

ENERGIE MECANIQUE

1. Notion de travail

1.1 EXPÉRIENCE : LES MACHINES SIMPLES

Une machine simple est un dispositif dont le but est de diminuer la force à appliquer ou à augmenter la force dont on dispose.

Le but des expériences suivantes est de faire monter un chariot (de 200g) jusqu'à une certaine hauteur (par exemple 20 cm). Plusieurs possibilités existent pour y parvenir.

1ere possibilité

Soulever le chariot et le faire monter verticalement

$$F_1 =$$

2eme possibilité

Utiliser une rampe inclinée de 40 cm, la force diminue

$$F_2 =$$

3eme possibilité

Utiliser une rampe plus longue de 80 cm, la force diminue encore

$$F_3 =$$

4eme possibilité

Utiliser une rampe de 1,2 m

$$F_4 =$$

Conclusions

1. Pour atteindre une hauteur toujours la même, la force à exercer sur un plan incliné x fois plus long est x fois plus faible

Autrement dit

$$F_1 \cdot L_1 = F_2 \cdot L_2 = F_3 \cdot L_3$$

Ou

$$F \cdot L = \text{constante}$$

On gagne en force ce que l'on perd en chemin à parcourir

Dans notre cas la constante vaut 0,4 N.m

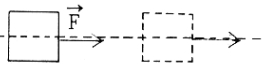
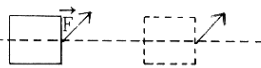
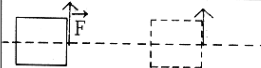
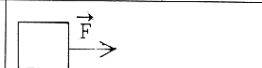
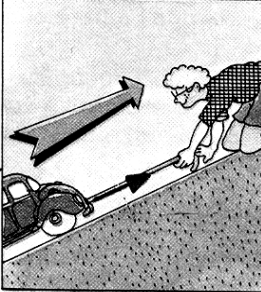
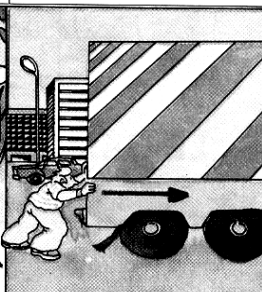
Le produit de la force à appliquer par la distance parcourue est une nouvelle grandeur physique appelée « travail de la force »

2. TRAVAIL D'UNE FORCE

2.1 INTRODUCTION

On dit en physique qu'une force travaille si son point d'application se déplace dans une direction qui n'est pas perpendiculaire à la sienne.

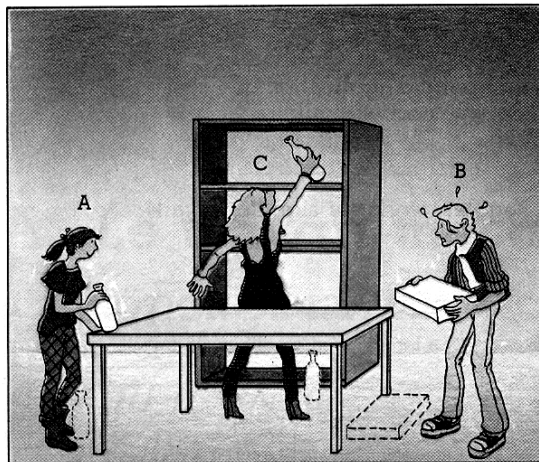
Le travail de la force sera noté W (work en anglais)

La force $\vec{F}$ accomplit un travail		La force $\vec{F}$ n'accomplit aucun travail	
 Déplacement de l'objet suivant la ligne d'action de la force $\vec{F}$.	 Déplacement de l'objet suivant une direction différente de la ligne d'action de la force $\vec{F}$ sans lui être perpendiculaire.	 Déplacement de l'objet suivant une direction perpendiculaire à la ligne d'action de la force $\vec{F}$.	 La force $\vec{F}$ ne provoque pas le déplacement de l'objet.
 		 	

Exemples

2.2 EXPRESSION DU TRAVAIL

2.2.1 De quoi dépend le travail d'une force ?



$W_B > W_A$

Les trois personnes ci-contre accomplissent un travail moteur.

A pose une bouteille vide sur la table et effectue un travail W_A .

B pose un lourd paquet sur la même table et effectue un travail W_B .

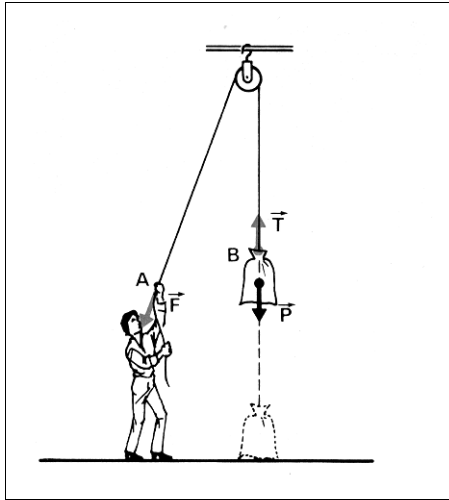
C place une bouteille vide sur une étagère élevée et effectue un travail W_C .

Initialement les trois objets se trouvaient sur le sol.

B développe une force supérieure à la force développée par A. Le travail W_B accompli par B est supérieur au travail W_A accompli par A même si les déplacements (sol-table) sont égaux. A et C développent des forces égales mais le travail W_C accompli par C est supérieur, en raison des déplacements inégaux, au travail W_A accompli par A.

Le travail W dépend de la force F et du déplacement d de son point d'application

2.2.2 Travail de la force si $\vec{F}$ et $\vec{d}$ sont //



Le travail W de la force est proportionnel à :
la force à exercer
la distance suivant laquelle elle agit.

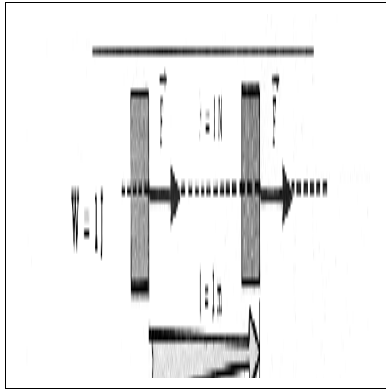
Le travail est égal au produit de la force F par la grandeur du déplacement d de son point d'application

$$W = + F \cdot d$$

Le travail s'exprime en **Joules (J)**

La force en Newton

La distance en m



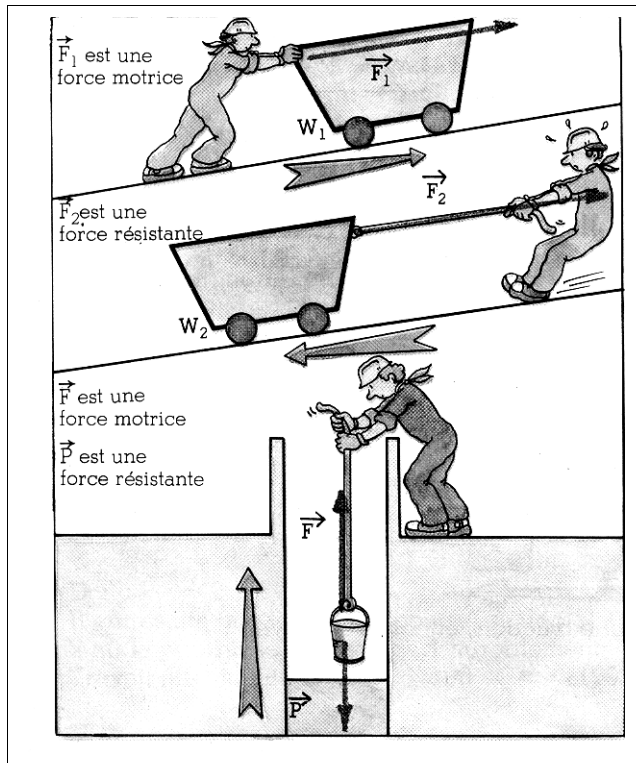
*Un **joule** est le travail effectué par une force de 1N qui déplace son point d'application de un mètre dans sa direction.*

2.3 TRAVAUX MOTEUR ET RÉSISTANT.

2.3.1 Force et déplacement sont // et de même sens

$$W = + F \cdot d$$

le travail est positif



Le seau est soumis à 2 forces. La pesanteur et la force F de l'ouvrier. Le seau monte. La pesanteur exerce un travail résistant alors que F exerce un travail moteur.

Un autre exemple de travail moteur est celui de la force motrice du moteur d'une voiture qui communique au démarrage de l'énergie à la voiture.

Elle a pour effet d'augmenter la vitesse de l'auto donc d'augmenter son énergie. Son travail est aussi positif.

Un travail positif est un travail moteur
La conséquence d'un travail moteur est de favoriser le mouvement et ainsi d'augmenter l'énergie du corps qui subit la force.

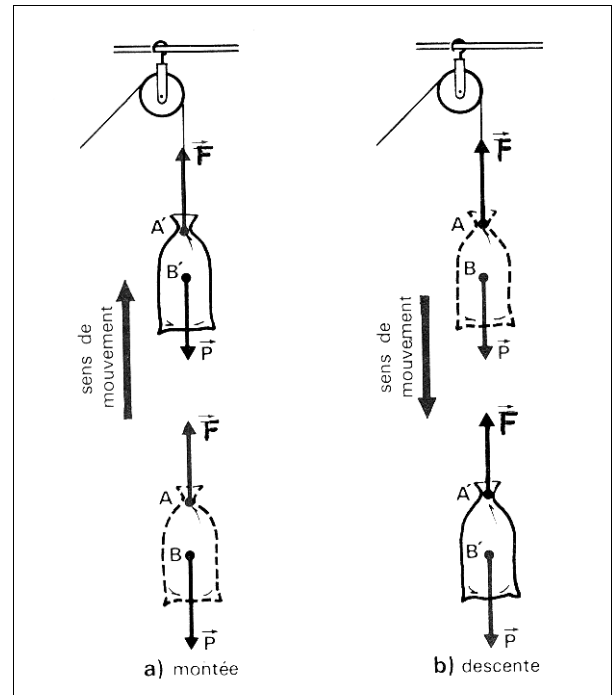
Le corps aura plus d'énergie après le travail qu'avant celui-ci.

Le wagonnet se déplace vers le haut grâce à F_1 .

F_1 et le déplacement sont de même sens. C'est un travail moteur.

Le wagonnet descend la pente malgré F_2 qui le retient.

F_2 et le déplacement sont de sens contraire. C'est un travail résistant



2.3.2 Force et déplacement sont // et de sens contraire

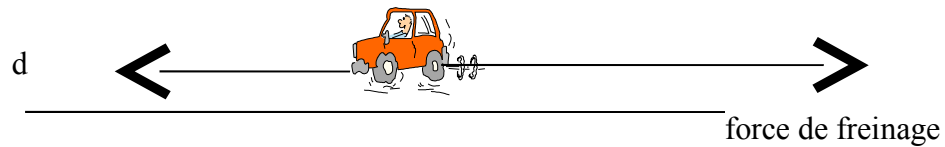
$$W = - F \cdot d \quad \text{le travail est négatif}$$

Un travail négatif est un travail résistant

La conséquence d'un travail résistant est de « freiner » le mouvement et ainsi de diminuer l'énergie du corps qui subit la force.

Le corps aura moins d'énergie après le travail qu'avant celui-ci.

C'est le cas des forces de frottement



2.3.3 Force et déplacement sont $\perp$

Dans ce cas le travail de la force est nul.

En effet, la force dans ce cas n'est pas responsable du déplacement du corps et elle ne modifie donc pas son énergie.

Cas d'une personne qui soutient une valise sans l'élever. Attention, même si la personne se fatigue, pour la physique, elle ne travaille pas.

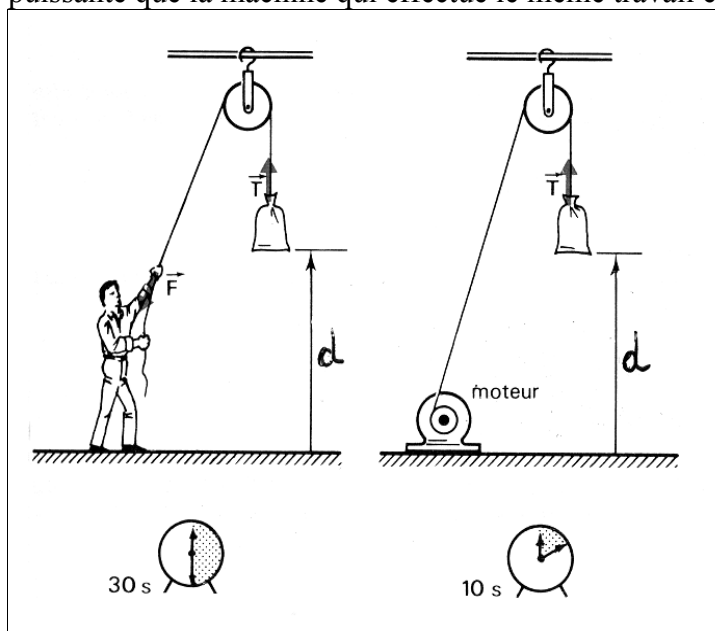
De même, une personne qui tente de pousser un meuble sans y arriver se fatigue mais vu que la force ne déplace pas son point d'application, pour la physique, elle ne travaille pas.

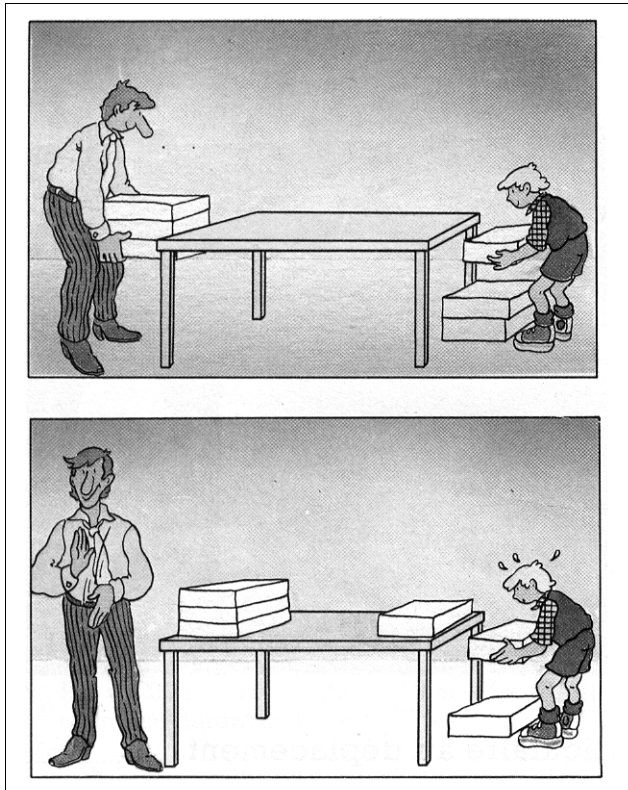
3. Puissance

3.1 INTRODUCTION

La rapidité avec laquelle un travail est effectué n'est pas un facteur négligeable.

Une machine pouvant élever 1 sacs de ciment à une hauteur de 10 m en 10 secondes est plus puissante que la machine qui effectue le même travail en 30 secondes.





3.2 DÉFINITION

On appelle puissance d'une machine le quotient du travail W qu'elle effectue par la durée t nécessaire pour l'effectuer

$$P = W / t$$

W en joule, t en seconde, P en **Watt (W)**

P = 1 W

lorsque

$F = 1 \text{ N}$	$l = 1 \text{ m}$	$t = 1 \text{ s}$
	<i>ou</i>	
$F = 2 \text{ N}$	$l = 0,5 \text{ m}$	$t = 1 \text{ s}$
	<i>ou</i>	
$F = 1 \text{ N}$	$l = 0,5 \text{ m}$	$t = 0,5 \text{ s}$

Le watt est la puissance d'une machine qui effectue un travail de 1J en 1s.

3.2.1 Autres unités:

1 cheval-vapeur = 1CV = 736 W

1 kW = 1000 W = 10^3 W

1MW = 1000000 W = 10^6 W

1GW = 1000000000 W = 10^9 W

3.2.2 Remarque

Supposons que le déplacement se fasse à la vitesse V alors ,

La puissance peut aussi se calculer par :
$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot d}{t} = F \cdot \frac{d}{t} = F \cdot V$$

V = vitesse de déplacement du point d'application de la force en m/s

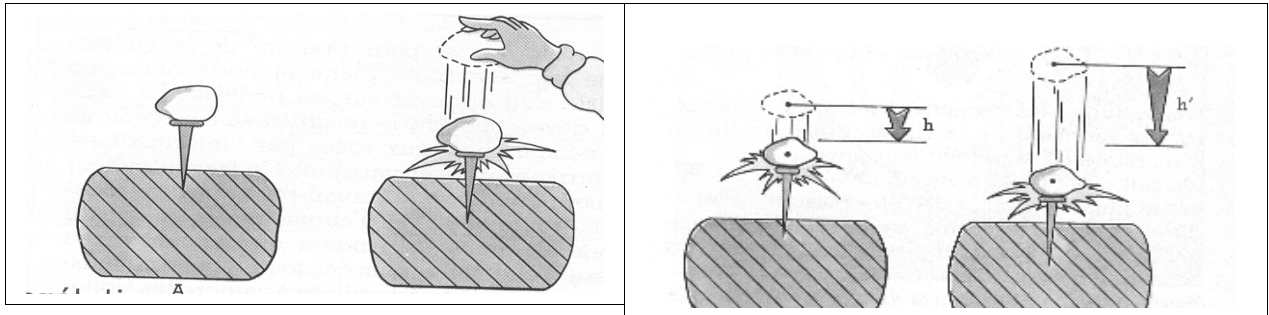
4. Energie mécanique

Un corps possède de l'énergie s'il est capable de réaliser un travail.

L'énergie mécanique peut se présenter sous deux formes : l'énergie potentielle et l'énergie cinétique.

4.1 ENERGIE POTENTIELLE E_p

Il en existe plusieurs formes



4.1.1 Energie potentielle de pesanteur

1. Lorsqu'un corps est soulevé verticalement à une certaine hauteur, le travail effectué pour l'y amener n'est pas perdu. Il se trouve « mis en réserve » sous forme d'une énergie appelée énergie potentielle de pesanteur.

La pierre posée sur un clou ne permettra pas de l'enfoncer mais si on le lâche d'une certaine hauteur, il pourra le faire.

2. *Elle est qualifiée de potentielle car elle est en réserve et susceptible d'être transférée lors du changement de position du corps. Elle est dite de pesanteur car elle est liée au poids du corps*

Le travail nécessaire pour faire passer une masse m du sol à une hauteur h

$$W = m \cdot g \cdot h$$

C'est ce travail qui représente *l'énergie potentielle de pesanteur du corps*.

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

m en kg $g = 9,81 \text{ N/kg}$ h en m E_p en joule (J)

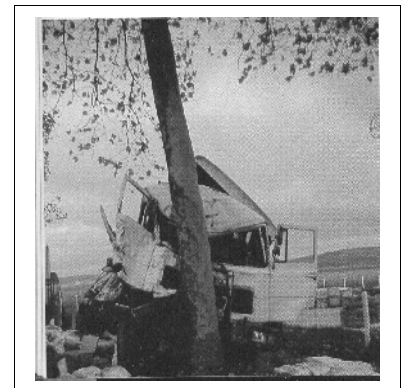
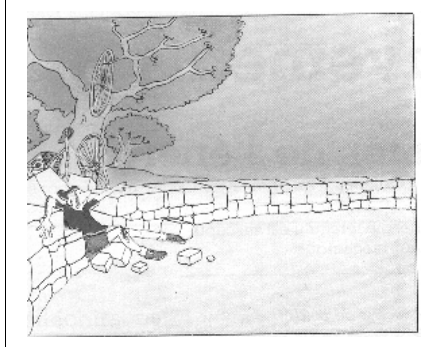
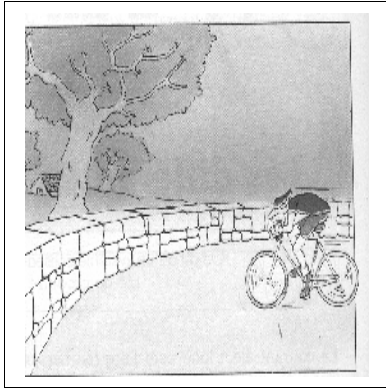
4.1.2 Energie potentielle élastique

Si on comprime un ressort, ce ressort possède de par son état, du travail en réserve. Ce ressort possède ainsi une autre forme d'énergie potentielle due à son élasticité.

Le même type d'énergie se retrouve dans un trampoline, un arc à flèches,...

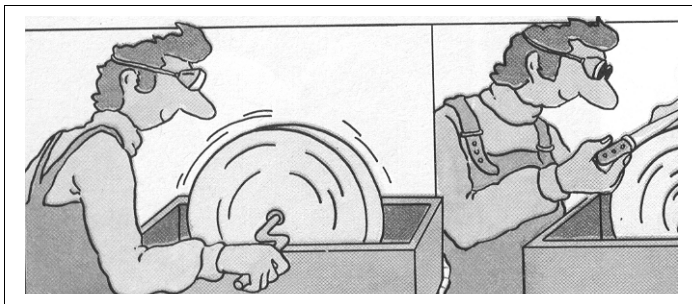
Une énergie potentielle d'un corps est l'énergie liée à sa position ou à sa forme.

4.2 ENERGIE CINÉTIQUE E_c



Une voiture qui roule peut monter des côtes, produire des dégâts lors d'un choc.
L'eau des torrents peut actionner des turbines pour produire de l'énergie électrique. Il en est de même pour le vent.

Tout corps en mouvement possède du travail en réserve donc de l'énergie appelée énergie cinétique E_c



4.2.1 Expression de E_c

Prenons une voiture qui démarre ($V_0 = 0$ m/s) sous l'action de la force F de son moteur. On sait qu'il sera en MRUA (2^{ème} loi de Newton) avec une accélération égale à a .
Plus la force F va agir sur une longue distance d , plus la vitesse V de la voiture sera grande.

Calculons le travail W de la force F sur une distance d

$$W = F \cdot d = m \cdot a \cdot d$$

$$W = m \cdot a \cdot a t^2 / 2$$

$$\text{car en MRUA : } d = at^2/2 \text{ et } V = at$$

$$W = m \cdot V^2 / 2$$

C'est ce travail que l'on définira comme étant l'énergie cinétique du corps en mouvement

L'énergie cinétique d'un corps dépend de la masse m du corps et du carré de la vitesse du corps V^2

$$E_c = m \cdot V^2 / 2$$

m en kg V en m/s E_c en J

4.2.2 Remarque

Cette formule montre que plus la masse du corps est importante plus son énergie cinétique sera grande.

Elle montre aussi que si la vitesse du corps est multipliée par deux alors son énergie cinétique est multipliée par quatre.

4.3 ENERGIE MÉCANIQUE

Un corps peut avoir à la fois de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique.

L'énergie mécanique E d'un corps est la somme des énergies potentielle et cinétique

$$E = E_p + E_c = mgh + mV^2 / 2$$

Travail - puissance- énergie : exercices

1. Quel est le travail effectué en élevant une cabine d'ascenseur de 1000 kg d'une hauteur de 24 m ?
(rép : $W = 240000 \text{ J}$)
2. Un travail de 1000 J est dépensé en levant une statue de 200kg. A quelle hauteur l'a-t-on levée ?
(rép : 0,5m)
3. On lance une balle de 40 g , verticalement vers le haut. Le sommet de la trajectoire est situé à 12 m au-dessus du point de lancement. Calculer le travail effectué par le poids de la balle durant sa montée. Ce travail est -il moteur ou résistant ?
(rép : 4,8 J)
4. Une force de 75 N exercée sur un ressort le raccourcit de 8 cm. Quel est le travail accompli ? (rép : 6J)
5. On désire empiler l'une sur l'autre 4 pierres cubiques identiques dont la longueur d'une arête est de 30 cm. Chaque pierre a un poids de 150 N. Au départ les 4 pierres sont sur le sol. Quel est le travail à effectuer ? (rép : 270 J)
6. Une personne soulève avec une poulie une masse de 50 kg à une hauteur de 10 m en 20 secondes.
Calculer sa puissance (rep : 250 W)
7. Un treuil motorisé de 15000 W est utilisé pour lever un bac de béton de 500 kg à une hauteur de 30 m.
Combien de temps mettra-t-il ? (rép : 10 s)
8. Quelle est la puissance d'un moteur qui lève une charge de 140 kg d'une hauteur de 15 m en 1 minute ? (rép : 350W)
10. Une cage d'ascenseur de 400kg monte à la vitesse de 80 cm/s. Calculer la puissance du moteur (rép : 3200 W)

9. Une cabine d'ascenseur dont le poids est de 10000 N est élevée à une hauteur de 24 m. Quelle est son énergie potentielle ?
(rép : 240000 J)
10. Le moteur d'un tracteur développe une puissance de 900 kW en tirant sa charge à la vitesse de 18 km/h. Quelle est la force produite ? (rép : 180.000 N)
11. A quelle hauteur un moteur diesel de 25 kW peut-il soulever une masse de 5 tonnes en une demi minute ? (rép : 15m)
12. Une locomotive tire un train à la vitesse de 90 km/h. La force de traction est de 20.000N. Quelle est la puissance de la locomotive ? (rép :500 kW)
13. Une cabine d'ascenseur dont le poids est de 10000 N est élevée à une hauteur de 24 m. Quelle est son énergie potentielle ?
(rép : 240000 J)
14. Quelle est l'Ep d'un livre de 2 kg que l'on soulève à une hauteur de 1,5 m ?
(rép : 29,4 J)
15. Quelle est l'énergie cinétique d'une auto de 1000 kg qui roule à la vitesse de 20 m/s ?
(rép : 200000 J)
16. Un enfant dont le poids est de 500 N fait du patin à la vitesse de 5 m/s. Quelle est son énergie cinétique ?
(rép : 625 J)
17. Un insecte de 2g vole à 0,4 m/s à une hauteur de 2m . Calculer son énergie mécanique
(rép : 0,04016 J)
18. Comparer l'énergie cinétique d'une voiture de 800Kg à la vitesse de 36 km/h, de 72 km/h et de 108 km/h (rép : 40.000 / 160.000 / 360.000 J)

5. Transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique en l'absence de frottement : conservation de l'énergie mécanique E

Chute de la bille d'une certaine hauteur

Au point A :

$$\begin{aligned} v_0 = 0 &\Rightarrow E_k = 0 \\ E_p &= m \cdot g \cdot h \\ E_m &= 0 + m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

Au point O :

$$\begin{aligned} h &= 0 \Rightarrow E_p = 0 \\ E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \end{aligned}$$

comme nous sommes en présence d'un MRUA, nous pouvons écrire :

$$v = g \cdot \Delta t \quad \text{et} \quad h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \Delta t^2$$

d'où

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

et par conséquent :

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot 2 \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot h \\ E_m &= m \cdot g \cdot h + 0 = m \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

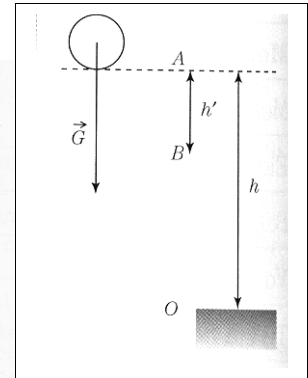
Au point B :

$$\begin{aligned} E_p &= m \cdot g \cdot (h - h') \\ E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v')^2 \end{aligned}$$

or

$$v' = \sqrt{2 \cdot g \cdot h'}$$

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot 2 \cdot g \cdot h' = m \cdot g \cdot h' \\ E_m &= m \cdot g \cdot (h - h') + m \cdot g \cdot h' = m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h' + m \cdot g \cdot h' = m \cdot g \cdot h \end{aligned}$$



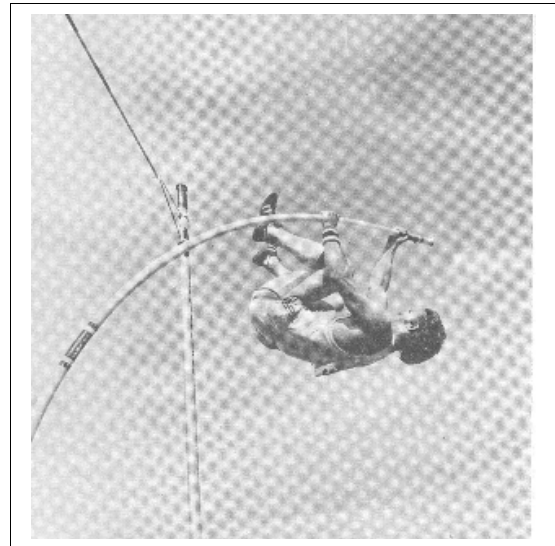
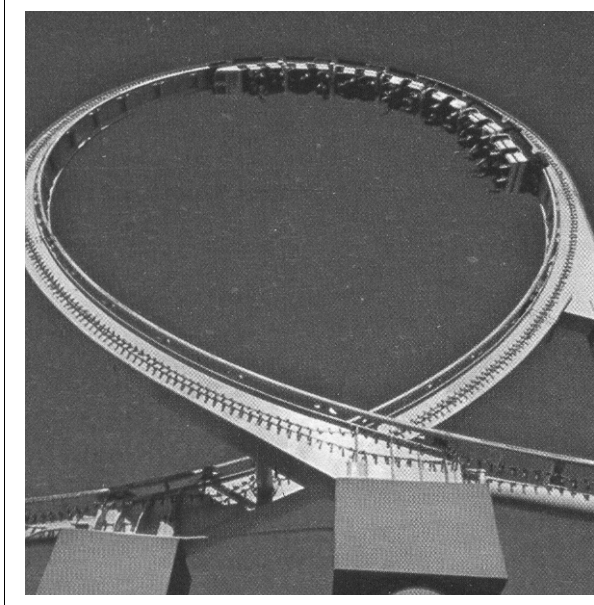
Cette analyse montre que l'énergie mécanique de la bille ne varie pas durant sa chute libre. Lors de la descente, l'énergie potentielle diminue alors que l'énergie cinétique augmente.

Il y a donc transformation progressive de l'énergie potentielle en énergie cinétique mais l'énergie mécanique totale reste constante : on dit que l'énergie mécanique se conserve à condition que la bille ne soit pas soumise à des forces de frottement.

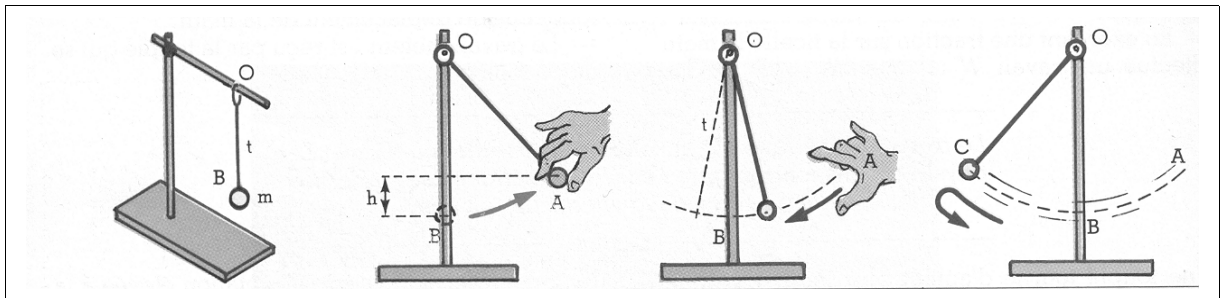
L'énergie mécanique reste constante.
 $E = E_p + E_c = \text{constante}$

6. Transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique en présence de frottement - diminution de l'énergie mécanique

Les applications du principe précédent sont innombrables : le saut en hauteur ou à la perche, la balançoire, la balle magique, les centrales hydroélectriques,



Toutefois, l'analyse de situations réelles montre toutes les limites de ce principe. En effet, après un certain temps, le pendule finira par s'arrêter, la balle magique ne rebondira plus jusqu'au niveau duquel elle a été lâchée, ...

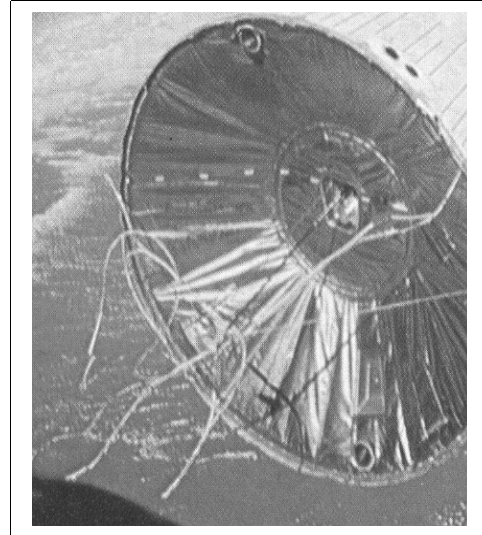
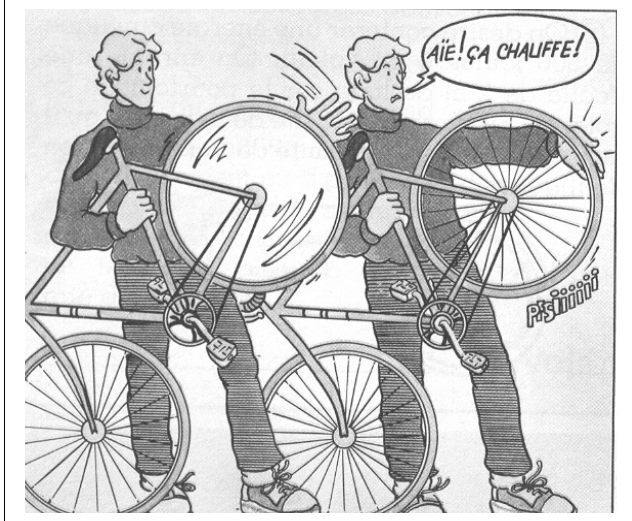


Pour n'importe quel mouvement se passant dans l'air, les forces de frottements ont pour conséquence de diminuer l'énergie mécanique totale.

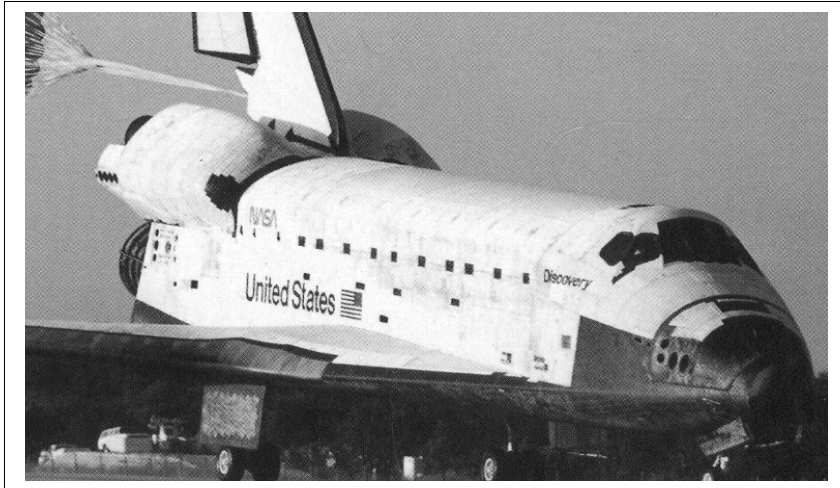
Ainsi l'énergie mécanique n'est pas constante.

7. Transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique

En réalité pour les mouvements se passant dans l'air, les frottements ne sont donc pas négligeables. L'air « frotte » sur le corps et provoque un échauffement.



L'énergie mécanique disparaît alors pour faire place à une autre sorte d'énergie : l'énergie thermique qui se manifeste localement par un échauffement de l'air autour de la balle ou du pendule.

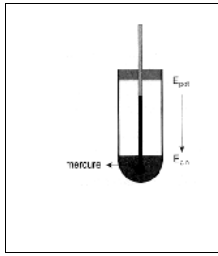


Lorsque la navette spatiale qui se déplace dans l'espace (le vide) à 27000 km/h. ,effectue sa rentrée dans l'atmosphère, elle est considérablement ralentie et à l'atterrissage sa vitesse n'est plus que de 700km/h.

Cette perte considérable d'énergie suite au frottement se retrouve sous forme d'énergie thermique et la température de la navette augmente considérablement (plusieurs milliers de degrés). Pour éviter que la matière ne fonde, la navette est équipée d'un bouclier thermique (matériau réfractaire qui résiste aux hautes températures)

Les étoiles filantes qui rentrent dans l'atmosphère frottent contre l'air ce qui donne naissance à de la chaleur qui les rend incandescentes

L'énergie est toujours conservée mais cette fois le système n'est plus isolé puisqu'il échange de la chaleur avec le milieu extérieur.



Expérience

Un tube rempli de mercure est retourné une trentaine de fois. Le thermomètre placé à l'intérieur du tube indique une augmentation de température du mercure.

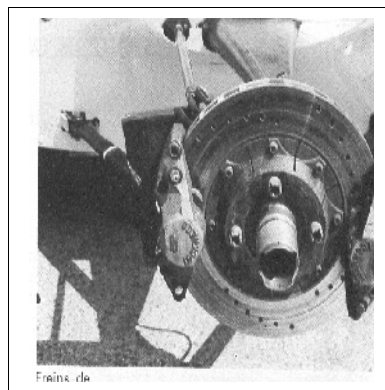
En effet, au cours de la chute, le mercure perd de l'énergie potentielle et gagne de l'énergie cinétique.

Au moment de l'impact, l'énergie cinétique du mercure devient égale à zéro.

En fait, l'énergie mécanique du mercure s'est transformée en une autre forme de l'énergie appelée énergie thermique.

Celle-ci est communiquée aux parois du tube et au mercure qui voient leur température augmenter.

Un autre exemple de transformation d'énergie mécanique en énergie thermique, c'est lorsqu'un automobiliste freine. L'énergie du véhicule disparaît mais on voit apparaître de l'énergie thermique au niveau des disques des freins qui s'échauffent.



ENERGIE et MATIERE

1 Introduction

L'observation quotidienne montre que la matière peut se présenter sous trois états : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux.

Le but de la première partie de ce cours est de déterminer l'agencement des particules de la matière dans ces 3 états et surtout de connaître les caractéristiques des forces que ces particules exercent les unes sur les autres. C'est en observant la matière que nous pourrions imaginer un modèle pour chaque état.

2 Description macroscopique des 3 états

(Macroscopique = qui peut être observé à l'œil nu)

Expériences simples

Observons :

- le volume et la forme d'un bloc de bois, de pierre
- la rentrée d'un plongeur dans l'eau
- la forme d'une certaine quantité d'eau dans des récipients différents
- la compression de l'air d'une pompe à vélo
- les masses volumiques de certaines substances à l'état solide, liquide et gazeux

	Etat solide (kg/m ³)	Etat liquide (kg/m ³)	Etat gazeux (kg/m ³)
Aluminium	2700	2380	
fer	7860	7030	
Argent	10500	9300	
Plomb	11300	10700	
Bismuth	9800	10000	
eau	920	1000	+ - 1
hydrogène			0,09

Conclusions

	SOLIDE	LIQUIDE	GAZ
Forme déterminée	OUI	NON	NON
Volume déterminé	OUI	OUI	NON
Cohésion / Résistance	FORTE	FAIBLE	NULLE
Masse volumique	élevée	Moins élevée	Très faible

3. Elaboration des modèles

Un modèle est un ensemble d'hypothèses concernant la nature d'un ensemble de phénomènes. Il doit permettre d'expliquer les propriétés de la matière.

- ***Nous admettons qu'une substance pure donnée (aluminium, eau, ...) est constituée des mêmes particules (molécules elles-mêmes constituées d'atomes) quel que soit son état : solide, liquide ou gaz.***
Le problème consiste à expliquer comment, avec ces mêmes particules, on peut obtenir des états ayant des propriétés aussi différentes.

Pour visualiser ces modèles, utilisons un grand nombre de billes et agençons les afin d'obtenir une structure qui aurait les propriétés des 3 états.

Modèle solide

les billes sont entassées les unes contre les autres et fixées les unes aux autres
 La structure a un volume déterminé, une forme déterminée et de la cohésion

Modèle liquide

les billes sont entassées dans un récipient mais sans être attachées les unes aux autres
 La structure a un volume déterminé, prenant la forme du récipient
 la cohésion est faible
 la masse volumique est quasiment identique à celle du solide

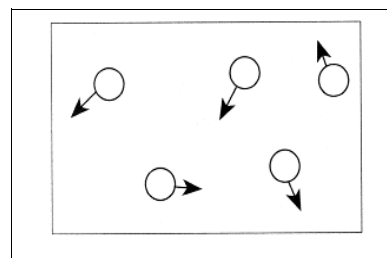
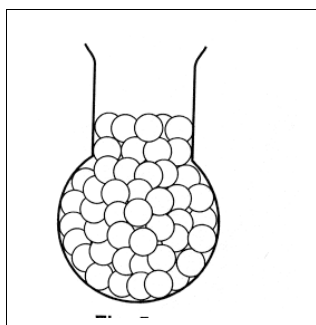
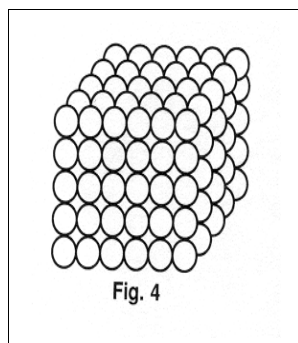
Modèle du gaz

Disposer les billes sur la table, assez éloignées les unes des autres avec un certain mouvement

La structure est sans forme et sans volume déterminés

La cohésion est nulle

La masse volumique est plus faible que pour le liquide



Autres observations

Une boule de naphtaline placée à l'air disparaît en quelques jours. On dit qu'elle sublime.

Les molécules se sont dispersées dans l'air.

De l'eau placée dans un récipient à l'air libre s'évapore.

Les vapeurs d'éther diffusent dans tout un local lorsqu'on ouvre la bouteille

Un grain de KmnO_3 plongé dans l'eau chaude circule naturellement vers la partie froide

- ***Ces phénomènes montrent que les molécules d'un corps (solide, liquide ou gazeux) sont en mouvement, quel que soit l'état du corps.***

- *Ces mouvements sont très rapides pour les gaz, assez lents pour les liquides et très très lents pour les solides. Ces particules possèdent de l'énergie cinétique.*

Autres observations

Saisir un objet sans le déformer

Plonger sa main dans l'eau, elle en ressort mouillée

Pour casser un objet, il faut parfois des forces importantes

- *Ces phénomènes montrent qu'il existe des forces entre les particules : ce sont les forces intermoléculaires ou forces de cohésion. Ce sont elles qui sont responsables de la cohésion des solides.*
- *Ces forces dépendent de la distance entre les particules. Elles n'agissent qu'à courte portée et elles n'agissent pas à très grandes distances.*

La région dans laquelle une particule exerce son influence est une zone ou sphère d'action.

Ceci permet d'expliquer que dans les solides, les particules sont très liées entre elles, que dans un liquide les particules roulent les unes sur les autres et que dans un gaz, elles sont libres.

Autres observations

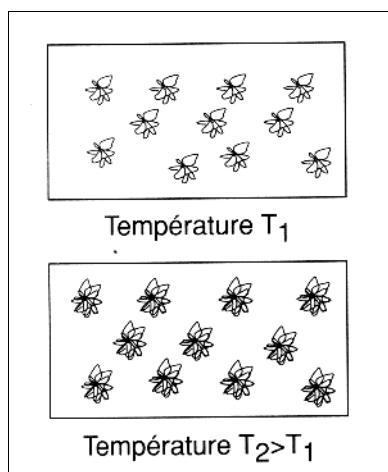
Un apport de chaleur

à un solide peut provoquer sa fusion

à un liquide peut provoquer sa vaporisation ou son ébullition

peut provoquer des dilatations

- *Admettons que les particules d'un solide possèdent des mouvements de vibration autour de leur position moyenne.*
- *Un apport de chaleur donc d'énergie a pour effet d'amplifier ces vibrations. Plus on fournit de la chaleur, plus l'amplitude des vibrations et plus l'énergie cinétique des particules est importante.*
- *Cette agitation, appelé agitation thermique, augmente donc avec la température.*
- *Cette agitation peut être telle que les distances entre particules augmentent (dilatation) ou que les forces intermoléculaires deviennent nulles et que les particules se libèrent (changements d'états)*



4. Conclusions

Dans un solide

- Les molécules sont très proches les unes des autres.
- Elles sont maintenues en place par des forces de cohésion importantes qui agissent à courte portée.
- Elles ont de faibles mouvements de vibration de part et d'autre de leur position d'équilibre.
- Plus la température est élevée, plus ces vibrations sont importantes.

Dans un liquide

- Les molécules sont un tout petit peu plus espacées.
- Elles ont une agitation thermique un peu plus importante que dans les solides.
- Elles peuvent rouler les unes sur les autres.
- Plus la température est élevée, plus cette agitation est importante.
- Les forces intermoléculaires sont encore assez importantes

Dans un gaz

- Les molécules sont très loin les unes des autres.
- Les forces de cohésion sont nulles.
- Elles ont des mouvements désordonnés faits de segments rectilignes (mouvement brownien) entre 2 collisions.
- Plus la température est élevée, plus ces mouvements sont rapides.

5. Température et chaleur

5.1 ENERGIE THERMIQUE

Lorsqu'on augmente la température d'une substance, on augmente l'agitation moléculaire et donc l'énergie cinétique des particules qui le constituent. La substance a reçu de l'énergie.

La forme d'énergie liée à l'agitation moléculaire s'appelle énergie thermique ou calorifique.

Si un corps ne change pas d'état, plus son énergie thermique est grande plus sa température est élevée.

5.2 AUGMENTATION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE

On peut augmenter l'énergie thermique

Par un apport de chaleur (en chauffant)

Par un travail (par frottement)

Par transformation d'énergie électrique (ampoule)

Par transformation d'énergie chimique

Par transformation d'énergie nucléaire (centrale nucléaire)

Par un apport d'énergie rayonnante (soleil)

5.3 TEMPÉRATURE ET L'ÉNERGIE THERMIQUE

La sensation de chaud et de froid se traduit par une notion précise, celle de température et elle se détermine par un thermomètre.

Les échelles utilisées sont l'échelle *Celsius* et *Kelvin*

Celsius (°C) : 0°C = glace fondante 100°C = vapeur d'eau bouillante

Kelvin (°K) : 0°K = -273 °C

On obtient les degrés Kelvin en ajoutant 273 aux degrés Celsius.

Observation

Peut-on faire fondre plus de glace avec 10 cc d'eau à 90°C ou avec 1 sceau d'eau à 60°C.

Un corps peut avoir une température élevée mais moins d'énergie calorifique qu'un autre corps qui a une température plus basse mais une quantité plus grande.

La température nous renseigne sur l'énergie cinétique moyenne des particules

L'énergie thermique nous renseigne sur l'énergie cinétique totale (notion de quantité) des particules.

6. Le gaz parfait

Dans ce chapitre, on se propose une étude plus approfondie de l'état gazeux

6.1 LE MODÈLE DU GAZ PARFAIT

Le modèle le plus simple pour étudier le comportement d'un gaz est celui du *gaz parfait*. Les hypothèses de ce modèle sont les suivantes :

- *Les molécules sont assimilées à des sphères (quasi ponctuelles) en agitation permanente.*
- *Chaque molécule est caractérisée par sa masse.*
- *Les interactions entre ces molécules sont quasi nulles sauf lorsqu'elles s'entrechoquent.*
- *Entre 2 chocs, les molécules se meuvent sur une trajectoire rectiligne.*
- *Les particules ne possèdent que de l'énergie cinétique ($E_{mol} = m \cdot V^2 / 2$)*

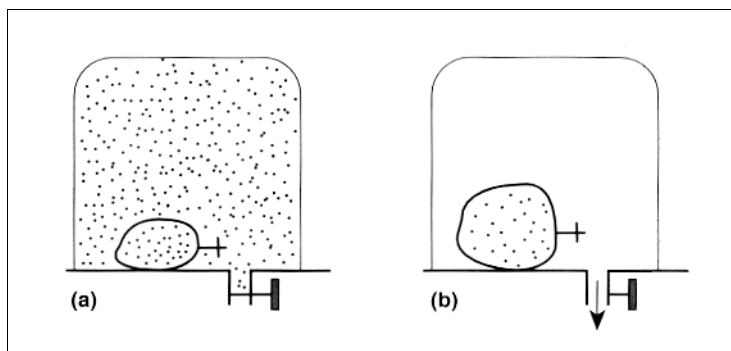
Le modèle du gaz parfait est évidemment théorique mais un grand nombre de gaz réels se comporte comme tel.

Pour qu'un gaz réel se comporte comme un gaz parfait, il faut qu'il soit à :
une température assez élevée (pour avoir une vitesse de particule élevée)
une pression assez basse (pour avoir des forces d'interactions entre molécules nulles)

6.2 NOTION DE PRESSION

La pression exercée par un gaz est un des effets les plus visibles de son agitation moléculaire.

6.2.1 Expérience



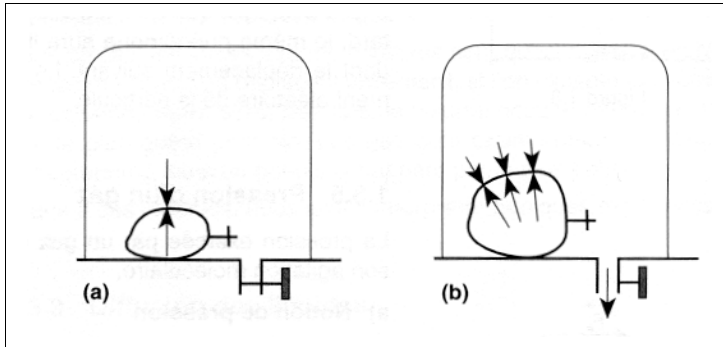
Ballon de baudruche dans une cloche à vide

Lorsque l'on retire l'air, le ballon se met à gonfler.

Lorsque le ballon est placé sous la cloche, la pression atmosphérique s'exerce aussi bien sur la paroi extérieure du ballon que sur la

paroi intérieure.

Dès qu'une partie de l'air est retirée, la pression exercée sur la surface extérieure est plus faible que celle exercée sur la paroi intérieure par l'air enfermé dans celui-ci : le ballon gonfle. Pour comprendre l'existence d'une pression exercée par un gaz, regardons ce qui se passe sur une petite surface du ballon.



Cette surface subit des collisions d'un grand nombre de molécules ce qui a un effet identique à celui produit par une force constante exercée sur cette surface.

On peut comparer cet effet à celui des coups répétés d'un boxeur dans un punching-ball : la ballon restant pratiquement immobile et écarté de sa position verticale comme s'il subissait une force constante.

La pression est due aux forces exercées par les molécules qui percutent la surface.

Comme on relie la notion de pression du gaz avec celle des chocs, on peut supposer que : la pression du gaz augmente avec le nombre et la violence des chocs.

Donc la pression P sera d'autant plus grande que :

- l'énergie cinétique des particules est grande → masse et vitesse (donc la température) sont élevées.
- le nombre de particules par unité de volume est élevé.

6.2.2 Rappel sur les unités de pression

Patm normale = 76 cm de Hg = 760 mm Hg
 [→ $\rho \cdot g \cdot h = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,76 = 101396 \text{ Pa}$]

Patm normale = 101396 Pa $\cong$ 100.000 Pa

1 bar = 100000 Pa = 10^5 Pa

Patm = 101396 Pa = 1014 hPa = 1,014 bar = 1014 mbar

6.2.3 Etude expérimentale d'un gaz

6.2.3.1 Expériences

- Enfoncer le piston d'une pompe de bicyclette tout en bouchant l'autre extrémité avec le doigt.

Le volume d'air diminue et sa pression augmente comme le prouve la force qu'il faut exercer pour maintenir le piston. Le doigt ressent une augmentation de température, le gaz s'est échauffé. Une diminution de volume entraîne une augmentation de température, la quantité de gaz restant constante.

- Une marmite à pression fermée hermétiquement contient de l'eau et de l'air à la pression atmosphérique. Si on élève la température de l'ensemble, l'eau produit de la vapeur d'eau. Le nombre de particules augmente ainsi que la pression dans l'enceinte.

- Pourquoi ne faut-il pas surgonfler les pneus avant un long trajet en été ?

Car à cause des frottements du pneu sur la route et de la chaleur, la température du pneu augmente ainsi que sa pression.

- Pourquoi faut-il regonfler les pneus en hiver ?

Car une diminution de température entraîne une diminution de pression.

- Il est dangereux de jeter une bombe d'aérosol dans le feu car elle contient toujours le gaz propulseur qui pourrait s'échauffer et augmenter de pression. Cette pression peut devenir tellement grande qu'une explosion se produit.

Conclusions

Quatre grandeurs physiques permettent de caractériser l'état d'un gaz.

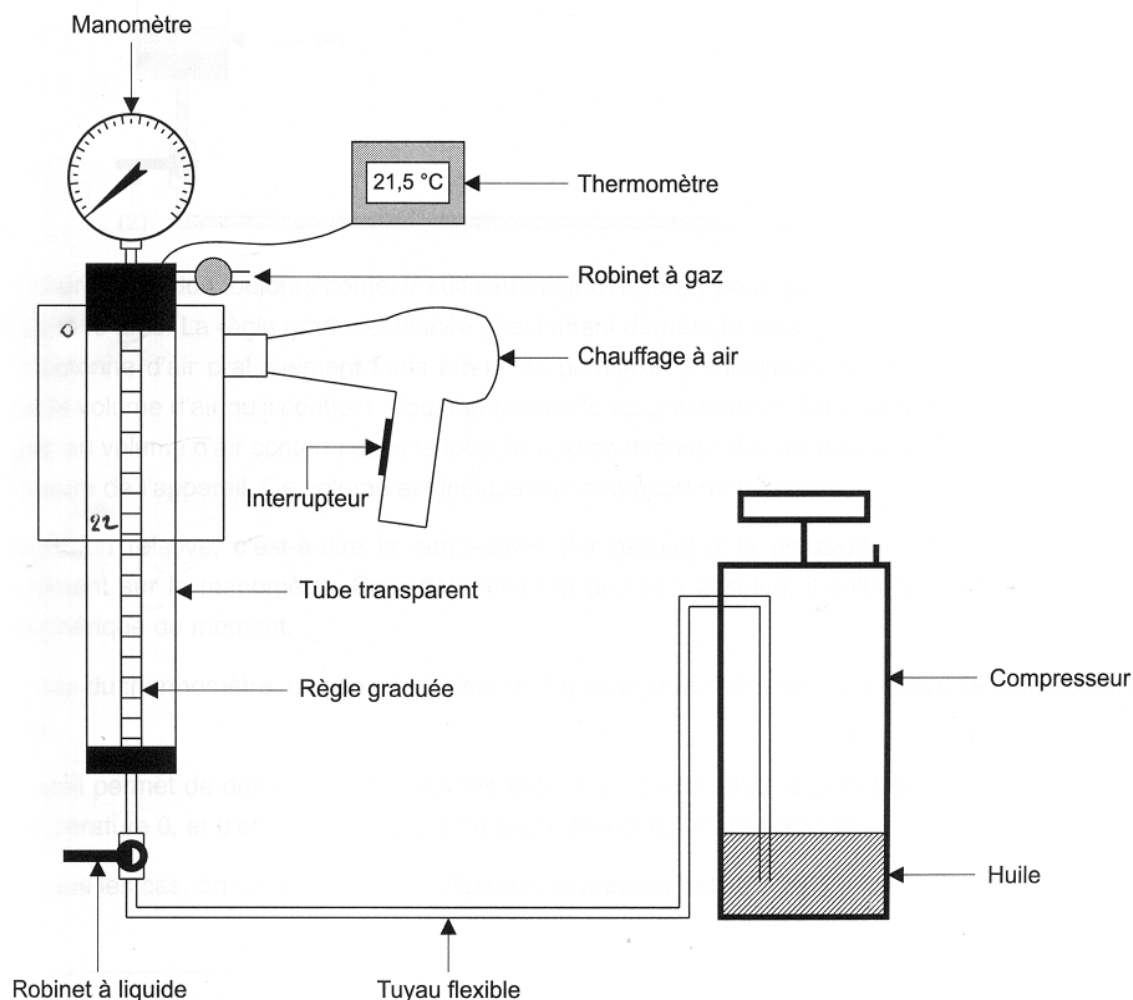
- *la pression P*
- *le volume V*
- *la température t*
- *le nombre de particules N*

On les appelle « paramètres d'état ». Ces paramètres sont liés entre eux par une équation qu'on appelle équation d'état du gaz.

Voici l'appareil qui servira pour l'étude des gaz

L'appareil est constitué:

1. d'un tube transparent dont le diamètre extérieur est de 50 mm; sa hauteur est d'environ 50 cm. Il est fixé sur un panneau maintenu verticalement à l'aide d'un support;
2. d'un manomètre de classe 1,0 (voir § 7, page 16: incertitudes de mesure) monté sur la partie supérieure du tube;
3. d'un robinet à gaz placé sous le manomètre; il permet d'amener la pression de l'air contenu dans le tube à la pression atmosphérique;
4. d'un thermomètre électronique à affichage numérique permettant de déterminer la température du gaz contenu dans le tube;
5. d'un manchon chauffant transparent sur lequel est fixé un système de chauffage à air se raccordant au secteur 230 V ~, avec deux puissances de chauffe (700 W et 1 400 W);
6. d'un compresseur contenant de l'huile qui peut être envoyée, par un tuyau flexible, à l'intérieur du tube transparent;
7. d'un robinet à liquide permettant de modifier la hauteur d'huile dans le tube;
8. d'une règle graduée placée derrière le tube.



♦ **Etude du volume V en fonction de la pression P (loi de Boyle et Mariotte)**

Lorsqu'on augmente la pression (lue au manomètre) du gaz, son volume se met à diminuer.

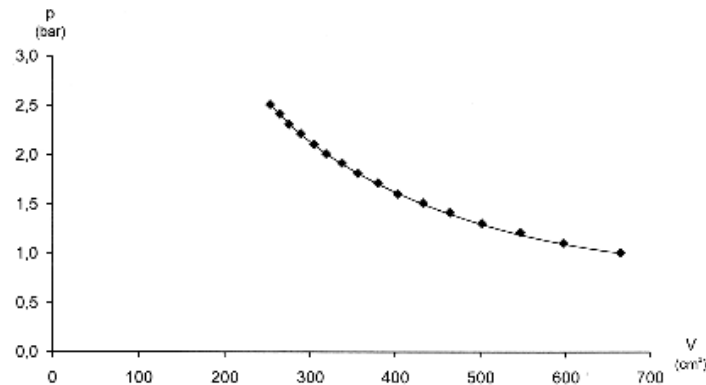
Inversement, si sa pression diminue son volume augmente.

La pression P et le volume V du gaz, évoluent en sens inverse.

Des mesures précises montrent que :

si P double, le volume est deux fois plus petit

si P triple, le volume est trois fois plus petit,...

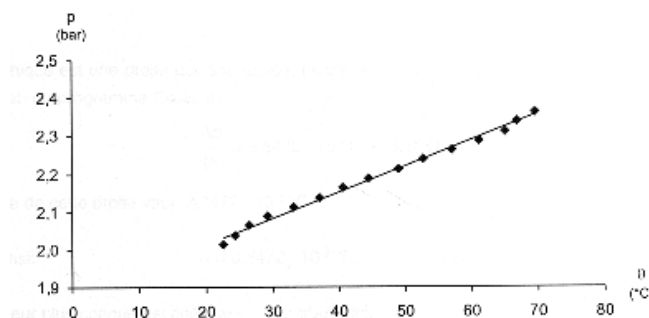


Pour une masse donnée de gaz, le produit de sa pression P par son volume V est constant

$$P \cdot V = \text{constante}$$

♦ **Etude de la pression en fonction de la température (à volume constant)**

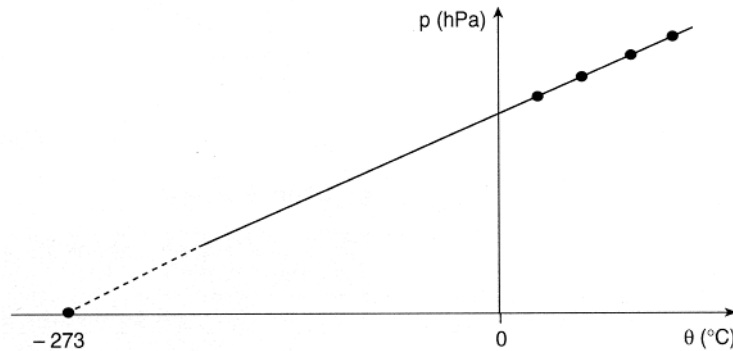
L'étude expérimentale montre que si la température t du gaz augmente, la pression P augmente aussi.



6.3 LE ZÉRO ABSOLU (ECHELLE KELVIN)

Des mesures précises montrent que si on refroidit le gaz, sa pression diminue. De ce fait, pour une température donnée, la pression du gaz deviendrait nulle (en supposant que le gaz ne se liquéfie pas).

Cette température est de l'ordre de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$



Au fur et à mesure que la température diminue, la vitesse des molécules diminue et par conséquent la pression du gaz.

Pour une température suffisamment basse, la pression serait nulle, les molécules seraient immobiles et leur vitesse nulle.

Il n'est donc plus possible de retirer de l'énergie à un système qui n'en a plus et donc il est impossible de diminuer encore la température.

Pour cette raison, la température ultime de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ est appelé « zéro absolu »

6.3.1 Echelle Kelvin

Le « zéro absolu » est à l'origine d'une nouvelle échelle des températures appelée « échelle Kelvin » ou « échelle des températures absolues ».

On introduit l'échelle des températures absolues T , en utilisant la loi suivante

$$T (^{\circ}\text{K}) = t (^{\circ}\text{C}) + 273$$

T = température absolue liée à l'agitation thermique des particules

K = degré Kelvin

zéro absolu	$t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\rightarrow$	$T = 0^{\circ}\text{K}$
	$t = 0^{\circ}\text{C}$	$\rightarrow$	$T = 273\text{ }^{\circ}\text{K}$

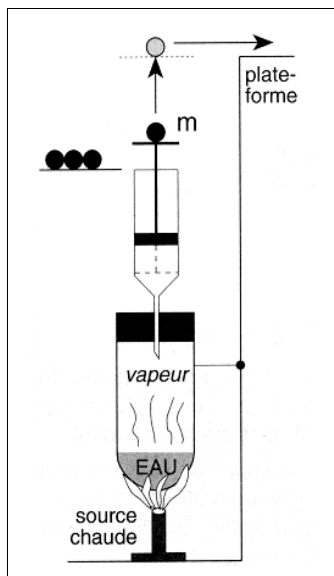
7. Les machines thermiques

7.1 DÉFINITION

Machine : transformateur d'énergie (dynamo , pile , moteur...)

Machine thermique : transforme l'énergie thermique (la chaleur) en travail (machine à vapeur, turbine, moteur à explosion, frigo , pompe à chaleur...)

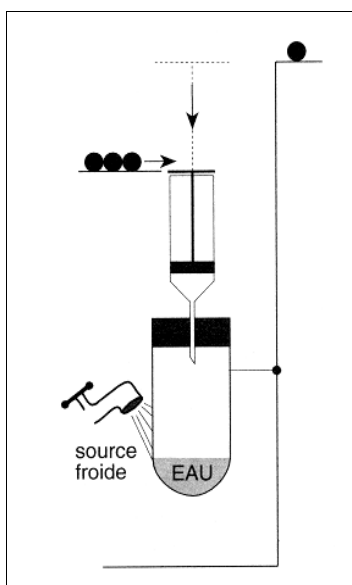
7.2 DESCRIPTION SIMPLIFIÉE D'UNE MACHINE THERMIQUE



Imaginons un système simple dans le but d'amener à une certaine hauteur, différents objets.

Premier temps

La flamme du bec Bunsen (source chaude) fait bouillir de l'eau, la vapeur soulève le piston qui soulève la masse à la hauteur souhaitée.



Deuxième temps

Pour que la machine puisse monter d'autres masses, il faut que le piston redescende.

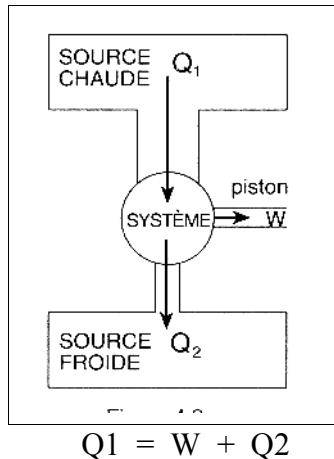
Pour cela, il faut condenser la vapeur donc refroidir le système en le plaçant sous un robinet d'eau froide (source froide)

Un mouvement de va et vient du piston constitue un cycle

Pour qu'une machine puisse fonctionner d'une manière continue, elle doit agir de manière cyclique, c'est à dire revenir périodiquement à son état initial.

Pour qu'une machine puisse fonctionner d'une manière cyclique, il faut disposer de 2 sources : une source chaude et une source froide

7.3 BILAN DES ÉCHANGES D'ÉNERGIE



La source chaude communique à la substance qui agit dans la machine thermique, une certaine quantité de chaleur $Q1$ au début de chaque cycle.

Le moteur effectue un travail W et cède donc de l'énergie mécanique au monde extérieur.

Pour que le cycle se poursuive, il faut que la substance cède une certaine quantité de chaleur $Q2$ à une source froide.

Au cours d'un cycle, l'énergie doit se conserver et de ce fait

Le travail effectué par la machine est donc la différence entre la chaleur reçue de la source chaude et celle cédée à la source froide

$$W = Q1 - Q2$$

Comme il faut toujours une source froide, seulement une partie de la chaleur fournie par la source chaude est transformée en travail

7.4 RENDEMENT D'UNE MACHINE THERMIQUE

C'est le rapport entre le travail W fourni par la machine (ce que j'ai quand tout est fini) sur l'énergie fournie $Q1$ (ce que j'aurais du avoir si je n'avais rien perdu)

$$Rdt = W / Q1 = (Q1 - Q2) / Q1 = 1 - Q2 / Q1 < 1$$

Le rendement d'une machine thermique est toujours inférieur à 1 c'est à dire à inférieur à 100 %

Remarque

Les études réalisées par Kelvin montrèrent que le rendement maximum que peut avoir une machine thermique peut aussi s'écrire sous la forme suivante :

$$Rdt = 1 - T2 / T1$$

Où $T1$ est la température (en ° Kelvin) de la source chaude et $T2$ (en ° Kelvin), la température de la source froide

Cette formule montre que le rendement est d'autant plus grand que $T1$ est élevé et que $T2$ est petit

Exemples de rendement

<i>Machine</i>	<i>T1 (K)</i>	<i>T2 (K)</i>	<i>Rdt max théorique en %</i>	<i>Rdt pratique en %</i>
Locomotive à vapeur	450	300	33	10
Turbine d'une centrale nucléaire	540	300	45	33
Moteur à combustion	780	300	62	35

Le rendement pratique est toujours inférieur au rendement théorique à cause des nombreux frottements occasionnés par les pièces en mouvement., des pertes d'énergie à partir de la source chaude, ..

7.5 DESCRIPTION DU MOTEUR À COMBUSTION INTERNE

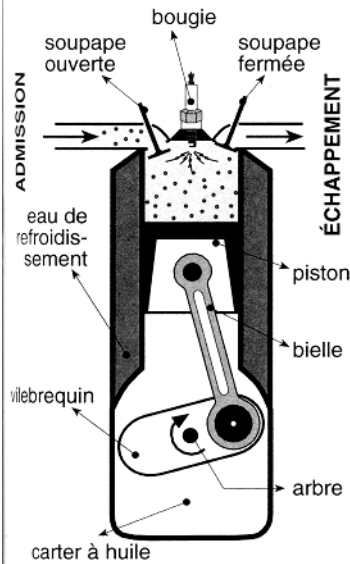


Figure 4.5

a) Moteur à essence

Le premier moteur du belge Etienne LENOIR était trop peu puissant pour faire mouvoir un engin automobile. Par contre, le moteur de Nikolaus OTTO, à quatre temps, eut un succès immédiat. Il est basé sur la combustion dans un cylindre d'un mélange d'air et d'essence; la combustion est provoquée par l'étincelle qui jaillit aux bornes de la bougie (fig. 4.5). Dans la grande majorité des cas, un moteur de voiture possède 4 cylindres.

Un litre d'essence en brûlant avec l'air dégage une énergie considérable de 40 MJ. Comme toute machine thermique, le moteur doit être refroidi : le vilebrequin baigne dans l'huile du carter et de l'eau circule dans des conduits perforés dans le bloc moteur. L'eau est elle-même refroidie par l'air à travers le radiateur.

Chaque cylindre possède au moins deux soupapes (*valve* en anglais) : une soupape d'admission et une soupape d'échappement. Les soupapes règlent les échanges gazeux avec l'extérieur. Elles sont maintenues fermées par des ressorts. Elles s'ouvrent au moment opportun du cycle moteur à l'aide des cames (pièces arrondies non circulaires attachées) d'un arbre lui-même entraîné par le moteur (fig. 4.6 a et b).

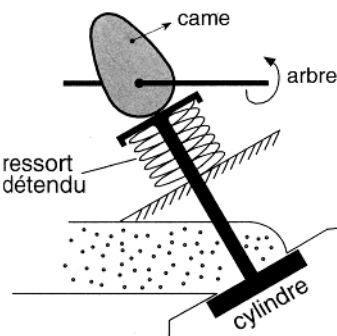


Figure 4.6 a

SOUPAPE
D'ADMISSION
FERMÉE

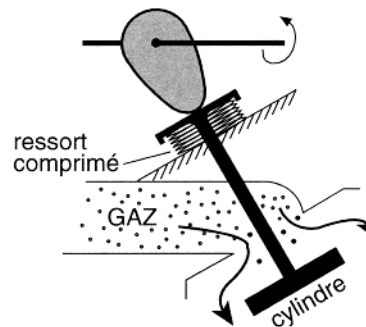


Figure 4.6 b

SOUPAPE
D'ADMISSION
OUVERTE

Le fonctionnement du moteur 4 temps est schématisé dans les figures suivantes (fig. 4.7 a, b et c). La description est faite pour un seul cylindre, le processus étant identique, quoique non simultané pour les autres cylindres.

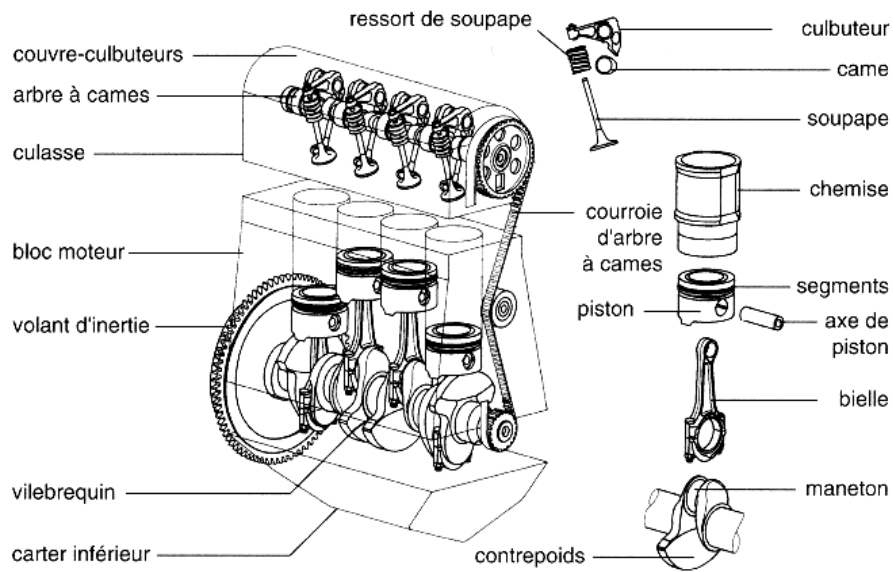


Figure 4.7 a

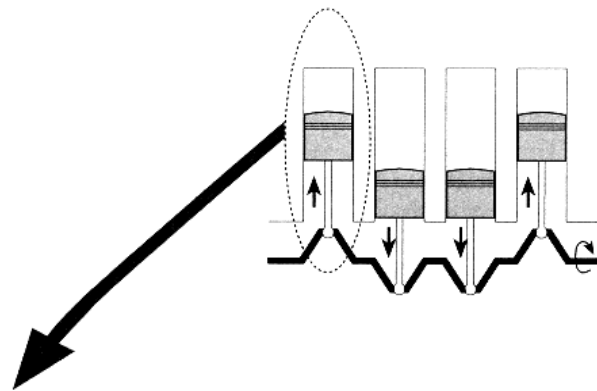


Figure 4.7 b

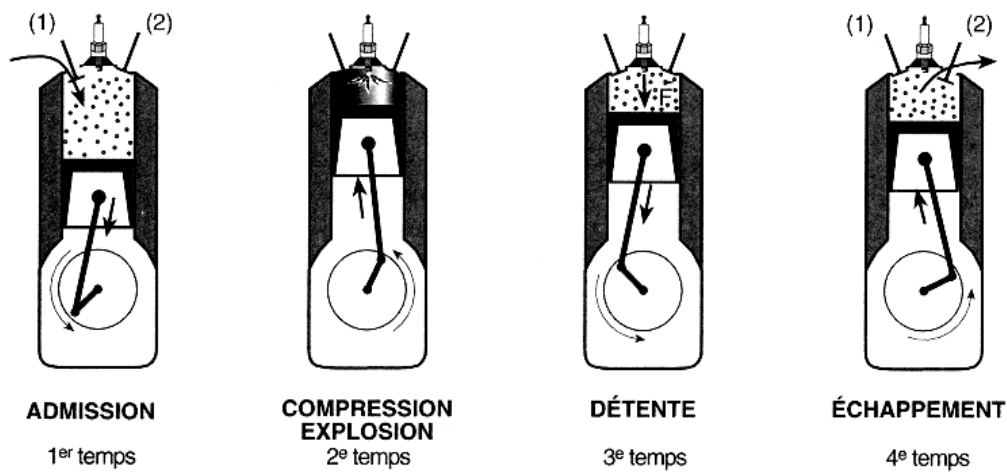


Figure 4.7 c

Premier temps : l'admission

La soupape d'admission (1) est ouverte, la soupape d'échappement (2) est fermée. Le piston, entraîné par la rotation de l'arbre moteur, descend et aspire un mélange d'air et d'essence.

Deuxième temps : la compression

Les deux soupapes sont fermées. Le piston remonte et comprime le mélange gazeux.

Quand le piston arrive au sommet de sa course, la bougie produit l'étincelle qui enflamme le carburant: c'est l'**explosion**. La **source chaude** est le mélange des gaz à haute température.

Troisième temps : la détente

Les soupapes sont toujours fermées. Le piston est repoussé violemment vers le bas; c'est la détente ou **temps moteur**. C'est en effet le seul moment du cycle où une force agit sur le piston. Au cours des temps suivants, le piston continuera son mouvement suite à l'inertie de l'arbre moteur.

Quatrième temps : l'échappement

La soupape d'échappement (2) est ouverte, la soupape d'admission (1) est fermée. Le piston remonte et les produits de la combustion sont expulsés à l'extérieur.

Notons que dans le cylindre, il y a des variations de température assez importantes : la température est maximale lors de l'explosion du mélange air-essence et minimale lors de l'admission du mélange air-essence.

b) Moteur Diesel

Vers 1885, Rudolf DIESEL (1858-1913) commence ses recherches en vue d'obtenir un moteur plus performant et meilleur marché utilisant des produits pétroliers moins raffinés (huiles lourdes du pétrole). Son idée étant que « **de très hautes pressions doivent être utilisées pour tirer l'avantage maximal du processus** ». Or, il n'est pas possible de comprimer fortement un mélange d'air et de mazout sans obtenir automatiquement une explosion; explosion qui aurait lieu à un moment inopportun, lors de la remontée du piston. Il faut donc dissocier l'admission d'air d'une part et l'admission de carburant d'autre part; c'est-à-dire provoquer :

- l'admission uniquement d'air au cours du premier temps
- une compression très élevée de l'air au cours du deuxième temps. Compression suivie d'une injection directe du combustible au moment où le piston atteint son point haut (fig. 4.8 a et b). La très grande pression, et l'échauffement qui en résulte, suffit à amorcer la combustion du mélange. Il n'y a donc plus besoin de bougies d'allumage.

Ce moteur a une très grande longévité (plus de 500 000 km pour les camions actuels); son fonctionnement est aussi très économique. Il fut développé pour la motorisation des camions, la propulsion des navires et fut adapté aux voitures de tourisme quelques années avant la seconde guerre mondiale par la firme Mercedes.

Le moteur est cependant plus lourd (coût supérieur de fabrication et donc d'achat) car il doit résister à des pressions très grandes; il est aussi plus bruyant.

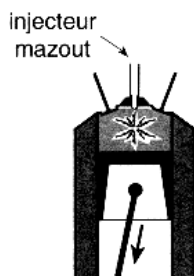
**DIESEL**

Figure 4.8 a

**ESSENCE**

Figure 4.8 b

7.6 MACHINE FRIGORIFIQUE

7.6.1 Expérience préliminaire

Lorsque l'on verse de l'éther sur sa main, il s'évapore c'est à dire qu'il passe de l'état liquide à l'état vapeur en laissant à la main une « sensation de froid ». Celle-ci provenant du fait que ***pour s'évaporer, le liquide à besoin d'énergie qu'il prend à la main qui se refroidit.***

Ce passage de l'état liquide à l'état gazeux peut être accéléré en diminuant la pression au-dessus du liquide.

C'est sur ce principe que fonctionne une machine frigorifique

7.6.2 Principe

Un liquide fort volatil circule dans un circuit fermé. Une partie du circuit est dans le « freezer » et l'autre à l'extérieur, à l'arrière du frigo (fig. 5.7).

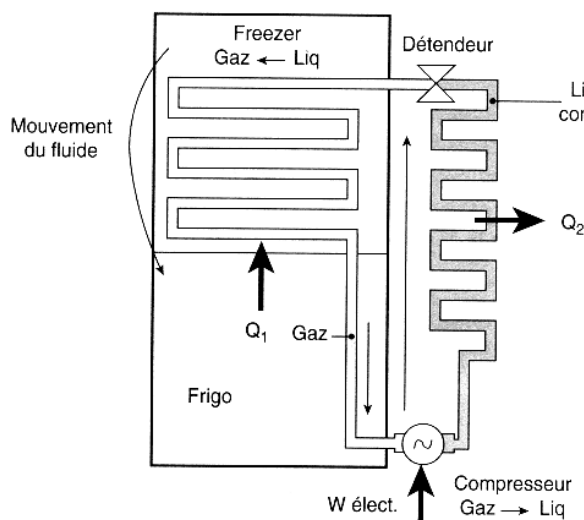


Figure 5.7

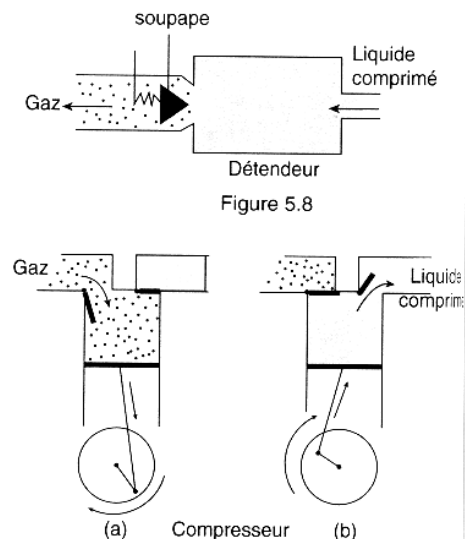


Figure 5.9

Le liquide comprimé, en traversant un **détendeur** (fig. 5.8), s'évapore brusquement dans le circuit du freezer. Cette évaporation est endothermique et le milieu ambiant (aliments dans le frigo), en cédant de la chaleur (Q_1), se refroidit. L'intérieur du frigo est appelé **source froide**.

Le **compresseur** aspire ensuite le gaz (fig. 5.9 a), le comprime et le refoule dans le circuit extérieur (fig. 5.9 b) : le gaz se transforme en un liquide comprimé ; cette réaction est exothermique et la chaleur (Q_2) est évacuée vers l'extérieur du frigo appelé **source chaude**. C'est pourquoi, l'arrière du frigo doit être bien aéré.

En repassant par le détendeur, le liquide comprimé se transforme en gaz et le cycle recommence.

d) Bilan énergétique

Un travail W est effectué par le moteur électrique du compresseur pour comprimer le fluide. Comme le fonctionnement du frigo est cyclique, en appliquant le principe de conservation de l'énergie, les échanges d'énergie doivent s'équilibrer et l'énergie reçue par le système (le fluide qui circule) sous forme d'énergie électrique et de chaleur est égale à l'énergie cédée sous forme de chaleur (fig. 5.10) :

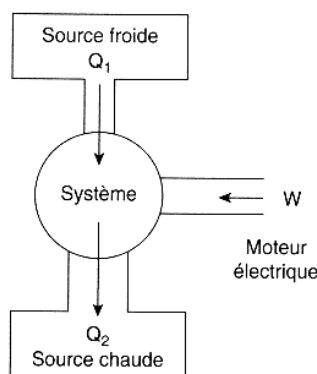


Figure 5.10

$$W + Q_1 = Q_2$$

7.6.3 La pompe à chaleur

Dans le circuit extérieur, le liquide est vaporisé; cette réaction étant endothermique, le liquide «pompe» la chaleur (Q_1) du milieu ambiant.

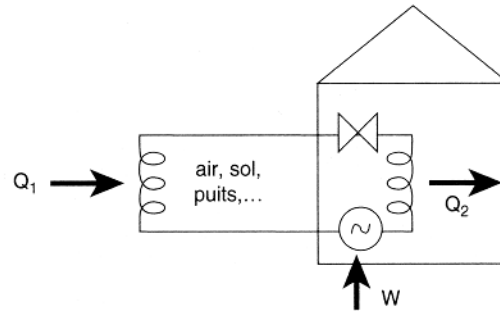


Figure 5.11

Dans le circuit intérieur, le gaz redevient liquide avec libération de chaleur (Q_2).

Comme pour le frigo, nous pouvons écrire :

$$W + Q_1 = Q_2$$

Cette relation montre que Q_2 est supérieur à W .

Le rendement de cette installation est particulièrement intéressant puisque l'énergie thermique extérieure (Q_1) est illimitée et que l'on paie moins d'énergie (W) que l'on en reçoit (Q_2).

$$\text{Rendement} = \frac{Q_2}{W} = \frac{W + Q_1}{W} > 1$$

La technique d'une mise en œuvre correcte est cependant plus délicate qu'un mode de chauffage classique.