

## *Les énergies renouvelables de la préhistoire à nos jours*



## INTRODUCTION

Le CNHS est une asbl fondée en 1958 ayant pour objectifs la promotion et la diffusion de l'histoire des sciences en Belgique. Dans le cadre scolaire, nous organisons des activités éducatives autour de thèmes précis alliant histoire et sciences.

En collaboration avec le Musée de La Fonderie, nous organisons des animations autour des collections de machines industrielles. Le présent dossier développe un des aspects de cette visite : l'énergie. Ce dossier devrait permettre aux enseignants de préparer la visite et de prolonger l'animation en classe.

### ***Les objectifs de la visite :***

- Découvrir La Fonderie et les machines du musée
- Sensibilisation à l'histoire des sciences et des techniques dans un contexte industriel aujourd'hui muséal ;
- Découvrir et classer les sources d'énergies renouvelables et non -renouvelables ;
- Apprendre un vocabulaire spécifique ;
- Comprendre le réchauffement climatique et de ses impacts sur le contexte de vie
- Sensibiliser au développement durable ;
- Sensibiliser à l'importance de la recherche scientifique et des nouvelles technologies liées à l'exploitation harmonieuse des ressources naturelles ;
- Apprendre par le corps, les gestes et la concentration ;
- Expérimenter au moyen de maquettes.

### ***Le public ciblé par la visite :***

À destination du cycle supérieur de l'enseignement fondamental.

Il s'agit d'une activité transversale qui peut s'insérer tant dans le programme des sciences que celui d'histoire.

## TABLE DES MATIÈRES:

<b>1. L'ÉNERGIE.....</b>	<b>4</b>
1.1 Présentation.....	4
1.2 Exploration de la langue.....	4
1.3 Qu'est que l'énergie ?.....	5
1.3.1 Les énergies renouvelables.....	5
1.3.2 Les énergies non-renouvelables.....	6
1.3.3 Les avantages et désavantages des énergies renouvelables.....	7
1.4 Formes et sources d'énergie.....	7
<b>2. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.....</b>	<b>9</b>
2.1 Le vent.....	9
2.2 Histoire de l'énergie éolienne.....	10
2.3 Les éoliennes.....	13
2.4 Les avantages et inconvénients de l'éolien.....	15
2.5 Recyclage des éoliennes.....	15
2.6 Références.....	16
<b>3. L'ÉNERGIE SOLAIRE.....</b>	<b>16</b>
3.1 Le soleil et son rayonnement.....	16
3.2 L'histoire de l'énergie solaire.....	16
3.2.1 Le solaire thermique.....	17
3.2.2 Le solaire photovoltaïque.....	20
3.3 Les avantages et inconvénients du solaire.....	21
3.4 Recyclage des panneaux photovoltaïques.....	22
3.5 Références.....	22
<b>4. L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE.....</b>	<b>22</b>
4.1 L'eau.....	22
4.2 Histoire de l'énergie hydraulique.....	23
4.3 Les centrales hydroélectriques.....	26
4.4 Avantages et désavantages de l'hydraulique.....	28
4.5 Références.....	28
<b>5. LA BIOMASSE.....</b>	<b>29</b>
5.1 Qu'est-ce que c'est ?.....	29
5.2 Histoire.....	29
5.3 Valorisation de la biomasse.....	29
5.3.1 Sous forme de chaleur : la bioénergie.....	29
5.3.2 Avantages et inconvénients de la biomasse.....	30
5.3.3 Conversion biologique de la biomasse.....	31
5.4 Références.....	32
<b>6. LA GÉOTHERMIE.....</b>	<b>32</b>
6.1 Qu'est-ce que c'est ?.....	32
6.2 Histoire.....	32
6.3 Les différents types de géothermie.....	32
6.4 Avantages et désavantages de la géothermie.....	33
6.5 Références.....	34

# 1. L'ÉNERGIE

## 1.1 Présentation

Le concept d'énergie étant assez complexe, nous le définirons ici dans le cadre de la vie courante. L'énergie est la capacité d'un corps à fournir un travail. Les sources d'énergie utilisables par l'homme sont nombreuses : elles lui fournissent chaleur, lumière et force. De tout temps, l'énergie a été essentielle à l'existence humaine et son emploi sous des formes diverses a continuellement transformé la société. Pensons en particulier à la découverte de celle issue de la vapeur, entraînant la Révolution Industrielle. Dans ce dossier, nous détaillerons principalement les inventions et découvertes liées aux sources d'énergie depuis l'Antiquité jusqu'au 19e siècle.

Malgré la maîtrise des techniques, la question de l'énergie apparaît aujourd'hui comme l'une de nos préoccupations majeures. Certaines de ses sources s'épuisent, d'autres polluent notre environnement. Nos besoins augmentant chaque jour, que faut-il utiliser? Quelles sont les énergies que l'on appelle renouvelables, et sont-elles vraiment propres ? L'histoire de l'énergie, et tout particulièrement des énergies renouvelables, est donc d'actualité.

## 1.2 Exploration de la langue

*Vocabulaire pré requis :*

**Condensation** : phénomène physique de changement d'état de la matière qui passe d'un état dilué (gaz) à un état condensé (solide ou liquide)

**Énergie éolienne** : l'énergie tirée du vent.

**Énergie hydraulique** : l'énergie tirée de l'eau.

**Énergie non-renouvelable** : énergie produite à partir d'une source qui ne se renouvelle pas assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme, par opposition aux énergies renouvelables. Ex : le pétrole, le charbon, ...

**Énergie renouvelable** : énergie produite à partir d'une source qui, contrairement aux énergies fossiles, se régénère au moins au même rythme que celui auquel on l'utilise. Ex : le vent, les marées, le soleil, ...

*Vocabulaire à expliquer :*

**Arbre à cames** : mécanisme qui permet de transformer un mouvement de rotation en mouvement longitudinal. Il est composé d'un arbre moteur sur lequel sont fixées des cames (ou sabots).

**Bielle-manivelle** : mécanisme qui permet de transformer un mouvement de rotation en mouvement de translation et inversement. Son nom vient des deux pièces qui la composent.

**Force** : action mécanique capable de créer une accélération, c'est-à-dire une modification de la vitesse d'un objet (en intensité ou en direction), ce qui induit un déplacement, ou encore une déformation de l'objet.

**Puissance** : quantité d'énergie fournie en un temps donné par un système à un autre. Elle se mesure en watt.

**Force** : action mécanique capable de créer une accélération, c'est-à-dire une modification de la vitesse d'un objet (en intensité ou en direction), ce qui induit un déplacement, ou encore une déformation de l'objet.

**Foulon** : bâtiment (souvent un moulin à eau) où on foulait les draps.

**Rotor** : le rotor d'une éolienne est constitué du nez et des pales.

**Watt** : unité de mesure de la puissance dont l'origine vient du nom de l'inventeur de la machine à vapeur, James Watt.

### 1.3 Qu'est-ce que l'énergie ?

On peut définir l'énergie comme tout ce qui permet d'effectuer un travail, de produire de la lumière, de la chaleur ou un mouvement. Le mot « énergie » vient du bas-latin *energia* qui vient lui-même du grec ancien ἐνέργεια (*energeia*), qui signifie « force en action ».

L'énergie est un concept ancien dans le langage courant, mais ne fut définie scientifiquement que dans la milieu du XIXème siècle. Après avoir exploité sa propre force et celle des animaux, l'homme a appris à utiliser les énergies contenues dans la nature (les vents : énergie éolienne et les cours d'eau : énergie hydraulique). Depuis la Révolution industrielle, les ressources, les capacités, et les besoins de l'homme en énergie ont connu une expansion phénoménale. En deux siècles, l'homme est passé des premières machines à vapeur desservant un atelier, aux centrales nucléaires fournissant de l'énergie à des villes entières.

Dans le *Système international d'unités*, l'énergie s'exprime en « joules ». En 1843, James Joule a mesuré et calculé l'équivalence entre l'énergie mécanique d'un objet en mouvement et la chaleur (énergie thermique) qu'il produit.

A noter qu'elle peut également être qualifiée de « renouvelable » si les sources ne s'épuisent pas de façon significative durant son exploitation, tandis que les énergies « non renouvelables » disparaissent une fois utilisées.

#### **1.3.1 Les énergies renouvelables**

Les **énergies renouvelables** sont celles dont les sources sont presque inépuisables. Certaines, comme le vent et l'eau, sont utilisées depuis des milliers d'années. D'autres doivent être exploitées de façon rationnelle si on ne veut pas qu'elles s'épuisent.

Ces énergies connaissent un regain d'intérêt depuis maintenant quelques décennies, elles permettent de réduire l'impact du réchauffement climatique, principalement produit par les énergies fossiles, et d'éviter le risque de pénurie à venir.

Elles sont souvent définies comme étant des énergies vertes ou propres. Leur exploitation ayant un impact sur l'environnement plus faible. Elles sont donc un atout important pour le développement durable et les enjeux climatiques. Bien que moins polluantes, l'impact des énergies vertes sur l'environnement n'est tout de même pas complètement neutre. En 2019, l'utilisation des énergies renouvelables représentait 17,9% de la consommation mondiale d'énergie.

Citons parmi celles-ci :

- Le soleil nous éclaire, nous réchauffe et est indispensable au développement de tous les êtres vivants. Grâce à lui, les plantes libèrent l'oxygène qui nous permet de respirer. Aujourd'hui on sait utiliser la chaleur du soleil pour créer de l'électricité. Les panneaux solaires captent cette énergie et la transforment en électricité ou en chaleur.
- L'homme utilise la force créée par les courants des rivières ou des chutes d'eau pour faire tourner la roue d'un moulin. Aujourd'hui on utilise cette force pour faire tourner les turbines des centrales hydro-électriques qui produisent de l'électricité.
- Le vent est également source d'énergie. Les oiseaux et les bateaux à voile se servent de l'énergie qu'il libère pour se déplacer. Il permet aussi de faire tourner les ailes des moulins à

vent pour pomper de l'eau ou moulin du grain. Aujourd'hui on utilise la force du vent pour faire tourner des éoliennes qui produisent de l'électricité.

- La chaleur interne de la terre est aussi une énergie considérée comme renouvelable et exploitable. Au centre de la Terre, les roches sont en fusion, il s'agit du magma. On se sert de la vapeur ou de l'eau capturée entre les roches et chauffée par la chaleur de la Terre pour produire de l'électricité et du chauffage. Cette énergie est appelée géothermique, utilisée par exemple pour chauffer les maisons en Islande.



Centrale géothermique  
Islande

Les matières organiques végétales ou animales peuvent aussi être utilisées pour produire de la chaleur. On appelle cette source d'énergie la biomasse. Par exemple, la combustion du bois est la plus ancienne des utilisations de cette énergie puisque l'homme préhistorique a maîtrisé le feu pour s'éclairer, se chauffer et cuire les aliments. Mais les forêts doivent être utilisées à bon escient pour éviter de s'épuiser. La vitesse de formation doit être plus grande que la vitesse d'utilisation. Sans compter la surveillance de l'émission du gaz carbonique qui accompagne la combustion du bois.

### **1.3.2 Les énergies non-renouvelables**

Les énergies non-renouvelables sont constituées de substances dont les stocks mettent des millions d'années à se reconstituer ou qui ne se reconstituent pas du tout (par exemple, le charbon que nous utilisons actuellement s'est formé il y a 360 à 300 millions d'années). L'utilisation et la combustion des énergies fossiles sont les principales causes du réchauffement climatique, de la pollution de l'air et de l'eau.

Les énergies fossiles sont produites par la combustion du charbon, du gaz et du pétrole. Ces substances, principalement composées de carbone et d'hydrogène, proviennent de la transformation de matières organiques restées en sous-sol pendant des millions d'années. (définir hydrocarbure ?)

Ainsi, on emploie le pétrole pour se déplacer, mais également pour fabriquer du fioul de chauffage, différentes sortes de carburants (kérosène, diesel, essence...), divers plastiques. Dans quelques dizaines d'années les ressources seront probablement épuisées.

L'énergie nucléaire, est produite à partir d'un minerai appelé uranium. La fission des atomes d'uranium libère une très grande quantité d'énergie dont on se sert pour chauffer de l'eau permettant de produire de l'électricité. La quantité d'uranium enrichi nécessaire pour faire fonctionner les centrales nucléaires est réduite, mais les réserves naturelles ne sont pas infinies.

Certaines centrales recyclent le plutonium produit lors de la réaction nucléaire qui se déroule dans les cœurs des réacteurs, ce qui permet de considérer que l'énergie nucléaire est une forme

d'énergie renouvelable. Si une centrale nucléaire ne crée pas de pollution durant son existence, il reste alors le problème de la gestion des déchets nucléaires qui pose de nombreux problèmes ! En effet ces déchets dangereux doivent être stockés , pour certains, durant plusieurs milliers d'années.

### **1.3.3 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables**

- + Les énergies renouvelables sont peu polluantes en comparaison des énergies fossiles. L'électricité produite émet très peu de CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) même en tenant compte de l'énergie grise. L'énergie grise est la quantité d'énergie utilisée durant tout le cycle de vie d'un objet ou d'un matériau, elle inclut : l'extraction des ressources, la production, la transformation, le transport, l'installation et le recyclage de fin de vie.
- + L'utilisation des énergies renouvelables ne produit pratiquement pas de gaz polluants tels que du CO<sub>2</sub>.
- + De plus, le secteur des énergies renouvelables est et va devenir, de plus en plus, un pourvoyeur d'emploi (recherche, fabrication, installation, entretien, recyclage, etc..)
- Parmi les désavantages, on peut citer l'intermittence de la production pour le solaire (cycle jour/nuit par exemple) et l'éolien (absence de vent). Cela nécessite donc des installations de stockage d'électricité supplémentaires afin de redistribuer pendant les périodes creuses les surplus d'énergie produits lors des périodes propices (beaucoup de soleil ou de vent).
- Ce stockage nécessite la construction de batteries, grandes consommatrices de ressources naturelles et de terres rares.  
Ces terres rares sont un groupe de 17 métaux qui sont, en fait, assez répandus dans l'écorce terrestre. Ils ont été découverts à la fin du XVIII<sup>e</sup> et au XIX<sup>e</sup> siècle, mélangés à des minerais peu courants à l'époque (d'où le terme de rare) éparpillés et difficiles à séparer. Il existe peu de sites où ces minerais se trouvent en concentration suffisante pour une exploitation minière. En 2017, 86 % de la production (extraction et transformation) était réalisée par la Chine.
- Celle-ci provoque de la pollution lors de l'extraction et de la transformation métallurgique (comme pour les autres métaux) mais pollue aussi les sols par la présence de thorium et d'uranium (tous les deux radioactifs) dans les gisements.
- Par ailleurs, la fabrication de panneaux solaires ou d'éoliennes, l'extraction de matières premières et leur transport, la fabrication des différents éléments et le trajet vers le site d'exploitation produisent aussi du CO<sub>2</sub>.

## 1.4 Formes et sources d'énergie

Tout ce qui est capable de produire un travail contient de l'énergie. Elle se présente sous plusieurs formes et peut être produite par différentes sources. On qualifie l'énergie selon la source dont on l'extrait ou encore le moyen par lequel elle est acheminée ou véhiculée (thermique).

Formes d'énergie	Sources d'énergie
<b>Énergie mécanique</b> (force motrice, mouvement, vitesse)	La gravitation, les muscles, le vent, l'eau, la vapeur (pression), les moteurs thermiques et électriques, les machines
<b>Énergie thermique</b> (chaleur, radiations thermiques)	Le soleil, la combustion du bois, des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), ou d'autres produits riches en carbone (alcools, huiles...), l'énergie électrique (effet Joule), l'énergie nucléaire (dans les centrales)
<b>Énergie électrique</b>	La foudre, l'électricité statique, les piles, les générateurs électriques (dynamos, alternateurs), les centrales hydroélectriques, les centrales nucléaires, les éoliennes
<b>Énergie lumineuse</b>	Le soleil, les lampes, le feu, le gaz
<b>Énergie chimique potentielle</b>	Matière organique (végétale et animale), les aliments, les produits chimiques réactifs, les énergies fossiles: houille, gaz, pétrole.

Il existe des sources d'énergie naturelles et des sources artificielles, c'est-à-dire créées par l'homme. Les premières sont appelées sources d'énergie primaires si elles produisent directement de l'énergie. Les autres sont appelées énergies secondaires car elles sont issues d'une transformation d'énergie.

Ainsi les aliments, l'eau, le vent et le soleil sont des sources primaires tandis que la vapeur et l'électricité sont des sources secondaires.



Le soleil est à l'origine de la plupart des sources d'énergie présentes sur terre: chaleur, lumière, croissance des végétaux, élévation des masses d'eau, vents, courants marins, orages.

Un des grands principes à retenir est que l'énergie se transforme mais n'est jamais perdue. L'énergie est **toujours conservée** même si elle change de forme. En d'autres mots, une quantité donnée d'énergie semble disparaître toujours pour donner la même quantité d'énergie sous une autre forme, qu'il s'agisse de chaleur, de lumière, de nourriture ... etc.



## 2. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

### 2.1 Le vent

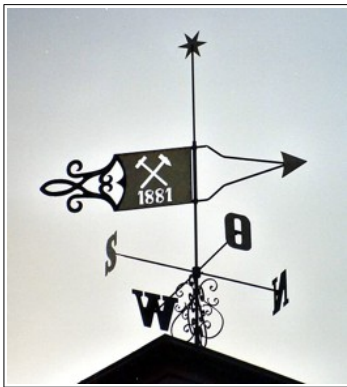
#### *D'où vient le vent ?*

Le soleil réchauffe inégalement l'air à la surface de la terre. Il chauffe l'air et l'eau, et la chaleur produite est ensuite diffusée dans l'air. Cela entraîne l'apparition de zones de haute pression (air chaud) et de basse pression (air froid). En effet, l'air chaud s'élève, ce qui génère des zones de basse pression au niveau du sol et, au dessus, une zone de haute pression. Dans l'atmosphère, l'air se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Le vent est cet air en mouvement.

L'énergie éolienne est issue du vent produit continuellement sous l'action du rayonnement solaire. Il s'agit donc bien d'une énergie renouvelable.

Les premiers savants à avoir pu expliquer l'origine du vent sont Evangelista Torricelli (1608-1647) et Blaise Pascal (1623-1662). Le premier mit en évidence la pression atmosphérique de l'air grâce à son baromètre tandis que le second décrivit le vent comme de l'air en mouvement, un courant d'air plus ou moins puissant, et il expliqua aussi la diminution de pression avec l'altitude.

#### *Connaître la direction du vent*



Depuis la Grèce Antique, on peut déterminer la direction du vent grâce à une girouette.

Si la girouette indique le Nord, cela signifie que le vent va du Nord vers le Sud. On parle alors de vent du Nord.

#### *Mesurer la vitesse du vent*



Pour mesurer la vitesse du vent, on utilise un anémomètre. Il s'agit d'un petit instrument composé de coupelles tournant autour d'un axe grâce à la force du vent.

La vitesse de rotation des coupelles permet de déterminer la vitesse du vent grâce à une formule mathématique qui dépend de différents paramètres. Ainsi, nous avons :

$$\rightarrow \text{Vitesse (vent)} = 2\pi F(N) R.N$$

où R est le rayon moyen des bras (de l'axe de rotation jusqu'au centre des coupelles), N, le nombre de tours par seconde [1/s] et F(N), une fonction d'étalonnage.

La vitesse du vent se mesure en km/h, en m/s ou en nœud. Un nœud équivaut à 1,852km/h.

La vitesse du vent ainsi que sa direction sont deux paramètres essentiels si l'on veut exploiter le vent comme source d'énergie.

## 2.2 Histoire de l'énergie éolienne

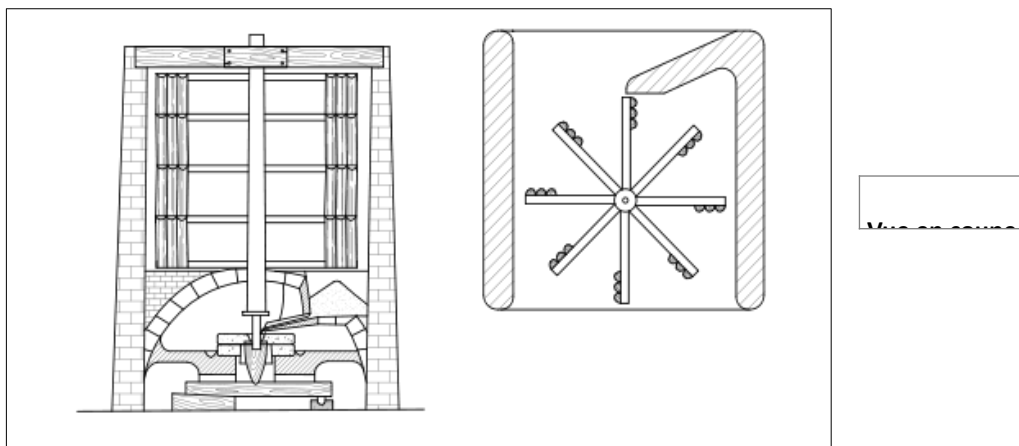
### Les bateaux à voile

Durant l'Antiquité, l'énergie éolienne issue du vent n'a servi qu'à la propulsion des bateaux. On retrouve les premières traces des bateaux à voile de papyrus ou de coton en Égypte.



### Les moulins à vent

Le moulin à vent n'est connu qu'à partir du VIIe siècle après Jésus-Christ et apparaît en Perse. Il est constitué d'un axe vertical avec des pales disposées verticalement confinées à l'intérieur du bâtiment du moulin. Des orifices dans les parois du moulin permettent à l'air de s'engouffrer pour actionner l'éolienne. L'arbre vertical était directement relié à la meule courante, sans transmission. Il servait à l'irrigation des terres cultivées et pour écraser du grain.



### Le Moyen Âge

Pendant toute l'Antiquité, les ingénieurs se sont peu souciés d'alléger le travail des hommes avec des machines puisque la plupart des sociétés antiques recouraient abondamment aux esclaves. Par contre, les occidentaux du Moyen Âge ne disposent plus de cette main d'œuvre gratuite. On cherche donc à exploiter au mieux les énergies qui ne font plus exclusivement appel aux muscles humains en développant des machines actionnées par des sources d'énergie que les hommes de l'Antiquité avaient négligées: l'eau et le vent.

C'est en observant la nature et sans comprendre réellement les grands principes scientifiques que l'homme a peu à peu utilisé ces forces naturelles pour accomplir ses tâches quotidiennes. Les premiers moulins à vent sont signalés en Europe à la fin du IXe siècle en Angleterre. Ils ne se généralisent pourtant dans toute l'Europe que vers le XIIe siècle, d'abord sur les côtes maritimes du Nord, puis dans les pays de la bordure atlantique (Portugal, Espagne, France). Ils sont en général placés sur des petits tertres et éminences, soit isolés, soit groupés, et disposent d'un axe horizontal fixe.

Deux problèmes techniques vont néanmoins se poser : d'abord, les ailes du moulin doivent toujours être face au vent, ce qui constitue une contrainte importante : le vent est capricieux et change régulièrement de direction contrairement aux rivières dont la direction du courant est constante. Ensuite, le meunier doit pouvoir transformer le mouvement de rotation vertical des ailes pour actionner la meule dans un mouvement de rotation horizontal.

Ce dernier problème sera résolu en liant la meule aux ailes par une série d'engrenages. Quant aux questions d'orientation par rapport au vent, les charpentiers médiévaux inventent des moulins pivotant complètement sur un énorme trépied de bois. D'abord manœuvré manuellement par le meunier, il sera par la suite muni d'un gouvernail actionné automatiquement par une petite roue à pales mue par le vent : il s'agit du **moulin chandelier**.



Moulin tour

Moulin chandelier



Plus tard, seul le toit pivotera en suivant la direction du vent, à partir d'une tour fixe : c'est le **moulin-tour**

L'eau et le vent resteront pendant des siècles les sources d'énergie principales et les techniques, hydrauliques surtout, feront l'objet de recherches et d'améliorations constantes.

### 2.3 Les éoliennes

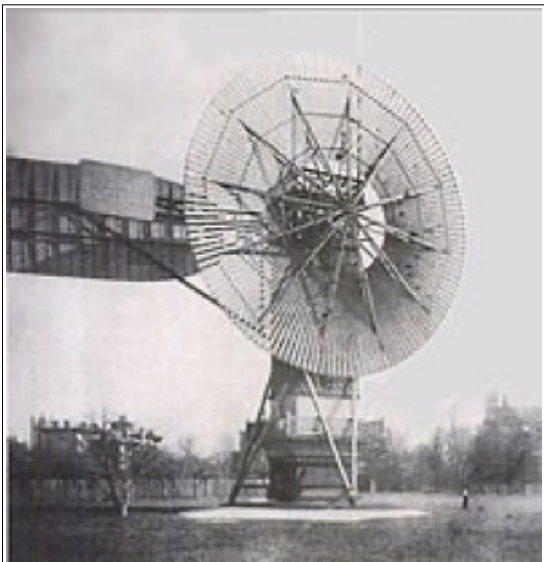
Les premières éoliennes apparaissent au XIXe siècle aux États-Unis et sont utilisées pour le pompage de l'eau. Elles sont constituées d'un pylône surmonté d'un axe horizontal autour duquel sont fixées plusieurs pales.

Le vent fait tourner les pales et grâce à un système de bielle-manivelle, le mouvement de rotation est transformé en mouvement de va-et vient ce qui permet d'actionner un piston qui aspire l'eau.

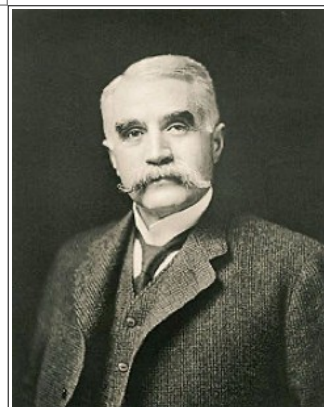


**En 1887-1888**, aux États-Unis, Charles F. Brush construit la première éolienne qui produit de l'électricité. Cette éolienne d'une puissance de 12kW a permis de charger des batteries pour alimenter sa maison en électricité pendant 20 ans.

Le rotor de l'éolienne constitué de 144 pales et du nez avait un diamètre de 17m !!



Éolienne de Charles F. Brush  
en 1887 (1849-1929)



Charles F. Brush (1849-1929)

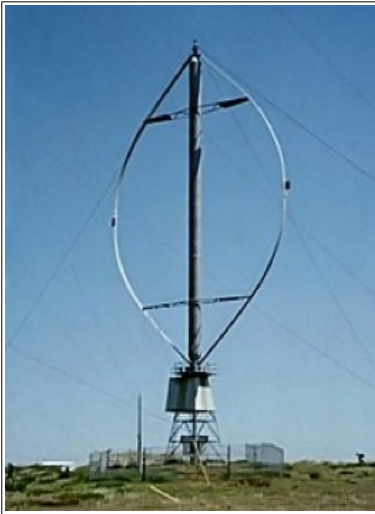
**En 1891**, le danois Poul La Cour (1846–1908) met en place une éolienne plus efficace permettant de produire 25 kW grâce à des rotors à 4 pales. Il met en évidence que les turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales apportent un meilleur rendement.

Cette éolienne sera la première utilisée à l'échelle industrielle.



Éolienne de Poul La Cour en  
1891 (1849-1929)

Au XXe siècle, les éoliennes vont se développer petit à petit. Dans les années 1920, Georges Darrieus (1888-1979) imagine une éolienne à axe vertical.



Éolienne de Darrieus



Éolienne avec turbine Gedser  
(1849-1929)

En 1957, Johannes Juul (1887-1969) crée une turbine appelée Gedser qui sert encore de modèle aux éoliennes actuelles. Les éoliennes utilisant ce type de turbine produisaient jusqu'à 1000 kW.

Le développement des éoliennes sera freiné par la suite en raison de la grande consommation en énergies fossiles telles que le pétrole et le charbon.

Ces dernières années, les parcs d'éoliennes se développent principalement en mer, les vents y étant plus puissants et réguliers et la disponibilité des sites plus grande. Cela permet aussi d'éviter les conflits avec de potentiels riverains sur les nuisances sonores et visuelles. Les éoliennes y sont plus grandes et 2 à 3 fois plus puissantes que leur version terrestre.

Il existe deux types d'éoliennes en mer : celles posées sur le fond marin (jusque 60 mètres de profondeur) et les flottantes.

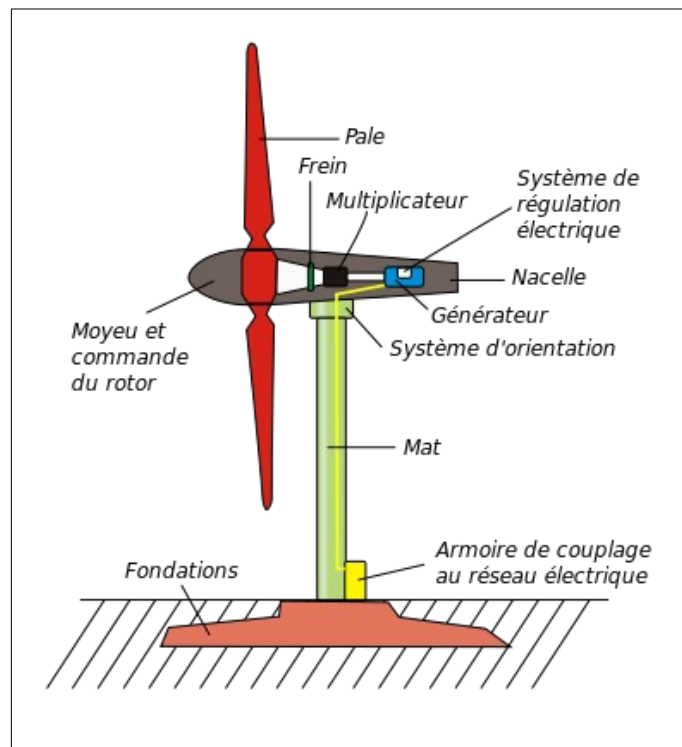
En Europe, les principaux parcs se trouvent en mer du Nord (en raison de sa faible profondeur).

En 2019, on comptait en Europe 110 parcs marins d'éoliennes répartis entre 12 pays dont la Belgique. En 2022, l'éolien représentait 12,8% de la production d'électricité en Belgique.

### Les composants d'une éolienne

Une éolienne se compose des principaux éléments suivants :

- ♣ le **mât** dont la hauteur va de 20 à plus de 100m
- ♣ la **nacelle** qui contient le moteur et les différents composants mécaniques.
- ♣ le **rotor** comprenant le nez et les pales d'un diamètre de 3 à 90 m. On compte généralement 3 pales sur les éoliennes modernes.



## Fonctionnement

1. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne qui elles-mêmes font tourner le générateur.
2. L'énergie mécanique produite va être transformée par ce générateur en énergie électrique. C'est le même principe que pour une dynamo ou un alternateur de voiture.
3. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou des batteries de stockage.

Grâce à un multiplicateur, la vitesse de rotation des pales (entre 15 et 30 tours par minute) est multipliée afin de faire tourner le générateur entre 1000 et 2000 tours par minute. C'est le principe des engrenages. Les pales de l'éolienne font tourner un grand engrenage (avec beaucoup de dents) qui est connecté à un petit engrenage (ayant environ 70 fois moins de dents) mais qui tourne alors 70 fois plus vite. Cet engrenage est raccordé au générateur. (voir dossier Mécanismes)

Pour obtenir un rendement optimal, la vitesse du vent doit être d'environ 50 km/h. Au delà de 90 km/h, les éoliennes ne peuvent plus tourner car cela endommagerait trop vite les mécanismes.

Pour fonctionner, une éolienne a besoin d'un vent d'au moins 10 km/h.

L'implantation des éoliennes doit donc tenir compte de la vitesse moyenne du vent autant que de sa direction afin d'avoir le meilleur rendement possible.

La capacité d'une éolienne à produire de l'énergie s'appelle la puissance et s'exprime en watts.

La puissance des éoliennes varie également suivant leur taille. Actuellement, il existe des petites éoliennes permettant de générer 400 W et des grosses éoliennes industrielles pouvant avoir une puissance jusqu'à 5 MW (=5000000 W).

## 2.4 Les avantages et les inconvénients des éoliennes

---

### Avantages

- + Une fois sa construction achevée, une éolienne ne demande aucun carburant pour fonctionner. Elle n'émet pas non plus de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques.
- + Elle ne pollue ni le sol, ni l'eau, ni l'air où elle est installée.
- + Si elle est installée dans des zones agricoles, elle n'utilise qu'une petite surface, permettant aux agriculteurs de continuer à utiliser leurs champs.

### Inconvénients

- L'électricité produite par les éoliennes est intermittente car elle dépend du vent. Elles ne peuvent donc pas subvenir seules aux besoins d'un pays et dès lors, doivent être couplées à d'autres formes de production d'énergie.
- Afin de pallier aux périodes d'absence ou de faiblesse du vent, il faudrait construire des batteries permettant le stockage et la distribution d'électricité pendant ces périodes. Ces batteries demandent l'extraction de ressources et de terres rares produisant de la pollution.
- Même si elles ne polluent pas l'environnement durant leur utilisation, durant leur cycle de vie elle émettent indirectement de la pollution au cours de la phase de construction, de mise en place sur le site et lors de leur démontage de fin de vie. Ainsi une grande éolienne nécessite 1500 tonnes de béton, plusieurs dizaines de tonnes d'acier, de la fibre de verre et de la résine et des métaux pour le générateur et la bobine (cuivre, silicium, aluminium, etc...)
- Elles peuvent avoir un impact sur l'avifaune (les oiseaux) et les chauve-souris.
- Enfin, pour les riverains habitant dans le voisinage des éoliennes, il peut y avoir un impact visuel et sonore.

## 2.5 Recyclage des éoliennes

---

Leur recyclage est possible. La première génération date de la fin des années 1970 et début 1980. Ayant une durée de vie de plus ou moins 25 ans, un grand nombre d'éoliennes ont déjà été recyclées.

90% du poids d'une éolienne est composé de métaux qui se recyclent facilement. Le béton armé composant le socle de la fondation est trié, concassé, déferrailé et réemployé dans le secteur de la construction.

Il reste le problème des pales, constituées de matériaux composites à base de fibre de verre ou de carbone. Elles sont, actuellement, broyées en morceaux et utilisées comme combustible dans l'industrie cimentière. Les cendres deviennent ensuite une des matières premières de la fabrication du ciment. Il n'y a donc pas de déchets. Cette solution n'étant pas la plus écologique, des recherches sont toujours en cours afin de trouver des solutions moins polluantes. Par exemple, réutiliser les pales broyées comme base de nouveaux matériaux composites.

Les prochaines générations d'éoliennes devraient aussi pouvoir diminuer ou supprimer l'utilisation de terres rares (comme le néodyme, utilisé dans les aimants permanents). En Belgique, seulement 10% des éoliennes en service en utilisent. En gros, l'éolien consomme, en terres rares, 6% de la production annuelle en néodyme et 30% en dysprosium.

## 2.6 Références

---

<http://zebulon1er.free.fr/vent.htm>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne\\_en\\_mer](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne_en_mer)

[https://reporterre.net/IMG/pdf/pap4 - ademe - impacts-environnementaux-eolien-francais-2015.pdf](https://reporterre.net/IMG/pdf/pap4_-_ademe_-_impacts-environnementaux-eolien-francais-2015.pdf)

<https://reporterre.net/Quel-est-l-impact-des-eoliennes-sur-l-environnement-Le-vrai-le-faux>

<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite>

## 3. L'ÉNERGIE SOLAIRE

### 3.1 Le soleil et son rayonnement

---

Le soleil est une étoile, qui émet un rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques. En fonction de la longueur de ces ondes, certaines parties du rayonnement sont visibles (lumière) ou non (infrarouges, ultraviolets...), et parviennent jusqu'à la Terre (tous les rayonnements cités ci-avant) ou non (les rayons à ondes courtes comme les rayons X et gamma).

Bien que les rayons du soleil soient observés (voire même adorés) depuis la nuit des temps, la composition de ce rayonnement ne commence à être étudiée qu'à partir du XVIIe siècle. Dans les années 1660, Isaac Newton (1643-1727) décompose le rayonnement solaire en un spectre de couleurs, en le faisant passer à travers un prisme. Il estime alors que le rayonnement est composé de particules (théorie corpusculaire), au contraire de son contemporain Christiaan Huygens, qui le visualise sous forme d'ondes (théorie ondulatoire). Au XIXe siècle, la théorie ondulatoire de la lumière s'impose aux dépens de la théorie corpusculaire. Cependant, au début du XXe siècle, Albert Einstein (1879-1955) découvre que, si les rayons se diffusent bien sous forme d'ondes, ils sont aussi composés de particules d'énergie, les photons. On parle désormais de « dualité onde-corpuscule ».

Les infrarouges et les ultraviolets sont découverts respectivement par l'Allemand William Herschel (1738-1822) en 1800, et par son compatriote Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) peu de temps après.

### 3.2 L'histoire de l'énergie solaire

---

L'homme est capable de transformer le rayonnement solaire en trois formes d'énergie :

- énergie thermique (chaleur)
- énergie photovoltaïque (électricité)
- énergie lumineuse



### **3.2.1 Le solaire thermique**

Le mot thermique vient du grec *thermos*, qui signifie « chaleur ». Il est évident que le soleil sert depuis toujours à l'homme pour se chauffer, sans utiliser aucun « artifice » (orientation adéquate des maisons dans l'Antiquité etc.). Mais on va découvrir qu'il est possible de chauffer ou de brûler diverses matières en focalisant sur elles les rayons du soleil, par l'intermédiaire de miroir(s) concave(s) ou de lentille(s).

Il faut noter que deux phénomènes physiques doivent être pris en compte quand on veut utiliser l'énergie solaire sous forme thermique :

a) La couleur noire absorbe la lumière (énergie transformée sous forme de chaleur), tandis que le blanc la réfléchit.

b) L'« effet de serre » fait que si on expose une pièce ou une boîte vitrée aux rayons du soleil, ceux-ci pénètrent à l'intérieur ; mais la chaleur rayonnante émise en conséquence par l'air de la boîte et les parois (les infrarouges) ne peut traverser les vitres vers l'extérieur (car le verre est transparent au rayonnement solaire – courte longueur d'onde – mais opaque au rayonnement infrarouge – grande longueur d'onde) et s'accumule à l'intérieur.

L'effet de serre a été observé par Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799), qui crée un « héliothermomètre », en 1784 : une caisse en sapin, doublée de liège noir et fermée par trois glaces, toujours placée perpendiculairement aux rayons du soleil. Ayant obtenu à l'intérieur de sa caisse une température supérieure à celle de l'eau bouillante, il explique son expérience par l'isolation de l'air, mais pas encore par l'effet de serre.

C'est Joseph Fourier (1768-1830), qui, ayant intégré les théories de la « chaleur rayonnante » - les infrarouges – fait l'analogie avec l'atmosphère en 1824.



**Horace-Bénédict de Saussure  
(1740-1799)**

### **Les miroirs ardents**



Dans l'Antiquité déjà, plusieurs savants s'intéressèrent au phénomène des « miroirs ardents ». Il s'agissait de faire en sorte que les rayons du soleil soient réfléchis par un miroir sphérique ou parabolique, et focalisés sur une petite surface, afin d'enflammer celle-ci à distance. On utilisait ce phénomène pour allumer des feux sacrés ou encore la flamme olympique.

La légende (au moins depuis l'époque byzantine) veut que lors du siège de Syracuse, colonie grecque, en 215-212 av. J.-C., le savant Archimède ait incendié à l'aide de miroirs les navires romains assiégeant la ville. Cette histoire (mise en doute depuis la Renaissance) va fasciner les siècles ultérieurs, et pendant longtemps les savants vont tenter de recréer cette expérience.

Dès 1747, Georges Buffon (1707-1788), directeur du Jardin du Roi, se lance dans la construction de miroirs concaves, avec lesquels il brûle différents matériaux à distance. Il s'intéresse aussi aux lentilles de réfraction, travaillant à l'élaboration de lentilles qui soient à la fois épaisses et bien transparentes, ce qui n'était pas encore réalisable en France à l'époque. Il fait des démonstrations publiques, notamment en présence du Roi.

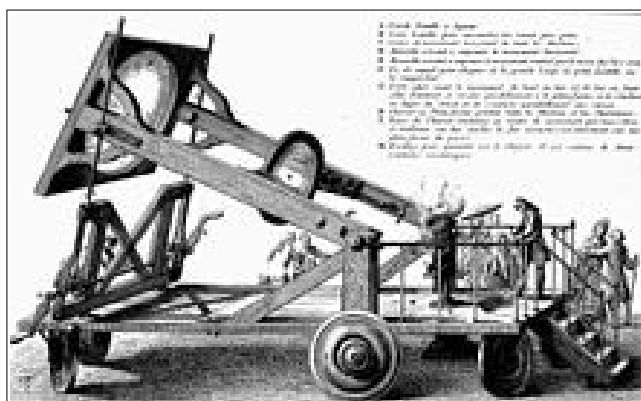


Georges Buffon  
(1707-1788)

Quelques années plus tard, Antoine Lavoisier (1743-1794) cherche à perfectionner les systèmes existants, lentilles et miroirs, pour les appliquer aux expériences chimiques, évitant de la sorte les interférences des fourneaux à charbon. Un premier essai avec les lentilles existantes le déçoit.



Antoine Lavoisier et son  
épouse Maire-Anne Paulze



Le corps que l'on veut exposer à la chaleur ne reçoit pas assez de rayons, et le foyer est trop ponctuel. Il faut une lentille plus grande, au foyer plus large. Comme il n'est pas possible de le réaliser en verre, Lavoisier préconise les loupes à liquide (plutôt que les loupes de verre) : une glace reliée par ses bords et remplie d'alcool est fabriquée. Elle est mobile pour suivre les mouvements du soleil. Si nécessaire (pour obtenir une température supérieure, pour parvenir à la fusion du fer), on ajoute une seconde lentille.

### Les pompes solaires

Dans l'Antiquité, Héron d'Alexandrie (Ier siècle ap. J.-C.) met au point une pompe solaire : une sphère qui aspire l'eau grâce au rayonnement solaire. La sphère remplie d'eau est chauffée par le soleil ; l'air chauffé et dilaté chasse le liquide, qui coule dans le réceptacle ; ensuite placée à l'ombre, la sphère aspire l'eau.

Le même principe est repris, au XVIIIe siècle, par Salomon de Caus (1576-1626), qui édifie diverses machines destinées à orner les luxueux jardins princiers de son temps. Parmi celles-ci, se trouvent des fontaines mises en route par des citernes cachées derrière un mur, sur lesquelles tombaient les rayons du soleil.

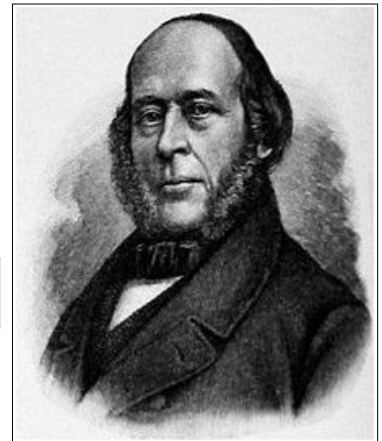
### Les fours et cuiseurs solaires

Un des premiers « fours solaires » est l'héliothermomètre de Horace-Bénédict de Saussure, dont il a été question plus haut. Une des premières applications semble avoir été réalisée par le scientifique anglais John Herschel durant son expédition en Afrique, dans les années 1830.

Au XIXe siècle, un Français, Augustin Mouchot (1825-1912), s'intéresse beaucoup aux diverses applications possibles de l'énergie solaire. Il met au point plusieurs fours, dont un four solaire parabolique destiné à produire de la vapeur pour faire fonctionner une machine à vapeur. Mais en ce temps, le charbon est bon marché et ses recherches ne suscitent pas de grand intérêt.



**Augustin Mouchot**  
(1825-1912)

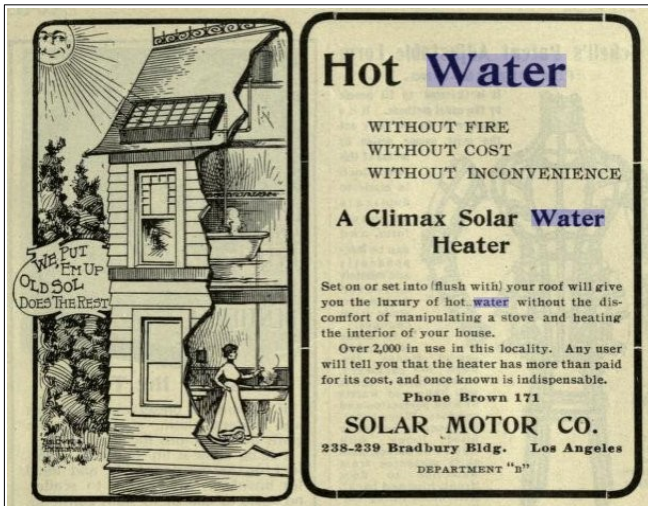


**John Ericsson**  
(1803-1889)



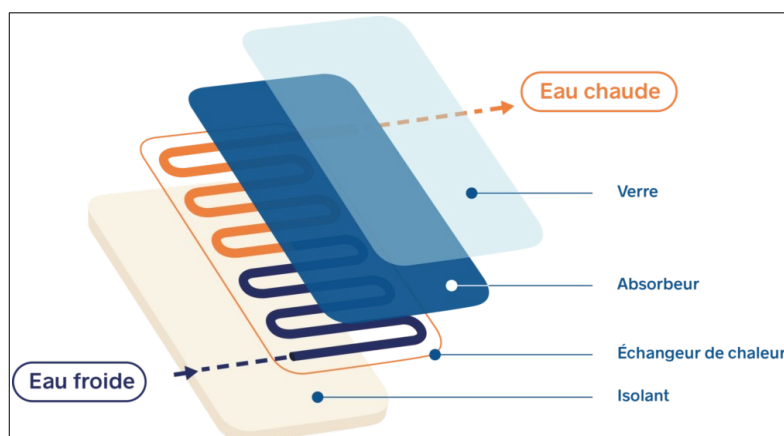
Par ailleurs, un four à très grande puissance destiné à des expériences scientifiques a été construit, à partir de 1949, à Mont-Louis en France (Pyrénées-Orientales). Un autre four plus puissant a été construit dans le même département à Odeillo, en 1970. Il permet d'atteindre des températures de plus de 3000°. Les rayons tombent sur une série de miroirs situés sur une pente et orientés ; ils sont réfléchis vers un miroir parabolique, qui les concentre à son tour vers une cible.

## Les capteurs solaires



Au XIXe siècle, aux États-Unis, certains peignaient des citernes en noir afin de récolter facilement de l'eau chaude. En 1891, l'Américain Clarence Kemp crée et commercialise le « Climax », qui combine ce principe de base avec l'effet de serre. En 1909, l'invention de William J. Bailey (stocker l'eau chauffée à l'intérieur de la maison) permet d'utiliser l'appareil jour et nuit.

Pour le chauffage de l'air, un « mur capteur » a été breveté en 1881 par Edward Morse : il s'agit d'accumuler la chaleur pendant le jour et de la restituer vers l'intérieur pendant la nuit ; une vitre y est ajoutée pour produire un effet de serre. Ce concept a été développé dans les années 1960 par Félix Trombe et porte le nom de « mur Trombe » ou « mur Trombe-Michel ». Un autre système, développé dans les années 1970, consiste en panneaux solaires aérothermiques : l'air chauffe par effet de serre entre deux parois, avant d'être introduit à l'intérieur de la maison. Le modèle le plus courant de capteurs solaires actuels (« flat-plate solar collector »), pour chauffer l'eau et l'air, a été développé dans les années 1950 par Hoyt C. Hottel et A. Whillier.

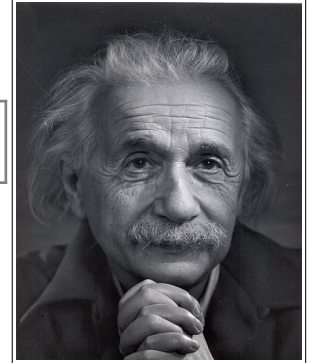


### **3.2.2 Le solaire photovoltaïque**

L' « effet photovoltaïque » (du grec *phôtos*, la lumière, et du nom de l'Italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrique) a été observé pour la première fois en 1839 par Antoine Becquerel (1788-1878). Lorsque certains matériaux (semi-conducteurs : silicium, germanium, etc.) sont éclairés, une tension électrique apparaît en leur sein.



**Antoine Becquerel  
(1788-1878)**



**Albert Einstein  
(1879-1955)**

Cet effet photovoltaïque (ou photoélectrique) a été expliqué par Albert Einstein en 1905 : le photon (particule de lumière) arrachant et mettant en mouvement un électron, le corps devient conducteur. Einstein a reçu le prix Nobel de Physique en 1921 pour cette découverte.



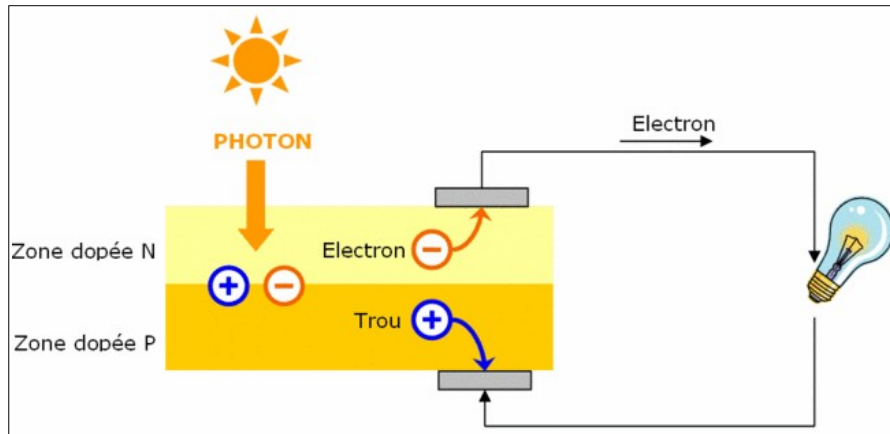
En 1883, l'Américain Charles Fritts construit la première cellule photovoltaïque au selenium, mais le taux de conversion électrique n'est alors que de 1% ! C'est en 1946 que Russel Ohl (1898-1987) met au point la première jonction PN (voir ci-dessous) ; et en 1954 qu'apparaissent les premières cellules modernes au silicium.

Dès la fin des années 1950, les cellules photovoltaïques sont utilisées sur les satellites. La première maison équipée de telles cellules date de 1973, et la première calculatrice solaire de 1976.



En Belgique, en 2022, le solaire représentait 7,7% de l'électricité produite en Belgique.

## Comment cela fonctionne-t-il ?



Afin de fabriquer une cellule photovoltaïque, on joint deux couches de semi-conducteurs, l'un en excès de charge positive, l'autre en excès de charge négative (une jonction PN), ce qui crée un champ électrique à leur zone de contact. Sous l'effet de ce champ, les électrons arrachés des atomes de silicium par les photons sont obligés de se diriger du même côté. Sur la face antérieure de la cellule, une grille métallique est chargée de collecter le courant photovoltaïque.

### 3.3 Les avantages et les inconvénients du solaire

#### Avantages

- + Le solaire est une énergie renouvelable car elle dépend du soleil, source d'énergie inépuisable (du moins à l'échelle humaine).
- + Hormis lors de sa construction et de son recyclage, le solaire ne pollue pas. Il n'émet ni particules ni gaz à effet de serre lors de la production d'électricité et d'eau chaude.
- + Les panneaux solaires ont une longue durée de vie (plus ou moins 30 ans).

#### Inconvénients

- L'énergie solaire est intermittente, elle n'est produite que durant la journée, il faut donc une autre source d'énergie ou l'utilisation de batteries durant la nuit.
- Les rendements sont plus faibles en hiver.
- Au delà de 25°, la production des panneaux photovoltaïques diminue (0,5 % de rendement en moins par degré supplémentaire). Ils sont donc moins efficaces en été et lors des canicules.
- Le rendement des panneaux photovoltaïques diminue avec le temps.

### 3.4 Recyclage des panneaux photovoltaïques

La durée de vie d'un panneau solaire est d'approximativement 30 ans.

Les panneaux sont composés majoritairement de verre à plus ou moins 80%, de silicium ou de cadmium (renvoyés au fabricant), de plastique, d'un cadre en aluminium et de métaux conducteurs (cuivre, argent ou aluminium). La plus grande partie de ces matériaux (90%) est déjà recyclée dans des filières industrielles.

L'enjeu sera d'augmenter les filières de recyclage afin de pouvoir traiter la grande quantité de

panneaux qui arriveront en fin de vie dans les décennies à venir.

Il existe déjà des sociétés en Belgique qui s'occupent du recyclage des panneaux solaires.

### 3.5 Références

R. RASHID, *Les Catoptriciens grecs*, Paris, 2000 (Les Belles Lettres)

*Les pneumatiques d'Héron d'Alexandrie*, trad. et notes G. ARGOUD et J.-Y. GUILLAUMIN, Saint-Etienne, 1997.

J.-P. POIRIER, *Antoine-Laurent de Lavoisier, 1743-1794*, Paris, 1993.

R. McKIE, *L'énergie solaire*, Tournai, 1986 (Découvrons l'énergie)

M. SPENCE et M. DE VISSCHER, *L'énergie solaire*, Tournai, 1994 (Le monde qui nous entoure).

[http://www.californiasolarcenter.org/history\\_solarthermal.html](http://www.californiasolarcenter.org/history_solarthermal.html)

<https://blog.ecoflow.com/fr/energie-solaire-avantages-et-inconvenients/>

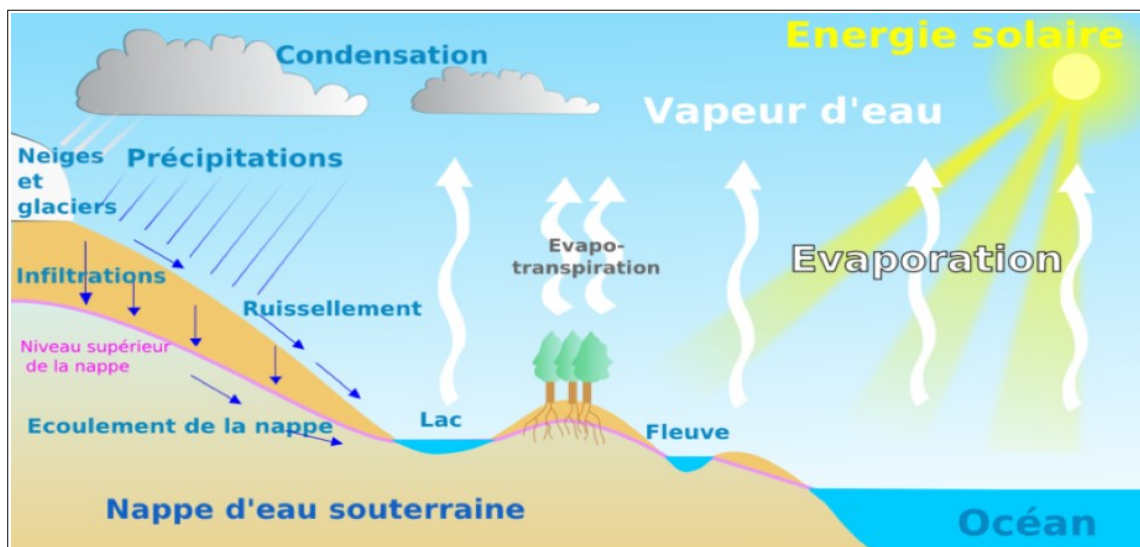
<https://sveasolar.be/fr-be/avantages-inconvenients-energie-solaire>

[https://blog.ecoflow.com/fr/energie-solaire-avantages-et-inconvenients/#Avantages\\_de\\_lenergie\\_solaire](https://blog.ecoflow.com/fr/energie-solaire-avantages-et-inconvenients/#Avantages_de_lenergie_solaire)

## 4. L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

### 4.1 L'eau

#### Cycle de l'eau



- Sur la terre, l'eau peut se trouver dans ses 3 états : liquide (eau), solide (glace) et gazeux (vapeur d'eau).
- Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau des lacs, des fleuves, des océans et aussi des végétaux s'évapore (évapotranspiration).
- En altitude, dans l'atmosphère, la vapeur se refroidit et se condense pour former de minuscules gouttelettes d'eau et constituer les nuages.
- Sous l'action du vent, les nuages se déplacent vers les terres, se refroidissent et donnent lieu

aux précipitations sous forme de pluie, neige ou grêle.

- L'eau issue des précipitations va soit être absorbée par les sols pour former la nappe phréatique, soit, sous l'action de la gravitation, ruisseler le long des pentes, et se déverser dans les rivières et les lacs pour finalement se retrouver dans les océans.

## L'énergie hydraulique

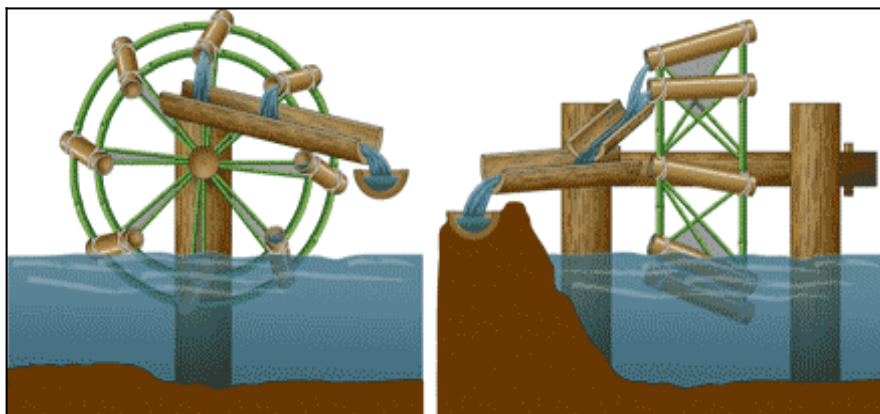
L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

Du point de vue de la mécanique, l'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique dans le cas des courants marins ou des cours d'eau, des marées, des vagues, et une énergie potentielle dans le cas des chutes d'eau et barrages.

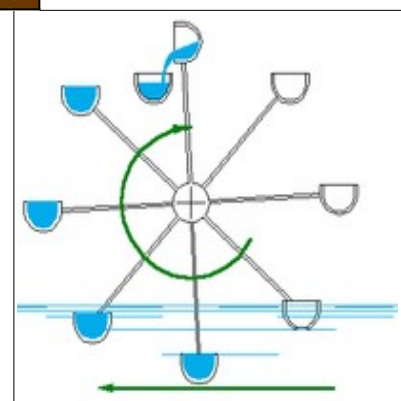
L'énergie hydraulique est issue du cycle de l'eau continuellement reproduit grâce au rayonnement solaire. Il s'agit donc bien d'une énergie renouvelable.

## 4.2 Histoire de l'énergie hydraulique

Les hommes de l'Antiquité se sont assez peu intéressés à l'énergie hydraulique. Le climat méditerranéen s'y prête peu : rares sont les cours d'eau ayant un débit constant et les aqueducs sont une solution très coûteuse. La principale machine utilisant la force du courant comme source d'énergie durant l'Antiquité est la **noria**. Il s'agit d'une grande roue à ailettes installée sur un cours d'eau et actionnée par le courant. Un chapelet de godets fixés à cette roue élève et déverse l'eau dans un aqueduc associé qui la distribue. La noria serait apparue chez les Romains au 1er siècle avant Jésus-Christ.

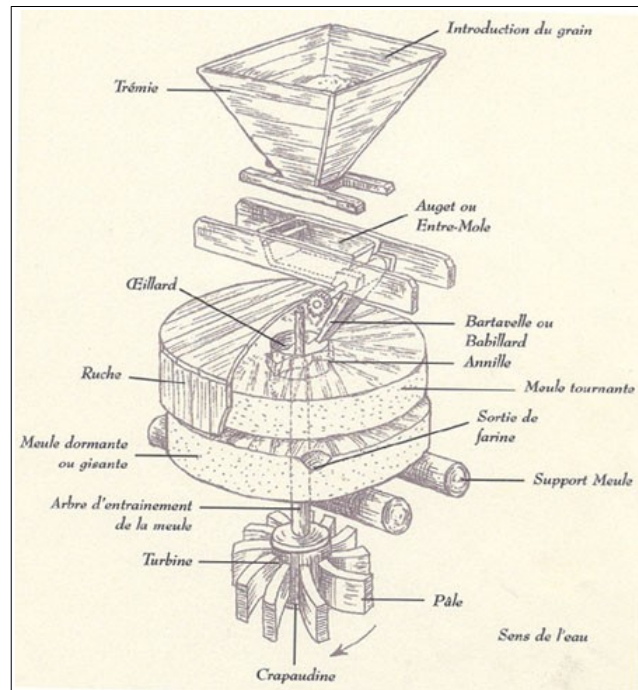


Noria

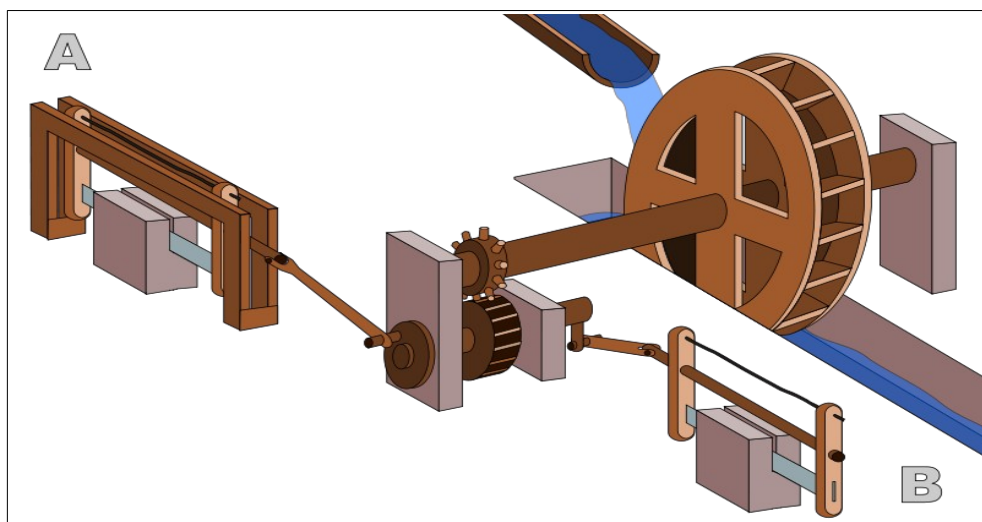




Les premiers moulins à eau construits par les Grecs vers 300-250 avant Jésus-Christ se composaient d'une roue motrice horizontale plongée dans le courant d'eau. L'arbre de la roue se prolongeait verticalement en hauteur, traversait la meule dormante et entraînait la meule courante placée au-dessus. De petite dimension et à usage domestique, ce type de moulin fut utilisé à travers l'Europe jusqu'à la fin du Moyen Âge.



Le moulin à eau à roue verticale est, quant à lui, apparu en 240 avant Jésus-Christ : il nécessite l'utilisation d'un mécanisme d'engrenages, beaucoup plus complexe que celui des moulins à roue horizontale. La plus ancienne machine à eau connue utilisant un système bielle manivelle est représenté sur un bas-relief du IIIe siècle de notre ère, à Hiérapolis en Turquie. Elle actionnait une paire de scies destinées à couper de la pierre. Il s'agit cependant probablement d'un cas particulier. Le système bielle manivelle ne connaîtra un réel essor qu'à la Renaissance.



Scie hydraulique de Hiérapolis – IIIe siècle ap. J.C

## Les moulins à eau

Les moulins à eau étaient très rares et de taille modeste durant l'Antiquité. Ils vont se multiplier et se perfectionner dans le courant du Moyen Âge. En effet, ce type de machine permet une productivité bien plus grande que celle fournie par les meules antiques actionnées par des esclaves : chaque moulin à eau peut moudre 150 kg de blé à l'heure ce qui correspond à peu près au travail de 40 personnes.



Moulin à eau avec sa roue à aubes  
situé sur la Lys, à Dennebroeucq  
(France).

À l'origine, ils servent essentiellement à moudre les grains, presser les olives, broyer les noix ou les raisins, voire les minéraux... Ils vont être adaptés à des activités industrielles proprement dites grâce à l'introduction d'un mécanisme intermédiaire révolutionnaire, l'arbre à cames : ce dispositif transforme en effet le mouvement circulaire continu de la roue motrice en un mouvement rectiligne et alternatif.

Avec l'arbre à cames, les roues hydrauliques peuvent actionner des pilons ou des marteaux pour forger le fer (moulins à fer dont les marteaux sont appelés martinets), des scies ou encore des soufflets dans les forges. Les moulins à foulon (les maillets foulent les draps), à chanvre, à pastel, à bière, à papier se multiplient.

Appliqué à toutes sortes d'industries, le moulin à eau est une étape décisive pour l'utilisation artisanale et industrielle de l'énergie hydraulique. Il est l'élément-clé de la révolution technique qui commence au IXe siècle au Moyen Âge et symbolise à lui seul la toute première révolution industrielle en augmentant la productivité et en s'adaptant à une grande diversité d'in

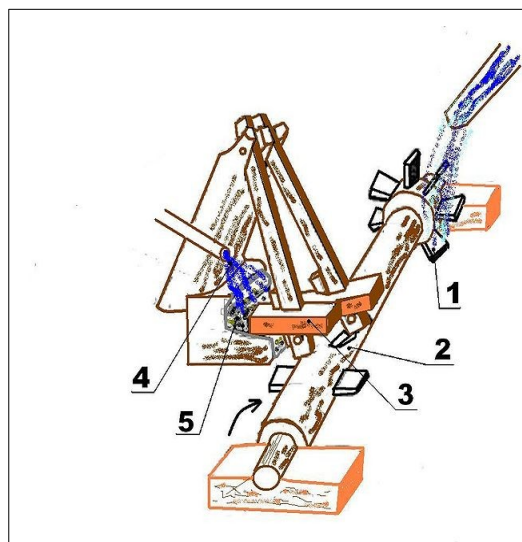


Schéma foulon: 1-roue à aubes, 2-arbres à cames, 3-maillets, 4-eau alcaline, 5-tissu à fouler

## Les centrales hydro-électriques

Ce n'est qu'au cours du XIXe siècle que les roues à aubes sont utilisées pour produire de l'électricité. À la fin du siècle, la turbine remplacera la roue hydraulique et les premiers barrages feront leur apparition.

En effet, au XIXe siècle Benoist de Fourneyron (1802-1867) invente la première turbine. Il utilise l'effet de la pression pour entraîner une roue à eau. Il commence en 1827 avec une première turbine aux forges de Pont-sur-l'Ognon en Franche-Comté. La hauteur de chute de 1,4m génère une puissance de 4,5 kW avec 60 tours par minute. Quelques années plus tard, en 1837, en Allemagne, il équipe une chute de 112 mètres avec une turbine de 55 cm de diamètre et atteint une puissance de 45 kW pour une vitesse de rotation de 2300 tours par minute.

Plus tard, l'apparition des dynamos et des alternateurs mis au point par le Belge Zénobe Gramme (1826-1901) entre 1869 et 1877 permettront de produire industriellement de l'électricité et de la transporter sur de longues distances.

L'hydroélectricité va connaître ensuite un développement spectaculaire. Ainsi, entre 1920 et 1940, plus de cinquante barrages sont édifiés.

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'hydro-électricité est la seule à être exploitée à grande échelle, et ceci dans le monde entier. En effet, elle représente 16 % de la production électrique mondiale contre 67 % pour les combustibles fossiles (charbon, pétrole, etc.), 17 % pour le nucléaire et 0,3 % pour les centrales géothermiques.

Actuellement, la Belgique est équipée d'un parc d'une cinquantaine de centrales hydroélectriques dont la puissance installée totale est d'environ 100 MW.



En 2022, la production des centrales hydroélectriques belges représentait 0,3 % du totale de l'électricité produite en Belgique.

### 4.3 Les centrales hydro-électriques

---

Il existe différents types de centrales hydroélectriques en fonction de la hauteur de la chute d'eau et du volume de la réserve d'eau :

- les centrales gravitaires qui mettent à profit l'écoulement de l'eau au long d'une dénivellation du sol. On distingue les usines de lac (plus de 300 m de chute), les usines d'éclusée (entre 25 et 300 m) et les usines au fil de l'eau (moins de 25 m).
- les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage qui en plus de produire de l'énergie à partir de l'écoulement naturel, comportent un mode pompage permettant de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation.
- les **usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins

permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.

À un étranglement des rives d'un cours d'eau, un barrage est érigé qui crée une retenue d'eau.

Au pied de ce barrage, on installe des turbines reliées à des alternateurs (générateurs). On alimente en eau sous pression les turbines par un système de canalisations et de régulateurs de débit. La turbine hydraulique couplée à un alternateur (ou générateur) convertit l'énergie cinétique de l'eau en mouvement en énergie électrique utilisable par les consommateurs.

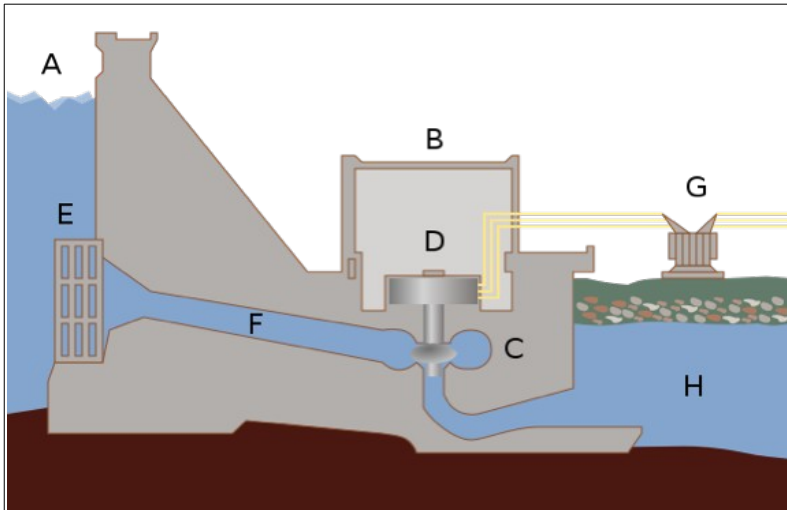
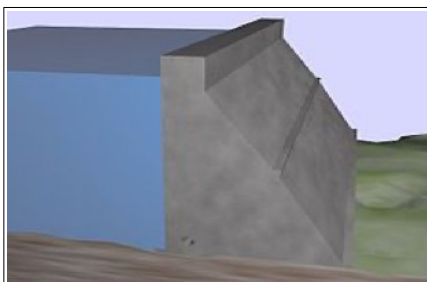


Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.

A - réservoir, B - centrale électrique, C - turbine, D - générateur, E - vanne, F - conduite forcée, G - lignes haute tension, H - rivière

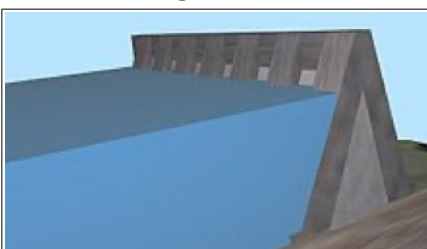
Il existe différents types de barrages:

### Barrage poids



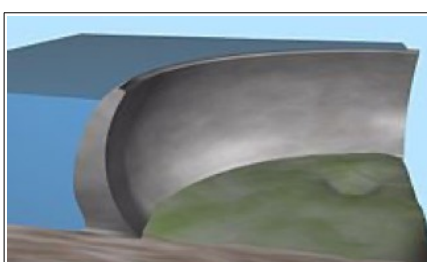
Un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau.

### Barrage à contreforts



Le barrage à contreforts reporte la poussée de l'eau sur les fondations inférieures et sur les rives.

### Barrage en voûte



La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure).

Ces énormes structures ne constituent que la partie supérieure d'un barrage hydroélectrique. Dans les sous-sols, se trouvent les turbines et les alternateurs.

## Fonctionnement

1. L'eau, par son poids et sa vitesse, actionne une turbine qui entraîne à son tour un générateur.
2. L'énergie mécanique produite va être transformée par ce générateur en énergie électrique.
3. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique.

L'électricité d'origine hydraulique provient de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux : en pratique il faut une tonne d'eau qui descend d'environ 400 m pour produire 1 kWh.

**1 kWh = 1000 Watt consommés pendant une heure.**

Deux facteurs influencent directement la puissance disponible : la hauteur de la chute (H) et le débit d'eau (Q).

Cette relation peut s'écrire :  $P = k.H.Q$

Le coefficient k tient compte du poids spécifique de l'eau et des rendements des différentes machines.

Pour une même puissance, une turbine peut donc être alimentée par un faible débit sous une hauteur de chute importante ou, au contraire, par un débit important sous une faible hauteur de chute.

## 4.4 Avantages et inconvénients de l'hydraulique

---

### Avantages

- + L'absence d'émission de gaz à effet de serre durant toute la période d'utilisation du barrage. Cette énergie ne produit pas de déchets.
- + Les lacs artificiels créés par ces barrages deviennent souvent des zones touristiques et de loisirs.

### Inconvénients

- Dans la plupart des cas, il y a destruction de villages et de terres agricoles lors de la création du lac artificiel.
- Il existe un risque de modification des écosystèmes et de sur- ou sous-oxygénation du milieu qui impacte la biodiversité.
- L'envasement des cours d'eau en amont.
- En s'accumulant dans les bassins de retenue d'eau, les sédiments peuvent polluer l'eau et créer une érosion des berges en aval par manque d'apport de nouveaux sédiments.
- Les barrages peuvent bloquer la circulation des espèces animales (les saumons par exemple).

## 4.5 Références

---

VIOLLET Pierre-Louis, *Histoire de l'énergie hydraulique*, Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2005

<http://science-energie.chez-alice.fr/energie/hydro.htm>

## 5. LA BIOMASSE

### 5.1 Qu'est-ce que c'est ?

Bio = vivant, Masse matière, la biomasse est de la matière issue du vivant.

La biomasse est le produit de la photosynthèse des végétaux. Cette réaction photochimique transforme et stocke l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique.

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (biocarburant ou agrocarburant).

La biomasse, préparée comme un aliment, constitue la ressource énergétique indispensable à la vie des êtres vivants.

La biomasse est une véritable réserve d'énergie, captée à partir du soleil grâce à la photosynthèse.

L'énergie tirée de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable et soutenable tant qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource, mise en péril de la fertilité du sol, et tant qu'il n'y a pas de compétition excessive d'usages (des terres arables, de l'eau), ni d'impacts excessifs sur la biodiversité, etc.

### 5.2 Histoire

L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie lumineuse et thermique remonte à la préhistoire par l'utilisation du bois pour se chauffer et s'éclairer. C'est la première source d'énergie exploitée pendant des millénaires jusqu'à la découverte du charbon et des autres énergies fossiles.

À la fin du XIXe siècle, à la naissance de l'industrie automobile, les motoristes se tournaient, entre autres, vers ce qu'on n'appelait pas encore des biocarburants : Nikolaus Otto, inventeur du moteur à combustion interne, avait conçu celui-ci pour fonctionner avec de l'éthanol. Rudolf Diesel, inventeur du moteur portant son nom, faisait tourner ses machines à l'huile d'arachide. La Ford T (produite de 1903 à 1926) roulait avec de l'alcool.

### 5.3 Valorisation de la biomasse

#### **5.3.1 Sous forme de chaleur: la bioénergie**

La valorisation énergétique de la biomasse se fait essentiellement par combustion. Une partie de la chaleur produite peut être transformée en une énergie mécanique (travail) par un moteur. Si le moteur est couplé à une génératrice électrique, il y a production d'électricité.

#### **Cas du bois**

L'énergie chimique du bois est libérée par combustion sous forme de chaleur et utilisée directement pour le chauffage de bâtiments (les bâtiments doivent être proches de la chaufferie afin d'éviter la déperdition de chaleur) ou pour produire de l'électricité. Le bois comme source de chauffage est utilisé à toute les échelles sur la planète.

## Menaces

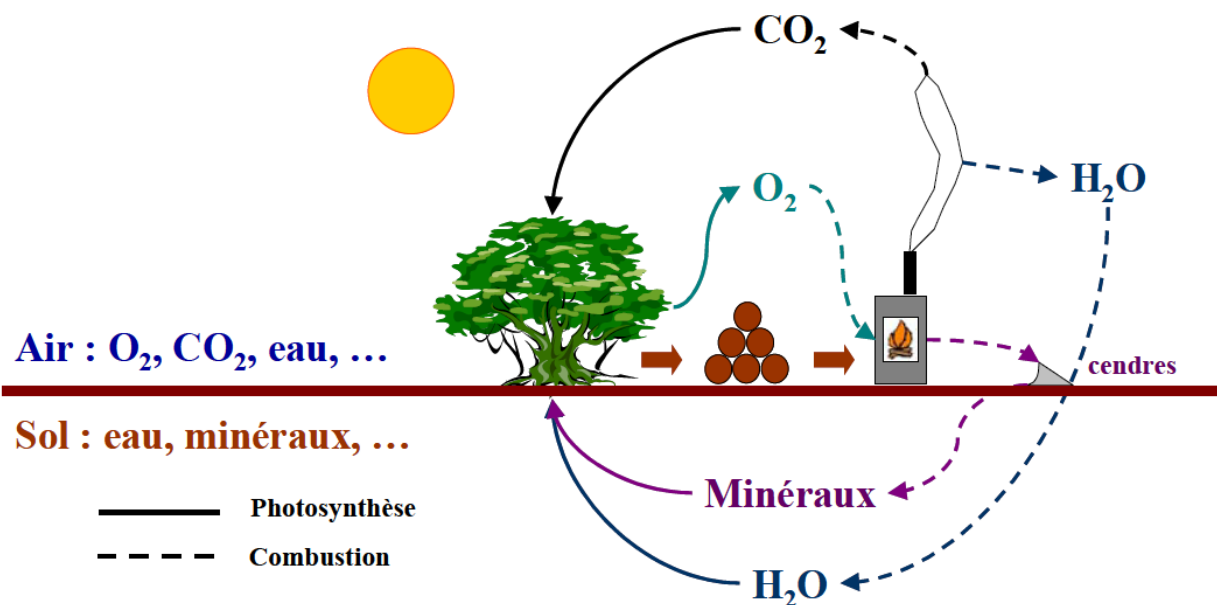
Les inconvénients de cette valorisation sont les coûts et impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque, ainsi que le risque de contribution à la déforestation ou à une surexploitation des forêts ou encore à un accaparement des terres pour y délocaliser une production de biocarburant pour les pays riches.

**Les problèmes de pollution atmosphérique induits par la combustion mal maîtrisée du bois ne sont pas anodins : sous certaines conditions, les poêles à bois libèrent des dioxines dont certaines sont toxiques ou encore des furanes.**

### Réduction des risques :

Si les surfaces dévolues aux forêts restent constantes, à proximité des lieux d'utilisation, et que la quantité prélevée est plus ou moins remplacée, alors l'utilisation n'aggrave pas la déforestation et a peu d'impact sur l'effet de serre.

**En effet, lors de la combustion du bois, du CO<sub>2</sub> est dégagé et de l'oxygène absorbé tandis que lors de la photosynthèse, le CO<sub>2</sub> est absorbé par les végétaux qui l'utilisent pour construire leur composants (racines, feuilles...) et ce processus libère de l'oxygène dans l'atmosphère.**



### 5.3.2 Avantages et inconvénients de la biomasse

#### Avantages

- + Cette source d'énergie est facilement accessible et disponible partout.
- + Les biocombustibles sont moins onéreux que les combustibles fossiles.
- + L'utilisation de la biomasse permet de valoriser les déchets (électricité, chaleur, biogaz).
- + La production d'énergie issue de la biomasse produit moins de CO<sub>2</sub> que celle produite grâce aux énergies fossiles.

## **Inconvénients**

- L'installation nécessaire pour l'incinération des déchets demande un espace de grande taille (pour la chaufferie, le traitement des fumées, le stockage de la matière première).
- Nombreux transports par camion pour amener le combustible.

### **5.3.3 Conversion biologique de la biomasse**

#### **Biogaz**

On appelle biogaz les effluents gazeux et le méthane essentiellement, issus de la fermentation de matières organiques contenues dans les décharges, les stations d'épuration, les déchets agricoles, etc. Le méthane est un puissant gaz à effet de serre et sa captation est de toute façon hautement souhaitable même si sa combustion produit du gaz carbonique<sup>1</sup>. Il peut être considéré comme une ressource énergétique, souvent via sa combustion pour produire de la chaleur et de l'électricité.

Après épurations des éléments néfastes pour les moteurs (eau, gaz carbonique, etc..), on peut également l'utiliser dans des moteurs à gaz. Ainsi, les bus urbains de Lille et Stockholm roulent en majorité avec du biogaz .

#### **Compost**

Le compostage est un procédé biologique simple et naturel par lequel la matière organique (résidus verts ou résidus de jardin, résidus de cuisine et restes de table) se décompose sous l'action des micro-organismes.

En combinant des conditions adéquates d'aération, une juste teneur en humidité et une bonne température, avec une recette équilibrée d'ingrédients à base de carbone (C) et d'azote (N), le compostage permet d'obtenir un amendement organique riche en composés fertilisants.

Ce compost est un terreau utile en jardinage (autant dans les jardins que pour les plantes d'intérieur). Mais attention, le compostage libère de grandes quantités de méthane, gaz dont le pouvoir réchauffant est 21 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>. La décomposition des matières organiques produit aussi du CO<sub>2</sub>, mais il s'agit en quelque sorte de restitution du gaz qui a été capté durant le développement de la plante. La façon de composter affecte la production plus ou moins grande de méthane ou de gaz carbonique : en remuant souvent ou en procédant par petits tas, on favorise la production de CO<sub>2</sub>.

#### **Sous forme de carburant : les biocarburants**

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. Il existe actuellement deux filières principales :

- filière huile et dérivés, comme le biodiesel (ou biogazole)<sup>2</sup> ;
- filière alcool, à partir de sucres, d'amidon, de cellulose ou de lignine hydrolysées<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Combustion du méthane (CH<sub>4</sub>) :  $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ .

<sup>2</sup> Il est possible d'extraire l'huile, par exemple, du tournesol, du colza ou du palmier à huile.

<sup>3</sup> Le sucre est produit à partir de la betterave, de la canne à sucre ou du maïs.



## 5.4 Références

Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement: Info Fiches-énergies:

<https://www.mon-energie-verte.com/quels-sont-les-avantages-et-les-inconvenients-de-lenergie-biomasse/>

## 6. LA GÉOTHERMIE

### 6.1 Qu'est-ce que c'est ?

La géothermie désigne l'ensemble des techniques permettant de récupérer et d'exploiter la chaleur naturellement présente dans le sol et dans les aquifères (nappes d'eau souterraines). Cette chaleur varie en fonction de la nature du sol, de sa localisation et de sa profondeur (la température augmente en moyenne de 3 degrés tous les 100 mètres).

Pour capter cette énergie géothermique, on fait circuler un fluide (le plus souvent de l'eau) qui augmente en température le long du trajet. Une fois remonté, ce fluide peut soit servir tel quel pour chauffer, soit pour produire de l'électricité. La géothermie de surface provient principalement de la chaleur provoquée par la désintégration naturelle des éléments radioactifs présents dans la croûte terrestre.

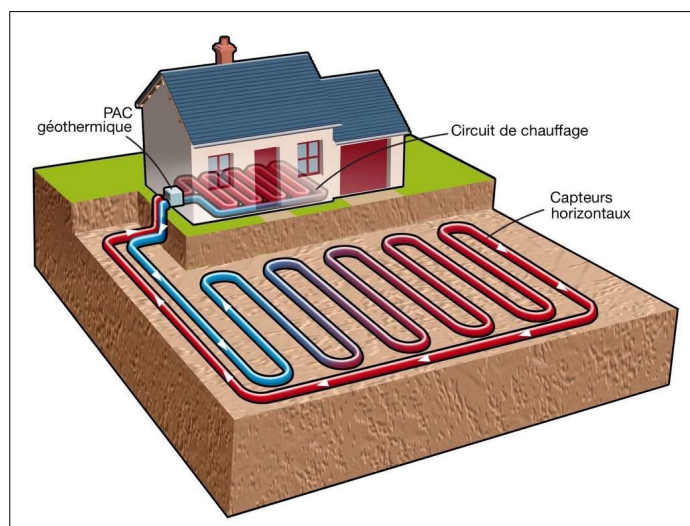
Une trentaine de pays produisent une partie de leur électricité grâce à la géothermie, les États-Unis et les Philippines en tête. En 2022, la géothermie représentait 1,5 % de la production totale d'électricité en Belgique.

### 6.2 Historique

Depuis au moins l'Antiquité, les sources d'eau chaude sont utilisées comme bain. On en retrouve des traces en Chine dès le 3<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ et les Romains s'en servaient, là où c'était possible, pour les thermes et le chauffage par le sol. Il faut attendre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour voir la construction, aux États-Unis, des premiers bâtiments alimentés grâce à la géothermie. Au XX<sup>e</sup> siècle, la demande croissante en électricité et les progrès techniques ont permis à la géothermie de figurer parmi les sources complémentaires d'électricité d'un grand nombre de pays.

### 6.3 Les différents types de géothermie

- La géothermie de surface à basse température (en dessous de 30°). Cette chaleur provient du soleil qui réchauffe le sol. Elle est destinée principalement aux particuliers. Le circuit fermé peut être installé horizontalement avec l'avantage d'être peu profond (entre 2 et 10 mètres de profondeur). À cette profondeur, la température du sol y est en permanence aux alentours de 12°.



Son inconvénient étant la grande surface nécessaire au sol (compter le double de la superficie à chauffer soit par exemple pour 100 m<sup>2</sup>, compter une installation de 200 m<sup>2</sup>). Ce type d'installation peut donc difficilement être installé en zones urbaines.

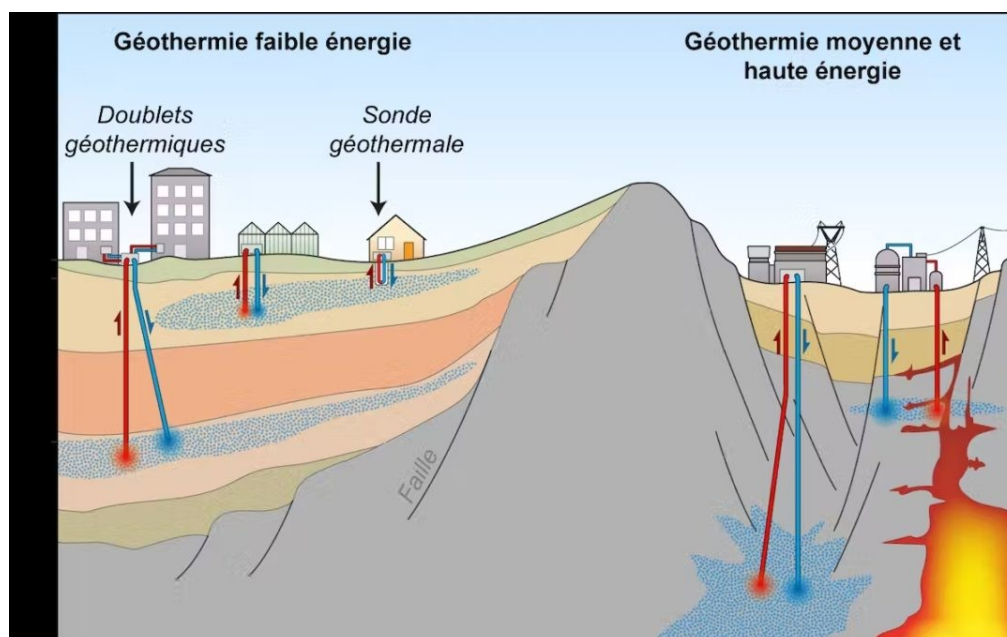
Cette installation peut aussi être positionnée verticalement mais nécessite alors des forages. Les deux procédés nécessitent une pompe à chaleur.

Ce type de géothermie est destiné au chauffage (radiateur, ou par le sol) pour le grand public.

- La géothermie à basse température (30 à 90°).

Elle nécessite des forages dans les nappes aquifères profondes (jusqu'à +/- 2000 mètres). L'eau qui remonte depuis cette profondeur peut servir à chauffer telle quelle de grandes infrastructures.

Elle nécessite aussi une bonne gestion de la nappe aquifère.



- La géothermie à haute température (entre 90 et 150°).

Les forages sont beaucoup plus profonds (jusqu'à 4000 mètres).

L'eau chaude ou la vapeur transmettent la chaleur à un autre fluide qui se vaporise et permet d'actionner des turbines afin de produire de l'électricité.

- La géothermie à très haute température (plus de 150°)

Les forages peuvent descendre jusqu'à 10000 mètres.

## 6.4 Avantages et inconvénients de la géothermie

### Avantages

- + C'est une énergie renouvelable mais elle nécessite une bonne gestion des aquifères.
- + L'énergie est constante et ne dépend pas des conditions météorologiques (vent, soleil...).
- + Peu de pollution émise (hormis pendant la construction).
- + Longue durée de vie des gisements (30-80 ans).
- + Peu d'impact sur le paysage.

### **Inconvénients**

- Les centrales géothermiques utilisant des forages profonds peuvent voir leur machinerie subir régulièrement des encrassements et des tuyaux bouchés suite aux dépôts réguliers de minéraux.
- La chaleur produite doit être utilisée localement, le transport sur de trop longs trajets amène une perte de chaleur.

### **6.5 Références**

---

<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/geothermie-exploiter-chaueur-planete>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9othermie>

<https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite>

<https://www.mon-energie-verte.com/lenergie-geothermique-fonctionnement-et-avantages/>