de l'énergie. Les TP «tambour» et «machine à vapeur» sont effectués en deux phases. L'une est très qualitative, l'autre, intervenant plus tard, est plus quantitative, et peut éventuellement être supprimée avec des classes à profil moins scientifique.

On arrive ensuite à des **TP** préparant les **mesures** de différentes formes d'énergie: énergie chimique (pouvoir calorifique), énergie de vaporisation, énergie électrique, énergie rayonnante,...

Certains **TP** sont très **libres** et laissent beaucoup de champ à l'imagination et à l'initiative personnelle. D'autres **TP**, plus **directifs**, peuvent servir de modèles pour des TP libres ultérieurs.

Tout le début du cours est une préparation aux **TP sur les «appareils»**. Il est en effet indispensable que les élèves parviennent à effectuer quelques-uns de ces TP, **afin que le cours prenne son sens**, à tout le moins à leurs yeux! Quitte à abréger certains des TP précédents et n'en livrer que le résultat! Ce sont ces TP «appareils» qui demandent l'exercice de compétences générales et qui sont en prise directe sur le monde pratique.

La **critique d'un essai** comportera en général les points suivants:

- Comparaison du résultat obtenu avec ceux d'autres groupes de travail, puis avec un résultat officiellement connu (table, indication du fabricant,...)
- Calcul de l'écart relatif par rapport à ces valeurs de référence.
- Justification de ces écarts par des **incertitudes** de mesure ou par des **erreurs systématiques**, et, dans ce cas, justification éventuelle du sens dans lequel l'écart a lieu.

La **synthèse du cours** s'opère par une élévation du point de vue, facilitée par des planches colorées et symboliques, qui mettent en exergue le rôle des **sources** de l'énergie, et leur importance écologique et économique.

Interdisciplinarité:

Implications avec l'**anatomie-physiologie**:

On verra à tous moments comment l'énergie se manifeste dans le corps animal et dans le corps humain, ainsi que dans les plantes. Le rôle de l'assimilation chlorophyllienne sera particulièrement mis en exergue.

Implications avec les **mathématiques**:

Ce cours touche particulièrement les sujets suivants:

- proportionnalité et rapports
- tableaux de valeurs et graphiques
- petites équations
- pose de petits systèmes d'équations
- écart relatif, %
- mesurage, unités
- ordres de grandeur

Implications avec l'**économie** et l'**écologie**:

Elles sont particulièrement importantes dans les paragraphes traitant du chauffage et des sources d'énergie.

Implications avec l'**histoire** et la **géographie**:

Elles sont particulièrement faciles à développer en relation avec l'apparition des formes d'énergie au cours de l'industrialisation, et la répartition terrestre des sources de l'énergie.

Options pédagogiques

Une des options principales est de mettre l'élève dans des situations qui lui parlent, et qui le motivent par leur parenté avec des **situations techniques réelles**. Il s'aperçoit qu'il peut maîtriser des installations telles que la centrale électrique à vapeur, le chauffe-eau solaire, etc. Pour atteindre ce but, il s'agit d'élaguer tout ce qui n'y concourt pas directement. Des sujets tels que gravité, composition des forces, calorimétrie, changements d'état, dynamique, électricité ne seront donc qu'effleurés.

Chemin faisant, l'élève doit être mû par ses **propres idées** et pouvoir vérifier ses conjectures par l'expérience, affinant ainsi sa **pratique scientifique** et son sens de l'objectivité.

Concernant certains **choix de termes français, d'unités, de notions fondamentales**, on retrouve ici des débats habituels. Les choix qui ont été faits l'ont été dans le but de la simplicité et de la proximité à la réalité dans laquelle baigne notre public d'élèves:

La «force» sera prise comme une notion fondamentale dont l'élève a une perception intuitive fort développée. On se contentera de la manipuler et de la mesurer. Une définition intellectuelle nous entraînerait trop loin et un débat philosophique n'aurait sa place qu'après bien des années de pratique.

Pour ces raisons, son unité, le «Newton», sera simplement introduit par l'observation d'un dynamomètre et deviendra une réalité bien concrète.

Le «Joule», que les élèves connaissent déjà souvent par des sensibilisations, n'a encore qu'une réalité très floue. Il s'agit de le définir.

Dans la perception de l'élève, la chaleur est a priori une réalité différente du travail mécanique. La découverte de ses relations avec les autres formes d'énergie est fondamentale, elle doit se dégager d'expériences objectives et aboutir à des certitudes. La réalité qui doit apparaître est celle de l'équivalence en quantité, mais de la différence en qualité. C'est pourquoi il est indispensable de mettre au départ dans les mains de l'élève deux unités différentes, qui chacune auront reçu une définition naturelle et parlante. La «calorie» est donc un outil pédagogiquement fort utile. Ce n'est que par la suite, lorsque cette relation chaleur-énergie sera bien assimilée, que les calculs d'énergie se feront uniquement en Joules. Mais là encore, on ne calculera que des énergies et les problèmes d'entropie resteront à résoudre! Il nous en restera la connaissance de cette unité encore fort employée aujourd'hui. La calorie nous permet par ailleurs de résoudre simplement quantité de problèmes techniques intéressants concernant l'eau, sans avoir à pénétrer dans le sujet de la calorimétrie.

Lorsque le choix se présentera entre deux expressions d'une grandeur physique, il sera toujours fait en faveur de l'expression la plus simple et la plus parlante pour l'élève, quitte à **bien définir le terme dans son usage scientifique**, et à prévenir l'élève de ses significations dans l'usage courant. C'est ainsi que, par exemple, dans cet exposé, on préfère le mot «poids» à l'expression «force de la pesanteur».

L'énergie, introduction

Discussion-recherche

Chacun a entendu parler d'«énergie»

- dans quelles circonstances?
- quelle est l'importance de cette notion?
- est-ce quelque chose de matériel?
- comment la définiriez-vous?
- quelles autres notions ce concept véhicule-t-il? (force, vitesse, chaleur, lumière, nourriture, vitalité, forme physique, danger, pollution, vibration,...)
- quelle est l'importance de l'énergie dans les domaines:
 - écologique
 - économique
 - santé
- par où pourrait-on se saisir de ce problème pour le clarifier?

Problématique

Chaque élève aura pris conscience de certains aspects de la problématique de l'énergie, que ce soit sous l'angle de l'approvisionnement, de l'écologie, de l'économie, de l'industrie, du ménage, de la technique, etc.

Ce concept est intimement lié à tout ce qui existe: monde animal et humain, végétal, géologique, météorologique, technique, etc. Et dans le monde technique, il concerne la mécanique (forces et mouvements), l'électricité, la chimie, l'atomistique, etc.

Chacun a déjà vu et expérimenté beaucoup de choses dans la vie courante. Le but du cours est de mettre toutes ces données en relation les unes avec les autres, et en relation avec d'autres expériences qu'on va faire. On en tirera une connaissance cohérente qui permettra de comprendre facilement ces phénomènes, de les maîtriser, de saisir leurs implications économiques, écologiques et techniques qui ont une importance immense pour l'avenir de la société, et dont par conséquent tout citoyen doit avoir de bonnes notions de base.

Immersion

Visite d'un atelier de fabrication.

Citer pour différentes machines les alimentations, les productions, les dégagements d'énergie.

Distinguer ce qui véhicule de l'énergie et ce qui n'en véhicule pas.

Envisager l'usine dans son entier. Mêmes questions.

Envisager une automobile. Mêmes questions.

Envisager un animal domestique. Mêmes questions.

Envisager votre propre corps. Mêmes questions.

Le rôle particulier et universel de la chaleur apparaîtra certainement.

Vérifier que l'apparition de chaleur ne correspond souvent pas à des «chauffages» voulus comme tels!

TP. les transformations de l'énergie

Objectifs

Contenus

- notions:

énergie, chaleur, forme d'énergie, bilan d'énergie, transformation, transport, stockage de l'énergie.

- outils et techniques:

schéma de la «boîte carrée» (exemple de modélisation)
liaison d'appareils entre eux, connexions.

Compétences

- Observer un appareil ou un ensemble d'appareils et en esquisser le bilan d'énergie.
- Distinguer entre énergie motrice, énergie utile, énergie perdue, chaleur fournie, chaleur utile.
- Reconnaître les formes d'énergie (mécanique, électrique, élastique, rayonnante, calorique (chaleur), chimique, cinétique, potentielle, chlorophyllienne («verte»), éolienne, etc.
- Distinguer un flux d'énergie d'un flux de matière. (Par exemple, l'énergie n'est pas la vapeur, ni la courroie, ni le courant électrique, ni l'eau de la chute,...)
- Distinguer: transformation, transport, stockage d'énergie.

Il va de soi qu'il ne s'agit que d'une première approche d'un domaine très vaste, et qu'à ce stade, l'élève ne peut souvent maîtriser ces objectifs qu'avec l'aide du maître.

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.**

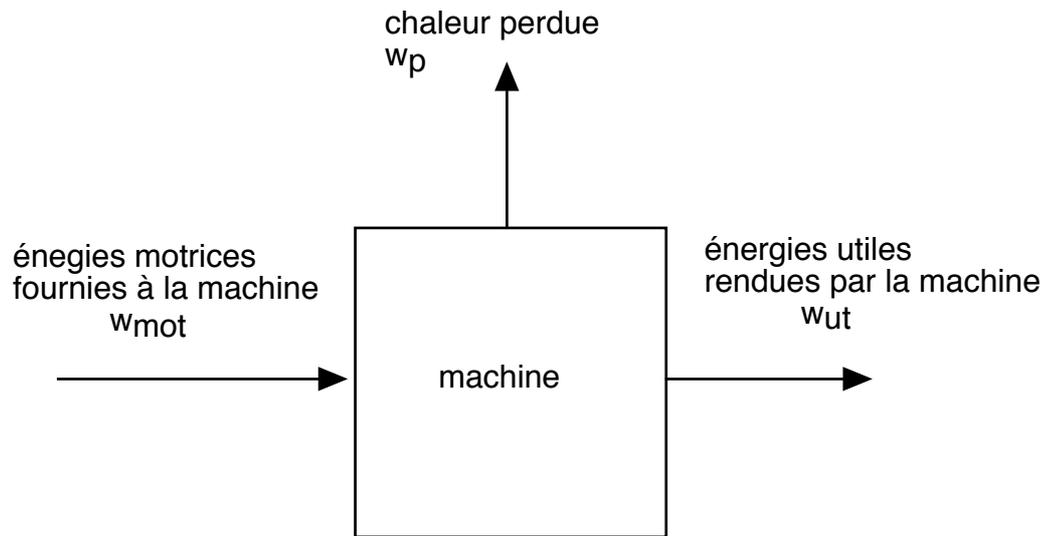
A chaque poste:

- 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.

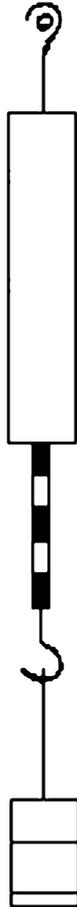


Nota: L'énergie sera symbolisée par **w** minuscule, symbole qu'il s'agira de ne pas confondre avec le **W** majuscule qui symbolisera le Watt, unité de puissance.

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.

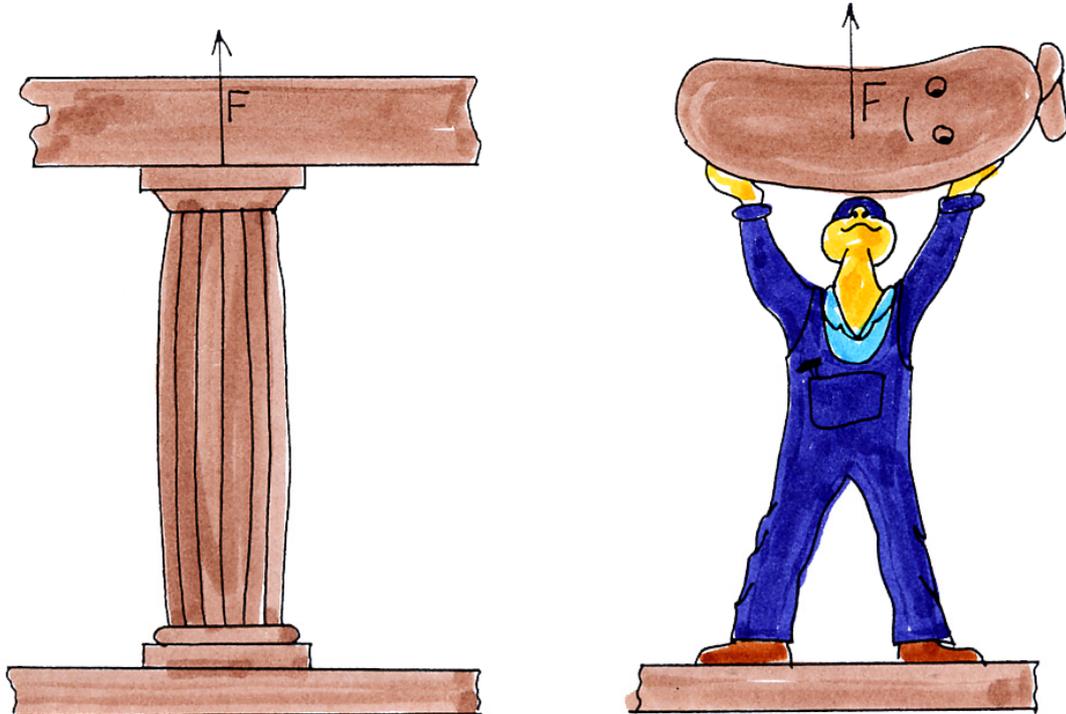


Suspendre une masse (quantité de matière) de 1 kg à un dynamomètre, après avoir appris à le **régler dans la position** où il va fonctionner.

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.

Travail (énergie mécanique) et chaleur

Problématique

On a constaté un dégagement de chaleur dans beaucoup de machines qui travaillent. Pour maîtriser ce problème, commençons par le simplifier à l'extrême et imaginons une machine dont tout le travail se transforme en chaleur.

Immersion

Percer ou meuler un profil en fer (attention, lunettes, ne pas se brûler!).
Faire fonctionner pendant un certain temps un moulin à céréales.
Toucher un frein à tambour après fonctionnement. Se frotter vigoureusement les mains.
Visite d'un atelier. Où constate-t-on des dégagements de chaleur? (Attention dangers!)
Entrée d'une locomotive en gare. Où dégage-t-elle de la chaleur?
Une automobile après fonctionnement. Même question.
Démonstration d'un fil électrique chauffant.

Pour tenter de voir clair dans les transformations d'énergie, nous allons d'abord étudier trois machines :

- **le tambour**, transformant entièrement un travail mécanique par le frottement (cette machine sera étudiée en deux temps)
- **le palan**, transformant un travail en un autre travail presque sans frottement. (cette machine sera également étudiée en deux temps, son étude complète étant réservée au cours de mécanique)
- **le plongeur électrique**, qui nous montrera que le travail électrique produit la même quantité de chaleur que le travail mécanique (exercice 5 p. 315).

TP. le tambour I

Objectifs

Contenus

- **notions:**
paramètre influençant une variable
approche de la notion de travail
approche de la notion de chaleur
- **outils et techniques:**
interprétation graphique de l'influence d'un paramètre
technique de mesure fine de la température

Compétences

- Isoler un paramètre pour étudier son effet sur une variable
- Choisir les paramètres judicieux
- Utiliser une série de mesures et les traduire en graphique
- Reconnaître l'influence du paramètre (proportionnalité, proportionnalité inverse, non-proportionnalité, non-influence, absence de corrélation, ...)
- Enoncer une conjecture sur une corrélation entre deux paramètres et la vérifier
- Prendre les précautions nécessaires en vue d'une mesure précise d'une faible différence de température (éviter les pertes de chaleur et ne pas changer de thermomètre)

Méthodologie

Il est primordial que la démarche suivante résulte d'une réflexion des élèves, aidés ou plutôt dépannés par le maître!

Choix des paramètres et identification de leur influence sur la variable observée (paramètre principal)

La variable observée sera la variation de température de l'eau(ΔT). C'est en effet la conséquence observée de tout frottement de la ficelle sur le tambour.

Comme paramètres pouvant influencer cette variable, on trouvera:

- **force** de traction sur la ficelle (F)
- **nombre de tours de manivelle** (n)
- **masse de liquide** dans le tambour (m)
- nature du liquide (que l'on quantifiera par exemple par sa **densité**) (d)
- **nombre de tours de ficelle** autour du tambour (f)
- **temps d'exécution** de l'essai (t)
- **diamètre** de la boîte (D)

On admettra que certains paramètres sont probablement sans influence, parmi ceux-ci:

- **hauteur de la boîte**
- **pression atmosphérique**
- **humidité de l'air**
- **état de surface de la boîte**
- **etc.**

D'autres paramètres auront probablement une influence, mais on pense qu'elle sera négligeable, par exemple:

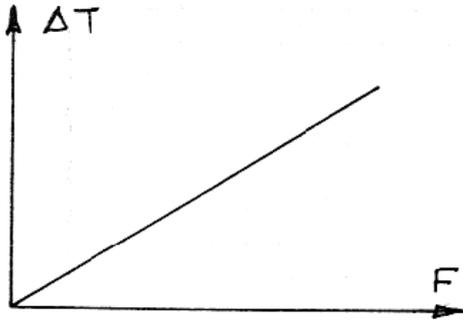
- **masse de la boîte**
- **matière de la boîte**
- **pertes de chaleur**
- **etc.**

Ces grandeurs auront un effet sur les écarts du résultat, écarts qu'on apprendra à estimer dans le TP tambour II.

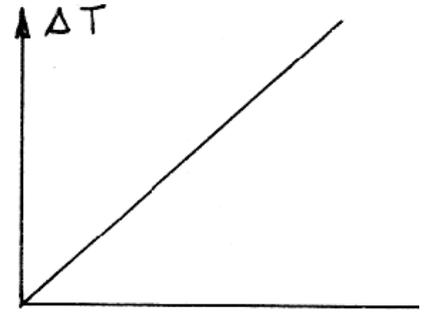
Tous les paramètres, à l'exception de celui qui est testé, seront maintenus à une valeur fixe durant tous les essais.

A l'issue des essais, on aidera les élèves à découvrir des **corrélations** correspondant aux **types** de diagrammes suivants:

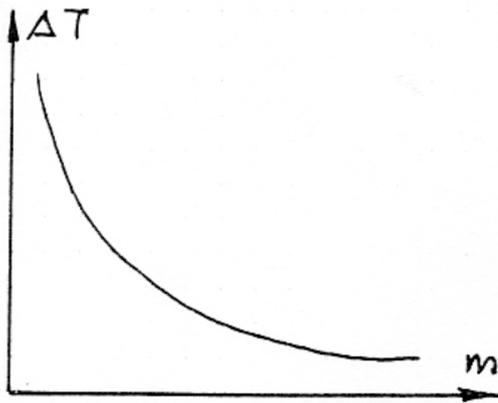
force: (proportionnalité)



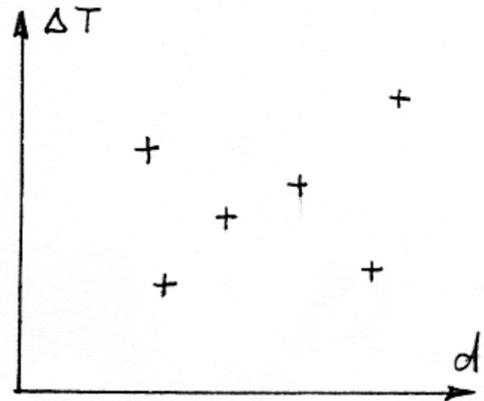
nombre de tours: (proportionnalité)



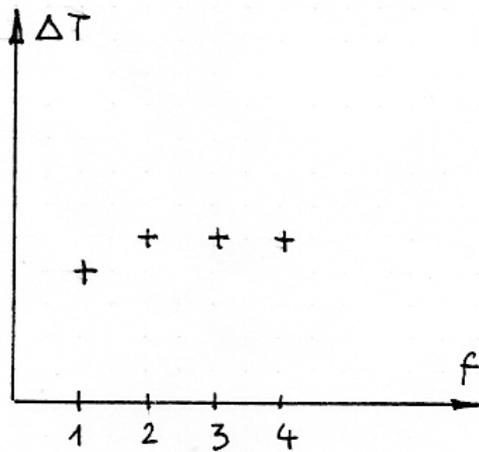
masse de liquide: (prop. inverse)
maître



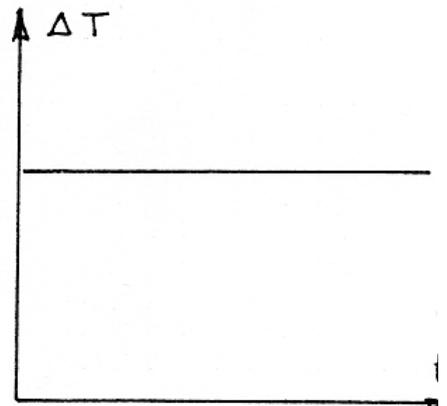
densité du liquide: (corr. aléatoire)



tours de ficelle: (sans influence)



temps d'exécution: (sans influence)



Après ces essais, on éliminera les **paramètres f et t** comme étant **sans influence**.

On éliminera **provisoirement d**, pour se limiter à l'**utilisation exclusive d'eau**.

On retiendra que les paramètres F et n ont une action proportionnelle. Ces deux paramètres sont certainement déterminants pour quantifier l'énergie mécanique donnée au cylindre. Il s'agit de la **force de frottement** et du nombre de tours. Ce dernier paramètre est lui-même proportionnel à la **distance parcourue** par la ficelle sur le tambour. Une étude de l'influence du diamètre du tambour pourrait nous renforcer dans la conjecture que c'est bien la distance parcourue qui compte pour le calcul de l'énergie donnée à la machine. Nous formulons la conjecture que **l'énergie donnée est proportionnelle à la force et au déplacement de cette force**. Cette conjecture sera renforcée par les essais du 2e TP sur le tambour!

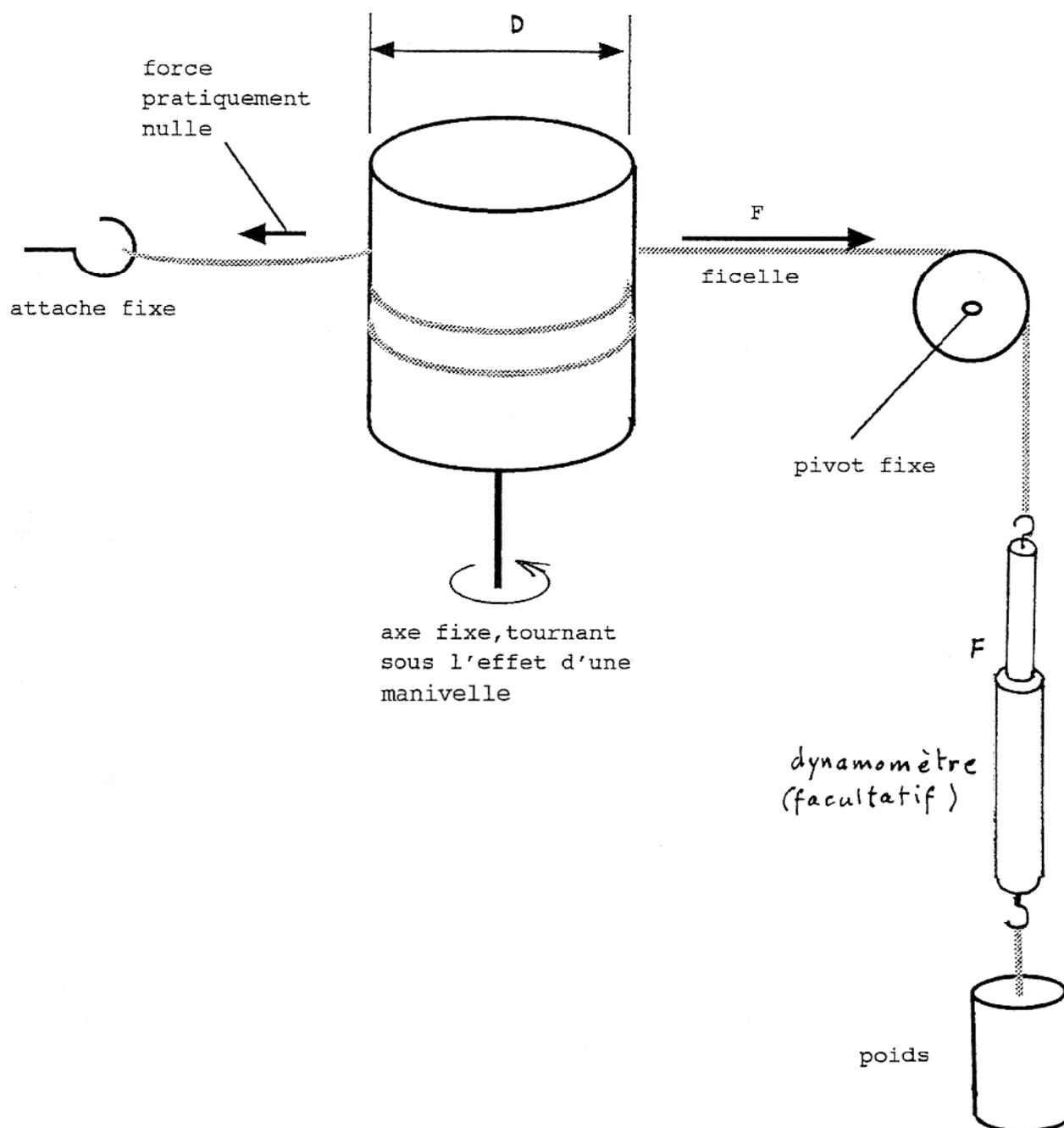
Reste à interpréter la proportionnalité inverse par rapport à la masse d'eau.

On constate que l'énergie qui entre dans l'eau pour la chauffer fait monter la température de moitié si la masse d'eau double, d'un tiers si la masse d'eau triple, etc. D'où la conjecture : **l'énergie qui est reçue par l'eau sous forme de chaleur est proportionnelle à la masse d'eau et à la différence de température**.

Ces deux conjectures seront à la base du 2e TP sur le tambour, au cours duquel on se posera aussi les questions suivantes:

- Est-ce que $m \cdot \Delta T$ est proportionnel à $F \cdot d$?
- Pourrait-on dire que la chaleur est proportionnelle à l'énergie mécanique donnée ?
- Quel est le coefficient de proportionalité ?

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 ΔT** 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 ΔT en fonction de ce paramètre.

Avant les essais, formuler des **conjectures** sur le genre de dépendance entre ΔT et le paramètre choisi:

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

Exemple:

Etudier l'effet de la **force** de traction F sur ΔT .

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?

Approche des notions quantitatives d'énergie mécanique et de chaleur.

Il s'agit de parler le plus simplement possible de l'énergie mécanique, de la chaleur, et de leur quantification, grâce à des unités adéquates.

La force

On s'est borné à montrer qu'elle se mesure à l'aide de «dynamomètres» gradués en «Newton».

Le travail (notion à aborder **après** le TP palan!)

Questions auxquelles on répondra par le «bon sens», tout en se méfiant de celui-ci. Le maître arrêtera les notions physiques à l'issue d'une discussion-recherche dans laquelle il sera fait une large place aux remarques et suggestions des élèves.

Une force immobile travaille-t-elle?

Une personne immobile supporte sa propre force de pesanteur. Travaille-t-elle?

Le socle d'une statue travaille-t-il?

(distinguer entre le sens physique et le sens professionnel du travail: un garde du Vatican au garde-à-vous est payé pour son travail)

Un déplacement sans force travaille-t-il?

(par exemple, le déplacement d'une ombre sur un mur demande-t-il du travail?)

Un **travail** demande donc une **force** et un **déplacement**.

Dès lors, on prendra comme unité de travail un travail effectué par une force de 1 Newton effectuant un déplacement de 1 m. On l'appellera 1 **Joule**.

Questions:

Quel sera le travail d'une force de 1 Newton se déplaçant de 2 m?

Quel sera le travail d'une force de 3 Newton se déplaçant de 1 m?

Quel sera le travail d'une force de 3 Newton se déplaçant de 2 m?

(certains élèves répondront probablement 5 Joules, à quoi on demandera ce que peut donner l'addition de 3 Joules et de 2 mètres!)

Quel sera le travail d'une force de f Newton se déplaçant de d mètres?

On en arrive à: $w = f \cdot d$

et à: $1[\text{J}] = 1 [\text{N} \cdot \text{m}]$

TP. le palan I

objectifs

Contenus

- notions

appropriation de la **notion de travail**, comme produit de deux grandeurs physiques: la force et la distance.

première approche de la **conservation de l'énergie** à travers l'égalité du travail moteur et du travail utile.

- outils et techniques

Utilisation d'un **dynamomètre dans une position quelconque** (réglage du zéro, élimination du frottement)

Détermination de la force de la pesanteur (poids) d'une masse connue.

Compétences

Observation de la variation inverse de deux grandeurs (force et déplacement)
En tirer des conclusions concernant l'importance de leur produit et l'invariance de celui-ci.

Méthodologie

Dans ce premier TP sur le palan, l'effet du frottement doit être le plus faible possible, afin de faire ressortir la loi de conservation, sans superposition de la loi de la conversion en chaleur.

Il s'agit donc d'employer des palans à très faible frottement, et il faut insister sur une manipulation correcte du dynamomètre et sur un déplacement sans frottement des ficelles.

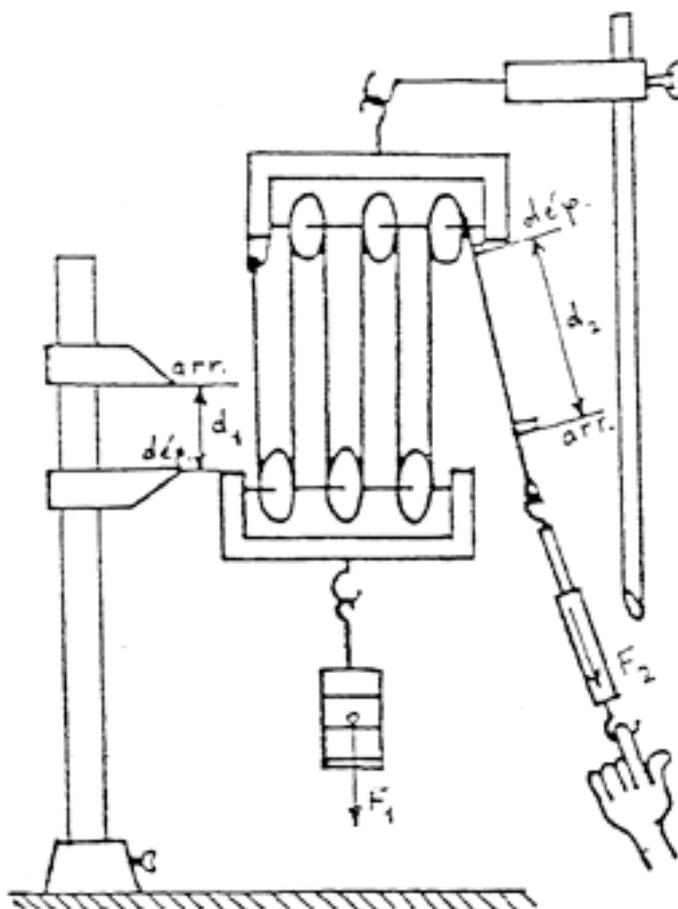
Le frottement sera pour l'instant classé dans les effets perturbateurs de la mesure, même si certains élèves auront remarqué que le travail utile est systématiquement plus petit que le travail moteur et en auront peut-être deviné la cause!

Dans ce cas on peut émettre ensemble la conjecture stipulant que le frottement est à l'origine de cette baisse de la quantité de travail et supposer que, comme dans le cas du tambour, ce travail a produit de la chaleur. Mais il est à ce stade impossible de le vérifier!

Conseil: peser les chapes mobiles avant le montage des ficelles et inscrire leurs masses.

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.

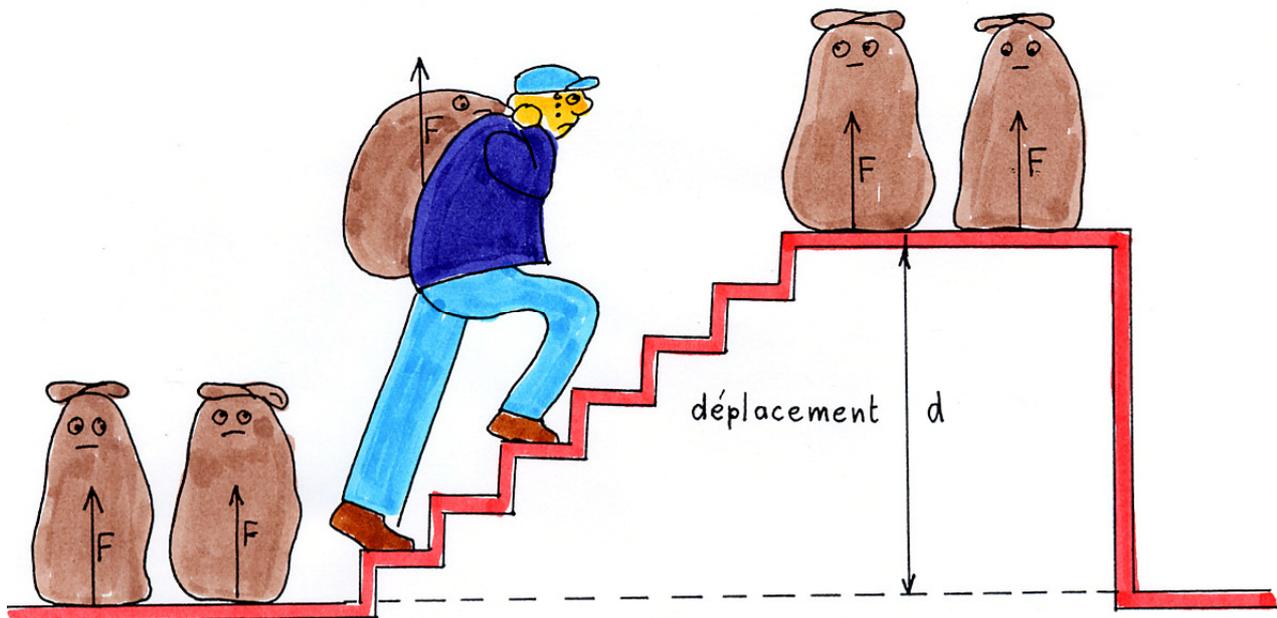
Chaque groupe de travail utilisera un palan de type différent, ceci permettant de varier le genre et la démultiplication des palans.

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).

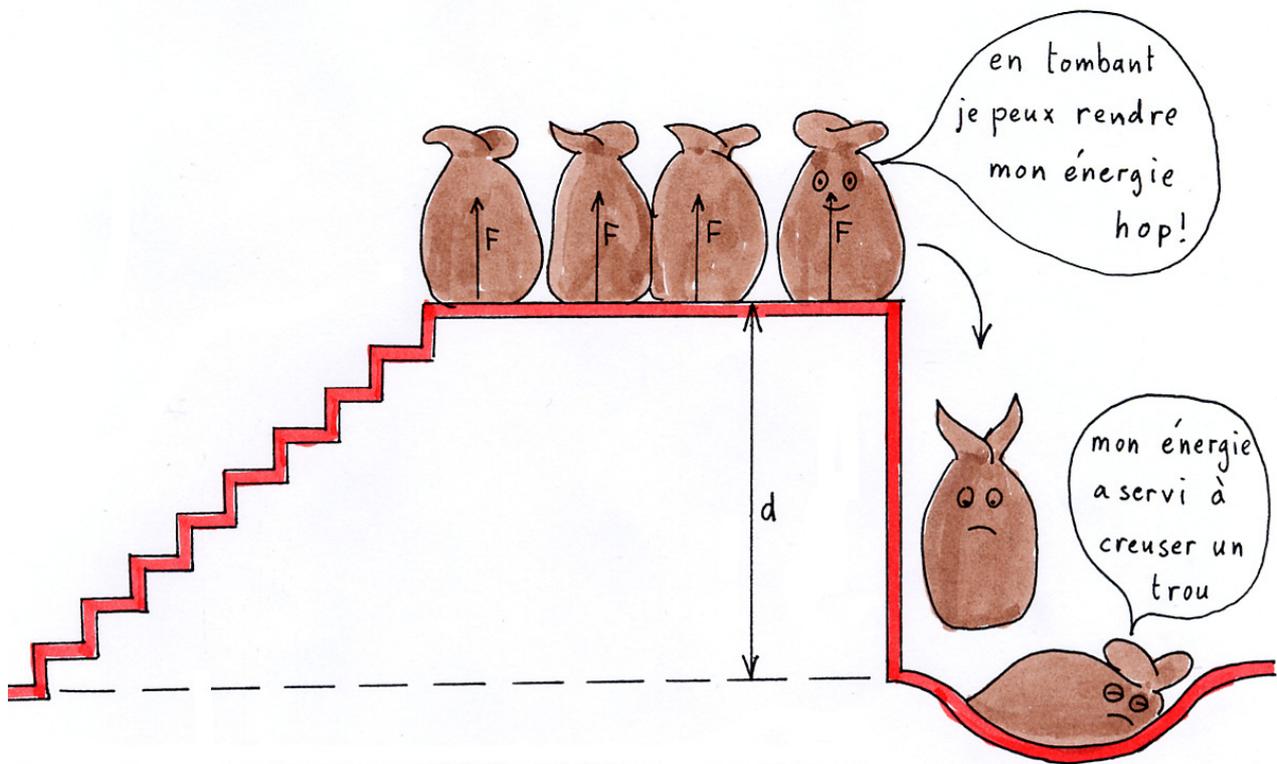
Unité de travail:

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

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).

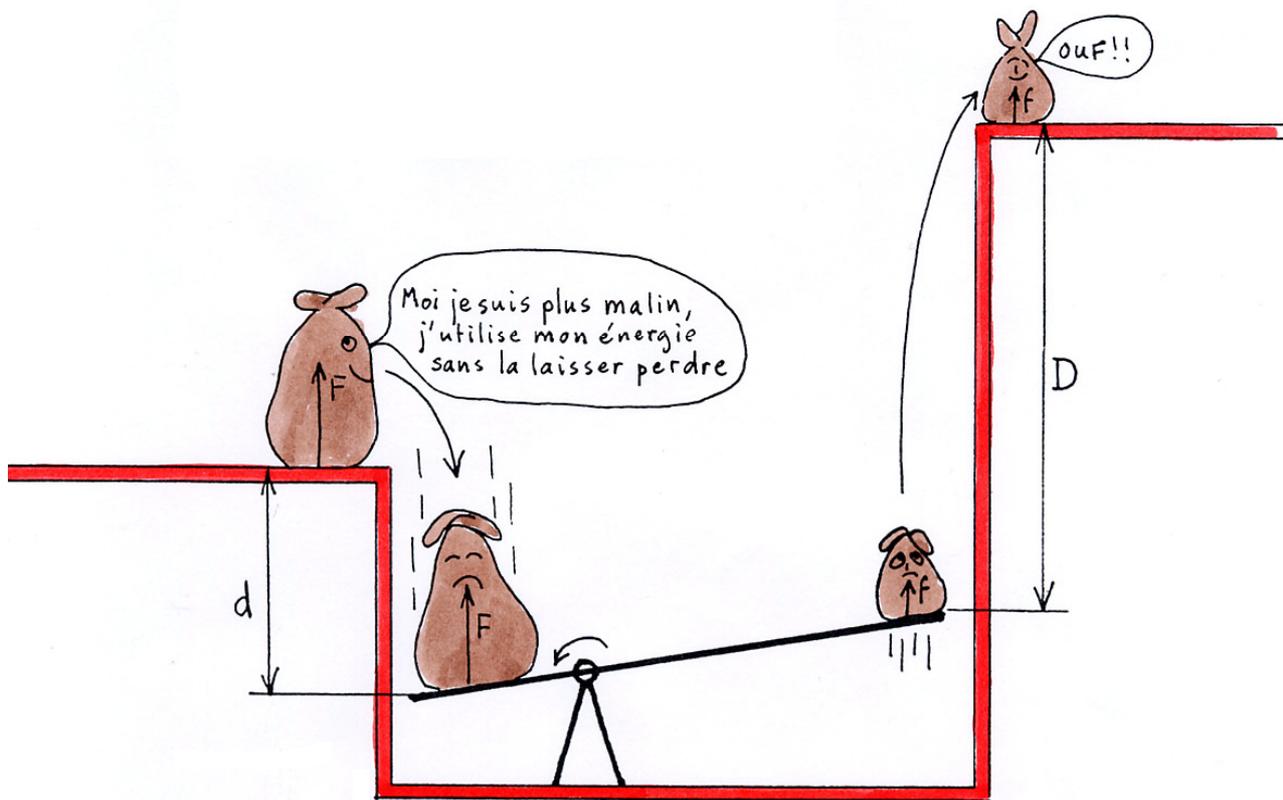
Elle peut se transformer en **énergie cinétique** (résidant dans la vitesse de chute de la masse des sacs).

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 jusqu'à 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 ?

La chaleur

Discussion-recherche

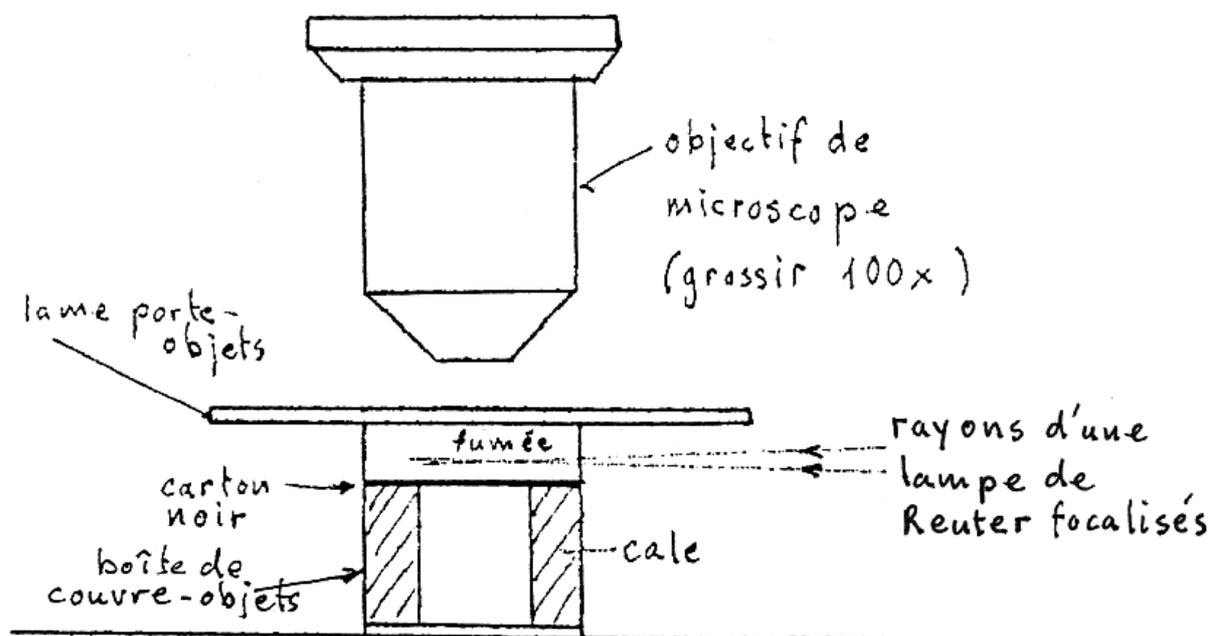
On a expérimenté le rôle du frottement comme transformateur d'énergie mécanique en chaleur. Ce phénomène a été reconnu dans des temps très anciens déjà.

En revanche la nature intrinsèque de la chaleur était un mystère profond, jusqu'au jour où il fut percé en 1827 par un botaniste écossais, Robert Brown, grâce à une expérience saisissante et très simple que nous allons reproduire.

Mais avant cela, il serait intéressant que des élèves expriment une idée ou une conviction à propos de la nature de la chaleur.

Expérience du mouvement «brownien»:

L'expérience est très simple et ne coûte que le prix d'une cigarette (et le désagrément de la fumer). En revanche, elle est fondamentale.



On en vient à constater (ou plutôt à supposer) que la chaleur réside dans une agitation désordonnée. Cette agitation serait le résultat de la transformation d'une énergie (mécanique par exemple) par le frottement. La preuve en serait fournie si on pouvait constater une augmentation de l'agitation en correspondance avec un apport de chaleur (par frottement par exemple). Malheureusement, les moyens d'un laboratoire scolaire ne permettent pas une telle expérience.

Est-il possible de reconvertir toute cette énergie cinétique désordonnée en une énergie mécanique utilisable (c'est-à-dire ordonnée)? La question sera approfondie ultérieurement.

Sensibilisation aux notions quantitatives de température et de chaleur:

On projette de chauffer une casserole d'eau de 15° à 20° (différence de température).

Puis on désire chauffer l'eau de la piscine de 15° à 20° .

Faut-il la même quantité de chaleur?

On voit que la **température** (lisible sur un thermomètre) est un **état de la matière** (état d'agitation) et que la **chaleur** est une **quantité d'énergie qu'on amène ou enlève** à cette matière, et qui dépend de la quantité de matière (masse) chauffée.

La **chaleur** est donc proportionnelle à la **différence de température** et à la **masse** de matière chauffée. (L'expérience montrerait qu'elle dépend aussi de la nature de la matière chauffée.)

Dès lors, il est pratique de fixer une unité de chaleur comme étant la chaleur permettant à 1 g d'eau de monter de 1° et on l'appellera la **calorie**.

pour chauffer 1 g d'eau de 1° il faut 1 cal
pour chauffer 1 g d'eau de 3° il faut 3 cal
question: pour chauffer 2 g d'eau de 3° il faut?... 6 cal (et non 5 cal!)

Il devient évident que, tant qu'on chauffe de l'eau, la chaleur en cal s'obtient par le produit de la masse d'eau en g et de la différence de température en °C ($q = m \cdot \Delta T$).

Conversion du Joule en calories:

Choix de l'appareillage:

L'élève doit imaginer un appareil qui permette de convertir intégralement un travail en chaleur par frottement, tout en permettant de mesurer les deux choses.

On arrivera probablement à des engins ressemblant à des freins, puis on pensera au tambour déjà utilisé, et on suggèrera aux élèves de l'adopter.

En effet, l'astuce consistant à retenir un poids à l'aide d'une ficelle faisant deux tours sur un tambour et dont l'autre brin a une force quasi nulle n'est pas évidente à trouver (et même à expliquer!) C'est pourtant une manière de faire cette expérience de façon simple et convaincante.

On conviendra que c'est le chauffage d'une petite masse d'eau qui permettra de fixer et de mesurer la chaleur en calories.

La **calorie** est une unité hors S.I., mais qui présente de nombreux avantages pratiques et pédagogiques:

- elle permet de fixer une **chaleur** de façon concrète, ce qui donne à l'élève un repère beaucoup moins abstrait que le Joule, lui permettant précisément de faire la comparaison travail-chaleur.
- elle est encore en usage dans beaucoup d'applications (alimentation, chauffage, ...)
- elle permet de nombreuses applications au laboratoire scolaire, sans avoir à aborder la calorimétrie, pourvu qu'on manipule de l'eau. Ceci permet de maîtriser nombre de problèmes de thermique par de simples raisonnements en forme de règles de trois.
- La conversion qui fait l'objet de notre TP: $1\text{J} = 0,24\text{ cal}$ deviendra à l'usage parfaitement concrète et claire pour les élèves.

Option pédagogique: un cours structuré de calorimétrie et changements d'état est prévu ultérieurement. Une étude poussée de ce domaine à ce stade du cours sur l'énergie disperserait par trop les idées des élèves. C'est la raison pour laquelle on utilisera de l'eau pour les applications thermiques. (voir exemple-type de résolution de problème, n° 3 p....)

TP. Tambour II.

Objectifs

Contenus

- notions

quantification du travail
quantification de la chaleur
proportionalité travail-chaleur
approche d'une loi de conservation travail-chaleur

- outils et techniques

critique de la mesure et du résultat de l'expérience
écart absolu
écart relatif (en décimal et en%)
incertitudes de mesure et leurs conséquences sur les résultats
écarts systématiques et leurs conséquences sur les résultats (sens de l'écart)
erreurs «humaines» et leur élimination

approche de l'utilisation d'un logiciel de tableur (à réserver éventuellement pour un TP ultérieur, ce TP étant déjà chargé en objectifs nouveaux!)

Compétences

- maîtrise de la mesure des forces et des différences de température.
- maîtrise de la construction d'un tableau de mesures et de calcul.
- approche de l'utilisation d'unités composées telles que le Joule et la calorie.
- critique d'un résultat d'expérience à l'aide du critère de l'écart relatif
- rédaction personnelle d'un rapport complet des essais, comprenant:
but des essais, méthode de travail, tableau de mesures et de calcul,
conclusions et critique. (un exemple-type de rapport d'élève est annexé aux notes méthodologiques qui suivent)

Methodologie**- Matériel**

L'appareillage, déjà utilisé pour le TP tambour I, est un bricolage très simple, bon marché et efficace.

On trouve dans le commerce des appareils de ce type, mais fort dispendieux, et qui chauffent une masse de métal, ce qui détruit la relation directe avec la calorie et nécessite une introduction calorimétrique compliquée.

D'autres appareils à brassage d'eau à partir d'une énergie potentielle sont performants mais chers et difficiles à mettre à la disposition de chaque groupe d'élève.

Un appareil simple, fait de boîtes de conserves, boulons, écrous, etc. est toujours préférable, car il démontre que le phénomène observé n'est pas mystérieux.

Les mesures peuvent être simplement reprises du TP tambour I.

Indications techniques: en effectuant 300 tours avec une masse suspendue de 1 kg, on obtiendra un échauffement de l'ordre de 1° pour une masse d'eau de 100 g. Diamètre de la boîte env. 3,5 cm.

Utiliser un thermomètre de précision minimale 0,1°. Ne pas changer de thermomètre.

Régler le zéro du dynamomètre dans sa position d'utilisation (verticale). On peut aussi l'éliminer, les élèves sachant maintenant calculer une force de la pesanteur (poids) à partir d'une masse.

- Rapport personnel de l'élève (exemple)But

Essai de détermination d'une proportionnalité entre travail moteur (mesuré en Joules) et chaleur produite (mesurée en calories).

Méthode

Matériel: tambour du type utilisé lors du TP «tambour I» (voir dessin sur la fiche de TP).

Le travail moteur w est mesuré par la force de frottement F et par son déplacement à la surface du cylindre $\Pi \cdot D \cdot n$.

La chaleur q est mesurée par la masse d'eau chauffée m et par la différence de température ΔT .

On calcule $w = F \cdot \Pi \cdot D \cdot n$ et $q = m \cdot \Delta T$

Puis on fait le rapport q/w

On compare ce résultat avec celui obtenu par d'autres groupes de travail.

Au cas où ces résultats seraient proches les uns des autres, on en fait une moyenne, et on la compare à la valeur officielle connue des scientifiques:

$$q/w = 0,24 \text{ cal/J}$$

suggestion de tableau de mesures

diamètre de la boîte: $D = \dots\dots\dots$ m

grandeur	symbole et formule	unité	essai 1	essai 2	essai 3	essai 4
masse suspendue	m	kg				
nombre de tours de manivelle	n	-				
masse d'eau	m'	g				
température initiale	T_i	°C				
température finale	T_f	°C				

calculs:

force de frottement	F	N				
distance parcourue	$d = \Pi \cdot D \cdot n$	m				
diff. de température	$\Delta T = T_f - T_i$	°C				
travail moteur	$w = F \cdot d$	J				
chaleur produite	$q = m \cdot \Delta T$	cal				
rapport q/w	q/w	cal/J				

Critique des résultats

Moyenne des résultats q/w

Ecart absolu par rapport à la valeur officielle.

Ecart relatif par rapport à la valeur officielle.

Les résultats fluctuent peu entre eux et leur écart à la valeur officielle n'est que de%, ce qui nous semble minime compte tenu des incertitudes de mesure (voir ci-dessous) et des écarts systématiques (idem).

incertitudes de mesure:

Sur la différence. de température: $0,1^{\circ}\text{C} / 1^{\circ}\text{C} = 0,1 = 10\%$
(rapport entre précision du thermomètre $0,1^{\circ}\text{C}$ et écart mesuré env. 1°C)

Sur la mesure de force, l'écart est difficile à évaluer. En cas d'utilisation d'un dynamomètre, les effets perturbateurs dépendent grandement de l'adresse de l'opérateur!

Les autres mesures doivent être proches de l'exactitude (masse d'eau, nombre de tours, diamètre)

En résumé, on a donc une incertitude de mesure d'au moins 10%

écarts systématiques:

Les principaux semblent être:

Les pertes de chaleur dues à la mauvaise isolation de la boîte. Celles -ci sont limitées par l'exigence d'une température initiale proche de celle du local d'expérimentation. Il y a des fuites de chaleur dans l'air, dans la fixation de la boîte et surtout inévitablement dans le fer de la boîte elle-même. (On pourra bientôt maîtriser cet effet grâce au cours de calorimétrie). **Ces effets diminuent la valeur mesurée de la chaleur et provoquent donc un abaissement du rapport q/w.**

D'autres actions perturbatrices ont une influence probablement minime, telle la tension résiduelle (mais nécessaire!) sur le brin de ficelle fixe. A ce propos, il convient de donner au moins deux tours à l'enroulement de la ficelle.

Or on constate que l'écart constaté est effectivement constamment vers le bas, avec une moyenne de%

Ceci nous donne la conviction que notre essai est valable, autant que notre matériel peut nous le permettre.

Conclusion

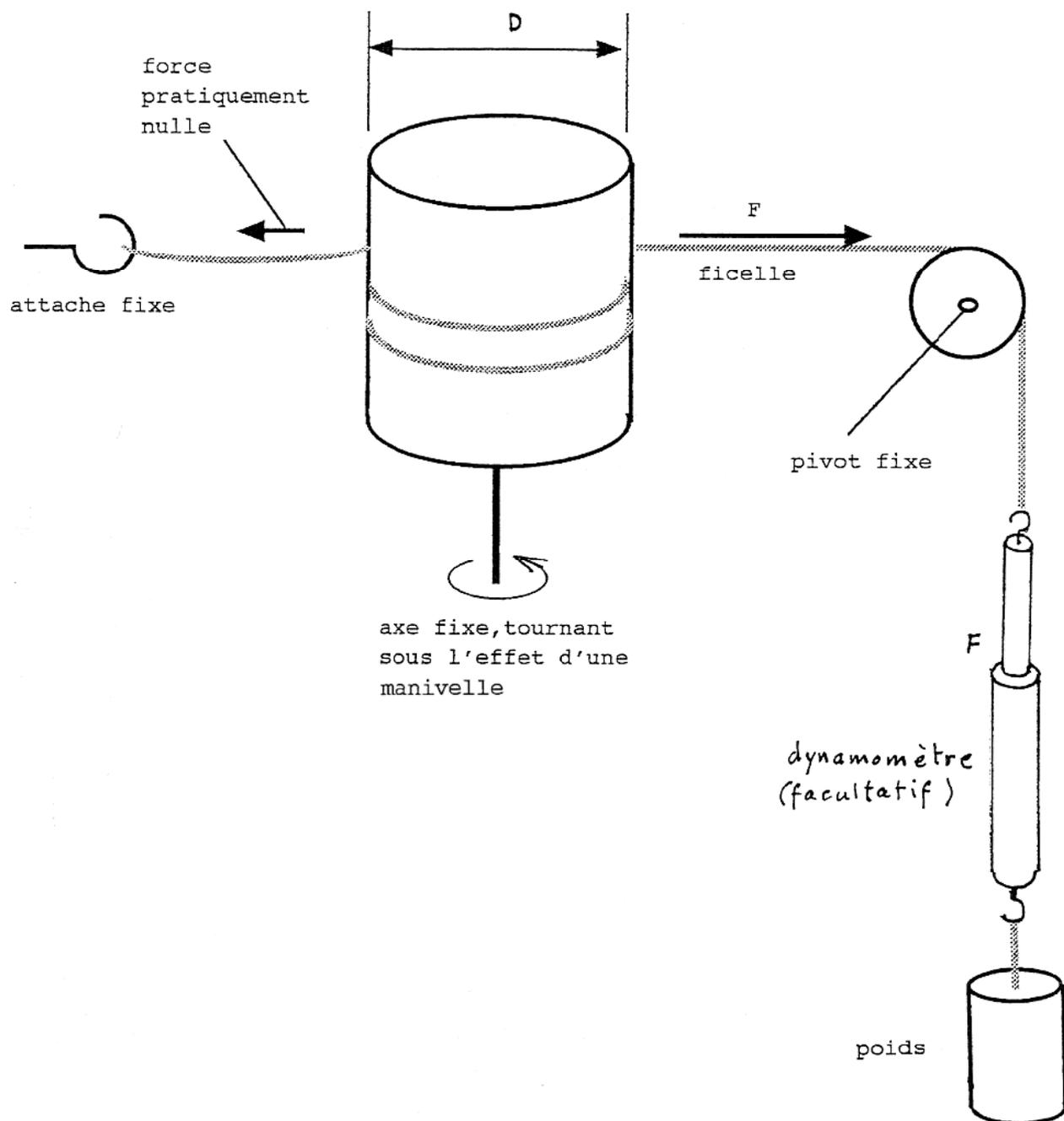
On peut affirmer avec une bonne certitude que **le rapport q/w est constant et que sa valeur est de ... cal/J.**

La valeur que nous utiliserons sera cependant celle donnée par les tables scientifiques:

0,24 cal/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 (**T₁** et **T₂**).

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.

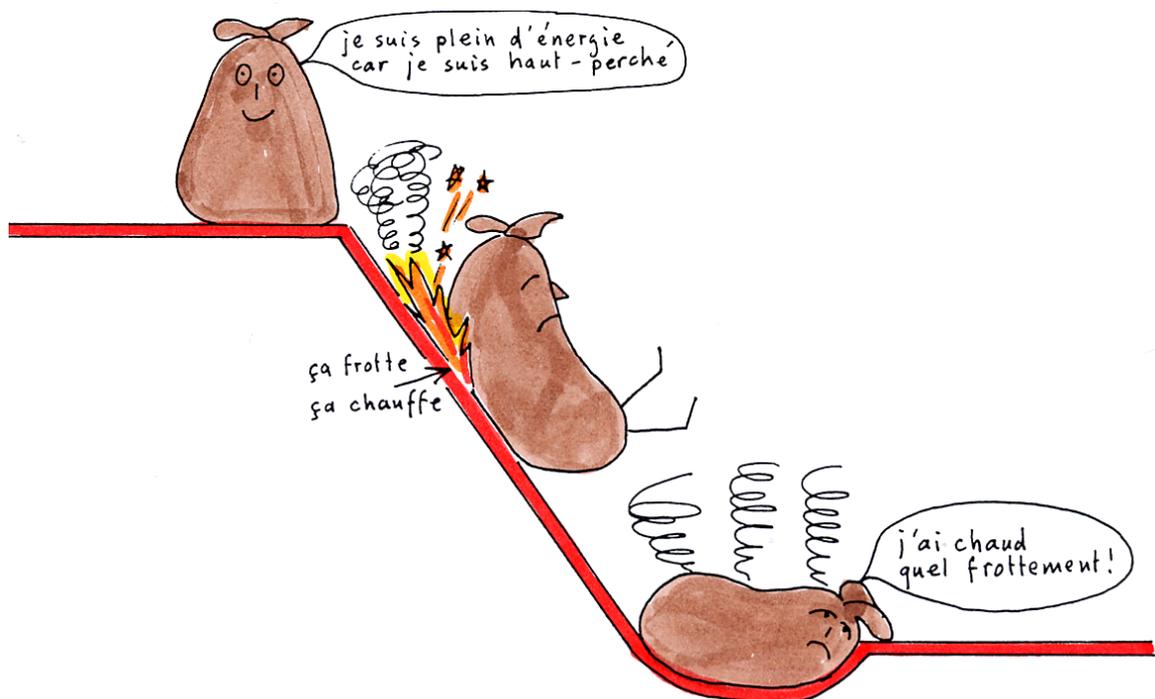
La **chaleur q** prise par l'eau est alors (en calories):

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

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 (1cm^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 m³ 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 ?

Sensibilisation à quelques notions de base

L'**énergie** peut être **cinétique** (penser au travail effectué par un véhicule lancé contre une barrière!) *On peut signaler au passage qu'elle est proportionnelle au carré de la vitesse, sans pour autant focaliser l'attention sur cette loi.*

L'**énergie** peut être **potentielle** (penser au travail que peut rendre un bidon de mortier qu'on a hissé au 6^e étage et qui tombe de l'échafaudage!)

On peut illustrer la conversion continue de ces deux énergies l'une dans l'autre à l'aide d'un grand **pendule**, en faisant aussi remarquer qu'il finit par s'immobiliser sous l'effet du frottement. Où est alors passée l'énergie??

On peut alors présenter l'expérience qui permet de visualiser la chaleur par l'observation de l'**agitation moléculaire**.
Se rappeler qu'il s'agit d'une **énergie cinétique désordonnée**.

Rendement:

On peut étayer cette notion, qui relève du bon sens, par une comparaison avec le rendement obtenu lors d'une livraison de betterave par un paysan à la sucrerie. Le rendement est forcément le rapport entre la masse de sucre produite et la masse de betterave fournie. Pour rendre le chiffre parlant, il est utile de le convertir en %. On s'apercevra que le résultat est toujours inférieur à 100%. De même pour les travaux ou les puissances, on aura toujours ce qui sort de la machine (utile) par rapport à ce qui entre dans la machine (moteur) et on saura (par expérience!) que le résultat est toujours inférieur à 100%. Cette comparaison permettra à l'élève de mieux saisir la signification du rendement et de ne pas inverser les termes du rapport.

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 $\frac{m \cdot v^2}{2}$

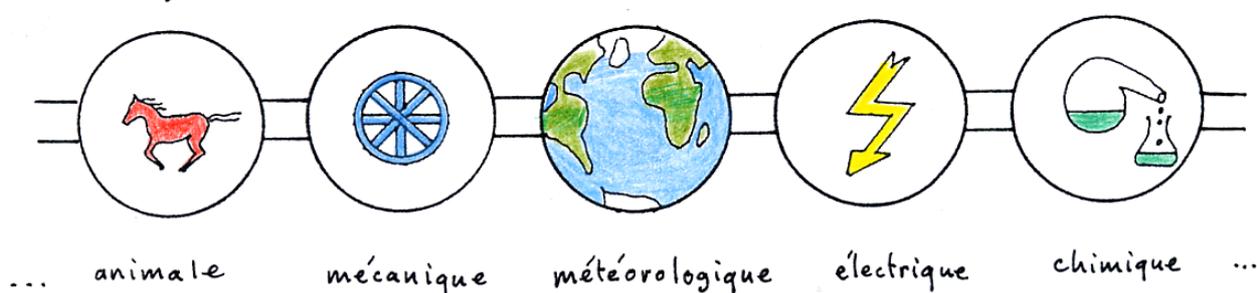
Nous allons tout au long de ce cours approcher de plus en plus un des principes fondamentaux de la nature:

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.

Energies:



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!

TP. La transformation inverse: chaleur-énergie. La machine thermique.

Objectifs

Contenus

- notions

- conditions de la transformation inverse chaleur-énergie.
- irréversibilité générale
- pôle chaud et pôle froid
- transformations successives de l'énergie dans les différents organes d'une centrale thermique.
- première approche de l'importance de la vapeur comme vecteur d'énergie.

Compétences

- manipulation d'une machine:
 - soupape de sûreté
 - niveau d'eau suffisant
 - qualité de l'eau (distillée)
 - lubrification
 - régulation de vitesse (éviter l'emballement)
 - utilisation judicieuse de l'énergie (problèmes d'économie et de sécurité)
- compréhension et utilisation des flux d'énergie et de chaleur

- le bilan quantitatif d'énergie est réservé au TP machine à vapeur II

La transformation inverse: chaleur — énergie

La machine thermique

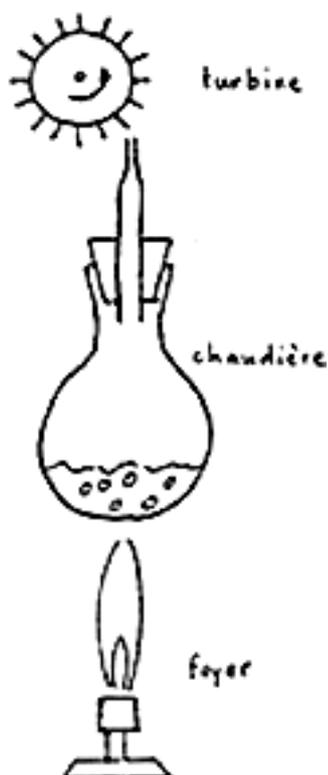
On a vu que toutes les machines produisent de la chaleur, même si ce n'est parfois qu'une petite partie de l'énergie transformée.

Questionnaire I (mental)

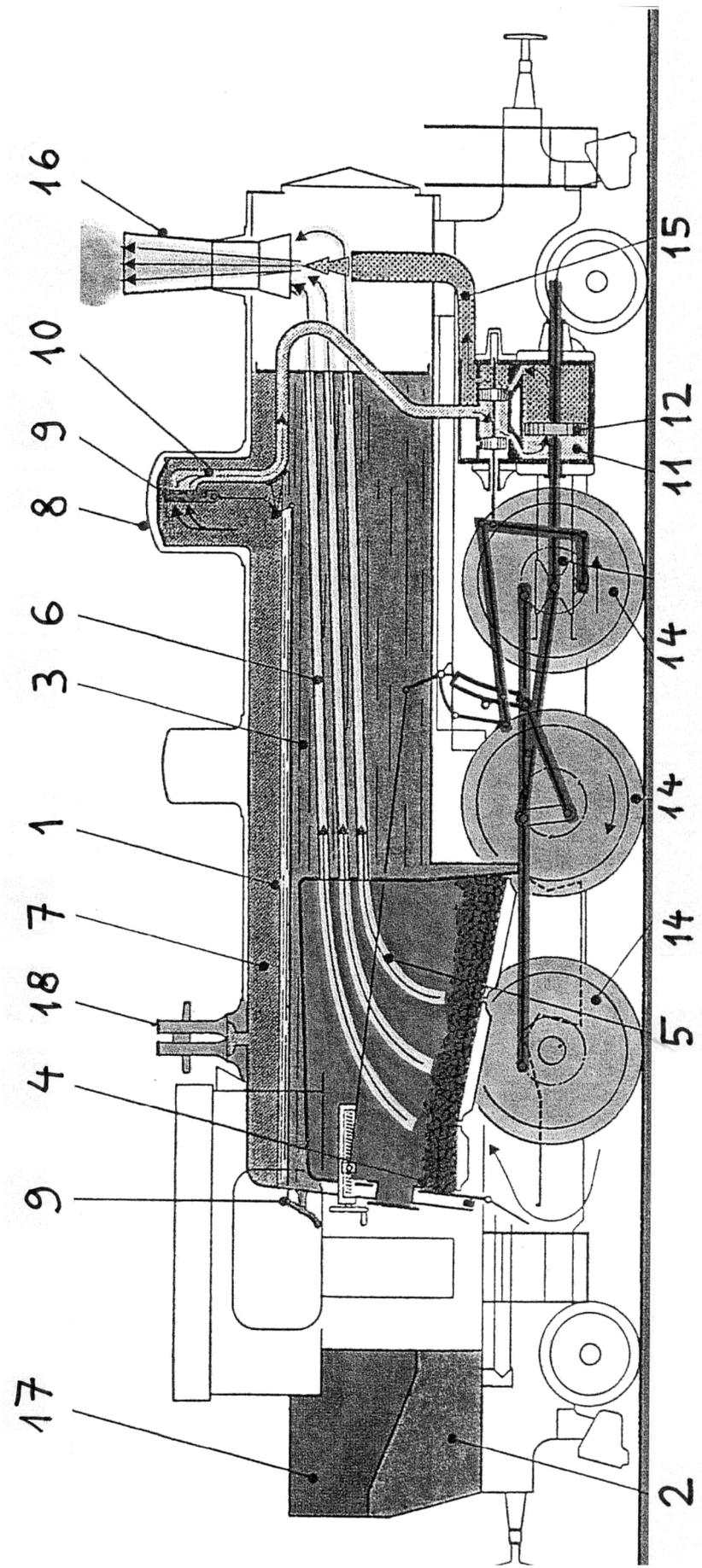
1. Est-il possible à votre avis de faire le contraire, c'est-à-dire de l'énergie mécanique à partir de la chaleur?
2. Est-il possible de re-transformer toute la chaleur perdue en énergie mécanique?
3. Peut-on utiliser la quantité fabuleuse de chaleur contenue dans les océans pour en faire de l'énergie?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

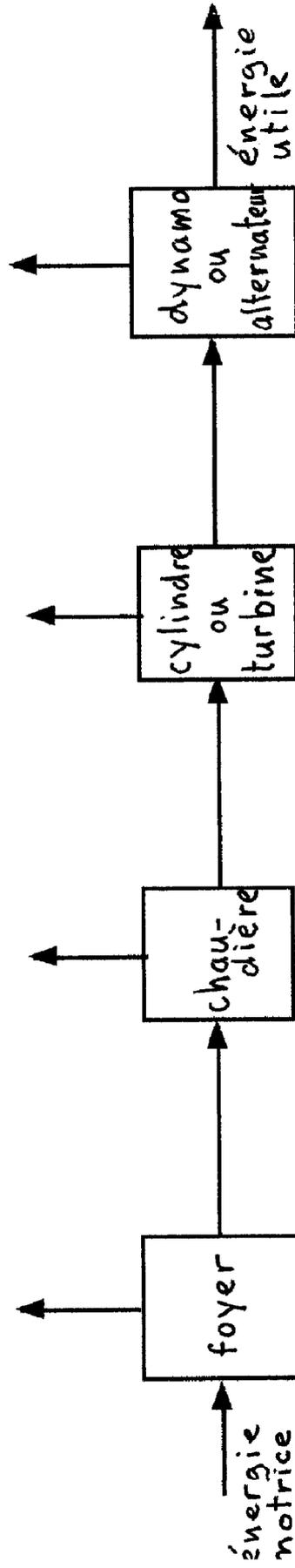


Fonctionnement d'une locomotive à vapeur

- 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.

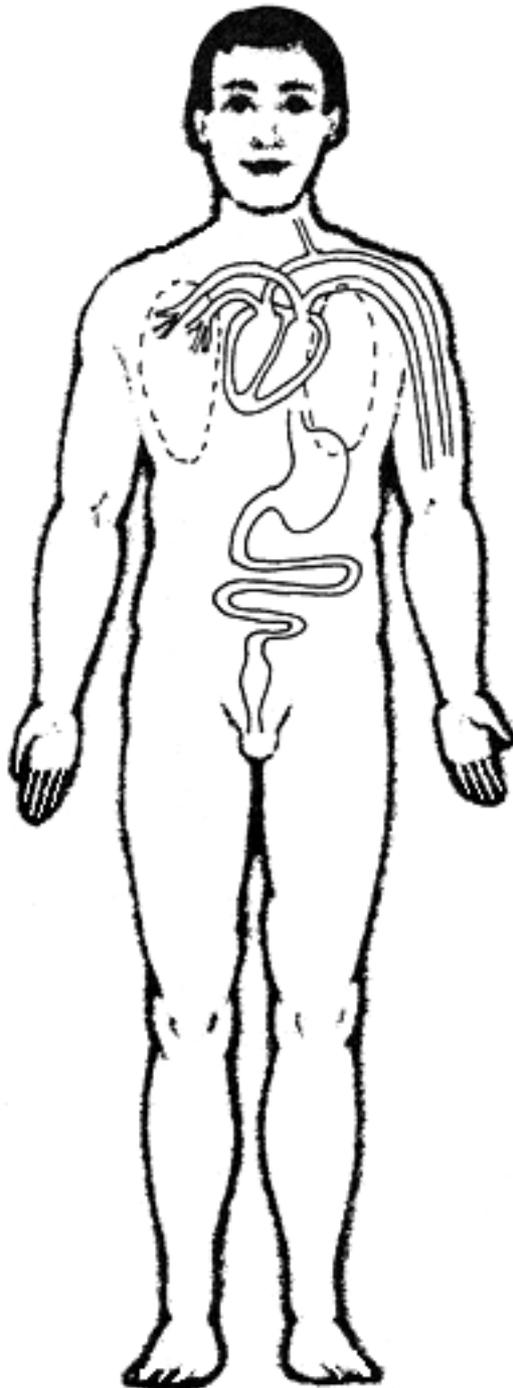
Comment une machine thermique réelle est-elle alimentée?

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

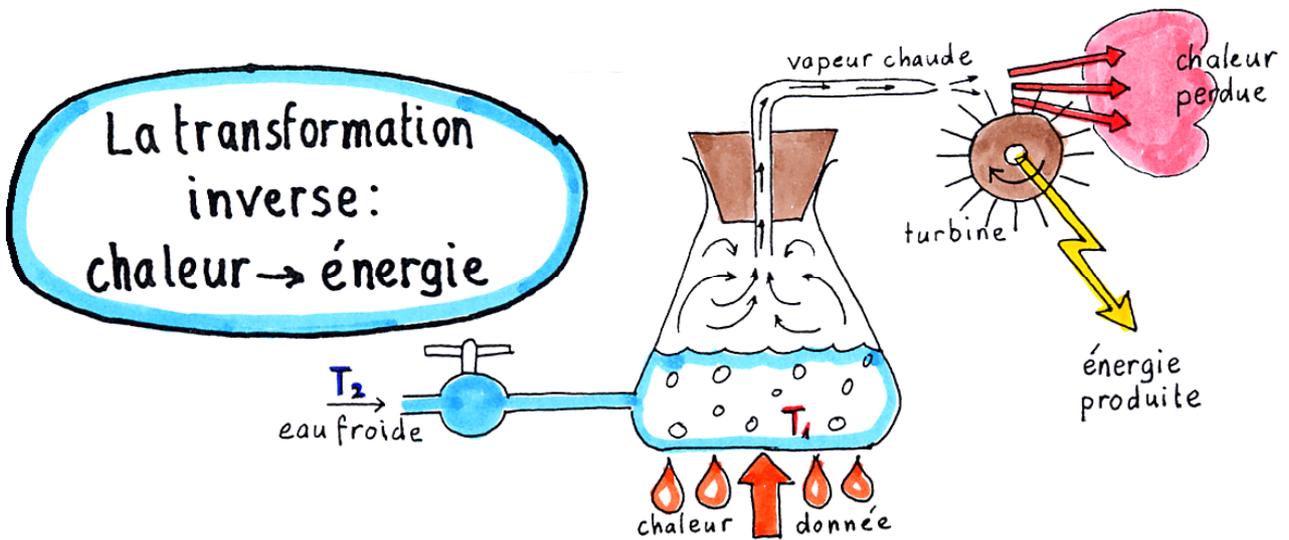
Compléter ce dessin au crayon en indiquant les organes correspondant au tableau qui suit. On peut ajouter des organes et des canaux.



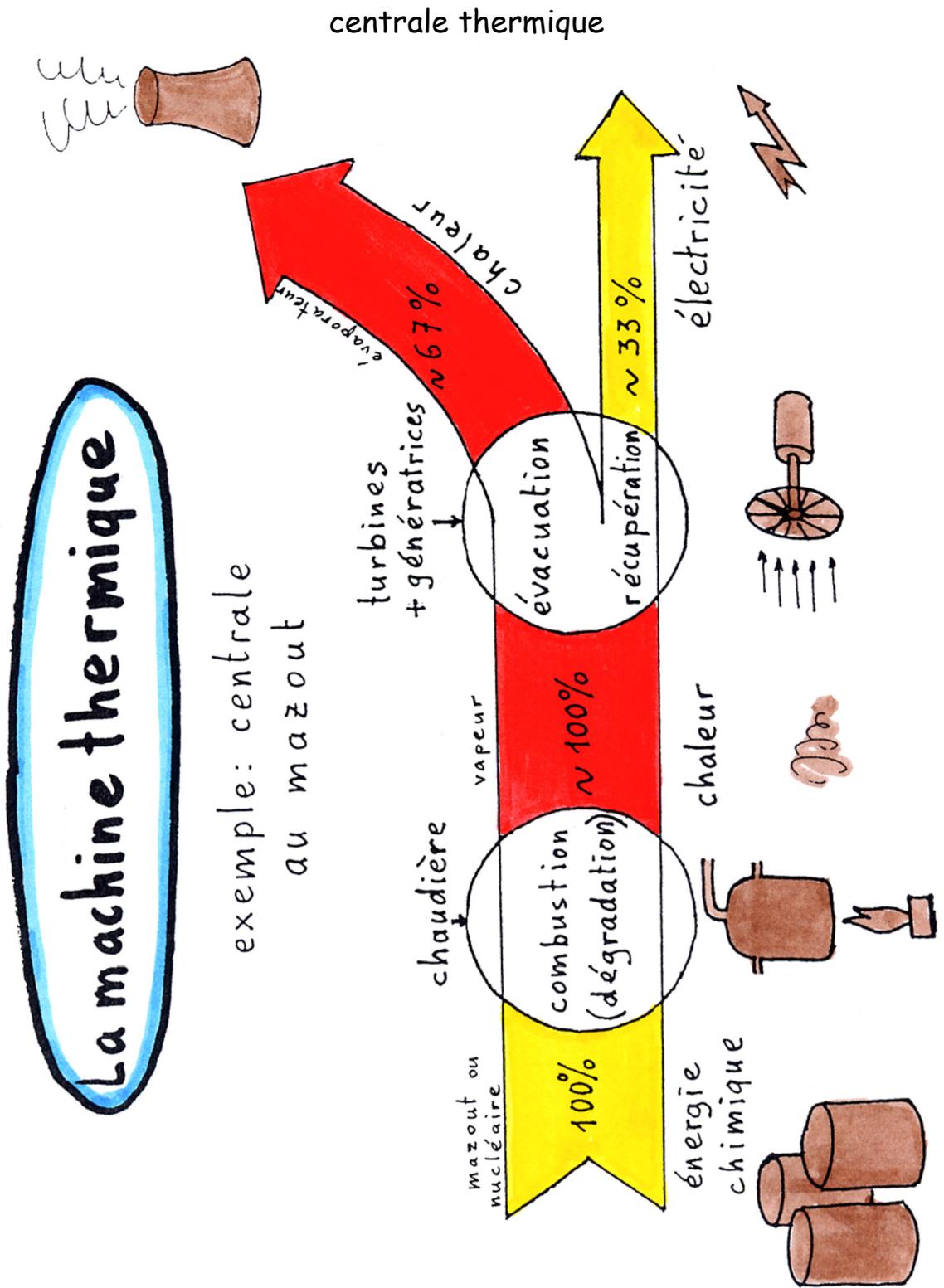
**Analogies entre le corps humain
et la machine à vapeur**

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

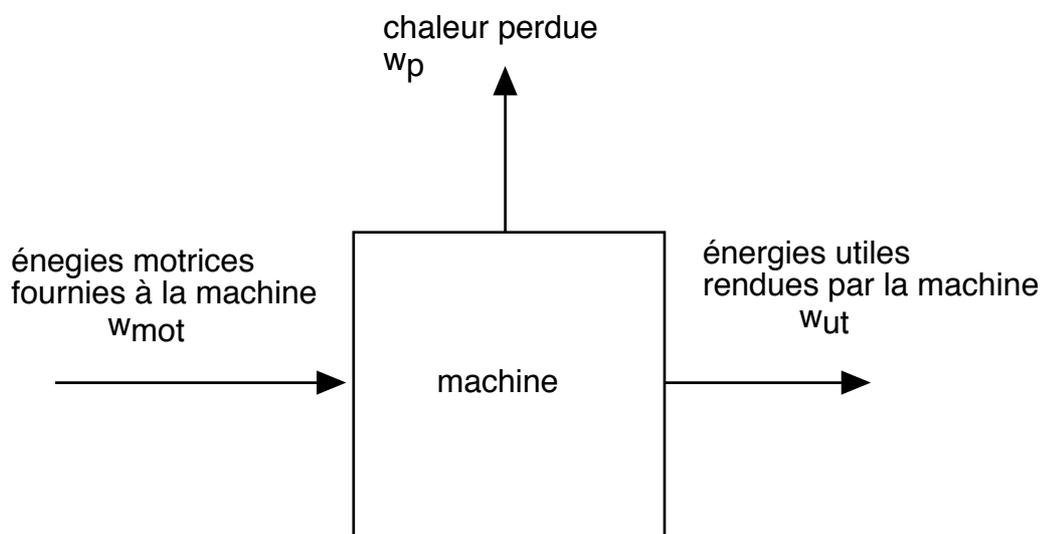
Nota: différence importante entre le corps humain et la machine à vapeur: L'énergie chimique des aliments ne passe pas par la chaleur **pour** se transformer ensuite en énergie mécanique. Ce n'est pas une machine «thermique».



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** η 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:
T1 = 540°C = (540 + 273)K = 813K

Température de l'eau de réfrigération:
T2 = 14°C = (14 + 273)K = 287K

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

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.

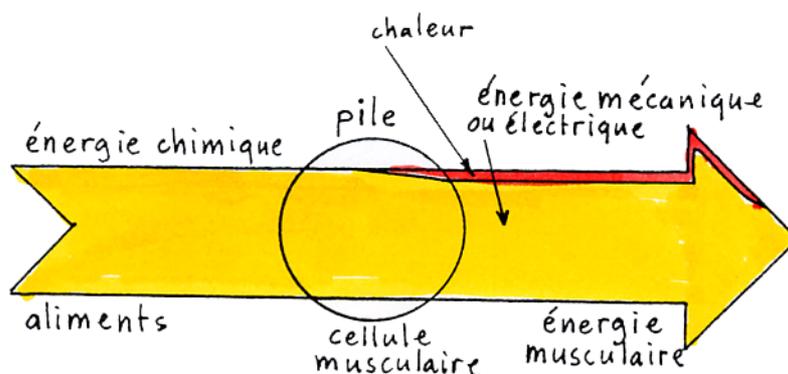
Rendement: **100%**



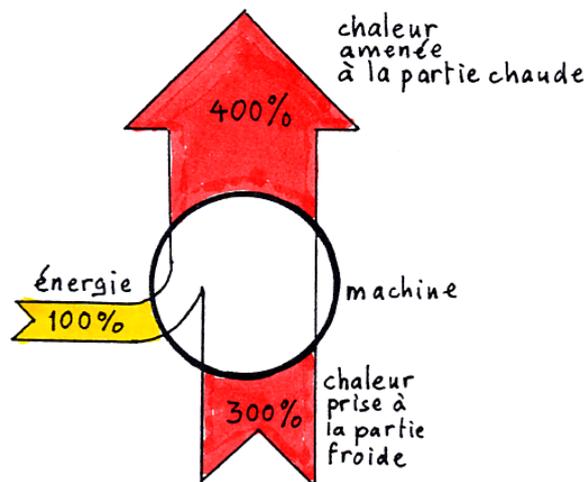
La pile à combustible

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%.

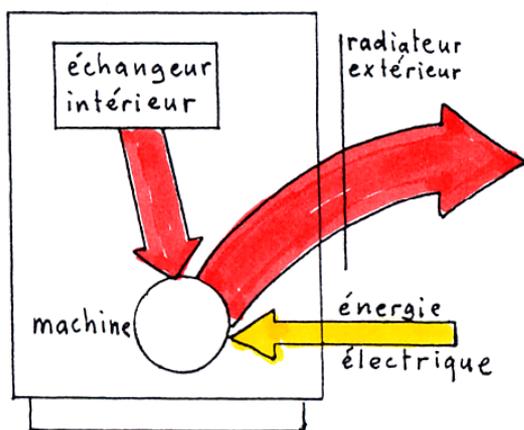
Un exemple courant et actuellement déjà fort utilisé est celui de la pile électrique et de l'accumulateur au plomb (batterie d'auto). Ces procédés, déjà fort anciens, pèchent par leur rapport très défavorable entre l'énergie accumulée et la masse de la pile, son prix et son impact sur l'environnement,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



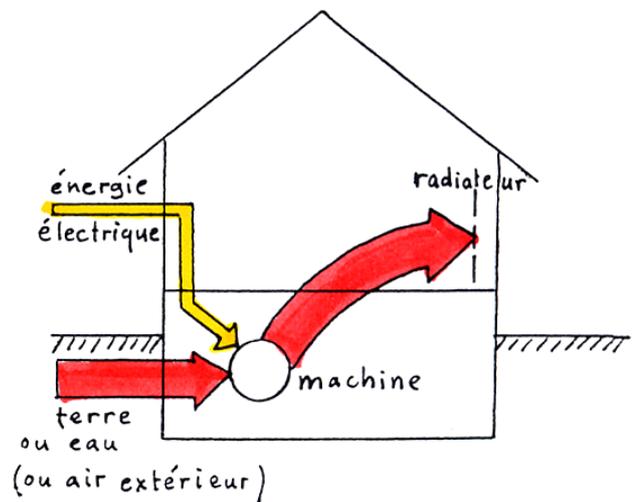
La pompe à chaleur



Exemple:
le frigorifique

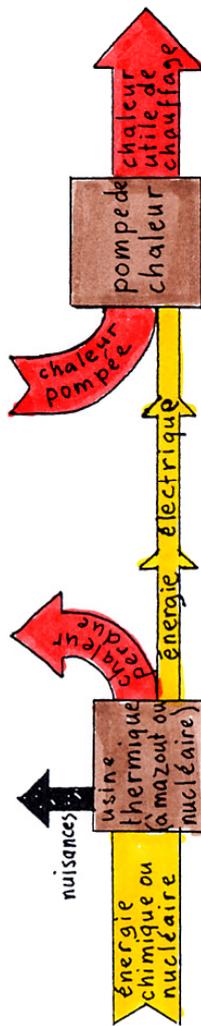


Exemple:
chauffage domestique

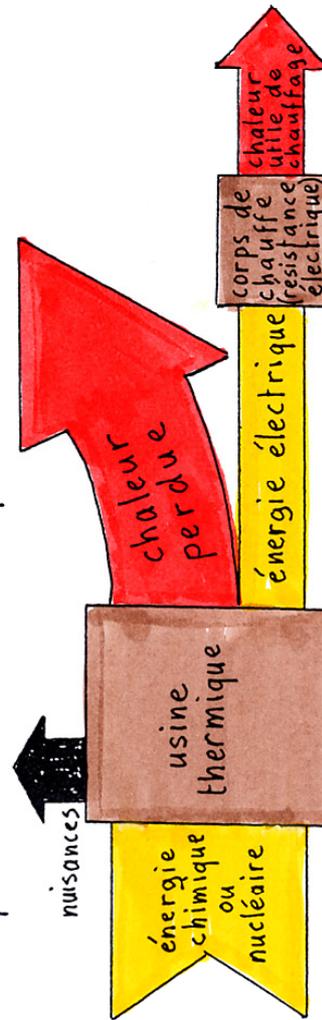


Les chauffages

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

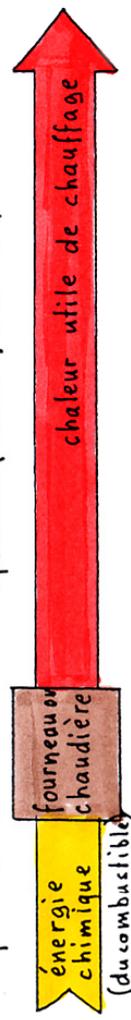


chauffage par corps de chauffe électrique



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

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

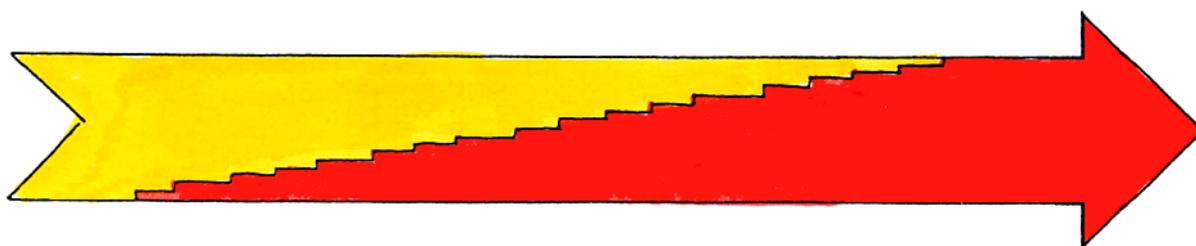


La dégradation

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.

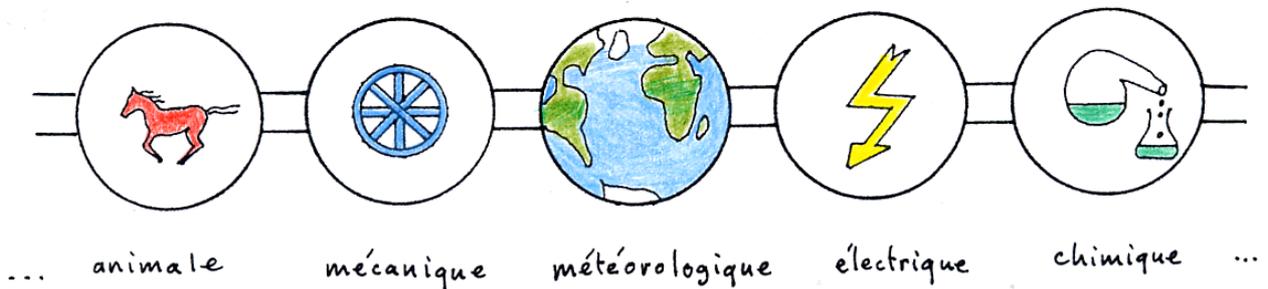
Donc, en définitive, lors de ses transformations successives, toute énergie finit tôt ou tard par se transformer en chaleur irrécupérable.



1^{re} loi:

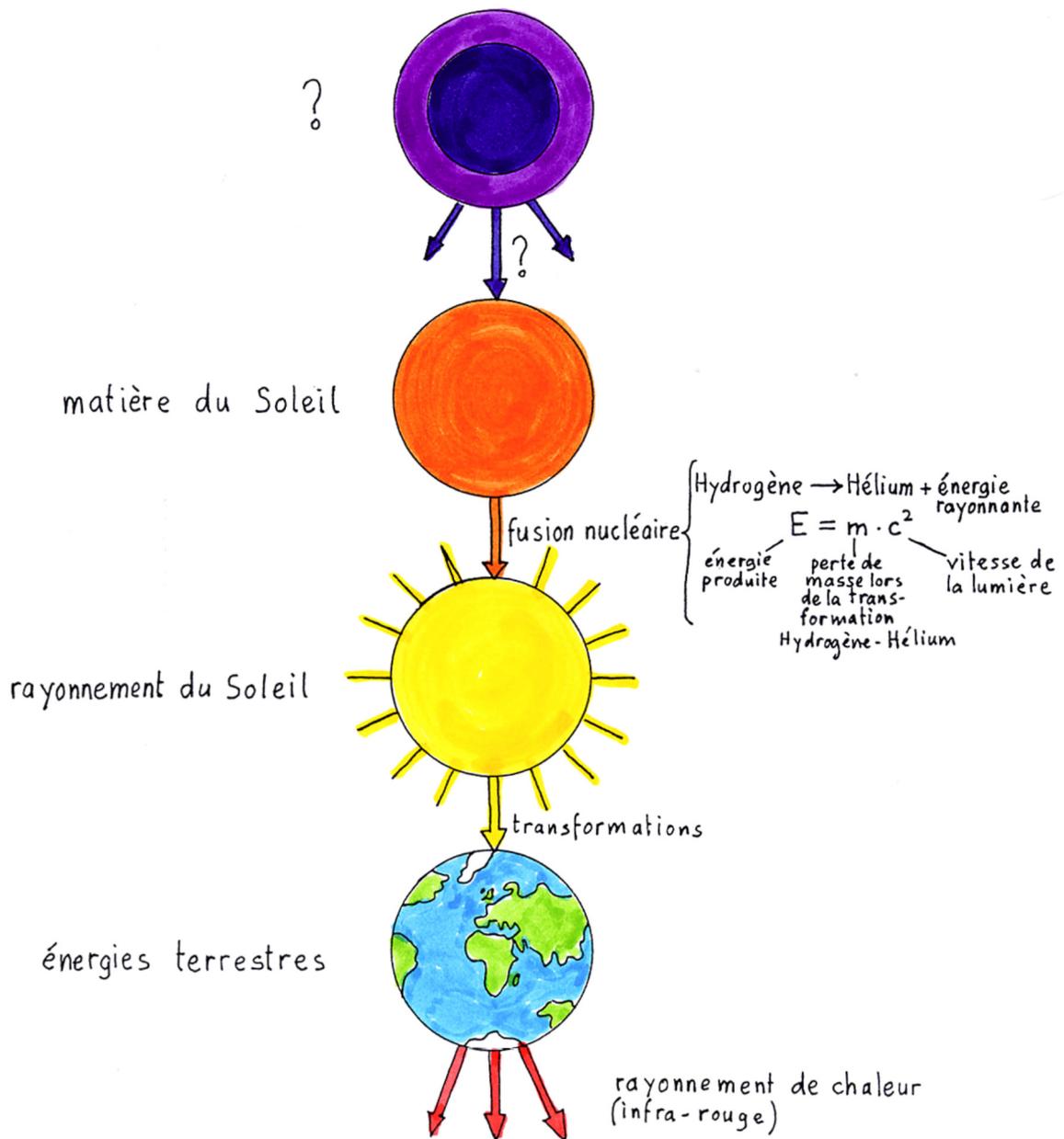
La conservation de l'énergie

Energies:

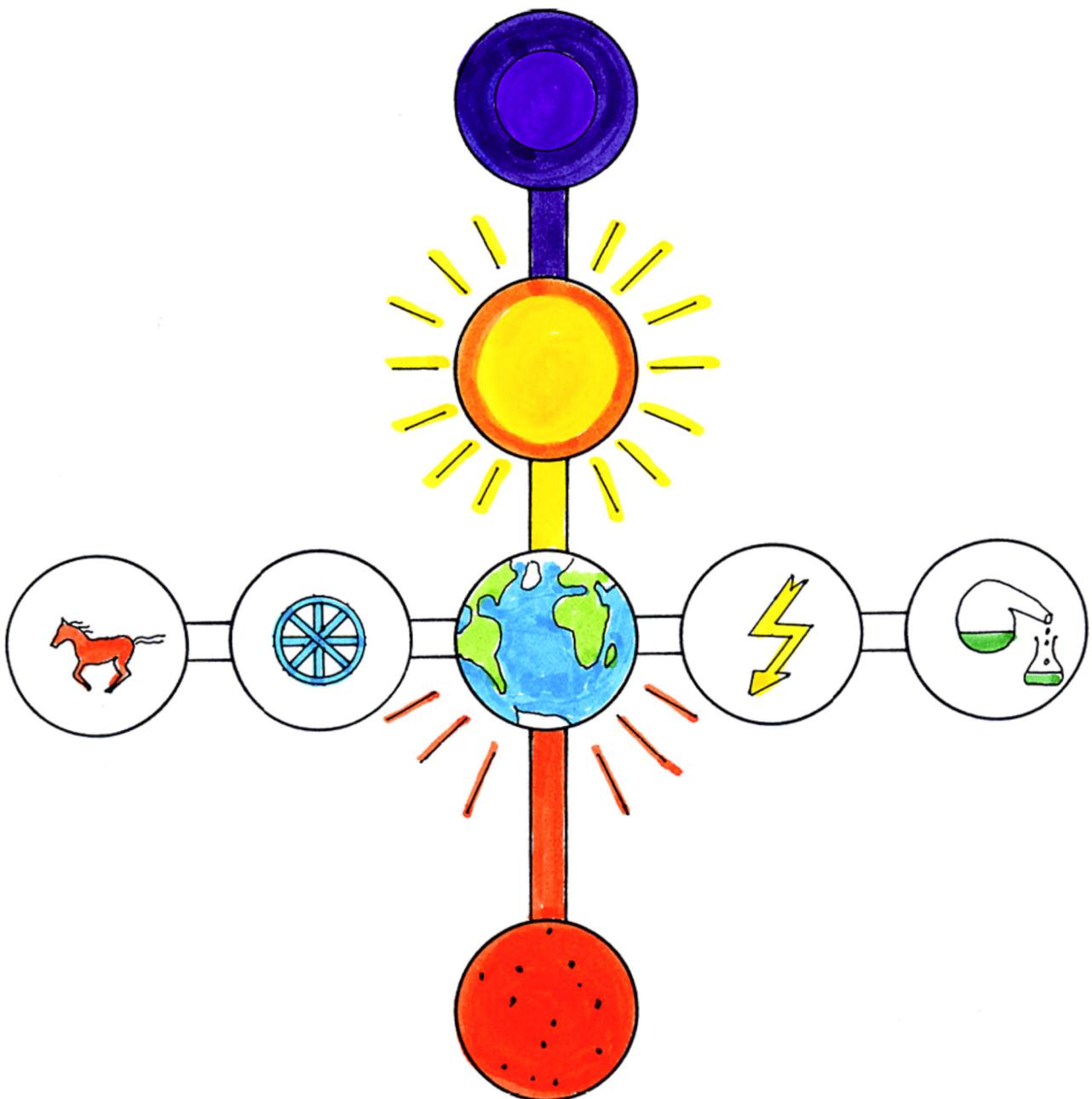


La 2^e loi est:

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!

Objectifs

Contenus

- **notions:**
pouvoir calorifique d'un combustible
- **outils et techniques:**
 - normalisation des conditions d'une expérience, en vue de comparaisons
 - optimisation des conditions en vue d'une approche de la valeur réelle
 - approche d'une valeur par limite inférieure (ou supérieure)

Compétences

- **Se faire une idée claire d'une notion** (ici le pouvoir calorifique d'un combustible), en recherchant une **définition** adéquate de la grandeur physique qui peut quantifier cette notion.
- **Imaginer des méthodes** pratiques de détermination, les comparer et choisir celle qui paraît la meilleure («brain-storming» de toute la classe).
- **Affiner la méthode et le matériel** afin de réduire au minimum les sources d'erreur et les incertitudes.
- **Normaliser la méthode et le matériel** afin de pouvoir comparer les essais (ici sur les différents combustibles), à défaut d'établir une valeur absolue (ici pour les pouvoirs calorifiques).
- Prévoir le sens des erreurs systématiques (par exemple le sens de l'effet des pertes de chaleur)
- Comparer les résultats avec ceux d'autres groupes de travail.
- Introduire les résultats dans un tableur informatique collectif
- Opérer un petit traitement statistique (simple moyenne)
- Comparer les résultats avec ceux d'une table ou la donnée d'un fabricant (écart relatif en %)

Méthodologie

Exemple d'une démarche possible:

Les élèves arriveront à la nécessité de tenir compte d'une quantité de chaleur donnée par le combustible, mais qui ne sera mesurable que par une chaleur absorbée par un corps. On choisira de préférence l'eau comme corps absorbant, étant donné sa relation directe avec la calorie. La masse d'eau chauffée et la différence de température donneront la chaleur absorbée par l'eau. La masse de combustible utilisé pour chauffer cette eau sera le paramètre important concernant le combustible. (Trouver des raisons pour lesquelles on ne se référera pas au volume du combustible, ou à son poids).

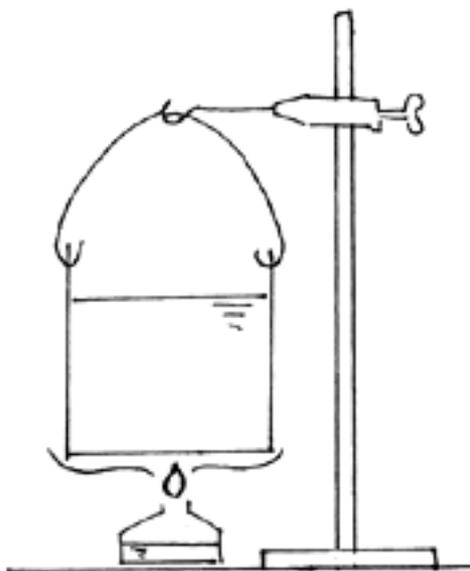
On en viendra à proposer que le pouvoir calorifique soit tout naturellement le rapport:

chaleur/masse de combustible
en cal/g (plus tard en J/kg)

Matériel:

Boîte en fer blanc remplie d'eau, suspendue par un fil de fer à un statif.

Brûleurs à alcool, à pétrole, à butane, bougies, plaques de «meta» posées sur deux appuis permettant le tirage (important pour le TP sur la machine à vapeur)



causes de perturbations:

pertes de chaleur

absorption de chaleur par le fer de la boîte

causes d'incertitudes:

mesure de la température

mesure de la masse de combustible

parade:

boîte en fer blanc à fond large et hauteur faible. Grande quantité d'eau. Flamme faible et proche du fond de la boîte. Ne pas monter très haut en température. Une isolation de la boîte paraît difficile, hormis peut-être un couvercle.

utiliser des boîtes de conserve, qui sont légères. Le fer (on le verra plus tard dans le cours de calorimétrie) absorbe très peu de chaleur comparativement à l'eau. Bien remplir la boîte, afin que la masse d'eau soit largement supérieure à celle du fer.

parade:

utiliser des thermomètres gradués au dixième de degré. Ne pas changer de thermomètre. Brasser avant la mesure. Laisser la température monter de plusieurs degrés (sans pour autant aller trop haut à cause des pertes de chaleur!)

peser un brûleur avant et après l'essai, avec une balance de précision.

Uniformisation (normalisation) des conditions matérielles en vue de la comparaison entre les essais des différents groupes.

Paramètres à normaliser (chaque groupe aura les mêmes données):

- dimensions de la boîte
- métal de la boîte
- quantité d'eau
- distance flamme - boîte
- montée approximative de température

Petite table des pouvoirs calorifiques K:

unités: 10^6 J/kg

alcool à brûler:	20
charbon (anthracite)	32
bois	16
benzine	45
gaz butane	46
gaz naturel	37
pétrole, mazout	41
hydrogène	12
stéarine (bougie)	34

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)

A propos du TP sur la chaleur latente de vaporisation-condensation

Pour la maîtrise quantitative des appareils énergétiques, un outil important est la mesure de:

- l'énergie véhiculée par la vapeur
- l'énergie emportée par une vaporisation
- l'énergie donnée par une condensation

Les phénomènes de vaporisation-condensation peuvent devenir évidents à l'élève, et leur calcul est très simple. Il est cependant nécessaire de faire une sensibilisation, sans que cela prenne trop de temps, ce qui nous détournerait du cours sur l'énergie, pour le transformer en un cours sur la calorimétrie et les changements d'état.

Pour amener l'élève à réaliser qu'il existe une température de vaporisation-condensation, et qu'à cette température la matière se vaporise sans aucune augmentation de température sous l'effet d'un apport de chaleur, chaque maître choisira entre des TP de sensibilisation ou des démonstrations, ou, s'il désire vraiment abréger, des discussions-recherches se référant au vécu de chacun, et aux expériences faites dans de précédents cours de sciences.

Une expérience très facile et instructive est la fusion-solidification de la naphthaline. Elle permet de constater les phénomènes de changement d'état dans la transition solide-liquide. Elle permet surtout de bien découvrir l'égalité des températures de fusion et de solidification. On suggérera alors l'égalité des températures de vaporisation et de condensation.

En ce qui concerne l'eau, il est assez couramment connu des élèves qu'elle bout à 100°C dans des conditions usuelles et qu'elle a besoin de beaucoup de chaleur pour se vaporiser (une casserole d'eau peut bouillir longtemps avant d'être complètement vidée)

Il est moins évident à l'élève que cette vapeur se condense à la même température. Mais cela n'a pas grande importance pour la plupart des TP sur les appareils qui sont suggérés.

On conviendra donc ensemble d'une définition de la chaleur latente de vaporisation comme étant l'énergie nécessaire à la vaporisation d'un kilogramme de matière et on demandera aux élèves de trouver des méthodes pour la déterminer.

La fiche de TP comporte un choix de questions.

Si on en a le temps, on projettera des essais sur la chaleur latente de fusion-solidification. Peut-être, au contraire, désirera-t-on aller au plus vite pour atteindre sans s'enliser les TP «appareils» qui permettent enfin d'exercer des compétences globales en situation.

TP. chaleur latente de vaporisation-condensation

Objectifs

Contenus

- notions:

chaleur latente de changement d'état
égalité des chaleurs latentes relatives à des changements d'état inverses
(une vérification du principe de conservation de l'énergie)

- outils et techniques:

équation calorimétrique simple

Compétences

Consolidation de compétences déjà acquises:

- définition de la quantification d'une grandeur physique (ici la chaleur latente)
- conception d'essais permettant de déterminer cette grandeur physique
choix des paramètres déterminants
- organisation d'un protocole de mesures et introduction souhaitable dans un tableur informatique collectif
(la préparation et la programmation du tableur peut être faite par des élèves)
- exploitation de la mesure, calculs, év. graphiques amenant au résultat demandé
- critique de l'essai:
 - écart relatif par rapport à une valeur officielle ou par rapport à la moyenne des résultats de la classe
 - suppositions concernant les erreurs systématiques, leurs provenances et le sens de leur effet sur le résultat
 - suppositions et si possible évaluations des incertitudes des mesures
- rédaction d'un rapport comportant:
 - le but de l'essai (celui-ci peut être résumé dans le titre du rapport)
 - la méthode (incluant la description du matériel)
 - le protocole de mesure
 - l'exploitation de la mesure
 - la critique
 - une conclusion

Méthodologie

Une option intéressante est de laisser les élèves découvrir que les chaleurs latentes de vaporisation et de condensation sont égales, et de les amener à en tirer une conclusion sur la conservation de l'énergie. Dans ce cas, la fiche suivante est à modifier en conséquence.

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.

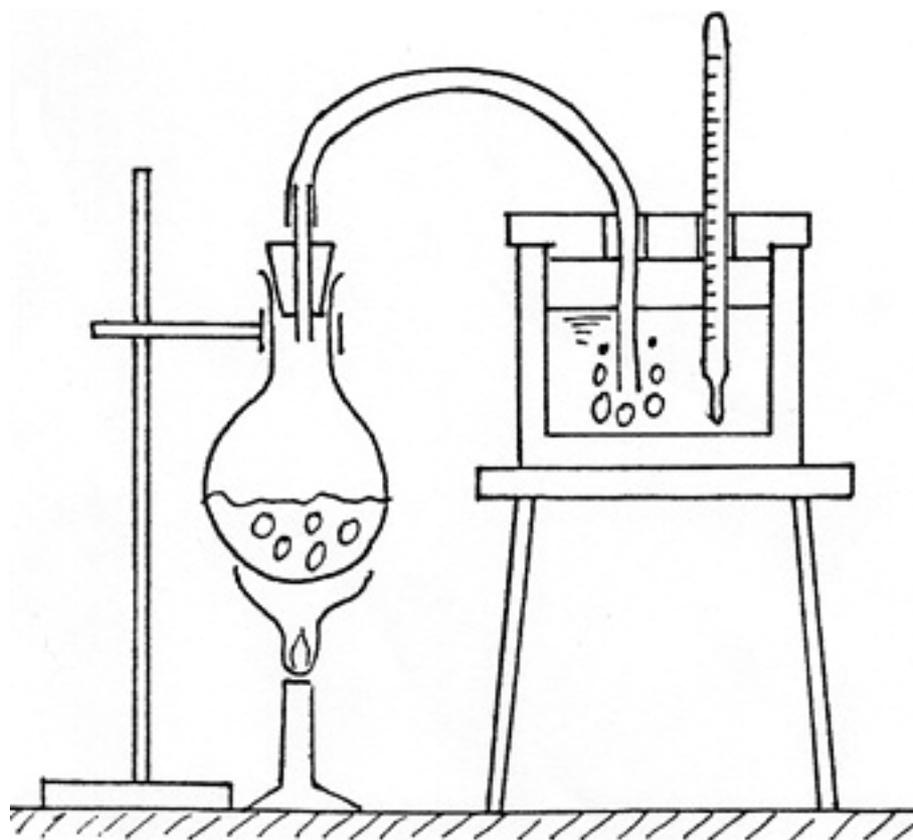
Exemple de détermination d'une chaleur latente de condensation.

(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?

Mesures de puissance et rendement d'appareils.

Il est maintenant nécessaire de procéder à l'introduction de la notion de puissance. En effet, le temps est un paramètre omniprésent, et certaines mesures d'énergie se font par l'intermédiaire de la puissance.

On parlera de la puissance comme d'un «débit d'énergie»: $P = w / t$
et de son unité le Watt: $W = 1J / 1s$

On introduira ensuite les méthodes de mesure de puissance rayonnante et de puissance électrique et on passera ensuite à des applications pratiques sur des TP «appareils».

On fera remarquer que, le temps t étant le même à tous les endroits d'une machine, on a une analogie entre les définitions des rendements:

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

$$\eta = P_{ut} / P_{mot}$$

Ceci permettra de déterminer la puissance et le rendement d'«appareils» à l'aide d'instruments de mesure simples, tels que:

- wattmètre électrique
- multimètres électriques
- wattmètre solaire (pyranomètre)
- appareils de calorimétrie (thermomètres, calorimètres, ...)
- balances

Exemples simples de détermination de rendements:

- capteur photovoltaïque
- capteurs thermiques parabolique et plan
- plaque électrique
- vaporisateur d'appartement
- frigo

Exemples plus complexes:

- divers organes de la machine à vapeur, puis le rendement global de cette machine
- distillation

La puissance

Discussion-recherche

Les notions de force, travail, puissance, sont incluses dans le sens commun. Tâchons de les tirer de là pour les clarifier et les définir au sens de la physique. C'est déjà largement fait pour la force et le travail. Qu'en est-il de la puissance?

On a vu qu'une grande force n'implique pas à coup sûr un grand travail (elle peut même ne pas travailler du tout). Un grand travail implique-t-il qu'il soit fait par une machine très puissante? Quelle est la condition pour qu'une machine peu puissante puisse tout de même effectuer un grand travail? On voit apparaître le paramètre **temps!**

La puissance est-elle plus grande ou plus petite si le temps mis pour effectuer le travail est plus petit? (penser à un coureur cycliste: le plus puissant est-il le plus rapide ou le plus lent?)

La fourmi mettra des siècles pour élever un mètre cube de terre, alors que le terrassier fera le même travail en un quart d'heure et le trax en une seconde. On fait dès lors appel à la notion de «**puissance**». On peut parler de **débit d'énergie**.

Faire dès lors une proposition de définition de la puissance à partir du travail effectué et du temps mis pour l'effectuer.

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:

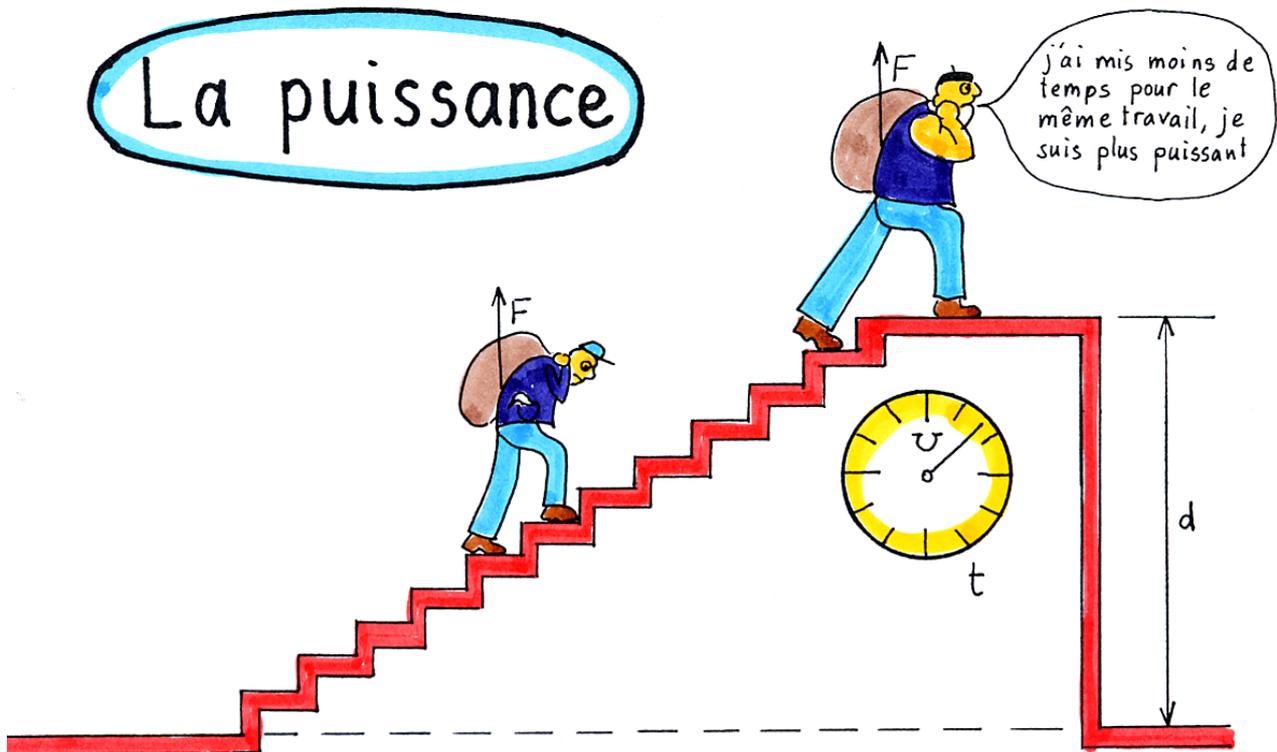
$$w_{mot} = w_{ut} + w_p$$

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

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

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

(P_p 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 3,2m³ 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 m³/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: 860 m
Débit: 25 m³/s
Rendement global: 82%
- Quelle est la puissance électrique absorbée par les pompes?
 - Quel est l'échauffement de l'eau?

Exemple de résolution de problème

Exercice 9, pages précédentes.

$$P_{\text{mot}} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$P_{\text{ut}} = 0,92 \cdot 1,2 \cdot 10^6 \text{ W} = 1,104 \cdot 10^6 \text{ W}$$

a) $P_{\text{cal}} = P_{\text{mot}} - P_{\text{ut}} = 0,096 \cdot 10^6 \text{ W} = \mathbf{96 \cdot 10^3 \text{ W}}$

b)
$$P_{\text{cal}} = 96 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 96 \cdot 10^3 \frac{0,24 \text{ cal}}{\text{s}} = 23 \cdot 10^3 \frac{\text{cal}}{\text{s}}$$

calcul pour une seconde:

1	cal	chauffe(nt)		1g d'eau de 1°C
23·10 ³	cal	"	23·10 ³ g	" " 1°C
23·10 ³	cal	"	$\frac{23}{26} \cdot 10^3 \text{ g}$	" " 26°C

débit de masse: $886 \text{ g/s} = 0,886 \text{ kg/s}$

débit de volume:
$$\frac{0,886 \text{ litre}}{\text{s}} = \frac{0,886 \text{ L}}{\frac{\text{min}}{60}} = \mathbf{53 \frac{\text{L}}{\text{min}}}$$

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 · 10⁶ Nm = 3,6 MJ

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

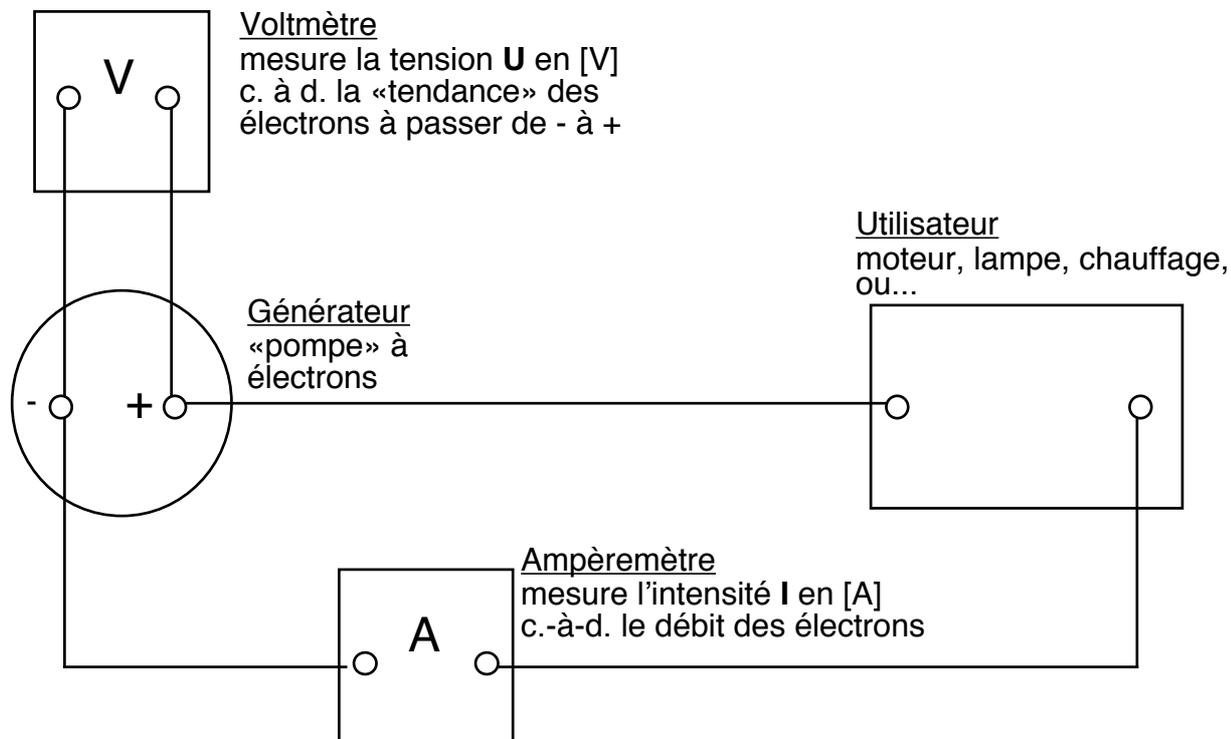
Energie et physiologie humaine

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/cm³ et dans le sang bleu g/cm³.
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/m²** 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

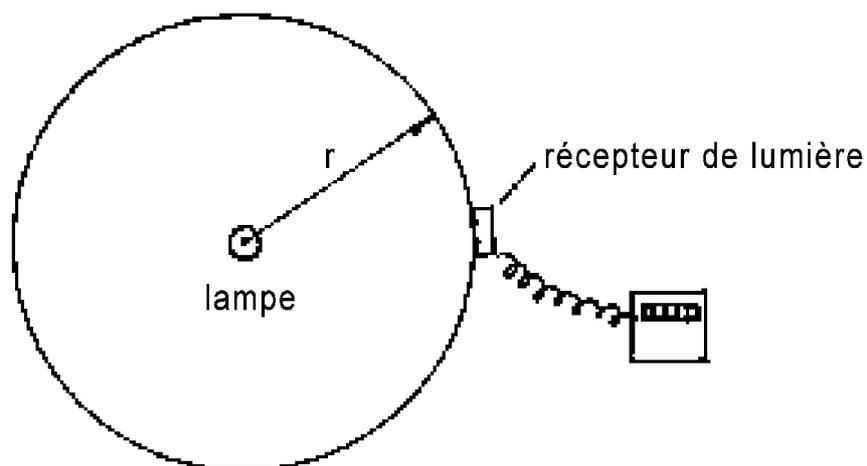
Indications:

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



Les TP «appareils»

Les TP «appareils» permettent à l'élève de mettre enfin en pratique des outils, connaissances et compétences qu'il a acquises dans les démarches précédentes. Il s'aperçoit ainsi qu'il peut maîtriser l'aspect énergétique de toutes sortes d'appareils et installations. Il apprendra alors à dresser le bilan d'une de ces installations, à isoler les entrées, sorties et pertes d'une machine entière ou d'un de ses organes, à dresser des bilans, à énoncer des critères de performance, etc.

Les fiches des élèves ne comportent en général aucune indication. **C'est à l'élève de décider des critères qui guideront sa démarche, des mesures qu'il va faire, et de quelle façon il les fera.**

Le maître pourra cependant adjoindre quelques indications aux fiches qu'il distribuera. A son intention, un exemple de mesures et de calcul est rédigé de façon succincte, mais **cette démarche ne se veut en aucun cas la seule possible**, et ne doit surtout pas servir de modèle contraignant!

Il est indiqué d'effectuer au début un TP au moins ensemble, et de le rédiger en détail avec les élèves, afin qu'ils en comprennent bien la démarche.

A l'issue de ces expérimentations, on pourra demander aux élèves de comparer certains appareils entre eux. L'élève devra alors non seulement être capable de prendre des mesures et de les exploiter, mais il lui faudra choisir des critères judicieux de comparaison, par exemple:

- puissance utile
- puissance spécifique utile (p. ex. par m² de capteur solaire)
- rendement (éventuellement de différents organes)
- température atteinte

mais aussi, si l'on veut regarder plus loin que l'aspect physique:

- coût (investissement et frais de consommation)
- aspects pratiques
- aspects écologiques
- etc.

C'est à ce stade que les compétences globales pourront se manifester, et pourront être testées. L'élève aura alors une approche interdisciplinaire, théorique et pratique, de la notion élémentaire d'énergie.

Objectifs

Les contenus et les outils sont en principe acquis par les élèves.

Reste à les mettre en œuvre dans des situations qui se rapprochent au maximum de cas réels techniques ou naturels.

Ce que l'élève acquerra alors sera un savoir-faire, une mise en relation de la pratique et de la théorie, une aptitude à imaginer des méthodes de travail et de mesure, à faire des montages adéquats.

Il s'apercevra alors des relations entre tous les éléments du cours, les situera dans un contexte de faisabilité, d'écologie et même d'économie.

C'est pourquoi il est souhaitable que les appareils utilisés rejoignent la catégorie des objets en usage dans le ménage, l'industrie, etc. et ne soient plus guère des montages de laboratoire au fonctionnement souvent abstrait et mystérieux. Il est aussi souhaitable que ces appareils convainquent, par leur efficacité, du fondement de certaines énergies d'avenir.

A ce stade, beaucoup d'élèves comprennent enfin les notions qu'on a voulu faire passer au début du cours.

Les TP «appareils» sont donc par excellence le champ d'exercice, d'acquisition et aussi d'évaluation des compétences.

Compétences:

- voir un appareil ou un ensemble d'appareils et y distinguer différents stades de transformation de l'énergie.
- localiser les sièges des différentes transformations
- imaginer et réaliser une prise de mesures permettant de quantifier ces énergies.
- déterminer le ou les rendements à différents stades de la transformation.
- critiquer la mesure (selon des critères connus)
- critiquer le fonctionnement de l'appareil, notamment **en le comparant** à d'autres.
- imaginer et éventuellement réaliser et vérifier des améliorations dans le fonctionnement de l'appareillage.
- envisager les applications ménagères et industrielles possibles, en les critiquant des points de vue écologique et économique.

- rédiger un rapport comportant:
 - titre
 - description de l'appareil
 - but de la démarche
 - méthode de mesure
 - valeurs des mesures
 - traitement de la mesure
 - conclusions et critique

Introduction aux travaux pratiques sur les «appareils»

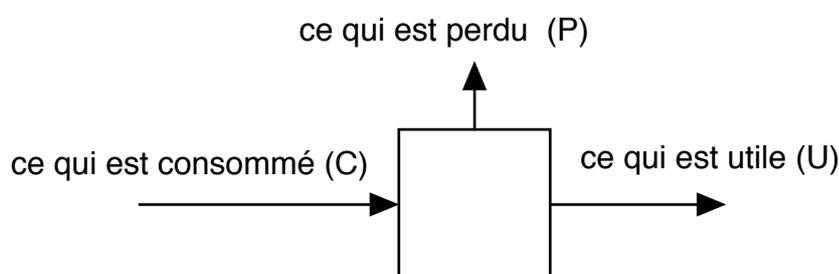
Mesure des énergies, puissances et rendements des machines et des organismes.

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

Le capteur solaire thermique plan et le chauffe-eau solaire.

Le type d'installation choisi est à convection naturelle, chauffée par un capteur prévu pour des installations ménagères. L'eau du réseau n'est généralement pas utilisable pour le circuit de circulation, le chlore attaquant le métal du capteur. Utiliser par exemple de l'eau de pluie.

Deux variantes sont représentées sur deux fiches différentes:

montage 1: sans eau potable (montage sans le récipient intérieur)

montage 2: avec chauffage d'eau potable

Le **montage 1** est le plus simple et le plus pratique pour la mesure du rendement du capteur seul ou de l'installation globale. Dans certaines installations, il peut être obtenu par simple démontage du récipient intérieur.

Le **montage 2** est exploitable ultérieurement pour quantité de problèmes concernant la statique des fluides. Il démontre les applications réelles de chauffage d'eau potable, dont le circuit fermé fonctionne en général avec un liquide antigel.

Signalons que la meilleure méthode simple pour une bonne mesure du débit de l'eau de circulation est la pose d'un sachet en plastic très léger à la sortie supérieure de l'eau dans le réservoir.

1re option possible: détermination du rendement du capteur seul.

Mesures:

- irradiance solaire: ... W/m^2
(prendre $1kW/m^2$ par beau temps si on ne dispose pas d'un pyranomètre)
- dimensions du capteur: ... x ...
- température du bras froid de l'eau de circulation: $T1 = ... \text{ }^\circ\text{C}$
- " " chaud " " : $T2 = ... \text{ }^\circ\text{C}$
- volume d'eau de circulation: $V = ...$ litres masse $m = ...$ g
(à mesurer de préférence à l'aide d'un sachet en plastique très souple, branché sur la sortie d'eau chaude dans le réservoir, selon croquis du montage 2)
- temps: $t = ...$ min = ... s

Calculs:

chaleur véhiculée par le circuit fermé:

$$q = m \cdot (T2 - T1) = ... \text{ cal} = ... \text{ J}$$

puissance calorifique: $P_{cal} = q/t = ... \text{ W}$

puissance d'irradiation solaire: $P_{sol} = \text{aire} \times \text{irradiance} = ... \text{ W}$

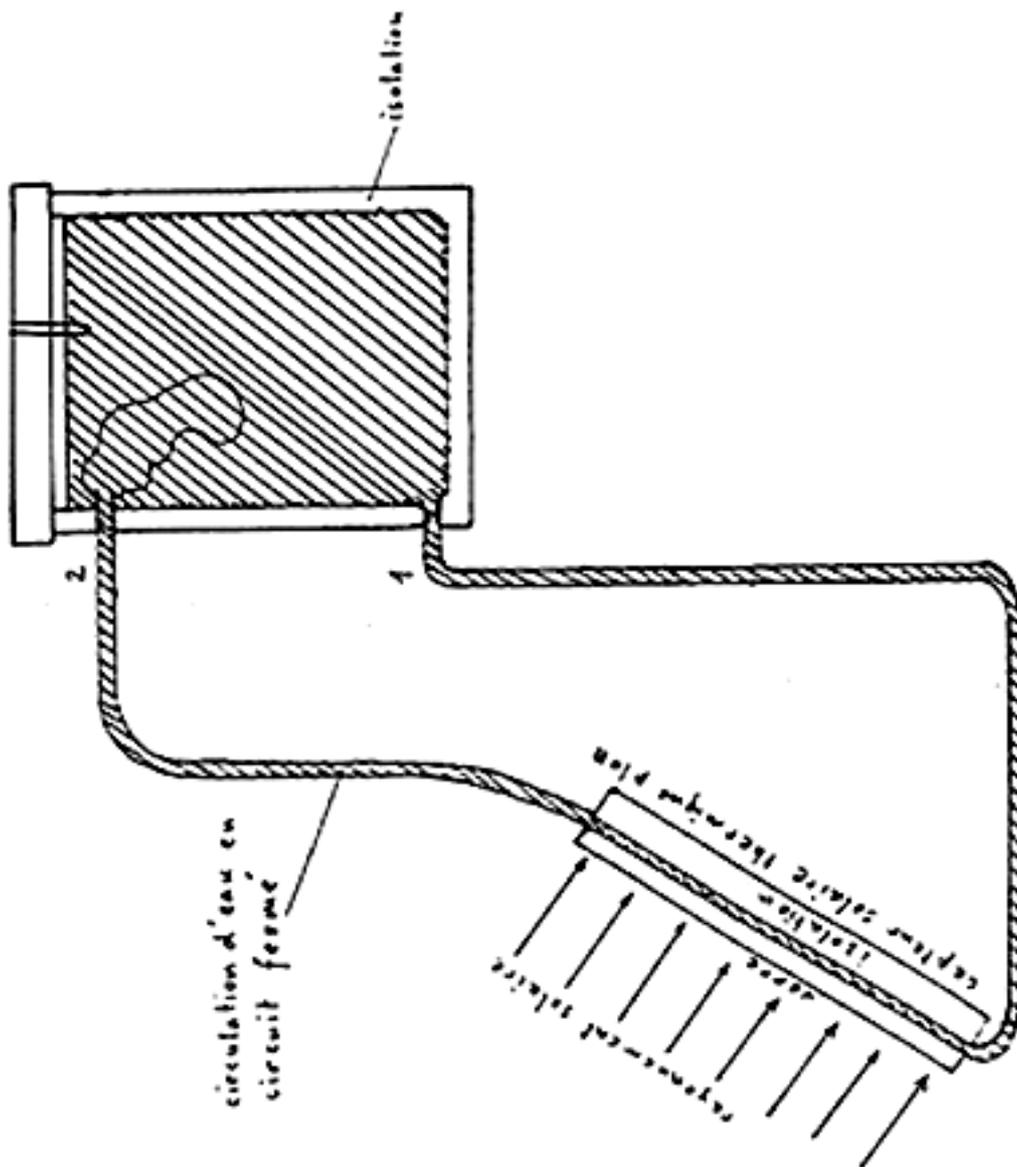
rendement du capteur: $\eta = P_{cal} / P_{sol} = ... = ... \%$

2e option possible: détermination du rendement global de l'installation.

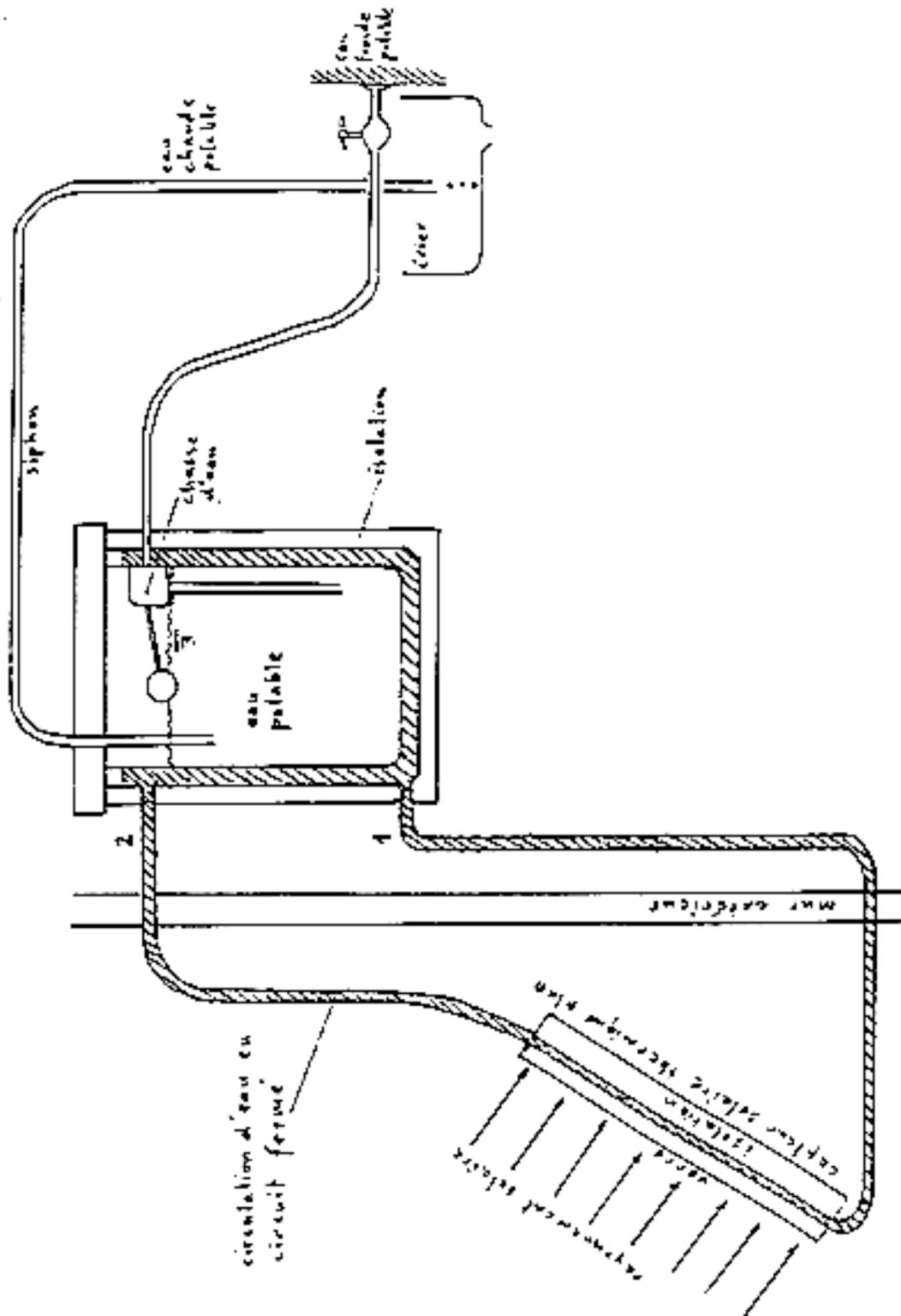
Se baser sur la mesure de l'échauffement du réservoir et sur la puissance d'irradiation.

Ces déterminations peuvent conduire à des comparaisons avec d'autres installations, par exemple celles alimentées par capteur parabolique ou par capteur photovoltaïque, etc. selon différents critères que l'élève doit choisir de façon critique (par exemple puissance par unité de surface, rendement, température maximum, etc.)

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)



Le capteur solaire parabolique

L'intérêt de cette étude, outre l'aspect optique et géométrique, réside dans la constatation, que l'élève devrait faire, de la haute température atteignable (l'eau doit pouvoir bouillir), mais du faible rendement, comparé à celui du capteur plan (recherche d'explications dans les conclusions).

Démarche possible:

Mesures:

- irradiance solaire: ... W/m^2
(prendre $1kW/m^2$ par beau temps si on ne dispose pas d'un pyranomètre)
- dimensions du capteur: ... x ... (rectangle de projection)
- température du bras froid de l'eau (robinet): $T1 = ... \text{ }^\circ\text{C}$
- " " chaud " (sortie) : $T2 = ... \text{ }^\circ\text{C}$ (**valeur importante**)
- masse d'eau chauffée: $m = ... \text{ g}$
- temps: $t = ... \text{ min} = ... \text{ s}$

Calculs:

chaleur prise par l'eau:

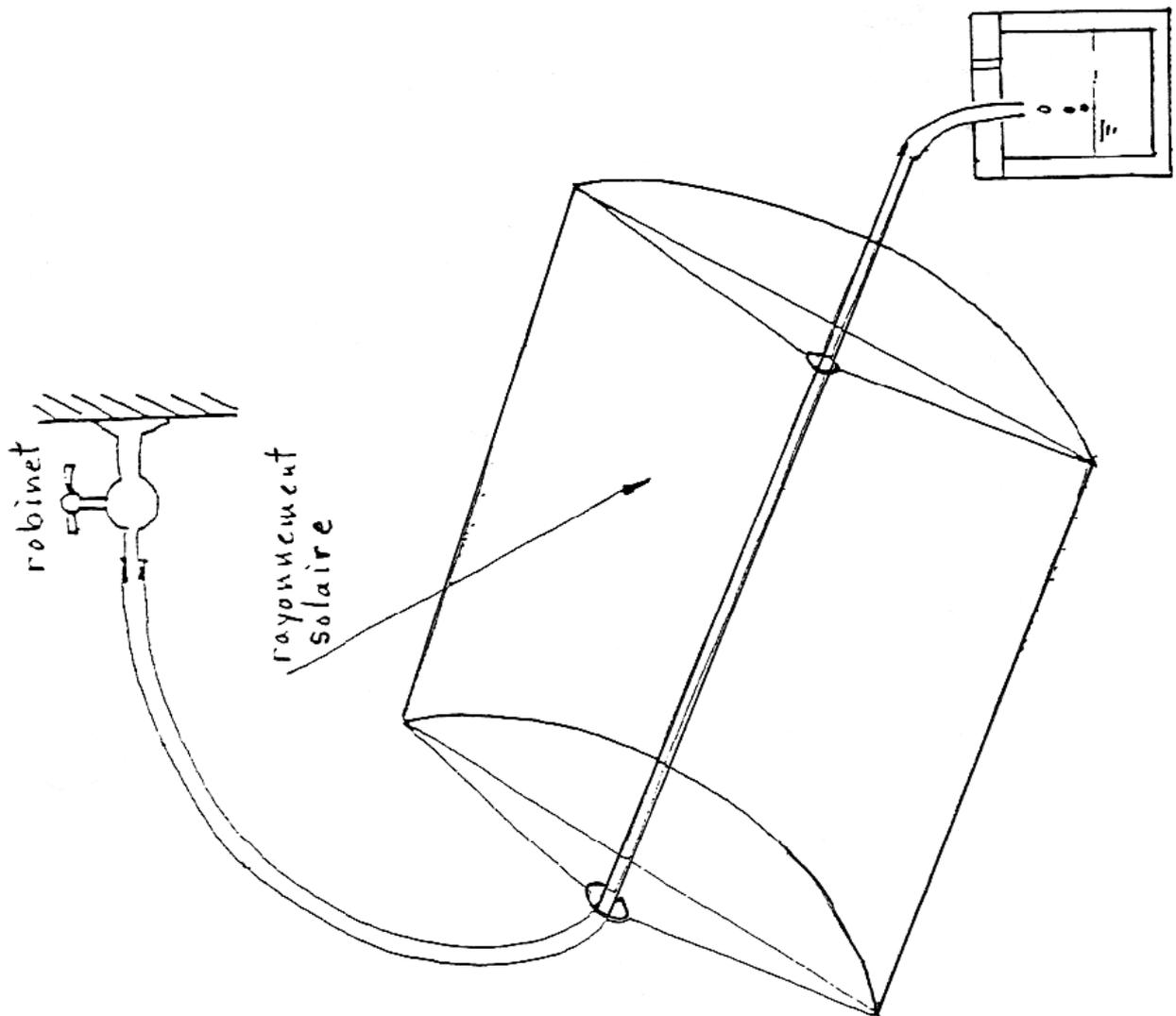
$$q = m \cdot (T2 - T1) = ... \text{ cal} = ... \text{ J}$$

puissance calorifique: $P_{cal} = q/t = ... \text{ W}$

puissance d'irradiation solaire: $P_{sol} = \text{aire} \times \text{irradiance} = ... \text{ W}$

rendement du capteur: $\eta = P_{cal} / P_{sol} = ... = ... \%$

Détermination des performances d'un capteur solaire parabolique



Détermination des performances d'une 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 kW / m^2
(valeur à préciser si on dispose d'un pyranomètre)

Mesures:

irradiance solaire: ... W/m^2
dimensions utiles du capteur: ... x ...
tension électrique: ... V
intensité électrique: ... A
volume d'hydrogène produit: ... cm^3
temps: $t = \dots \text{ min} = \dots \text{ s}$

Calculs:

puissance d'irradiation: $P_{\text{sol}} = \dots \text{ W/m}^2 \cdot \text{aire du capteur} = \dots \text{ W}$

puissance électrique: $P_{\text{el}} = \dots \text{ V} \cdot \dots \text{ A} = \dots \text{ W}$

puissance de production d'hydrogène:

(approximation sans correction par la loi des gaz parfaits)

énergie résidant dans l'hydrogène produit:

$$w = \dots \text{ m}^3 \cdot 0,09 \text{ kg/m}^3 \cdot 12 \cdot 10^6 \text{ J/kg} = \dots \text{ J}$$

$$P_h = w/t = \dots \text{ W}$$

rendement du capteur: $\eta_{\text{el}} = P_{\text{el}}/P_{\text{sol}}$

rendement du générateur d'hydrogène: $\eta_h = P_h/P_{\text{el}}$

rendement global: $\eta_{\text{gl}} = P_h/P_{\text{sol}} \quad (= \eta_{\text{el}} \cdot \eta_h)$

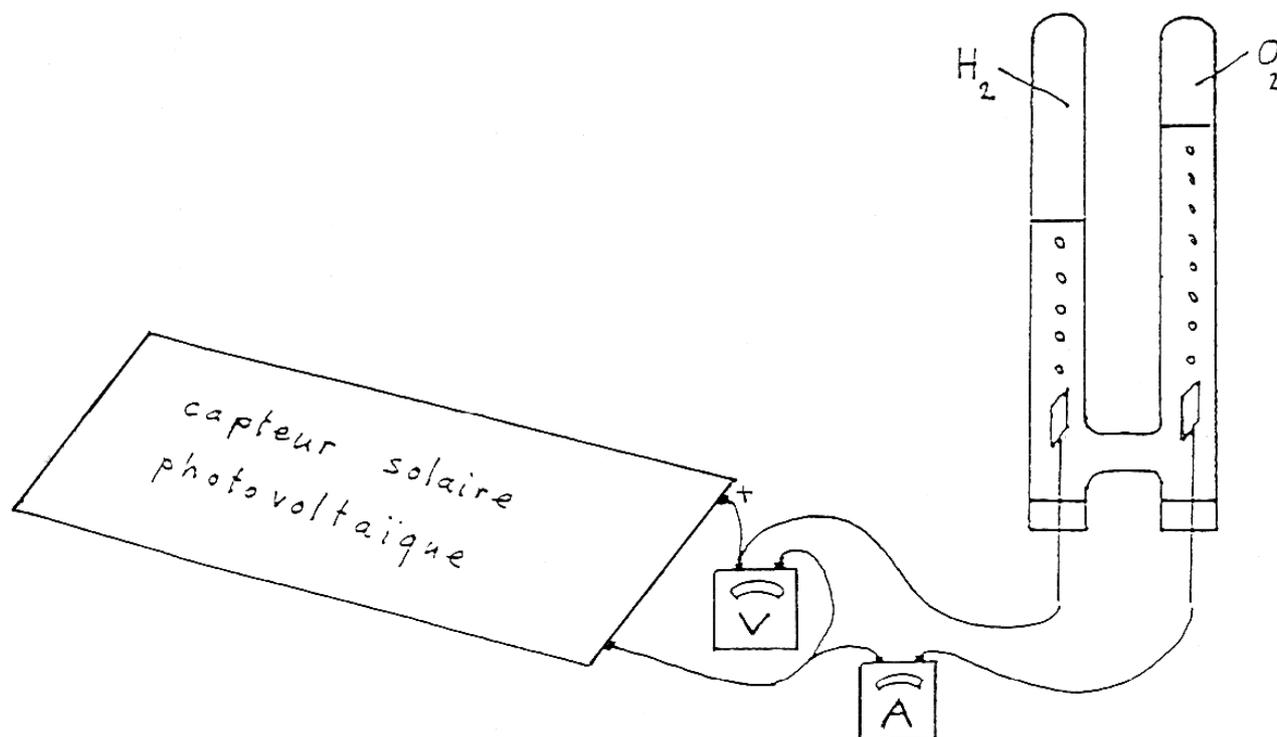
Installation solaire de production d'hydrogène par capteur photovoltaïque.

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 kW / m^2
(valeur à préciser si on dispose d'un pyranomètre)



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

Ceci n'est qu'un exemple de démarche. **Si on fournit une fiche avec dessin à l'élève, elle ne doit pas indiquer de moyen de mesures**, l'élève devant les imaginer lui-même (par exemple, wattmètre, grosse masse d'eau à introduire dans le frigo).
Le frigo doit être testé en régime stationnaire et non en démarrage (l'enclencher longtemps avant l'essai et ne plus toucher le thermostat)

Mesures:

masse d'eau: $m = \dots$ kg
température initiale de l'eau: $T_i = \dots$ °C
« finale de l'eau: $T_f = \dots$ °C
temps: $t = \dots$ min = \dots s
puissance électrique motrice: $P_{el} = \dots$ W

Calculs:

chaleur emmenée:
 $q_e = m \cdot (T_i - T_f) =$
 \dots g \cdot \dots °C = \dots cal = \dots J
puissance de réfrigération:
 $P_r = q_e / t = \dots$ J / \dots s = \dots W
rendement:
 $\eta = P_r / P_{el} = \dots$ %

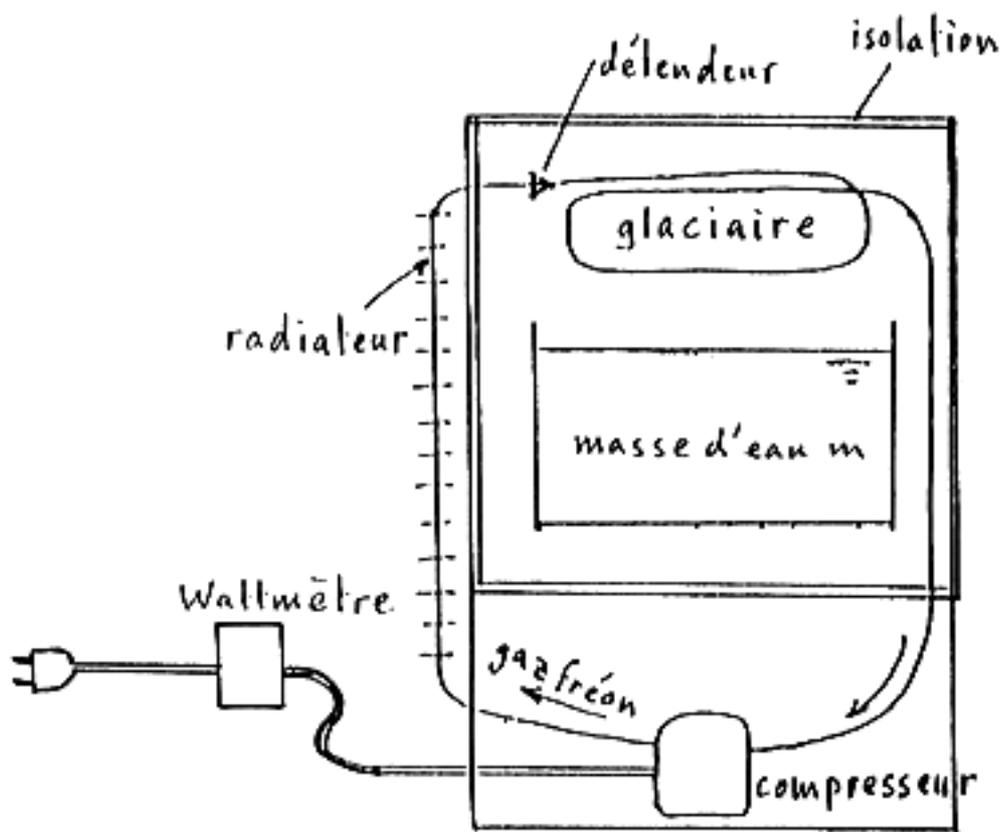
Conclusions:

Entre autres: le rendement correspond-il à ce qu'on peut attendre d'une pompe de chaleur?

Calculer pour se faire une idée le maximum théorique (inverse du rendement de Carnot)

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

(Effacer le wattmètre et le bac d'eau)



installation de distillation

Comparer:

- la puissance de chauffage
- la puissance du refroidisseur
- la puissance de condensation

Dans le cas où le liquide distillé contiendrait de l'alcool, indiquer la chaleur latente de vaporisation-condensation de l'alcool.

Tableau de mesures:

<u>puissance électrique</u>	$P_{el} = \dots$	W
masse distillée	$m' = \dots$	g
concentration d'alcool du distillat: c =	\dots	%
masse d'eau de refroidissement: m =	\dots	g
température de l'eau «chaude»	$T_1 = \dots$	°C
" " " «froide»	$T_2 = \dots$	°C

Calculs:

chaleur de réfrigération:

$$q_r = m \cdot (T_2 - T_1) = \dots \text{ cal} = \dots \text{ J}$$

puissance de réfrigération:

$$P_r = q_r / t =$$

masse d'alcool condensé: $m_a = c \cdot m' =$

masse d'eau condensée: $m_e = m' - m_a =$

chaleur de condensation:

$$q_c = 540 \text{ cal/g} \cdot m_e + 204 \text{ cal/g} \cdot m_a =$$

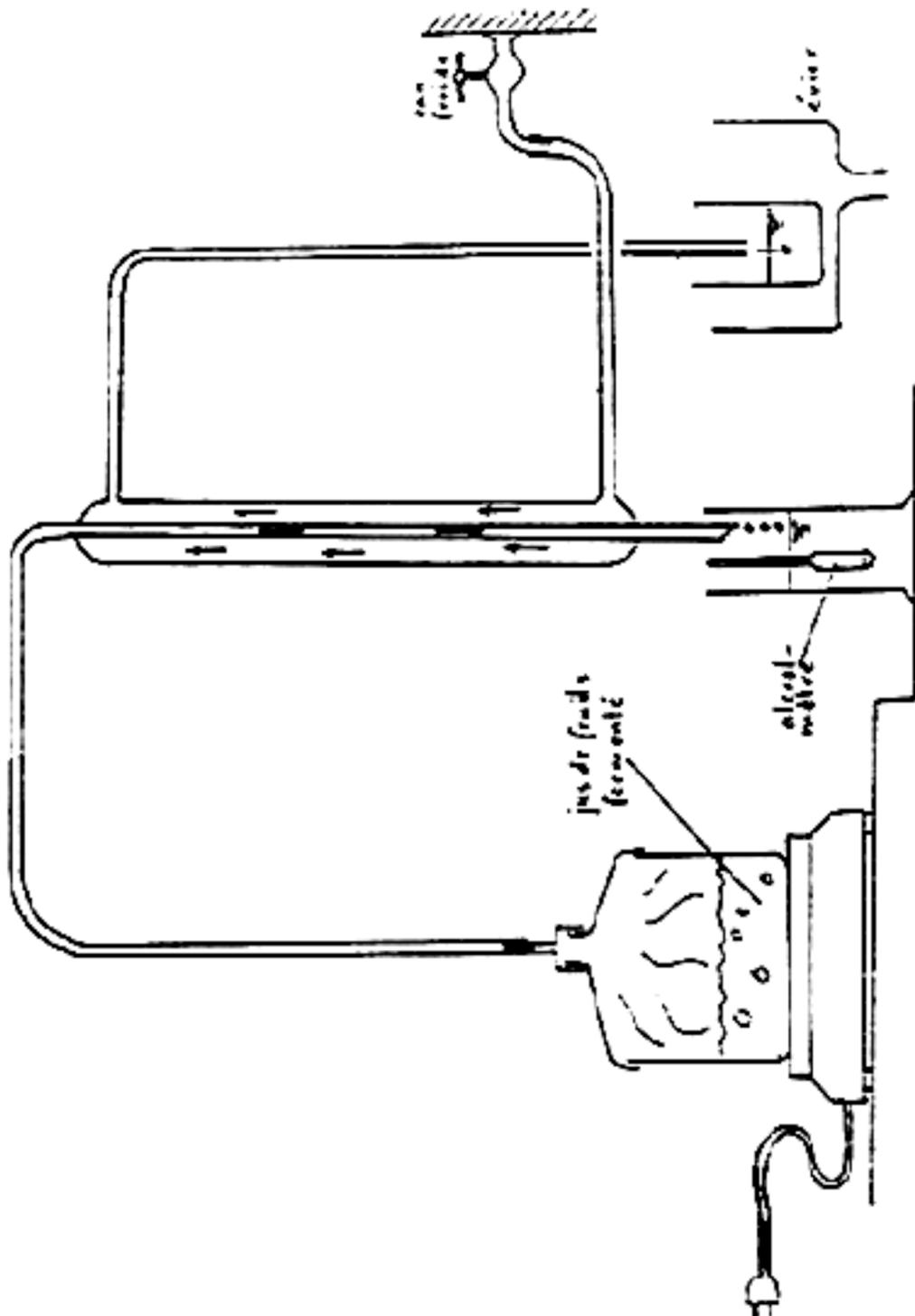
puissance de condensation:

$$P_c = q_c / t =$$

Conclusions:

comparer P_{el} , P_r et P_c

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



Centrale électro-hydraulique

Pour élèves capables de calculer une puissance mécanique. Le calcul de la puissance hydraulique à partir de la hauteur de chute et du débit de poids de l'eau ne sera pas facile à trouver et nécessitera une discussion-recherche avec le maître.

En lieu et place du compteur de volume d'eau, on peut simplement mesurer l'eau écoulée à l'aide d'un seau gradué.

On peut aussi (et c'est plus intéressant, mais nettement moins puissant) construire un barrage et une conduite forcée dans la cage d'escaliers de l'école, à l'aide d'une cuvette et d'un tuyau en plastic. La turbo-génératrice doit alors être de taille beaucoup plus modeste.

Mesures:

différence de pression: $p = \dots$ bar
 volume d'eau: $V = \dots$ litres
 temps: $t = \dots$ min = \dots s
 tension électrique: $U = \dots$ V
 intensité électrique: $I = \dots$ A

Calculs:

puissance motrice (hydraulique):

$$P_h = F \cdot d / t = \dots \text{ W}$$

avec:

$F =$ poids de l'eau utilisée = \dots N

$d =$ hauteur de la chute = \dots m

«recette»: prendre p en bar, multiplier par 10. On obtient la hauteur de chute en mètres (à 2% près).

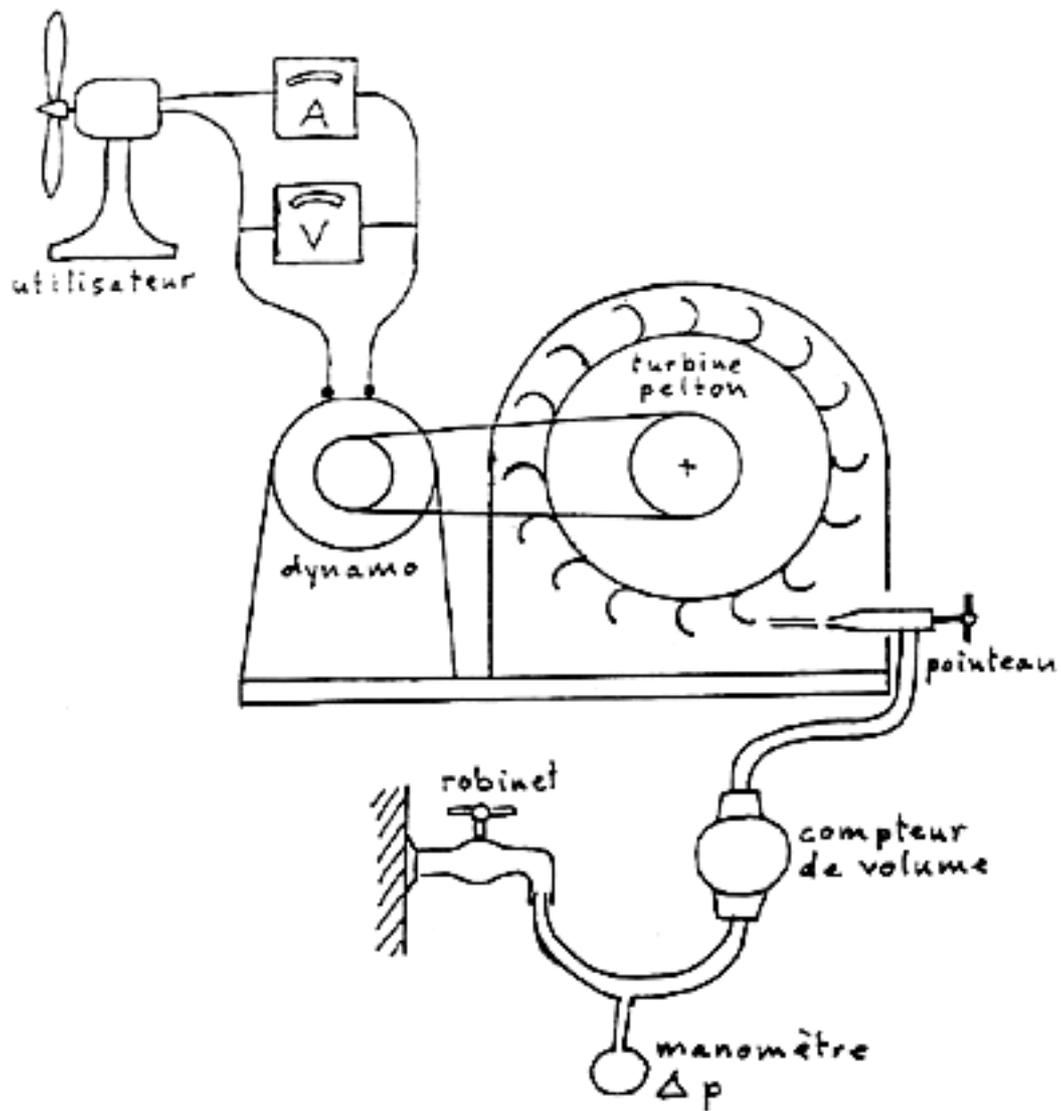
puissance utile (électrique):

$$P_{el} = U \cdot I = \dots \text{ V} \cdot \dots \text{ A} = \dots \text{ W}$$

rendement de l'installation:

$$\eta = P_{el} / P_h = \dots \%$$

Détermination du rendement d'une centrale électro-hydraulique



Puissance et rendements d'une machine thermique La machine à vapeur

Au cas où on ne posséderait pas de machine à vapeur (ce genre de jouet devenant rare, en particulier avec le système à double effet avec bielle de pilotage du tiroir qui a un «bon» rendement), on peut faire des essais analogues avec la turbine à vapeur, moyennant un petit bricolage. On sera alors plus près du système moderne (toutes proportions gardées).

- Montage:
- tendre une courroie entre machine et dynamo
 - remplir le graisseur du cylindre avec de l'huile de moteur d'auto
 - remplir la chaudière aux 3/4 avec de l'eau distillée, puis peser toute la machine, sans le tiroir à combustible
 - vérifier que la soupape de sécurité fonctionne, et la visser fortement sur son joint d'étanchéité
 - visser le sifflet de la même façon
 - peser 4 plaques de combustible «meta», puis les disposer dans le tiroir ad hoc
 - brancher le circuit de mesure de l'intensité électrique produite, dans l'ordre: dynamo pôle+, ampèremètre, moteur du ventilateur, dynamo pôle-
 - brancher le voltmètre aux bornes de la dynamo

- Fonctionnement:
- enflammer le combustible
 - noter le temps t_a lorsque les plaques brûlent bien, puis glisser immédiatement ce tiroir sous la chaudière
 - prendre le temps t_v lorsque l'eau se met à bouillir fortement et que la pression est montée. Lancer alors le volant de la machine, qui se met à fonctionner, entraînant la dynamo et le ventilateur électrique
 - pendant la marche, mesurer l'intensité et la tension électriques. Prendre la pression de vapeur p .
 - surveiller le niveau de l'eau dans la chaudière, qui ne doit en aucun cas descendre en dessous du bas du hublot, auquel cas il faudrait retirer le tiroir de combustible
 - lorsque la machine faiblit par manque de combustible, noter le temps t_f

- Mesures et calculs:
- Déterminer le rendement de deux parties distinctes de la machine:
- chaudière
 - cylindre + dynamo
- Puis calculer le rendement global de la centrale électrique.
Calculer le rendement théorique maximum (rendement de Carnot)

- Question:
- Que penser de ces différents rendements?

Manipulations:

Simuler le comportement d'une centrale thermique. A chaque manipulation, observer le comportement des machines, en déduire ce qui pourrait arriver dans une vraie centrale et indiquer ce que devrait faire le personnel dans chaque cas.

- débrancher l'utilisateur de la puissance mécanique (enlever la courroie)
- débrancher l'utilisateur électrique (enlever une prise)
- mettre la machine en panne (arrêter le volant, ce qui bloque la sortie de vapeur)
- épuiser l'eau de la chaudière (à ne pas pratiquer, faire des suppositions!)
- observer le régulateur centrifuge postiche. Quelle est son utilité?

TP machine à vapeur
tableau de mesures

masse de combustible $m_c = \dots\dots\dots g$
 masse de la machine avant l'essai $m_{av} = \dots\dots\dots g$
 " " " " après l'essai $m_{ap} = \dots\dots\dots g$

temps à l'allumage $t_a = \dots\dots\dots \text{min} = \dots\dots\dots \text{s}$
 " début vaporisation $t_v = \dots\dots\dots \text{min} = \dots\dots\dots \text{s}$
 " fin $t_f = \dots\dots\dots \text{min} = \dots\dots\dots \text{s}$

tension électrique $U = \dots\dots\dots \text{V}$
 intensité électrique $I = \dots\dots\dots \text{A}$

(pression de vapeur) $p = \dots\dots\dots \text{bar}$
 température d'ébullition $T_e = \dots\dots\dots ^\circ\text{C} = \dots\dots\dots \text{K}$
 température ambiante $T_a = \dots\dots\dots ^\circ\text{C} = \dots\dots\dots \text{K}$

données

pouvoir calorifique du combustible: 43 000 J/g
 chaleur latente de vaporisation de l'eau: 540 cal/g = 2250 J/g

calculs

puissances:

puissance du combustible:
$$P_{com} = \frac{m_c \cdot 43\,000 \text{ J/g}}{t_f - t_a} = \dots\dots\dots \text{ W}$$

masse de vapeur produite : $m_v = m_{av} - m_{ap} = \dots\dots\dots \text{ g}$

puissance vapeur:
$$P_v = \frac{m_v \cdot 2250 \text{ J/g}}{t_f - t_v} = \dots\dots\dots \text{ W}$$

puissance électrique: $P_{el} = U \cdot I = \dots\dots\dots \text{ W}$

rendements:

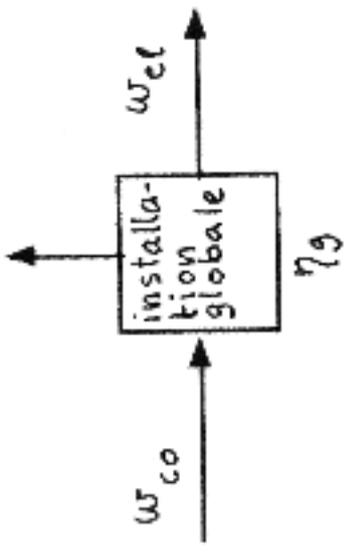
rendement global : $\eta_g =$

rendement du groupe cylindre-dynamo : $\eta_{cd} =$

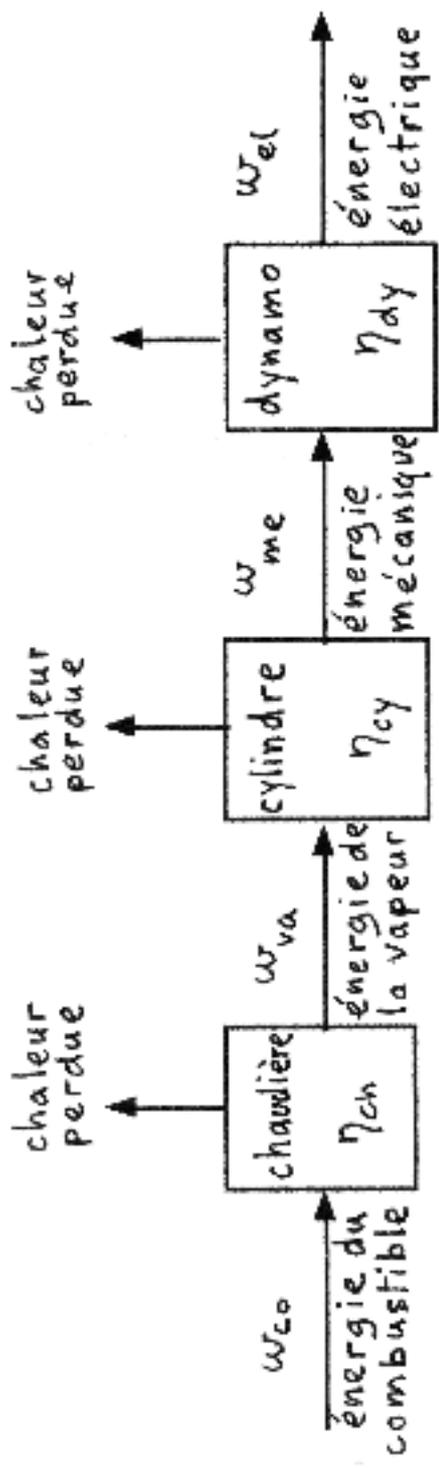
rendement de la chaudière : $\eta_{ch} =$

rendement théorique maximum (de Carnot) : $\eta_c = \frac{T_e - T_a}{T_e} = \dots\dots\dots =$
 %

Nota: Une méthode permettant la mesure de la puissance mécanique du cylindre est praticable. La description en est faite en annexe, après la «confection du tambour».



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

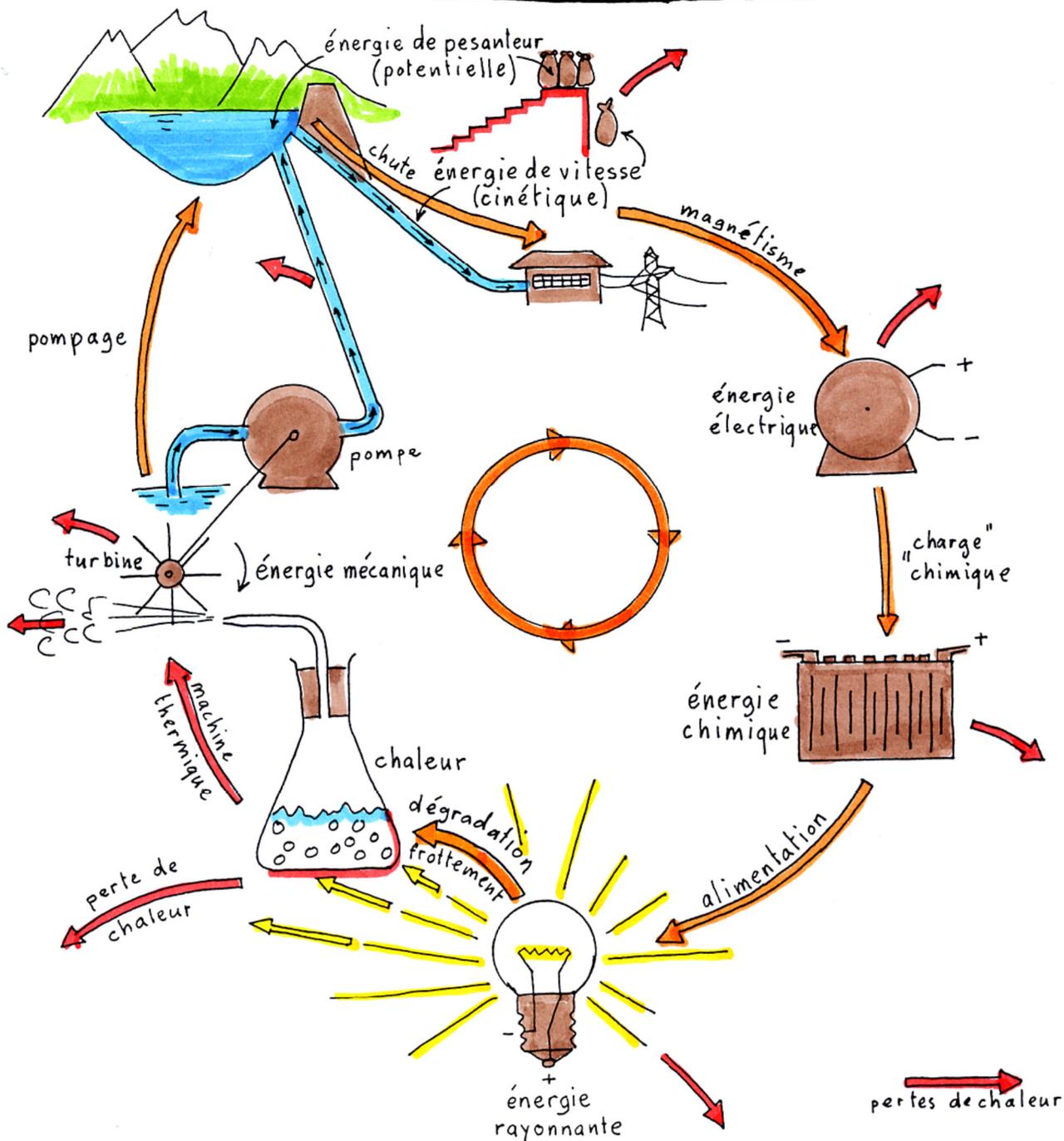
Les sources de l'énergie

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

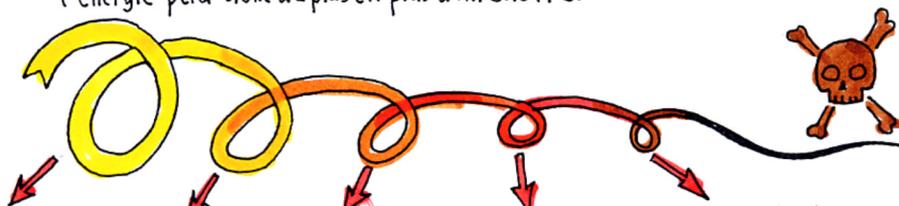
des transformations de l'énergie
exemples de leurs diverses formes



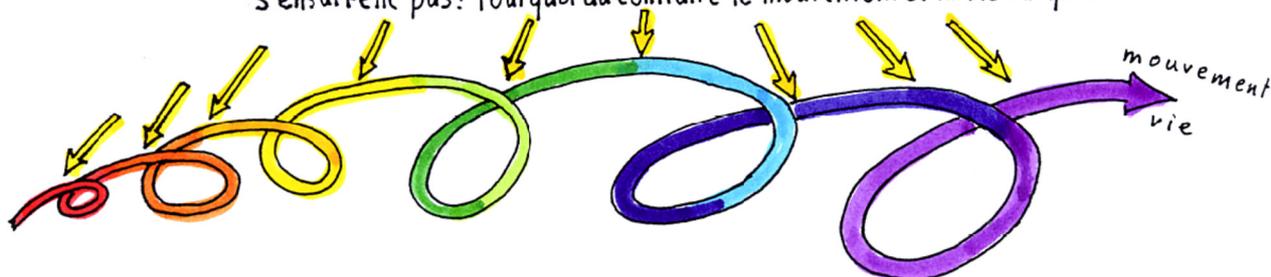
La spirale



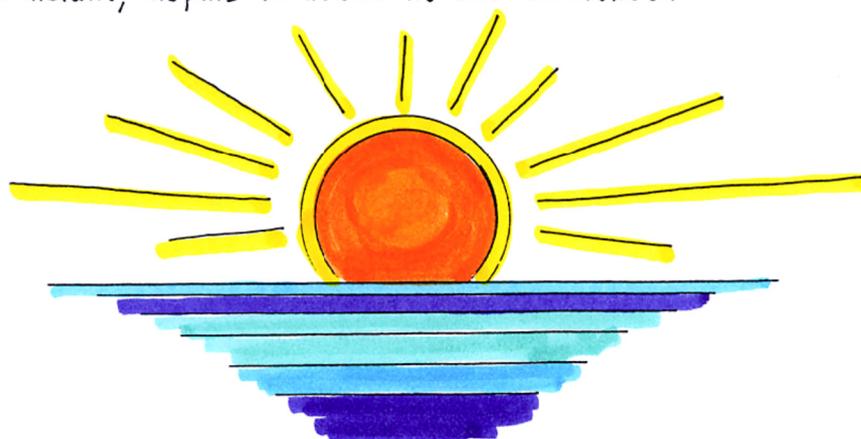
A chaque transformation se superpose un peu de „frottement“ qui donne de la chaleur, en partie irré récupérable. Le cycle des transformations de l'énergie perd donc de plus en plus d'intensité.



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?

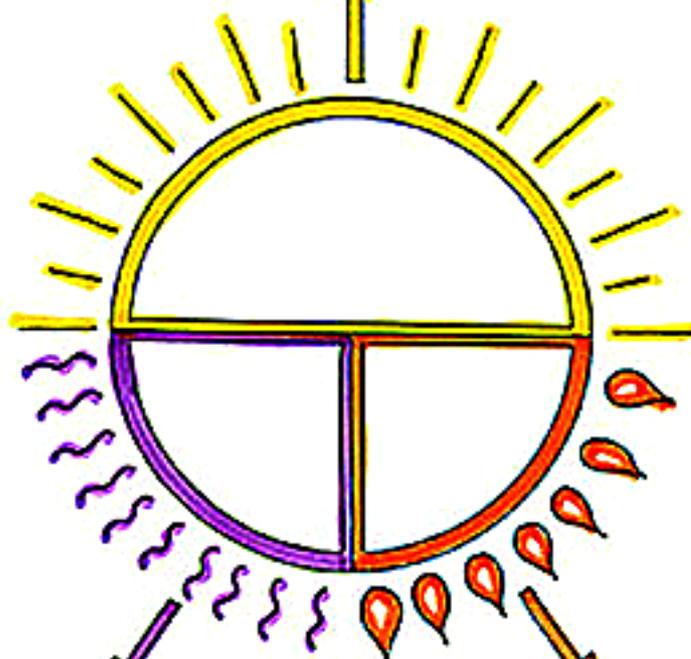


La Terre reçoit un flux d'énergie sous forme rayonnante, chaque instant, depuis le début de son existence.



Les 3 sources

le Soleil direct



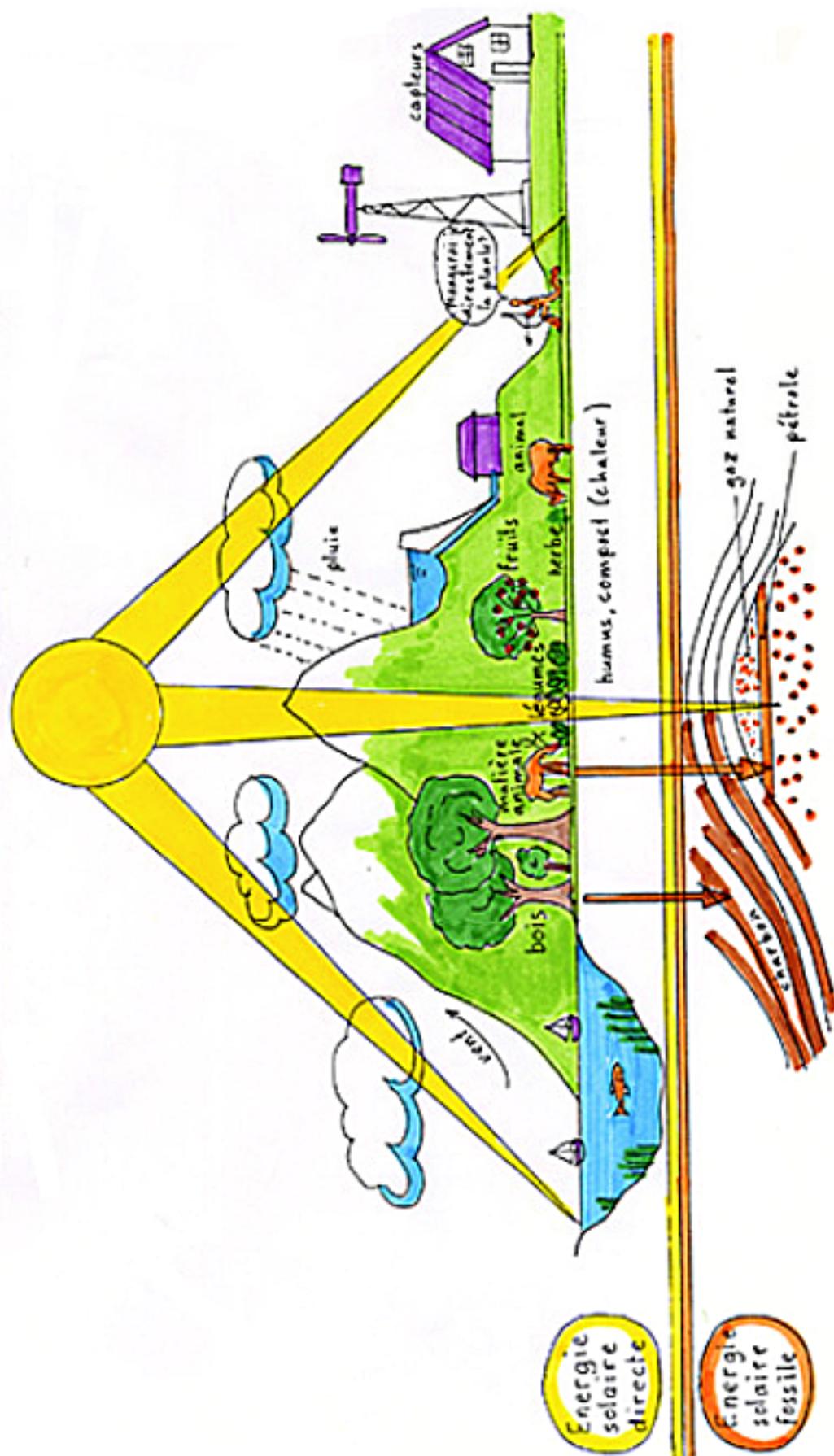
le Soleil artificiel
énergie produite par
fission ou fusion
nucléaire



le Soleil fossile
énergie accumulée
pendant des millions
d'années

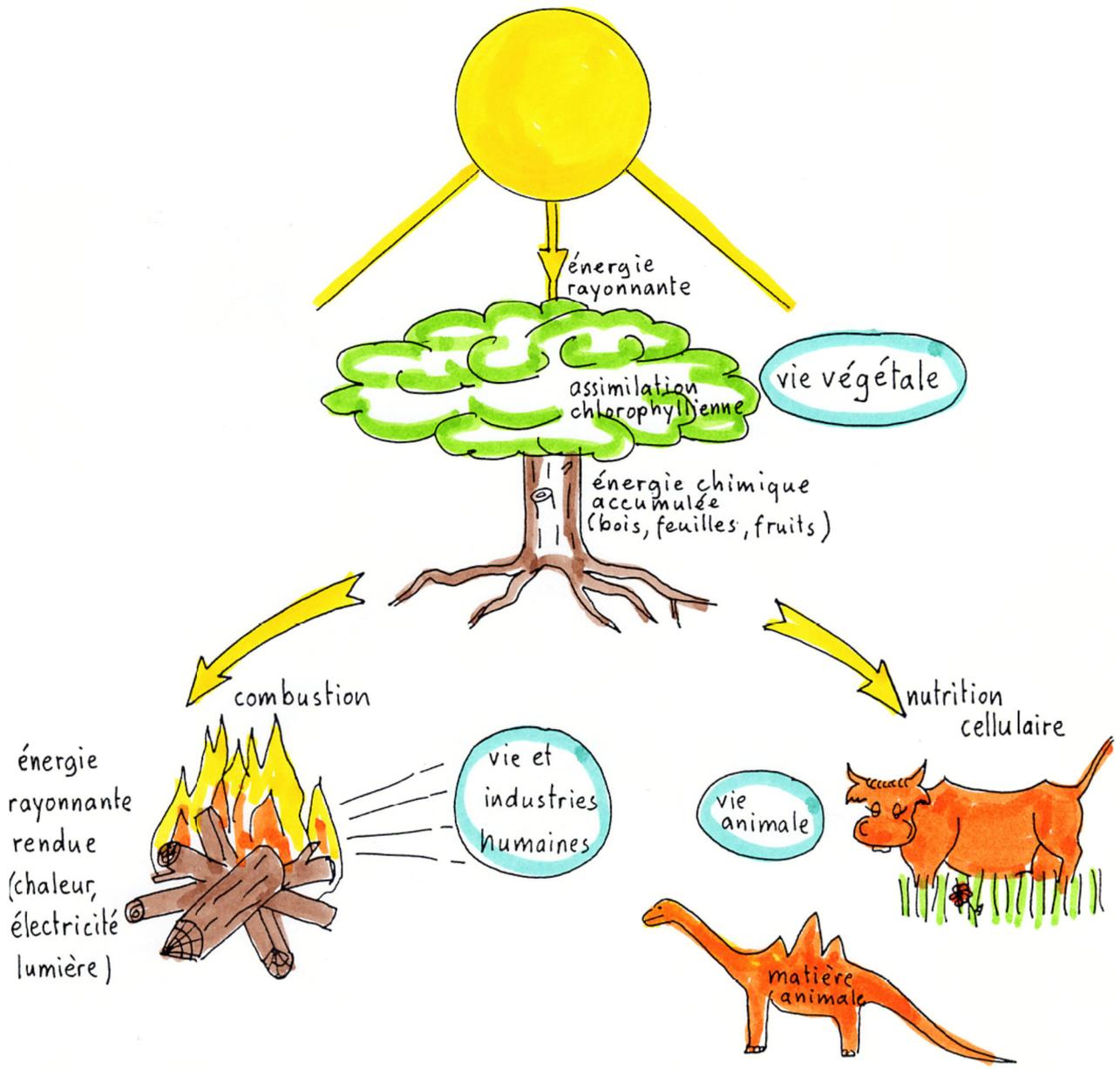
La pyramide de l'énergie solaire

Les deux sortes d'énergie solaire



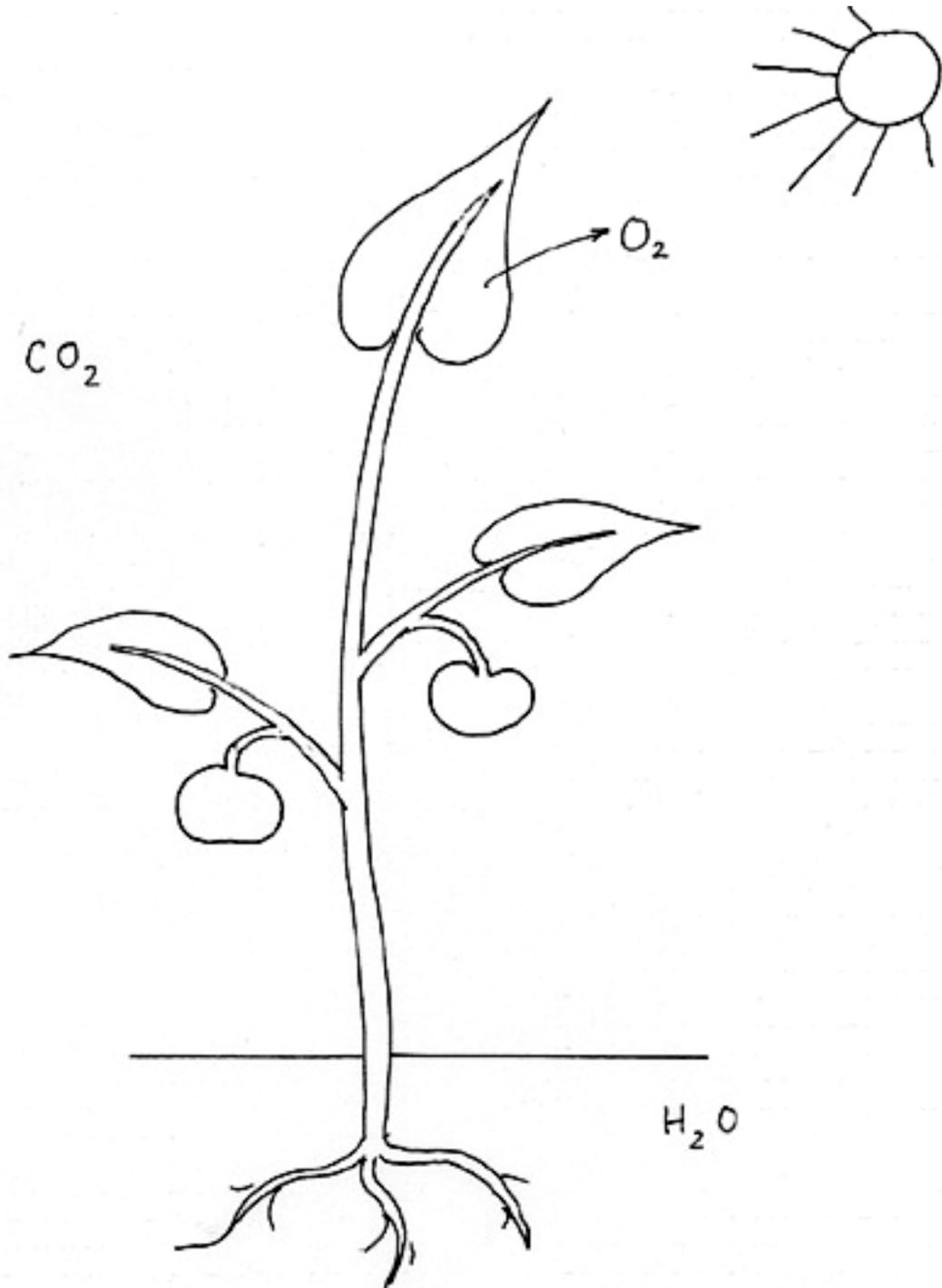
énergie
solaire
directe

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



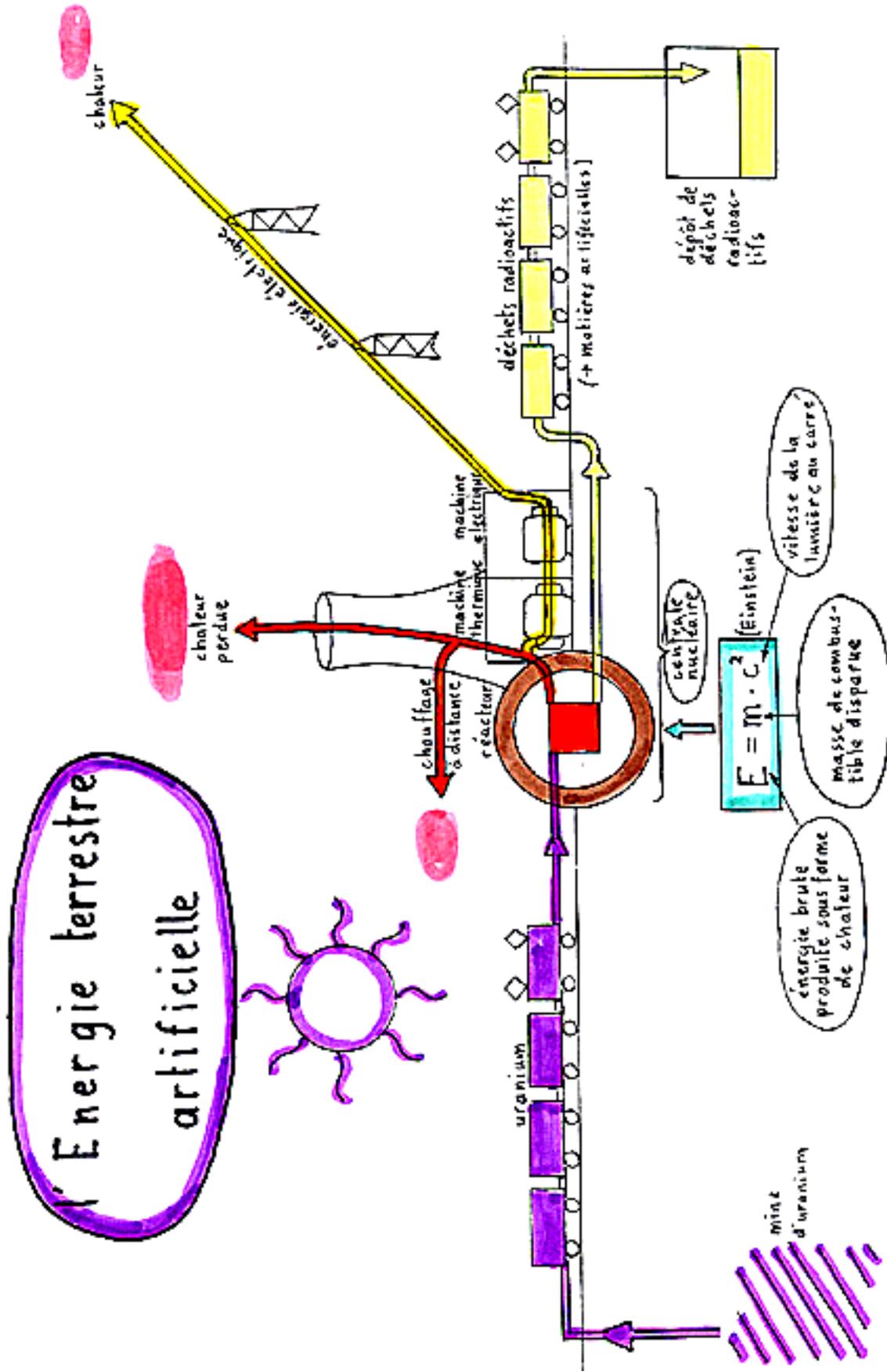
Analogies entre la plante verte et le générateur solaire d'hydrogène

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

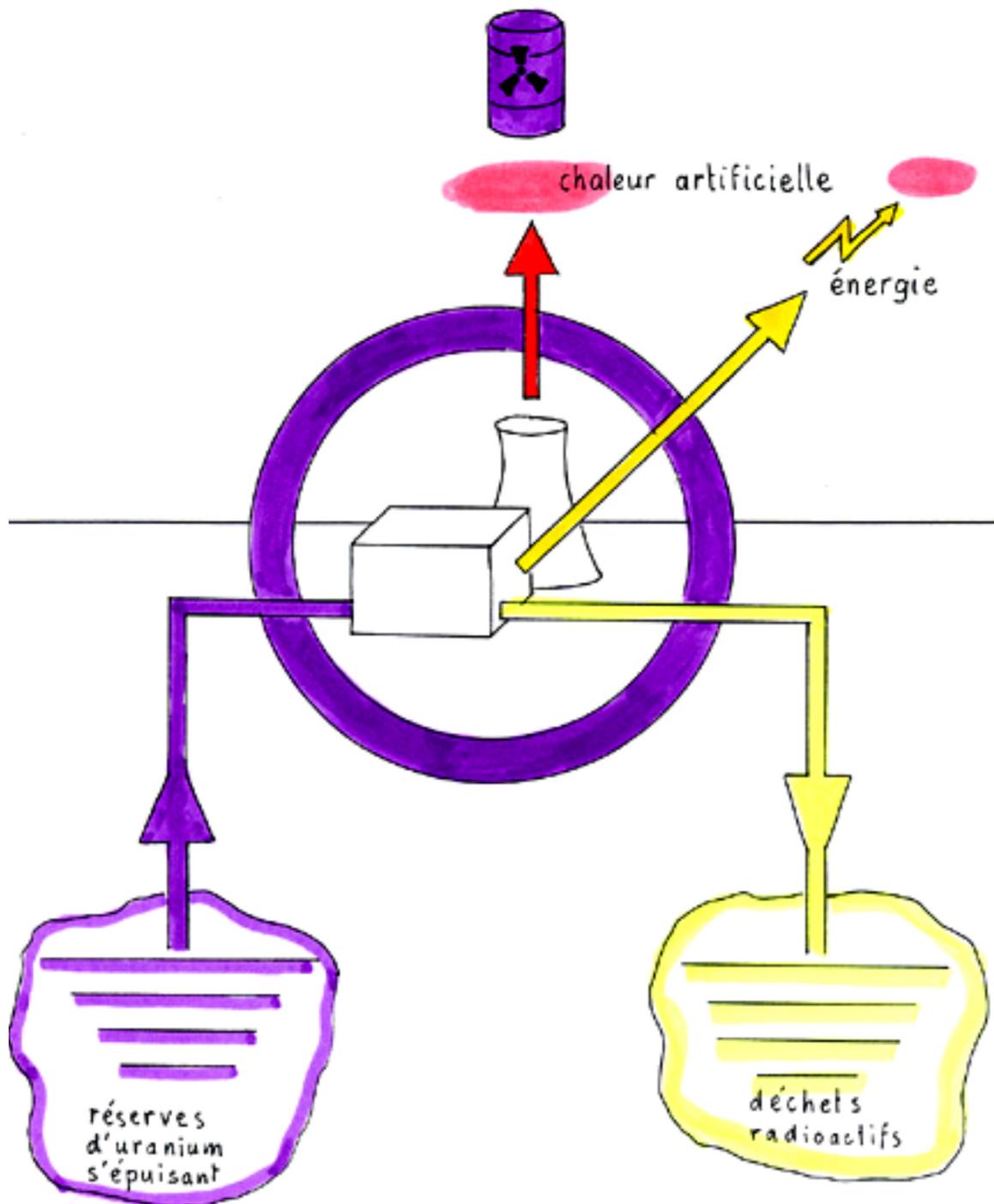


Analogies entre la plante verte et le générateur solaire d'hydrogène

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



le Soleil artificiel bilan



le Soleil fossile bilan

