



Pierre Miquel et Guy Maurin

Septembre 2025

Les unités et les principales sources énergétiques

Dans notre vie de tous les jours l'énergie a été historiquement définie comme « une force en action » par les grecs anciens. Elle peut être créée, produite, consommée et doit être économisée. Par contre au sens physique existe le principe de la conservation de l'énergie : elle ne peut pas être créée, ni consommée, ni économisée mais elle peut s'échanger. Elle peut être gravitaire (on parle d'énergie potentielle), relativiste ($E=mc^2$) ou nucléaire, radiative, cinétique, chimique, électrique, calorifique. Depuis Newton, l'énergie gravitaire peut accélérer une pomme et lui communiquer de la vitesse, donc une énergie cinétique. L'énergie est nécessaire au mouvement. Depuis Einstein, et $E=mc^2$, la masse et l'énergie sont équivalentes et l'Univers en regorge. L'énergie gouverne le développement de l'humanité et chaque Français utilise actuellement une énergie équivalente à ce que produirait la force physique de 400 serviteurs humains.

Notre planète Terre reçoit presque la totalité de son énergie du Soleil qui est un grand réacteur de fusion nucléaire. Les rayonnements du soleil chauffent la Terre, évaporent l'eau et, par photosynthèse, transforment le CO_2 en végétation. Toutes les énergies fossiles, mais aussi les énergies hydrauliques et éoliennes proviennent du Soleil qui consomme 4 milliards de kg/s d'hydrogène provenant de ses réserves. Il n'y a donc pas d'énergie renouvelable mais une énergie durable, le Soleil pouvant encore briller 5 milliards d'années.

L'énergie géothermique ne provient pas du soleil mais des désintégrations radioactives des éléments instables de notre planète et de l'énergie cinétique de toutes les météorites qui ont créé la terre en s'agrégeant. Le flux géothermique est faible et l'usage possible limité à certains sites favorables.

L'énergie marémotrice provient des forces gravitaires exercées par la Lune et le Soleil ; son utilisation réduit, un tout petit peu, l'énergie cinétique de ces astres qu'elle ralentit. A l'échelle des planètes, les marées consomment de l'énergie à cause des frottements. La rotation de la Terre ralentit d'une heure par jour tous les 200 millions d'années et la Lune s'éloigne de nous.

Toutes les formes d'énergie ont tendance à se convertir en chaleur. On peut transformer intégralement les autres formes d'énergie « mécanique » en chaleur. On peut aussi, à l'aide d'une pompe à chaleur, pomper jusqu'à 2,4 fois (cas favorable) plus de chaleur qu'on a consommé d'énergie mécanique.

Dans l'autre sens, les machines thermiques peuvent produire de l'énergie mécanique mais leur rendement est limité par la formule de Carnot : $Rdt = 1 - TF/TC$, TF étant la température de la source froide et TC celle de la source chaude. Le rendement augmente avec la température de la source chaude.

Dans tous les cas, l'énergie totale se conserve.

La comparaison de différents types d'énergie met en jeu des rendements technologiques, nécessairement variables. Cela permet de tenir compte du service plus grand fourni par l'énergie mécanique et de la valeur moindre de la chaleur. L'Energy Institute (Réf. 1) considère que l'énergie mécanique ou électrique vaut 2,4 fois plus que l'énergie thermique fournie par le charbon, le pétrole ou le gaz.

L'unité d'énergie du Système International est le joule (J) et celle de la puissance le watt (W), énergie disponible par unité de temps ($1\text{ W}=1\text{ J/s}$).

En pratique, le kilowattheure (kWh) est souvent utilisé comme unité d'énergie. Par exemple, une pompe de 1 kW qui fonctionne en continu pendant 2 heures va consommer $2 \times 1 = 2\text{ kWh}$

Un exemple pour illustrer les échanges d'énergies et la forte densité énergétique de l'essence :

Un être humain, pour monter en haut du Mont Blanc à partir du niveau de la mer va prélever 1 kWh de son énergie musculaire qu'il va transformer en énergie potentielle. Ses muscles avaient eux-mêmes trouvé leur énergie dans celle chimique des aliments mangés, aliments qui eux-mêmes provenaient de la photosynthèse obtenue grâce au rayonnement du soleil etc. Par comparaison un litre d'essence est capable de fournir 10 kWh d'énergie thermique, ce qui montre la grande quantité d'énergie contenue dans un litre d'essence!

1. Energie

1.1. Unités d'énergie

Unités d'énergie	
Joule (J)	1 kg lancé à 1 m/s = 0,5 J 1 kg chutant de 1 m = 9,8 J
Kilowatt – heure (kWh)	1 kWh = 3,6 MJ = $3,6 \cdot 10^6\text{ J}$
Tonne d'Équivalent Pétrole (tep)	1 tep = 11 MWh (thermique) = $39,6 \cdot 10^6\text{ J}$
Kilocalorie (ou grande calorie)	1 kcal = 4,18 kJ = 1,2 Wh 1 kg d'eau chauffé de 1°C
Électronvolt (eV)	1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$

1.2. Masses en jeu pour produire 1 kWh

Energie mécanique : en tonnes pour 1 kWh	
Pesanteur	10 t d'eau chutant de 36 m
Cinétique	Camion de 10 t à 100 km/h
Éolienne	20 000 m ³ d'air (25 t) à 60 km/h

Energie thermique : en kilogrammes pour 1 kWh	
Chimique	0,1 kg de carburant (pétrole, charbon, gaz)
Biologique	Un repas
Électrochimique	80 kg de batterie
Thermique	Fusion de 10 kg de glace Vaporisation de 1,5 kg d'eau

Energie nucléaire : en milligrammes pour 1 kWh	
Fission	10 mg d'uranium naturel
Surgénération	0,1 mg d'uranium naturel
Fusion	5 µg d'hydrogène dans le soleil

Un réacteur nucléaire de 1 GW électrique fournit 10 TWh/an avec 1 t/an de matière fissile.

2. Puissance

2.1. Unités de puissance

La Puissance c'est l'énergie par unité de temps

Unités de puissance	
Watt	1 W = 1 J/s
	kilowatt → 1 kW = 10^3 W → Réchaud
	Mégawatt → 1 MW = 10^6 W → Eolienne
	Gigawatt → 1 GW = 10^9 W → Réacteur
	Térawatt → 1 TW = 10^{12} W
	Exawatt → 1 EW = 10^{18} W → 6 flux solaires reçus par la Terre

Le soleil a une puissance de $4 \cdot 10^{26}$ W

Puissance moyenne	
→ kilowattheure par jour	1 kWh/jour = 42 W
→ Térawattheure par an	1 TWh/an = 0,11 GW
→ Mégatep par an	1 Mtep/an = 1,3 GW

2.2. Comment produire 1 GW électrique

- **Nucléaire** (rendement 33%) pilotable

27 t uranium enrichi par an

- **Thermique** (rdt 41%) pilotable

160 t fuel ou 240 t charbon par heure

- **Hydraulique** (rdt 85%) pilotable

1200 t d'eau chutant de 100 m par seconde

- **Éolien** intermittent

1000 éoliennes de 50 à 60 m et 200 t à puissance maximale

4000 éoliennes en moyenne (le facteur de charge est de 0,25)

1 GW pilotable nécessaire lors de l'absence de vent

- **Solaire** intermittent

3 millions de panneaux de 1,6 m² en crête

20 millions de panneaux en moyenne

1 GW pilotable nécessaire lors de l'absence de soleil

3. Energie et émission de CO₂

Pour comparer le pétrole et l'électricité à service équivalent, l'énergie électrique est conventionnellement multipliée par **2,4**. (ref1)

1 EJ = 1 Exajoule = 10¹⁸ J

Monde	Energie EJ	EJ/personne	GtCO ₂	2023/2022
Asie Pacifique	290	120	18,9	+4,7%
Amérique du Nord, Mexique	120	240	5,6	-2,5%
Europe	80	130	3,5	-6,2%
Russie & CIS	40	180	2,2	+0,7%
Moyen Orient	40	160	2,3	+2,3%
Amérique Centrale & Sud	30	70	1,3	+2,7%
Afrique	20	25	1,3	-0,7%
Total	620		40	+1,6%

Europe	Energie EJ	EJ/personne	GtCO ₂	2023/2022
France	8,7	134	0,25	-6,6%
Allemagne	11,5	137	0,57	-9,5%
Italie	6	101	0,30	-7,3%
Royaume Uni	7,0	102	0,33	-4,1%

Consommation de charbon en EJ	
USA Canada Mexique	8.8
Amérique du Sud	1.2
Europe	8.4
Inde	22
Chine	92

L'Inde consomme plus de charbon que l'Amérique et l'Europe réunies et la Chine 5 fois plus que l'Inde.

Référence 1: Energy Institute 2024 Statistical Review of World Energy 73th edition