

# *Presque tout sur l'énergie*

*Jacques Deferne*



## *Avant-propos*

*Les hommes primitifs ne disposaient que de leur force musculaire dont ils ont amélioré lentement l'efficacité en inventant quelques outils. Puis, ils ont réussi à domestiquer le feu qui leur a permis de se chauffer, de cuire leurs aliments, d'éloigner les animaux dangereux et, plus tard, à l'avènement de l'agriculture, de défricher la forêt.*

*Aujourd'hui l'homme utilise une quantité colossale d'énergie bon marché pour se chauffer, se réfrigérer, se déplacer, pour construire les maisons, pour les démolir, pour produire les objets de consommation dont il ne peut plus se passer. On voit que le recours à l'énergie a centuplé l'emprise de l'homme sur son environnement.*

*Mais qu'est donc cette énergie qui, comme le pacte de Faust avec le Diable, nous donne richesse et facilité, mais risque finalement de conduire notre humanité à la ruine ?*

*Ce texte essaye d'expliquer simplement ce qu'est l'énergie, quelles sont ses différentes formes et comment on peut la produire sans trop nuire à notre environnement.*

## Qu'est-ce que l'énergie?

Ce n'est pas une notion bien facile à comprendre. L'énergie est invisible. Simplement dit, c'est quelque chose qui permet d'effectuer un travail, faire avancer une voiture, monter un ascenseur, chauffer ou éclairer une maison.

C'est aussi ce qui permet non seulement l'existence des vagues, du vent, des tornades, des courants marins, de la pluie, mais aussi les mouvements de nos muscles ou la croissance des plantes. C'est aussi de l'énergie interne de notre planète qui est à l'origine des volcans, des tremblements de terre, de la formation des montagnes et de leur érosion.

### Comment les physiciens définissent-ils l'énergie ?

Leur définition semble simple à leurs yeux. Mais pour un profane, ce n'est pas si facile de comprendre leur définition. La voici :

**L'énergie est la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur.**

Il est fort probable que vous n'avez rien compris à cette définition abstraite. Essayons tout de même de faire comprendre cette notion par des exemples :

**Modifier un état**, par exemple, c'est faire passer une masse d'eau d'une position élevée à une position basse. Cela produit un travail à condition bien évidemment qu'en changeant d'état, l'eau ait entraîné la roue d'un moulin. **Le système**, ici, est l'installation technique du moulin.

Modifier un état c'est aussi faire passer une masse d'eau de 60° à 40°, la différence ayant servi, après avoir traversé un système de radiateurs, à chauffer votre maison.

Dans les deux exemples choisis, il y a eu modification d'un état par l'intermédiaire d'un système. Ce qui est remarquable, c'est que, dans le premier exemple, l'énergie perdue par l'eau qui a changé d'altitude a été entièrement récupérée par le moulin. On peut donc, à première vue, appliquer à l'énergie la formule attribuée à Lavoisier et qui constitue aussi le premier principe de la thermodynamique :

**Rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme**

### La nature utilise aussi de l'énergie

Toute l'activité de la nature est fondée sur l'énergie. Le Soleil réchauffe la Terre d'une manière différenciée : les parties proches de l'équateur reçoivent beaucoup de chaleur, les parties proches des pôles en reçoivent peu. Il y a transfert de chaleur des basses latitudes vers les latitudes élevées par le biais des vents. Les vents entraînent à leur tour les masses océaniques dans de vastes courants marins qui circulent tout autour de la planète. Les océans empruntent de l'énergie solaire pour évaporer l'eau superficielle et alimenter les nuages. Ces

derniers sont à l'origine des précipitations qui vont ruisseler sur les pentes et utiliser leur énergie pour éroder les continents.

Les vents, les précipitations, l'érosion, la croissance de la végétation et la vie animale utilisent et transforment l'énergie dans un vaste système dont les divers états se modifient en permanence pour assurer la vie sur notre planète.

### *Il y a diverses formes d'énergie*

On devine que l'énergie peut se manifester de plusieurs manières et qu'elle peut se concentrer sous des formes diverses. Ce sont principalement :

- l'énergie cinétique renfermée dans un corps en mouvement,
- l'énergie potentielle d'une masse située dans une position élevée,
- la chaleur,
- l'énergie solaire,
- l'énergie nucléaire issue de la fission de l'uranium,
- l'énergie musculaire produite par la dégradation des aliments que nous absorbons.

Dans la liste ci-dessus, je n'ai pas mentionné l'électricité qui, nous le verrons par la suite, n'est pas vraiment une énergie en soi mais un **vecteur d'énergie**.

### *Unités utilisées pour quantifier l'énergie*

Suivant la forme d'énergie considérée on peut adopter des unités différentes dont les principales sont les suivantes :

- **le joule** [J] est l'énergie nécessaire pour communiquer à une masse d'un kg une vitesse (horizontale) de un mètre par seconde;
- **la calorie** [cal] est l'énergie nécessaire pour élever de 1° celsius un gramme d'eau. On utilise plus généralement la **grande calorie** [kcal] qui correspond à l'élévation de 1° de 1000 g d'eau.
- Une calorie = à 4.18 joules, 1 kcal = 4'180 joules.
- **le watt x seconde**, unité employée plus communément en électricité, correspond à un joule. On utilise plus fréquemment le **kilowattheure** [kWh], (unité que nous facture notre fournisseur d'électricité) qui correspond à la consommation de 1000 watt pendant une heure, soit 3'600'000 joules.

On utilise encore d'autres unités, mais il n'est pas utile de les signaler toutes ici. Mentionnons tout de même l'énergie que renferme une tonne de pétrole ou une tonne de charbon. On parle de tonne équivalent pétrole, [tep] ou de tonne équivalent charbon, [tec] :

- 1 tep = 41.868 milliards de joules,
- 1 tec = 29.3 milliards de joules

Ces deux dernières unités servent surtout à comparer entre elles les consommations globales à l'échelle des divers pays.

## Force, énergie, travail

Il faut préciser le rapport qu'il y a entre ces notions qui se ressemblent mais qui ont des significations un peu différentes.

- **La Force** est définie par les physiciens comme une action mécanique capable de créer une accélération, c'est-à-dire de pouvoir modifier la vitesse d'un objet. L'unité de force est le **Newton [N]**. C'est la force nécessaire pour modifier la vitesse horizontale d'une masse de 1 kilo, de 1 mètre seconde, chaque seconde.



60 kg ou 580 N

Unité de force : Newton [N]

C'est la force nécessaire pour modifier la vitesse d'une masse de 1 kilo de 1 mètre seconde par seconde :

$$1 \text{ N} = \frac{1 \text{ kg} \times \text{m}}{\text{s}^2}$$

Pratiquement, on connaît mieux le kilogramme-force [kgf] qui est l'unité dont se sert votre épicier pour mesurer la quantité de pommes-de-terre qu'il vous vend.

Le kilogramme-force est la force exercée par une masse de 1 kg dans le champ de gravité terrestre et qui vaut 9.81 N. Lorsqu'on parle du poids d'un homme de 60 kg, il s'agit en fait de la force qu'il exerce sur le sol, exprimée en kgf. On pourrait changer d'unité et dire qu'il exerce sur le sol une force de 580 Newton ! On voit que l'application d'une force provoque une variation de vitesse, c'est donc une **accélération !**

- **Le Travail** est produit par la force lorsque son point d'application se déplace. L'unité de travail est le joule [J]. Elle est identique à celle de l'énergie.

Unité de travail : Joule [J]

C'est donc l'énergie nécessaire pour communiquer à une masse d'un kilo une vitesse de un mètre par seconde.

- **L'Énergie** semble être, à première vue, intimement liée au travail. Il est difficile de saisir la différence de ces deux notions qui utilisent toutes deux la même unité. On pourrait dire que l'énergie c'est le potentiel qui peut produire un travail. Au moment où le travail s'effectue, l'énergie semble disparaître. En réalité elle se transforme. L'énergie permet alors d'effectuer **un travail**.

## Jouons avec les unités

Si les physiciens utilisent les joules, on utilise plus volontiers dans la vie courante le kilowattheure [kWh], la kilocalorie [kcal] (surtout ceux qui font un régime alimentaire) et d'autres unités plus prosaïques comme le litre d'essence (pour la voiture) ou la tonne de mazout pour le chauffage. Cela est dû au fait qu'on vend l'essence (une quantité d'énergie) par litre, le mazout par centaines de litres et l'électricité par kilowattheure. Vous auriez probablement du mal à vous faire comprendre en demandant à votre pompiste 500 millions de joule d'essence ou encore 800 kcal de pommes-de-terre à votre épicier.

## Prenons conscience de la valeur de l'énergie !

Si vous pédalez énergiquement sur un vélo d'appartement pendant une journée entière, vous aurez dépensé (ou produit si vous êtes relié à un générateur d'électricité) à peu près un kWh !

On pourrait donc utiliser aussi comme unité d'énergie **la journée de pédalage** ! En consultant le tableau ci-dessous vous constatez qu'il faut pédaler une semaine entière pour produire l'énergie nécessaire pour prendre un bain, environ cinq ans pour un voyage en avion à New-York et deux à trois ans pour le plein d'essence de votre voiture !



## La nature mobilise de grandes quantités d'énergie

### Exemple de consommation d'énergie dans la vie courante

	joules	kcal	kWh
énergie contenue dans 1 litre d'essence	$50 \times 10^6$	12 000	13,9
prendre un bain dans sa baignoire	$27 \times 10^6$	6 500	7,5
Paris-New-York en avion par passager	$7 \times 10^9$	$1.6 \times 10^6$	1 945

Le tableau suivant donne quelques exemples de la dissipation d'énergie dans des situations qui nous sont familières.

On voit qu'on peut exprimer une quantité de charbon, de pétrole ou de gaz en unités d'énergie, soit en joules, en kcal ou encore en kWh.

Au vu de ce tableau, on se rend compte que nos réserves énergétiques ne sont pas inépuisables. On constate, en lisant cette statistique et en mettant en relation les réserves connues et notre consommation annuelle, qu'il ne nous resterait que 60 ans de réserve de pétrole, 57 ans de gaz et 147 ans de charbon ! Ces estimations sont très approximatives et dépendent du prix que nous sommes prêts à payer !

Ainsi à un euro le litre, il n'y a plus beaucoup de pétrole; à deux euros le litre, il y en a encore passablement, à 10 euros il y en a encore beaucoup !

*Exemple de dissipation d'énergie dans la nature  
(exprimée en joules, kcal ou kWh)*

	<b>Joules</b>	<b>kcal</b>	<b>kWh</b>
<i>énergie dégagée par le Soleil par seconde</i>	$3.83 \times 10^{26}$	$915 \times 10^{20}$	$1.06 \times 10^{20}$
<i>énergie solaire reçue par la Terre par seconde</i>	$1.74 \times 10^{17}$	$415 \times 10^{11}$	$48.3 \times 10^9$
<i>énergie produite par un éclair de moyenne intensité</i>	$1.5 \times 10^9$	357 000	415
<i>éruption volcanique du Mont St-Hélène en 1980</i>	$1.69 \times 10^{18}$	$4.03 \times 10^{14}$	$4.69 \times 10^{11}$
<i>tremblement de terre dans l'Océan indien en 2004</i>	$1.33 \times 10^{20}$	$3.17 \times 10^{16}$	$3.7 \times 10^{13}$
<i>réserves estimées de pétrole dans le monde consommation annuelle de pétrole</i>	$7.2 \times 10^{21}$ $1.21 \times 10^{20}$	$1.72 \times 10^{18}$ $2.9 \times 10^{16}$	$2.05 \times 10^{15}$ $4.52 \times 10^{14}$
<i>réserves estimées de gaz dans le monde consommation annuelle de gaz</i>	$7.74 \times 10^{21}$ $1.34 \times 10^{20}$	$1.85 \times 10^{18}$ $3.2 \times 10^{16}$	$1.66 \times 10^{15}$ $3.3 \times 10^{14}$
<i>réserves estimées de charbon dans le monde consommation annuelle de charbon</i>	$24 \times 10^{21}$ $1.63 \times 10^{20}$	$5.77 \times 10^{18}$ $3.89 \times 10^{16}$	$5.55 \times 10^{15}$ $3.66 \times 10^{14}$

*Rappel : Chaque fois que l'exposant augmente d'une unité, cela revient à multiplier le terme précédent par 10. Ainsi  $10^9$  = un milliard,  $10^{18}$  = un milliard de milliards.*

### *La machine humaine a aussi besoin d'énergie !*

*Pour fonctionner, notre corps a besoin d'énergie. Cette énergie lui est fournie indirectement par le Soleil qui permet aux végétaux de croître. Par un long processus de transformation, les animaux herbivores dégradent ces végétaux et les transforment en viande.*

*L'homme mange les végétaux, les huiles végétales et la viande qui sont dégradés dans son système digestif et sont transformés en sucre et en graisse, des réserves d'énergie qui sont stockées dans son corps. D'autres réactions complexes se produisent pour assurer la production de chaleur nécessaire pour maintenir la température de notre corps à 37°. Lorsque nous faisons un effort, les muscles sollicitent à leur tour les réserves d'énergie qui lui sont nécessaires pour fonctionner. Toutes ces réactions qui utilisent ou restituent de l'énergie sont bien connues des diététiciens. Les quantités d'énergie sont exprimées en grandes calories [kcal]. Le contrôle des dépenses d'énergie nécessaire à notre activité en regard des calories que nous absorbons par le biais des aliments est souhaitable si nous voulons éviter le piège de l'embonpoint !*

<i>Le corps humain a besoin d'énergie</i>			
	<i>joules</i>	<i>kcal</i>	<i>kWh</i>
<i>besoin nutritionnel journalier de l'homme</i>	10 467 000	2500	2,9
<i>besoin nutritionnel journalier de la femme</i>	8 373 000	2000	2,3
<i>chaleur dégagée par heure par une personne au repos</i>	360 000	86,2	0,1
<i>marche rapide pendant une heure</i>	1 800 000	415	0,5
<i>course à pied pendant une heure</i>	4 186 000	1000	1,16
<i>une étape moyenne au Tour de France</i>	20000000	3500 à 5000	4 à 6
<i>contenu énergétique d'un kg de pommes-de-terre</i>	3 350 000	800	0,9
<i>contenu énergétique d'une entrecôte de 150 g.</i>	1 250 000	300	0,35
<i>contenu énergétique d'un verre de bière (33 cl)</i>	745 000	178	0,21

### *Le prix de l'énergie*

*Votre fournisseur d'électricité vous facture le kWh en moyenne aux alentours de 0.13 €. En réalité, vous payez plus cher, car votre facture prend en compte un abonnement et la location d'un compteur et, depuis peu, une taxe pour subventionner les énergies renouvelables. Le prix actuel de l'essence qui nous paraît élevé correspond aussi à environ 0.13 € le kWh. Ces prix sont relativement peu élevés : pour dissiper un kWh sur un vélo d'appartement, il faut pédaler énergiquement pendant une dizaine d'heures !*

### *Le coût d'une ascension au Mont-Blanc*

*La quantité d'énergie acquise (ou dépensée!) par un touriste dont le poids (bagage compris) est de 80 kg, qui se déplacerait à pied de Chamonix au sommet du Mont-Blanc (dénivellation. 3'700 m.) est égale à :*

$$80 \times 3700 \times 9.81 = 2'903'000 \text{ [joules]} \text{ (ou encore } 0.8 \text{ kWh)}$$

*Mais il faut tenir compte du rendement de la machine humaine qui ne se situe qu'aux alentours de 25%. Notre touriste a donc dépensé réellement 11'612'000 joules ce qui correspond environ à 3.2 kWh. Mais un treuil n'aurait eu besoin que*

*de 0.8 kWh d'électricité pour tirer notre touriste jusqu'au sommet du Mont-Blanc et cela ne lui aurait coûté que 0.10 € ! Vraiment, le coût de l'énergie n'est pas encore très élevé !*



## Il y a deux qualités d'énergie

L'énergie peut se présenter sous deux formes selon la façon dont elle est utilisée. Sans entrer dans les lois compliquées de la thermodynamique, on peut donner une explication simple de ces deux formes d'énergie.

- La première est la forme noble : c'est **l'énergie mécanique**.
- La seconde est une forme dégradée : c'est **la chaleur**.

Nous verrons plus loin les raisons de cette discrimination.

## L'énergie mécanique

C'est **l'énergie potentielle** que possède un corps situé dans une position élevée et qui la restitue en passant à une station plus basse. C'est, par exemple, l'énergie qu'on peut retirer directement de la dénivellation d'un cours d'eau par l'intermédiaire du moulin qui, à son tour, entraîne une meule pour moudre le grain ou anime les scies qui débitent les troncs d'arbres en planches. Dans les siècles qui nous ont précédés, les industries qui avaient besoin d'énergie s'installaient par nécessité le long des cours d'eau.



L'énergie potentielle est proportionnelle à la masse  $[M]$  multipliée par la différence d'altitude  $[h]$  et l'accélération de la pesanteur  $[g]$ , soit :

$$\text{Energie potentielle : } E_{\text{pot}} = M \times g \times h$$

L'énergie mécanique c'est aussi **l'énergie cinétique** que possède un corps en mouvement et qui la restitue en ralentissant. Elle est proportionnelle à la moitié de la masse en mouvement multipliée par le carré de la vitesse soit :

$$\text{Energie cinétique : } E_{\text{cin}} = \frac{M \times v^2}{2}$$

On peut aisément comprendre qu'une voiture roulant à 50 Km/h délivre beaucoup d'énergie lorsqu'elle s'écrase sur un obstacle. L'énergie a servi à tordre les tôles et à endommager l'obstacle. En doublant la vitesse, soit 100km/h, on quadruple l'énergie produite et les dégâts sont beaucoup plus importants ! Si la voiture avait tout simplement freiné, l'énergie produite l'aurait été sous forme de chaleur dissipée par les disques de freinage et la friction des pneus sur l'asphalte.

Energie cinétique d'une auto de 1500 kg  
roulant à 120 km/h ( $\approx 33$  m/s) :

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} \times 1500 \times 33^2 = 816'750 \text{ joules (0.227 kWh)}$$



## L'énergie cinétique et l'énergie potentielle sont interchangeables

Le **yo-yo** est un jouet constitué de deux disques parallèles solidaires d'un axe autour duquel on enroule une ficelle que l'on tient par son extrémité. En lâchant le yo-yo, celui-ci perd de l'énergie potentielle au cours de sa descente et la transforme en énergie cinétique en communiquant aux deux hémisphères une certaine vitesse de rotation. Arrivé au bas de sa trajectoire, l'énergie cinétique va servir à enrouler à nouveau la ficelle. Cela provoque la remontée du yo-yo qui regagne une grande partie de son énergie potentielle en perdant son énergie cinétique de rotation.



**Les montagnes russes** constituent un autre exemple de transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique : au sommet du parcours, les wagonnets ont emmagasiné une certaine quantité d'énergie potentielle qu'ils vont transformer en énergie cinétique au cours de la descente.

Parvenus au bas de leur parcours, l'énergie cinétique acquise pendant la descente va leur permettre de remonter vers le sommet où ils retrouveront leur énergie potentielle.

Les compagnies de transport en commun auraient intérêt à construire leur réseau en montagnes russes et disposer les stations aux sommets du circuit. Cela éviterait de dissiper l'énergie en freinage et les descentes disposées après les stations fourniraient l'accélération nécessaire pour la remise en route des rames !

Mais rassurez-vous, elles y ont pensé : les locomotives électriques récupèrent une partie de l'énergie de freinage en restituant du courant dans la ligne d'alimentation. Le rendement n'est toutefois pas très bon. Ainsi, le train du Gornergrat qui conduit les touristes de Zermatt (1650 m. d'altitude) au Gornergrat (3'000 m. d'altitude) restitue à la ligne d'alimentation, lors de la descente, le tiers de l'énergie électrique qu'il a consommée à la montée.



## La fée électricité nous a beaucoup aidés

Avec la découverte de l'électricité et l'invention des dynamos, des alternateurs et des moteurs, les industriels ont pu s'affranchir de l'obligation de rester le long des cours d'eau. Ainsi les lignes électriques ont permis d'éloigner les utilisateurs de la source productrice. Les pertes d'énergie qui se produisent inévitablement dans l'échauffement des alternateurs, des moteurs et des lignes électriques sont assez faibles et une bonne partie de l'énergie produite par le turbinage des eaux est effectivement utilisable par l'intermédiaire de la fée électricité.

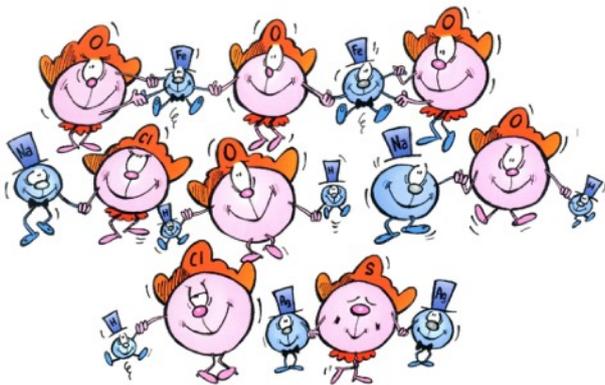
## Mais l'électricité n'est qu'un vecteur d'énergie !

Il faut bien prendre conscience que l'électricité n'est pas une énergie en soi mais un **vecteur de l'énergie**. Dans le cas d'une production hydroélectrique, c'est la chute d'eau qui produit l'énergie. Ainsi l'énergie consommée par les déplacements d'un ascenseur dans un immeuble est produite du côté de l'usine électrique par la perte d'altitude d'une certaine quantité d'eau.

On parle incorrectement d'énergie électrique; on devrait être plus rigoureux et parler d'**énergie hydroélectrique**, terme dans lequel on reconnaît la vraie source de l'énergie - la chute d'une certaine quantité d'eau - ou d'**énergie thermoélectrique** lorsque l'origine de l'énergie est une centrale thermique. Dans ce dernier cas, il faut encore préciser quel combustible est utilisé pour produire la vapeur : le charbon, le pétrole, le gaz ou une réaction nucléaire !

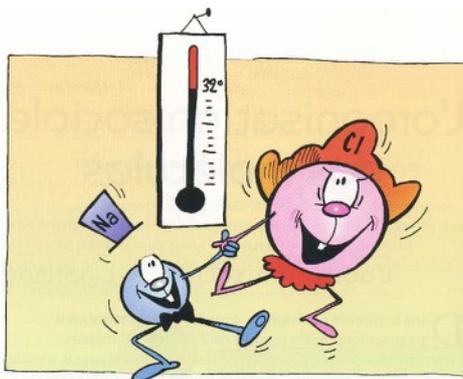
## Chaleur et température

Avant le développement de la thermodynamique, on n'avait pas une idée bien claire sur ce qu'était la chaleur. On parlait d'un fluide invisible, le calorique, qui pouvait circuler d'un corps à l'autre. On sait aujourd'hui que la chaleur est l'expression de l'agitation des molécules d'un corps. La température est donc la mesure de l'agitation des molécules.

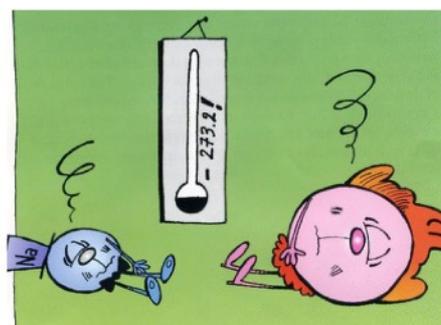


Dans le monde des atomes, tous les personnages sont joyeusement agités par des mouvements dansants incessants. Certains même se déplacent infatigablement à toute vitesse, en tous sens, rebondissant contre leurs congénères ou contre les obstacles qu'ils rencontrent. Cette agitation est permanente. Mais contrairement aux Terriens qui s'agitent et battent des pieds pour se réchauffer lorsqu'il fait froid, les habitants du Monde des Atomes sont d'autant plus agités qu'il fait plus chaud.

Cette agitation diminue lorsqu'il fait plus froid et ils tombent même en léthargie lorsque la température s'approche de  $273,2^\circ$  au dessous de zéro. Cette température extrême est appelée «zéro absolu». Les physiciens ont démontré qu'il était impossible d'obtenir une température inférieure à cette limite.



Plus il fait chaud, plus ils sont agités



A  $-273,2^\circ$ , ils tombent en léthargie

## La chaleur, une forme dégradée d'énergie

C'est une forme d'énergie qu'on pourrait qualifier de **bâtarde** ou de **dégradée**. En réalité, il faut préciser que lorsqu'on dit chaleur, on entend source de chaleur par rapport à un environnement plus froid.

Une source de chaleur peut produire de l'énergie mécanique (énergie noble) par l'intermédiaire d'une **machine thermique**. Les principales machines thermiques que nous connaissons sont les machines et les turbines à vapeur, les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz et les réacteurs d'avion.



Toutes ces machines sont soumises aux lois inexorables de la thermodynamique qui ne leur accordent qu'un rendement assez faible. Ainsi les vénérables locomotives à vapeur gaspillaient la plus grande partie de l'énergie - qu'elles tiraient de la combustion du charbon ou du mazout - à chauffer le ciel, car elles n'utilisaient guère que le 20% de cette énergie pour faire avancer le train.

## La thermodynamique est née avec la machine à vapeur

L'invention de la machine à vapeur, dans la deuxième moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, a fait prendre conscience aux physiciens qu'il y avait une relation entre la chaleur et l'énergie mécanique. De l'étude de cette relation est née une nouvelle discipline de la physique : **la thermodynamique**. Elle étudie, en premier lieu, le comportement des gaz (température, pression, volume) soumis à un apport de chaleur. En second lieu elle étudie comment ces gaz peuvent fournir de l'énergie à travers le système d'une machine thermique : machine à vapeur, turbine à gaz, moteur à explosion.

**La thermodynamique** est née de la question : qu'est-ce qui relie la chaleur au travail ? Et, subsidiairement, comment les machines thermiques convertissent-elles la chaleur en travail ? Elle est fondée sur plusieurs principes qui s'expriment de la manière suivante :

- L'énergie ne peut pas disparaître ou se créer mais seulement se transformer,
- il est impossible de transformer toute la "chaleur" d'une source réservoir en travail,
- l'évolution d'un système s'effectue dans le sens ordre → désordre,
- plus un corps est froid, plus il est difficile à refroidir. On ne peut pas atteindre le zéro absolu.

La thermodynamique est une science ardue basée sur un principe fondamental : la création spontanée d'énergie n'existe pas. Il est donc inutile de chercher le "**mouvement perpé-**

**uel"!** Comme tout principe, il ne se démontre pas mais reste posé tant qu'aucune expérience ne l'a mis en défaut. La thermodynamique montre encore qu'il n'est pas possible de transformer toute la «chaleur» d'un réservoir en travail, ce qui explique le rendement relativement médiocre des machines thermiques.

Elle montre encore que plus un corps est froid, plus il est difficile à refroidir. Il existe donc une limite inférieure à la température qui est de  $-273.15$  degré Celsius. C'est le **zéro absolu**.

### **James Prescott Joule (1818 - 1889), un des pères de la thermodynamique**

James Joule est né à Manchester dans une famille où l'on est brasseur de père en fils. Tout d'abord éduqué dans sa famille, il fréquente ensuite la Manchester Literary and Philosophical Society où il a la chance de suivre l'enseignement du chimiste John Dalton.

Sa contribution majeure à la science est d'avoir démontré que la chaleur était une forme d'énergie. Il mesura, dans un calorimètre, l'augmentation de la température de l'eau provoquée par le frottement d'une roue à ailettes entraînée, à l'aide d'un système de poulies, par la chute d'une masse.

Dans les unités de l'époque, il énonça qu'il fallait une énergie de 773 pieds-livres pour élever d'un degré Fahrenheit une livre d'eau. La thermodynamique était née !

La communauté scientifique lui a rendu hommage en donnant son nom à l'unité de mesure d'énergie, de travail et de quantité de chaleur. Un joule correspond à l'énergie nécessaire pour communiquer à une masse d'un kg une vitesse horizontale de un mètre par seconde.

Il a également énoncé une relation entre le courant électrique traversant une résistance et la chaleur dissipée par celle-ci, appelée la loi de Joule.

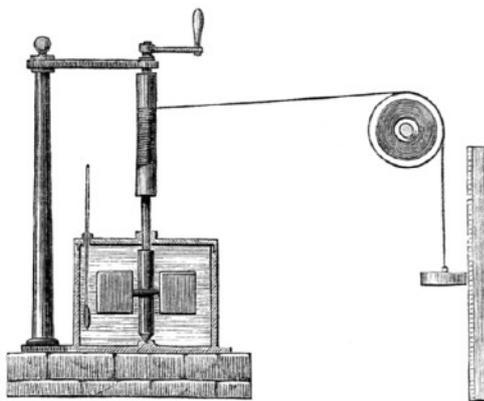
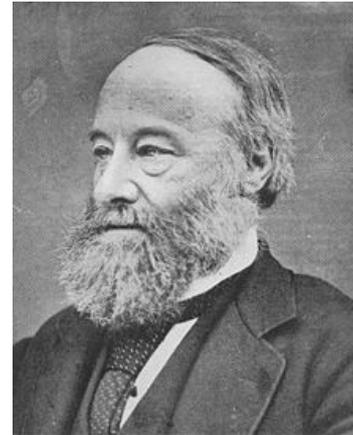


Schéma de l'appareil utilisé par Joule pour mesurer l'équivalence de l'énergie et de la chaleur



L'appareillage original utilisé par Joule

## Ces deux formes d'énergie ne sont pas de même qualité

- **L'énergie mécanique** peut se transformer (et se transforme inexorablement) en chaleur avec un rendement de 100 %.
- **Une source de chaleur** ne peut être transformée en énergie mécanique qu'avec un rendement limité à 35 % environ, dans le meilleur des cas. Les 65 % perdus demeurent sous forme de chaleur un peu moins chaude.

Ce sont ces propriétés qui nous conduisent à parler **d'énergie noble** pour la première et **d'énergie bâtarde** (ou énergie dégradée) pour la seconde. Ainsi le pétrole, le charbon, le gaz ou les combustibles nucléaires sont des formes d'énergie bâtarde dans la mesure où on veut les transformer en énergie mécanique, puisqu'on ne peut guère récupérer que le 35 % de l'énergie mécanique qu'ils renferment. Par contre, ces combustibles peuvent restituer toute leur énergie si on se contente d'utiliser la chaleur qu'ils peuvent produire à des fins de chauffage (chauffage domestique, eau chaude, fours à ciment, métallurgie).

Dans tous les cas, la totalité de l'énergie que nous utilisons finit par se dégrader. Elle se transforme inexorablement en chaleur qui est diffusée dans l'espace interplanétaire sous forme d'un rayonnement infrarouge.

## L'énergie ne disparaît jamais !

Imaginez que vous faites une excursion en automobile. Vous avez parcouru une centaine de kilomètres, franchi quelques cols puis vous êtes revenu à votre point de départ. Vous avez consommé une certaine quantité d'essence. Où donc a passé l'énergie dont vous avez eu besoin pour votre périple ? L'essence, ce concentré d'énergie utilisé par votre moteur, a été entièrement dissipée dans l'environnement sous forme de chaleur produite par le mauvais rendement du moteur, le frottement de l'air, l'échauffement des freins, l'usure des pneus et du revêtement bitumineux de la route. Toute l'énergie mécanique développée par votre automobile s'est finalement diluée dans notre environnement sous forme de chaleur (pas très chaude). Malheureusement, cette nouvelle forme d'énergie, très dégradée, n'est plus utilisable. C'est l'entropie qu'on peut définir comme étant le processus par lequel l'énergie disponible se transforme, après usage, en énergie très diluée, non disponible. On peut résumer ce principe :

*Dans un système isolé, l'énergie a tendance à se disperser le plus possible.*

## L'entropie ne peut qu'augmenter

Le charbon et les hydrocarbures, qui sont des formes fossiles d'énergie solaire, dispersent leur énergie lors de leur transformation en travail par le biais des machines à vapeur et des turbines. Ce sont ces combustibles qui fournissent la plus grande partie de l'énergie que le monde consomme aujourd'hui.

Dans un moteur ou une turbine, la chaleur produite a été utilisée partiellement, environ 35 %, pour produire du travail. Le solde, 65% environ, est dispersé dans l'atmosphère sous forme de chaleur un peu moins chaude dans de majestueuses tours de refroidissement et contribue ainsi à l'homogénéisation thermique de notre environnement. Cette

chaleur n'est alors plus disponible pour produire un travail. L'épuisement progressif des énergies fossiles est la démonstration la plus évidente d'une loi de la nature :

***l'entropie augmente inexorablement !***

Cela explique pourquoi un café brûlant se refroidit avec le temps alors qu'un café tiède ne va pas se réchauffer, que la pomme de Newton tombe de l'arbre mais remontera plus sur sa branche !



*Tour de refroidissement*

### ***Le cas ambigu des pompes à chaleur***

En Europe, près de la moitié de l'énergie consommée est destinée à chauffer les maisons en hiver. Les milieux écologistes vantent le chauffage des habitations au moyen de pompes à chaleur. Cette alternative peut sembler séduisante, mais à y regarder de plus près, ce n'est pas aussi avantageux qu'on pourrait le croire. Pour la démonstration, je distingue deux types d'énergie :

- l'énergie mécanique qui vous est transmise par le biais de l'électricité,
- la chaleur que vous apporte la combustion du charbon, du bois, de mazout, du gaz ou une réaction nucléaire.

L'énergie mécanique peut se transformer totalement en chaleur avec un rendement de 100%. Je la qualifie **d'énergie noble**.

La transformation de la chaleur en énergie mécanique nécessite l'usage d'une machine thermique, moteur à explosion, machine à vapeur ou turbine. Les lois de la thermodynamique sont implacables et le rendement obtenu n'excède pratiquement pas 35%. Le 65% restant est rejeté dans l'atmosphère sous forme de chaleur, un peu moins chaude ! Ce sont des considérations pédagogiques qui m'ont poussé à qualifier l'énergie mécanique de noble et la chaleur d'énergie bâtarde.

### ***Usage d'une pompe à chaleur***

Avant l'installation d'une pompe à chaleur vous chauffiez votre maison avec un combustible, le mazout ou le gaz naturel. La totalité de la chaleur était utilisée pour votre chauffage. Pour la pédagogie, divisons la quantité consommée de combustible en trois tiers :

*Chauffage classique (combustible):*

$\frac{1}{3}$  d'énergie bâtarde +  $\frac{1}{3}$  d'énergie bâtarde +  $\frac{1}{3}$  d'énergie bâtarde

Avec la pompe à chaleur on vous assure que vous n'utiliserez plus qu'un tiers de l'énergie que vous dépensiez précédemment. Mais c'est une énergie mécanique, une pompe qui fonctionne à l'électricité. C'est donc un chauffage électrique !

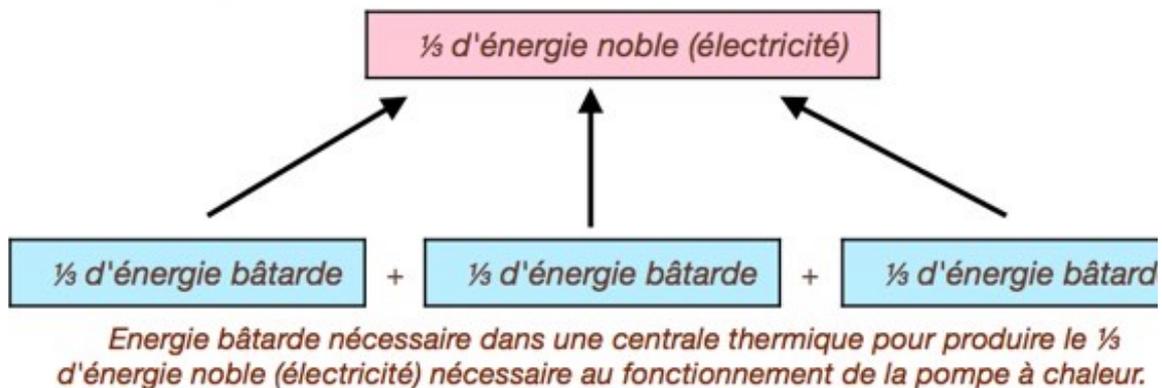
### Chauffage au moyen d'une à pompe chaleur :

$\frac{1}{3}$  d'énergie noble (électricité)

#### Comment produire l'électricité nécessaire à votre pompe à chaleur

En hiver, vous ne pouvez pas compter sur les panneaux photovoltaïques et assez peu sur les éoliennes lorsque l'anticyclone des Açores est présent. A part les quelques pays qui possèdent des ressources hydro-électriques, l'électricité dont vous avez alors besoin pour votre pompe à chaleur provient de centrales thermiques dont le rendement n'excède guère 35 %. Pour produire cette quantité d'électricité, il faut :

Fonctionnement électrique d'une à pompe chaleur et quantité d'énergie nécessaire à produire cette électricité



#### Conclusion

Si l'électricité qui fait fonctionner votre pompe à chaleur provient d'une centrale thermique, ce qui est généralement le cas, la consommation de combustible n'a pas changé. Les seuls avantages sont la délocalisation de la pollution, le bénéfice substantiel de l'installateur ainsi que celui du fournisseur d'électricité ! L'économie de CO<sub>2</sub> est donc nulle.

Toutefois, les électriciens ont promis de construire des centrales thermiques dans lesquelles on valoriserait la chaleur aujourd'hui rejetée dans l'environnement. Il faudra donc attendre encore un peu !

## Les diverses sources d'énergies

Tout comme les animaux, les premiers groupes humains qui ont commencé à peupler notre planète n'avaient pas d'autres sources d'énergie que leurs muscles. Avec la maîtrise du feu, ils ont pu se chauffer et cuire leurs aliments. Puis ils ont utilisé la force musculaires des animaux pour le transport et le labour des champs. Ils ont profité du vent pour faire avancer leurs embarcations.

C'est la mise au point des moulins à vent et surtout des moulins à roue le long des cours d'eau qui leur a permis de développer des industries plus gourmandes en énergie.

Mais le grand saut a été l'invention de la machine à vapeur qui a provoqué l'avènement de l'ère industrielle, puis celle du moteur à explosion. Mais il a fallu abattre de grandes quantités d'arbres, exploiter le charbon, puis les hydrocarbures.

## Nous somme devenus des dévoreurs d'énergie

Aujourd'hui, nous sommes obligés d'exploiter et brûler d'immenses quantités de charbon, de pétrole, de gaz pour maintenir le confort de milliards d'individus au détriment de notre environnement qui se détériore de jours en jours.

<i>Production énergétique mondiale selon la source d'énergie (chiffres fournis par l'Agence internationale de l'énergie)</i>			
<i>Énergie</i>	<i>Production en 2017</i>	<i>Production 2017 en Mtep</i>	<i>Proportion en 2017</i>
<i>Pétrole</i>	<i>92,65 Mbbbl/j</i>	<i>4 387</i>	<i>32,5%</i>
<i>Charbon</i>	<i>7 727 Mt</i>	<i>3 767</i>	<i>27,9%</i>
<i>Gaz naturels</i>	<i>3 680 Gm<sup>3</sup></i>	<i>3 165</i>	<i>23,4%</i>
<i>Hydraulique</i>	<i>4 060 TWh</i>	<i>919</i>	<i>6,8%</i>
<i>Nucléaire</i>	<i>2 636 TWh</i>	<i>596</i>	<i>4,4%</i>
<i>Éolien</i>	<i>1 123 TWh</i>	<i>254</i>	<i>1,9%</i>
<i>Solaire photovoltaïque</i>	<i>443 TWh</i>	<i>100</i>	<i>0,7%</i>
<i>Géothermie, Biomasse</i>	<i>586 TWh</i>	<i>133</i>	<i>1,0%</i>
<i>Biocarburants</i>	<i>350 TW/h</i>	<i>84</i>	<i>0,6%</i>
<b><i>Total énergie primaire</i></b>	<b><i>13 511 Mtep</i></b>	<b><i>13 511</i></b>	<b><i>100%</i></b>

*Mbbbl/j = millions de baril par jour    Mt = millions de tonnes    Gm<sup>3</sup> = milliards de m<sup>3</sup>  
TWh = 1 milliards de kWh    Mtep = 1 millions de tonnes équivalent pétrole*



*Centrale thermique au charbon de Belchatow, Pologne  
(source : Darek Redos / AFP).*

*Un tiers de la chaleur est convertie en énergie mécanique. Les deux-tiers restants sont dissipés dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Cette centrale consomme une tonne de charbon par seconde !*

### *Niveau de vie et consommation d'énergie*

*Pour notre confort nous devons dépenser des quantités immenses d'énergie. Le tableau ci-dessous montre quelle est la consommation journalière de chaque individu en fonction du niveau de vie.*

<i>Consommation quotidienne d'énergie par pays et par habitant (source : Key World Energy Statistics)</i>					
	<i>tep/année*</i>	<i>kWh/jour</i>		<i>tep/année</i>	<i>kWh/jour</i>
<i>Qatar</i>	<i>18,5</i>	<i>590</i>	<i>Allemagne</i>	<i>3.82</i>	<i>121</i>
<i>U.S.A.</i>	<i>6,81</i>	<i>216</i>	<i>Chine</i>	<i>2,14</i>	<i>68</i>
<i>Russie</i>	<i>5,27</i>	<i>168</i>	<i>Brésil</i>	<i>1.42</i>	<i>42</i>
<i>France</i>	<i>3,86</i>	<i>123</i>	<i>Inde</i>	<i>0.64</i>	<i>20</i>

*\* tonnes équivalent pétrole par an*

*La consommation d'énergie est donc étroitement liée à notre niveau de vie et obéit à l'équation :*

$$Q_E = k (N \times R)$$

*où **N** = nombre d'individus, **R** = revenu de chacun et **k** un facteur qui englobe les diverses mesures anti-gaspillages. Il en ressort clairement que la consommation d'énergie est directement proportionnelle au revenu de chacun.*

On constate que dans notre environnement européen, la dépense d'énergie quotidienne induite par notre mode de vie équivaut à environ 120 kWh par habitant. Plus de 80% de cette énergie provient de la combustion du charbon et des hydrocarbures.

La consommation par habitant des pays à bas revenus est beaucoup plus faible, mais, ne nous y trompons pas, leur ambition et d'atteindre le niveau de confort des pays dits développés. Chaque Chinois rêve de posséder une voiture et manger au McDonald !

Les chiffres exceptionnels concernant le Qatar s'expliquent par l'énergie que consomment les usines de désalinisation de l'eau de mer, par l'usage généralisé de la climatisation et par les programmes démentiels de construction de gratte-ciels.

### **Le Soleil est notre principal pourvoyeur d'énergie**

Tout comme Monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, nous utilisons depuis longtemps l'énergie solaire sans nous en rendre compte !

L'énergie hydroélectrique est de l'énergie solaire, car les précipitations qui alimentent les bassins d'accumulation et les fleuves proviennent des nuages, eux-mêmes produits par l'évaporation des eaux superficielles des océans sous l'effet du rayonnement solaire.

Les éoliennes, versions modernes des antiques moulins à vent, utilisent les courants aériens engendrés par l'action du soleil. Toutes les formes de vie, en particulier la croissance des arbres et des forêts, doivent leur existence à l'énergie solaire. Le charbon et le pétrole sont les témoins dégradés des déchets de la vie. Leur consommation aujourd'hui ne fait que restituer l'énergie solaire empruntée, il y a des dizaines ou des centaines de millions d'années. Les aliments que nous mangeons ont été produits grâce à l'énergie solaire, ce qui implique que notre énergie musculaire est indirectement de l'énergie solaire.

Le charbon et le pétrole sont des formes fossiles d'énergie solaire. Les régimes des vents et des précipitations sont des formes presque instantanées (à l'échelle géologique) de cette même énergie. Il n'y a en réalité que l'énergie nucléaire qui ne soit pas une forme d'énergie solaire.

<i>Principales sources d'énergie utilisées par l'Homme</i>		
<i>Energie solaire fossile</i>	<i>charbon</i>	<i>Energie bâtarde</i>
	<i>pétrole</i>	
	<i>gaz</i>	
<i>Energie solaire récente</i>	<i>biomasse</i>	
<i>Energie solaire instantanée (ou presque)</i>	<i>énergie hydraulique</i>	<i>Energie noble</i>
	<i>éolienne</i>	
	<i>photo-électricité</i>	
<i>panneaux solaires</i>		
<i>Chaleur fossile et radioactivité naturelle</i>	<i>géothermie</i>	<i>Energie bâtarde</i>
<i>Energie de liaison des noyaux atomiques</i>	<i>énergie nucléaire</i>	

Rappelons que j'appelle "énergie bâtarde" les sources de chaleur qui ne peuvent se transformer que très partiellement en énergie mécanique.

## *Ne l'oublions pas : l'énergie solaire est d'origine nucléaire !*

*L'énergie rayonnée par le Soleil provient d'une gigantesque réaction nucléaire qui se produit en permanence en son centre. Le Soleil réalise ce que nos chercheurs cherchent en vain à domestiquer depuis plus d'un demi-siècle : **la fusion nucléaire**.*

*Pour réaliser la fusion d'atomes d'hydrogène en atomes d'hélium, il faut une température initiale d'au moins 10 millions de degrés. C'est la température qui règne au centre du Soleil. Là, en permanence, 650 millions de tonnes d'hydrogène se transforment chaque seconde en hélium, fournissant une énergie colossale qui s'oppose à l'effondrement du Soleil sur lui-même et permet à notre étoile de rayonner de l'énergie vers l'espace intersidéral. Notre énergie solaire est donc de l'énergie nucléaire ! Au cours de cette réaction, 5'000 tonnes de matière disparaissent chaque seconde, converties en énergie [E] en accord avec la loi d'Einstein :  $E = m \times c^2$*

## *Utilisation directe du Soleil*

*On peut tirer parti du rayonnement solaire en installant des panneaux solaires thermiques qui produisent et accumulent de l'eau chaude destinée à un usage sanitaire ou à chauffer une habitation. On peut installer aussi des panneaux photovoltaïques qui transforment la lumière en électricité. On verra plus loin plus en détail cette technique. Aujourd'hui les forêts croissent toujours. Les mêmes causes, qui autrefois ont contribué à la formation du charbon et du pétrole, existent toujours aujourd'hui dans quelques grands bassins fluviaux et dans les deltas qu'ils engendrent. Le pétrole et le charbon continuent de se former aujourd'hui, mais à un rythme probablement 1'000'000 fois moins rapide que la consommation que nous en faisons !*

---

## La production d'énergie, source de pollution

Le recours à l'énergie induit inmanquablement une pollution. Il y a une relation directe entre l'usage de sources d'énergie et la pollution. Que ce soit dans le recours à l'énergie ou dans la quantité de pollution qui accompagne notre mode de vie, on retrouve une même relation :

$$Q_P = k (N \times R), \text{ pour la pollution}$$

$$Q_E = k (N \times R), \text{ pour l'énergie}$$

où  $Q_P$  et  $Q_E$  sont respectivement la quantité de pollution et d'énergie,  $N$  le nombre d'individus,  $R$  le revenu moyen de chacun et  $k$  un facteur qui tient compte des mesures prises pour diminuer la pollution ou modérer la consommation d'énergie. Il en ressort clairement que chaque fois que nous recourons à de l'énergie, nous induisons une pollution.

### L'énergie hydroélectrique

L'énergie hydroélectrique est la seule énergie qui n'implique aucune charge polluante notable pour notre environnement, si ce n'est l'impact de l'implantation des barrages sur le régime des rivières et sur la faune. Quelques barrages ont cependant été élevés sans qu'on mesure vraiment les conséquences que leur construction allait entraîner. Le barrage d'Assouan a bien régularisé le débit du Nil, mais il a aussi supprimé l'enrichissement en limon des terres autrefois périodiquement inondées et a fait disparaître les bancs de sardines - autrefois abondants - au large du delta du fleuve, entraînant du même coup la disparition des activités de pêche.

Cependant, si on ne tient pas compte de l'avis des poissons, on peut considérer l'énergie hydroélectrique comme globalement peu perturbatrice de l'environnement.

### Les combustibles fossiles polluent l'atmosphère

Il n'en va pas de même des combustibles fossiles, charbon, pétrole, gaz, qui polluent gravement l'atmosphère :

- ils consomment de quantités importantes d'oxygène,
- ils rejettent des gaz nocifs à la vie ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  etc...),
- ils rejettent des poussières souvent chargées de métaux lourds,
- ils nous laissent des quantités importantes de cendres chargées de produits toxiques.



L'accumulation de ces rejets dans l'atmosphère cause en premier lieu une nuisance directe importante sur la santé publique et, en second lieu, tendrait à modifier l'équilibre de l'effet de serre naturel qui contrôle la température moyenne de notre planète.

### Le gaz naturel, un combustible "propre" ?

Les milieux écologistes et les autorités politiques nous assurent que le gaz naturel est plus "propre" que le mazout ou le charbon. C'est partiellement vrai dans le sens qu'à production de chaleur égale, le gaz naturel rejette environ 30% de  $\text{CO}_2$  de moins que le pétrole ou le charbon. C'est un point de vue ! Mais il en rejette tout de même des quantités considérables !

*Mais ce qu'on ne nous dit pas, c'est que le gaz naturel est constitué essentiellement de méthane, un gaz à effet de serre trente fois plus efficace que le CO<sub>2</sub>, et que les fuites engendrées inmanquablement par les milliers de kilomètres de conduites souterraines contribuent largement à l'augmentation de l'effet de serre. Le gaz naturel n'est donc pas si innocent qu'on veut bien nous le faire croire.*

### **L'hydrogène source d'énergie non polluante ?**

*Monsieur Schwarzenegger, ancien gouverneur médiatique de la Californie, préconise sa solution: utiliser l'hydrogène comme carburant pour la voitures.*

*Oui, la combustion de l'hydrogène ne rejette dans l'atmosphère que de l'eau et, à ce titre, cela semble séduisant. Mais il ne nous dit pas où prendre l'hydrogène !*

*Il y a plusieurs façons de produire l'hydrogène mais toutes sont dévoreuses d'énergie. Là aussi, comme l'électricité, l'hydrogène n'est qu'un **vecteur d'énergie**. En brûlant, il ne fait que restituer une petite partie de l'énergie qu'on a dû dépenser pour le produire. Et si sa consommation est non polluante, sa production, elle, est très polluante car elle nécessite des centrales électriques. Monsieur Schwarzenegger ne fait donc que déplacer la pollution du site de consommation vers le site de production.*

### **Le cas du combustible nucléaire**

*L'énergie dite nucléaire est à classer dans les énergies que nous avons qualifiées de bâ-tardes ou dégradées. Elle tire sa source du dégagement de chaleur qui accompagne le phénomène de fission<sup>1</sup> de l'uranium. On doit considérer l'uranium comme un combustible dont l'impact sur l'environnement est différent de celui des combustibles fossiles.*

*Si la fission de l'uranium ne consomme pas d'oxygène, ne rejette ni gaz ni poussière ni ne perturbe l'effet de serre, son utilisation est soumise à des risques d'un autre ordre et les déchets radioactifs qu'elle produits posent des problèmes d'entreposage et de stockage. Par ailleurs, la sécurité du fonctionnement des centrales nucléaires pose aussi des problèmes complexes. Nous analyserons plus loin la nature de ces risques.*

#### **Pour assurer notre confort\***

*Les **combustibles fossiles** polluent gravement l'atmosphère, attentent à notre santé et contribuent, peut-être, au réchauffement de la Planète.*

***L'énergie nucléaire** ne perturbe pas l'atmosphère mais fait peser sur nous des risques d'un autre ordre et nous laisse des déchets désa-gréables à gérer !*

*Vous pouvez m'accuser de mauvaise foi et vous auriez partiellement raison! J'ai écrit ces lignes pour souligner surtout combien notre confort est dépendant de l'énergie !*

<sup>1</sup> Pour comprendre la fission, consultez, sur ce même site, «Le Monde étrange des atomes».

## Comment produire l'électricité ?

Nous avons vu que l'électricité n'était qu'un vecteur d'énergie et que c'est son mode de production qui implique une certaine perturbation de l'environnement. Les deux principaux moyens de production sont les centrales **hydroélectriques** et les **centrales thermiques**. On peut également produire de l'électricité par des panneaux photovoltaïques ou des éoliennes mais, pour l'instant du moins, les quantités produites sont marginales et leur utilisation est limitée à quelques situations particulières.

### L'électricité d'origine hydraulique

Les sources de production hydroélectrique sont les barrages au fil de l'eau qui exploitent de grandes quantités d'eau sous des chutes peu importantes - quelques dizaines de mètres au plus - et les bassins d'accumulation en altitude qui permettent de turbiner au bas des vallées de plus faibles quantités d'eau, mais avec des pressions importantes correspondant à des différences de niveau de plusieurs centaines de mètres, voire plus de mille mètres.

Les centrales hydroélectriques ont des puissances très diverses, allant de la petite installation régionale à des barrages géants, tels que Mauvoisin ou la Grande-Dixence, dans les Alpes suisses, qui alimentent plusieurs paliers d'usines de production. La puissance produite par ces usines est modulable rapidement et peut être adaptée en quelques secondes aux fluctuations de la demande des centres de consommation.

Ce type de production n'engendre aucune pollution atmosphérique. Par contre il est indéniable que la construction d'un barrage sur un cours d'eau peut entraîner des modifications de l'équilibre écologique le long de ses rives. De même, la création en montagne de grands barrages porte un certain préjudice au régime hydrologique des vallées sises en aval<sup>1</sup>.



Barrage de la Grande Dixence, 2365 m. (Suisse)  
hauteur du barrage = 285m

Il faut noter que les ressources hydroélectriques ne sont disponibles que dans les régions où les précipitations sont suffisantes et les reliefs bien marqués. Elles sont nulles dans les pays arides et difficilement exploitables dans les pays plats. Par ailleurs, dans les pays qui disposent d'importantes ressources hydrologiques, les aménagements hydroélectriques possibles sont presque tous achevés et l'on ne peut guère envisager d'en augmenter le nombre.

<sup>1</sup> Les riverains ne se plaignent pas trop : ils "vendent" l'eau de leurs vallées aux exploitants des barrages et en retirent des profits importants !

## L'électricité d'origine thermique

Dans les centrales thermiques, c'est l'utilisation d'une source de chaleur qui est à l'origine de la production électrique. Cela peut être le charbon, le pétrole, le gaz naturel ou un réacteur nucléaire. La source de chaleur sert à produire de la vapeur d'eau à des températures de l'ordre de 300° à 500° et à des pressions de plus de 200 atmosphères. Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur qui produit l'électricité.

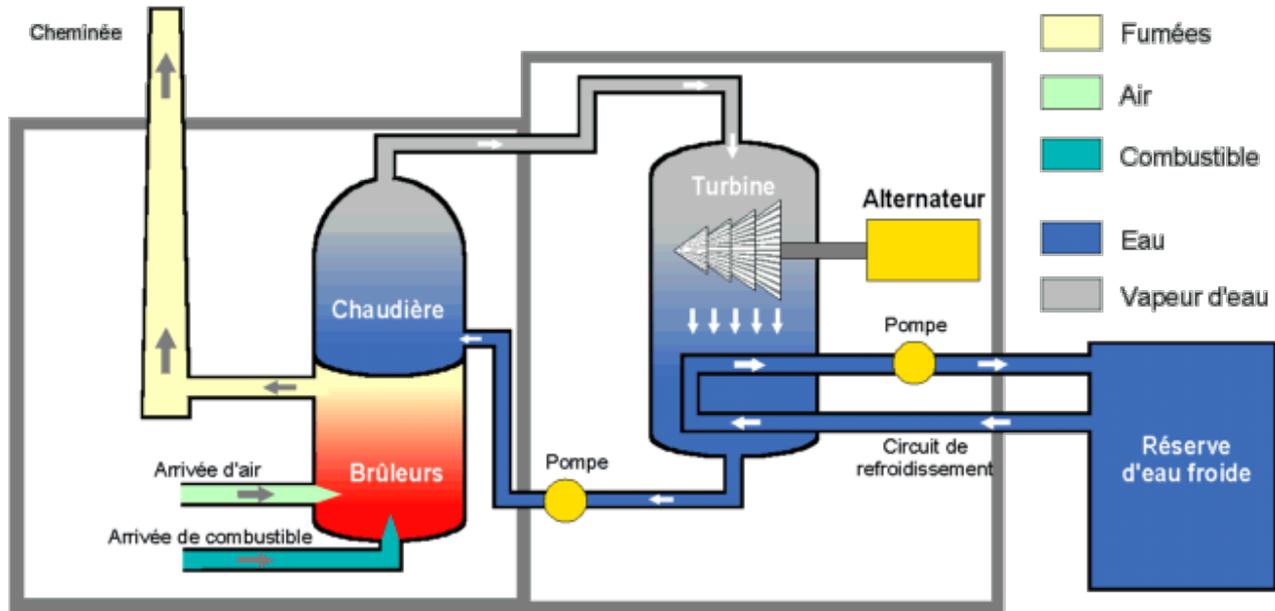


Schéma d'une centrale thermique

## Dissipation de la chaleur par les centrales thermiques

La turbine ne valorise qu'une partie de la chaleur de la vapeur. A la sortie, la vapeur résiduelle est encore très chaude et il faut la refroidir avant de pouvoir la réinjecter sous forme d'eau dans le chaudière. Cette vapeur résiduelle est refroidie dans des condenseurs.

L'eau des condenseurs qui sert au refroidissement est parfois rejetée directement dans une rivière. Le réchauffement des rivières et des fleuves par ces rejets modifie considérablement les conditions de la vie aquatique. Aussi a-t-on plutôt recours à ces immenses tours de condensations qui rejettent la chaleur dans l'atmosphère. De loin elles sont reconnaissables par le majestueux panache de vapeur d'eau qui s'en échappe.

L'énergie dissipée en chaleur est deux fois plus importante que l'énergie produite sous forme d'électricité. Une centrale d'une puissance électrique de 1000 mégawatts dissipe encore 2000 mégawatts supplémentaires sous forme de chaleur - pas très chaude - généralement non récupérée.



Tour de refroidissement de la centrale de Gösgen (Suisse)

Les centrales thermiques peuvent atteindre des puissances de production considérables. La complexité de leur fonctionnement fait qu'on ne peut pas moduler rapidement leur puissance. Il faut quelques heures pour arrêter ou mettre en marche une centrale alimentée au charbon, au gaz ou au pétrole, et environ vingt-quatre heures pour une centrale équipée d'un réacteur nucléaire. On peut aussi entraîner un alternateur au moyen d'un moteur à explosion. On parle alors de **groupe électrogène**. Cela va du petit générateur juste suffisant pour faire fonctionner les quelques ampoules d'une caravane de camping jusqu'aux puissants générateurs qui alimentent en électricité une petite agglomération isolée. Ces groupes ont un rendement encore plus faible que les grandes centrales thermiques et elles ne sont utilisées que lorsqu'on ne peut pas faire autrement. Ce sont surtout des groupes de secours qui sont mis en marche lors d'une panne du réseau ordinaire.

### Le cas du combustible nucléaire

L'uranium est le dernier élément naturel du tableau périodique de Mendeleïev. Il renferme deux isotopes en proportions inégales : 99.3 % d'Uranium 238 et 0.7% d'Uranium 235. On désigne ces deux isotopes par les symboles  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$ .

Le noyau de chaque isotope compte 92 protons.  $^{238}\text{U}$  comporte en outre 146 neutrons ( $92+146 = 238$ ), et  $^{235}\text{U}$  143 neutrons ( $92+143 = 235$ ). Les nombres 238 et 235 indiquent donc le nombre total des particules renfermées dans chacun des noyaux. Ces deux isotopes de l'uranium sont instables et se transmutent naturellement en d'autres éléments stables.

Cette transformation peut se faire selon deux processus très différents l'un de l'autre :

1. **la décroissance radioactive,**
2. **la fission nucléaire.**

### La décroissance radioactive<sup>1</sup>

Les deux isotopes de l'uranium sont instables et émettent naturellement des particules radioactives issues de leur noyau. Ces particules sont de trois types:

- les particules  $\alpha$ , constituées chacune de 2 protons 2 neutrons. Elle correspondent à des noyaux d'atome d'hélium.
- Les particules  $\beta$ , qui sont des électrons issus d'un neutron (qui se transforme alors en proton);
- Un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  semblable aux rayons X.

A chaque perte d'une particule  $\alpha$  ou  $\beta$  l'uranium se transforme en un autre élément et, après une série d'états intermédiaires successifs, chaque isotope aboutit à un atome stable qui est le  $^{206}\text{Pb}$  pour  $^{238}\text{U}$  et  $^{207}\text{Pb}$  pour  $^{235}\text{U}$ . Cette décroissance radioactive s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Mais comme la vitesse de transformation est très lente, ce dégagement de chaleur est économiquement inutilisable. Par ailleurs on ne peut

---

<sup>1</sup>

Les phénomènes de décroissance radioactive et de fission nucléaire sont expliqués de manière plus détaillée dans "Le Monde étrange des Atomes-", du même auteur et sur le même site.

pas utiliser ce phénomène pour produire de l'énergie car la décroissance radioactive est un phénomène aléatoire que les physiciens n'ont jamais réussi ni à accélérer ni à ralentir.

Par contre il faut tenir compte de ce processus en ce qui concerne les déchets nucléaires car, pour ceux-ci, c'est justement leur décroissance radioactive qui est problématique.

### La fission nucléaire

L'instabilité des atomes d'uranium peut se manifester d'une autre manière. Parfois, spontanément, un atome  $^{235}\text{U}$  se divise en deux atomes plus petits dont le total des masses est presque égal au poids de l'atome originel. La très faible différence de masse perdue dans l'opération se transforme en énergie (sous forme de chaleur) en obéissant à la fameuse loi d'Einstein :

$$E = m \times c^2.$$

En clair, cela signifie que l'énergie dégagée  $[E]$  est égale à la perte de masse  $[m]$  multipliée par le carré de la vitesse de la lumière  $[c^2]$ .

Cette quantité d'énergie, sous forme de chaleur, est colossale. De plus, les physiciens ont trouvé le moyen d'accélérer cette réaction nucléaire qui, dans la nature, est un phénomène d'une extrême rareté. On peut donc moduler à loisir les réactions de fission de l'uranium.

Une centrale nucléaire fonctionne comme une centrale thermique classique dans laquelle il y a production de vapeur qui entraîne une turbine couplée à un alternateur. La différence réside uniquement sur le combustible utilisé.

Pour éviter une dispersion de matériel nucléaire dans la turbine, on utilise deux circuits séparés avec un échangeur de chaleur étanche entre ces deux circuits.

Lorsqu'on arrête la réaction nucléaire, le combustible dégage encore une chaleur résiduelle due à la décroissance radioactive des déchets fortement radioactifs du combustible nucléaire. Cette production de chaleur intense diminue au cours des semaines qui suivent l'arrêt du réacteur. Pendant tout ce temps, il faut refroidir le cœur du réacteur pour qu'il ne surchauffe pas et risque de fondre.

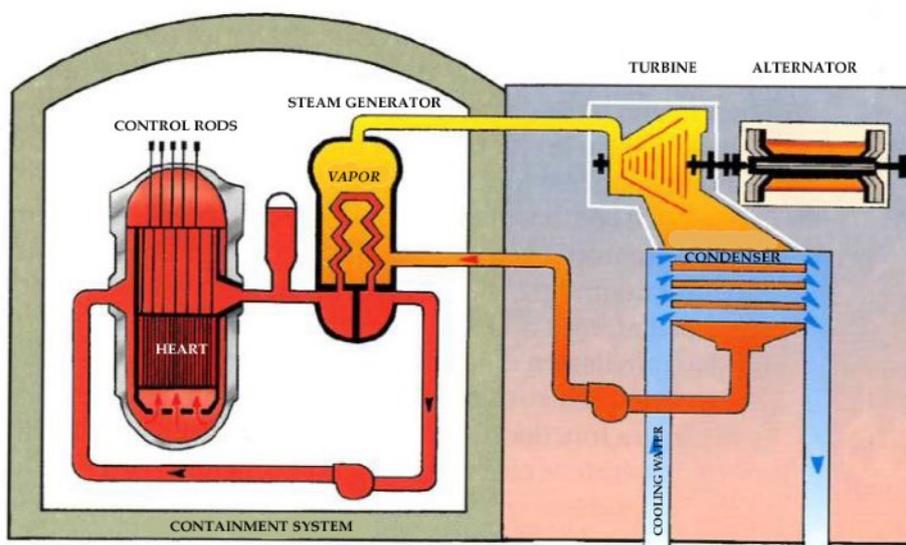


Schéma simplifié d'une centrale nucléaire

## Les déchets nucléaires

L'inconvénient de cette source de chaleur réside dans la nature des atomes créés par la fission de l'uranium : ce sont des éléments communs du tableau périodique mais dont les noyaux renferment tous un excès de neutrons. Ce sont donc des isotopes instables de ces éléments, qui tendent à se transformer ensuite plus ou moins rapidement en d'autres atomes stables par le biais du phénomène de la **décroissance radioactive**.

Ils émettent donc des particules radioactives pendant toute la durée de leur transformation vers leur état stable, et à ce titre, ils ne peuvent pas être abandonnés sans précautions dans la nature. Ce sont les **déchets nucléaires**.

Les neutrons, émis en abondance au cours de la fission, réagissent aussi avec les matériaux utilisés pour confiner le réacteur et induisent aussi des isotopes radioactifs dont il faudra tenir compte dans le processus de démantèlement final d'une centrale.

Les déchets les plus radioactifs sont ceux qui ont un demi-vie faible. Leur radioactivité diminue rapidement. Les déchets qui ont une demi-vie longue ont une radioactivité relativement faible, mais elle persiste longtemps. Ce sont eux dont la gestion reste problématique dans le temps.

## Etat de la production classique d'électricité.

Actuellement, une grande partie du potentiel hydroélectrique est déjà exploitée. Le nombre des centrales nucléaires plafonne à cause des craintes des populations à la suite des accidents qui se sont produits récemment au Japon et du souvenir de la catastrophe de Tchernobyl.

Par contre, les centrales thermiques alimentées par des combustibles fossiles ne cessent d'augmenter. Il y en a environ 550 en fonctionnement rien qu'aux U.S.A. Certaines consomment près de 300 kg de charbon par seconde. En Chine, chaque semaine on inaugure une nouvelle centrale à charbon. La pollution atmosphérique qu'elles engendrent est considérable.

## Production photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques transforment directement l'énergie solaire en courant continu. Le rendement est assez faible et n'atteint guère que 12% de l'énergie solaire reçue. Le coût du kWh obtenu est encore très supérieur à celui des autres sources d'électricité. La production est directement liée à l'ensoleillement, ce qui rend la production ins-



Installation de panneaux photovoltaïques sur un toit

*tantannée aléatoire. Par contre, couplé avec des batteries, l'usage de panneaux photovoltaïques est intéressant dans des régions éloignées non connectées à un réseau électrique, telles les maisons isolées ou les cabanes de montagnes. Actuellement, sous la pression des milieux écologistes, l'état subventionne indirectement l'installation de panneaux photovoltaïques en achetant à leurs propriétaires l'électricité à un prix supérieur à celui du marché. La production d'électricité photovoltaïque progresse et les recherches pour améliorer leur rendement sont importantes.*

### *Production par éoliennes<sup>1</sup>*

*La production d'électricité au moyen d'éolienne progresse rapidement. Les éoliennes actuelles développe en moyenne une puissance de 3 à 5 MW et fonctionnent environ 2000 heures par an. Pour avoir une idée de leur importance sur le marché de la production, notons qu'une centrale nucléaire fonctionne avec une puissance de 900 à 1300 MW sur environ 8000 heures par an.*

*Une comparaison un peu simpliste montre qu'il faudrait environ 800 éoliennes pour égaler la production d'une centrale nucléaire.*

*Les éoliennes sont efficaces là où il y a des vents réguliers et dans des zones peu habitées. Malheureusement elles sont dépendantes du vent et les électriciens ne sont pas maîtres de leur production instantanée. Malgré ces inconvénients, la production éolienne semble avoir un grand potentiel de développement et contribuera sans doute dans une mesure non négligeable à la décentralisation de la production électrique. Toutefois, les nuits sans vent, vous serez contraints de passer votre soirée à jouer aux cartes avec vos voisins à la lueur d'une bougie si vous ne maintenez pas toujours les moyens classiques de production d'électricité !*



### *Aspects de la consommation électrique*

*L'électricité doit être consommée au moment même de sa production. On ne peut pas la stocker<sup>2</sup>. Il faut donc constamment adapter la production des centrales pour satisfaire la demande instantanée des consommateurs. Cette demande est très variable et obéit à de nombreux facteurs.*

### *Comment se présente donc cette variation ?*

*Il y a tout d'abord une variation diurne de la demande : elle est forte la journée lorsque toutes les usines et les entreprises fonctionnent à plein rendement, elle est faible la nuit lorsque l'activité humaine est ralentie. À cette variation diurne se superpose une variation saisonnière attachée à la température de l'air et à la longueur du jour. Au mois d'août, une*

<sup>1</sup> Voir du même auteur "Presque tout sur les éoliennes"

<sup>2</sup> A l'exception des piles et des batteries qui ne stockent que du courant continu à basse tension et qui, en regard de leur poids, de leur encombrement et de leur courte durée de vie, ne sont que de piètres réservoirs d'électricité.

partie de la population est en vacances, certaines entreprises sont fermées, la durée du jour est longue. La consommation est faible.

En hiver, sous nos latitudes, la consommation atteint son plus haut niveau aux alentours du deuxième mercredi de décembre vers onze heures du matin. L'activité industrielle fonctionne au maximum de sa capacité; dans les bureaux toutes les secrétaires habillées légèrement ont allumé les radiateurs électriques d'appoint, les grands magasins et les rues débordent d'éclairages supplémentaires installés pour la période des fêtes et vers onze heures du matin, les cuisinières électriques commencent à fonctionner !

### Comment répondre à la demande irrégulière ?

Les producteurs d'électricité doivent toujours être en mesure de répondre instantanément aux fluctuations de la demande. La variation de consommation peut être brusque et de grande amplitude au niveau d'une petite agglomération. Par contre ces variations sont atténuées si on considère une plus vaste région. En effet, la variation instantanée de la demande de deux régions ne se fait pas nécessairement au même instant et la compensation instantanée de ces variations atténue leur amplitude. D'un autre côté, il n'est pas possible à une seule centrale régionale de s'adapter instantanément sa production à la demande locale. Pour cette raison, la plupart des centrales sont liées les unes aux autres. C'est **l'interconnexion des réseaux électriques**. Et c'est ici qu'apparaît l'importance des lignes de transport électrique à très haute tension. Elles doivent être conçues pour pouvoir supporter la charge maximale des pointes de consommation et pour répartir sur un vaste territoire l'énergie des régions productrices vers les régions consommatrices.

L'allure générale de la variation de la consommation est bien connue et les producteurs augmentent ou diminuent la production des centrales, arrêtent ou mettent en marche d'autres unités de production en fonction de la demande.

- **Les centrales nucléaires** qui ont besoin de près de 24 heures pour être arrêtées et remises en marche, assurent la production de base et fonctionnent quasiment en permanence. Mais on peut toujours moduler leur puissance.
- **Les centrales thermiques** qui ont besoin d'environ 2 heures pour être mises en marche, assurent les fluctuations lentes.
- **Les centrales hydroélectriques**, dont on peut moduler le régime de production en quelques secondes, sont mises en marche rapidement pour assurer les pointes de consommation, puis arrêtées lorsque la consommation diminue. Cette variation implique la maîtrise des moyens de production.

La production des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques échappe au contrôle des électriciens responsables de réguler la production instantanée. C'est là leur inconvénient majeur. Pendant la nuit, la production électrique reste largement excédentaire et les consommateurs peuvent obtenir des prix très avantageux. C'est le seul moment où l'on pourrait envisager de transformer l'électricité en chaleur, en particulier pour chauffer l'eau sanitaire qui servira aux besoins du jour suivant, car autrement elle serait perdue.



*On peut remonter l'eau pendant la nuit*

*Lignes à haute tension pour le transport de l'électricité*



*Mais la tendance actuelle est d'utiliser cette énergie nocturne excédentaire pour remonter l'eau d'un bassin d'accumulation au moyen de pompes puissantes, vers un autre bassin situé à plus haute altitude. C'est une manière indirecte de stocker l'électricité sous forme d'énergie potentielle. Cette technique n'est possible que dans les régions de montagnes où existent déjà des installations hydroélectriques.*

*Le barrage de l'Hongrin, situé dans les Préalpes vaudoises, retient le plus grand lac de pompage-turbinage de Suisse (55 millions de m<sup>3</sup>). Situé à 1'255 mètre d'altitude, son eau est turbinée, lors des heures de grande consommation, dans la centrale de Veytraux au bord du lac Léman, 878 mètres plus bas. En période de faible consommation, lorsqu'il y a un excédent d'électricité, de puissantes pompes réalimentent le barrage en sens inverse avec de l'eau puisée dans le lac. Ce procédé qui alterne le turbinage et le pompage permet de régulariser la consommation électrique et joue le rôle d'un puissant accumulateur d'énergie. Les pertes sont tout de même estimées à 30 %.*

## Peut-on maîtriser la consommation d'énergie ?

Dans les lignes qui suivent on considère la totalité des moyens de production d'énergie, soit les combustibles fossiles, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique ou les énergies issues de l'éolien ou du photovoltaïque. La consommation d'énergie obéit à une équation générale qui est de la forme :

$$Q_E = k (N \times R)$$

dans laquelle :

- $Q_E$  = quantité d'énergie consommée.
- $N$  = nombre d'individus d'une population.
- $R$  = revenu moyen.
- $k$  = "facteur de consommation".

Ici, la variable  $k$  englobe de nombreux paramètres qui comprennent aussi bien le rendement des moyens d'utilisation, le climat, le degré d'industrialisation, les habitudes de vie, la qualité de l'isolation des maisons. De toute manière, la parenthèse  $(N \times R)$  est en constante augmentation et on ne peut agir que sur le facteur  $k$ . Il faut malheureusement constater que le produit  $(N \times R)$  augmente toujours plus vite que ne diminue le facteur  $k$ .

### Les postes de travail consomment de l'énergie

La productivité du travail, tabou du monde globalisé, ne peut progresser que grâce au recours à toujours plus d'énergie. Un poste de travail dans le secteur tertiaire implique une consommation annuelle<sup>1</sup> d'environ 5'500 kWh. Dans l'industrie légère, cette consommation est de l'ordre de 7'000 kWh. Elle peut atteindre 20'000 kWh dans l'industrie lourde. L'augmentation du nombre des postes de travail - avec l'augmentation de la population - accroît inexorablement la consommation d'énergie. Là encore, l'homme est en contradiction avec lui-même : d'une part, il préconise l'amélioration de la productivité et, d'autre part, il souhaite lutter contre la consommation d'énergie. Il ne prend pas conscience que ces deux aspirations sont contradictoires.

De nombreuses voix se sont élevées, demandant que les pouvoirs publics prennent des mesures efficaces pour suggérer ou imposer des programmes d'économies d'énergie. Là aussi, les autorités politiques se sont montrées totalement impuissantes. Bien que beaucoup d'appareils électroménagers fonctionnent aujourd'hui avec des puissances d'utilisation moins élevées qu'auparavant, la croissance de la consommation électrique a inexorablement continué de progresser car le nombre des appareils consommant de l'électricité augmente rapidement. Malgré l'effort consenti par de nombreux propriétaires pour renforcer l'isolation thermique des immeubles, la consommation de combustibles de chauffage n'a cessé de croître car le nombre des maisons a augmenté.

<sup>1</sup> Valeurs pour l'année 1991 à Genève, d'après l'annuaire genevois des statistiques.

*Les entreprises privées ou publiques qui essaient de ne pas dépasser la température 20° dans leurs locaux en hiver, ne parviennent pas à empêcher la plupart de leurs employés d'enclencher leur radiateur électrique d'appoint dans leur bureau pour atteindre les 22° ou 23° auxquels ils sont habitués. On voit donc que sans mesures coercitives, il est difficile de faire diminuer la consommation d'énergie !*

### **Dans les pays froids, il faut chauffer !**

*Les pays industrialisés occidentaux, dont le niveau de vie moyen est élevé, sont situés pour la plupart entre 30° et 60° de latitude nord. Ces pays ont un besoin immense d'énergie, non seulement pour faire fonctionner leurs usines, mais surtout pour chauffer les maisons en hiver. En effet, près de la moitié de l'énergie consommée par ces pays sert à chauffer les habitations pendant la saison froide.*

*Le chauffage constitue donc une des données essentielles dans le problème de l'énergie. Il s'agit de la forme bâtarde de l'énergie, c'est-à-dire que n'importe quelle source de chaleur peut être utilisée. Allègrement nous brûlons, avec les conséquences polluantes que nous connaissons, mazout, gaz charbon et bois pour assurer notre confort en maintenant la température de nos habitations aux environs de 20° à 24° C.*

*Là aussi, la quantité d'énergie dépensée obéit à la loi  $Q_E = k (N \times R)$ . Le facteur  $k$  englobe la latitude, la qualité d'isolation des maisons et le rendement des installations de chauffage. Le facteur  $R$  (revenu) influe directement sur les habitudes domestiques des individus. En effet on observe que les populations à hauts revenus vivent dans de vastes habitations bien chauffées, alors que celles qui sont démunies se contentent - par obligation - d'habitations plus petites et de températures plus basses.*

*L'isolation des maisons est un facteur très important qui devrait permettre de diminuer d'une manière importante le recours aux combustibles fossiles. L'isolation des nouvelles constructions est maintenant pratiquée à une large échelle. Malheureusement, il est très difficile d'isoler les anciennes constructions et il faudra patienter un siècle ou deux pour le renouvellement du parc immobilier.*

### **Dans les pays chauds, il faut climatiser !**

*Depuis une trentaine d'années, plusieurs pays dits "du Sud" (Taiwan, Corée, Singapour, Indes, Brésil, etc..) ont vu leur développement économique s'envoler, leur population augmenter et leur niveau de vie s'élever d'une manière extrêmement rapide. Le produit ( $N \times R$ ) y augmente plus rapidement qu'ailleurs et le facteur  $k$  reste encore une préoccupation secondaire. Si la situation géographique de ces pays leur évite de consacrer de l'énergie au chauffage des habitations, la chaleur accablante qui y règne souvent implique par contre le recours à des installations de climatisation tout aussi dévoreuses d'énergie. Les problèmes énergétiques liés à la réfrigération des immeubles sont plus complexes que ceux liés à leur chauffage: il faut des "pompes à chaleur" qui fonctionnent à l'électricité. Pour peu que l'électricité utilisée provienne de centrales thermiques - caractérisées, rappelons-le par leur faible rendement - la quantité d'énergie est aussi comparable à celle utilisée pour le chauffage dans les pays tempérés.*

## Et l'énergie grise ?

Sous ce terme, on désigne la quantité d'énergie qui a été nécessaire pour produire un objet de consommation ainsi que son transport du lieu de fabrication à celui de sa consommation. Il faut tenir compte de cette valeur lorsqu'on envisage d'investir dans des travaux en vue de réaliser des économies d'énergie. Ainsi, lors de l'installation de panneaux solaires destinés à la production d'eau chaude, l'économie ne sera effective que lorsque la quantité d'énergie économisée, relativement à des sources conventionnelles, aura dépassé notablement la quantité d'énergie grise qu'il aura fallu pour construire et installer les panneaux.

La construction immobilière est un dévoreur d'énergie. L'énergie absorbée ne se limite de loin pas au fonctionnement des grues et des pelleteuses, mais c'est la fabrication des matériaux de construction qui consomme d'énormes quantités d'énergie. Le tableau montre l'énergie nécessaire à leur élaboration.

Energie nécessaire à la fabrication de divers matériaux de construction		
Béton armé	$6.6 \times 10^9$ joules / t	1850 kWh / t
Acier	$10.8 \times 10^9$ joules / t	3'000 kWh / t
Laine de verre	26'460 joules /kg	7.35 kWh / kg
Polystyrène expansé	$115 \cdot 10^6$ joules / kg	32 kWh / kg
Pellets de bois	$792 \times 10^9$ joules / tonne	220 kWh / tonne

La construction d'une automobile nécessite aussi une quantité importante d'énergie. Cette énergie grise, si on l'exprime en litres de carburant<sup>1</sup>, équivaut approximativement à la consommation d'essence nécessaire à ce véhicule pour parcourir 30'000 km., voire 50'000 km pour les véhicules les plus sophistiqués. Il en ressort que tout bien de consommation a nécessité de l'énergie pour sa production.

## Quelle sorte d'énergie consommons-nous ?

En Europe, on peut considérer que 50% de l'énergie est consacré au chauffage de nos maisons en hiver. C'est essentiellement le mazout et le gaz naturel qui assurent cette charge. 25% concerne la production d'électricité et 25% les transports et l'industrie. On voit donc que la part des combustibles fossiles est encore prédominante dans notre quotidien

## Toute dépense entraîne une consommation d'énergie

Cela implique que chaque dépense induit inmanquablement une consommation d'énergie. Notre système d'organisation sociale avec sa division du travail et la productivité que la concurrence impose, implique que chaque dépense que nous effectuons entraîne une

<sup>1</sup> Ces chiffres sont très difficiles à obtenir et on observe une certaine rétention d'information à ce sujet. Les estimations montrent que l'énergie grise d'un véhicule correspond à un parcours compris entre 25'000 et 50'000 km suivant le type de véhicule.

consommation d'énergie. Cela confirme bien la règle qui montre que la consommation d'énergie est proportionnelle au produit intérieur'une communauté :

$$Q_E = k (N \times R)$$

### *Les ressources d'énergie sont-elles inépuisables ?*

Nos ressources énergétiques proviennent essentiellement des combustibles fossiles et, dans une moindre mesure, de la production hydroélectriques et des centrales nucléaires. Nous sommes donc effroyablement dépendants des réserves des combustibles fossiles et de l'uranium. Les géologues des compagnies qui exploitent ces ressources ont évalué et mesuré les réserves mondiales effectives de charbon, de pétrole, de gaz et d'uranium. Leurs conclusions est que nous nous acheminons sans aucune contestation possible vers une pénurie des ressources énergétiques fossiles et leur épuisement dans les décennies à venir.

### *Epuisement des combustibles fossiles*

Les gisements de charbons sont le produit de l'accumulation, dans le passé, des arbres morts d'immenses forêts, qui ont été fossilisés à l'abri de l'air. Les hydrocarbures sont le produit de la décomposition de déchets organiques enfouis également à l'abri de l'air sous l'accumulation de sédiments qui les ont protégés jusqu'à aujourd'hui.

Aujourd'hui les forêts croissent toujours. Les mêmes causes, qui autrefois ont contribué à la formation du charbon et du pétrole, existent toujours aujourd'hui dans quelques grands bassins fluviaux et dans les deltas qu'ils engendrent. Le pétrole et le charbon continuent de se former aujourd'hui, mais à un rythme probablement 1'000.000 fois moins rapide que la consommation que nous en faisons !

Si on met en balance les réserves connues de charbon, de pétrole et de gaz et notre consommation actuelle de ces ressources, il est indéniable que nous aurons épuisé le charbon dans un peu plus d'un siècle, le pétrole dans une trentaine d'années et le gaz dans une cinquantaine d'années. Nous nous acheminons vers une pénurie d'énergie et la différence toujours plus grande entre la demande et l'offre va se traduire, dans un avenir pas très lointain, par une augmentation inéluctable du prix de l'énergie.

	<i>Réserves estimées</i>	<i>Consommation annuelle</i>	<i>Fin des réserves</i>
<i>Charbon</i>	<i>1000 milliards de t.</i>	<i>5901 millions de t.</i>	<i>vers 2130</i>
<i>Pétrole</i>		<i>3906 milliards de t.</i>	<i>vers 2060</i>
<i>Gaz</i>		<i>2865 milliards m<sup>3</sup></i>	<i>vers 2080</i>
<i>Uranium*</i>	<i>4'300'000 t.</i>	<i>56'200 t.</i>	<i>vers 2100</i>
<i>* réserves estimées pour les centrales utilisant uniquement <sup>235</sup>U comme combustible.</i>			

Les estimations sur les réserves de combustible fossile sont toutes relatives. Il faudrait encore préciser le coût que nous sommes prêts à payer pour cette énergie. Car des gisements dont l'exploitation est trop coûteuse aujourd'hui deviendront rentables lorsque le prix de l'énergie sera plus élevé.

## Le cas des hydrocarbures

La demande en produits énergétique augmente constamment, justement à cause de la progression du facteur ( $N \times R$ ) et les réserves de pétrole s'épuisent progressivement. Ni les grandes compagnie pétrolières ni les Etats du Golfe ne souhaitent révéler l'état des leurs réserves. Ce sont des raisons stratégiques pour les premiers et politiques pour les seconds qui conduisent à une certaine opacité de leur part.

Il est par ailleurs difficile de répondre à la question : "dans combien d'années les réserves de pétrole seront-elles épuisées". Au prix de un euro le litre d'essence, il n'y en a plus beaucoup. A dix euros le litre, il y en a encore passablement !

## Le taux de retour énergétique

Le taux de retour énergétique, dont l'acronyme est TRE<sup>1</sup>, est le rapport entre l'énergie utilisable et l'énergie dépensée pour produire cette l'énergie. En clair, c'est la quantité d'énergie qu'on peut produire en regard de l'investissement nécessaire à sa production.

Au début de l'exploitation des gisements pétroliers, en forant un puit dans la péninsule arabique ou au Texas, le pétrole jaillissait en abondance et la quantité d'énergie que ce pétrole pouvait restituer était au moins 100 fois plus importante que l'énergie nécessaire à son extraction (ou à l'investissement engagé). On peut estimer que le taux de retour énergétique (TRE) était supérieur à 100.

L'épuisement progressif des gisements très productifs a obligé les compagnies pétrolières à forer un plus grand nombre de puits pour accéder aux gisements de moins en moins riches. L'investissement plus important pour une même quantité de pétrole fait donc chuter le TRE aux alentours de 80, puis de 30. L'exploitation des schistes par fracturation ou celle des sables bitumineux du continent nord-américain fait tomber le TRE aux environs de 5.

En ce qui concerne les autres formes d'énergie, on peut aussi estimer leur TRE. Le tableau suivant résume ces chiffres<sup>2</sup> :

On voit que que l'accès aux diverses sources d'énergie nécessitera des investissement toujours plus importants et que le prix de l'énergie augmentera inéluctablement.

## Taux de retour énergétique pour l'hydrogène

Il faut 5 kWh pour produire un m<sup>3</sup> d'hydrogène par électrolyse dont le rendement n'est que de 60%. Ce m<sup>3</sup> ne renferme plus qu'une énergie égale à 3 kWh. Si on souhaite transformer cet hydrogène en énergie mécanique pour faire avancer une voiture, par exemple, les lois de la thermodynamique ne permettent plus qu'en retirer 1 kWh. Le TER est donc de 0.3.

Il faut donc réfléchir à deux fois pour imaginer que l'hydrogène pourra servir un jour à stocker de l'énergie.

<sup>1</sup> Connu aussi sous l'acronyme anglo-saxon EROEI (Energy Returned on Energy Invested).

<sup>2</sup> Ces chiffres sont des approximations les diverses exploitations sont toute des cas particulier.

<i>Taux de retour énergétique de diverses sources d'énergie (d'après J.-M. Jancovici)</i>	
<i>Pétrole d'Arabie séoudite</i>	<i>100</i>
<i>Pétrole aujourd'hui</i>	<i>40 à 60</i>
<i>Gaz de schistes</i>	<i>4</i>
<i>Sables bitumineux</i>	<i>4</i>
<i>Charbon</i>	<i>20 à 80</i>
<i>Energie hydroélectrique</i>	<i>50</i>
<i>Energie nucléaire</i>	<i>50</i>
<i>Eoliennes</i>	<i>5 à 10</i>
<i>Solaire</i>	<i>5</i>
<i>Hydrogène</i>	<i>0.3</i>

---

## Et l'énergie solaire ?

### Comment peut-on utiliser l'énergie solaire ?

Comme nous l'avons déjà vu précédemment, nous utilisons depuis longtemps l'énergie solaire sans nous en rendre compte ! Mais nous l'utilisons de manière indirecte : l'énergie hydroélectrique est de l'énergie solaire, les éoliennes, version moderne des antiques moulins à vent, utilisent les courants aériens engendrés par l'action du soleil.

Le charbon et le pétrole sont des formes fossiles d'énergie solaire. Les régimes des vents et des précipitations sont des formes presque instantanées (à l'échelle géologique) de cette même énergie. Il n'y a en réalité que l'énergie nucléaire et la géothermie qui ne soient pas des formes d'énergie solaire.

### Panneaux solaires et cellules photovoltaïques

Les combustibles ne se renouvellent donc pas aussi rapidement que nous les consommons et l'on peut imaginer des procédés qui permettent d'utiliser instantanément et directement l'énergie solaire. Ces procédés existent : ce sont les panneaux solaires et les cellules photovoltaïques.



Panneau solaire thermique



Panneau solaire photovoltaïque

**Les panneaux solaires** sont utilisés pour la production directe d'eau chaude. Le principe en est simple et notre propos n'est pas d'en faire une description technique. Ils ne sont utilisables que lorsqu'il y a du soleil. L'eau chaude qu'ils produisent peut être stockée quelques dizaines d'heures, ce qui permet d'en différer quelque peu son utilisation. La température de l'eau chaude est beaucoup trop faible pour envisager son éventuelle transformation en énergie mécanique. Par ailleurs, le côté aléatoire de l'ensoleillement dans les pays de l'hémisphère nord ne lui confère qu'un rôle d'appoint. Son utilisation est donc restreinte à la production d'eau chaude sanitaire en été et, partiellement, au chauffage des maisons et à la production d'eau chaude en hiver dans les régions où l'ensoleillement hivernal est suffisant. Malheureusement les gros consommateurs d'énergie ont besoin de se chauffer en hiver, lorsque le soleil fait défaut. Ce système de récupération de l'énergie solaire ne peut donc jouer qu'un rôle marginal parmi les autres sources classiques d'énergie.

*Les panneaux photovoltaïques, quant à eux, sont constitués d'un assemblage d'une grande quantité de petites unités produisant chacune un courant de quelques millivolts. Le principe de la transformation de l'énergie lumineuse en courant électrique est complexe. La fabrication des unités photoélectriques est encore très coûteuse et le rendement reste assez faible. Le prix de l'électricité produite est encore élevé. Pour l'instant, l'usage de l'électricité d'origine photovoltaïque se limite à des situations bien particulières : alimentation de stations de télécommunication éloignées d'un réseau de distribution, cabanes de montagnes, alimentation de calculatrices de poche. Quelques centrales photovoltaïques ont été construites, dont les puissances peuvent atteindre quelques centaines de MW lorsqu'il fait jour. Elles sont totalement dépendantes de l'ensoleillement et nécessitent de grandes surfaces. Dans l'état des connaissances actuelles, la production d'électricité par cette méthode reste encore relativement marginale. Mais l'évolution des techniques évolue rapidement et l'électricité d'origine photovoltaïque prendra vraisemblablement une place toujours plus grande pour notre alimentation énergétique.*

### *Rendement énergétique des installations solaires*

*Ces deux types d'installations produisent donc de l'énergie, mais sous des formes différentes. Sous les moyennes latitudes (Suisse, France, Allemagne, Belgique) on peut espérer une production énergétique annuelle d'environ 700 à 900 kWh thermiques par mètre carré de panneau solaire pour la production d'eau chaude contre 120 à 150 kWh par mètre carré de panneau photovoltaïque.*

*Les panneaux solaires thermiques sont plus efficaces et plus rentables que les panneaux photovoltaïques. Plus de 50% de l'énergie solaire est transformée en eau chaude, alors que la production d'électricité des panneaux photovoltaïques ne dépasse guère 15 % de l'énergie solaire reçue. Mais la forme d'énergie produite n'est évidemment pas la même.*

*Les panneaux solaires thermiques sont faciles à construire et ne nécessitent pas de métaux rares alors que la production de panneaux photo-voltaïques nécessite des matériaux rares et que la technologie de leur construction entraîne de nombreux inconvénients.*

---

## L'énergie interne de notre Planète

### La Terre est un radiateur géant

Tel un radiateur géant, la Terre dégage en permanence de la chaleur. Ce flux de chaleur est variable suivant les régions :

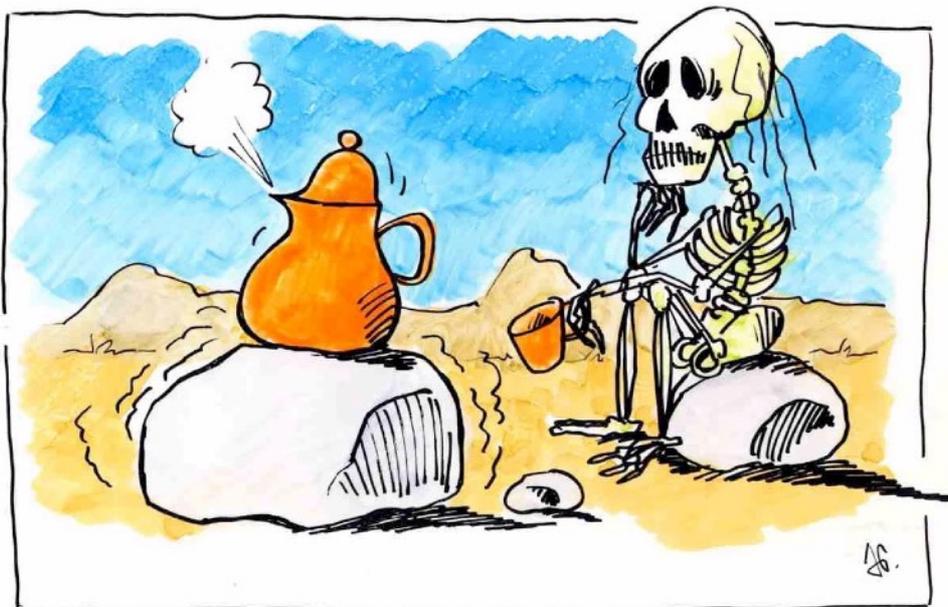
- il est intense dans les régions volcaniques,
- il est faible au coeur des socles continentaux anciens.

La quantité moyenne de chaleur dissipée par toute la Terre est égale à :



50 calories/m<sup>2</sup>, par an ou 0.06 watt/m<sup>2</sup>

La moitié environ de ce flux de chaleur provient des couches très chaudes des profondeurs du globe. C'est la partie résiduelle, non encore dissipée, de la chaleur originelle issue du processus de formation de la terre, il y a quatre milliards et demi d'années. L'autre moitié est la conséquence de la décroissance radioactive naturelle de l'uranium et du thorium, éléments toujours présents en faibles quantités dans les roches de composition granitique. En regard des 0.06 watt/m<sup>2</sup> du flux géothermique, rappelons que l'énergie solaire délivre environ 340 watt/m<sup>2</sup> soit environ 6'000 fois plus ! Ce flux de chaleur peut paraître faible: en imaginant qu'on puisse récupérer la totalité de la chaleur dégagée sous la surface d'une casserole posée au sol, il faudrait 4 ans pour faire bouillir un litre d'eau! Toutefois la totalité de la chaleur dégagée par les profondeurs de la Terre suffirait pour faire bouillir le lac Léman en quinze jours!



La chaleur produite par l'activité de l'uranium et de thorium renfermés dans un bloc de granite de 30 cm de côté est suffisante pour préparer une théière de thé bouillant...

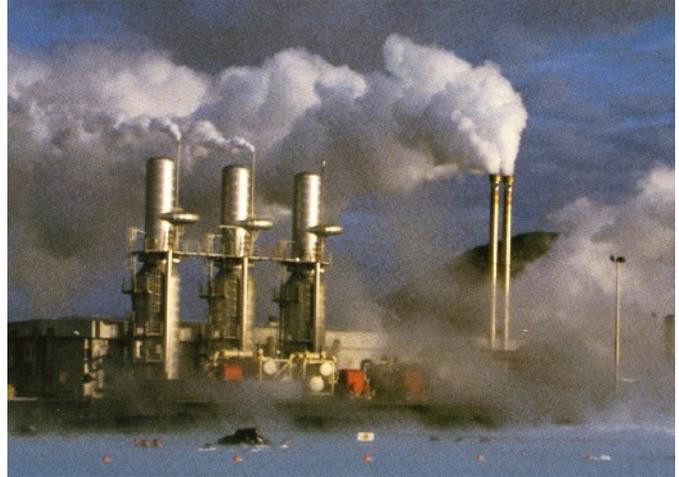
...à condition d'attendre 200'000 ans !

## Exploitation de l'énergie géothermique

Malheureusement la récupération de ce flux de chaleur pour une utilisation domestique n'est possible que dans quelques rares cas. Ce sont surtout les habitants des régions volcaniques qui utilisent les sources thermales pour chauffer leurs habitations. Parfois, il est même possible d'extraire par forage la vapeur d'eau nécessaire pour faire fonctionner de petites centrales électriques. Mais, à part l'Islande qui est située sur la grande faille atlantique, l'utilisation du flux de chaleur terrestre demeure extrêmement limitée.

L'exploitation de l'énergie géothermique n'est possible que dans quelques situations géologiques particulières. Il faut tout d'abord forer à une profondeur de trois à cinq kilomètres pour que la température de la roche soit un peu supérieure à 100° C.

La seconde condition est que les roches atteintes soient à la fois poreuses et perméables, ce qui n'est que rarement le cas. On peut fracturer artificiellement les roches en injectant de l'eau sous très haute pression, mais cela peut induire des microséismes. Récemment de tels essais dans la région de Bâle (une région sismique) ont provoqué un séisme qui a effrayé la population.



Production d'électricité grâce à des captages de vapeur à haute température, Keflavik, Islande.

Il ne faut donc pas fonder trop d'espoir sur cette technique. Par contre, à l'échelle de la planète, c'est ce flux de chaleur interne qui permet à la Terre d'avoir une vie géologique active. En effet, c'est lui qui produit les magmas générateurs des roches éruptives, c'est lui encore qui génère les roches métamorphiques en modifiant les assemblages minéralogiques des roches préexistantes, et qui, par les lents mouvements de convection qu'il engendre en profondeur, déplace les plaques continentales et soulève les chaînes de montagnes.

## La transition énergétique, un sujet délicat et polémique

Sous la pression des milieux écologiques qui souhaitent raisonnablement lutter contre les centrales thermiques qui polluent grandement notre environnement et qui militent aussi pour le démantèlement de centrales nucléaires qui, pourtant, ne produisent pas de CO<sub>2</sub>, les politiciens qui suivent le vent optent pour une "transition énergétique". Cela consiste à miser sur les énergies renouvelables pour diminuer voir même faire disparaître non seulement les centrales à charbon, mais aussi les centrales nucléaires.

Cette vision angélique de l'avenir, promue par les partis écologistes et soutenue par une majorité de gens apeurés par les catastrophes annoncées, pousse les politiciens à aller dans le sens de la population. Ils décident majoritairement d'aller aussi vers la transition énergétique.

*Le problème majeur est que les énergies renouvelables ont le fâcheux défaut de ne produire de l'énergie que quand il y a du soleil et du vent.*

*Si vous n'acceptez pas de devoir de passer les soirées d'hiver sans vent à jouer aux cartes avec vos voisins à la lueur d'une bougie, il faudra tout de même conserver les sources d'électricité traditionnelles pour pailler aux sautes d'humeur des éoliennes et des panneaux photovoltaïques ou bien trouver un moyen de stocker l'énergie excédentaire de l'été pour l'utiliser pendant les périodes hivernales grandes dévoreuses d'énergie.*

*Par ailleurs, la transition énergétique suscite appétit d'industriels en grand nombre qui souhaitent profiter de cet engouement fortement subventionné par les pouvoirs publics. Cette nouvelle politique est donc influencée par de nombreux lobbys industriels qui voient surtout leur profit immédiat et ne s'interrogent pas vraiment sur la finalité à long terme de leur activité. Le débat est devenu idéologique et financier et les réalités de l'avenir ne sont plus vraiment les préoccupations initiales. Il est donc très difficile pour un politicien qui n'est pas un ingénieur en distribution d'électricité de prendre des décisions rationnelles.*

*Je n'ai pas l'ensemble des connaissances nécessaires pour affirmer ou infirmer que ce sont les émanations de CO<sub>2</sub> dont l'homme est responsable qui provoquent le réchauffement de la planète ou si, au contraire, c'est le réchauffement qui est responsable de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. La réponse des experts dépend malheureusement de l'origine des sources de financement qui les incitent à étudier le problème. Le problème reste donc ouvert !*

### **Que devient l'énergie que nous consommons ?**

*Nous savons que l'énergie ne disparaît pas. Elle ne fait que se transformer. Que devient-elle après usage ? Je vais tenter de l'expliquer : au bistrot, je demande toujours un café "brûlant", c'est à dire le plus chaud possible. On sourit autour de moi, mais je m'explique : si le café est trop chaud, il suffit d'attendre un peu pour qu'il atteigne la température souhaitée. S'il est tiède, on peut toujours attendre, mais il y peu de chance de le voir se réchauffer ! Ce passage du chaud au froid est inéluctable et universel.*



*Tous ça, c'est de la thermodynamique et c'est la faute à **l'entropie** !*

*Dans mon café brûlant, les molécules sont extrêmement agitées. Petit à petit cette agitation va se transmettre aux molécules de l'air ambiant. Les molécules de mon café ralentissent et il se refroidit. Les molécules de l'air ambiant voient leur vitesse augmenter légèrement à la suite des chocs qu'elles subissent de la part des molécules du café et elles se réchauffent légèrement. Au cours de cette évolution, il y a transfert d'énergie du corps chaud vers le corps froid, ce qui se traduit vers une homogénéisation des températures et une plus grande dilution de l'énergie thermique dans l'environnement.*

*De la même manière, si vous attendez suffisamment longtemps, par chutes de pierres successives, le Cervin se transformera en un tas de cailloux, chaque cailloux ayant cédé son énergie potentielle à l'environnement sous forme de chaleur.*



*Si on attend suffisamment longtemps*



*A terme, l'entropie réduira le Cervin à un tas de cailloux !*

*L'entropie d'un système mesure donc le degré de dispersion de l'énergie à l'intérieur de ce système*

*C'est le second principe de la thermodynamique qui stipule que, dans un système isolé, l'énergie a tendance à se disperser le plus possible.*

*On peut définir aussi l'entropie comme le processus par lequel l'énergie disponible se transforme en énergie non disponible. Il s'agit d'une grandeur mesurable. Exprimée en grammes et par degré, elle est la quantité totale de chaleur ajoutée, divisée par la température.*

### *L'entropie ne peut qu'augmenter*

*Le charbon et les hydrocarbures, qui sont des formes fossiles d'énergie, dispersent leur énergie lors de leur transformation en travail par le biais des machines à vapeur et des turbines. Ce sont ces combustibles qui fournissent la plus grande partie de l'électricité que le monde consomme aujourd'hui.*

*La chaleur produite a été utilisée partiellement, environ 35 %, pour produire du travail. Le solde, 65% environ, est dispersé dans l'atmosphère sous forme de chaleur un peu moins chaude et contribue ainsi à l'homogénéisation thermique de notre environnement. Cette chaleur, un peu moins chaude, n'est alors plus disponible pour produire un travail.*

*L'épuisement progressif des énergies fossiles est la démonstration la plus évidente d'une loi de la nature : l'entropie augmente inexorablement !*

*Cela explique pourquoi notre tas de pierre ne peut pas se transformer en Cervin, un café tiède ne va pas se réchauffer et la pomme de Newton ne va pas remonter sur sa branche !*

### *L'écoulement du temps*

*L'entropie nous démontre aussi qu'il y a un passé et un avenir et elle reste le plus sûr indice du sens de l'écoulement du temps. Ainsi, l'irréversibilité du temps semble s'expliquer par l'augmentation permanente de l'entropie, cette grandeur qui mesure l'état de désordre d'un système de particules. Tout va de l'ordre vers le désordre.*

*Le confort dans lequel nous vivons aujourd'hui n'est possible que grâce à l'accélération de l'augmentation de l'entropie que nous induisons. Toutes énergies confondues, nous consommons journallement près de 100 kWh ! Après usage, cette énergie va se disperser dans notre environnement et contribuer à l'augmentation générale de l'entropie. La vie elle-même, qui pourrait sembler contredire le principe de l'entropie en se développant à partir d'un désordre ambiant proche, n'est en réalité possible que grâce à l'augmentation d'un désordre plus global et, ensuite, la mort viendra inexorablement participer à l'augmentation de l'entropie !*

*Sic transit gloria mundi !*

---

## Table des matières

### *Qu'est-ce que l'énergie . . . . . 2*

*Comment les physiciens définissent l'énergie ? - La nature utilise aussi de l'énergie - Les diverses formes d'énergie - Force, énergie, travail - Jouons avec les unités - Prenons conscience de la valeur de l'énergie - La nature mobilise de grandes quantités d'énergie - La machine humaine a aussi besoin d'énergie - Le prix de l'énergie - Le coût d'une ascension au Mont-Blanc - Il y a deux qualités d'énergie - l'énergie mécanique - L'énergie cinétique et l'énergie potentielle sont interchangeables - La fée électricité nous a beaucoup aidé - Mais l'électricité n'est qu'un vecteur d'énergie -*

### *Chaleur et température . . . . . 10*

*La chaleur, une forme dégradée d'énergie - la thermodynamique est née avec la machine à vapeur - L'énergie ne disparaît jamais ! - L'entropie ne peut qu'augmenter - Le cas ambigu des pompes à chaleur*

*Les diverses sources d'énergie - Nous sommes devenus des dévoreurs d'énergie - Niveau de vie et consommation d'énergie - Le Soleil est notre principal pourvoyeur d'énergie - L'énergie solaire est d'origine nucléaire ? - Utilisation directe du Soleil -*

### *La production d'énergie, source de pollution . . . . . 20*

*L'énergie hydroélectrique - Les combustibles fossiles polluent l'atmosphère - Le gaz naturel, un combustible "propre" ? - l'hydrogène, source d'énergie non polluante ? - Le cas du combustible nucléaire -*

### *Comment produire l'électricité ? . . . . . 22*

*L'électricité d'origine hydraulique - L'électricité d'origine thermique - Le cas du combustible nucléaire - Le décroissance radioactive - La fission nucléaire - Les déchets nucléaires Production photovoltaïque - Production par éoliennes - Aspect de la consommation électrique - Comment se présente donc cette variation ? - Comment répondre à la demande irrégulière ? - On peut remonter l'eau pendant la nuit*

### *Peut on maîtriser la consommation d'énergie ? . . . . . 30*

*Les postes de travail consomment de l'énergie - Dans les pays froids il faut chauffer ! - Dans les pays chauds il faut climatiser ! - Et l'énergie grise ? - Toute dépense entraîne une consommation d'énergie - Les ressources d'énergie sont-elles inépuisables ? - Epuisement des combustibles fossiles - Le cas des hydrocarbures - Le taux de retour énergétique*

### *Et l'énergie solaire ? . . . . . 36*

*Comment peut-on utiliser l'énergie - Panneaux solaires et cellules photovoltaïques - Rendement énergétique des installations solaires*

### *L'énergie interne de notre planète . . . . . 38*

*La Terre est un radiateur géant - Exploitation de l'énergie géothermique - La transition énergétique, un sujet délicat et polémique - Que devient l'énergie que nous consommons - l'entropie ne peut qu'augmenter - L'écoulement du temps.*