



## L'énergie sous toutes ses formes : définitions

### Énergie primaire, énergie secondaire, utile ou finale. Quelles sont les formes et les déclinaisons de l'énergie ?

D'après le dictionnaire de l'Académie française, énergie vient du grec *energeia*, « force en action ». Pour les scientifiques et les ingénieurs, ce terme désigne la capacité qu'a un corps, un système, de produire un travail susceptible d'entraîner un mouvement, une production de chaleur ou d'ondes électromagnétiques (dont la lumière).

En thermodynamique, on distingue deux principales formes d'énergie : le travail (énergie fournie par une force lorsque son point d'application se déplace, souvent énergie cinétique macroscopique ou énergie électrique) et la chaleur (énergie cinétique microscopique).

En économie, on désigne par énergie tant la matière première ou le phénomène naturel pouvant fournir un travail, que le travail ainsi produit et le secteur d'activité chargé de sa conversion (production de combustibles et de carburants comme l'extraction de houille, de lignite, de tourbe, d'hydrocarbures ou de minerais d'uranium, cokéfaction et industrie nucléaire, raffinage de pétrole).

### Les différentes formes de l'énergie

#### ■ Énergie cinétique d'une masse en mouvement

La chaleur, aussi appelée énergie thermique, correspond à l'énergie cinétique d'agitation microscopique des molécules qui constituent un objet. Elle est d'autant plus élevée que la température desdits objets est élevée ; elle se transmet d'un corps à l'autre par conduction, convection et rayonnement ; ces transferts thermiques macroscopiques sont contraints par les lois de la thermodynamique.

■ **Énergie potentielle**, qui est en puissance dans un système et peut être libérée par un changement d'état (ex. : énergie libérée au cours d'une réaction chimique ou d'une réaction nucléaire, énergie d'un objet soumis à un champ de force tel que la gravité, un champ électrique, un champ magnétique...)

■ **Énergie électromagnétique**, portée par les ondes électromagnétiques en quanta d'énergie appelées photons (ex. : énergie de la lumière ou des ondes radio).

Le terme d'énergie mécanique désigne tant l'énergie cinétique que l'énergie potentielle découlant d'une force conservative, c'est à dire dont le travail ne dépend pas du chemin parcouru (ex. : la pesanteur est une force conservative, mais les frottements ne le sont pas).

### Les unités de mesure

Dans le système international, l'unité de mesure de l'énergie est le joule (J). 1 joule (J) correspond au travail d'une force d'1 newton (N) dont le point d'application se déplace d'1 mètre (m) dans la direction de la force. C'est aussi l'énergie dissipée par un appareil électrique d'1 watt (W) opérant pendant 1 seconde (s).

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ W.s}$$



D'autres unités de mesure de l'énergie sont couramment utilisées, telles que le kWh (l'énergie électrique dissipée par un appareil électrique d'une puissance d'1kW pendant 1 heure; 1 kWh = 3,6 MJ), la tonne équivalent pétrole (1 tep = 42 GJ), la tonne équivalent charbon (1 tec = 0,7 tep), la calorie (énergie thermique nécessaire pour chauffer 1 gramme d'eau dégazée de 14,5°C à 15,5°C sous pression atmosphérique normale; 1 cal = 4,18J), la Calorie ou kilo-calorie (1 Cal = 1 kcal = 1 000 cal), l'électron-volt (énergie cinétique d'un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel électrique d'1 Volt; 1 eV = 1,6.10<sup>-19</sup> J), etc.

Note: la notation kW/h est fréquemment utilisée pour qualifier une quantité d'énergie électrique dans des articles non spécialisés. Cette notation n'a pas de sens. Il faut parler de kW (unité de puissance) et de kWh (unité d'énergie).

## Les grands principes de l'énergie : conservation et conversion

Deux concepts essentiels qu'il est important de mémoriser :

- **Principe de conservation de l'énergie** (ou premier principe de la thermodynamique) : principe selon lequel l'énergie totale d'un système isolé reste constante. Cette énergie peut changer de forme (transformation de chaleur à haute température en énergie cinétique puis électrique, avec rejet de chaleur à basse température) et être échangée entre sous-systèmes, mais sa quantité demeure constante pour un système isolé. C'est une variante du principe universel énoncé par Lavoisier selon lequel « *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme.* »
- **La transformation d'une forme d'énergie en une « seule » autre n'est jamais intégrale** : les déperditions qui ont lieu au cours de cette conversion prennent souvent la forme de chaleur. On qualifie cette chaleur, dont l'existence est nécessaire pour que soit vérifié le premier principe de la thermodynamique, de « fatale, » car elle n'est que rarement valorisée (= utilisée). Les rendements de conversion varient suivant les formes d'énergie en jeu et les systèmes utilisés pour la conversion.

Ainsi, le rendement des machines thermiques, qui ont pour vocation la transformation de l'énergie thermique en énergie cinétique (de chaleur en travail), est ainsi limité par le second principe de la thermodynamique énoncé par Nicolas Sadi Carnot au XIX<sup>e</sup> siècle. Défini par le rapport de la différence de température entre source chaude et source froide avec la température de la source chaude, le rendement est d'autant plus élevé que la source de chaleur est à une température élevée (ex. : chaudière d'une centrale thermique à charbon, à gaz, nucléaire...) et que la température de la chaleur rejetée est basse (ex. : la température de refroidissement offerte par l'atmosphère ou les cours d'eau).

Le bilan énergétique de cette transformation s'écrit :  $Q_c = W + Q_f$

où  $Q_c$  est la chaleur fournie par la source chaude,  $W$  le travail mécanique en laquelle la chaleur est transformée et  $Q_f$  la chaleur rejetée vers la source froide.

L'efficacité (ou rendement énergétique) est égale à  $W/Q_c = (Q_c - Q_f)/Q_c = 1 - Q_f/Q_c$

Le rendement d'une centrale thermique se situe entre 35 et 45%.

Le rendement d'un moteur électrique (qui transforme une énergie électrique en énergie cinétique, de l'ordre de 90%) ou d'un alternateur (qui transforme une énergie cinétique en énergie électrique) n'est réduit que par l'existence de frottements qui échauffent les pièces et conduisent au rejet de chaleur dans l'environnement. Les pertes énergétiques correspondantes sont faibles.

Cette notion d'efficacité limitée de la conversion énergétique permet d'introduire les notions d'énergie primaire, secondaire, finale et utile.



## Les déclinaisons de l'énergie : énergie primaire, secondaire, finale et utile

A l'exception de l'utilisation directe de la lumière solaire (pour l'éclairage, le séchage du linge, ou la photosynthèse), toutes les formes d'énergie que nous utilisons proviennent de la conversion d'une énergie primaire disponible dans la nature en énergie secondaire produite par l'homme (ex. : conversion de chaleur en électricité dans une centrale thermique, du rayonnement solaire en énergie électrique par un panneau photovoltaïque, du pétrole en essence dans une raffinerie).

- **L'énergie primaire** correspond à l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium<sup>1</sup>.
- **L'énergie secondaire** est toute l'énergie obtenue par transformation d'une énergie primaire<sup>2</sup> (en particulier électricité d'origine thermique). Une fois produite, cette énergie secondaire doit être transportée vers son lieu de consommation ; ce faisant, elle peut encourir des pertes (notamment dans le cas de l'électricité produite de façon centralisée et transportée sur de longues distances). L'énergie dont dispose le consommateur final est appelée énergie finale (ex. : électricité domestique, essence à la pompe, gaz de réseau ou en bouteille).
- **L'énergie finale** donne lieu à une transformation en énergie utile sur le lieu de son utilisation (ex. : conversion de l'énergie électrique reçue du réseau en énergie cinétique du fluide caloporteur du lave-vaisselle, en énergie lumineuse pour l'éclairage ou en énergie thermique pour le chauffage).
- **L'énergie utile** est celle qui procure le service énergétique recherché. C'est celle qui est recherchée par l'utilisateur final : énergie cinétique de l'eau dans le lave-vaisselle, chaleur diffusée dans les pièces d'un bâtiment, intensité lumineuse d'une lampe. Avant d'arriver au lieu de sa transformation en service énergétique, elle aura dû être produite et transportée.

Les pertes encourues lors du transport de l'énergie secondaire et l'efficacité de la conversion entre énergie finale et énergie utile varient d'une forme d'énergie à l'autre et d'un mode de conversion à l'autre (ex. : les ampoules fluoro-compactes sont six fois plus efficaces que les lampes à incandescence pour la conversion d'électricité en lumière).

En résumé :

Énergie Primaire	×	rendement de conversion	=	Énergie Secondaire
Énergie Secondaire	×	rendement de transport	=	Énergie Finale
Énergie Finale	×	rendement d'utilisation	=	Énergie Utile

Donc,

Énergie Utile =

rendement de conversion × rendement de transport × rendement d'utilisation × Énergie Primaire.

Rapporter toutes les consommations d'énergie à leur équivalent en énergie primaire permet de mieux les comparer, et d'en analyser l'impact sur la disponibilité des ressources énergétiques. La réglementation thermique des bâtiments en France a ainsi choisi d'imposer des seuils de consommation d'énergie

1 <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/energie-primaire.htm>

2 <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/energie-secondaire.htm>



primaire par m<sup>2</sup> de construction. Par exemple, le Grenelle de l'Environnement pose la RT 2012 comme référence à compter d'octobre 2011 : l'objectif de consommation est fixé à 50 kWh/m<sup>2</sup>/an.

A noter : Le sens statistique de ces termes diffère du sens physique. En effet, les statistiques de comparaison de la production d'énergie considèrent comme énergie primaire, l'énergie qui résulte de la première transformation (la chaleur nucléaire, l'électricité éolienne ou l'électricité hydraulique sont ainsi considérées comme des énergies primaires, et non pas l'énergie de fission potentielle de l'uranium, l'énergie cinétique du vent ou l'énergie potentielle des chutes d'eau).

### Quelques ordres de grandeur

Énergie Primaire (au sens physique)	Énergie Secondaire	Moyen de conversion	Rendement de conversion
Énergie potentielle chimique du charbon	Énergie électrique (avec conversion intermédiaire en énergie cinétique du rotor d'un alternateur)	Centrale Thermique à Charbon	30–50%
Énergie potentielle chimique du gaz		Centrale Thermique	40% (cycle simple) 55% (cycle combiné)
Énergie potentielle nucléaire de l'uranium		Centrale Thermique Nucléaire	35%
Énergie potentielle chimique de la biomasse		Centrale Thermique	35%
Énergie potentielle d'une chute d'eau		Barrage hydroélectrique de retenue	90%
Énergie cinétique du vent		Éolienne	limite maximale théorique (limite de Betz) : $16/27 \approx 59\%$
Énergie potentielle chimique du charbon ou du gaz	Cogénération d'électricité ET de chaleur	Centrale de Cogénération	75%
Énergie lumineuse	Énergie électrique	Panneau photovoltaïque de silicium polycristallin	15% limite maximale théorique pour les panneaux mono-couches de silicium polycristallin
Énergie potentielle chimique du pétrole	Énergie potentielle chimique de l'essence	Raffinerie	30–50%



Rendements de transport :

- 95% en moyenne en France pour l'électricité
- 99,4% pour le gaz en France<sup>3</sup>

Énergie Finale	Énergie Utile	Moyen de conversion	Rendement de conversion
Électricité	Lumière	Ampoule fluorocompacte <sup>4</sup>	12% (10–20 lm/W)
Électricité	Lumière	Ampoule à incandescence <sup>4</sup>	70% (30–87 lm/W)
Électricité	Chaleur de cuisson des aliments (et non de chauffage de l'air ambiant)	Plaques de cuisson	50% (fonte en serpentin) 60% (vitrocéramique) 90% (plaque à induction)
Chaleur (par ex. via des réseaux de chauffage)	Chaleur	Radiateur électrique	≈ 95%
Gaz de réseau	Chaleur	Chaudière	80%
Gaz de réseau	Chaleur de cuisson des aliments	Gazinière	50%
Essence	Énergie cinétique d'un véhicule	Moteur à explosion	20%
Diesel	Énergie cinétique d'un véhicule	Moteur diesel	30%

3 Donnée GrdF <http://www.grdf.fr/navigation-institutionnelle/actualites/liste-actualites/detail-actualite/article/grdf-achete-14-twh-de-gaz-a-total-gas-power/>

4 Sources pour les lampes : <http://www.eu-greenlight.org/What-to-do/what.htm>



## Deux exemples

Rappel :

Énergie Utile =

rendement de conversion × rendement de transport × rendement d'utilisation × Énergie Primaire.

Prenons le cas de l'éclairage par une ampoule à incandescence qui reçoit l'électricité produite par une centrale à charbon :

Énergie utile = 35% × 95% × 12% × Énergie primaire = 4% × Énergie Primaire.

Seuls 4% de l'énergie calorifique du charbon sont utiles au consommateur final. Le reste (96%) est « parti en fumée », dissipé sous forme de chaleur dans l'environnement (67% de l'énergie primaire) et le lieu éclairé (29% de l'énergie primaire).

Dans le cas non plus d'une ampoule à incandescence (rendement d'utilisation de 12%) mais d'une lampe à fluorescence (rendement d'utilisation de 70%), ce ne sont plus 4% de l'énergie primaire qui sont utiles au consommateur, mais 23%. C'est-à-dire que pour obtenir le même service énergétique (qualité de l'éclairage), on a besoin de consommer six fois moins de charbon. Cet exemple illustre l'important moyen de réduction de la facture énergétique et des émissions de gaz à effet de serre que représente l'efficacité énergétique.

Autre exemple : celui de l'utilisation de l'électricité pour la cuisson sur des plaques à induction, plutôt que l'utilisation d'un combustible fossile. Supposons que l'électricité est produite dans une centrale à gaz à cycle combiné.

- Cuisson sur plaques à induction :

Énergie utile = 55% × 95% × 90% × Énergie Primaire = 47% × Énergie Primaire, l'essentiel des 53% restants étant utilisé pour chauffer l'environnement extérieur.

- Cuisson sur gazinière :

Énergie utile = 99,4% × 50% × Énergie primaire = 49,5 % × Énergie Primaire, l'essentiel des 50% restants étant utilisé pour chauffer l'air de la cuisine (avantageux en hiver!)

Lire aussi :

« Chiffres clés de l'énergie : Édition 2010 » (graphique pages 6-7),

Commissariat général au développement durable,

[http://www.statistiquesdeveloppement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SOeS-Int\\_energie-entierV5\\_cle29b8cd.pdf](http://www.statistiquesdeveloppement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SOeS-Int_energie-entierV5_cle29b8cd.pdf)