

## Les formes d'énergie

L'énergie se trouve au cœur même de la matière. On ne peut ignorer cela si l'on souhaite la comprendre afin de la produire et de la consommer plus intelligemment. Elle peut parfois être engendrée en profitant du fait qu'en changeant d'état, solide, liquide ou gazeux elle peut transmettre l'énergie qu'elle a en son sein. Une fois produite, on peut alors l'aborder sous ses aspects *primaire*, *secondaire* ou *utile*, et enfin la consommer sous ses différentes formes, *mécanique*, *hydraulique*, *thermique*, ou *électrique*.

## Les interactions de la matière

Les interactions qui régissent l'état d'équilibre dans lequel se trouve la matière est au cœur même de la compréhension de l'énergie. En allant du plus puissant – pris comme valeur de référence – vers le moins puissant, ou ce qui revient un peu au même dans l'ordre d'importance et de potentiel énergétique décroissant, on peut situer ainsi les interactions qui régissent l'état d'équilibre dans lequel se trouve la matière.

### **L'interaction nucléaire forte** (Force $10^0$ ou le chiffre 1)

Son histoire commence en 1911 avec la découverte du noyau atomique par Rutherford, mais ce n'est qu'en 1970 et avec les quarks que la théorie de l'interaction forte est élaborée avec la chromodynamique quantique ou QCD. L'interaction nucléaire forte permet la cohésion des noyaux atomiques en liant les protons et les neutrons au sein de ce noyau. Si cette interaction n'existait pas, les noyaux seraient instables et seraient dissociés sous l'effet de la répulsion électrostatique des protons entre eux. L'interaction forte est ainsi au cœur de la compréhension des réactions nucléaires. Elle est source d'énergie pour notre planète par exemple grâce à la **fusion nucléaire** sur le soleil.

### **L'interaction électromagnétique** (Force $10^{-2}$ ou le chiffre 0,01)

L'interaction électromagnétique est à l'origine de tous les phénomènes thermodynamiques et régit entre autres la *chaleur spécifique* de la matière. Elle provient de la force répulsive ou attractive qui agit sur les objets ayant une charge électrique. Deux objets de charges électriques de même signe se repoussent alors que deux objets de charges électriques de signe opposé s'attirent. L'interaction électromagnétique permet la cohésion des atomes en liant les électrons (charge électrique négative) et le noyau des atomes (charge électrique positive). Elle est à la base des réactions chimiques et couvre les produits fossiles. Elle est liée aux ondes électromagnétiques, aux ondes radio, aux radars ainsi qu'aux rayons X et elle permettrait même d'expliquer la biologie avec certaines classes de molécule.

### **L'interaction nucléaire faible** (Force $10^{-4}$ ou le chiffre 0,0001)

Son histoire commence en 1896 avec la découverte de la radioactivité par Becquerel. Elle évolue en 1933 lorsqu'E. Fermi élabore le premier modèle d'interaction faible incorporant l'existence non encore démontrée du neutrino. La radioactivité est au cœur même de la compréhension de l'interaction nucléaire faible et l'on pense que c'est la radioactivité naturelle qui est responsable de la source d'énergie importante qui maintient le magma en fusion sous la croûte terrestre.

*La gravitation*  $\vec{F} = m\vec{a}$  (Force  $10^{-44}$  ou le chiffre 1 précédé de 43 zéros avant la virgule)

La masse de la terre a beau être très importante, force est de constater que la gravitation est la moins puissante de toutes les interactions. L'électricité issue des barrages hydroélectriques provient de la gravitation. Le cycle de l'eau évaporation-condensation à l'origine de la pluie, du ruissellement et de la rivière, c'est également la gravitation. Vu l'incapacité des barrages hydroélectriques à assurer la totalité de nos besoins en énergie alors que notre pays comprend pourtant la plus haute chaîne montagneuse d'Europe, on pourrait légitimement s'interroger sur la capacité de la gravitation à assurer l'essentiel de nos besoins énergétiques. Cela serait le cas si la gravitation n'était étroitement associée aux deux interactions les plus puissantes : la *nucléaire forte*, qui réchauffe la croûte terrestre superficielle en assurant le caractère renouvelable au chauffage thermodynamique et *l'électromagnétique*, qui régit la chaleur spécifique de la matière et sa capacité à transmettre l'énergie thermique. Compte tenu de la surface de l'Hexagone et de la hauteur pluviométrique moyenne en France proche du mètre, c'est près de 10 000 m<sup>3</sup> d'eau qui sont disponibles chaque année pour chacun des quelque 60 millions d'habitants qui le composent. En refroidissant, ce volume d'eau de 3 °C représente quelque 30 000 kWh thermiques qui sont récupérés par chaque Français pour chauffer son habitation. Plus qu'il n'en faut puisque ce chiffre correspond sensiblement, selon l'IRENA, à la moitié du besoin en énergie toutes énergies confondues de chacun des habitants de l'OCDE que l'on sait être particulièrement énergivores par rapport à la moyenne mondiale.

#### *L'énergie des marées*

On sait que la terre et la lune sont soumises à un effort de rapprochement  $F$  (Newton) proportionnel au produit de leur masse  $m$  et inversement proportionnel au carré de la distance  $d$  qui les sépare ( $F = G \cdot mm'/d^2$ ).  $G = 6,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$  étant la constante de la gravitation. On sait maintenant aussi que l'énergie cinétique en rotation de la terre ( $0,72 \times 10^{27}$  kWh) est progressivement absorbée par les marées engendrées par la variation de  $F$ . On estime qu'elle a ralenti de 1 tour en 22 h à 1 tour en 24 heures en 400 millions d'années. En comparant cette perte d'énergie cinétique qui peut être attribuée aux frottements fluides des mouvements marins pendant cette période, on trouve que la puissance dissipée par les marées à chaque instant est environ 5 000 fois inférieure à la puissance reçue du soleil. Ce qui place cette énergie pratiquement au même niveau que *l'interaction nucléaire faible*. L'homme est en passe de récupérer avec les *hydroliennes* une infime partie de cette énergie qui pourrait toutefois être non négligeable par rapport à notre besoin.

*Prenons l'Hexagone comme exemple de calcul pour comparer ces différentes formes d'énergie en allant cette fois du moins puissant vers le plus puissant.*

La gravitation : du fait de la gravitation terrestre  $\vec{a}$ , une masse de 1 kg, c'est un effort de près de 10 daN dirigé vers le bas (en pratique 9,81 daN du fait de l'attraction terrestre de 9,81 m/s<sup>2</sup>). La surface de l'Hexagone, c'est 550 000 km<sup>2</sup> (ou  $5,5 \times 10^{11}$  m<sup>2</sup>), surface sur laquelle il tombe environ 750 kg d'eau/m<sup>2</sup>/an (on parle d'une hauteur pluviométrique moyenne annuelle en France de 750 mm d'eau). Compte tenu de l'altitude moyenne de l'Hexagone proche de 300 m, lorsque l'eau qui ruisselle en surface est descendue au niveau de la mer, le travail de son poids fourni du fait de la gravitation est d'environ  $7\,500 \times 300 \times 5,5 \times 10^{11} = 1,25 \times 10^{18}$  joules (ou 343 TWh). Notre pays, avec sa production de quelque 70 TWh par les barrages hydroélectriques, a pu récupérer 20 % de cette énergie. (Même plus en pratique par le fait qu'une partie non négligeable n'est pas récupérable du fait de l'évaporation et des infiltrations dans le sous-sol vers les nappes captives.)

### *L'interaction électromagnétique*

Étant donné qu'il y a dans une année 8 760 heures ou 31 536 000 secondes, le débit d'eau qui s'écoule vers la mer du fait des quelque  $4,1 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup> d'eau que reçoit annuellement l'Hexagone est de 13 000 m<sup>3</sup>/s. En tenant compte de l'écoulement des nappes libres et de l'évaporation, c'est seulement un débit moyen voisin de 5 000 m<sup>3</sup>/s qui arrive à la mer par les estuaires des fleuves (voir la [carte des rivières françaises les plus importantes](#))

Si l'on ne prend en compte que le débit des fleuves, le fait que l'on puisse récupérer environ 1 kWh en abaissant 1 m<sup>3</sup> d'eau de 1 °C en raison de la chaleur spécifique de l'eau permet d'affirmer que c'est une **énergie thermique** de  $5\,000 \times 31\,536\,000 \times 3 = 473 \times 10^9$  kWh que notre pays peut récupérer en refroidissant l'eau de nos fleuves de 3 °C. Sur la base de 25 millions de foyers fiscaux, on est donc en face d'un potentiel de récupération d'énergie thermique encore inexploité par la thermodynamique voisin de 20 000 kWh par foyer, correspondant à une consommation annuelle de fioul proche des besoins en chauffage d'un habitat ancien mal isolé (2 m<sup>3</sup> de FOD). Si l'on raisonne maintenant en évaluant la puissance thermique disponible dans un doublet géothermale d'un débit **Q** de 200 m<sup>3</sup>/h procurant de l'eau à 70°C et la rejetant à 20°C c'est en hiver et sur la base d'un écart de température cette fois de 50 °C, une puissance instantané disponible  $P = Q \times \Delta T \times c = 200 \times 50 \times 4\,180 = 94 \times 10^9$  J/s, soit 11 600 kW que le puits géothermale met à notre disposition sous forme thermique compte tenu de la chaleur spécifique **c** de l'eau de 4,18 kJ/kg et °C. Au moment où l'on souhaite se passer de la combustion des produits fossile pour chauffer l'habitat avec ce projet de loi sur la transition énergétique qui stipule que la puissance électrique devra être plafonnée en France à 63,2 GW, cela tombe bien. Il ne devrait donc subsister de doute dans l'esprit du lecteur sur la capacité de la rivière assistée par l'eau géothermale à assurer nos besoins en énergie thermique<sup>43</sup>.

### *L'interaction nucléaire forte*

Reste à savoir si ce potentiel est renouvelable ou non. Pour cela, il suffit de comparer les chiffres ci-dessus à l'énergie qui nous vient du soleil au 45° nord et qui réchauffe les premiers mètres de la couche terrestre superficielle. Avec une puissance moyenne voisine de 350 watts/m<sup>2</sup> une fois franchi l'atmosphère, c'est tout de même un apport thermique solaire correspondant à une quantité d'énergie de  $0,35 \times 8\,760 = 3\,000$  kWh par m<sup>2</sup> qui nous arrive du ciel tous les ans. Avec près de 9 000 m<sup>2</sup> de surface de chauffe par Français, puisque nous sommes environ 60 millions d'habitants sur un Hexagone de 550 000 km<sup>2</sup>, c'est une quantité d'énergie de  $3\,000 \times 9\,000 = 27$  millions de kWh que le soleil envoie généreusement annuellement sur terre pour chacun d'entre nous. Quantité d'énergie cette fois près de 500 fois supérieure à la quantité d'énergie consommée en moyenne selon l'INRA par chacun des membres des pays de l'OCDE ! (55 000 kWh/an toutes énergies confondues). Comme on le voit, il n'y a pas d'inquiétude à se faire sur le caractère renouvelable du chauffage thermodynamique aquathermique !

### Les états de la matière

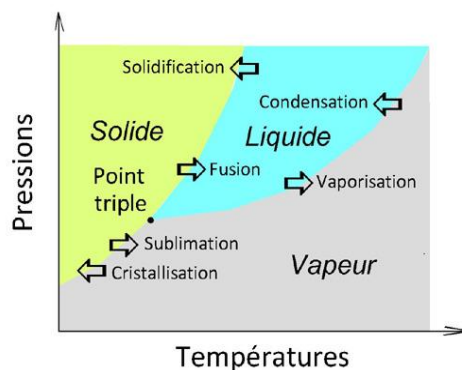
La matière peut être à l'état solide, liquide ou gazeux et passer d'un état à l'autre lorsque la température ou la pression change.

---

<sup>43</sup> La chaufferie hybride, telle qu'elle a été définie dans ce livre, ne risque pas de surcharger la consommation électrique au plus froid de l'hiver vu que pendant cette période généralement assez courte, c'est la combustion qui fournit le besoin.

## Les lutins thermiques et :

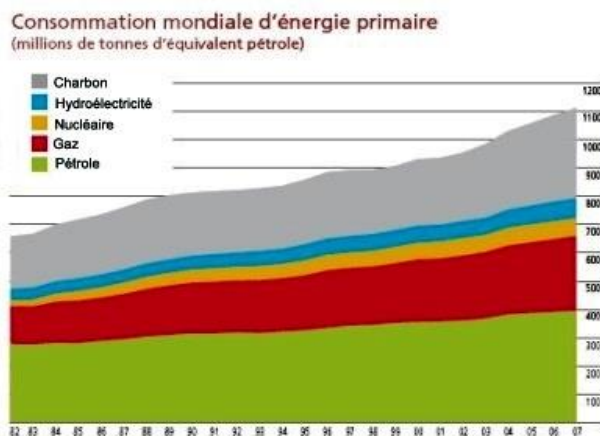
1. De solide à liquide : c'est la *fusion ou liquéfaction*.
2. De liquide à solide : c'est la *solidification*.
3. De liquide à vapeur : c'est la *vaporisation*.
4. De vapeur à liquide : c'est la *condensation*.
5. De solide à vapeur : c'est la *sublimation*.
6. Et enfin, de vapeur à solide : c'est la *cristallisation*.



Ces passages se font en transmettant de l'énergie. Lorsque par exemple un fluide caloporteur change d'état en se vaporisant dans l'évaporateur, puis en se liquéfiant dans le condenseur d'une pompe à chaleur, il transmet au milieu extérieur l'énergie latente qu'il contient en son sein : la chaleur latente de vaporisation d'une part et la chaleur latente de condensation d'autre part. C'est ainsi que le chauffage thermodynamique nous permettra de satisfaire à moindre frais nos besoins en énergie thermique.

*L'énergie primaire (EP) > secondaire > finale (EF) > utile*

À l'énergie finale rendue à notre domicile en bout de course s'ajoute l'énergie qu'il a fallu dépenser préalablement pour extraire, distribuer, stocker et produire avec une chaîne de production au rendement plus ou moins bon, selon les cas, en perdant de ce fait plus ou moins d'énergie au passage. L'énergie primaire ou *énergie grise* est le total de toutes ces énergies consommées. Ce raisonnement peut se tenir pour le charbon, le fioul, le gaz, le bois ou l'électricité.



Source BP Statistical Review of World Energy 2008

Pour permettre la comparaison avec les autres pays, la France a dû introduire, dans le cadre de son mode de production énergétique, la notion d'énergie primaire établissant la part relative de chaque chaîne énergétique. Cette part relative des sources d'énergie primaire françaises en 2012 s'établit comme suit par ordre d'importance décroissante :

Électricité *	44 %	114 M tep
Pétrole	30,3 %	78,6 M tep
Gaz	14,8 %	38,5 M tep
EnR thermique et déchets**	6,6 %	17,2 M tep
Charbon	4,2 %	10,9 M tep

\*Pourcentage et quantité englobant le nucléaire et l'hydraulique, l'éolien et le voltaïque n'occupant pour l'instant qu'une position marginale et l'hydrolien étant encore négligeable.

\*\*Production de chaleur avec le bois, les déchets urbains renouvelables, la géothermie, le solaire thermique, le biogaz et le chauffage thermodynamique (PAC).

Les réglementations thermiques françaises ont dû introduire également les notions d'*énergie primaire*, d'*énergie finale* et enfin d'*énergie utile*, notions faisant intervenir le rendement de la chaîne énergétique utilisée pour produire l'énergie utile arrivant à l'utilisateur. Cette notion de

## Les lutins thermiques et :

rendement de la *chaîne énergétique* assurant la satisfaction du besoin est à considérer pour le chauffage, la climatisation, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage des locaux et de tous les auxiliaires électroménagers. Elle est essentielle afin de diminuer autant que faire se peut la quantité d'énergie primaire requise pour satisfaire le besoin. Une réflexion sur le coefficient de transformation de l'énergie primaire thermique en énergie finale selon la chaîne énergétique utilisée pourrait être la suivante en ce qui concerne le chauffage :

<b>Énergie</b>	<b>Énergie primaire (EP)</b>	<b>Énergie finale (EF)</b>
bois	0,6 kWh*	1 kWh
gaz/fioul	1 kWh	1 kWh
Électricité	2,58 kWh**	1 kWh

\*La justification de ce chiffre est complexe et est plutôt une convention qui mérite examen dans la mesure où la quantité de gaz carbonique dégagée par le bois qui se décompose lentement dans la forêt est la même que celle qui se forme lors de la combustion. La formation de CO<sub>2</sub> est seulement plus rapide. La théorie de l'Oncle Vania « *Back to the trees* », du célèbre livre *Pourquoi j'ai mangé mon père*, n'est probablement pas la solution si elle devait se généraliser avec la démographie actuelle car il faut se rendre à l'évidence : une fois coupé pour les besoins de la combustion, le bois n'absorbe plus le CO<sub>2</sub> qu'il aurait absorbé s'il ne l'avait pas été.

\*\*Ce chiffre, différent pour chaque pays européen, est fonction du mode de production utilisé localement pour générer l'électricité. La chaîne de production utilisée en France, étant principalement nucléaire, est liée au rendement des centrales nucléaires actuelles voisin de 35 %. Les lutins thermiques, qui vont nous guider dans la suite de ce livre, ne comprennent pas pourquoi ce chiffre n'est pas revu à la baisse compte tenu de l'amélioration des performances des centrales nucléaires. Un coefficient de conversion de l'énergie électrique finale en énergie primaire voisin de 2 serait probablement plus conforme à la réalité par le fait que les pertes thermiques dans l'environnement soient maintenant plus faibles et plus proches de 50 % que de 61 %. Ils estiment que le président de l'Association des pompes à chaleur (AFPAC) a raison de dire que si le coefficient de 2,58 était remplacé dans la RT 2012 par une valeur voisine de 2, les conséquences seraient de valoriser le chauffage électrique utilisant les PAC à compresseur au détriment du gaz ouvrant la voie à la pompe à chaleur à compresseur. Les lutins thermiques ne comprennent pas non plus pourquoi la loi instaure un bonus-malus sur l'énergie qui privilégie le chauffage au gaz par rapport au chauffage électrique, alors que tous les hommes politiques français s'accordent à condamner l'exploitation du gaz de schiste.

### *La France et l'énergie électrique d'origine nucléaire*

L'énergie électrique est produite en France à près de 80 % par le nucléaire. Cette production met en évidence un rapport entre l'énergie primaire et l'énergie finale compris entre 2,2 et 2,58 selon les organismes européens, ce qui revient à dire, en prenant la référence de 2,58 chiffre retenu par l'Ademe – organisme français contrôlant la RT 2012 – que seulement 1 kWh d'énergie finale parvient à l'utilisateur pour 2,58 kWh d'énergie primaire. Pour comprendre ce chiffre, il est nécessaire de mettre en évidence le rendement de la chaîne énergétique utilisée avec le nucléaire (voir les *chaînes énergétiques*, page 160). La chaleur intense générée par la transformation des chaînes atomiques dans le cœur du réacteur nucléaire sert à surchauffer l'eau à une température et une pression aussi élevée que possible. Ceci pour améliorer le rendement des turbines transformant en énergie mécanique l'énergie interne contenue dans la vapeur surchauffée. Pour améliorer le rendement, on augmente maintenant les températures à la source chaude jusqu'à des températures voisines de 250 °C voire plus, ce qui permet d'obtenir un coefficient de performance amélioré, coefficient qui reste malgré tout relativement modeste ( $COP = (T_c - T_f) / T_c = (250 - 50) / 273 + 250 = 200 / 523 = 0,38$ ). La différence  $1 - 0,38 = 0,62$  étant les pertes thermiques malheureusement encore importantes dissipées sous forme de chaleur dans l'atmosphère, dans la rivière et bientôt dans la mer. Ces dissipations sont en partie responsables du réchauffement climatique. On retrouve bien sensiblement le rapport entre l'énergie primaire égale à 1 et l'énergie finale 0,38 récupérée par l'homme sous forme électrique  $1 / 0,38 = 2,63$ . Ce chiffre proche de 2,58 pouvant varier sensiblement selon les températures à la source chaude et

## Les lutins thermiques et :

à la source froide (prise ici égale à 50 °C) et aussi selon les pertes en ligne par effet Joule du réseau de distribution. Ces dernières, proches de 5 % malgré les très hautes tensions utilisées pour la distribution de l'électricité (voir *transport de l'énergie* page 182), ne sont pas négligeables. Le rendement de la chaîne énergétique des centrales nucléaires est donc relativement modeste mais elle ne génère pratiquement pas de CO<sub>2</sub>.

### *Énergie utile = énergie finale x coefficient de performance*

Reste une dernière étape très importante avant que l'énergie thermique n'arrive dans nos pièces de vie : celle touchant le rendement du générateur de chaleur.

Si l'on prend l'exemple du chauffage électrique, deux cas de figure se présentent :

1. Le chauffage électrique à effet Joule avec un COP de 1 : 1 kWh électrique = 1 kWh thermique.
2. Le chauffage électrique par PAC à compresseur avec un COP de 4 (pour exemple) 1 kWh électrique x 4 = 4 kWh thermiques, 3 kWh thermiques étant prélevés dans l'environnement. Avec un COP de 4, une pompe à chaleur est donc 4 fois plus performante qu'un radiateur électrique à effet Joule.

### *Énergie primaire (EP) selon le mode de chauffage des logements en France*

	NB en millions de logements <sup>1)</sup>	NB en %	EP en 2012	EP avec TRI à minima
Gaz naturel	9,03	34,4	34,4	14,3 <sup>3)</sup>
Électricité	7,94	30,3	78,2	32,5 <sup>3)</sup>
Fioul	4,63	17,7	17,7	7,4 <sup>3)</sup>
Chauffage urbain	1,29	5	5	5
Charbon <sup>2)</sup>	1,17	4,5	4,5	4,5
Bois <sup>2)</sup>	1,17	4,5	2,7	2,7
Gaz liquéfié (GPL)	0,6	2,3	2,3	1,1
Autres moyens	0,35	1,3	-	-
<b>Totaux</b>	<b>26,19 millions</b>	<b>100</b>	<b>145</b>	<b>67,5</b>

soit 2,3 habitants en moyenne par logement

<sup>1)</sup> Données Wikipédia pour le NB de logements.

<sup>2)</sup> Bois et charbon supposé en quantités égales.

<sup>3)</sup> Pourcentage de PAC air-eau et eau-eau supposée égal à 50/50 avec COP moyen de 4.

La colonne de droite montre ce que pourrait être en France la consommation en EP sur la base d'une TRI à minima combinant deux fluides au sein d'une chaufferie hybride. Elle prouve (voir cellules grisées) que la consommation d'énergie primaire pourrait être divisée à minima par deux pour le chauffage des logements parcourant ainsi sensiblement la moitié du chemin qui nous sépare de la stratégie européenne de l'énergie dite du 20-20-20.

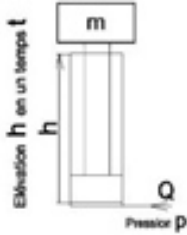
### *Les renouvelables*

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant suffisamment rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle humaine (elle dure de nombreuses générations). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers et répétitifs provoqués par les astres, principalement le rayonnement solaire, par le sous-sol de la Terre (géothermique profonde) mais aussi à un degré moindre par la Lune (marée) et la combustion du bois sous certaines réserves. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon ne sont pas des énergies renouvelables car il faudra des millions d'années pour reconstituer les stocks d'énergie fossile que l'on consomme actuellement en quelques générations. De même, la réserve d'uranium disponible sur Terre étant limitée, l'énergie nucléaire actuelle, issue de la fission des atomes d'uranium, ne peut pas être considérée comme une énergie renouvelable. Seuls les réacteurs à fusion, en cours d'expérimentation, dont le carburant est constitué des isotopes de l'hydrogène présents dans l'eau des océans de façon quasi illimitée à l'échelle humaine, seraient des moyens de production d'énergie utilisant une énergie renouvelable.

## Les lutins thermiques et :

### Les 4 énergies de base

Selon les lutins thermiques : « On ne changera pas l'énergie, elle restera mécanique, hydraulique, électrique, thermique. » Ce qui changera, selon eux, est la façon dont ces formes d'énergie seront converties entre elles en intégrant mieux les saisons, en profitant des propriétés de la matière et en tenant compte des lois qui régissent la conservation de l'énergie ainsi que des équivalences entre les paramètres du système d'unité internationale SI. (Voir par exemple les deux applications pratiques ci-dessous.)

Type d'énergie	Électrique	Thermique	Hydraulique	Mécanique
<i>Puissance P</i>				
Formules	$P = UI$	$P = QTc = Qe$	$P = Qp$	$P = Fv = C\omega$
Unités de <b>P</b> en watt	Avec Tension <b>U</b> en volts Courant <b>I</b> en Amp. <b>P</b> en watt Avec loi d'ohm $U = RI$ <b>R</b> résistance électrique (ohms)	Avec - Débit <b>Q</b> en g/s - Température <b>T</b> °K - <b>c</b> chaleur spécifique du fluide en J/g et °C - <b>e</b> enthalpie du fluide en joule/g	Avec Débit <b>Q</b> m <sup>3</sup> /s et pression <b>p</b> en N/m <sup>2</sup> ou $P = 2,77 Qp$ avec débit <b>Q</b> en l/mn et pression <b>p</b> en bar (1 bar = 10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup> )	Avec en linéaire - Effort <b>F</b> en newton - Vitesse <b>V</b> en m/s  Ou en rotation - Couple <b>C</b> en m N (newton) - $\omega$ rd/s
Pertes de puissance	$\Delta P = I(U_1 - U_2) = RI^2$	$\Delta P = Q(Te - Ts)c$	$\Delta P = Q(p_1 - p_2)$	Frottement <b>f</b>
Remarque	Effet Joule. Chute de tension en ligne par effet Joule <b>U<sub>1</sub> - U<sub>2</sub></b>	Chute de température en ligne <b>Te - Ts</b>	Pertes de charge en ligne <b>p<sub>1</sub> - p<sub>2</sub></b>	Le frottement s'oppose au mouvement
<i>Énergie = puissance x temps W = P t avec W (joule), P (watt), t (secondes)</i>				
Formules <b>W</b> en joule 1 joule/s = 1 watt	$W = RI^2 t$	$W = m(T_1 - T_2)c$	$W = Q(p_1 - p_2)t$	$W = f d$ (pertes) $W = mgh$ (potentielle) $W = \frac{1}{2}mv^2$ (cinétique)
<i>Transport</i>				
Type d'énergie	Électrique	Thermique	Hydraulique	Mécanique
Commodité	Assez bon rendement. Grande distance.	Mauvais rendement (pertes). Distance moyenne.	Assez bon	Bon rendement. Petite distance coûteuse.
Remarques	On diminue les pertes en ligne par effet Joule en augmentant la tension <b>U</b> .	L'eau est souvent le fluide qui transmet la puissance. On diminue les pertes en ligne par calorifugeage des tuyaux.	<i>Exemple :</i> <b>élevateur hydraulique</b> Énergie $W = mgh$ Puissance $P = UI = mgh/t$	
<i>Le stockage de l'énergie (appréciations)</i>				
On peut citer par ordre d'importance décroissante :				
<i>Hydraulique</i> : - les STEP qui permettent de stocker sous forme potentielle des quantités d'énergie considérables proche du milliard de kWh, les accumulateurs hydrauliques qui peuvent restituer des puissances importantes mais pendant des temps relativement courts.				
<i>Électrique</i> : l'électricité est difficile à stocker avec les piles. Il faut cependant citer, dans le cadre du stockage de l'énergie développée par les éoliennes, la société américaine Zincairinc basée dans le Montana qui vient de développer une technologie de batteries « vertes » capables de restituer une puissance instantanée de 1 000 kW pendant près de 19 heures.				

## Les lutins thermiques et :

**Thermique** : le stockage thermique possible grâce à la chaleur spécifique des corps commence à être utilisé à grande échelle dans les centrales solaires électriques afin qu'elles puissent continuer à produire de l'électricité lorsque le temps est couvert ou la nuit. L'Espagne va exploiter prochainement sa troisième et gigantesque CST *Andasol 3* fonctionnant sur ce principe.

**Mécanique** : la société américaine *Beacon Power* a annoncé en 2011 le fonctionnement à pleine puissance d'un volant d'inertie mécanique capable de développer une puissance mécanique de 20 000 kW sous la forme d'une énergie mécanique cinétique. Cette puissance est destinée à stabiliser le réseau électrique de New York pendant des temps relativement courts.

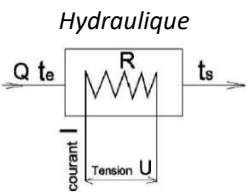
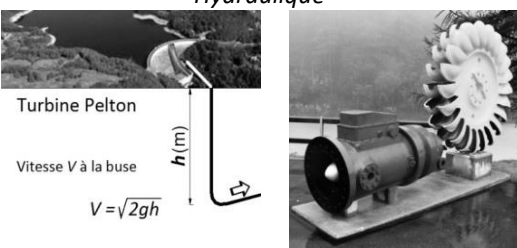
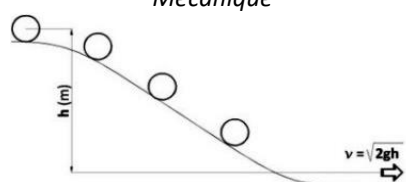
### Équivalences et correspondances

Il y a quelques équivalences entre les énergies :

- L'équivalence entre les énergies thermique et mécanique (1 cal = 4,18 joules), une calorie étant par définition la quantité de chaleur nécessaire pour élever un gramme d'eau d'un °C.
- Les deux équivalences entre l'énergie thermique et la masse de la matière à savoir :
  - celle relative à l'*enthalpie* du fluide caloporteur avec le chauffage thermodynamique qui s'exprime en kilojoule/kg ;
  - celle relative à la *fusion nucléaire* qui peut être assimilée à une énergie cinétique convertie en chaleur avec diminution de la masse selon la célèbre formule d'Einstein  $W = m v^2$ , formule valable selon Wikipédia dans le système international d'unités SI, soit  $W$  en joules si  $m$  est exprimé en kg et la vitesse de la lumière  $v$  en m/s ( $c = 300\,000\,000$  m/s). Lorsque l'on observe cette formule formulée – et non démontrée – par Poincaré dans ses études sur l'électromagnétisme et par Einstein cinq ans plus tard, on ne peut que faire le rapprochement avec la formule facile à démontrer de l'énergie cinétique mécanique dans notre champ gravitationnel conventionnel  $W = 1/2 m v^2$ . Reste ce rapport de 1/2 qui différencie les deux formules et qui pourrait avoir trouvé une suite dans le moteur surnuméraire à dégravitation de Léon Raoul Hatem et dans les *travaux de G. Romerio et Rubtsov*. Ceci en rapprochant l'infiniment grand et l'infiniment petit l'un de l'autre en quelque sorte ?
- Il y a aussi les correspondances en rapport avec la combustion des combustibles fossiles : la combustion de 1 litre de fioul ou de 1 m<sup>3</sup> de gaz naturel génère une énergie thermique sensiblement égale à 10 kWh.

Type d'énergie	Électrique	Thermique	Hydraulique	Mécanique
<i>Système d'unités internationales SI distance m, surface m<sup>2</sup>, volume m<sup>3</sup></i>				
Puissance $P$ watt Énergie $W$ joules j Temps $t$ secondes Distance $h$ mètre Masse $m$ en kg	Tension $U$ volts Intensité $I$ Ampère Résistance électrique $R$ (ohms)	Débit massique $Q$ en kg/s Chaleur spécifique $c$ fluide joule/g et °C Enthalpie $e$ du fluide en joule/g	Débit volumique $Q$ en m <sup>3</sup> /s Pression $p$ en N/m <sup>2</sup>	Effort $F$ en Newton N - Vitesse linéaire $V$ en m/s - Vitesse angulaire $\omega$ en rd/s 1 rd = 57,2°

### Applications pratiques

<p style="text-align: center;"><b>Chauffe-eau instantané sans ballon (effet Joule)</b></p> <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;"><math>P = UI = Q(T_e - T_s)c</math></p> </div> <p>Faut-il préciser que ce mode de chauffage, acceptable dans certains cas pour générer l'eau chaude sanitaire, est à éviter pour le chauffage des locaux compte tenu de ses modestes performances.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Potentiel-cinétique</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><i>Hydraulique</i></p>  <p>Turbine Pelton</p> <p>Vitesse <math>V</math> à la buse</p> <p><math>V = \sqrt{2gh}</math></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><i>Mécanique</i></p>  <p>Lorsque la bille arrive en bas de la pente l'énergie potentielle <math>mgh</math> est convertie en énergie cinétique. On a <math>mgh = \frac{1}{2} m v^2</math></p> </div> </div>
--	--