

**Année 2019-2020**  
**Filière G3EI**  
**G3EI1**

# **LES ÉNERGIES**

**Prof. Dr. H. EL KALKHA**

# Généralités sur les énergies

## 1. Qu'est-ce que c'est l'ENERGIE?

Comment définir l'énergie ? C'est la une question tout à fait légitime à se poser avant d'entreprendre toutes discussions sur le sujet.

D'un point de vue commun, cela s'avère un concept très difficile à décrire puisqu'il demeure d'abord et avant tout quelque chose d'abstrait. L'énergie ne peut pas être vue, ni même mesurée directement. Son existence n'est révélée que par sa transformation et son transfert. Sa manifestation dans les phénomènes naturels est donc bien réelle.

Pour cette raison, il serait naïf de prétendre que l'énergie n'est qu'un outil de travail.

Selon Roger Balian, la meilleure façon de définir l'énergie, c'est d'utiliser une approche historique. Il se trouve que, historiquement, c'est justement la recherche de la constance dans le mouvement qui a mené à l'élaboration de ce concept.

Une méthode souvent plus judicieuse est la recherche d'une constante dans le problème, car étudier le problème en focalisant sur les aspects qui ne changent pas permet d'avoir une vue beaucoup plus fondamentale de ce qu'est la nature : « **la nature est telle qu'une certaine quantité est toujours conservée** ». La recherche de la constance dans les phénomènes naturels est une idée en soi révolutionnaire qui en a beaucoup facilité l'étude.

Il a toutefois fallu attendre le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle pour que ces idées soient bien établies en science. Les progrès ont notamment été freinés par un manque de vocabulaire. **Aristote** n'a jamais parlé de travail au sens moderne, pas plus que Galilée ne parlait d'énergie. Le développement d'un vocabulaire adéquat fut une étape tout aussi cruciale à l'émergence du concept devenu, sans doute, le plus important en physique.

Le concept d'énergie est fondamental pour

Le concept physique d'énergie s'est donc logiquement affirmé au XIX<sup>ème</sup> siècle.

- Point de vue physique:
  - 
  - 
  -
  
- Sens Politique ou économique:
  - 
  - 
  -
  
- Sens écologique: environnement

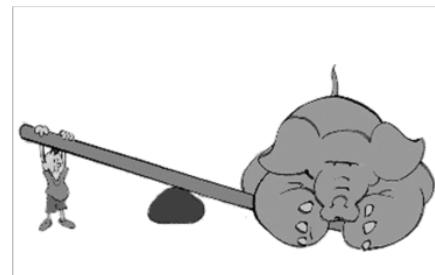
## 2. Point de départ

Après avoir exploité sa propre force et celle des *animaux*, l'homme a appris à exploiter les énergies contenues dans la nature (*d'abord les vents et les chutes d'eau*) et capables de lui fournir une quantité croissante de travail mécanique par l'emploi de machines : machines-outils, chaudières et moteurs. L'énergie est alors fournie par un carburant (liquide ou gazeux, énergie fossile ou non).

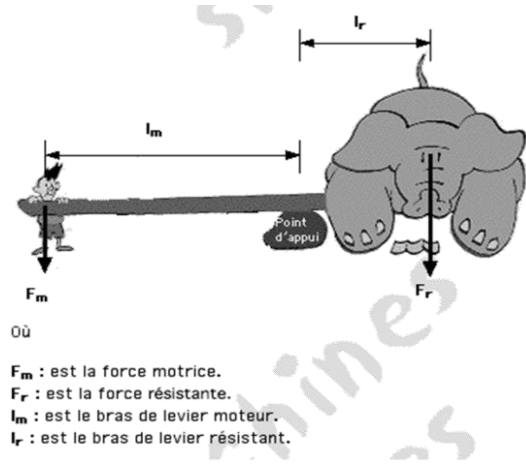
C'est avec l'étude des *machines simples* qu'a commencé la grande épopée de l'énergie.

L'analyse d'un banal levier, par exemple, permet une *constatation* aussi évidente qu'étonnante :

***Pour augmenter le poids en question à une distance donnée au-dessus du sol, il est nécessaire d'abaisser l'extrémité du long bras du levier, au cours de laquelle la force est appliquée, à une distance plus grande. »***



Ainsi, dans ce premier exemple, quelque chose est gagné au détriment d'une autre chose qui est perdue. Le « quelque chose » qui est conservé, est le produit de la force par la distance parcourue. L'écriture moderne en terme du travail serait



### 3. Mise en situation et premières expériences

#### a. Définition:

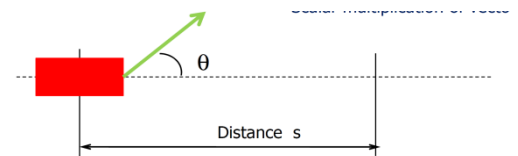
- 
- C'est une grandeur physique qui caractérise
- Si un organisme possède l'énergie,

#### b. Travail

Le travail  $W_{AB}(\vec{F})$  d'une force constante  $\vec{F}$  lors d'un déplacement rectiligne de son point d'application du point A vers le point B, est égal au produit scalaire des vecteurs force  $\vec{F}$  et déplacement  $\vec{AB}$  :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \theta$$

Où  $\theta$  désigne l'angle entre la force et le déplacement



En soulevant un poids, par exemple en remontant de l'eau depuis la base jusqu'au sommet d'un barrage, on lui fournit un travail, qui lui permet d'acquérir une énergie potentielle plus élevée.

Le travail fourni à une pompe qui comprime un gaz accroît l'énergie élastique de celui-ci et contribue à l'échauffer.

### c. Puissance

Pour retourner un carré de jardin afin d'y faire vos plantations, vous avez 3 possibilités :

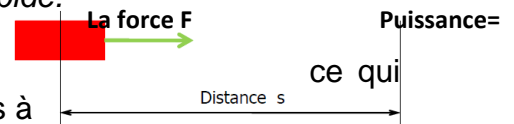
Utiliser une bêche et vos muscles, utiliser un motoculteur ou encore utiliser un tracteur et une charrue.

On comprend aisément que le travail sera fait plus rapidement avec le motoculteur qu'avec vos seuls muscles et encore plus vite si vous utilisez un tracteur...

#### Définition :

deux systèmes de puissance différente pourront fournir le même travail (la même énergie), mais le système le plus puissant sera le plus rapide.

- Si un corps a une force (F) qui lui est appliqué provoque de se déplacer d'une distance (s) mètres à (t) secondes puis:



#### Unité :

- **Le Watt (W)**

C'est l'unité officielle du SI. 1W correspond à une énergie de 1J développée en 1 seconde. C'est la puissance qu'il faut développer pour « tirer » une charge de 1N, à la vitesse de 1 mètre par seconde. On utilise également ses multiples et sous-multiples (mW, W, kW, MW, GW, TW, etc...).

- **Le cheval-vapeur (cv, hp en anglais)**

Cette unité est surtout de rigueur dans le monde de l'automobile. La puissance des moteurs est en effet toujours exprimée en cv.

1cv=736W

120cv=88.3kW (voiture courante)

## d. Energie

Exemple. Un moteur à explosion fonctionne grâce à une réaction chimique : la combustion qui a lieu à l'intérieur d'un cylindre. La réaction du combustible (l'essence) avec le comburant (l'oxygène de l'air) produit du gaz avec émission de chaleur et de lumière, ce qui se traduit par une augmentation de la température et de la pression dans le cylindre ; la différence de pression entre ce gaz et l'atmosphère de l'autre côté du piston déplace ce dernier, qui va, à travers une transmission mécanique, faire tourner les roues ainsi qu'un alternateur qui va produire de l'électricité.

### Résultat:

Le concept d'énergie va permettre de calculer l'intensité des *différents phénomènes* (par exemple la vitesse de la voiture et la quantité d'électricité produite par l'alternateur) en fonction de l'intensité du phénomène initial (la quantité de gaz et la chaleur produite par la réaction chimique de combustion).

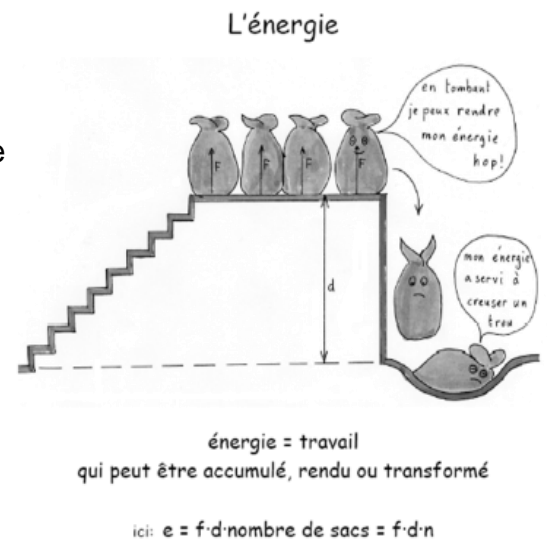
Elle mesure donc la capacité d'un système à modifier l'état d'un autre système, à produire sur lui un travail mécanique, à y entraîner l'apparition d'un mouvement, d'un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur

Cette définition repose sur les résultats d'une série d'expériences, menées au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle et mettant en évidence les constats suivants ou lois :

- On constate que la chute d'un poids donné d'une même hauteur produit toujours le même échauffement (calorimétrie) ;
- On constate aussi que si la vitesse finale n'est pas nulle, la hausse de température est moindre, comme si seulement une partie de la chute était convertie en vitesse et le reste en chaleur ;
- De même un échauffement pourra produire une dilatation, une augmentation de pression, qui elle-même permettra de « produire un travail » par exemple en déplaçant une masse ;
- 

D'une manière générale, un système "possède" de **l'énergie** s'il est capable de produire une **transformation** de son énergie (**l'énergie chimique** de nos cellules est transformée dans nos muscles en **énergie mécanique** qui produit un mouvement) ou d'**échanger** de **l'énergie** (**chaleur transmise** par un radiateur).

- L'énergie a la forme d'une énergie potentielle (résidant dans la hauteur d'une masse soumise à la pesanteur).
- Elle peut se transformer en énergie cinétique (résidant dans la vitesse de chute d'une masse).
- Elle peut enfin se transformer en chaleur ou énergie thermique (résidant dans l'échauffement de la masse, due au frottement à l'arrivée).



### Un principe fondamental :

La caractéristique la plus remarquable de l'énergie est qu'elle se conserve toujours. Lorsqu'elle est transférée d'un système à un autre, ou lorsqu'elle change de nature, il n'y a jamais ni création ni destruction d'énergie.

Lorsqu'un système n'a aucun échange avec le milieu extérieur, on admet que son énergie reste constante et on dit qu'il est isolé.

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.

...la loi est appelée **conservation de l'énergie**. Elle affirme qu'il y a une certaine quantité que nous appelons **énergie**, qui ne change pas dans **les multiples modifications** que peut subir la nature. C'est **une idée très abstraite**, car c'est un **principe mathématique** ; ce principe dit qu'il existe une **quantité numérique** qui ne change pas, lorsque **quelque chose se passe**. Ce n'est pas la description d'un mécanisme ou de quoi que ce soit de concret ; c'est simplement ce fait étrange que nous puissions calculer un **certain nombre** et que, lorsque nous avons terminé d'observer

L'énergie est un concept créé pour quantifier les interactions entre des phénomènes très différents ; c'est un peu une « monnaie d'échange » commune entre les phénomènes physiques.

« Derrière ce qui change, il y a quelque chose qui ne change pas. »

Dans le monde, il y a du changement. Du chaud devient tiède. Des corps tombent. Le feu brûle et les buches se consomment. Ces transformations ne se font pas d'une façon arbitraire. Elles sont reliées entre elles par une sorte d'échange monétaire. La monnaie, ici, c'est l'énergie. Elle permet au physicien de tenir la comptabilité des phénomènes qu'il étudie.

#### **e. Energie: quelques unités**

- Le Joule (unité S.I.), travail produit par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.

C'est l'unité reconnue par le Système International (SI). C'est une très petite quantité d'énergie, puisque cela ne permet -par exemple- que de soulever une pomme d'un mètre, ou encore de réchauffer 1L d'air de 1°C.

- La calorie, c'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme d'eau pour augmenter sa température de 1°C sous la pression atmosphérique normale.

- Autres unités :

- 
- 
- 
- 
- 

A noter qu'il existe d'autres unités (par exemple le erg, le Pascal mètre cube, le litre atmosphère, ...), mais leur utilisation demeure très marginale.

- unité- physique

L'unité utilisée par les physiciens pour mesurer l'énergie est le joule (J). Les économistes utilisent plutôt la tonne d'équivalent pétrole (tep), les médecins nutritionnistes la calorie (cal). En électricité, on utilise le wattheure (Wh) ou le kilowattheure (kWh)



j = joule  
 cal = calorie  
 kwh = kilowattheure  
 Btu = British thermal unit  
 tep = tonne équivalent pétrole  
 tec = tonne équivalent charbon

| de: | à:              | j                     | cal                | kwh                   | Btu                   | tep                    | tec                    |
|-----|-----------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|     | multiplier par: |                       |                    |                       |                       |                        |                        |
| j   |                 | 1                     | 0,2388             | $2,778 \cdot 10^{-7}$ | $9,478 \cdot 10^{-4}$ | $2,388 \cdot 10^{-11}$ | $3,413 \cdot 10^{-11}$ |
| cal |                 | 4,1868                | 1                  | $1,163 \cdot 10^{-6}$ | $3,968 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-10}$     | $1,429 \cdot 10^{-10}$ |
| kwh |                 | $3,6 \cdot 10^6$      | $7,88 \cdot 10^5$  | 1                     | 3412                  | $8,598 \cdot 10^{-5}$  | $1,229 \cdot 10^{-4}$  |
| Btu |                 | 1055                  | 252                | $2,931 \cdot 10^{-4}$ | 1                     | $2,52 \cdot 10^{-8}$   | $3,601 \cdot 10^{-8}$  |
| tep |                 | $4,187 \cdot 10^{10}$ | $9,998 \cdot 10^9$ | 11630                 | $3,968 \cdot 10^7$    | 1                      | 1,429                  |
| tec |                 | $2,93 \cdot 10^{10}$  | $6,997 \cdot 10^9$ | 8140                  | $2,777 \cdot 10^7$    | 0,6997                 | 1                      |

- Liste des ordres de grandeurs pour l'énergie:

|           |             |     |                                   |     |                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------|-------------|-----|-----------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ancien    | Énergie     |     | <b>1 erg</b>                      |     | = $10^{-7}$ joule                                                                                                                                                                                                                                              |
| SI dérivé | Énergie ou* |     | <b>1 joule</b>                    | J   | = 1 N.m = 1 kg.m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup><br>= 0, 2392 calorie<br>= $0,277 \cdot 10^{-6}$ kWh = $0, 238 \cdot 10^{-12}$ tep                                                                                                                               |
| Ancien    | Énergie     | >>> | <b>1 calorie (internationale)</b> | cal | = 4,1868 joules. = $1, 162 \cdot 10^{-6}$ kWh<br>= $0, 996 \cdot 10^{-12}$ tep<br>= $3,968 \cdot 10^{-3}$ BTU<br>D'autres calories<br>1 calorie (15°C) = 4, 1855 J<br>1 calorie (thermochimique) = 4, 184 J                                                    |
| Ang-Sax   | Énergie     |     | <b>1 British Thermal Unit</b>     | BTU | = 1 055 joules                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Général   | Énergie     |     | <b>1 wattheure</b>                | Wh  | = 3 600 joules                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Général   | Énergie     |     | <b>1 frigorie</b>                 | fg  | = 1 kcal en négatif                                                                                                                                                                                                                                            |
| Général   | Énergie     |     | <b>1 kilowattheure</b>            | kWh | = 3,6 millions de joules = 3600 kJ. = 3, 6 MJ<br>= $8, 6042 \cdot 10^5$ calories = $85, 7 \cdot 10^{-6}$ tep                                                                                                                                                   |
| Ancien    | Énergie     |     | <b>1 thermie</b>                  | th  | = 4,187 MJ = 1,16 kWh = $10^6$ calories                                                                                                                                                                                                                        |
| Général   | Énergie     |     | <b>1 mégawattheure</b>            | MWh | = 1000 kWh<br>= 3, 6 milliards de joules (MJ) = 3, 6 GJ<br>= $85, 7 \cdot 10^{-3}$ tep                                                                                                                                                                         |
| Ang-Sax   | Énergie     |     | <b>1 barrel of oil equivalent</b> | boe | = 1 566 kWh = 5, 6 GJ<br>= 0,135 tep = 0, 9855 "baril de pétrole"                                                                                                                                                                                              |
| Ancien    | Énergie     |     | <b>1 tonne équivalent charbon</b> | tec | = 8 700 kWh = 30, 9 GJ<br>= 0, 75 tep                                                                                                                                                                                                                          |
| Général   | Énergie     |     | <b>1 tonne équivalent pétrole</b> | tep | = 11 666 kWh = 41,76 GJ (Gigajoules)<br>= 7, 3 "barils de pétrole" (1160, 7 l)<br>1 tonne d'essence = 1, 05 tep<br>1 tonne de fioul = 1, 00 tep<br>1000 m <sup>3</sup> de gaz naturel = 0, 85 tep<br>1 tonne de charbon = 0, 619<br>1 tonne de bois = 0, 3 tep |
| Nucléaire | Énergie     | >>> | <b>1 électronvolt</b>             | eV  | = $1,602 \cdot 10^{-19}$ joules                                                                                                                                                                                                                                |
| Biologie  | Énergie m   | >>> | <b>1 met</b>                      |     | = 58 W / m <sup>2</sup> (énergie métabolique)                                                                                                                                                                                                                  |

| Facteur (J) | Multiple          | Valeur                                    | Exemple                                                                                                                                       |
|-------------|-------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $10^{-33}$  |                   | $1,602 \times 10^{-31}$ J                 | 1 peV (picoélectron-volt)                                                                                                                     |
|             |                   | $3,0 \times 10^{-31}$ J                   | l'énergie cinétique moyenne d'une molécule à la température la plus basse atteinte ( $10^{-12}$ K) : le niveau d'énergie atteint le plus bas. |
|             |                   | 1,8 peV                                   |                                                                                                                                               |
| ...         |                   |                                           |                                                                                                                                               |
| $10^{-24}$  | 1 yoctojoule (yJ) | $1,5 \times 10^{-23}$ J<br>0,093 meV      | l'énergie cinétique moyenne d'une molécule à l'endroit le plus froid connu, la Nébuleuse du Boomerang (température 1 K).                      |
|             |                   | $1,602 \times 10^{-22}$ J                 | 1 meV                                                                                                                                         |
| $10^{-21}$  | 1 zeptojoule (zJ) | $4,37 \times 10^{-21}$ J<br>0,0273 eV     | l'énergie cinétique moyenne d'une molécule à température ambiante.                                                                            |
|             |                   | $1,602 \times 10^{-19}$ J                 | 1 électron-volt (eV)                                                                                                                          |
|             |                   | $1,602 \times 10^{-19}$ J                 | l'énergie cinétique moyenne d'une molécule à 11 300 °C.                                                                                       |
|             |                   | $2,7-5,2 \times 10^{-19}$ J               | l'intervalle d'énergie des photons de la lumière visible.                                                                                     |
| $10^{-18}$  | 1 attojoule (aJ)  | $5,0 \times 10^{-18}$ J<br>50 eV          | limite supérieure de la masse-énergie d'un neutrino électronique.                                                                             |
| $10^{-15}$  | 1 femtojoule (fJ) | $5,0 \times 10^{-14}$ J<br>500 000 eV     | limite supérieure de la masse-énergie d'un neutrino muonique.                                                                                 |
|             |                   | $5,1 \times 10^{-14}$ J<br>511 000 eV     | la masse-énergie d'un électron.                                                                                                               |
|             |                   | $1,602 \times 10^{-13}$ J<br>1 000 000 eV | 1 MeV                                                                                                                                         |
|             |                   |                                           |                                                                                                                                               |
| $10^{-12}$  | 1 picojoule (pJ)  | $3,2 \times 10^{-11}$ J<br>200 MeV        | l'énergie totale émise dans la fission d'un atome de $^{235}\text{U}$ (en moyenne).                                                           |
|             |                   | $3,5 \times 10^{-11}$ J<br>210 MeV        | l'énergie totale émise dans la fission d'un atome de $^{239}\text{Pu}$ (en moyenne).                                                          |
|             |                   | $1,5 \times 10^{-10}$ J<br>940 MeV        | la masse-énergie d'un proton, au repos.                                                                                                       |
|             |                   | $1,602 \times 10^{-10}$ J                 | 1 GeV, (1 000 MeV)                                                                                                                            |

|           |                              |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $10^{-9}$ | 1 nanojoule (nJ)             | $8 \times 10^{-9}$ J<br>50 GeV       | l'énergie initiale opérationnelle par faisceau de l'accélérateur de particules du CERN, le Large Electron Positron (1983).                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|           |                              | $1,3 \times 10^{-8}$ J<br>80,411 GeV | la masse-énergie d'un boson W, au repos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|           |                              | $4,3 \times 10^{-8}$ J<br>270 GeV    | l'énergie initiale opérationnelle par faisceau de l'accélérateur de particules du CERN Super Proton Synchrotron atteinte en 1981.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|           |                              | $10^{-7}$ J                          | 1 erg, 1 TeV (1 000 GeV)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|           |                              | $1,602 \times 10^{-7}$ J<br>1 TeV    | environ l'énergie cinétique d'un moustique volant [CERN LHC website].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| $10^{-6}$ | microjoule ( $\mu\text{J}$ ) | $1,602 \times 10^{-4}$ J             | 1 000 TeV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|           |                              | $2 \times 10^{-4}$ J<br>1 250 TeV    | le niveau d'énergie de collision prévu du Large Hadron Collider construit au CERN (2005) pour les ions lourds (noyaux de plomb).                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $10^0$    | joule (J)                    | 1 J                                  | l'énergie requise pour soulever une petite pomme (102 g) d'un mètre, à la surface de la Terre.<br>1 joule est égal à : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 N·m (newton-mètre)</li> <li>• 1 W·s (watt seconde)</li> <li>• 0,000 000 278 kWh (kilowatt-heure)</li> <li>• 0,000 239 kcal (grande calorie)</li> <li>• 0,000 948 BTU (British thermal unit)</li> <li>• 10 000 000 ergs</li> </ul> |
|           |                              | 4,184 J                              | 1 cal <sub>m</sub> (calorie thermochimique, petite calorie)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|           |                              | 4,1868 J                             | 1 cal <sub>IT</sub> (calorie de la Table Internationale, petite calorie)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|           |                              | 8 J<br>$5 \times 10^{19}$ eV         | la limite GZK pour l'énergie d'un rayon cosmique.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|           |                              | 12 J                                 | énergie délivrée par le flash d'un appareil photo amateur (condensateur de 220 $\mu\text{F}$ , 330 v)                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           |                              | 48 J<br>$3 \times 10^{20}$ eV        | le rayon cosmique le plus énergétique jamais détecté (voir Zetta-particule).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|           |                              | 90 J                                 | énergie cinétique d'une balle de tennis (masse 58 g) lors d'un service à 200 km/h.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|           |                              | 142 J                                | l'énergie cinétique d'une balle standard de .22 Long Rifle (balle en plomb de 2,6 grammes propulsée à 330 mètres par seconde).                                                                                                                                                                                                                                                                      |

|                  |                  |                                     |                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 <sup>4</sup>  | kilojoule (kJ)   | 1 000 J                             | l'énergie nécessaire à un enfant (30 kg) pour monter un étage (un peu plus de trois mètres).                                                                                                                    |
|                  |                  | 1 055 J                             | 1 BTU (British thermal unit)                                                                                                                                                                                    |
|                  |                  | 1 360 J                             | l'énergie reçue du Soleil, au sommet de l'atmosphère terrestre, par un mètre carré en une seconde. (constante solaire)                                                                                          |
|                  |                  | 3 600 J                             | 1 Wh (0,001 kWh)                                                                                                                                                                                                |
|                  |                  | 4 184 J                             | l'énergie dégagée par l'explosion d'un gramme de TNT.                                                                                                                                                           |
|                  |                  | 4 186 J                             | 1 kcal (énergie requise pour réchauffer un kilogramme d'eau d'un 1 degré Celsius<br>1 calorie de nourriture).                                                                                                   |
|                  |                  | 8 640 J<br>2,4 Wh                   | l'énergie stockée dans une pile bâton LR06 AA rechargeable (1,2 V 2000 mAh).                                                                                                                                    |
| 10 <sup>4</sup>  | 10 kJ            | 1,7×10 <sup>4</sup> J               | énergie dégagée par le métabolisme d'un gramme de sucre ou de protéine.                                                                                                                                         |
|                  |                  | 3,8×10 <sup>4</sup> J               | énergie dégagée par le métabolisme d'un gramme de matière grasse.                                                                                                                                               |
|                  |                  | 44 130 J                            | une puissance d'un cheval-vapeur appliquée pendant une minute.                                                                                                                                                  |
|                  |                  | 5,0×10 <sup>4</sup> J               | énergie dégagée par la combustion d'un gramme d'essence.                                                                                                                                                        |
|                  |                  | 60 000 J                            | une puissance d'un kilowatt appliquée pendant une minute.                                                                                                                                                       |
| 10 <sup>5</sup>  | 100 kJ           | 600 000 J                           | l'énergie cinétique d'une voiture de 1 000 kg à la vitesse de 125 km/h.                                                                                                                                         |
|                  |                  | 735 500 J                           | une puissance de 100 chevaux-vapeur appliquée pendant dix secondes.                                                                                                                                             |
| 10 <sup>6</sup>  | megajoule (MJ)   | 10 <sup>6</sup> J<br>239 kcal       | la valeur nutritionnelle d'une barre chocolatée est d'environ cette valeur, de même que les plats principaux tels que 150 g de riz ou 200 g de pain.                                                            |
|                  |                  | 1 728 000 J<br>480 Wh               | l'énergie stockée dans une batterie de voiture courante. (12 V 40 Ah)                                                                                                                                           |
|                  |                  | 2 647 796 J<br>736 Wh               | une puissance d'un cheval-vapeur appliquée pendant une heure.                                                                                                                                                   |
|                  |                  | 3 600 000 J                         | 1 kWh (kilowatt-heure)                                                                                                                                                                                          |
|                  |                  | 4,184×10 <sup>6</sup> J             | énergie dégagée par l'explosion d'un kilogramme de TNT.                                                                                                                                                         |
|                  |                  | 4,8×10 <sup>6</sup>                 | énergie moyenne consommée par un cycliste entraîné pédalant durant 1 heure (env. 1/100 d'un kilogramme d'essence).                                                                                              |
|                  |                  | 6,3×10 <sup>6</sup><br>1500 kcal    | une valeur souvent recommandée pour l'énergie nutritionnelle d'une femme ne faisant pas d'activité sportive par jour (2 000 kcal = 8,4×10 <sup>6</sup> pour les hommes).                                        |
| 10 <sup>7</sup>  | 10 MJ            | 2,65×10 <sup>7</sup> J              | une puissance de dix chevaux-vapeur appliquée pendant une heure.                                                                                                                                                |
|                  |                  | 4,18×10 <sup>7</sup> J<br>11,6 kWh  | énergie requise pour :<br>• chauffer un cumulus de 200 litres (élever la température de 200 litres d'eau de 15 à 65 degrés Celsius).<br>• 44 jours d'éclairage. (une lampe de 11 W allumée pendant 1054 heures) |
|                  |                  | 4,8×10 <sup>7</sup> J               | énergie dégagée par la combustion d'un kilogramme d'essence.                                                                                                                                                    |
| 10 <sup>8</sup>  | 100 MJ           | 1,055×10 <sup>8</sup> J             | un therm (EC) (100 000 BTU)                                                                                                                                                                                     |
| 10 <sup>9</sup>  | 1 gigaJoule (GJ) | 1,5×10 <sup>9</sup> J               | l'énergie d'un éclair moyen.                                                                                                                                                                                    |
|                  |                  | 1,6×10 <sup>9</sup> J               | l'énergie d'un réservoir moyen (45 litres) d'essence.                                                                                                                                                           |
|                  |                  | 3,2×10 <sup>9</sup> J<br>900 kWh    | l'énergie utilisée annuellement par un sèche-linge.                                                                                                                                                             |
|                  |                  | 3,6×10 <sup>9</sup> J               | 1 000 kWh                                                                                                                                                                                                       |
|                  |                  | 4,184×10 <sup>9</sup> J             | l'énergie dégagée par l'explosion d'une tonne de TNT.                                                                                                                                                           |
| 10 <sup>10</sup> | 10 GJ            | 1,8×10 <sup>10</sup> J<br>5 000 kWh | Objectif de consommation annuelle d'énergie pour un Bâtiment de basse consommation, en France, de 100 m <sup>2</sup> (50 kWh/m <sup>2</sup> /an).                                                               |
|                  |                  | 4,187×10 <sup>10</sup> J            | 1 TEP (tonne d'équivalent pétrole)                                                                                                                                                                              |
|                  |                  | 7,2×10 <sup>10</sup> J              | l'énergie consommée annuellement par une automobile moyenne aux États-Unis en 2000.                                                                                                                             |
| 10 <sup>11</sup> | 100 GJ           | 1,16×10 <sup>11</sup> J             | L'énergie d'un kilomètre-cube d'air se déplaçant à 50 km/h.                                                                                                                                                     |
| 10 <sup>12</sup> | térajoule (TJ)   | 2,9×10 <sup>12</sup> J              | L'énergie d'un kilomètre-cube d'air se déplaçant à 250 km/h (ouragan).                                                                                                                                          |
|                  |                  | 3,6×10 <sup>12</sup> J              | 1 000 000 kWh, ou 0,001 TWh                                                                                                                                                                                     |
|                  |                  | 4,184×10 <sup>12</sup> J            | l'énergie dégagée par l'explosion d'une kilotonne de TNT.                                                                                                                                                       |
| 10 <sup>13</sup> | 10 TJ            | 6,3×10 <sup>13</sup> J              | l'énergie dégagée par le bombardement d'Hiroshima.                                                                                                                                                              |
|                  |                  | 9,0×10 <sup>13</sup> J              | la masse-énergie totale théorique d'un gramme de matière.                                                                                                                                                       |
| 10 <sup>14</sup> | 100 TJ           | 3,24×10 <sup>14</sup> J<br>90 GWh   | la production annuelle d'électricité au Togo.                                                                                                                                                                   |
| 10 <sup>15</sup> | pétajoule (PJ)   | 3,6×10 <sup>15</sup> J              | 1 TWh                                                                                                                                                                                                           |
|                  |                  | 4,184×10 <sup>15</sup> J            | l'énergie dégagée par l'explosion d'une mégatonne de TNT.                                                                                                                                                       |

|                  |                     |                                        |                                                                                                                                                                                 |
|------------------|---------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 <sup>16</sup> | 10 PJ               | 10 <sup>16</sup> J                     | l'énergie de formation d'un cratère d'impact correspondant à un météorite de dix mille tonnes.                                                                                  |
|                  |                     | 3,03×10 <sup>16</sup> J<br>8.403 TWh   | la consommation électrique au Zimbabwe en 1998.                                                                                                                                 |
|                  |                     | 4,14×10 <sup>16</sup> J<br>11.5 TWh    | les pertes d'énergie électrique en France en 2009. (liées au transport de l'électricité) RTE  |
|                  |                     | 9,0×10 <sup>16</sup> J                 | la masse-énergie totale théorique d'un kilogramme de matière.                                                                                                                   |
| 10 <sup>17</sup> | 100 PJ              | 1,74×10 <sup>17</sup> J                | l'énergie totale du Soleil qui atteint la Terre en une seconde.                                                                                                                 |
|                  |                     | 1,5×10 <sup>17</sup> J                 | l'énergie estimée dégagée par l'éruption du Krakatoa.                                                                                                                           |
|                  |                     | 2,5×10 <sup>17</sup> J                 | l'énergie dégagée par la plus puissante bombe nucléaire jamais testée, la bombe Tsar Bomba.                                                                                     |
|                  |                     | 4×10 <sup>17</sup> J<br>111 TWh        | la consommation électrique de la Norvège en 1998.                                                                                                                               |
| 10 <sup>18</sup> | 1 exajoule (EJ)     | 3,6×10 <sup>18</sup> J                 | 1 PWh = 1 000 TWh                                                                                                                                                               |
| 10 <sup>19</sup> |                     | 1,04×10 <sup>19</sup> J                | l'énergie totale du Soleil qui atteint la Terre en une minute.                                                                                                                  |
|                  |                     | 1,339×10 <sup>19</sup> J<br>3719,5 TWh | la production totale d'énergie électrique aux États-Unis en 2001.                                                                                                               |
|                  |                     | 1,6×10 <sup>19</sup> J                 | l'équivalent énergétique de l'alimentation annuelle d'une population mondiale 7 milliards d'êtres humains sur la base d'un apport nutritionnel journalier de 1500kcal.          |
|                  |                     | 9,0×10 <sup>19</sup> J                 | la masse-énergie totale théorique d'une tonne de matière.                                                                                                                       |
| 10 <sup>20</sup> |                     | 1,05×10 <sup>20</sup> J                | l'énergie consommée par les États-Unis en une année (2001).                                                                                                                     |
|                  |                     | 1,33×10 <sup>20</sup> J                | l'énergie dégagée par le tremblement de terre de l'Océan Indien en 2004.                                                                                                        |
|                  |                     | 4,26×10 <sup>20</sup> J                | l'énergie consommée dans le monde en une année (2001).                                                                                                                          |
|                  |                     | 6,2×10 <sup>20</sup> J                 | l'énergie totale du Soleil qui atteint la Terre en une heure.                                                                                                                   |
| 10 <sup>21</sup> | 1 zettajoule (ZJ)   | 3,6×10 <sup>21</sup> J                 | 1 EWh = 1 000 000 TWh                                                                                                                                                           |
|                  |                     | 6,0×10 <sup>21</sup> J                 | l'énergie (potentielle) des réserves de gaz naturel estimées dans le monde (2003).                                                                                              |
|                  |                     | 7,4×10 <sup>21</sup> J                 | l'énergie (potentielle) des réserves de pétrole estimées dans le monde (2003).                                                                                                  |
| 10 <sup>22</sup> |                     | 1,5×10 <sup>22</sup> J                 | l'énergie totale du Soleil qui atteint la Terre en 24 heures.                                                                                                                   |
|                  |                     | 2×10 <sup>22</sup> J                   | l'énergie (potentielle) des réserves de charbon estimées dans le monde (2003).                                                                                                  |
|                  |                     | 3,9×10 <sup>22</sup> J                 | l'énergie (potentielle) des réserves de l'énergie fossile estimées dans le monde (2003).                                                                                        |
| 10 <sup>23</sup> |                     | 5,0×10 <sup>23</sup> J                 | l'énergie estimée dégagée par l'impact du Chicxulub.                                                                                                                            |
| 10 <sup>24</sup> | 1 yottajoule (YJ)   | 3,6×10 <sup>24</sup> J                 | 1 ZWh = 1 000 000 000 TWh                                                                                                                                                       |
|                  |                     | 3,827×10 <sup>26</sup> J               | l'énergie dégagée par le Soleil en une seconde.                                                                                                                                 |
| 10 <sup>27</sup> |                     | 3,6×10 <sup>27</sup> J                 | 1 YWh = 10 <sup>12</sup> TWh                                                                                                                                                    |
|                  |                     | 2,30×10 <sup>28</sup> J                | l'énergie dégagée par le Soleil en une minute.                                                                                                                                  |
| 10 <sup>30</sup> |                     | 3,6×10 <sup>30</sup> J                 | 1000 YWh = 10 <sup>15</sup> TWh                                                                                                                                                 |
|                  |                     | 3,0×10 <sup>31</sup> J                 | l'énergie (potentielle) des réserves exploitables estimées dans le monde en uranium 238 (2003).                                                                                 |
|                  |                     | 2,4×10 <sup>32</sup> J                 | l'énergie de liaison gravitationnelle de la Terre.                                                                                                                              |
| 10 <sup>33</sup> |                     | 2,7×10 <sup>33</sup> J                 | l'énergie cinétique de la Terre sur son orbite solaire.                                                                                                                         |
|                  |                     | 3,6×10 <sup>33</sup> J                 | 10 <sup>18</sup> TW·h                                                                                                                                                           |
|                  |                     | 1,2×10 <sup>34</sup> J                 | l'énergie dégagée par le Soleil en une année.                                                                                                                                   |
| 10 <sup>36</sup> |                     | 3,6×10 <sup>36</sup> J                 | 10 <sup>21</sup> TWh                                                                                                                                                            |
|                  |                     | 1,2×10 <sup>37</sup> J                 | l'énergie dégagée par le Soleil en un millénaire.                                                                                                                               |
| 10 <sup>39</sup> |                     | 1,2×10 <sup>40</sup> J                 | l'énergie dégagée par le Soleil en un million d'années.                                                                                                                         |
|                  |                     | 5,37×10 <sup>41</sup> J                | la masse-énergie totale théorique de la masse de la Terre.                                                                                                                      |
|                  |                     | 6,9×10 <sup>41</sup> J                 | l'énergie de liaison gravitationnelle du Soleil.                                                                                                                                |
| 10 <sup>42</sup> |                     | 10 <sup>44</sup> J                     | l'énergie dégagée par une supernova.                                                                                                                                            |
| 10 <sup>45</sup> |                     | 10 <sup>47</sup> J                     | l'énergie dégagée par un sursaut gamma.                                                                                                                                         |
|                  |                     | 1,8×10 <sup>47</sup> J                 | la masse-énergie totale théorique de la masse du Soleil.                                                                                                                        |
| ...              |                     |                                        |                                                                                                                                                                                 |
| 10 <sup>58</sup> |                     | 4×10 <sup>58</sup> J                   | la masse-énergie totale de la matière « visible » de la Galaxie.                                                                                                                |
| 10 <sup>59</sup> |                     | 1×10 <sup>59</sup> J                   | toute la masse-énergie de la Galaxie (incluant la matière noire).                                                                                                               |
| ...              |                     |                                        |                                                                                                                                                                                 |
| 10 <sup>69</sup> | 10 <sup>45</sup> YJ | 2×10 <sup>69</sup> J                   | la masse-énergie totale théorique de l'Univers (le niveau d'énergie le plus grand connu).                                                                                       |

# LES DIFFÉRENTS TYPES D'ÉNERGIE

## 1. Introduction

- 
- 
- 
- Dans une centrale thermoélectrique, l'énergie stockée dans le carburant (énergie chimique dans le charbon et le pétrole, ou énergie nucléaire dans l'uranium) est transformée (par combustion ou par réaction nucléaire) en chaleur ; puis une partie de cette chaleur est récupérée dans les turbines sous forme mécanique ; enfin, cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique dans les alternateurs.

## 2. Les différents types d'énergie et leurs transformations

### Types d'énergie

- Energie rayonnante
- Energie chimique
- Energie mécanique
- Energie thermique
- Energie électrique
- Energie nucléaire
- Energie hydraulique
- Energie éolienne

### a. L'énergie rayonnante (radiative) :

C'est l'énergie transportée par les rayonnements. Dans le filament d'une ampoule électrique, l'énergie électrique se transforme en chaleur évacuée en énergie radiative, lumineuse et infrarouge. Le Soleil nous transmet une puissance de l'ordre de 1kW par mètre carré, sous forme de lumière visible et de rayonnement infrarouge.

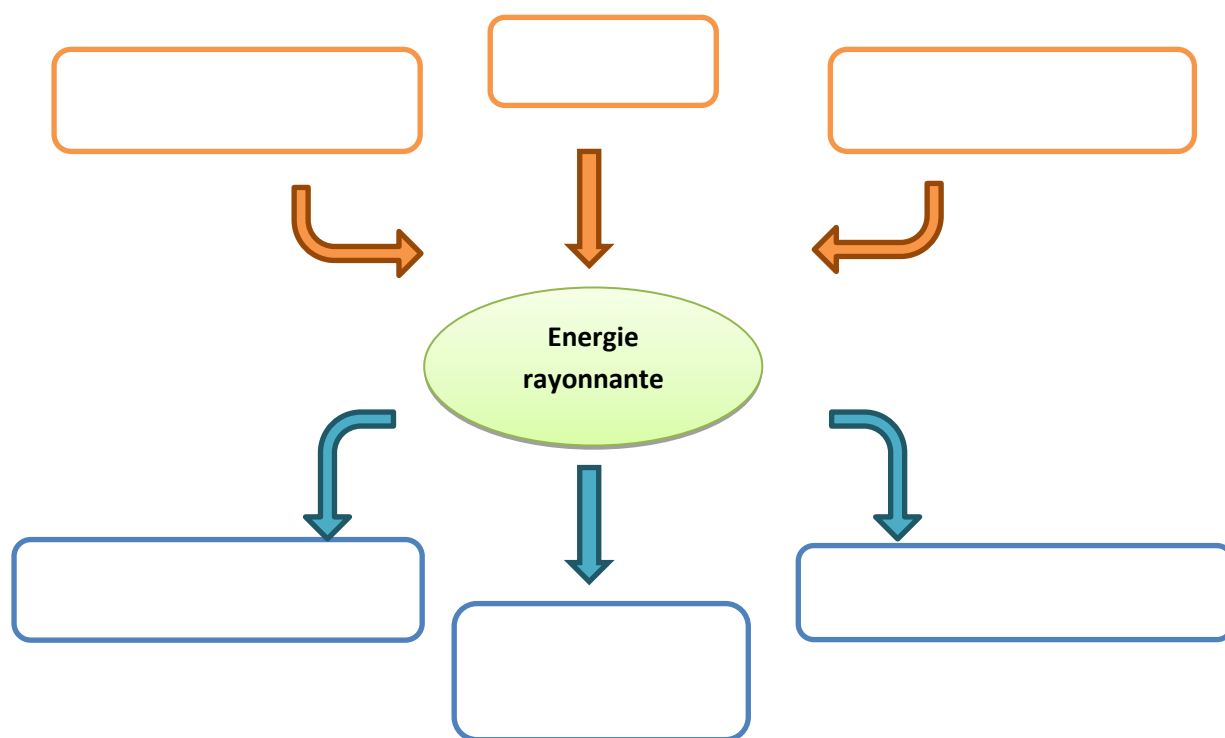
L'énergie solaire correspond à une forme d'énergie rayonnante. L'énergie du soleil est à la base de la majeure partie des formes d'énergies disponibles en milieu naturel.

L'énergie rayonnante, ou énergie radiative, est la seule énergie qui peut se propager dans le vide, en l'absence de matière. Elle repose sur le principe du rayonnement électromagnétique, lui-même basé sur un déplacement de photons.

Au quotidien, l'énergie rayonnante est très présente ; c'est ainsi que le soleil nous éclaire, qu'un radiateur nous chauffe ou encore qu'un micro-onde réchauffe nos aliments. Environ 1000 W d'énergie radiative touchent chaque m<sup>2</sup> de la Terre (le jour).

Le rayonnement électromagnétique se déplace à la vitesse de la lumière (appelée célérité, et notée  $c$ ), soit près de 300 000 km.s<sup>-1</sup>, et est principalement caractérisé par sa longueur d'onde ou sa fréquence.

On rappelle qu'à une longueur d'onde (notée  $\lambda$ , exprimée en mètre et ses multiples) correspond une fréquence ( $\nu$ , en Hertz, Hz) selon la relation suivante :



**i. Incandescence**

- 1878 : J.Swan (amélioré par Edison):
- 
- 

**ii. Électroluminescence**

- 
- 

**iii. Photochimie**

- 
- 
- 
- 

**iv. Capteurs solaires**

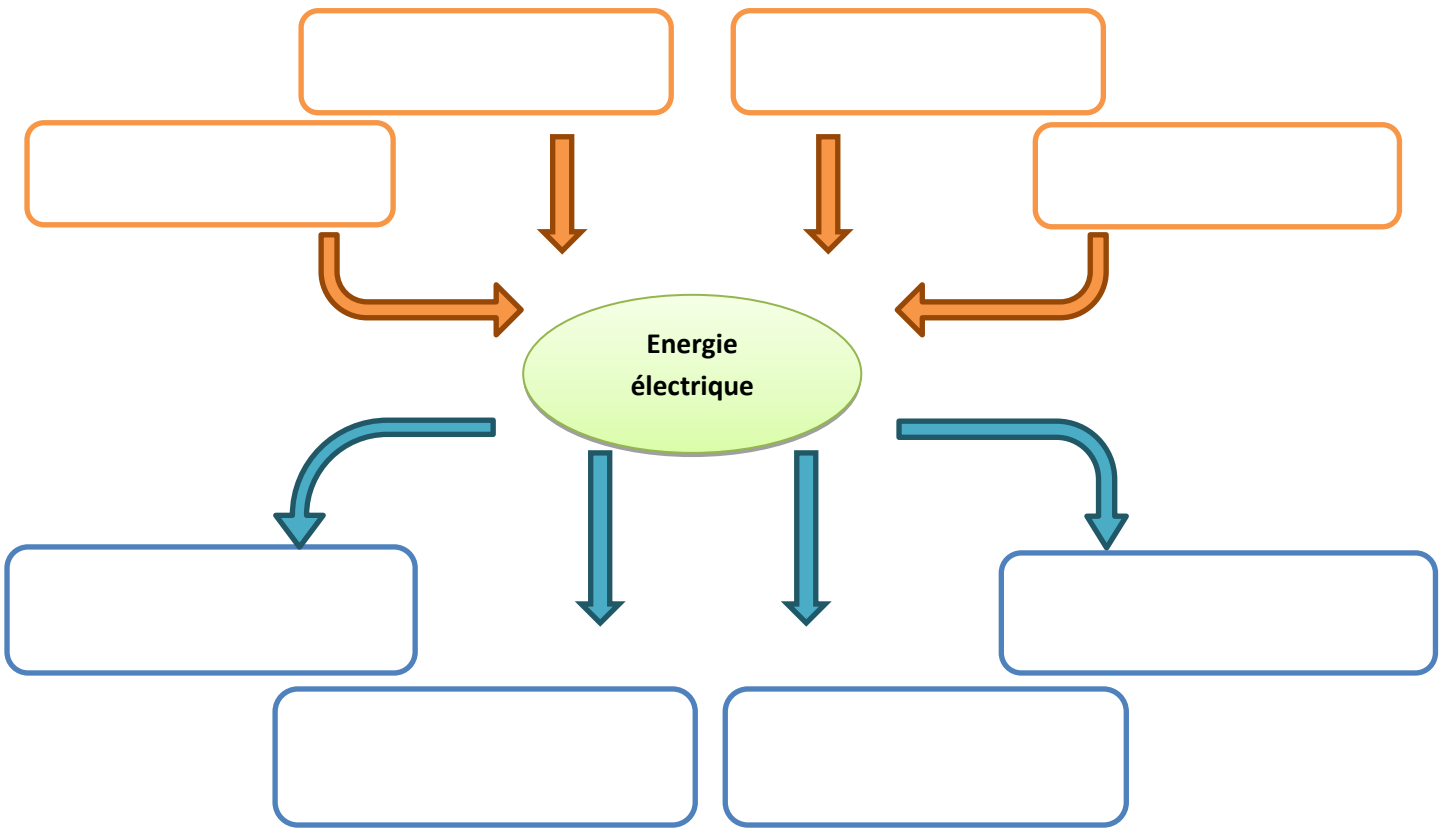
- 
- 

**b. L'énergie électrique:**

Pour qu'une énergie électrique puisse circuler et être consommée, le circuit doit être fermé, contenir au moins un consommateur d'énergie, et une différence de potentiel (une tension en Volts, V) doit lui être appliquée. Un courant électrique (en Ampères, A) se met alors à circuler.

Dans un circuit électrique, la puissance mise en jeu par un consommateur d'énergie obéit à la loi suivante :

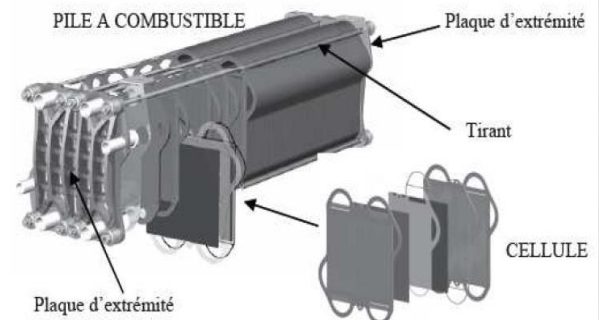
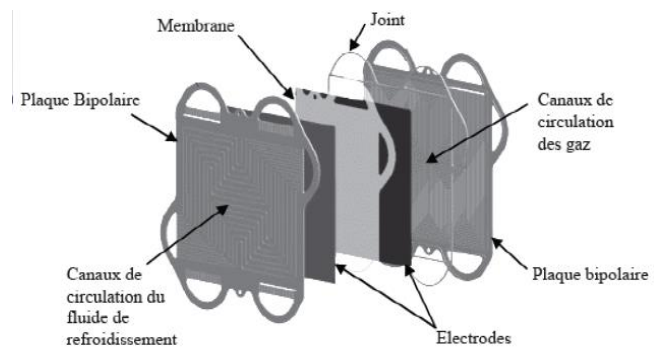
Pour connaître la quantité d'énergie absorbée (ou plutôt convertie), il suffit de multiplier la puissance par le temps de fonctionnement (en secondes).



i. Pile à combustible

- est une pile où la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur ( par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air
- 
- 
- 

+  
+  
+  
+  
+





ii. La piézoélectricité

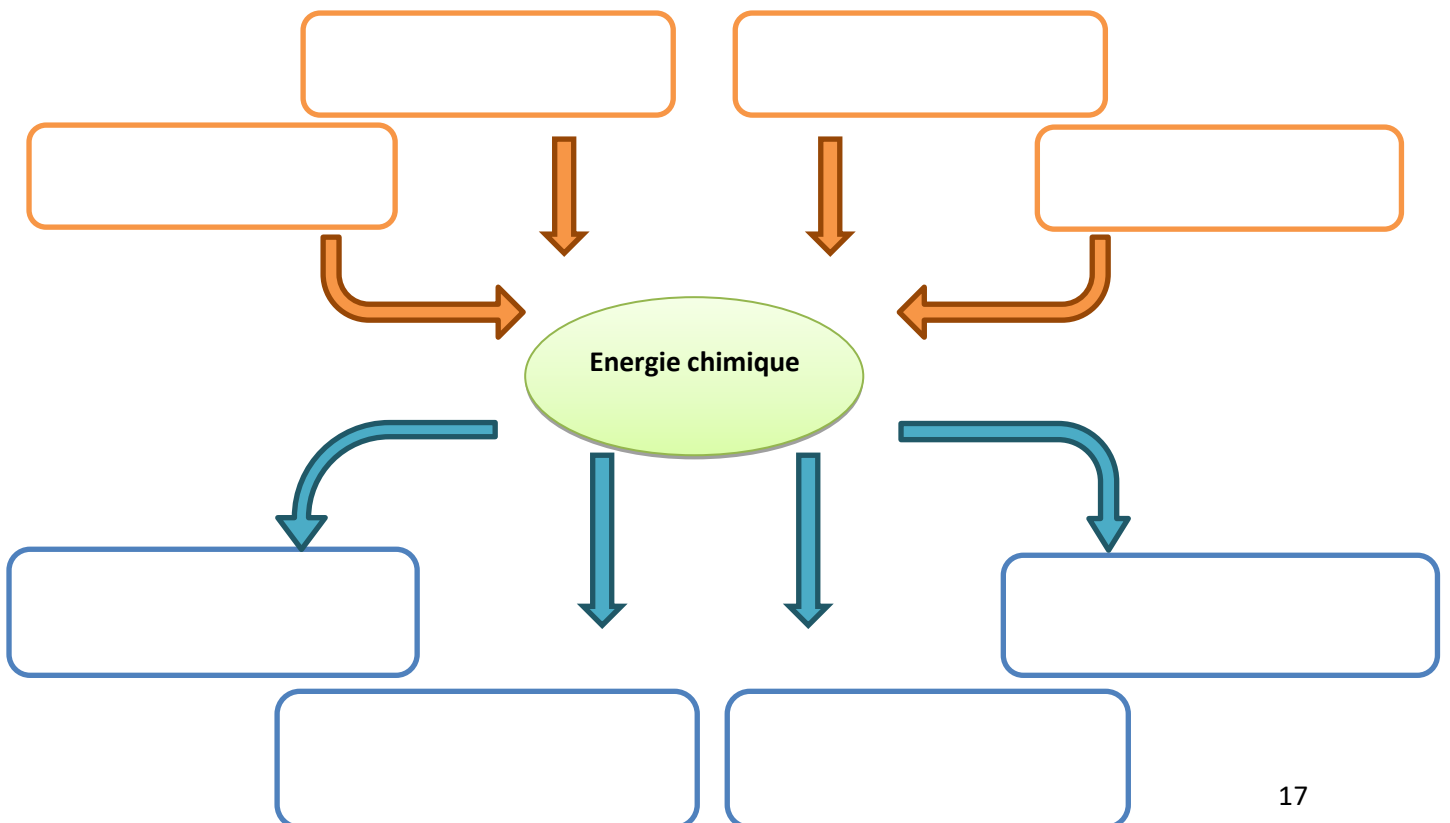
- 
- 
- 

iii. pyroélectricité

- 
- 

c. L'énergie chimique:

Lors de la combustion, qui est l'une de ces réactions, le pétrole, le gaz, le charbon ou encore la biomasse convertissent leur énergie chimique en chaleur – et souvent en lumière. Dans les piles, les réactions électrochimiques qui ont lieu produisent de l'électricité.



i. Thermolyse

- 
- 
- 
- 

ii. Électrolyse

- 
- 
- 

**d. L'énergie mécanique:**

Un train qui roule sur ses rails, un cycliste qui monte une côte ; soit autant d'exemples où l'énergie mécanique est mise en jeu. Cette dernière doit être divisée en deux sous-formes d'énergie : l'énergie cinétique, et l'énergie potentielle de pesanteur. Ce sont les deux composantes de l'énergie mécanique.

❖ **l'énergie cinétique**

En effet, tout objet qui se déplace et dont la masse n'est pas nulle possède de l'énergie cinétique. Cette énergie n'étant pas stockable sur le long terme, on la qualifiera d'énergie de flux. Même s'il est possible de la stocker quelques instants (via l'inertie mécanique). Elle se calcule via la relation suivante :

Où  $m$  est la masse du corps (en kg) et  $v$  sa vitesse (en mètre par seconde,  $m.s^{-1}$ )

❖ **l'énergie potentielle de pesanteur**

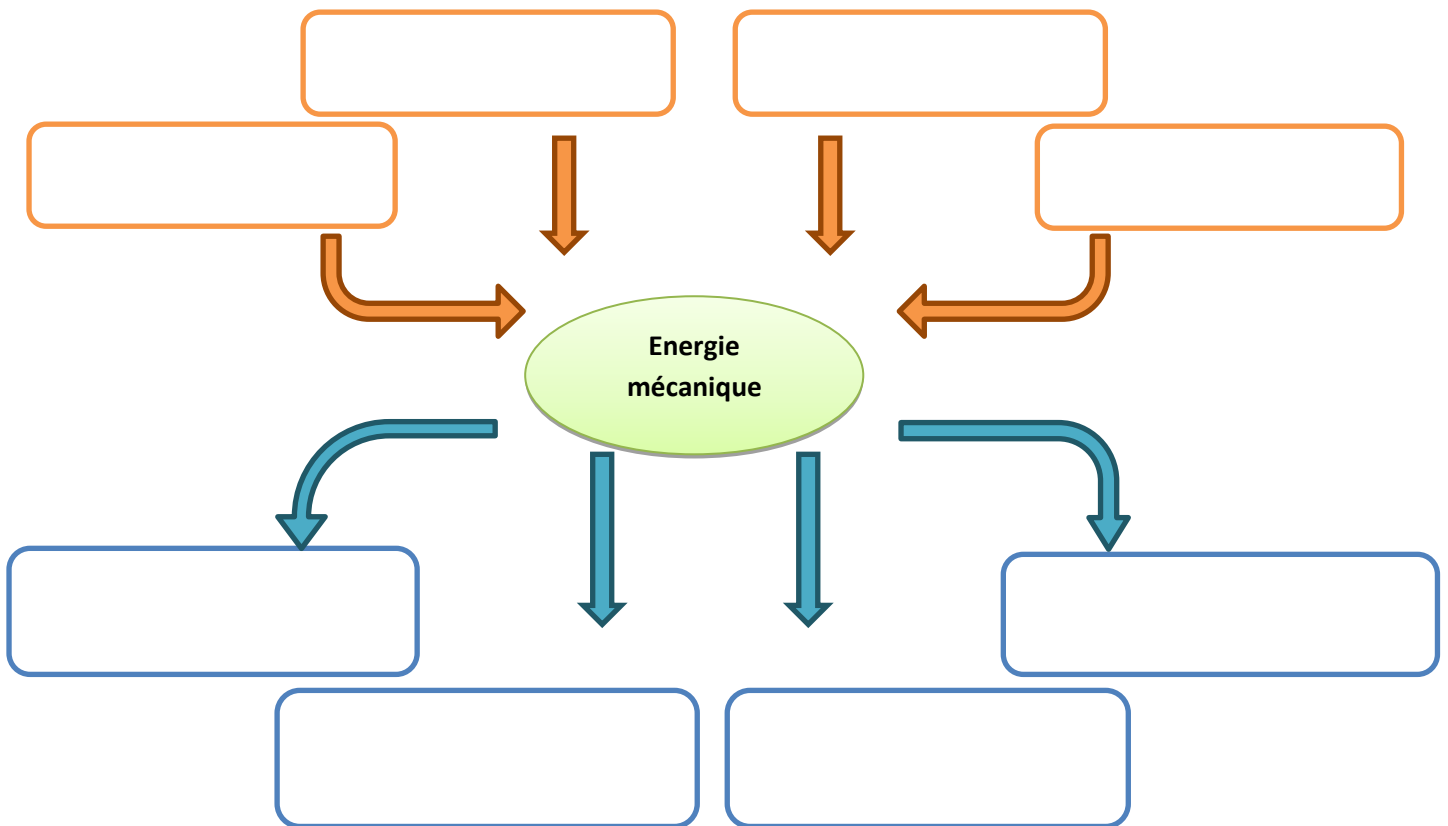
De son côté, l'énergie potentielle de pesanteur résulte de l'attraction terrestre. Il est assez intuitif de penser que pour élever un corps (par exemple monter un sac à dos d'un étage), il est nécessaire de lui apporter de l'énergie. Pendant l'élévation, cette énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle de pesanteur.

Où  $m$  est la masse du corps (en kg),  $g$  est l'intensité de la pesanteur (en  $m.s^{-2}$  ; sur Terre, on prendra  $g = 9.81 m.s^{-2}$ ) et  $z$  l'altitude.

❖ **Relation entre énergie mécanique, énergie cinétique et énergie potentielle de pesanteur.**

De manière générale, l'énergie mécanique est directement la somme des énergies cinétique et potentielle de pesanteur.

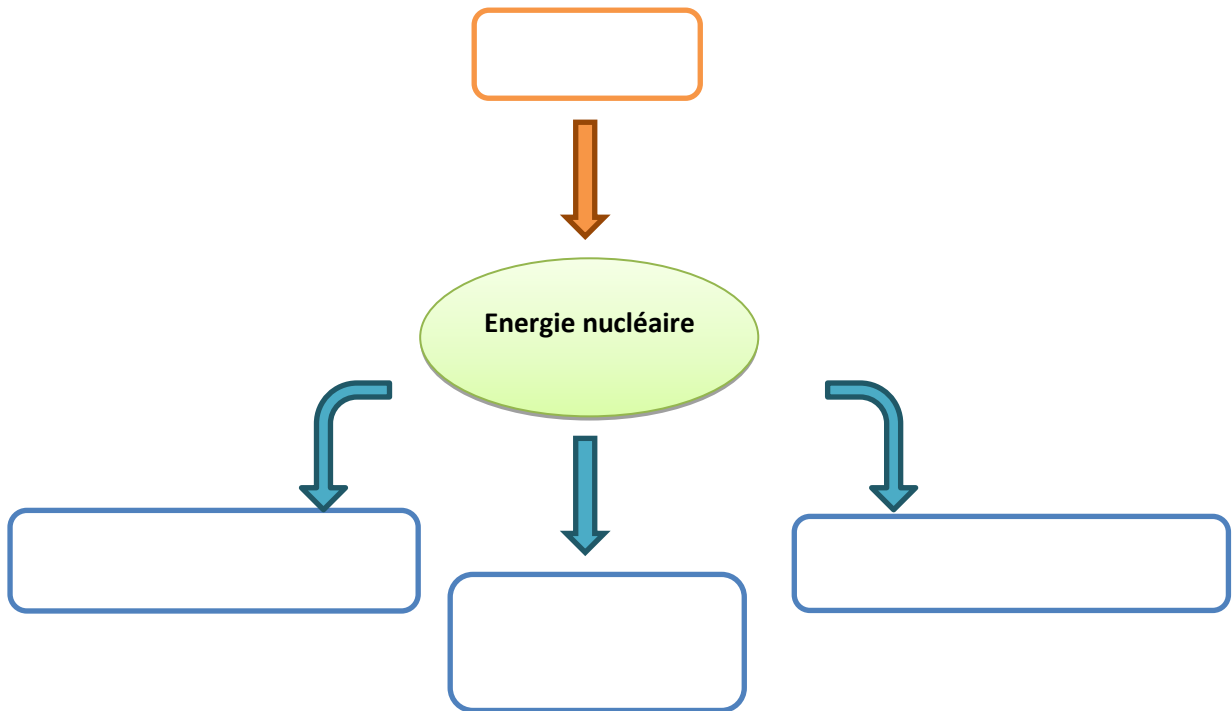
Un cas un peu particulier est la chute libre d'un objet. Durant cette dernière, la somme entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle de pesanteur est toujours constante.



**e. L'énergie nucléaire:**

Ce mécanisme se produit au cœur du Soleil, par fusion (la combinaison de deux nucléides formant un noyau de masse plus importante avec un important dégagement d'énergie) des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium, dans les centrales nucléaires, par fission des noyaux d'uranium.

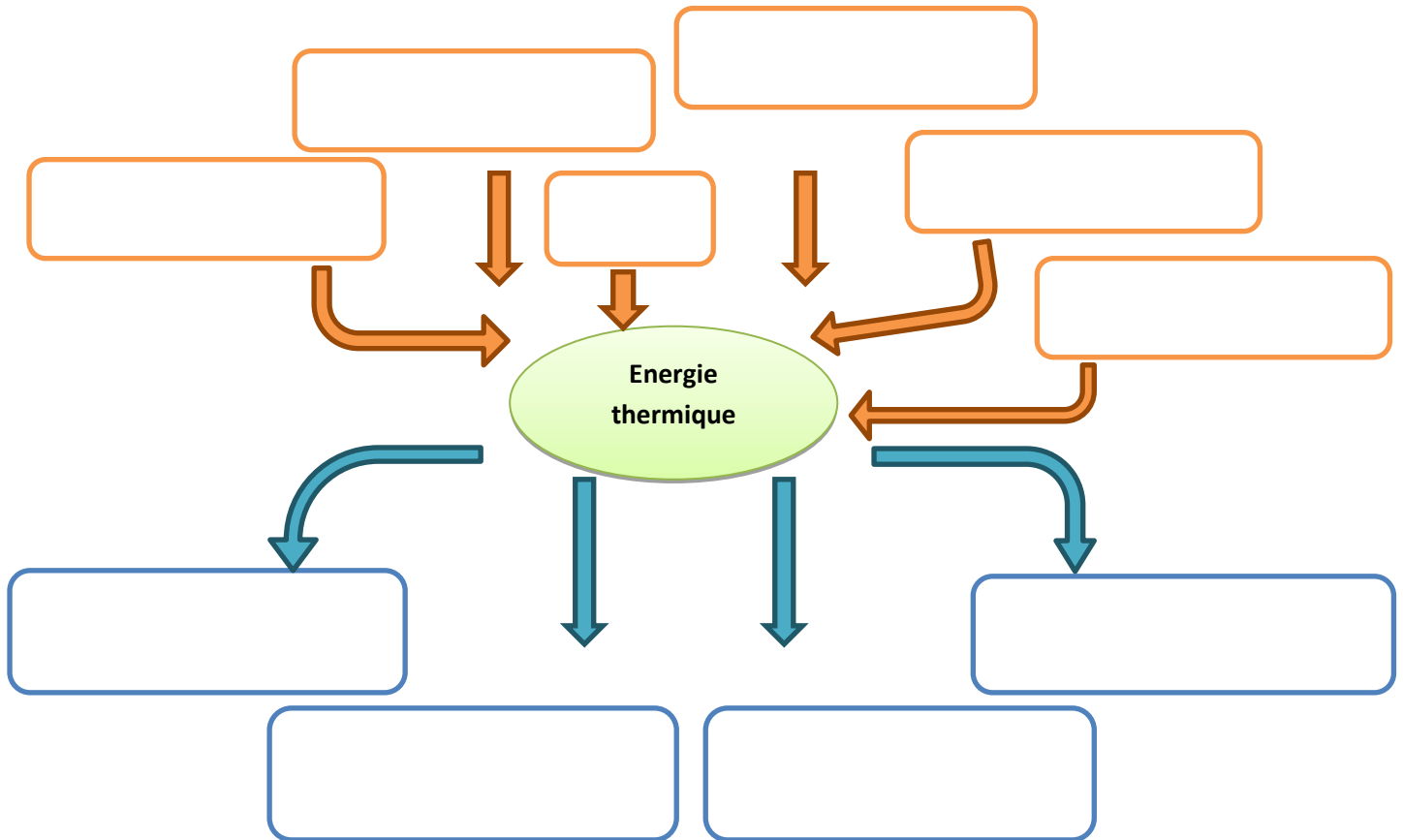
Elle permet de produire de l'électricité, dans les centrales thermiques nucléaires, appelées centrales électronucléaires, grâce à la chaleur dégagée par la fission.



**f. L'énergie thermique:**

Dans le langage courant, on la mesure en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) ; dans le système international c'est le Kelvin (K) qui est utilisé. Pour convertir des degrés Celsius en Kelvin, il suffit d'ajouter 273.15 (et vice-versa). Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu (soit 0K ou  $-273.15^{\circ}\text{C}$ ) possède de l'énergie thermique. Ce n'est qu'à cette température que les molécules ne s'agitent plus du tout.

Cette dernière correspond à la quantité d'énergie qu'il faut apporter à 1 kg de ce matériau pour que sa température augmente de 1K. Elle est notée  $C_p$ , et s'exprime en Joule par kilogramme par Kelvin ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ). La quantité d'énergie thermique contenue, notée  $Q$ , s'exprime alors de la sorte :



**g. L'énergie hydraulique:**

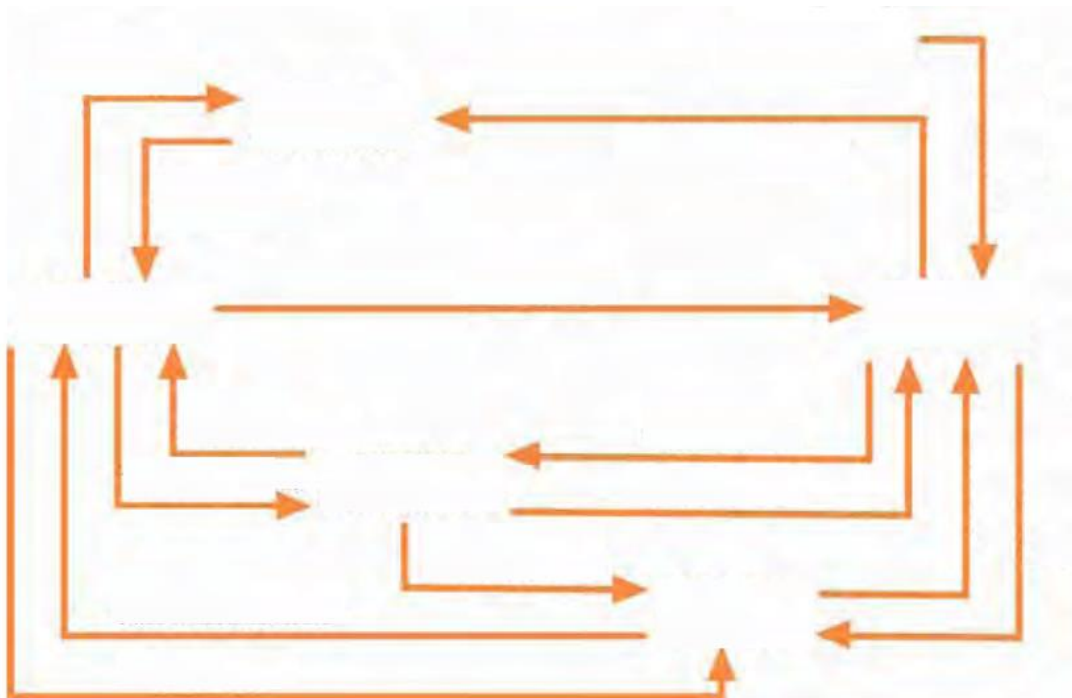
Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

**h. L'énergie de gravitation :**

i. L'énergie élastique :

j. L'énergie calorifique :

### 3. Conclusion



# Les sources d'Energie

## 1. Les énergies durables, quelles alternatives ?

La situation énergétique mondiale et nationale devient, depuis quelques années, un sujet d'actualité de plus en plus brûlant. Qu'en est-il exactement ?

Le tableau ci-dessous, synthétise les consommations des différentes sources, d'énergie, leurs réserves, leurs conséquences sur le climat et les tendances actuelles relatives à l'évolution des prix.

| source                                                                                                                      | pétrole                                                                        | gaz                                                                      | charbon                                                                           | nucléaire<br>fission                                                                              | renouvelables                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Consommations primaires</b><br><b>Monde</b><br><b>Europe</b><br><b>France</b><br>(proportion sur la consommation finale) | 37 %<br>41 %<br>35 % (45 %)                                                    | 21 %<br>24 %<br>14 % (21 %)                                              | 24 %<br>15 %<br>5 % (4 %)                                                         | 7 %<br>14 %<br>40 % (21 %)                                                                        | 9 %<br>5 %<br>7 % (10 %)                                   |
| <b>inconvénients</b>                                                                                                        | Effet de serre<br><br>Répartition de la ressource : concentrée au Moyen-Orient | Effet de serre<br><br>Répartition de la ressource : concentrée en Russie | Effet de serre<br><br>Équitabilité répartie dans le monde, mais la plus polluante | Énergie qui cristallise les peurs au regard des risques et des déchets                            | Énergie diffuse et aléatoire dépendant souvent de la météo |
| <b>Réserves</b><br>(en années de consommation actuelle)                                                                     | prouvées : 40<br><br>ultimes : 135                                             | prouvées : 65<br><br>ultimes : 230                                       | prouvées : 220<br><br>ultimes : 1400                                              | prouvées : 70 (3000 avec les surgénérateurs)<br><br>ultimes : 280 (12000 avec les surgénérateurs) | infinies                                                   |
| <b>Prix</b>                                                                                                                 | tendance forte à la hausse avec l'épuisement                                   | tendance forte à la hausse avec l'épuisement                             |                                                                                   |                                                                                                   | Tendance à la baisse avec le progrès                       |

Plusieurs constats mis en évidence dans ce tableau nécessitent une analyse plus approfondie. Nous allons seulement en énumérer, par ordre de gravité.

Environ 60% de l'énergie consommée dans le monde (65% pour l'Europe et 49% pour la France) provient des ressources en hydrocarbures. Or, comme toutes les ressources, celle des hydrocarbures s'épuise.

Le protocole de Kyoto qui a pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), est un premier pas insuffisant pour limiter les conséquences du réchauffement climatique. Il est néanmoins refusé par les USA et la Chine. Sa mise en œuvre au travers de quotas d'émission régulés par le marché met en cause l'indispensable solidarité internationale nécessaire pour limiter les conséquences à terme de ce phénomène. Il convient donc d'aller plus loin dans la réduction des GES.

Quelle que soit l'échéance de survenue du pic, nous devons d'autant plus nous préparer à l'après pétrole qu'il faudra environ 30 ans, dans le meilleur des cas, pour changer notre système énergétique.

Face à ces contraintes incontournables qui tendent à réduire la production d'énergie, nous devons répondre à une demande qui ne peut être que croissante.

- 

- 

## 2. Les réserves

Lorsque l'on parle des quantités d'hydrocarbures, il faut commencer par distinguer les ressources des réserves.

Les **ressources** que l'on peut récupérer techniquement et de façon rentable sont appelées réserves et plusieurs étapes se succèdent pour les estimer : étude géologique (description du gisement), étude technique (quantité extractible), étude économique (rentabilité) et choix de communication (quantités à déclarer pour des raisons politiques ou stratégiques).



Ces étapes permettent d'établir une estimation probabiliste des réserves, c'est-à-dire une classification en fonction de leur probabilité d'existence.

La somme des réserves et du pétrole par exemple qui a déjà été consommé constitue les **réserves ultimes**, c'est-à-dire le volume total de pétrole qui aura été extrait par l'Homme, de la première à la dernière goutte.

Il existe aussi des polémiques sur les termes de réserves « estimées », « prouvées » ou « conventionnelles », l'épuisement des réserves d'énergies fossiles est aujourd'hui reconnu, tant par les scientifiques, les pays producteurs que par les industriels, à quelques nuances chronologiques près.

On désigne comme « conventionnelle » une ressource que l'on peut extraire selon les moyens technologiques actuels et à un coût économiquement acceptable.

Définition des réserves est une définition principalement économique. Les aspects géopolitiques interdisant une diffusion précise des données.

### 3. perspectives des besoins mondiaux en énergie

#### i. Production mondiale d'énergie primaire

En recherchant la situation dans les premières années du 21<sup>ème</sup> siècle peut se résumer par le tableau 1 ci-dessous, extrait des statistiques de l'IEA pour l'année 2010.

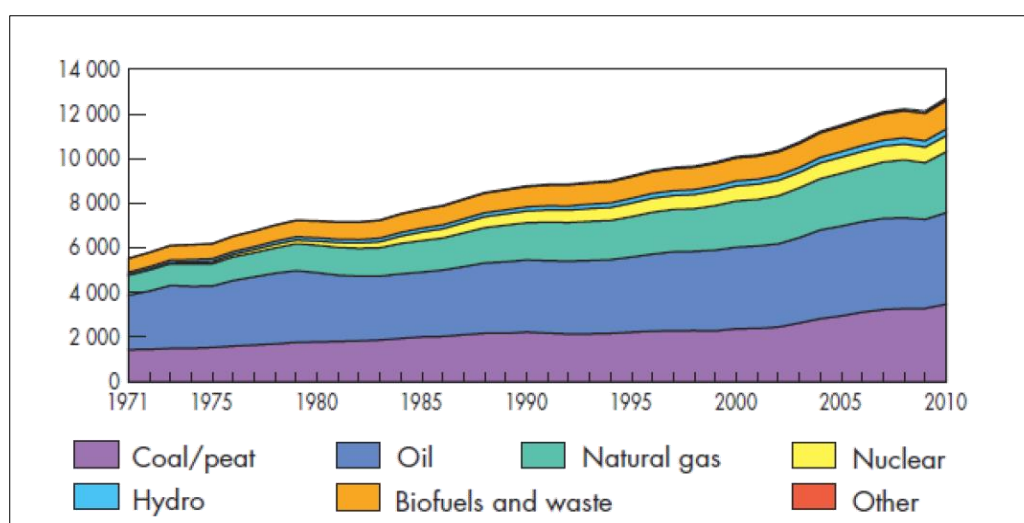
| Source primaire         | Mtep          | %          |
|-------------------------|---------------|------------|
| Pétrole                 | 4 120         | 32,4       |
| Charbon                 | 3 470         | 27,3       |
| Gaz naturel             | 2 720         | 21,4       |
| Nucléaire               | 725           | 5,7        |
| Hydraulique             | 292           | 2,3        |
| Renouvelables + déchets | 1 386         | 10,9       |
| <b>TOTAL</b>            | <b>12 717</b> | <b>100</b> |

Il ressort **Production mondiale d'énergie primaire en 2010 en millions de tep (Mtep)** de ce  
*Source: Key World Energy Statistics, IEA - 2012*

tableau que plus de **80% de la production mondiale d'énergie** a été basée en 2010 sur les combustibles fossiles.

Il est intéressant de voir comment cette consommation d'énergie primaire a évolué dans le temps depuis 1990. La figure suivante en montre la croissance, ainsi que la part de chaque source ; on notera la part croissante du charbon à partir du début des années 2000.

## ii. Consommation mondiale d'énergie primaire



Evolution de la consommation d'énergie primaire (en millions de tep) par source  
Source: Key World Energy Statistics, IEA - 2012

## iii. Consommation marocaine d'énergie primaire

|          | Consommation d'énergie<br>par tête (TEP/hab)<br>2003 | Consommation d'énergie<br>par PIB (TEP/PIB 1000\$)<br>2003 |
|----------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Suède    | 5,75                                                 | 0,21                                                       |
| Finlande | 7,20                                                 | 0,30                                                       |
| Danemark | 3,85                                                 | 0,13                                                       |
| Suisse   | 3,66                                                 | 0,11                                                       |
| USA      | 7,84                                                 | 0,22                                                       |
| Maroc    | 0,4                                                  | 0,25                                                       |

Source : AIE.

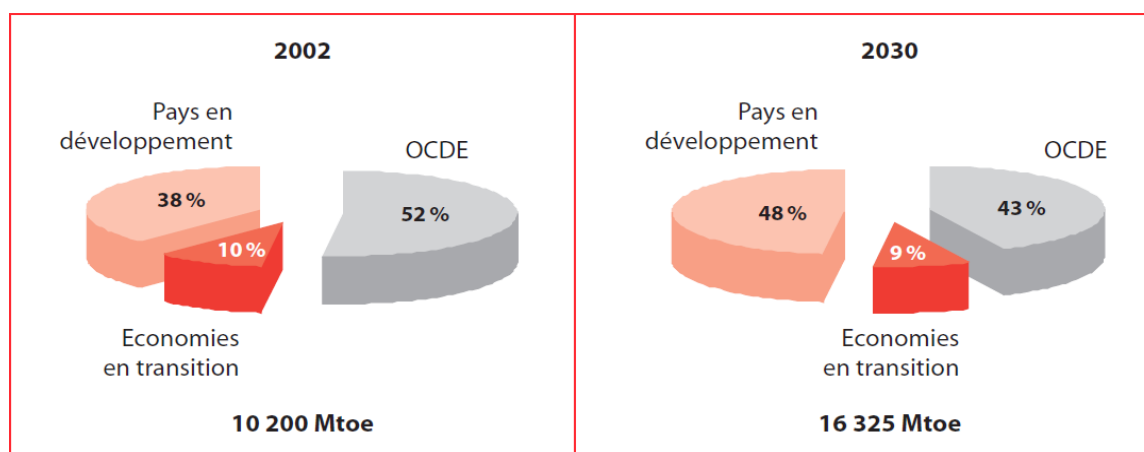
#### iv. Demande mondiale de l'énergie primaire

| Rubriques                     | 1971   |      | 2002   |      | 2030   |      | 2002-2030*<br>en % |
|-------------------------------|--------|------|--------|------|--------|------|--------------------|
|                               | volume | %    | volume | %    | volume | %    |                    |
| Charbon                       | 1 407  | 25,4 | 2 389  | 23,1 | 3 601  | 21,6 | 1,5                |
| Pétrole                       | 2 413  | 43,6 | 3 676  | 35,5 | 5 766  | 35,7 | 1,6                |
| Gaz                           | 892    | 16,1 | 2 190  | 21,2 | 4 130  | 25,0 | 2,3                |
| Nucléaire                     | 29     | 0,5  | 692    | 6,7  | 764    | 4,5  | 0,4                |
| Hydraulique                   | 104    | 1,9  | 224    | 2,2  | 365    | 2,2  | 1,8                |
| Biomasse                      | 687    | 12,4 | 1 119  | 10,8 | 1 605  | 9,5  | 1,3                |
| Autres énergies renouvelables | 4      | —    | 55     | 0,5  | 256    | 1,5  | 5,7                |
| Total                         | 5 536  | 100  | 10 345 | 100  | 16487  | 100  | 1,7                |

Demande mondiale de l'énergie primaire (en millions de TEP)

Selon le scénario de référence de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande mondiale annuelle de l'énergie primaire augmenterait de **60 % par rapport à 2002** pour atteindre **16,5 milliards de tonnes équivalent pétrole en 2030**.

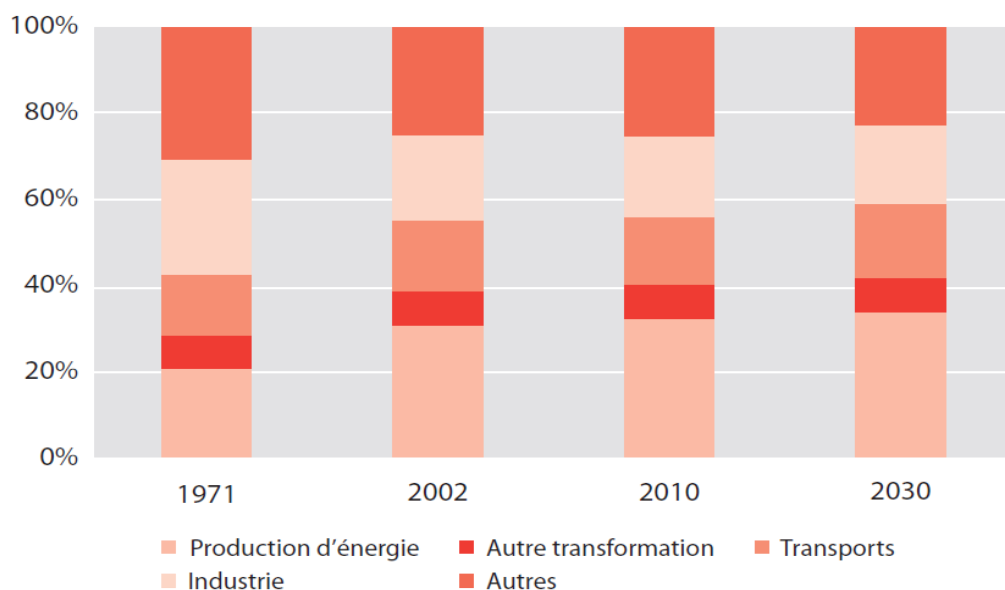
#### v. Structure de la demande énergétique mondiale



Entre 2002 et 2030, la demande énergétique mondiale, proviendrait pour ses deux tiers des pays en développement, **26 %** des pays de l'OCDE et **8%** des pays en transition.

La part des pays de l'OCDE et des pays en transition dans la demande mondiale d'énergie baisserait respectivement, **entre 2002 et 2030, de 52 % à 43 % et de 10 % à 9%**, pendant que celle des pays en développement croîtrait **de 38 % à 48 %**.

## vi. Structure sectorielle de la demande énergétique mondiale



Structure sectorielle de la demande énergétique mondiale (1971-2030)

Les secteurs des transports et de la production d'énergie absorberaient **plus de 60 %** de la demande globale d'énergie à l'horizon 2030, cette part étant en 2004 **de 54 %**.

La demande énergétique, en relation avec l'évolution de la mobilité et des besoins en services, faisant appel à l'électricité, croîtrait en fonction du PIB, mais à un rythme moindre que par le passé.

La demande des secteurs des transports, de l'industrie, des ménages, des services et de l'agriculture évoluerait à un taux annuel moyen de **1,6% entre 2002 et 2030**, soit un taux similaire à celui de la demande globale.

## vii. En résumé

## **4. Sources des énergies**

### **a. Les énergies non renouvelables**

#### **i. Energies fossiles**

Ce sont des matières premières que l'on trouve sous terre issues de la fossilisation( décomposition ) de matières organiques (végétaux et organismes vivants), il y a des millions d'années. Ce sont des combustibles tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole.

##### **\* Le pétrole**

Le pétrole est un mélange d'hydrocarbures (molécules formées d'atomes de carbone et d'hydrogène) et de molécules, appelées résines et asphaltènes, contenant également d'autres atomes, principalement du soufre, de l'azote et de l'oxygène. Certains de ces constituants sont, à température et à pression ambiantes, gazeux (méthane, propane, etc.), liquides (hexane, heptane, octane, benzène etc.) et parfois solides (paraffines, asphaltes, etc.).

[...]Facile à pomper, à stocker, à transporter et à utiliser, [...] le pétrole est devenu, à partir des années 50, la première source d'énergie dans le monde.

Sa forte densité énergétique en fait la matière première des carburants qui alimentent les transports (voitures, camions, avions, etc.).

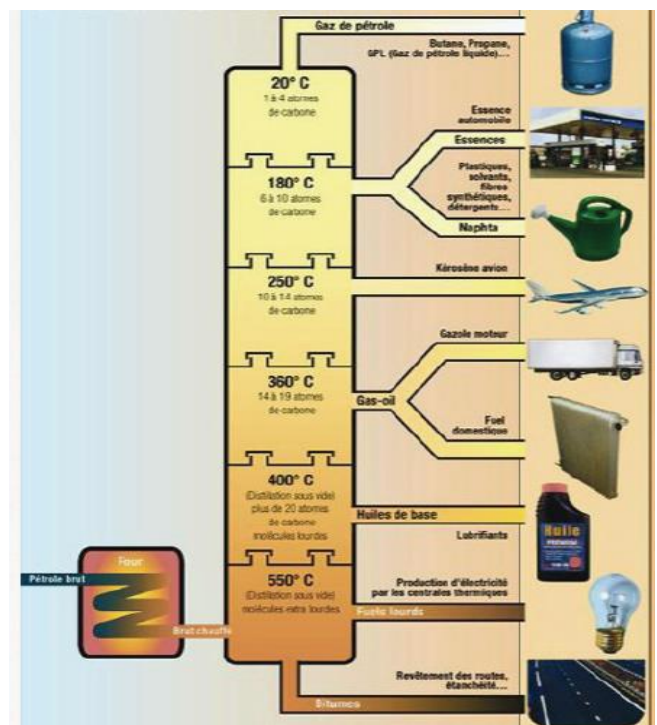
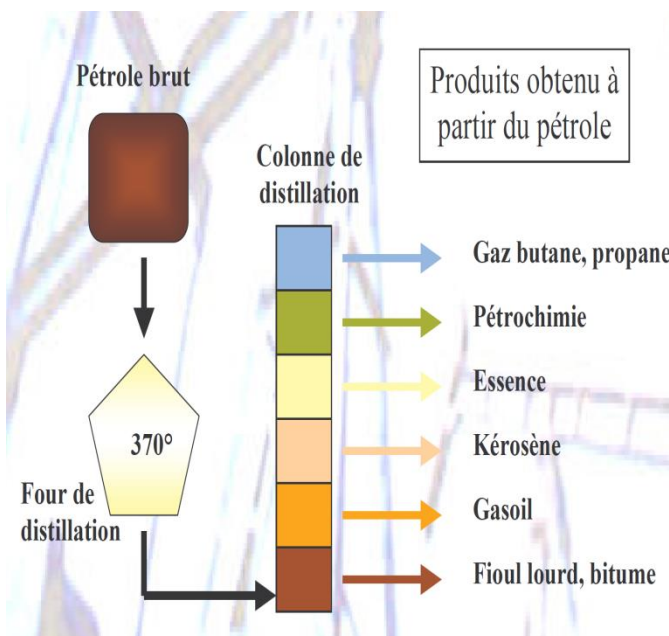
Il résulte de la dégradation thermique de matières organiques contenues dans certaines roches : les "roches mères" du pétrole. Ce sont des restes fossilisés de végétaux aquatiques ou terrestres et de bactéries s'accumulant au fond des océans, des lacs ou dans les deltas.

Pendant des dizaines de millions d'années, de nouveaux sédiments vont continuer à s'accumuler, entraînant la roche mère à de grandes profondeurs.

Généralement entre 2500 et 5000 m et sous l'action des hautes températures qui y règnent, le kérogène se transforme (craquage thermique) en pétrole liquide accompagné de gaz. A plus de 5000 m, le pétrole "craque" à son tour et se transforme en gaz.

Le pétrole brut, est une huile minérale foncée et visqueuse qui viens du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts, le pétrole est **donc une source d'énergie fossile non renouvelable**.

### Le pétrole : quel produit?



### Les réserves de pétrole pourront-elles suivre ?

D'après certains experts, face à une demande mondiale en hausse constante, la pénurie pourrait progressivement s'installer. En un peu plus d'un siècle, nous aurions déjà consommé la moitié des réserves de pétrole découvertes, lentement accumulées dans le sous-sol pendant des centaines de millions d'années. La seconde moitié serait consommée infiniment plus vite que la première, du fait d'une demande énergétique mondiale beaucoup plus forte.

Un scénario alarmiste à tempérer compte tenu des progrès continus des technologies : une partie de ce qui n'était pas récupérable ou exploitable hier l'est aujourd'hui et une partie de ce qui ne l'est pas aujourd'hui, le sera demain. S'il faut s'attendre à une baisse de la production avant la moitié de ce siècle, cela ne signifiera pas pour autant la fin brutale du pétrole. Le pétrole sera encore produit et consommé bien au-delà de la fin du siècle.

## Des chiffres clés pour le pétrole

- 

- 

16 % de la population mondiale se partage 70 % de la consommation mondiale de pétrole.

Concernant le pétrole conventionnel, on a consommé jusqu'à aujourd'hui autour de 1000 milliards de barils de pétrole. Il resterait à produire (réserves existantes + réserves restant à découvrir) :

- un peu plus de 1 000 milliards de barils de pétrole d'après l'ASPO (Association for the Study of Peak Oil),
- plus de 2 000 milliards de barils (valeur moyenne) d'après l'USGS (United States Geological Survey).

### \* **Le gaz**

Le constituant principal des gisements de gaz naturel est le méthane. Le méthane est un hydrocarbure composé d'un atome de carbone et de quatre atomes d'hydrogène CH<sub>4</sub>.

Les qualités du gaz sont principalement liées à son bon rendement énergétique et à ses avantages environnementaux : sa combustion n'émet pas de poussières, peu de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), peu d'oxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et moins de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) que d'autres énergies fossiles. .

Son transport comporte des contraintes qui influent sur le développement de son commerce international.

#### • **Le transport par gazoduc :**

[...] est quatre ou cinq fois plus coûteux que le transport du pétrole par pipe-line. Le gaz naturel doit être comprimé tous les 120 à 150 km par des stations de compression.

- **Le transport par méthanier :**

[...] On y a recours en cas de longues distances ou de difficultés liées aux conditions géopolitiques ou géographiques des pays traversés.

On connaît surtout son usage domestique pour **le chauffage et la cuisson**. Mais l'utilisation du gaz naturel se développe dans d'autres domaines, comme **les centrales électriques ou le transport**, en raison de ses qualités favorables au respect de l'environnement.

La part du gaz naturel dans la consommation mondiale d'énergie croît régulièrement, notamment en Europe depuis 30 ans.

**Des chiffres clés pour le gaz:**

**26,7 %**

soit plus d'un quart des réserves gazières mondiales sont situées en Russie, 15,2 % sont en Iran et 14,7 % au Qatar.

Le coût du transport du gaz est **5 fois** supérieur à celui du pétrole.

\* **Le charbon**

La formation du charbon dans le sous-sol remonte à l'ère primaire dite "carbonifère", il y a 200 à 300 millions d'années. Recouverte de marécages, la terre connaît alors un climat chaud et humide. Des débris végétaux fermentent sous des sédiments, se superposent dans une atmosphère riche en gaz carbonique et se transforment en substances solides combustibles à haute teneur en carbone : la houille, le lignite et la tourbe. On appelle charbon ces roches sédimentaires contenant au moins 50 % de carbone.

Le charbon sert essentiellement à fabriquer de l'électricité dans les centrales thermiques. Mais en France, l'électricité étant majoritairement d'origine nucléaire, le charbon n'intervient qu'à hauteur de 5 %. En Allemagne, il représente 50 % de la production d'électricité, et pourrait encore s'accroître avec l'arrêt programmé

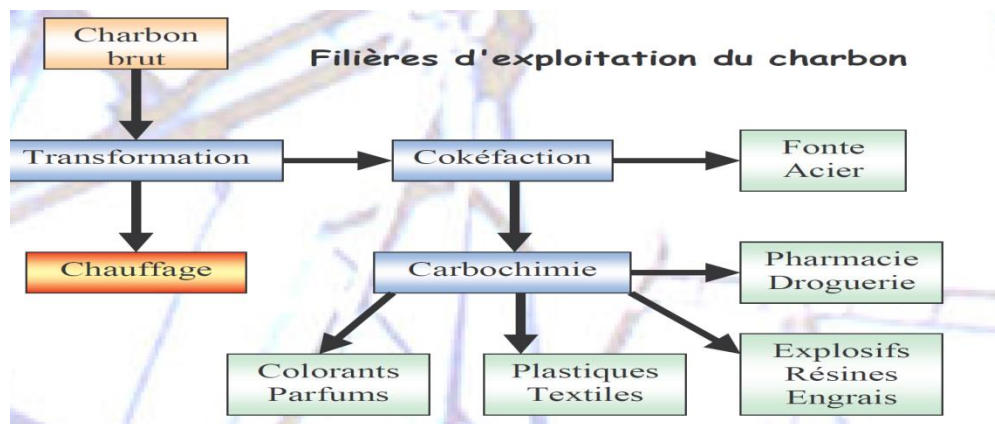


des centrales nucléaires. Le charbon est aussi utilisé de manière importante dans la sidérurgie<sup>1</sup>.

Des progrès importants ont été réalisés afin de diminuer les émissions de polluants des procédés utilisant du charbon (notamment de production d'électricité).

- Les réserves sont abondantes (200 années au rythme de production actuel) et bien réparties géographiquement.
- 
- 
- 

#### Filières d'exploitation:



#### Chiffres clés pour le charbon :

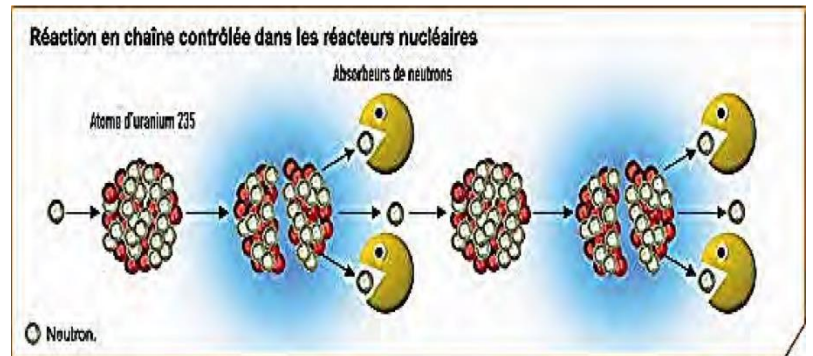
**28,9 %**

des réserves de charbon sont situées aux Etats-Unis, suivi de la Russie (19 %) et de la Chine (13,9 %).

**4,8 %**

c'est le taux de croissance annuelle moyen de la production mondiale de charbon entre 2000 et 2007.

## ii. Energies fissiles



L'énergie nucléaire est produite à partir d'un minéral appelé uranium. L'énergie nucléaire peut être utilisée pour produire de l'électricité. Tout d'abord, l'énergie doit être libérée. Cette énergie peut être obtenue de deux façons :

- 
- 

### L'uranium : comment?

**L'uranium** est un métal relativement répandu dans l'écorce terrestre. Comme la plupart des métaux, il ne s'extrait pas directement sous sa forme pure parce qu'à l'état naturel il se trouve, dans des roches, combiné à d'autres éléments chimiques. Les roches les plus riches en uranium sont les minerais uranifères (c'est-à-dire contenant de l'uranium), telles, par exemple, l'uraninite et la pechblende.

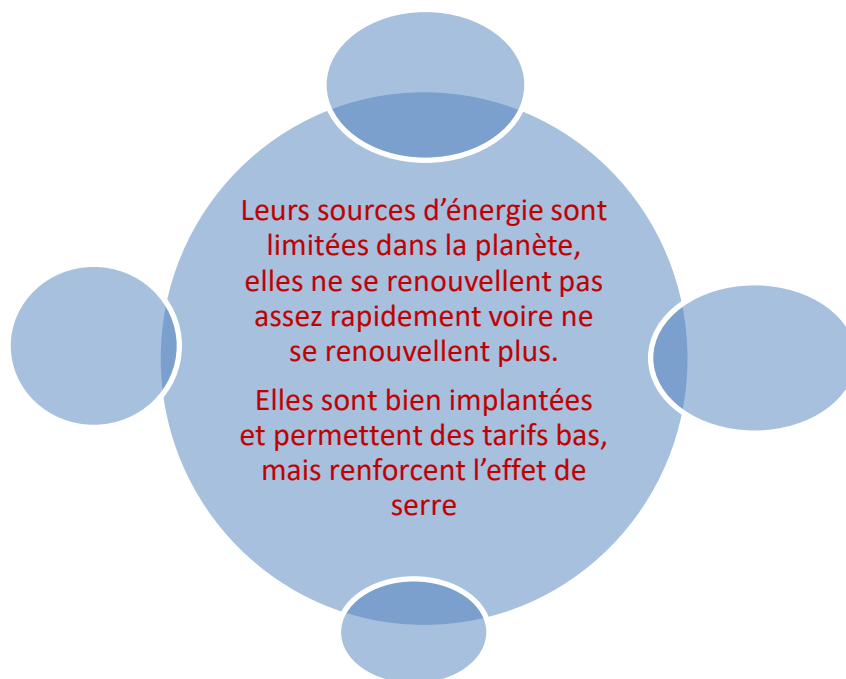
Les principaux gisements connus se trouvent en Australie, aux États-Unis, au Canada, en Afrique du Sud et en Russie.

Il est donc indispensable de concentrer l'uranium de ces minerais. Les roches sont d'abord concassées et finement broyées, puis l'uranium est extrait par diverses opérations chimiques.

Il contient environ 75% d'oxyde d'uranium, soit 750 kg par tonne. Le concentré d'uranium ne peut pas être utilisé tel quel dans les réacteurs nucléaires. L'oxyde d'uranium doit d'abord être débarrassé des impuretés par différentes étapes de purification (raffinage). Très pur, il est ensuite converti en tétrafluorure d'uranium (UF<sub>4</sub>) constitué de quatre atomes de fluor et d'un atome d'uranium.

Pour alimenter les REP (réacteurs des centrales nucléaires à eau pressurisée), il faut disposer d'un combustible dont la proportion d'uranium 235 se situe entre 3 et 5 %, car seul cet isotope de l'uranium peut subir la fission nucléaire libératrice d'énergie. Or, dans 100 kg d'uranium naturel, il y a 99,3 kg d'uranium 238 et 0,7 kg d'uranium 235, soit 0,7 % seulement d'uranium 235 fissile.

### Les énergies non renouvelables



### **b. Les énergies renouvelables**

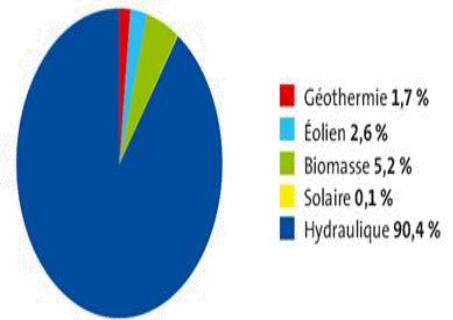
Mais certaines peuvent disparaître aussi si on ne les protège pas. Elles ont largement contribué au développement de l'humanité.

- En utilisant les énergies renouvelables,
- En développement dans le monde entier,

Les énergies renouvelables nous parviennent directement ou indirectement du Soleil, qui nous envoie en permanence son rayonnement. Il s'agit des énergies solaire, hydrauliques, éolienne, et aussi la biomasse et le géothermie.

En 1843 James Joule a été le premier à découvrir que la chaleur est une forme d'énergie : il a prouvé que quand on met un objet en mouvement (énergie mécanique) on produit de la chaleur (énergie thermique). Aujourd'hui on sait utiliser l'énergie du soleil pour créer de la chaleur et de l'électricité par la cogénération.

- ▶ Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de



### Avantages et inconvénients de ces nouvelles énergies

|               |                  |
|---------------|------------------|
| Avantages     | -<br>-<br>-<br>- |
| inconvénients | -<br>-           |

### La cogénération

Elle se base sur le fait que la production d'électricité (à partir d'un moteur thermique ou d'une turbine) dégage une grande quantité de chaleur habituellement inutilisée.

La cogénération valorise cette chaleur afin d'atteindre un rendement énergétique global pouvant atteindre 85%.

### **i. L'énergie solaire**

C'est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement direct ou diffus. Elle est à l'origine du cycle de l'eau et du vent. Les plantes l'utilisent pour la photosynthèse et quasiment toutes les autres formes énergies sont le produit de sa conversion.

Elle peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs spécialement adaptés.

#### **Solaire Thermique:**

#### **Solaire photovoltaïque:**

##### **❖ Le solaire thermique à basse température**

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie (énergie solaire) à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur.

**Les capteurs plans vitrés:** les capteurs les plus répandus sont les capteurs plans vitrés. ils sont composés



**Les capteurs à tubes sous vide:** Cette technologie permet d'annuler les pertes convectives dues à l'air. À température égale,



**Les capteurs non vitrés** Également qualifié de capteurs « moquette », ils consistent en un réseau de tubes noirs en matière plastique, accolés les uns aux autres. Pour chauffer l'eau d'une piscine, les capteurs peuvent être insérés dans le circuit de filtration.



### ❖ Le solaire thermique à haute température

La concentration optique des rayons du soleil permet d'obtenir de très hautes températures. Selon les différentes technologies de captage, la chaleur produite est généralement comprise entre 400 °C et 1 000 °C.

Dans leur principe, les concentrateurs optiques superposent en un même point des rayons solaires collectés sur une surface de captage le plus souvent formée de miroirs.

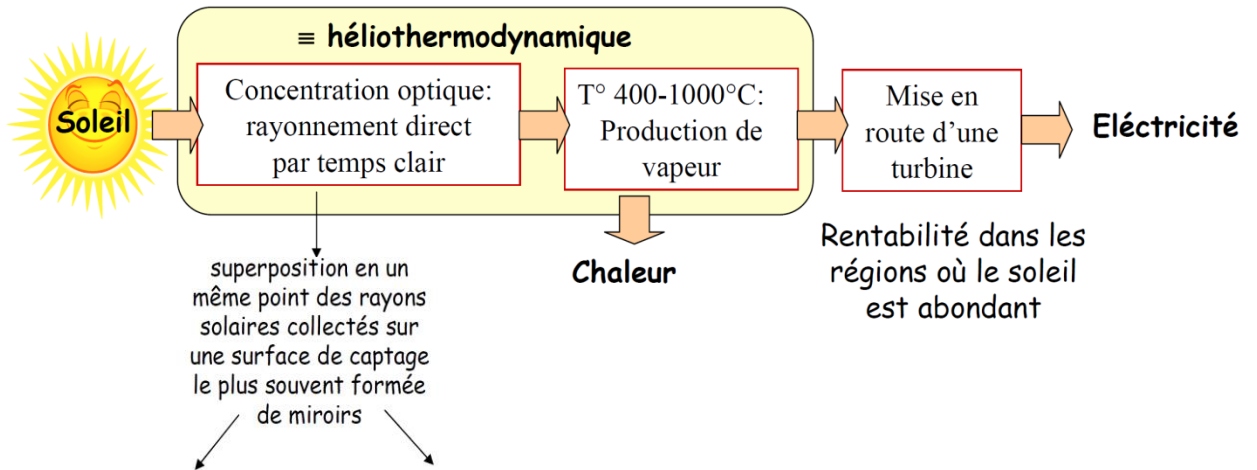
Les centrales solaires sont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés comparable à celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers.

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc.

### **Quel est l'intérêt du solaire haute température ?**

Dans les centrales solaires à concentration, on peut produire de grandes quantités d'électricité. Cette filière, promue dans les années 70, est retombée en sommeil suite au contre choc pétrolier de 1986. Elle intéresse à nouveau les industriels, les investisseurs et les compagnies électriques, car elle est source de kilowattheures propres et participe ainsi à la lutte contre l'effet de serre. Pour le moment, l'héliothermodynamique n'est compétitive que lorsque le soleil est abondant

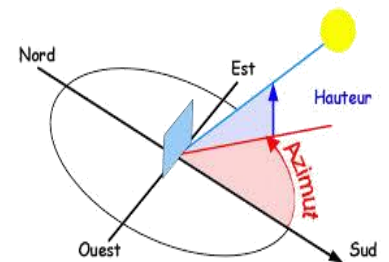
### Héliothermodynamique



### Coordonnées locales (ou horizontales)

**Azimut solaire :**

**Hauteur du soleil :**



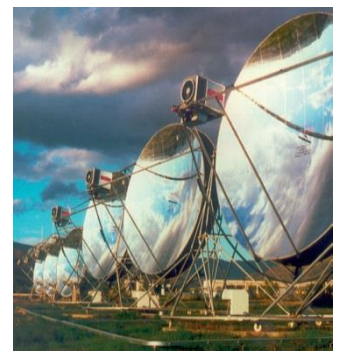
### Concentration

Pour travailler à  $T^\circ$  élevée, il faut diminuer fortement la surface de réception pour maintenir, en proportion, les pertes de chaleur à un niveau raisonnable  $\Rightarrow$

On caractérise la performance du système par le chiffre de sa « concentration » qui est le rapport de la surface de collecte sur la surface du capteur.

### La famille des capteurs solaires à haute température

- i. **Collecteurs paraboliques (ou concentrateur convexe)**



Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité.

## ii. Collecteurs cylindro-paraboliques

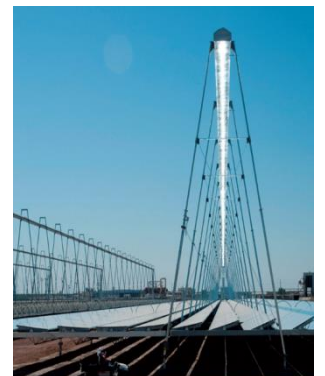
Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil.



## iii. Collecteurs solaires à miroir de Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique.

Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.



La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur.

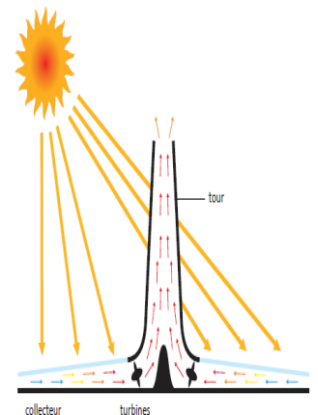




#### iv. Les centrales à tour

Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée au fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

#### v. Un cas particulier : la tour solaire à effet de cheminée



Cette circulation d'air permet alors à des turbines situées à l'entrée de la cheminée de produire de l'électricité.

Le principal avantage de ce système est qu'il peut fonctionner sans intermittence en utilisant le rayonnement du soleil le jour et la chaleur emmagasinée dans le sol la nuit.

Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh l'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW.

Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur.

### ❖ Solaire photovoltaïque

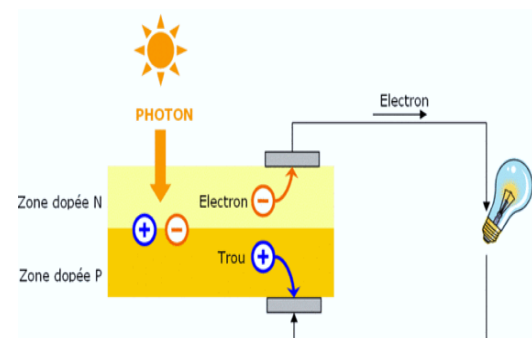
L'énergie Solaire photovoltaïque consiste à emmagasiner la lumière du Soleil pour en faire de l'électricité au sein de matériaux semi-conducteur comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique.



L'énergie provient des capteurs de lumière des photons (composent de lumière) qui heurtent les électrons et les libère en introduisant un courant électrique. Ensuite il peut être stocké en batterie ou bien injectés dans le réseau en électricité.

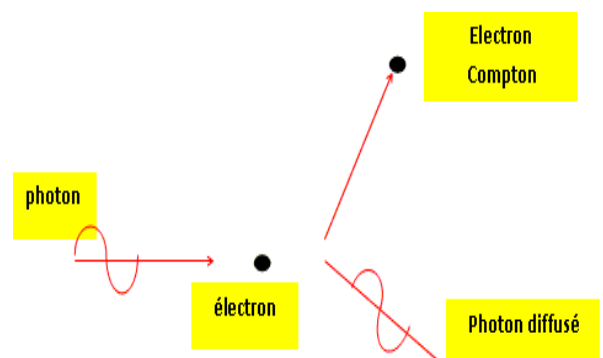
Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque, qui alimente un réseau de distribution électrique.

### L'effet photoélectrique



Par extension, il regroupe parfois l'ensemble des phénomènes électriques d'un matériau provoqués par l'action de la lumière. On distinguera alors deux effets : des électrons sont éjectés du matériau (émission photoélectrique) et une modification de la conductivité du matériau (photoconductivité, effet photovoltaïque lorsqu'il est en œuvre au sein d'une cellule photovoltaïque).

Lorsque l'EPE se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron périphérique.



Une absorption partielle est caractérisée par la diffusion Compton (la diffusion inélastique de rayonnement d'un photon sur un électron d'un atome lors de l'éjection de l'électron de l'atome).

## ii. La géothermie

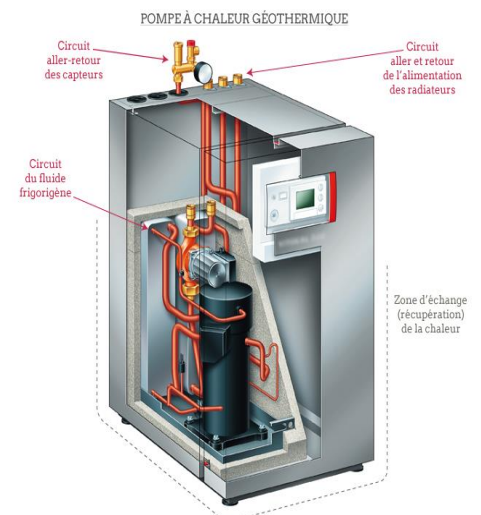
Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe par la présence du magma en –dessous de la croûte terrestre, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau) en faisant un ou plusieurs forages, plus ou moins profond.

Il existe deux modes d'exploitation de la chaleur du sous-sol : la **production de chaleur** et la **production d'électricité**.

Avec la **géothermie à très basse** (température inférieure à 30° C) **et basse énergie** (température entre 30 et 90° C), on récupère la chaleur du sous-sol pour l'exploiter directement ou grâce à des pompes à chaleur. Elle servira à chauffer des maisons, des immeubles, des piscines...

Avec la **géothermie à haute énergie** (températures supérieures à 150° C), on exploite des zones naturellement plus chaudes où la vapeur d'eau, extraite du sous-sol, alimente des turbines pour produire de l'électricité.

### ➤ La géothermie à basse température



Il s'agit d'un équipement qui fonctionne exactement comme le réfrigérateur, mais à l'envers!!!

Principe de fonctionnement :

- 1.
- 2.

3.

4.

En fonction de ce que l'on veut chauffer (habitations individuelles, serres, bâtiments collectifs...) et des caractéristiques du sol, on installera des pompes à chaleur plus ou moins puissantes. Cependant, le système de chauffage par géothermie doit être complété par un autre mode de chauffage d'appoint pour prendre le relais quand la demande en énergie est trop importante, notamment pendant les périodes de grand froid.

➤ **La géothermie moyenne et haute température**

L'eau est alors présente dans le sous-sol sous forme liquide ou sous forme de vapeur. **Cette vapeur va permettre de faire tourner une turbine, qui, accouplée d'un alternateur, produira de l'électricité.**

➤ **L'électricité du futur par système géothermique stimulé**

L'enjeu de cette technologie encore en développement est de **produire de l'électricité par la géothermie profonde à haute température à partir de roches sèches** (la première méthode consiste à produire de l'électricité en utilisant l'eau stockée dans le sous-sol).

## **Principe**

On creuse un puits dans lequel **on injecte de grandes quantités d'eau** (il est plus facile de capter la chaleur à travers l'eau car les roches ne conduisent pas bien la chaleur). Elle s'infiltré en profondeur et se réchauffe au contact des roches. Puis elle est **captée grâce à des pompes** par autres puits. Une fois en surface, **cette eau chaude cède sa chaleur** (via un échangeur) **à un fluide qui se transforme en vapeur**. Il monte en pression, ce qui lui permet d'**entraîner la turbine qui produit de l'électricité**. Pendant ce temps, l'eau du puits qui a cédé une bonne partie de sa chaleur redescend... et c'est reparti pour un autre tour.

### **iii. La biomasse**

Elle peut être **issue de forêts, milieux marins et aquatiques, parcs et jardins, industries générant des co-produits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage.**

Cette matière organique est la matière qui compose les êtres vivants et leurs résidus ayant pour particularité d'être toujours composée de carbone (du bois aux feuilles en passant par la paille, les déchets alimentaires, le fumier...). Bref, une source d'énergie tirée de ce qui pousse et de ce qui vit !

#### **Les composantes de la biomasse**

Le bois énergie, matérialisé par les bûches, les granulés, les briques de bois reconstitué et les plaquettes, est de très loin la première source d'énergie biomasse. Il existe d'autres types de ressources en biomasse :

- 
- 
- 
- 

#### **Type de la biomasse**

**Biomasse sèche**

**Biomasse humide**

#### **Produits de la biomasse**

Les différentes ressources de biomasse à usage énergétique peuvent être transformées en produits énergétiques:

- 
- 
- 
- 

#### **iv. L'énergie hydraulique**

Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau , ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique .

##### **Mode d'emploi**

Une centrale hydroélectrique est composée, comme toutes les usines hydroélectriques de quatre éléments principaux :

- 
- 
- 

##### **Principes de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique consiste à canaliser le cours d'eau vers une turbine qui, reliée à un alternateur puis à un transformateur, produit de l'électricité destinée au réseau électrique.

##### **Les grandes et les petites centrales**

La taille et la puissance des ouvrages sont très variables, de plusieurs MW à quelques kW.

La classification de l'énergie hydraulique selon les tailles d'installations est la suivante :

| Classification     | Puissance en kW         |
|--------------------|-------------------------|
| Grande Hydraulique | > 10 000 kW             |
| Petite Hydraulique | 1000 kW < P < 10 000 kW |
| Micro Hydraulique  | 10 kW < P < 1000 kW     |
| Pico Hydraulique   | < 10 kW                 |

**Les grandes centrales** nécessitent de lourds investissements puisqu'il faut en général construire des lacs de retenue, des barrages et installer des turbines. Les petites centrales quant à elles produisent la plupart du temps l'énergie au fil de l'eau (puissance inférieure à **10 MW** pour les petites et inférieure à **0,5 MW** pour les plus petites d'entre elles, comparativement aux quelques GW que peuvent produire les plus grandes installations).

Les petites centrales peuvent ne pas être raccordées au réseau de distribution électrique et satisfaire ainsi les besoins de zones reculées.

### La petite Hydroélectricité

Une petite centrale hydroélectrique est une centrale électrique utilisant l'énergie hydraulique pour produire de l'électricité à petite échelle.

- 
- 
- 
- 
- 
- 

### La grande Hydroélectricité

Ce sont les barrages de retenue qui représentent une technologie maintenant maîtrisée, elle se limite aux sites à forte hauteur de chute et /ou à grand débit volumique.

### Le mode de gestion de la prise d'eau

Le mode de gestion de la prise d'eau peut-être variable :

- **Au fil de l'eau.** Ce sont les usines ayant un réservoir dont la durée de remplissage est inférieure ou égale à deux heures ;

- **En éclusée.** Les usines ont un réservoir dont la durée de remplissage, comprise entre 2 et 400 heures,
- **Avec lac.**

## Types d'aménagements

On distingue en pratique trois types d'aménagements :

- **Les aménagements de haute chute:** Ils équipent des sites de montagne qui bénéficient,
- **Les aménagements de moyenne chute:** Ils sont situés sur des cours d'eau à débit abondant,
- **Les aménagements de basse chute:** Implantées notamment sur les grands fleuves, les centrales de basse chute ont un débit très important et

## Les différentes turbines existantes

Les différents types de turbines hydrauliques répondent à des fonctions relativement précises qui peuvent servir de base à une classification sommaire. Distinguons ainsi :

- les turbines **Pelton**



les turbines **Kaplan** et hélice

- les turbines **Francis**



- les **groupes bulbes,**



- les groupes **turbines-pompes**,

| Type           | Hauteur de chute | Gamme de débit |
|----------------|------------------|----------------|
| PELTON         | Grand            | Petit          |
| FRANCIS        | Moyen            | Moyen          |
| KAPLAN         | Petit            | Grand          |
| Pompe inversée | grand à moyen    | faible à moyen |

#### a. L'énergie hydraulique: L'énergie des marées

Le rythme des marées est déterminé par **l'attractivité exercée par le soleil et la lune**. Le niveau de la mer est ainsi plus élevé du côté de la lune et ce mouvement se déplace selon le mouvement de rotation de la Terre.

Deux techniques ont jusqu'alors été envisagées :

- Pour les zones de forts courants marins, il s'agit de placer des turbines de grande dimension qui vont produire en continu de l'électricité.
- Le "piège à eau" consiste quant à lui à construire une usine marémotrice qui laisse passer la marée lors de la montée au travers de vannes

#### b. L'énergie hydraulique: L'énergie des vagues

Issues du mouvement des masses d'air à la surface des océans, les vagues peuvent également être exploitées pour la production d'électricité mais cette technique est très peu répandue. Il existe des centrales flottantes ou des centrales fixes.

Les vagues pénètrent à l'intérieur de la centrale en comprimant de l'air qui est propulsé à l'extérieur au travers de turbines couplées avec des générateurs et ainsi de suite.

### **c. L'énergie hydraulique: L'énergie des océans**

L'énergie est captée à la surface de l'eau et stockée en surface à des températures avoisinant pour les zones les plus chaudes 25°C. A l'inverse, le fond des océans (à environ 1000 mètres) est d'une température de 4°C.

Il est possible de convertir cette différence de température en électricité en récupérant la chaleur transmise par les eaux profondes pompées et mélangées à l'eau chaude de surface.

Pour que le rendement soit intéressant,

### **v. Energie Eolienne**

L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

- **Par conversion en énergie mécanique:**
- **Par transformation en énergie électrique:** l'éolienne est couplée à un générateur électrique qui crée le courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

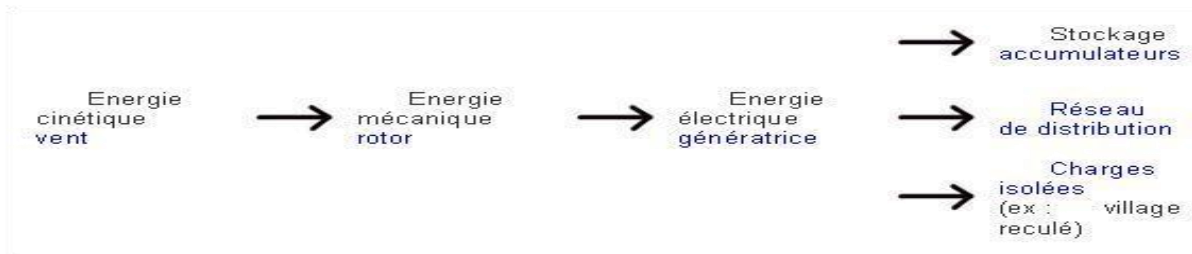
#### **a. Les éoliennes mécaniques**

La première transformation de l'énergie cinétique du vent est mécanique. Le vent, source de l'énergie, fait tourner les pales du moulin qui sont couplées à un rotor. Ces éoliennes mécaniques servent le plus souvent au pompage de l'eau du sous-sol. L'hélice entraîne un piston qui remonte l'eau.

## b. Les aérogénérateurs

La deuxième transformation permet de produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique, en couplant le rotor à une génératrice. Ces éoliennes sont appelées aérogénérateurs.

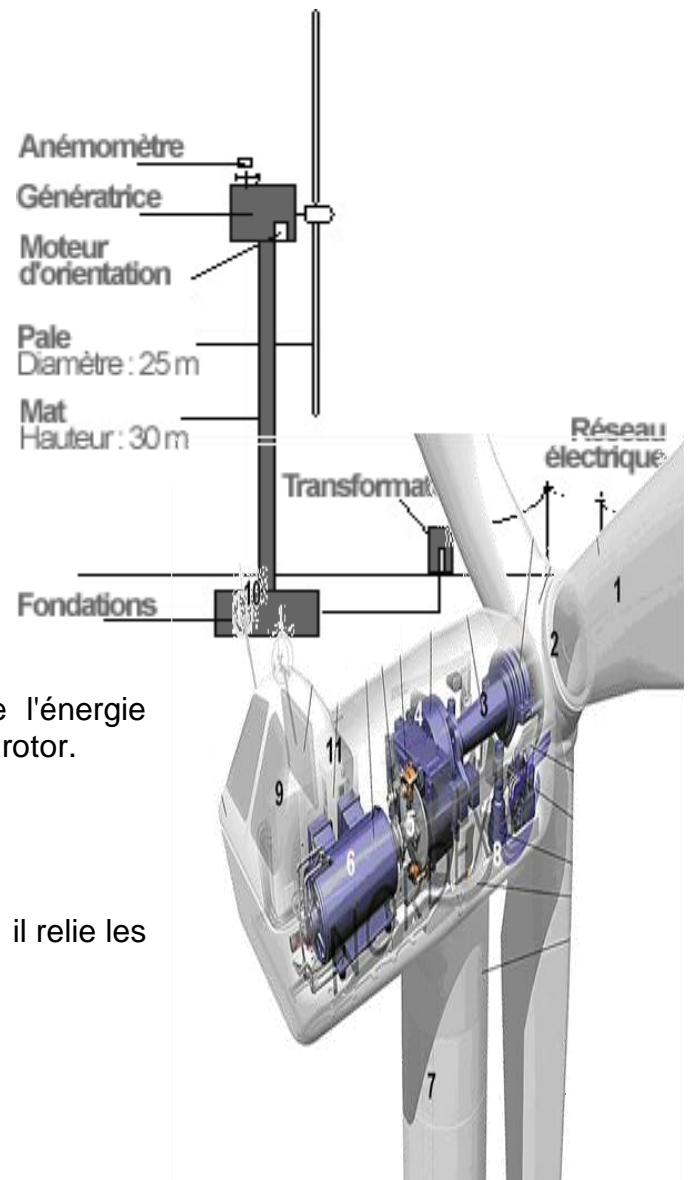
Contrairement à l'idée reçue, ce n'est pas le nombre de pales de l'hélice qui conditionne la quantité d'énergie « récoltée ». En effet, c'est la surface balayée par le vent et densité de l'air qui comptent.



L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor: cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou être utilisée par des charges isolées.

## c. Les composantes de l'aérogénérateur

1. **Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
2. **Le moyeu** :
3. **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : il relie les pales au multiplicateur.



4. **Le multiplicateur :**

5. **L'arbre secondaire :** il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

6. **Le générateur électrique :** il assure la production électrique. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif).

7. **Le mât :** c'est un tube en acier, le pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente.

8. **Le système d'orientation de la nacelle :** c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

9. **Le système de refroidissement :**

10. **Les outils de mesure du vent :** girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

11. **Le système de contrôle électronique :**

12. Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

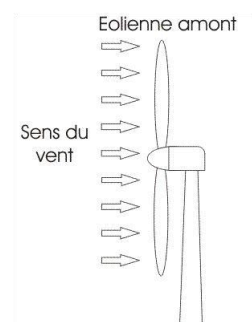
d. **Les différents aérogénérateurs**

**Axe vertical :** tout le dispositif de conversion de l'énergie est au pied de l'éolienne ce qui facilite les opérations de maintenance. Il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor.

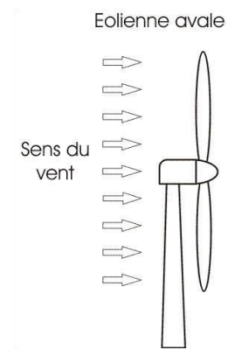


**Axe horizontal :** elles sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement 3 pales pour des questions de performance et de contraintes sur la machine. Il existe deux catégories :

- **éolienne amont ou hélice au vent :**



- **éolienne avale ou hélice sous le vent :**



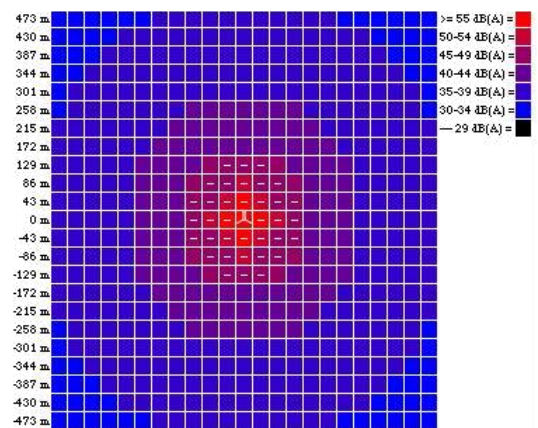
## e. Le débat environnemental

### 1- La dégradation du paysage

- Les dimensions des éoliennes (qui peuvent atteindre plus de 100 mètres de hauteur) et leur mouvement en font **des équipements "hors norme"**.
- 

### 2- Les nuisances sonores

Le bruit que génèrent les éoliennes peut être d'origine mécanique (rotation du rotor et fonctionnement de la génératrice) ou d'origine aérodynamique (lorsque les pales «fendent» l'air). Les éoliennes installées actuellement produisent un bruit de 55 dBA à leur pied.



© 1998 www.WINDPOWER.org

### 3- Les problèmes ornithologiques

Les **impacts** des parcs éoliens sur la **biodiversité** touchent principalement les **oiseaux**. Ils sont de **trois types - mortalité, dérangement, perte d'habitat** - et varient en fonction des espèces, des saisons, des milieux, de la taille des parcs éoliens...

## f. Solution :

### L'éolien offshore



Cependant, l'installation **d'éoliennes en mer** est beaucoup plus **coûteuse qu'à terre** : les mâts doivent être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion doit être renforcée, **l'implantation en mer nécessite des engins spécialisés**, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins coûteux, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens.

### Le petit éolien

Parallèlement aux grandes éoliennes destinées à une installation collective, il existe des dispositifs adaptés à l'installation individuelle.

Les petites éoliennes ont une **petite taille** qui rend possible leur installation chez un particulier.



### Nouvelle stratégie énergétique marocaine

**Le Maroc** a mis en place une **politique énergétique** nationale favorable au développement des énergies renouvelables, pour sécuriser son approvisionnement énergétique dans un contexte de forte croissance de la demande énergétique, pour maîtriser les **coûts futurs des services énergétiques par rapport à la tendance haussière des cours des produits pétroliers et enfin pour préserver l'environnement en atténuant les émissions de gaz à effet de serre.**

Au Maroc, l'efficacité énergétique, parallèlement au développement des énergies renouvelables, constitue une priorité majeure dans la stratégie énergétique nationale. L'ambition de cette stratégie est d'économiser 12% en 2020 et 15% en 2030 de la consommation énergétique. Dans cette perspective, des plans d'action d'efficacité

énergétique ont été mis en place dans tous les secteurs clés notamment : le transport, l'industrie, le bâtiment mais aussi l'agriculture.

Dans ce cadre, l'Agence pour le Développement des Energies Renouvelable et de l'Efficacité Energétique (ADEREE) a lancé plusieurs programmes d'efficacité énergétique dans le bâtiment, l'industrie (y compris l'agro-alimentaire) et le transport, secteurs qui représentent plus de 90% de la consommation énergétique marocaine.

Une volonté politique chiffrée et concrète :

- Mise en place d'un nouveau cadre législatif, notamment la loi n°13-09 relative aux énergies renouvelables, et la loi n°16-09 relative à la création d'une Agence dédiée aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique.
- Création d'un fond de développement énergétique doté de 1 Md USD et de la SIE (Société d'Investissements Energétiques) dotée de 1 Md MAD dont le but est d'investir dans des projets EnR.
- Planification d'une série d'investissements comme le programme d'amélioration du réseau national, d'un montant de 21 milliards de dirhams. L'interconnexion avec l'Espagne sera renforcée avec une troisième ligne électrique qui augmentera la capacité d'échange à 2.100 MW.
- Création d'une Agence Nationale de l'Energie Solaire – MASEN pour gérer le programme Solaire de 2.000 MW à l'horizon 2020.
- Lancement par l'ONE du Programme intégré éolien de 1.000 MW à l'horizon 2020.
- Plan national de la biomasse énergie, dans lequel, il est prévu de produire, à court terme, 1.160 GWh thermique/an à l'horizon 2012 (puissance installée 45 MW) et à moyen terme, 3.778 GWh thermique/an à l'horizon 2020 (puissance installée 144 MW).