

## QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ?

### 1. INTRODUCTION

L'évolution de l'homme est fortement liée à l'énergie, de la force musculaire à celle de l'énergie atomique de nombreuses découvertes ont entraîné des étapes importantes dans l'évolution humaine :

- découverte du feu
- invention du harnais qui a permis une meilleure utilisation de la force animale
- utilisation de forces naturelles (eau et vent) par le développement de systèmes permettant la transmission de l'énergie mécanique (courroies, engrenages)
- machine à vapeur
- découverte de l'électricité
- utilisation de l'énergie chimique (moteur à explosion)
- découverte de l'énergie nucléaire.

Il n'est pas simple de définir l'énergie. En effet celle-ci se décline sous plusieurs formes : énergie chimique, énergie électrique, énergie mécanique, énergie nucléaire, énergie thermique, énergie rayonnante.

Il n'existe pas de définition « officielle » de l'énergie mais une des plus pertinentes paraît être la suivante :

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

Le fait que l'énergie représente soit une source (combustibles fossiles, éléments fissiles, chute d'eau, vent, soleil...) soit le résultat d'une action ne simplifie pas les choses.

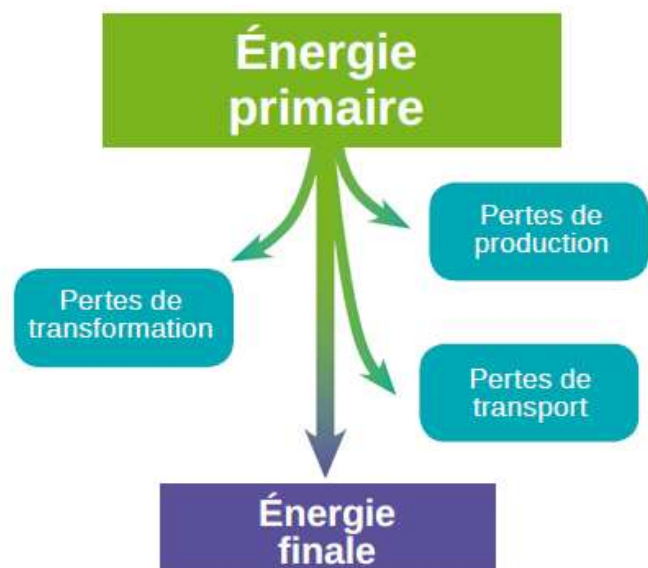
Il est important de distinguer l'énergie primaire, la ressource disponible, et l'énergie finale, la ressource délivrée (voir schéma ci-dessous et figure 1). Il existe également des vecteurs d'énergie tels que l'électricité ou l'hydrogène.

### ENERGIE PRIMAIRE – ENERGIE FINALE

L'**énergie primaire** est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Si elle n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie finale, pour être mise en œuvre.

L'**énergie finale** est la forme d'énergie délivrée prête à l'emploi par l'utilisateur final : le litre d'essence à mettre dans la voiture, l'électricité disponible à la prise, etc...

Comme le montre le schéma ci-contre le passage de l'énergie primaire à l'énergie finale comporte des « pertes »<sup>1</sup> de différentes natures plus ou moins importantes. De plus cette transformation n'est pas toujours directe et elle transite souvent par des énergies intermédiaires (énergies secondaire, tertiaire...)



<sup>1</sup> La notion de « perte » est un abus de langage, voir § 3

## L'électricité : exemple de conversion et transfert d'énergie

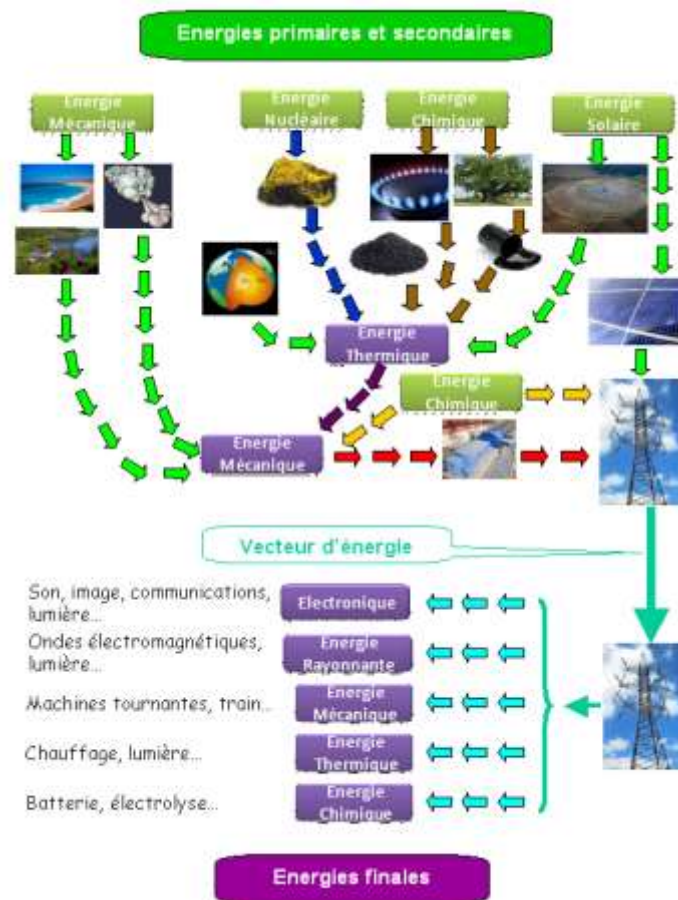


Figure 1

Une autre notion est fondamentale :

**L'énergie ne se produit pas, elle ne se consomme pas, elle se convertit d'une forme en une autre ou se transfère d'un sous-système à un autre.**

Dans le langage courant l'utilisation des termes « production » pour la conversion de l'énergie primaire en énergie finale et « consommation » pour l'utilisation de l'énergie finale permettent de les distinguer. C'est dans ce sens que ces termes sont utilisés dans la suite du texte. Chaque conversion d'énergie primaire en énergie finale se fait avec un rendement (cf. § 3).

Le théorème de Noether démontre que l'invariance des lois physiques par rapport à certaines transformations (dans l'espace ou le temps) a pour conséquence la conservation de certaines quantités comme l'énergie, en particulier le fait qu'il est impossible de produire ou de faire disparaître de l'énergie<sup>2</sup>.

De nombreuses fiches du site [www.energethique.com](http://www.energethique.com) traitent de l'énergie, les différentes formes, les différentes sources... L'annexe 1 donne la liste de ces fiches.

## 2. ÉNERGIE ET PUISSANCE

Ces deux entités sont distinctes mais reliées par une relation simple qui fait intervenir le temps :

$$\text{ÉNERGIE} = \text{PUISSANCE} \times \text{TEMPS}$$

$$E = P \times t$$

<sup>2</sup> Ce théorème démontré en 1918 à Göttingen par la mathématicienne Emmy Noether fut qualifié par Einstein de « monument de la pensée mathématique »

L'énergie, consommée ou produite, est le résultat de l'utilisation d'une puissance pendant une durée déterminée. Réciproquement la puissance est l'énergie, consommée ou produite, uniformément par unité de temps<sup>3</sup>.

Ces deux entités ont leurs propres unités.

Pendant longtemps un vocabulaire différent a été utilisé :

- **énergie = travail**
- **puissance = force**

## 2.1. UNITE D'ÉNERGIE

L'unité d'énergie est le **joule** (symbole **J**), définie pour l'énergie thermique des équivalences existent pour les autres formes d'énergie :

- énergie thermique : 1 J = 0,239 calorie (calorie : quantité d'énergie nécessaire pour élever de 1°C la température d'un gramme d'eau)
- énergie mécanique : 1 J = 1 N x m (force d'un newton appliquée sur une distance d'un mètre)
- énergie électrique : 1 J = 1 V x 1 A (courant de un ampère sous une tension de un volt)
- énergie nucléaire : 1 J = 6,24 10<sup>18</sup> eV (eV : énergie d'un électron soumis à une différence de potentiel de un volt)

Le joule est l'énergie, consommée ou produite, en utilisant une puissance de un watt pendant une seconde. Le joule représente une énergie très faible, dans la pratique on utilise fréquemment le kilowattheure (symbole **kWh**). Cette unité correspond à l'utilisation d'une puissance d'un watt pendant une heure.

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

Les multiples du wattheure couramment utilisés sont :

- |                            |                      |                     |
|----------------------------|----------------------|---------------------|
| • le kilowattheure (kWh) : | 1 000 Wh             | 10 <sup>3</sup> Wh  |
| • le mégawattheure (MWh) : | 1 000 000 Wh         | 10 <sup>6</sup> Wh  |
| • le gigawattheure (GWh) : | 1 000 000 000 Wh     | 10 <sup>9</sup> Wh  |
| • le térawattheure (TWh) : | 1 000 000 000 000 Wh | 10 <sup>12</sup> Wh |

Une unité particulière a été introduire pour mesurer l'équivalence des différentes énergies, il s'agit de la « tonne équivalent pétrole » (symbole tep) qui équivaut à 11,6 MWh (42 GJ).

## 2.2. UNITÉ DE PUISSANCE

L'unité de puissance est le **watt** (symbole **W**)

Un watt est la puissance d'un système énergétique dans lequel une énergie de 1 joule est transférée uniformément pendant 1 seconde.

Le watt représente une puissance très faible, les multiples du watt sont couramment utilisés :

- |                      |                     |                    |
|----------------------|---------------------|--------------------|
| • le kilowatt (kW) : | 1 000 W             | 10 <sup>3</sup> W  |
| • le mégawatt (MW) : | 1 000 000 W         | 10 <sup>6</sup> W  |
| • le gigawatt (GW) : | 1 000 000 000 W     | 10 <sup>9</sup> W  |
| • le térawatt (TW) : | 1 000 000 000 000 W | 10 <sup>12</sup> W |

<sup>3</sup> Un bon exemple pour distinguer puissance et énergie est la foudre : l'éclair a une puissance de plusieurs dizaines de GW mais comme sa durée est de l'ordre de la milliseconde l'énergie dissipée est de quelques kWh ! (cf site [www.energhetique.com](http://www.energhetique.com) article 41)

### 3. FORMES D'ÉNERGIE

La figure 2 décrit les conversions possibles entre les différentes formes d'énergies.

Plusieurs énergies peuvent être primaires ou finales, exemples :

- l'énergie thermique est primaire dans le cas de la géothermie ou du solaire thermique
- l'énergie thermique est finale lorsqu'elle est produite à partir d'autres sources (combustibles fossiles, énergie nucléaire)
- l'énergie mécanique est primaire dans le cas des chutes d'eau mais elle sera finale dans de nombreux autres cas, y compris pour pomper de l'eau !

Dans la vie courante les conversions et transferts d'énergie sont fréquents (voir exemple dans l'encadré ci-dessous).

Ces différentes conversions ne se feront pas en totalité vers l'énergie souhaitée, l'énergie convertie en énergie non souhaitée est appelée « perte » et elle sera principalement de l'énergie thermique.

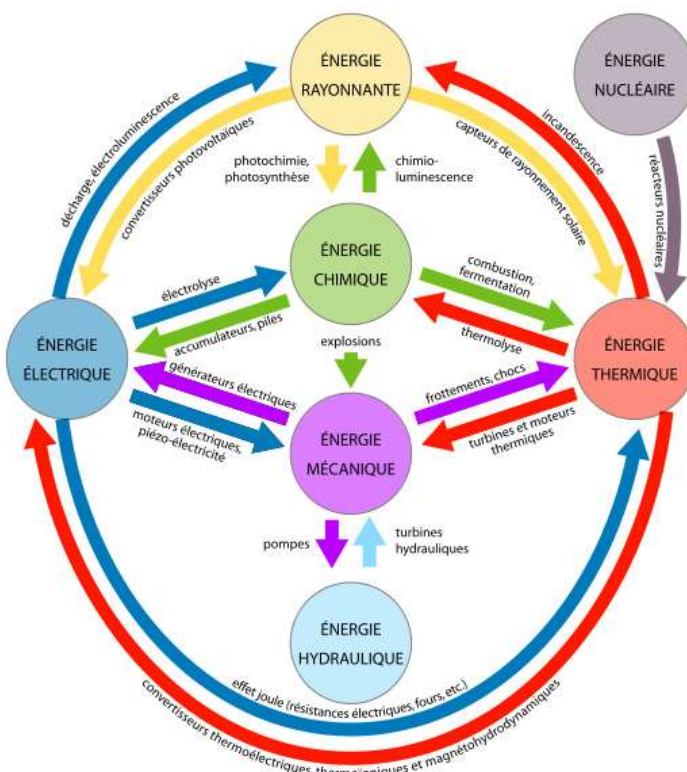


Figure 2

#### EXEMPLE DE CONVERSIONS ET TRANSFERTS D'ÉNERGIE

- l'énergie chimique permet aux muscles de produire une énergie mécanique
- l'énergie mécanique des muscles est transférée à la génératrice et provoque sa rotation
- la rotation de la génératrice produit de l'électricité
- l'électricité transmise à la diode électroluminescente produit de l'énergie rayonnante.

Toutes ces opérations sont accompagnées d'une production de chaleur. Cette production non désirée constitue une « perte » d'énergie.



Les « pertes » engendrées par les conversions et transferts d'énergie sont caractérisées par le rendement de conversion. La quasi-totalité des « pertes » est une transformation en énergie thermique non souhaitée (échauffement par frottement en mécanique, effet Joule en électricité...). Quelques exemples :

- un moteur thermique aura un rendement qui variera entre 30 et 40 %, ce qui signifie que seulement 30 à 40 % de l'énergie contenue dans le carburant sera convertie en énergie mécanique pour assurer le déplacement du véhicule <sup>4</sup>
- l'éclairage d'une pièce a été longtemps assuré par des lampes à incandescence qui nécessitaient des puissances électriques de 75 ou 100 W. Avec les lampes à basse consommation la même puissance lumineuse est obtenue avec une puissance électrique divisée par 2 à 4 selon le type de lampe.

<sup>4</sup> Une bonne illustration est la comparaison entre un véhicule thermique qui embarque 70 kWh pour faire 100 km et un véhicule électrique qui embarque 15 kWh pour faire 100 km.

Il est également important de noter que de nombreuses conversions sont régies par des lois physiques invariantes : en particulier les utilisations de l'énergie thermique soumises aux lois de la thermodynamique, qui aboutissent dans le cas d'une conversion énergie thermique, en énergie mécanique à un rendement de l'ordre de 35 %.

#### 4. CARACTÉRISTIQUES DES FORMES D'ÉNERGIE

Il est utile de caractériser les différentes sources primaires dont nous pouvons disposer. Cette caractérisation porte sur les éléments suivants :

- énergie de stock ou de flux :
  - énergie de stock : l'énergie est contenue dans la matière
  - énergie de flux : il s'agit en fait d'une puissance plus ou moins disponible
- énergie renouvelable ou pas
- utilisation de l'énergie pilotable ou pas
- l'utilisation de l'énergie entraîne ou pas une émission des gaz à effet de serre (GES).

Le tableau ci-dessous récapitule ces différentes caractéristiques pour les énergies primaires utilisables :

Energie primaire	Energie stock / flux	Energie renouvelable	Utilisation pilotable	Emission de GES
Combustibles fossiles : charbon, gaz et pétrole	Stock	NON	OUI	OUI
Energie nucléaire (fission)	Stock	NON (*)	OUI	NON
Biomasse	Stock	OUI	OUI	OUI (**)
Géothermie profonde	Stock	OUI	OUI	NON
Géothermie de surface	Flux	OUI	OUI	NON
Hydraulique de retenue	Stock	OUI	OUI (***)	NON
Hydraulique au fil de l'eau et marine	Flux	OUI	Partiellement	NON
Energie éolienne	Flux	OUI	NON	NON
Energie solaire (photovoltaïque et thermique)	Flux	OUI	NON	NON

(\*) l'utilisation de la filière à neutrons rapide rend le nucléaire recyclable

(\*\*) une gestion correcte de la biomasse aboutit à une compensation du CO<sup>2</sup> rejeté en replantant des végétaux qui en absorberont pendant leur croissance

(\*\*\*) sous réserve de disponibilité de la retenue.

L'hydrogène n'apparaît pas dans ce tableau car il est principalement un vecteur énergétique et pas une énergie primaire, au même titre que l'électricité.

#### 5. ORIGINE DES SOURCES D'ÉNERGIE

L'origine des sources d'énergie peut être décrite à deux niveaux : comment la ressource s'est-elle constituée ? et par quel processus l'énergie peut-elle être libérée ?

##### 5.1. CONSTITUTION DE LA RESSOURCE

###### 5.1.1. Combustibles fossiles<sup>5</sup>

La photosynthèse, qui constitue une condition à la croissance des végétaux et la fossilisation des végétaux au cours du temps ont permis de constituer ces ressources. Cette formation a demandé plusieurs centaines de milliers d'années et les ressources seront épuisées en quelques siècles !

<sup>5</sup> Les combustibles fossiles ne sont-ils pas que le résultat d'un stockage d'énergie solaire ?



La biomasse peut être classée dans cette catégorie avec une nuance importante : cette ressource est utilisée au fur et à mesure de sa formation. Une gestion correcte de cette ressource peut en assurer le renouvellement.

### 5.1.2. Fission nucléaire

Les ressources en matières fissiles proviennent de l'accrétion des noyaux lourds au moment de la formation de la terre. Les différents corps fissiles sont radioactifs, leurs demi-vies sont très différentes, certains ont disparu ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ), d'autres sont encore présents comme l' $^{235}\text{U}$ .

Les éléments fissiles disparus ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ) peuvent être recréés artificiellement, respectivement à partir du  $^{232}\text{Th}$  et de l' $^{238}\text{U}$  dans des réacteurs nucléaires. Les quantités d' $^{238}\text{U}$  et de  $^{232}\text{Th}$  encore présentes sur terre sont suffisantes pour assurer une utilisation de la fission nucléaire pendant plusieurs siècles.

### 5.1.3. Géothermie

Cette énergie issue de la terre a plusieurs origines :

- chaleur contenue dans la terre dont l'origine est principalement la radioactivité naturelle due aux isotopes radioactifs dont la demi-vie est très longue (uranium, thorium, potassium et leurs descendants)
- chaleur contenue dans les premiers mètres du sol due au réchauffement de la terre par l'énergie solaire.

L'exploitation de la géothermie peut se faire à des profondeurs différentes et elle se traduira par des sources à basse, moyenne ou haute température. L'exploitation peut être directe en pompant l'eau chaude dans les aquifères ou indirecte en faisant circuler un fluide qui se réchauffe au contact des roches chaudes.

L'exploitation de la géothermie à faible profondeur peut être assimilée à une énergie de flux car dépendante de l'ensoleillement et de la saison. L'exploitation de la géothermie profonde peut être assimilée à une énergie de stock car constante à l'échelle de temps de la vie humaine.

### 5.1.4. Énergies renouvelables

L'énergie du soleil est utilisable directement sous forme d'énergie thermique. Elle permet également par effet photovoltaïque de produire de l'électricité.

Les énergies renouvelables « mécaniques » ont pour origine le soleil et la rotation de la terre :

- pas de vent sans variation de température (jour / nuit) et rotation de la terre
- pas de chutes d'eau, pas de courants marins, pas de vagues et marées sans gravitation et rotation de la terre.

## 5.2. RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE

L'énergie peut être récupérée à partir des interactions fondamentales qui sont au nombre de quatre :

- interaction gravitationnelle, celle dont la découverte est la plus ancienne (loi de Newton XVII<sup>ème</sup> siècle)
- interaction électromagnétique, mise en évidence à partir de la découverte de l'électron et l'unification de l'électrodynamique et du magnétisme (Maxwell XIX<sup>ème</sup> siècle)
- interaction nucléaire forte, mise en évidence suite à la découverte du noyau atomique (Rutherford début du XX<sup>ème</sup> siècle)
- interaction nucléaire faible, mise en évidence à partir de la découverte de la radioactivité (Becquerel fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et Fermi XX<sup>ème</sup> siècle).

Ces interactions ont des intensités très différentes, ce qui a pour conséquence des densités d'énergie très différentes (voir § 5.3).

Le tableau ci-après met en évidence la puissance relative des quatre interactions en prenant pour référence l'interaction nucléaire forte. L'annexe 2 donne quelques caractéristiques des interactions.

Interaction	Puissance relative
Nucléaire forte	1
Electromagnétique	$10^{-2}$ (1/100 <sup>ème</sup> )
Nucléaire faible	$10^{-5}$ (1/100 000 <sup>ème</sup> )
Gravitationnelle	$10^{-38}$ (1/100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 <sup>ème</sup> )

### 5.3. DENSITÉ D'ÉNERGIE

Les caractéristiques des quatre interactions mettent en évidence une grande diversité de densité d'énergie selon l'interaction mise en jeu.

La figure 3 illustre les ordres de grandeur des densités d'énergie.

Cette notion de densité d'énergie est fondamentale car, si on prend comme exemple la production d'électricité, elle aboutit à concevoir des systèmes de production qui auront des caractéristiques et des contraintes très différentes :

- installations complexes utilisant peu de ressource (nucléaire)
- Installations simples utilisant beaucoup de ressource (combustibles fossiles)
- installations de grandes dimensions (hydraulique, photovoltaïque) ou très nombreuses (éolien) utilisant les ressources renouvelables.

Le tableau ci-dessous permet de connaître les ressources nécessaires à la production d'un kWh électrique à partir des principaux moyens de production.

Un kWh représente la consommation électrique de :

- une télé LCD grand écran pendant 13 heures
- un fer à repasser utilisé pendant une heure
- un four électrique utilisé pendant 30 minutes.

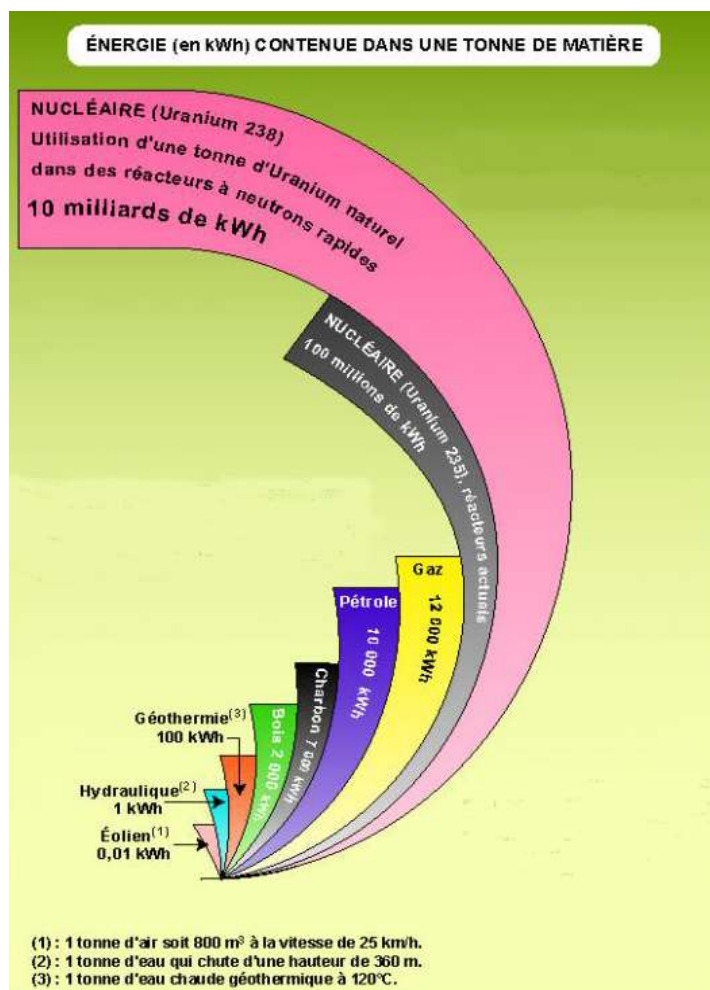


Figure 3

Ressources nécessaires à la production d'un kWh électrique				
Forme d'énergie	Moyen de production	Ressource utilisée	Rendement	Quantité de ressource utilisée
Stock	Combustible fossile	Gaz méthane	35 % (*)	170 g
	Fission nucléaire	Uranium enrichi à 5%	35 % (*)	2,5 mg
	Hydraulique barrage	Chute d'eau de grande hauteur	85 %	1 t d'eau chutant de 367 m ou 367 kg d'eau chutant de 1 000 m
Flux	Eolien	Vent	48 % (**)	Une éolienne de 40 m de rayon soumise à un vent de 50 km/h pendant 1 seconde
	Photovoltaïque	Soleil	15 % (***)	6,6 m <sup>2</sup> de PV exposés pendant 1 heure à un ensoleillement zénithal (1 000 W / m <sup>2</sup> )
	Hydraulique cours d'eau	Fil de l'eau	50 %	3 600 t d'eau circulant à 2 m/s
	Hydraulique marine	Courant marin	30 %	6 000 t d'eau circulant à 2 m/s

(\*) rendement moyen des systèmes thermodynamiques, (\*\*) compte tenu de la loi de Betz (limite théorique à 57 %) et du rendement des éoliennes estimé à 85 %, (\*\*\*) rendement maximum des panneaux actuellement commercialisés.

## 6. DISPONIBILITÉ DES SOURCES D'ÉNERGIE

La disponibilité des sources d'énergie dépend essentiellement de leur nature : énergie de stock ou énergie de flux.

### 6.1 ÉNERGIES DE STOCK

Ces énergies sont contenues dans des matériaux présents sur terre, combustibles fossiles, matières nucléaires fissiles, géothermie profonde, hydraulique de retenue. Leurs caractéristiques essentielles sont les suivantes :

- la quantité disponible est finie, celle-ci peut être renouvelable (hydraulique de retenue) ou recyclable (énergie nucléaire)
- leur coût d'utilisation est composé du coût d'extraction, ou de reconstitution du stock dans le cas de l'hydraulique, et du coût de transformation
- leur densité d'énergie peut être faible (hydraulique), forte (combustibles fossiles) ou très forte (nucléaire)
- leur utilisation est pilotable.

### 6.2. ÉNERGIES DE FLUX

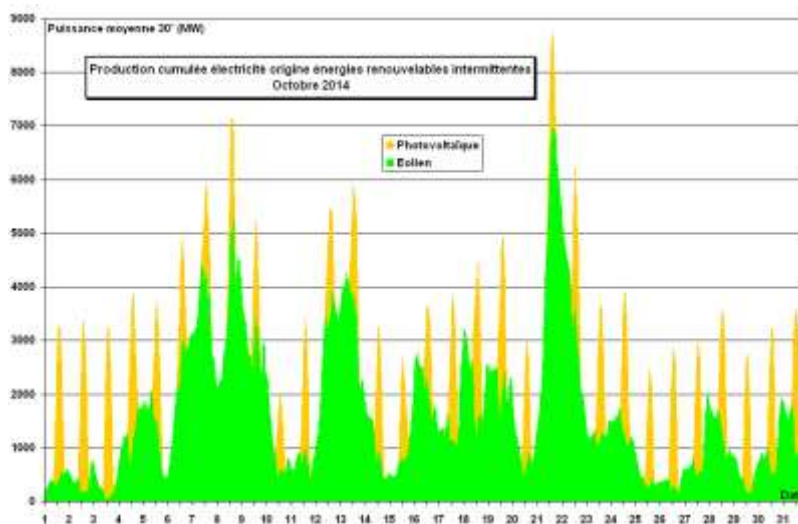
Ces énergies sont renouvelables et donc en quantité infinie. Leurs caractéristiques essentielles sont les suivantes :

- leur coût d'utilisation est composé uniquement du coût de transformation en énergie finale
- leur densité d'énergie est faible
- leur utilisation n'est pas pilotable, elle est subie, ces énergies sont fatales.

Leur principal handicap est l'intermittence qui oblige à prévoir des installations de « backup » permettant de pallier leurs défaillances [1].

Les installations palliatives font malheureusement appel aux combustibles fossiles.

La figure 4 illustre l'intermittence de la production d'électricité cumulée à partir des énergies éolienne et solaire au cours du mois d'octobre 2014.



Parc installé éolien = 8 750 MW, facteur de charge = 19,3%  
Parc installé photovoltaïque = 5 052 MW, facteur de charge = 12,4%

Figure 4

## 7. CONCLUSION

Cette fiche traite de généralités sur l'énergie. Les différentes énergies évoquées font l'objet de fiches spécifiques (voir liste en annexe 1).

Quelques points importants à retenir :

- de nombreuses ressources ont pour origine directe ou indirecte le soleil
- imaginer que l'on peut créer de l'énergie est en contradiction avec le principe d'invariance des lois physiques
- au fur et à mesure des conversions d'énergie celle-ci se dégrade et perd en densité
- les énergies issues de l'interaction gravitationnelle ont une densité très faible. Si elles ont l'avantage d'être facilement accessibles par contre elles nécessitent des installations importantes (hydraulique) ou nombreuses (éolien). Il en est de même de l'énergie solaire dont la densité est très faible et qui nécessite des installations de très grande surface. De plus l'intermittence de certaines sources les rend fatales. La nécessité d'installations importantes aboutit, sauf pour l'hydraulique, à des coûts d'utilisation très élevés

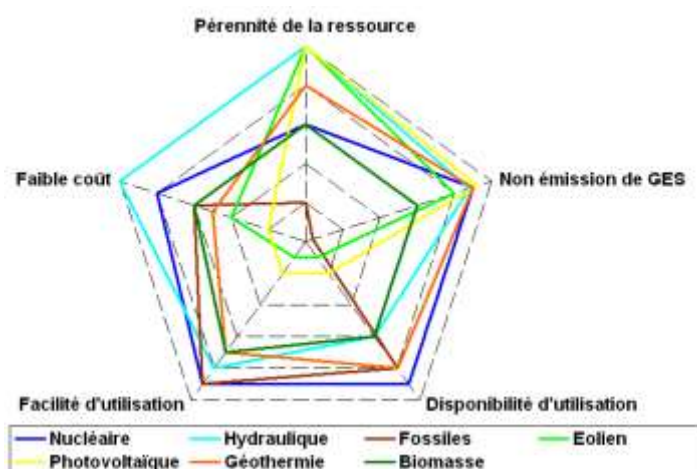


- il est urgent de prendre en compte les réserves existantes et l'impact de l'utilisation de certaines ressources sur l'évolution climatique
- la mise en œuvre d'économie d'énergie est une nécessité et le développement d'analyses du cycle de vie (ACV) peut s'avérer très utile pour certains produits<sup>6</sup> afin de prendre des dispositions pour assurer leur longévité.

Il peut être intéressant de comparer les différentes sources d'énergie dont nous pouvons disposer. Pour cela il faut définir différents critères concernant la ressource, les conditions d'utilisation, l'impact sur l'environnement et l'aspect financier.

Le graphique ci-contre présente une telle comparaison.

Pour chacun des 5 critères pris en compte une échelle arbitraire de 0 à 5 a été établie, la notation sur cette échelle est relative entre les différentes énergies. Plus le polygone caractérisant une énergie a une grande surface plus elle répond favorablement aux critères pris en compte. Les choix pourraient se faire en attribuant un poids différent à chaque critère.



## 8. RÉFÉRENCES

[1] Électricité : intermittence et foisonnement des énergies renouvelables Article des Techniques de l'ingénieur Référence BE858,6 Date de publication : 10 oct. 2014, Hubert FLOCARD, Jean-Pierre PERVÈS, Jean-Paul HULOT [http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/nouvelles-technologies-energies-renouvelables-et-stockage-42594210/electricite-intermittence-et-foisonnement-des-energies-renouvelables-be8586/#vertical\\_container\\_authors](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/nouvelles-technologies-energies-renouvelables-et-stockage-42594210/electricite-intermittence-et-foisonnement-des-energies-renouvelables-be8586/#vertical_container_authors)

## ANNEXE 1

Liste des fiches du site [www.energethique.com](http://www.energethique.com) qui traitent de sujets en relation avec l'énergie

- Evolution du besoin énergétique dans le monde [fiche GAENA N°2](#)
- France : quelle énergie pour demain ? [fiche GAENA N°4](#)
- EPR [fiche GAENA N°13](#)
- ITER : le chemin vers les réacteurs de fusion [fiche GAENA N°16](#)
- Génération IV [fiche GAENA N°22](#)
- Comparaison des différents modes de production d'électricité [fiche GAENA N°23](#)
- Le stockage de l'Énergie électrique [fiche GAENA N°26](#)
- L'énergie solaire photovoltaïque [fiche GAENA N°28](#)
- L'Énergie Éolienne [fiche GAENA N°31](#)
- L'Hydrogène [fiche GAENA N°36](#)
- L'Énergie Solaire [fiche GAENA N°37](#)
- La Biomasse [fiche GAENA N°40](#)
- Énergie marine [fiche GAENA N°44](#)
- L'énergie géothermique [fiche GAENA N°54](#)

De nombreux articles du site [www.energethique.com](http://www.energethique.com) traitent également de sujets en rapport avec l'énergie.

<sup>6</sup> A titre d'exemple pour un téléphone portable utilisé en moyenne 11 minutes par jour pendant 2 ans (soit 134 h) la consommation totale est de 13 kWh. Sa fabrication, son emballage et sa distribution nécessitent 56 kWh !

## ANNEXE 2

### Interactions fondamentales

#### Annexe 2.1 Interaction nucléaire forte :

L'interaction nucléaire forte a les propriétés suivantes :

- elle est responsable de la cohésion des noyaux atomiques
- rayon d'action seulement  $2,5 \cdot 10^{-15}$  m
- la plus puissante de toutes les interactions connues.

#### Annexe 2.2 Interaction électromagnétique :

L'interaction électromagnétique a les caractéristiques suivantes :

- responsable de la plupart des phénomènes quotidiens : lumière, électricité et magnétisme, chimie
- en principe, rayon d'action illimité. Mais en pratique, les charges positives et négatives tendent à se neutraliser au delà de la taille d'un atome ou d'une molécule
- peut être attractive ou répulsive selon le signe des charges électriques
- cent fois moins forte que l'interaction nucléaire forte.

#### Annexe 2.3 Interaction nucléaire faible :

L'interaction nucléaire faible a les caractéristiques suivantes :

- responsable d'un des types de radioactivité, la radioactivité bêta
- rayon d'action très court,  $10^{-18}$  m
- $10^5$  fois moins puissante que la force nucléaire forte.

#### Annexe 2.4 Interaction gravitationnelle :

La gravitation est le phénomène d'interaction physique qui cause l'attraction réciproque des corps massifs entre eux, sous l'effet de leur masse.

Il s'observe au quotidien en raison de l'attraction terrestre qui nous retient au sol. La gravité est responsable de plusieurs manifestations naturelles : les marées, le vent, les chutes d'eau.

La gravitation a les propriétés suivantes :

- elle est dominante pour les grandes structures de l'univers car elle est toujours attractive et ne peut pas être neutralisée comme les forces électromagnétiques
- rayon d'action illimité.

La gravitation est la plus faible de toutes les interactions, elle est  $10^{38}$  fois plus faible que l'interaction nucléaire forte.

### QUELQUES EXEMPLES D'ÉNERGIE LIBÉRÉE DANS DES INTÉRACTIONS :

Interaction nucléaire forte :

- la fission d'un atome d' $^{235}\text{U}$  libère 190 MeV, soit  $3 \cdot 10^{-11}$  J ou  $\sim 10^{-17}$  kWh
- la fusion deutérium - tritium libère 17 MeV, soit  $2,7 \cdot 10^{-12}$  J ou  $\sim 7,5 \cdot 10^{-19}$  kWh

Interaction électromagnétique :

- la combustion d'un atome de carbone libère 4,6 eV, soit  $7,4 \cdot 10^{-19}$  J ou  $\sim 2 \cdot 10^{-25}$  kWh
- la combustion d'une molécule de méthane libère 10 eV, soit  $10^{-18}$  J ou  $\sim 3 \cdot 10^{-25}$  kWh
- l'effet photovoltaïque sur un atome de silicium libère 1 eV, soit  $10^{-19}$  J ou  $\sim 3 \cdot 10^{-26}$  kWh

$$E = m \cdot c^2 \quad ?$$

Cette équation représente l'énergie contenue dans la matière, quelle proportion en récupère-t-on ?

Dans le cas de la combustion d'une molécule de méthane : environ 1 milliardième !

Dans le cas de la fission d'un atome d' $^{235}\text{U}$  : environ 1 millième !