

# ENERGIE RENOUVELABLE

*Cours pour les étudiants de 1 ère année Mater*

*Génie des Procédés*

*Option : Génie Chimique*



## Introduction générale

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) sont la matière première de l'industrie chimique et la source d'énergie la plus utilisée dans le monde : ils fournissent plus de 80% de l'énergie utilisée, loin devant l'énergie nucléaire et les autres formes d'énergie (hydraulique, éolienne, solaire...). Les besoins mondiaux en énergie ont augmenté de façon considérable au cours du vingtième siècle et le développement des pays émergents comme la Chine permet de prévoir une augmentation encore plus rapide dans les prochaines décennies. Mais les ressources ne sont pas inépuisables : ces produits sont formés par une succession de mécanismes biologiques et géologiques qui mettent des millions d'années à s'accomplir, ces ressources ne sont donc pas renouvelables à une échelle de temps humaine.

On définira une énergie renouvelable comme une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à échelle humaine de temps. C'est une source inépuisable d'énergie offerte par la nature elle-même et dont la maîtrise garantirait largement l'autonomie de la planète. On y trouve l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie marémotrice, l'énergie de la biomasse.

Le développement de l'utilisation de ces énergies renouvelables sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront) mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants, pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires), possibilité de limitation de l'emploi des CFC (production de froid solaire par adsorption).

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire sont sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

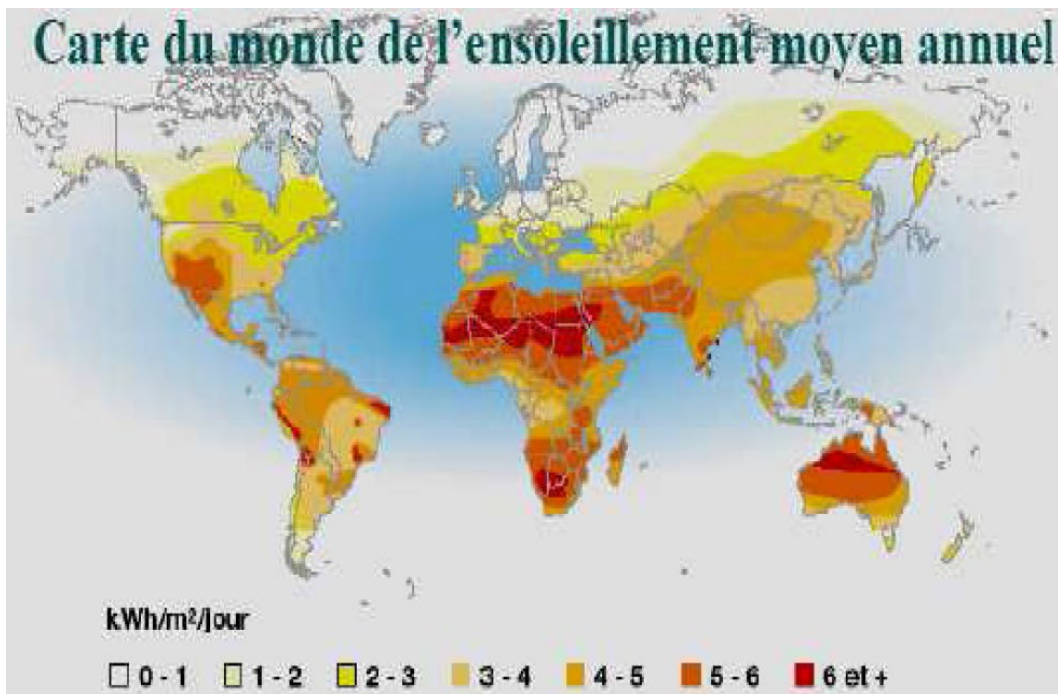
## Chapitre 1 : Le gisement solaire

### 1.1 Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie et les applications énergétiques. Il est aussi utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

### 1.2 Le gisement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure :



Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau ci-dessous selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

### **1.3 Le soleil**

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques.

Le soleil est une sphère gazeuse composée de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. Son diamètre est de 1.391.000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de  $2 \times 10^{27}$  tonnes.

Le noyau du soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion est déclenché pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie. L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace.

La terre étant à une distance de 150.106 km du Soleil, elle reçoit une énergie de  $1.8 \times 10^{17}$  W. La valeur du flux de rayonnement solaire  $E$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance terre-soleil, sa valeur moyenne  $E_0$  est appelée la constante solaire, elle vaut  $E_0 = 1367$  W/m<sup>2</sup>. On peut calculer la valeur du flux de rayonnement solaire  $E$  en fonction du numéro du jour de l'année  $j$  par la relation suivante :

$$E = E_0 [1 + 0.033 \cos(0.984j)]$$

#### **1.3.1 Rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est une énergie électromagnétique libérée par les réactions thermonucléaires au sein du soleil. Il est assez proche de celui qui est émis par un corps noir porté à une température légèrement inférieure à 5800 Kelvins. Malgré la distance entre le soleil et notre planète, l'impact de ce

rayonnement sur la terre représente un apport énergétique important. En effet, on peut estimer à 1781015 Watts puissance interceptée par l'hémisphère éclairée. Sa répartition n'est pas uniforme; ni géographiquement, ni temporellement.

### 1.3.2 Composante du rayonnement solaire

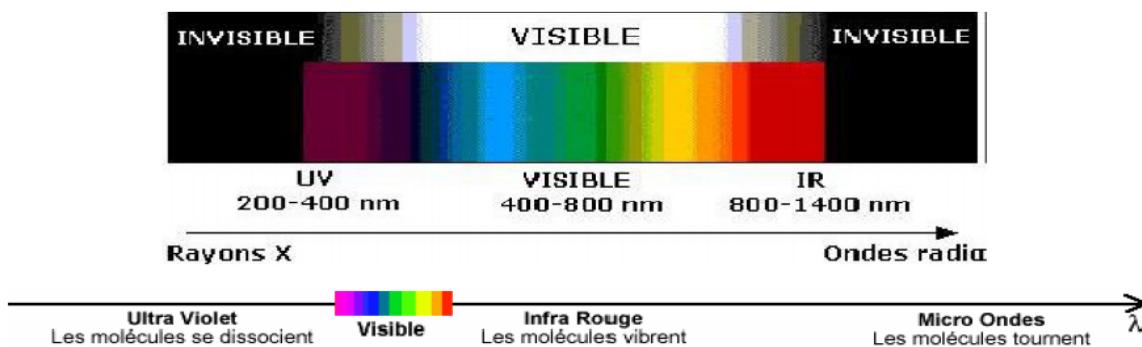
Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3  $\mu\text{m}$  (violet-bleu) à 0,7  $\mu\text{m}$  (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction. Tout éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune.

Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde.

William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au-delà du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra-violet).

Tableau Emission du rayonnement solaire

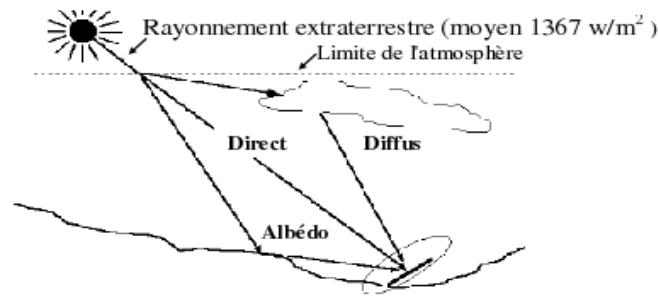
Longueurs d'onde constituant le rayonnement solaire température 6 000 K		
domaine ultraviolet inférieure à 0,3 $\mu\text{m}$ (violet-bleu)	domaine visible de 0,3 $\mu\text{m}$ (violet-bleu) à 0,7 $\mu\text{m}$ (rouge)	domaine infrarouge au delà de 0,7 $\mu\text{m}$ (rouge)
10%	40%	50%



Répartition du rayonnement solaire

### 1.3.3 Rayonnement solaire au sol

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :



- **Rayonnement direct** : C'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- **Rayonnement diffus** : C'est la part du rayonnement solaire diffusé par l'atmosphère (air, aérosols)
- **Rayonnement l'albédo** : L'albédo est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. Donc le rayonnement global s'écrit sous la forme suivante:

$$P_{glo} = P_{dir} + P_{diffus} + P_{albedo}$$

### 1.4 Captation de l'énergie solaire

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir

**1.4.1 L'énergie solaire thermique** : Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

**1.4.2 L'énergie solaire thermodynamique** : La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques. Trois types principaux de centrales sont utilisés :

- Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
- Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.
- Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

### 1.4.3 L'énergie solaire photovoltaïque

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé.

## Chapitre 2 : Conversion Thermique, Applications à Basse Température

Lorsque l'énergie lumineuse (photons) rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion photo thermique, et c'est sur ce principe que sont basés les procédés de capteur plan solaire. L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types :

- Capteur solaire photothermique
- Capteur solaire photovoltaïque

### 2.1 Applications de l'énergie solaire thermique

- Production d'eau chaude sanitaire
- Chauffage des locaux
- Chauffage des piscines

### 2.2 Types de Capteurs

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considéré.

#### 2.2.1 Les capteurs à tubes sous vide

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un tube sous vide simple ou double. Le vide améliore l'isolation contre les pertes en convection.

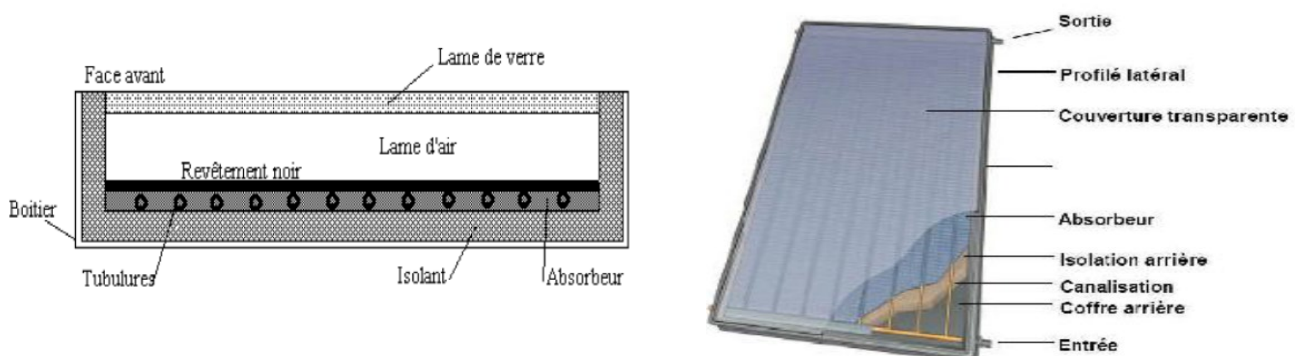
#### 2.2.2 Les capteurs plans vitrés

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un anti-gel alimentaire, de type mono-propylène glycol.

#### 2.2.3 Les capteurs non-vitrés

Par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple (réseau de tubes plastiques noirs) utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été ; ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines.

### 2.3 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire



Les capteurs solaires captent le rayonnement solaire pour le transformer en énergie thermique ou en chaleur. Les capteurs solaires utilisés dans les installations d'énergie solaire thermique sont composés des éléments suivants:

**Couverture:** Il doit s'agir d'un matériau transparent, en général c'est du verre, mais il y a certains plastiques qui peuvent aussi être utilisés avec l'avantage d'être moins chers et plus maniables. La fonction de la couverture est de minimiser les pertes de chaleur par convection et rayonnement et doit donc avoir une transmission solaire aussi élevée que possible.

**Canal d'air:** C'est un espace qui sépare le couvercle de la plaque absorbante et peut être vide ou non.

**Plaque absorbante:** La plaque absorbante est l'élément qui absorbe l'énergie solaire et la transmet au liquide qui circule dans les tuyaux. La caractéristique principale de la plaque absorbante est qu'elle doit avoir une grande absorption solaire et une émission thermique réduite. Pour répondre à cette exigence, des matériaux combinés sont utilisés pour obtenir le meilleur rapport absorption / émission.

**Tubes ou conduits:** Les tubes touchent (parfois soudés) la plaque absorbante pour maximiser l'échange d'énergie thermique par conduction thermique. Le liquide qui va chauffer et faire circuler la chaleur dans le réservoir d'accumulation s'écoule à travers les tubes.

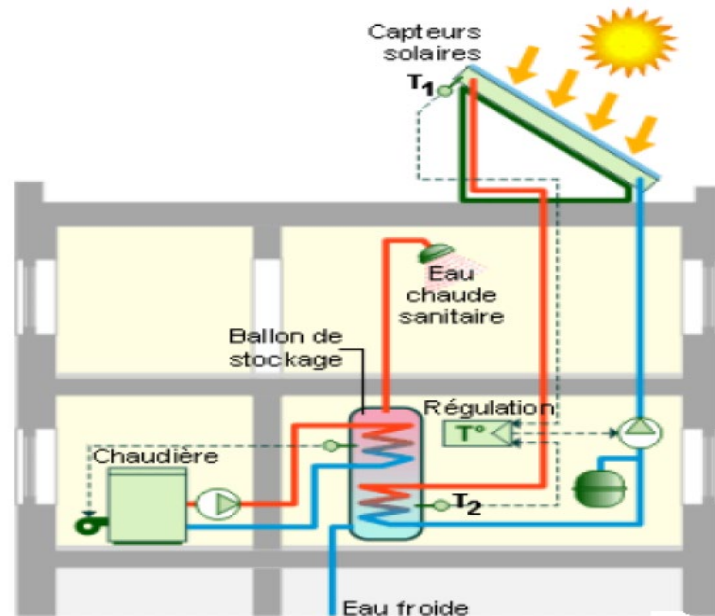
**Couche isolante:** Le but de la couche isolante est de couvrir le système pour éviter et éviter les pertes thermiques. Pour que l'isolation soit la meilleure possible, le matériau isolant doit avoir une faible conductivité thermique.

## 2.4 Exemple de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à un circuit d'eau secondaire. Les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque chaude passe un circuit d'eau qui récupère cette chaleur. Par la suite ce circuit alimente un circuit secondaire qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

La circulation de l'eau peut se faire par simple phénomène physique, l'eau chaude est moins dense que l'eau froide. C'est pour cela que sur le schéma l'eau chaude est toujours au-dessus de l'eau froide.





Principe d'un panneau solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire

Les composants du chauffe-eau solaire de la figure 1, ainsi que du système intégré dans le bâtiment sont les suivants:

- Le capteur solaire qui servira à la transformation du rayonnement solaire en chaleur ;
- Le réservoir de stockage de la chaleur jusqu'au moment de l'utilisation ;
- La boucle primaire qui aura pour objectif le transfert de chaleur entre le capteur et le réservoir ;
- Système de régulation du transfert de chaleur vers le réservoir (s'arrête quand  $T_{\text{réservoir}} > T_{\text{capteur}}$ ) ;
- La chaudière servira comme une énergie d'appoint lorsqu'il n'y aura pas assez de soleil.

### 2.5 Les avantages

- Rendement élevé (jusqu'à 80%) ;
- Source d'énergie inépuisable et propre ;
- La technologie solaire thermique est simple, peu onéreuse et facilement accessible sur le marché ;
- Il est facile de stocker temporairement la chaleur ;

### 2.6 Les inconvénients

- La production de chaleur dépend des saisons et des climats ;
- L'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds ;
- Durée de vie des panneaux généralement limitée à 20 ans ;
- Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...).

## Chapitre 3 : La Conversion Photovoltaïque

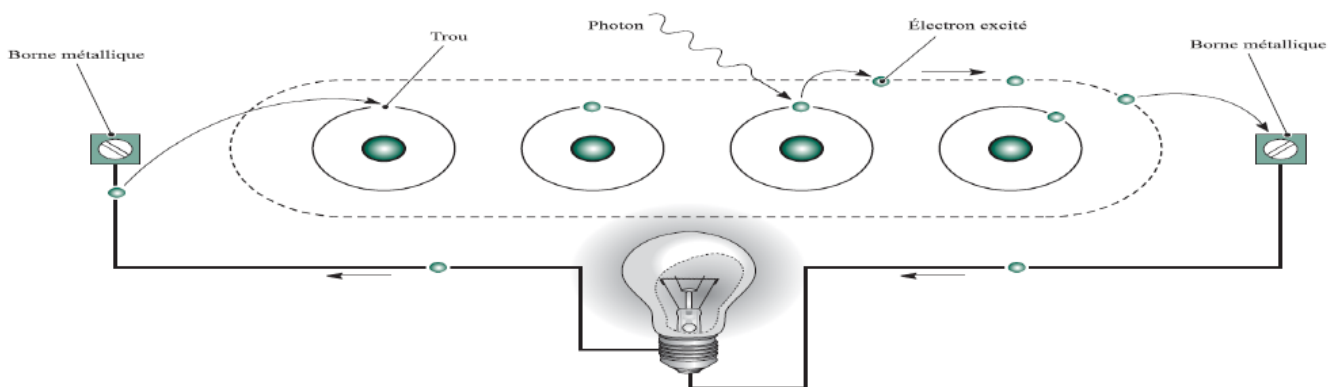
Les panneaux photovoltaïques sont composés des cellules photovoltaïques (PV) à base de silicium, et qui ont la capacité de transformer les photons en électrons.

### 3.1 Principe de fonctionnement

Lorsqu'une cellule solaire photovoltaïque est soumise au rayonnement solaire, les photons contenus dans le rayonnement absorbé apportent de l'énergie qui libère des électrons de la couche du semi-conducteur de la cellule. C'est le mouvement des électrons libérés qui produit le courant électrique. Ce processus de conversion de lumière en électricité est appelé l'effet photovoltaïque.

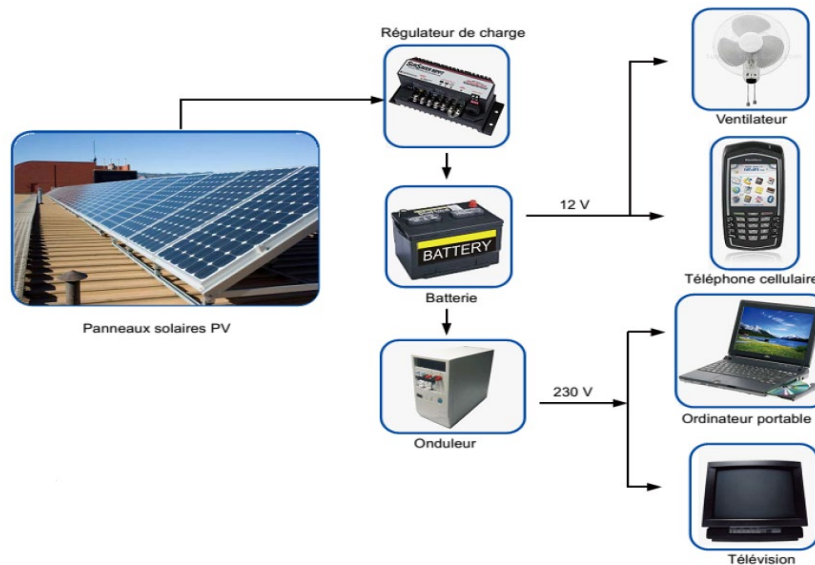
La lumière est une forme d'énergie et les électrons contenus dans le matériau semi-conducteur se mettent en mouvement lorsqu'ils reçoivent ce supplément d'énergie apporté par les photons de la lumière. Les électrons se déplacent alors librement à l'intérieur du matériau semi-conducteur. La différence de potentiel électrique ainsi créée peut être captée par des fils conducteurs d'électricité vers l'extérieur de la cellule.

Pour augmenter la puissance fournie par les cellules PV, il suffit de les assembler en série afin d'augmenter la tension (Volts) puis on connecte ces sous-ensembles, en parallèle afin d'augmenter l'intensité du courant (Ampères); on obtient ainsi un panneau solaire photovoltaïque. Ces panneaux solaires peuvent ensuite être connectés entre eux pour former des installations photovoltaïques de plus grande puissance.



Description simple de l'effet Photovoltaïque

Une installation photovoltaïque complète ne comporte pas que les panneaux solaires, elle inclut le matériel de montage, le système de stockage de l'énergie ou le dispositif de connexion au réseau de distribution électrique (onduleurs).



Représentation d’une installation PV typique.

### 3.2 Dimensionnement d’une installation PV

La méthode consiste à estimer à partir des appareils électriques et du tableau ci-après la consommation électrique annuelle du logement considéré. Il s’agit par la suite, d’une approximation de la taille d’une installation photovoltaïque. Une approximation valable fait que 1 kWc à installer peut garantir environ 1000 kWh/an et nécessite une surface de panneaux de l’ordre de 10 m<sup>2</sup>.

A titre d’exemple, la consommation d’une famille de 4 personnes est de 4000 kWh/an environ. La puissance à installer sera donc 4 kWc, pour une surface de 40 m<sup>2</sup>. Il suffit par la suite d’ajouter les équipements (Régulateur de charge, Batteries, Onduleurs et câbles) pour compléter l’installation.

**Tableau 1:** Estimations de la consommation annuelle d’un logement

Appareil	Consommation annuelle kWh/an
<b>Eclairage</b>	
Ampoule Fluocompacte	60
Ampoule incandescence	110
Halogène	600
<b>Electroménager</b>	
Réfrigérateur	300
Réfrigérateur combiné	500
Congélateur	1000
Four	210
Micro onde	220
Plaque électrique	650
Plaque induction	350
Cafetière	30
Bouilloire	70
Lave vaisselle	180
Lave linge	200
Sèche cheveux	8
Fer à repasser	150
Téléviseur LCD	250
Téléviseur cathodique	150
Plasma	500
Ordiateur fixe	120
Ordinateur portable	65
<b>Chauffage</b>	
Chauffage électrique	14000
PAC	7000
Chauffage central	170
<b>Climatisation</b>	
Climatisation	700
<b>Eau chaude sanitaire</b>	
Bain	300
Douche	250
Chaffe eau électrique	entre 400 et 5000

Ainsi on obtient le besoin annuel ( $Ba$  = Somme des consommations des appareils) ; Sachant que 10 m<sup>2</sup> de panneaux développent une puissance de 1000kWh/an ainsi : Surface des panneaux =  $Ba / 100$ .

Une manière plus simple consiste à utiliser les factures d'électricité pour estimer la consommation annuelle réelle.

### **3.3 Les avantages**

- Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable ;
- Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine ;
- Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

### **3.4 Inconvénients**

- Coût du photovoltaïque élevé car il est issu de la haute technologie ;
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance ;
- Marché très limité mais en développement ;
- Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit ;
- Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé) ;
- Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule ;
- Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production ; Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

## Chapitre 4 : L'hydrogène

### 4.1 La problématique du stockage d'énergie

En plus des problèmes d'irrégularités des ressources renouvelables, un autre paramètre apparaît comme un réel handicap pour l'utilisation de ces sources, il s'agit du stockage d'énergie.

Pour la plupart des énergies renouvelables, le stockage se fait à court terme. En effet, dans le cas du photovoltaïque, le stockage d'énergie électrique dans des batteries ne peut durer que quelques heures ; quant à l'éolien, l'excès de vent pourra être emmagasiné sous forme de volant d'inertie, l'excès de l'énergie électrique pourra aussi être utilisé pour comprimer de l'air afin de l'utiliser en cas de faible vitesse de vent.

En période de faible consommation, l'énergie produite par l'éolienne pourra être utilisée dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau par un électrolyseur qui pourra être à son tour stocké puis utilisé comme combustible dans une pile à combustible pour produire de l'électricité lorsque la demande est forte ou par manque de vent.

- ✓ L'hydrogène est donc présenté comme un très bon candidat à cette fonction pour le futur, car sa capacité de stockage de  $30000 \text{ Wh.kg}^{-1}$  est trois fois plus élevée que celle de l'essence et une utilisation bien maîtrisée ne présente que peu de risques, tout comme celle du gaz naturel.

### 4.2 L'hydrogène comme vecteur énergétique

L'hydrogène représente le bon choix comme future source d'énergie non polluante pour de nombreuses raisons. En voici quelques-unes de ces raisons :

- L'hydrogène peut être produit à l'aide de plusieurs sources. Il est tout à fait renouvelable car l'élément de départ le plus abondant et le plus propre pour produire de l'hydrogène est l'eau.
- L'hydrogène peut être stocké à l'état gazeux ou à l'état liquide. Il peut aussi être stocké dans différentes substances chimiques telles que le méthanol, l'éthanol, ou les hydrures métalliques.
- Il peut être produit à partir d'électricité ou converti en électricité avec un bon rendement.
- Il peut être transporté et stocké avec autant de sécurité que les combustibles utilisés de nos jours.

Comparé à d'autres combustibles, l'hydrogène est désormais un bon concurrent, le tableau suivant présente quelques éléments de comparaison.

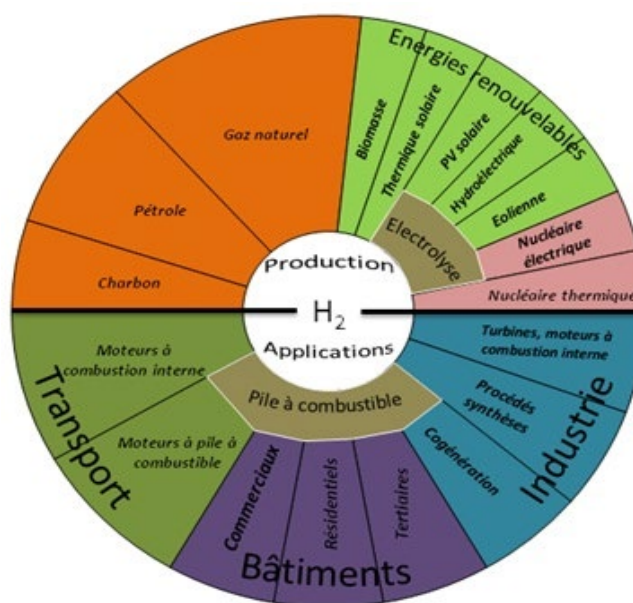
Propriétés	Hydrogène	Methane	Methanol	Ethanol	Propane	Essence
Masse Moléculaire (g/mol)	2,016	16,043	32,04	46,06	44,1	~107
Densité (kg/m <sup>3</sup> ) à 20°C	0,08375	0,6682	791	789	1,865	751
Point d'ébullition (°C)	-252,8	-161,5	64	78,5	-42,1	27-225
Point d'éclair (°C)	<-253	-188	11	13	-104	-43
Limites d'inflammabilité dans l'air (%volume)	4,0 - 75,0	5,0 - 15,0	6,7 - 36,0	3,3 - 19	2,1 - 10,1	1,0 - 7,6
CO <sub>2</sub> produit par unité d'énergie	0	1	1,5			180
Température d'auto-inflammation dans l'air (°C)	585	540	385	423	490	230 - 480
Pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg)	142	55,5	22,9	29,8	50,2	47,3
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/kg)	120	50	20,1	27	46,3	44

### 4.3 La filière technologique de l'hydrogène

La filière hydrogène ou autrement dit, la production et les applications de ce vecteur énergétique très important est composé de plusieurs variantes.

Nous pouvons constater trois domaines d'applications. En effet, dans le domaine du transport, l'hydrogène peut être utilisé dans les moteurs à combustion interne et dans les moteurs électriques alimentés par des piles à combustible. Le secteur bâtiment bénéficie aussi de l'hydrogène vu qu'il existe des piles à hydrogène adaptées aux usages bâtiments commerciaux, résidentiels ou même tertiaires.

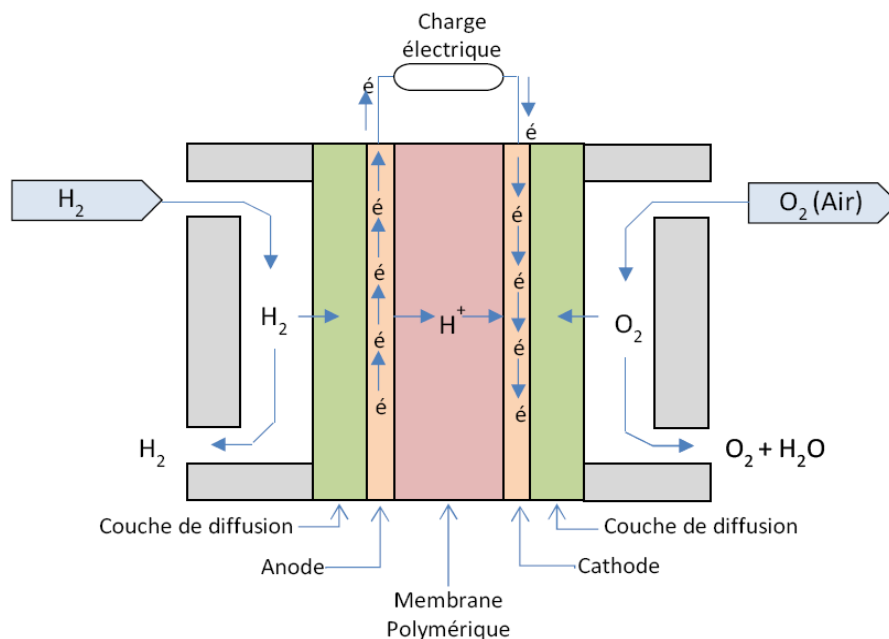
En industrie, l'hydrogène peut servir comme le vecteur énergétique de plusieurs applications telles que la cogénération par des piles à hydrogène, des turbines ou même des moteurs à combustion interne, son application dans des procédés de synthèse demeure aussi possible.



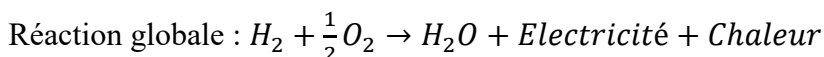
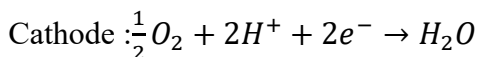
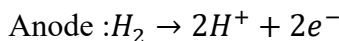
#### 4.4 La pile à combustible

Le développement de la filière hydrogène repose en grande partie sur la technologie de la pile à combustible (PAC). De la micro PAC, qui ne produit que les quelques watts nécessaires à l'alimentation d'un téléphone mobile, à la pile capable de produire 1 MW pour fournir de l'électricité à un immeuble collectif, en passant par la pile destinée aux applications embarquées, dans le secteur des transports, il existe désormais toute une gamme de PAC.

La pile à combustible à membrane polymère électrolytique (appelée aussi proton exchange membrane fuel cell PEMFC), fournit une haute densité de puissance et un poids moindre, un coût raisonnable et un faible volume.



Une pile à combustible PEMFC comprend une électrode chargée négativement (anode), une électrode chargée positivement (cathode), et un électrolyte (la membrane). L'hydrogène est introduit du côté de l'anode et l'oxygène est introduit du côté de la cathode. Les protons sont transportés de l'anode vers la cathode, à travers la membrane électrolytique et les électrons circulent par un circuit externe représenté par la charge. Une pile à combustible PEMFC typique comporte les réactions suivantes:



Ces piles travaillent à une température inférieure à  $100^\circ\text{C}$  pour un rendement de l'ordre de 50%. La faible température de fonctionnement leur confère une aptitude à démarrer relativement rapidement.

Ces piles sont développées pour alimenter en énergie des véhicules et des installations fixes de petite ou moyenne taille. La gamme de puissance des piles PEMFC se situe de quelques dizaines de watts à une dizaine de mégawatts.

### **Avantages et inconvénients**

Ces piles cumulent certains avantages:

- Temps de démarrage très rapide ;
- Temps de réponse très rapide ;
- Insensible au CO<sub>2</sub> ;
- La température de fonctionnement est faible ;
- La puissance massique est élevée, la densité de puissance peut atteindre 1kW/kg.

Elles présentent cependant certains inconvénients :

- Coût élevé de la membrane ;
- Les membranes doivent être impérativement maintenues en permanence dans un bon état d'hydratation pour favoriser le transport des protons. Dans le cas contraire ; il y a un risque de détérioration de la membrane ;
- Elles sont sensibles au monoxyde de carbone qui empoisonne les sites catalytiques.



## Chapitre 5 : La Géothermie

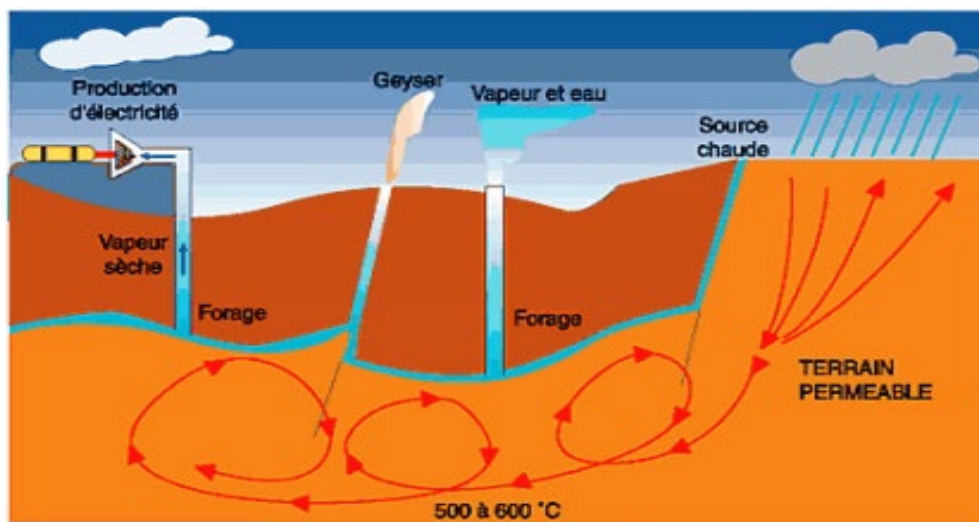
### 5.1 Introduction

L'énergie géothermique est l'énergie provenant de la chaleur accumulée dans les profondeurs de la terre. Il faut savoir que les profondeurs de la terre comportent un immense réservoir de chaleur qui permet de maintenir l'intérieur de la planète à une température élevée.

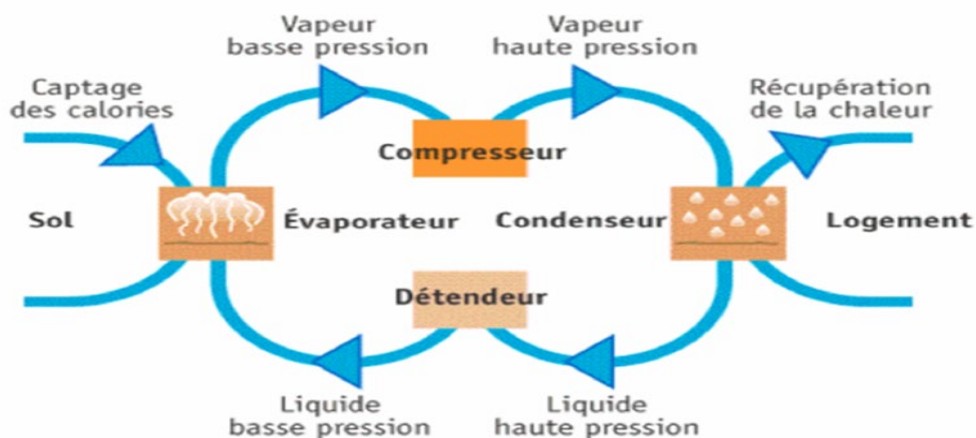
Cette chaleur produite à l'intérieur de la terre arrive à s'échapper à la surface par l'activité volcanique, les sources d'eau chaude et les geysers.

### 5.2 Le principe de la pompe à chaleur géothermale

L'énergie géothermique est réapprovisionnée en permanence par la proximité du magma sous la croûte terrestre et la radioactivité des roches. L'énergie géothermique s'obtient le plus souvent au moyen de pompes à chaleur.



Principe l'exploitation énergie géothermique



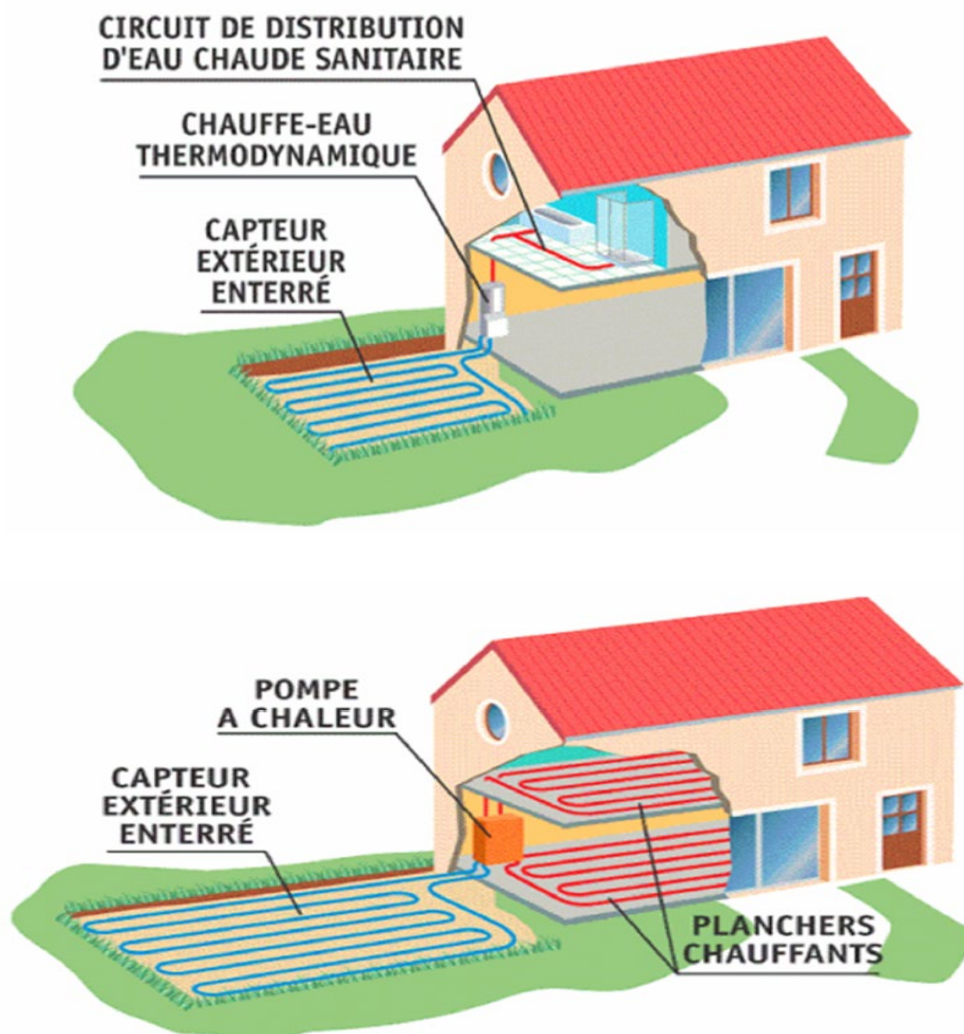
Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermique

### 5.3 Classification de la géothermie

En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

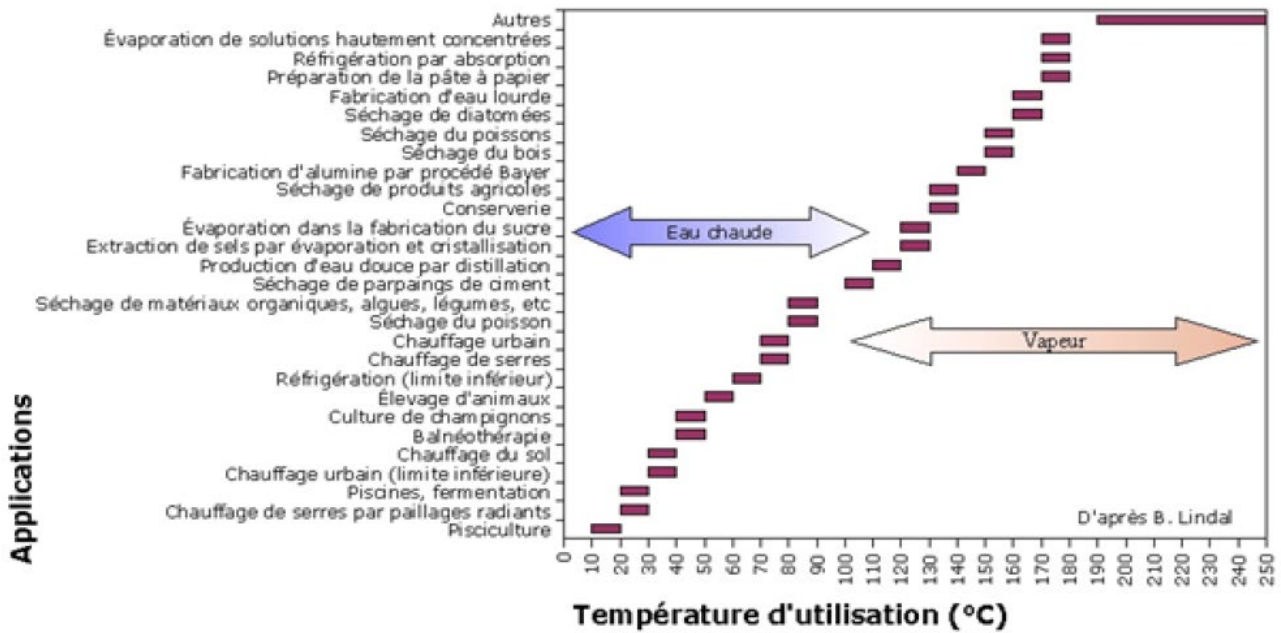
Cette source d'énergie est considérée comme inépuisable, (avec certaines limites), car elle dépend : pour la géothermie profonde, des sources de chaleur internes de la terre, dont la durée de vie se chiffre en milliards d'années ; pour la géothermie de surface, des apports solaires.

### 5.4 Exemples d'applications domestiques de la géothermie



#### Applications domestiques de la géothermie

On peut utiliser l'énergie thermique issue de la géothermie dans plusieurs applications telles que la production d'eau chaude sanitaire (figure du haut), et le plancher chauffant. La figure ci dessous récapitule les applications industrielles de la géothermie avec les niveaux de température correspondant.



### 5.5 Autres caractéristiques

La géothermie est en générale diffusée et rarement concentrée, avec un flux moyen, de  $0,1 \text{ MW/km}^2$  ( $0,1 \text{ W/m}^2$ ) et un niveau de température faible. La puissance exploitable économiquement est donc en règle générale réduite. Il arrive cependant qu'elle soit plus concentrée à proximité des failles tectoniques entre plaques terrestres, en particulier des formations volcaniques ou encore dans des formations géologiques favorables.

C'est pourquoi il faut distinguer plusieurs types d'utilisation de la géothermie suivant ses caractéristiques locales:

- la géothermie de surface à basse température: 5-10 °C,
- la géothermie profonde 50-95 °C, jusqu'à 2 000 m de profondeur,
- la géothermie très profonde à haute et très haute température, jusqu'à 10 000 m
- la géothermie volcanique de type geyser.

### 5.6 Comment produit-on de l'électricité avec la géothermie ?

La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Si la température de la nappe est comprise entre 100 et 150°C, il est également possible de produire de l'électricité, mais en utilisant la technologie du cycle binaire. Dans ce cas, un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide (isobutane, isopentane, ammoniaque) qui a la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau.

### **5.7 La disponibilité des ressources géothermiques**

Cette chaleur est variable selon les zones. A la surface du globe, le flux géothermique moyen est faible (il s'agit de l'énergie disponible pour une superficie et une période données).

Ce flux s'élève à 0,06 watt par mètre carré et par an, soit 3 500 fois moins que le flux d'énergie solaire reçu en une année par la même surface de sol ! C'est pourquoi on cherche à exploiter en priorité les ressources calorifiques de certaines zones susceptibles de fournir des quantités d'énergie importantes. Ces « réservoirs géothermiques » sont disponibles dans tous les bassins sédimentaires de la planète mais la géothermie haute énergie se situe surtout à proximité de volcans. Dans ces zones, le flux géothermique peut atteindre 1 watt/m<sup>2</sup>/an.

Les réservoirs géothermiques ont tendance à s'épuiser au fur et à mesure de leur exploitation, certains plus rapidement que d'autres. Leurs capacités de renouvellement reposent sur :

- Des sources de chaleur internes à la croûte terrestre (radioactivité essentiellement et chaleur résiduelle);
- Des apports d'énergie venus de l'extérieur du réservoir (chaleur solaire) pour les usages de très basse température au moyen de pompes à chaleur (PAC). Assurer ces conditions de réchauffement se révèle d'autant plus crucial pour les PAC géothermales que le sous-sol est également refroidi par des facteurs extérieurs : en hiver, par exemple, on y récolte moins de chaleur ;
- La circulation des eaux souterraines qui leur permet de se réchauffer au contact de sources de chaleur éloignées du réservoir, avant de réintégrer celui-ci. Ainsi, pour pouvoir exploiter un réservoir de manière durable, on doit veiller à la reconstitution progressive de ses ressources calorifiques. Cela passe par le plafonnement des quantités de chaleur prélevées et la limitation dans le temps de l'exploitation du site.

En outre, la disponibilité de l'énergie géothermique est limitée géographiquement. Le transport de la chaleur sur de longues distances génère en effet d'importantes pertes thermiques. Il en résulte une difficulté à faire correspondre lieux de production et lieux de consommation pour couvrir les besoins en énergie.

## Chapitre 6 : Energie éolienne

Les éoliennes utilisent la force du vent pour produire de l'électricité. Elles sont montées aux sommets de mâts afin de bénéficier d'un maximum de puissance. A 30 mètres du sol ou plus au-dessus du sol, elles bénéficient d'une plus grande vitesse de vent, et évitent ainsi les turbulences aérodynamiques qui se trouvent proches du sol. Les éoliennes captent l'énergie du vent par leurs pales en forme d'hélices. Le plus souvent 2 ou 3 pales sont montées sur un axe pour constituer un rotor. Il existe de manière générale deux sortes d'éolienne, à axe vertical et à axe horizontal.

### 6.1 Eolienne à axe horizontal

L'architecture de ce type d'éolienne est précisée dans la figure 1, elle est constituée des éléments suivants:

- **Le Rotor**

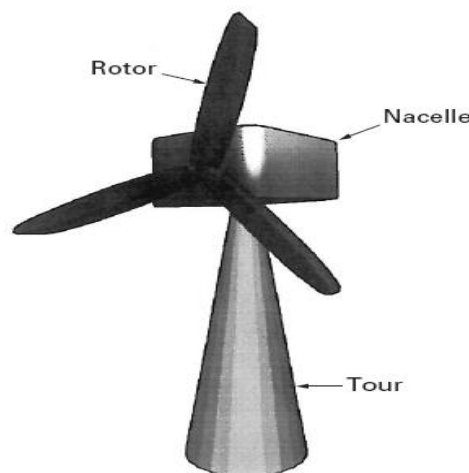
Le rotor est en fait l'élément qui capte l'énergie cinétique du vent. Celui-ci est formé de pales (en général 3 pour des raisons aérodynamiques) et de l'arbre principal solidaires au moyen d'un moyeu central. En général, l'ensemble tourne entre 10 et 60 tours par minute.

- **La Nacelle**

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Elle est solidaire de la tour au moyen d'un pivot appelé pivot d'orientation.

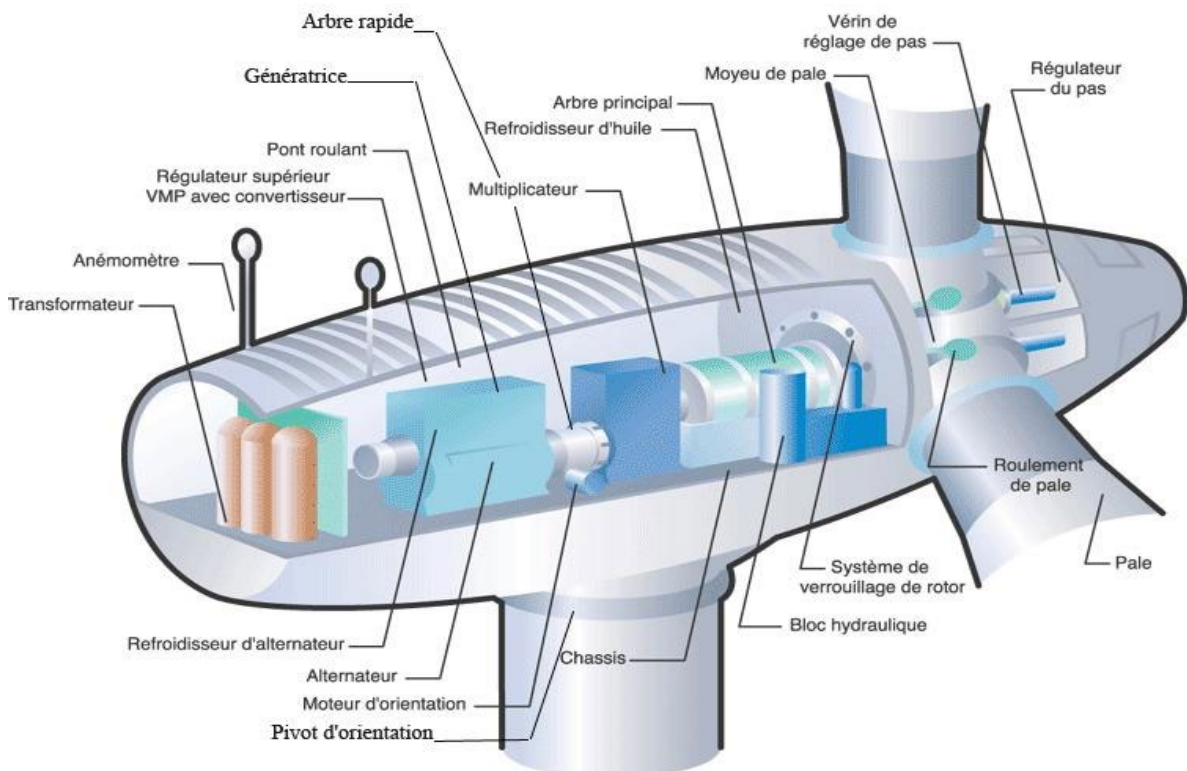
- **La Tour**

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante pour avoir un rendement maximum par rapport au vent (il faut en effet essayer de s'affranchir le plus possible du gradient de vitesse qui est très fort près du sol).



### 6.2 Principe de fonctionnement de l'éolienne

Une pale d'éolienne se comporte dans l'air comme une aile d'avion. Lorsque le vent souffle, une dépression d'air se forme le long du « dos » de la pale, de son côté « sous le vent ». Cette dépression aspire alors la pale dans sa direction, ce qui provoque la rotation de l'ensemble rotor. Ce phénomène d'aspiration se nomme « la portance ». La force de portance est en fait bien plus importante que la force dynamique du vent sur la face avant des pales, qui se nomme « la traînée ». La combinaison de la portance et de la traînée provoque la giration du rotor, entraînant à son tour la génératrice d'électricité montée sur le même axe. Une description plus complète du cœur de la nacelle est donnée dans la figure 2.



Les éléments de la figure 2 sont décrits comme suit :

- **Régulateur du pas**

Celui-ci permet à l'hélice d'avoir une fréquence de rotation stable à partir d'une certaine vitesse du vent (en général à partir de 3m/s).

- **La girouette et l'anémomètre**

Ces deux instruments sont en fait des capteurs qui permettent de connaître respectivement l'orientation du vent et sa vitesse. Ils sont placés derrière les pales. Ils prennent les mesures entre deux passages de pales et établissent une moyenne. En fonction de la vitesse et la direction du vent, le pivot d'orientation est mis en fonctionnement à l'aide d'un moteur électrique afin de présenter l'hélice face au vent pour avoir un rendement maximal.

- Système de verrouillage du rotor

Système de sécurité qui permet d'activer des freins si la vitesse du vent est supérieure à 90km/h (25m/s) et qui empêche donc le rotor de tourner.

- Le multiplicateur

Permet de transformer la rotation lente de l'arbre principal en une rotation plus rapide grâce à un système d'engrenages. La vitesse de rotation passe ainsi de 60 tours/minute à environ 1500 tours/minute.

- La génératrice

La génératrice est l'élément clé qui permet de transformer l'énergie mécanique de rotation issue de l'arbre rapide en énergie électrique. Il existe ainsi deux (02) types de générateurs :

- Les génératrices synchrones ou alternateurs

Ces génératrices tournent à une vitesse variable en fonction de la vitesse du vent. Ceci produit du courant à voltage et fréquence variable. Ce " mauvais " courant alternatif car irrégulier doit être redressé en courant continu qui doit être encore transformé en courant alternatif de voltage et de fréquence constants par un onduleur. Cette technique de vitesse variable est utilisée par les propriétaires d'éoliennes domestiques qui ne sont pas raccordées au réseau électrique pour une utilisation le plus souvent directe. Mais elle est aussi de plus en plus courante dans les parcs éoliens car les appareils de transformation de courant sont de moins en moins coûteux.

- Les génératrices asynchrones

Elles produisent grâce à un champ magnétique du courant directement utilisable, c'est à dire à fréquence constante. Ces génératrices sont utilisées sur des éoliennes reliées directement au réseau de distribution électrique.

- Dispositif de stockage de l'énergie

Il arrive souvent que les éoliennes ne soient pas reliées au réseau électrique et l'énergie produite doit être stockée. Celle-ci est le plus souvent stockée au moyen de batteries le plus souvent au plomb car peu coûteuses. Ce dispositif de batterie impose aussi un dispositif de contrôle car les batteries sont bien souvent très sensibles aux surcharges. Il faut donc un système qui puisse faire fonctionner plusieurs batteries selon qu'elles soient chargées ou non.

- **Dispositif de commande automatisée**

L'ensemble des capteurs présents dans l'éolienne (girouette, anémomètre, système derégulation des pâles...) renvoient les informations à un ordinateur se trouvant à la base de la tour qui lui permettent de commander l'ensemble des moteurs et organes de l'éolienne.

## Chapitre 7 : L'énergie Hydraulique

## 7.1 Introduction

Dans un barrage hydroélectrique on exploite l'énergie mécanique de l'eau. Cette énergie provient de la force de gravitation, c'est-à-dire que plus la chute d'eau aura une hauteur importante plus l'énergie mécanique sera importante. En effet, on peut considérer que l'eau stocke une énergie potentielle de pesanteur lorsqu'elle est dans la retenue. Lorsque les vannes sont ouvertes, l'eau s'engouffre dans une conduite, et l'énergie potentielle de pesanteur se transforme en énergie cinétique. Donc, plus l'énergie potentielle de pesanteur est importante, c'est-à-dire une forte différence d'altitude entre la retenue d'eau et la centrale, plus l'énergie cinétique de l'eau au niveau de l'alternateur sera importante, donc une plus grande quantité d'électricité sera produite.

## 7.2 Définitions

La définition de l'énergie potentielle est :

$$W = m \cdot g \cdot h$$

Avec :

W : énergie potentielle [J]

m : masse de l'eau [Kg]

g : accélération de la pesanteur [ $m/s^2$ ]

h : hauteur de la chute d'eau [m]

La définition de la puissance est :  $P = \frac{W}{t}$

Avec :

P : puissance utile de la chute d'eau [W]

t : durée en secondes [s]

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit:

$$P = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h}{t}$$

Avec :

$\rho$ : Masse volumique [ $Kg/m^3$ ]

V : Volume [ $m^3$ ]

Ce qui donnera au final :

$$P = \dot{Q} \cdot g \cdot h$$

Avec :



$\dot{Q}$  : Débit de la chute d'eau (m<sup>3</sup>/s)

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit  $Q.h$  doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies.

### **7.3 Les différents types de barrages**

#### **7.3.1 Le barrage poids**

Il utilise son propre poids pour résister à la force de l'eau retenue. De section triangulaire avec une base large très implantée dans le sol, il sollicite peu la résistance des berges. Dans certains terrains, c'est un avantage. Par contre, il utilise beaucoup de béton.

barrage de Castelnau Lassouts, en Aveyron



#### **7.3.2 Le barrage contrefort**

Le mur en voûte ou dalle plate qui retient l'eau, est doublé de contreforts qui transmettent la force de l'eau vers le sol. Il nécessite moins de béton pour sa construction, il doit reposer sur un sol résistant et n'est pas nécessairement dans les vallées étroites.

barrage de la Girotte, en Savoie



#### **7.3.3 Le barrage voûte**

Il est constitué d'une coque en béton à simple ou double courbure et dont l'extérieur est situé à l'amont.

En effet, la force de pression de l'eau est transmise aux roches des parois de la vallée grâce à la forme courbe du barrage, qui peut donc être très mince.

barrage de Tignes, en Savoie



### **7.3.4 Le barrage en matériaux meubles**

Il s'agit d'un barrage poids particulier, car il n'est pas réalisé en béton mais en enrochement de blocs de pierre ou en terre compactée, sans élément de liaison particulier. Il possède une base très large, et il comporte sur toute la hauteur un élément assurant l'étanchéité. aménagement du Vieux Pré, en Meurthe-et-Moselle



### **7.4 Les différents types de turbine**

La turbine constitue le cœur de l'installation hydroélectrique, puisque le type de turbine utilisé déterminera l'aménagement d'ensemble de l'installation. La conception hydraulique d'une turbine est déterminée par le débit de l'eau ainsi que la hauteur de chute d'un emplacement particulier. La turbine doit aussi tourner à une vitesse conforme à la vitesse d'un alternateur. La conception des turbines se divise en trois catégories.

#### **7.4.1 Les turbines Francis**

Utilisées par un fort rendement dans des chutes de 40 à 300 m. possédant des immenses réservoirs d'eau elles arrivent à développer une puissance régulière et forte qui couvre généralement les demandes d'électricité. Sa composition est une conduite en colimaçon ou bache en spirale qui met l'eau sous pression dans les directrices (aubage) qui mettent en mouvement perpétuel la roue et l'arbre de la turbine. L'eau s'échappe ensuite au-dessous de la turbine.



#### **7.4.2 Les turbines Kaplan**

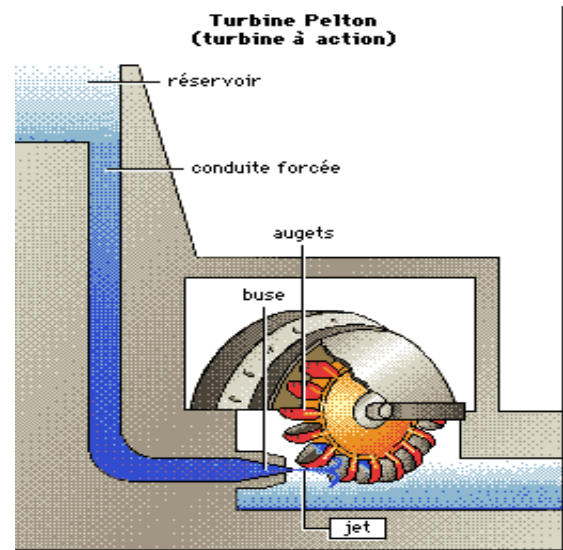
Les turbines à hélice ou à pas variable (Kaplan). Elles prennent profit des petites chutes de 15 à 30 m. Elles se trouvent au fil de l'eau et n'ont pas de réservoir. La Kaplan a la caractéristique de pouvoir être réglable lors de son fonctionnement. La roue à une forme d'hélice et on peut développer plusieurs variants pour réguler la puissance fournie et l'extraire ainsi des groupes "Bulbes" dont la technique a été développée pour l'usine marémotrice de la Rance, où l'alternateur est collé à la turbine et étanche ce qui donne un niveau d'indépendance à la turbine tel qu'elle



est capable d'être totalement immergé sous l'eau.

### 7.4.3 Les turbines Pelton

Ce sont des turbines utilisées lors des hautes chutes et petits débits. Le débit des injecteurs est réglé avec le pointeau mobile de l'injecteur (comme une vanne), ensuite l'eau sort de manière cylindrique et uniforme. Elle vient immédiatement percuter des cuillères métalliques rattachées à la roue, ce sont les augets. L'eau ensuite glissera sur les côtés de la turbine.



### 7.5 Les avantages de la production d'électricité hydraulique

Même si la puissance produite par ces usines est inférieure à celle produite par l'énergie nucléaire, l'électricité hydraulique joue un rôle de régulateur du réseau électrique, indispensable pour répondre aux brusques variations de la demande globale, en cas de vague de froid par exemple.

Elle est donc un élément essentiel à la sûreté, à la souplesse et à l'économie globale du parc énergétique.

Il est certes impossible de stocker l'électricité, mais les masses considérables d'eau retenues derrière les barrages constituent une énorme réserve d'énergie facilement utilisable.

Enfin, même si les précipitations varient d'un mois et d'une année sur l'autre, l'énergie hydraulique est facilement et rapidement mobilisable : il suffit par exemple de 2 minutes à l'usine de Grand'Maison dans les Alpes pour fournir une puissance de 1 800 MW.

Type d'énergie	Gamme de puissance	Investissement moyen/kW (durée annuelle d'utilisation)	Durée de vie	Coût moyen du kWh	Marché mondial
<b>Hydraulique</b>	1 kW à 12 600 MW	1000-3000 €/kW (5000 heures/an)	50 ans	0,03 €/kWh	38 milliards d'euros
<b>Nucléaire</b>	600 MW à 5000 MW	1200-2300 €/kW (6000 heures/an)	30 ans	0,04 à 0,1 €/kWh	5,5 milliards d'euros

On peut comparer facilement le nucléaire et l'hydraulique, car les centrales produisant ces énergies disposent d'une durée de vie très importante, environ 30 ans pour le nucléaire et 50 ans pour l'hydroélectricité.

Les barrages hydroélectriques ont un éventail de puissance assez large, de quelques dizaines de kW à plusieurs milliers de MW tandis que les centrales nucléaires sont composées de plusieurs réacteurs (généralement de 2 à 4) qui produisent 900 MW.

Par contre, elles sont très différentes en ce qui concerne l'entretien : une installation hydroélectrique demande un grand investissement et ne sera rentable que sur du long terme mais ne coûte pas très cher en matière première et en entretien alors que le nucléaire n'est pas trop cher à la construction mais demande un entretien et un coup d'achat des matières premières très coûteux.

En Europe, le potentiel estimé, en prenant en compte les contraintes environnementales et économiques, correspond à une production électrique de 24 TWh (étude de ESHA – European Small Hydraulic Association).

La capacité installée est aujourd'hui d'environ 10 300 MW, dont 2 100 MW pour la France et 2 300 MW pour l'Italie, les deux premiers Pays en terme de puissance installée.

En France, région Midi-Pyrénées possède le plus grand nombre de centrales hydrauliques de petites puissances (près de 400 - 500 MW de puissance installée), grâce aux réservoirs d'eau que constituent la chaîne des Pyrénées et le Massif Central.

## **7.6 Impacts environnementaux**

L'hydroélectricité est considérée comme une énergie propre et inépuisable, contrairement au pétrole ou au gaz naturel.

L'utilisation d'énergie de source hydraulique plutôt que provenant de sources non renouvelables est globalement positive pour l'environnement. Cependant les impacts environnementaux peuvent être très importants, surtout lors de la mise en place de structures souvent lourdes permettant la récupération d'énergie hydraulique.

La construction du barrage nécessite du béton et des gravas, ce qui conduit à une dépense énergétique initiale colossale et ce qui est fortement émetteur de gaz carbonique. En effet pour obtenir du béton, il faut chauffer du calcaire à 1450°C pour le décarboniser. Outre la décarbonisation du calcaire, cette importante chaleur est obtenue en brûlant du combustible fossile, qui peut être du fioul, du gaz, des pneus... L'ensemble du processus est fortement émetteur de gaz carbonique. Cependant il faut bien reconnaître que c'est moins pire que de construire une centrale thermique qui brûlera pendant des décennies des millions de tonnes de charbon, de fioul ou de gaz.

Ces impacts varient avec le type et la taille de la structure mise en place : ils sont faibles s'il s'agit d'exploiter les chutes d'eau naturelles, les courants marins, les vagues, mais ils deviennent très importants

s'il s'agit de créer des barrages et des retenues d'eau artificielles. Il faut remarquer que dans les projets de barrages, la production d'hydroélectricité est, la plupart du temps, secondaire par rapport à d'autres aspects tels que la maîtrise du flux d'un cours d'eau (évitement des inondations), l'alimentation en eau de canaux, la constitution de stocks d'eau.

Quelle que soit la taille de l'installation, il faut néanmoins faire de sérieuses études d'incidence sur l'environnement avant de construire une installation hydraulique et adopter des mesures compensatoires telles que des échelles à poissons. Par le passé, les barrages construits ont conduit au dépeuplement des rivières en espèces migratrices (anguilles, saumons,...). À ce point de vue, la situation des rivières européennes tend à s'améliorer lentement.

Le bilan en gaz à effet de serre des systèmes hydroélectriques est nettement positif. Il faut néanmoins tenir compte qu'il faut plusieurs années avant que le CO<sub>2</sub> dépensé lors de sa construction soit compensé par l'électricité produite.

- Remise en cause récente des impacts environnementaux :

Certaines recherches récentes émettent de très sérieux doutes sur le bilan en gaz à effet de serre des systèmes hydroélectriques. L'activité bactériologique dans l'eau des barrages (surtout en régions tropicales) relâcherait d'énormes quantités de méthane (gaz ayant un effet de serre 20 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub>).