

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel**



**Département D'Electrotechnique**

**Master 1**

**Machines Electriques**

**Support de cours**

**Energies Renouvelables**

**Dr. Hocine BOUCHEKHOU**

2020

# **Avant Propos**

L'homme à besoin continuellement de l'énergie pour vivre. Le pétrole est particulièrement utilisé pour le déplacement de l'être humain (transports), le gaz naturel pour son chauffage, et le charbon pour produire de l'électricité ou bien de la chaleur. Mais le gaz naturel entraîne des risques d'explosion ainsi que l'extraction et la consommation de pétrole et de charbon sont écologiquement polluantes. Ces énergies fossiles ont l'inconvénient commun d'être présentes en quantité limitée sur terre et ne sont pas renouvelables. Ce ne sont donc pas des énergies sur lesquelles nous pourrions compter indéfiniment.

Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois. Ces énergies sont fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux. Selon leurs avantages, il est fortement conseillé de s'orienter vers ces énergies inépuisables.

Ce support de cours s'adresse aux étudiants du première année Master Machines Electriques, Module Energies renouvelables de l'Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel. Le but principal de ce cours est de permettre aux étudiants de faire acquérir les connaissances relatives aux divers types des énergies renouvelables et leurs gisements, stockages, et développements dans le monde.

**Dr. H. BOUCHEKHOU**

Module **Energies Renouvelables**  
Filière **Machines Electriques**  
Département **d'Electrotechnique**  
Faculté **des Sciences et de la Technologie**  
Université **de Jijel**

---

# Sommaire

## Sommaire

### Chapitre I : Introduction aux énergies renouvelables

I-1 Introduction.....	01
I.2 Histoire des énergies renouvelables.....	01
I.3 Gisement d'énergie.....	02
a. Le gisement solaire.....	02
b. Le gisement éolien.....	02
c. Le gisement hydraulique.....	03
d. Le gisement géothermique.....	03
I-4 matériaux.....	04

### Chapitre II : Energie solaire

II.1 Introduction.....	06
II.2 L'énergie Solaire photovoltaïque.....	06
II.2.1 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques .....	07
a. Les modules photovoltaïques au silicium.....	07
a.1 Les panneaux PV avec des cellules monocristallines.....	08
a.2 Les panneaux PV avec des cellules poly-cristallines.....	08
a.3 Les modules photovoltaïques amorphes.....	09
b. Les modules photovoltaïques composites et organiques.....	09
c. Les modules PV double face.....	10
II.2.2 Intérêts d'assemblage d'un module photovoltaïque .....	11
II.2.3 Rendement d'un module PV.....	11
a. Le cout d'une installation PV .....	12
b. Prix moyen par $W_c$ installé .....	12
c. Marché des modules PV .....	12
II.2.4 Principe de fonctionnement de la cellule PV.....	13
II.2.5 Les panneaux ou modules solaires PV intégrés au bâti.....	15
II.2.6 L'énergie photovoltaïque en Algérie.....	16
II.3 L'énergie solaire thermique.....	17
II.3.1 Principe.....	17
II.3.2 Les applications de l'énergie solaire thermique.....	18

II.3.2.1 La technologie solaire passive.....	18
II.3.2.2 La technologie solaire active.....	19
II.3.2.3 La technologie solaire concentrée ou « thermodynamique ».....	19
II.3.2.4 Les types de capteurs solaires thermiques.....	20
a. Capteur plan.....	20
b. Capteur sous vide.....	21
II.4 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	21

### **Chapitre III : Energie éolienne**

III.1 Introduction.....	23
III.2 Principe d'une éolienne.....	23
III.3 Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne.....	24
III.3.1 Fonctionnement technique ou scientifique.....	24
III.3.2 Enjeux par rapport à l'énergie.....	25
III.4 Avantages et inconvénients.....	25
III.5 Centrales éoliennes en Algérie.....	26

### **Chapitre IV : Autres sources renouvelables**

IV.1 Energie Hydraulique.....	28
IV.1.1 Principe d'une centrale hydraulique.....	28
IV.1.2 Les différents types d'ouvrages hydrauliques.....	29
IV.1.2.1 Les bassins versants et le stockage naturel de l'eau.....	29
IV.1.2.2 Les différents types d'aménagements hydrauliques.....	29
a. Les aménagements avec retenue.....	30
b. Les aménagements "au fil de l'eau".....	30
c. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP).....	31
IV.1.3 Les différents types de turbines.....	32
IV.1.4 Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique .....	34
IV.1.5 Energie hydraulique en Algérie.....	35
IV.2 Energie Géothermique.....	36
IV.2.1 Types de géothermie.....	37
IV.2.2 Principes.....	37
IV.2.3 Centrale Géothermique .....	38
IV.2.4 Principe de fonctionnement et usages de la géothermie.....	38

IV.2.4.1 Géothermie très basse énergie.....	38
IV.2.4.2 Géothermie basse et moyenne énergie.....	40
IV.2.4.3 Géothermie haute énergie (production d'électricité).....	40
IV.2.5 Production de l'électricité dans le monde (énergie géothermique).....	41
IV.2.6 Avantages de l'énergie géothermique.....	41

### Chapitre V : Stockage d'énergie

V.1 Stockage mécanique.....	43
V.2 Stockage thermique.....	43
V.3 Stockage électromagnétique.....	44
V.4 Stockage électrochimique.....	44
V.4.1 Piles à combustibles.....	44
V.4.1.1 Les différents types de piles à combustible.....	45
a. Les piles à combustible avec électrolyte acide.....	46
a.1 La pile à hydrogène « PEM » (Proton Exchange Membrane).....	46
a.2 La pile à méthanol « DMFC » (Direct Methanol Fuel Cell).....	46
a.3 La pile à acide phosphorique « PAFC » (Phosphoric Acid Fuel Cell).....	47
b. Les piles à combustible avec électrolyte basique.....	47
b.1 La pile à oxyde solide « SOFC » (Solid Oxyde Fuel Cell).....	47
b.2 La pile à potasse liquide « AFC » (Alkaline Fuel Cell).....	47
b.3 La pile à carbonates fondus « MCFC » (Molten Carbonate Fuel Cell)...	47
V.4.1.2 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible.....	48
V.4.2 Batteries.....	49
V.4.3 Supercondensateurs.....	49

### **Références**

## Chapitre I

# Introduction aux énergies renouvelables

---

## Chapitre I : Introduction aux énergies renouvelables

### I.1 Introduction

Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Le pétrole représente 32,8% de la consommation totale dans le monde, suivi du charbon (27,2%), puis du gaz naturel (20,9%) et enfin du nucléaire (5,8%). Il est clair qu'actuellement cette consommation est satisfaite principalement par les ressources d'énergies fossiles. Ces dernières sont considérées parmi des principales causes de l'effet de serre. Leur combustion engendre des problèmes écologiques insurmontables et de plus en plus graves [1].

#### *Comment l'approvisionnement futur en énergie peut être assuré ?*

La première étape est d'augmenter considérablement l'efficacité de la consommation d'énergie. La seconde est de développer les sources d'énergie renouvelable. En effet, avec la population mondiale qui croît et la demande insatisfaite des pays en développement, la seule option pour couvrir la demande d'énergie globale d'une manière climatiquement durable, est une efficacité énergétique. Les énergies renouvelables seront la clé de ce développement. Comme leur nom l'indique, il s'agit de source qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain.

Les sources renouvelables sont l'énergie **solaire**, **éolienne**, **hydraulique**, **géothermique**, **marine** et la **biomasse**.

### I.2 Histoire des énergies renouvelables

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Depuis des millénaires, l'homme a utilisé la chaleur du soleil, a brûlé du bois ou des déchets, a utilisé la chaleur de la terre dans les régions volcaniques, a fait tourner des moulins à vent ou à eau, a exploité la force des marées.

Aujourd'hui on sait utiliser la chaleur du soleil pour créer de l'électricité, on utilise la force de l'eau pour faire tourner les turbines des centrales hydro-électriques qui produisent de l'électricité. De plus 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.

### I.3 Gisement d'énergie

#### a. Le 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 pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise [2] :

- Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données ;
- Selon le nombre d'années de mesures disponibles.
- Selon le pas de temps des données (mois, jour, heure)
- Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol etc....

#### b. Le gisement éolien [3]

Le rayonnement du soleil et la rotation de la terre (hémisphère irradié, hémisphère dans l'obscurité) sont à l'origine d'écarts de pression atmosphérique qui s'établissent à proximité de la surface ou en basse altitude. Les masses d'air s'écoulent alors, avec une vitesse plus ou moins élevée, des régions ou zones de forte pression vers les zones de plus faible pression. Ces masses d'air emportent avec elles une énergie cinétique qui peut être considérable, proportionnelle à la masse volumique de l'air, aux volumes échangés et au carré de la vitesse du vent. La vitesse du vent, sa direction, ses fluctuations, son aléa, etc. au cours d'une période (par exemple, un jour, un mois, une année) sont des informations essentielles qui caractérisent le gisement éolien.

Le gisement éolien est globalement bien réparti à la surface des différents continents et des océans. On estime que son exploitation maximum par des turbines relevant de la technologie actuelle permettrait la production d'électricité d'un minimum de 100 000 TWh/an au plan mondial, de quoi couvrir, en théorie, plusieurs fois la consommation annuelle d'électricité, sous réserve que la production d'électricité éolienne soit au fil des heures synchronisée avec la demande d'électricité, aux capacités d'interconnexion des réseaux et de stockage d'énergie près.

Des laboratoires internationaux s'attachent à modéliser le vent à faible altitude (80m, par exemple) au-dessus de grandes régions.

Il apparaît que le vent est, en moyenne sur l'année, modéré dans la région du Pôle Nord et dans les régions intertropicales. Il est plus fort autour des régions comprises entre 50° et 60° de latitude. En mer, le vent est plus fort (par exemple : Atlantique Nord, zone des 40<sup>ème</sup> rugissants dans l'hémisphère Sud) et régulier (les Alizés).

Il faut cependant distinguer le gisement brut du gisement électrique qui dépend fortement des caractéristiques des éoliennes.

### c. Le gisement hydraulique [4]

L'énergie des eaux de ruissellement qui s'écoulent dans les cours d'eau du Monde est évaluée à environ 40 000 TWh par an (1 TWh/a correspond à une puissance moyenne d'environ 114 MW). Un gros tiers de cette énergie, soit environ 14 000 TWh est exploitable avec les techniques qui sont actuellement disponibles, mais ce pourcentage n'est plus que d'à peu près 20 % (8 500 TWh) si on considère seulement les investissements qui sont rentables dans les conditions économiques du début du XXI<sup>e</sup> siècle, au regard des autres énergies.

En ce début de siècle, 2 900 TWh d'énergie hydroélectrique sont produits par an, ce qui représente quelques 16 % de la production totale d'électricité dans le Monde. Il demeure donc pour l'avenir de notre planète un gisement annuel de l'ordre de 5600 TWh qui peut être aménagé dans de bonnes conditions économiques, beaucoup plus en fait si l'on se projette dans un futur où les tensions sur les ressources d'énergie primaire seront plus grandes, où les prix des combustibles fossiles seront plus élevés, où il faudra limiter encore plus les rejets de CO<sub>2</sub>. L'essentiel de ce potentiel encore exploitable se situe en Afrique, en Asie, et dans une moindre mesure en Amérique Latine.

### d. Le gisement géothermique

Il existe trois formes de ressources géothermiques pour produire de l'électricité.

#### Par réservoir de vapeur

Lorsque l'eau de gisement est partiellement vaporisée, elle est récupérée sous la forme de vapeur sèche directement utilisable pour faire tourner les turbines des centrales géothermiques. Mais ces gisements de vapeur sont relativement rares.

Les plus connus sont : *Lardarello (Italie)*, *Geysers (Californie)* et *Matsukawa (Japon)*.

### Par réservoir d'eau chaude

Pendant sa remontée vers la surface, l'eau chaude subit une baisse de pression. Elle se transforme alors en vapeur, de sorte qu'en tête de puits, sort un mélange eau-vapeur dont on peut utiliser la phase gazeuse pour alimenter des turbines.

### Par roches fracturées


Elle consiste à récupérer la chaleur de roches chaudes en profondeur dans des sous-sols composés de roches naturellement fracturées, grâce à de l'injection d'eau :

- De l'eau froide est injectée à environ 5 000 m de profondeur par un puits.
- L'eau circule dans les fractures et se réchauffe au contact de la roche chaude à plus de 200 °C.
- L'eau est pompée par la centrale pour remonter à la surface par un deuxième puits.
- En surface, par l'intermédiaire d'un échangeur thermique, l'eau chaude du circuit primaire se transforme en vapeur dans le circuit secondaire.
- La vapeur entraîne une turbine et un alternateur qui produit de l'électricité.
- L'eau est ensuite renvoyée dans les roches.

Cette technique est en cours de développement à *Soultz-sous-Forêts* en France.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

## I.4 Matériau [5]

 Dans le secteur de l'éolien : les ingénieurs se sont rapidement tournés vers les matériaux composites. Des mélanges de résine époxy ou de polyester, et de fibre de verre pour constituer des pales qui doivent être aussi légères que résistantes aux contraintes comme à la corrosion. Les développeurs ont ajouté ainsi au mélange quelques fibres de carbone. Les pales obtenus, de plus en plus légères et à l'aérodynamisme optimisé, capables de fait de produire plus d'électricité par unité de volume.

L'ennui est que ces matériaux composites sont difficilement recyclables. La solution : recourir à une résine thermoplastique qui devrait aider à recycler le matériau composite par dépolymérisation, tout en permettant d'économiser de l'énergie dans la phase de production des pales d'éolienne.

- ✚ Dans le secteur marin : Les matériaux composites apparaissent également essentiels au développement de systèmes exploitant les énergies marines renouvelables. Par leur faible poids également et par leur besoin en maintenance quasi inexistant. Mais aussi pour leur capacité à résister à la corrosion. La résine époxy, en effet, se montre très peu perméable à l'eau et permet de protéger les structures. On trouve ainsi, entre autres, des tuyères, ces éléments qui permettent aux hydroliennes de capter plus de puissance, réalisées en fibre de verre et résine époxy.
- ✚ Du côté des piles à combustible : les matériaux composites représentent un moyen renouvelable de produire de l'électricité, de nombreuses pièces et composants pourraient aussi profiter des qualités des matériaux composites. Les mélanges d'ester vinylique et de fibres de carbones, par exemple, sont en effet conducteurs, résistants à la corrosion, dimensionnellement stables et inflammables. Et d'un point de vue pratique, les réservoirs à hydrogène des voitures du futur gagneraient à être faits de composites. De quoi économiser en temps de production.
- ✚ Dans le domaine de l'énergie solaire : les matériaux composites semblent à même d'apporter un plus grâce à la possibilité de réaliser des pièces robustes et légères, à longue durée de vie et résistantes aux intempéries... et au soleil ! Les composites therm durcissables peuvent ainsi remplacer les structures en aluminium ou les tuiles de toit classiques en terre cuite. Des travaux ont aussi montré qu'un mince film composite à base de deux oxydes inorganiques de bismuth et de manganèse, par exemple, optimise la capacité d'une cellule photovoltaïque à absorber les rayons solaires sur un spectre plus large.

## Chapitre II

# Energie solaire

## Chapitre II : Energie solaire

### II.1 Introduction

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord extrême de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions de KM), c'est ce que l'on appelle la constante solaire (égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ ) [07].

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air.

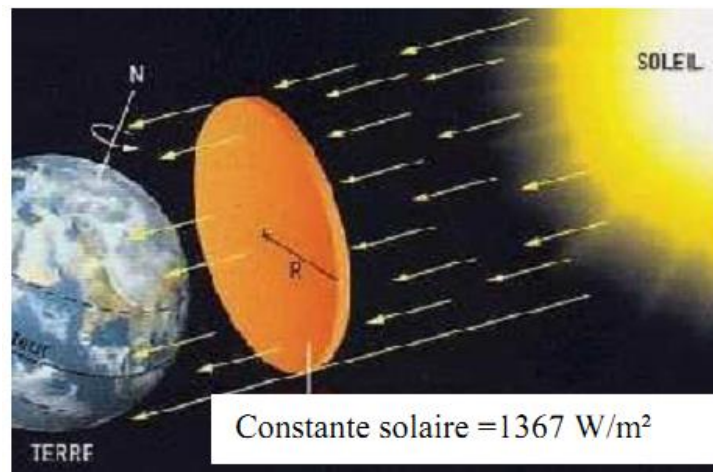


Figure II.1 : Système énergétique solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : la quantité d'énergie libérée par le soleil (capté par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an [06].

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est **l'énergie solaire photovoltaïque**.

### II.2 L'énergie Solaire photovoltaïque

Elle désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque (Fig.II.2). Le terme

photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique-l'effet photovoltaïque- ou la technologie associée.



Cellule

Panneau

Champ photovoltaïque

Figure II.2 : Eléments de base du système photovoltaïque.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

### II.2.1 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium) [08].

#### a. Les modules photovoltaïques au silicium

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des « impuretés ».

C'est une technique appelée le « dopage » qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartz (dioxyde de silicium).

**Le quartz** : est la forme cristalline la plus répandue de la silice  $\text{SiO}_2$  et se présente dans de nombreuses roches cristallines acides mais aussi dans des roches métamorphiques ou sédimentaires.

La silice est légèrement soluble dans l'eau et donne de l'acide silicique, de sorte que les terrains riches en silice sont toujours acides et peu fertiles.

Le sable quartzueux est chauffé dans un four électrique à une température de  $1700^\circ\text{C}$ . Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (Wafers) [08].

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

Les cellules monocristallines et poly-cristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module.

#### a.1 Les panneaux PV avec des cellules monocristallines :

Sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Les cellules sont rondes ou carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme (Fig.II.3). Elles ont un rendement de 12 à 18 %, mais la méthode de production est laborieuse.



Figure II.3 : Panneaux PV avec des cellules monocristallines

#### a.2 Les panneaux PV avec des cellules poly-cristallines :

Sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).



Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.



Figure II.4 : Panneaux PV avec des cellules poly-cristallines

### a.3 Les modules photovoltaïques amorphes :

Ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que de 6 à 8% actuellement. Le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.



Figure II.5 : Cellule photovoltaïque amorphe

Les cellules PV au silicium cristallin (mono ou multi) représentent la majorité de la production mondiale (29 et 51% de la production mondiale).

### b. Les modules photovoltaïques composites et organiques

Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques autre que la technologie « silicium » existe mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche.



Figure II.6 : Modules photovoltaïque composites et organiques.

Le tableau suivant montre une comparaison entre les différentes technologies de cellules photovoltaïques [09]:

Matériau	Rendement	Longévité	Principales utilisations
Silicium Monocristallin	12 à 18%	20 à 30 ans	Aérospatiale, module pour toits, Façades.....
Silicium Poly-cristallin	11 à 15%	20 à 30 ans	Module pour toits, Façades Générateurs...
Amorphe	5 à 8%		Appareils électroniques (montres, calculatrices...), Intégration dans le bâtiment
Composite Monocristallin	18 à 20%		Système de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite Poly-cristallin	8%		Appareils électroniques (montres, calculatrices...), Intégration dans le bâtiment

Tableau II. 1 : Comparatif des différentes technologies de cellules photovoltaïques

### c. Les modules PV double face

Certain fabricants proposent des panneaux solaire comportant des cellules solaires sur les deux faces, sur la face avant exposée au soleil et sur la face arrière du panneau. Les cellules sont généralement montées sur une vitre, encapsulées dans un cadre aluminium. Ces panneaux sont adaptés aux sites ayant des albédos important des lacs, mers, les déserts, les surfaces enneigées.

La puissance du module double face est le double de la puissance du module simple face mais l'énergie moyenne annuelle produite par le module double face n'est supérieure que de 10% à celle produite par le même module simple face (le coût d'investissement par contre a presque doublé !!) [09].

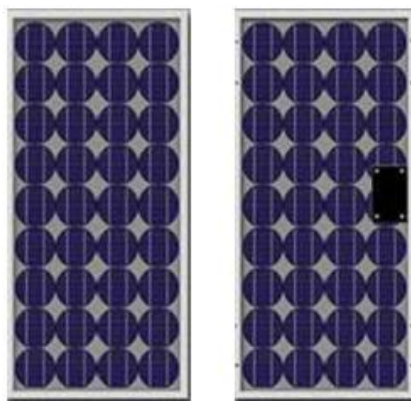


Figure II.7 : Module photovoltaïque double face.

### II.2.2 Intérêts d'assemblage d'un module photovoltaïque [10]

Les cellules photovoltaïques sont assemblées en série (string) afin de composer le module photovoltaïque. Le but de cette association est triple :

- Obtenir une tension suffisante grâce à la connexion en série de nombreuses cellules,
- Protéger les cellules et leurs contacts métalliques contre les conditions ambiantes (humidité surtout),
- Protéger mécaniquement les cellules, qui sont très fragiles.

Les matériaux utilisés pour l'encapsulation doivent avoir une durée de vie élevée afin de :

- Résister aux variations de température et à l'exposition aux rayons UV.
- Résister aux efforts mécaniques (transport, montage, efforts éoliens) et aux averses de grêle.
- Se fixer facilement et de façon durable sur la toiture.

### II.2.3 Rendement d'un module PV

Souvent, les vendeurs de matériel photovoltaïque parlent de la puissance crête d'un module mais rarement de son rendement. Or, ce paramètre est évidemment important pour juger de sa qualité.

Heureusement, les 2 éléments sont intimement liés. La puissance crête d'un module correspond à la puissance électrique de celui-ci dans des conditions standards ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $AM 1,5$ ).

En connaissant la surface d'un module et sa puissance crête, il est donc aisé de calculer le rendement. Il suffit en fait de calculer la puissance crête par mètre carré et de la comparer à l'ensoleillement des conditions standards :  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Le rendement d'un module est donc égal à sa puissance crête par  $\text{m}^2$  (en  $\text{W/m}^2$ ) divisé par  $1000 \text{ W/m}^2$ .

#### Exemple:

Un panneau de  $200 \text{ W}_c$  a une superficie de  $1,6 \text{ m}^2$ . Sa puissance crête par  $\text{m}^2$  est donc de  $200/1,6$  soit  $125 \text{ W}_c/\text{m}^2$ .

Le rendement de ce panneau est donc de :  $125/1000 = 12,5 \%$

#### Remarque :

L'unité  $\text{W}_c$  correspond au Watt crête qui est l'unité définissant la puissance nominale d'un panneau solaire dans des conditions de test bien définies.

- AM = Air Mass ; cette indication chiffre l'épaisseur de l'atmosphère. Au niveau de l'Equateur, l'atmosphère a une épaisseur  $AM=1$ , en Europe environ 1,5.

### Les normes de référence

Les normes de références pour les modules sont les suivantes :

- **IEC 61215 ou NBN 61215** pour les modules de première génération : « Modules photovoltaïques (PV) au silicium cristallin pour application terrestre ».
- **IEC 61646 ou NBN 61646** pour les modules de seconde génération (couches minces) : « Modules photovoltaïques (PV) en couches minces pour application terrestre ».

Ces normes garantissent l'exactitude des informations techniques reprises sur les fiches des fabricants. Elles garantissent également la réussite d'une série de tests : variations de température, exposition aux rayons UV, résistance aux efforts mécaniques (transport, montage, efforts éoliens, grêle).

#### a. Le coût d'une installation PV :

Le coût d'une installation provient principalement du prix d'achat des modules photovoltaïques. Cependant, les prix peuvent varier fortement en fonction du mode d'intégration architecturale choisi, du choix de la structure (fixe ou mobile), du raccordement au réseau ou non, de la taille de l'installation.

#### b. Prix moyen par $W_c$ installé :

De façon générale, on retiendra que le coût total d'un système photovoltaïque raccordé au réseau (HTVA, installation comprise) se situe entre 1,3 € et 2,5 € par Watt crête ( $W_c$ ) installé selon la taille de l'installation, le type de toit (plat, incliné) et le type de pose choisi.

Cela correspond donc à un prix :

- Environ 10 000 € pour un système de 5  $kW_c$  (environ 4250 kWh par an),
- Environ 18 000 € pour un système de 10  $kW_c$  (environ 8500 kWh par an),
- Environ 150 000 € pour un système de 100  $kW_c$  (environ 85 000 kWh par an).

#### c. Marché des modules PV :

Les principaux pays fabriquant des modules photovoltaïques (*Japon, Allemagne, Etats-Unis, Espagne*) ont veillé à développer chez eux des systèmes photovoltaïques reliés au réseau, qui leur servent ainsi de démonstration et de vitrine à l'exportation.

Le rendement énergétique des cellules photovoltaïques est de 10 à 15% en pratique, et presque de 30% en labo.

En 2005, l'électricité d'origine photovoltaïque ne représentait que 0,02% de la production mondiale d'électricité [11].

#### II.2.4 Principe de fonctionnement de la cellule PV

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type « N » et dopée de type « P ». Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formée.

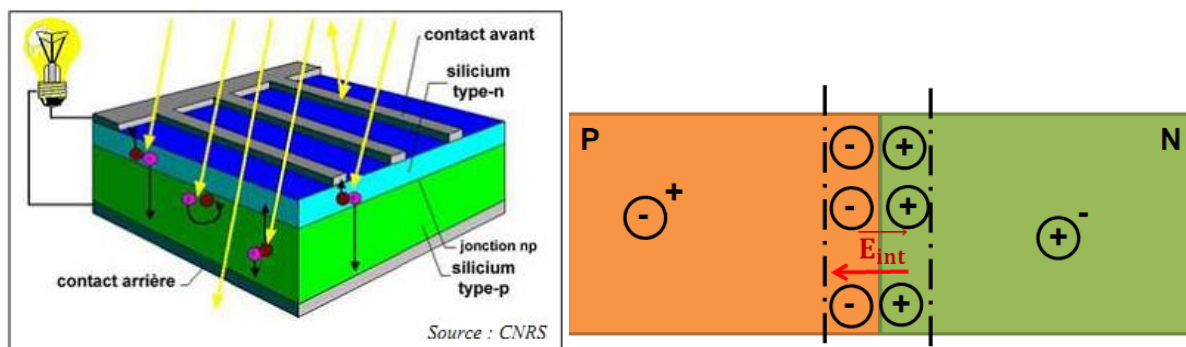


Figure II.8 : Constitution d'une cellule photovoltaïque

Semi conducteur : est un élément qui présente une conductivité électrique intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants (comme le Silicium, Germanium...).

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau semi-conducteur pur : le matériau est parfaitement régulier et ne contient aucune impureté.

Le dopage d'un cristal intrinsèque consiste à substituer des atomes de semi conducteurs du réseau par des atomes étrangers- deux cas peuvent se présenter :

**Des semi conducteurs de type « P »** (dopé « P »)

- Introduction d'atomes trivalents (3 électrons sur la dernière couche c.à.d. dans la bande de valence)
- Il manque un électron à l'atome pour qu'il puisse s'entourer d'un octet complet donc chaque impureté crée un trou (absence d'électron) qui ne demande qu'à être comblé par un électron libre.

**Des semi conducteurs de type « N »** (dopé « N »)

- Introduction d'atomes possédant 5 électrons sur la dernière couche (dans la bande de valence)
- L'atome d'impureté a un électron de trop pour constituer un octet. Cet électron excédentaire est libre dans le cristal.

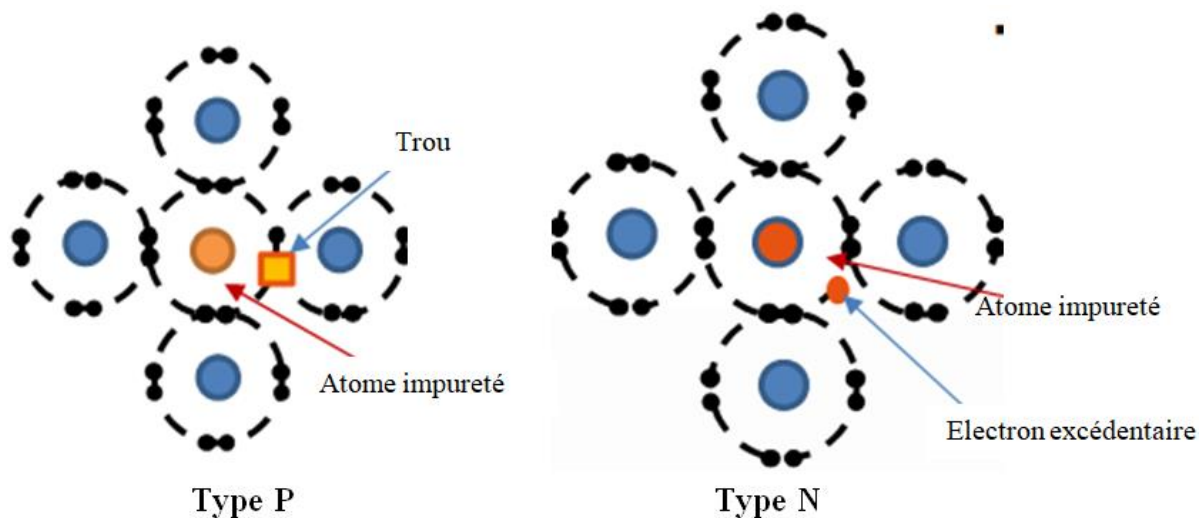


Figure II.9 : Principe de formation d'une jonction PN.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous traction de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

### II.2.5 Les panneaux ou modules solaires PV intégrés au bâti

Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme :

- Villages, maisons isolées
- Relais de communication.
- Pompage de l'eau.
- Refuges...



Figure II.10 : Système de production local d'électricité (maison).

Les panneaux ou modules solaires photovoltaïques intégrés au bâti (verrière, toiture...) sont constitués d'un assemblage de cellules en matériaux semi-conducteurs généralement à base de silicium. Chaque cellule capte l'énergie de la lumière (photons) et la transforme en courant électrique continu.

La puissance des panneaux photovoltaïques s'exprime en Watt crête ( $W_c$ ) : c'est la puissance maximale délivrée dans certaines conditions d'ensoleillement ( $1000 \text{ W/m}^2$  à une température de cellules de  $25^\circ\text{C}$ ).

Les panneaux sont à installer en plein sud (mais de Sud-est à Sud-ouest, c'est encore très bien) pour une inclinaison optimale de  $30^\circ$  par rapport à l'horizontale.

L'onduleur convertit le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif selon les caractéristiques du réseau ( $50 \text{ Hertz}$  et  $220 \text{ Volts}$ ).

L'exploitation de la production d'électricité solaire peut se faire de multiples manières :

- Stockée sur batteries : pour un chalet, un bateau de plaisance... L'énergie est captée pendant la journée, stockée dans des accumulateurs et utilisée en



fonction des besoins;

- Raccordée au réseau public d'électricité avec vente de la totalité de la production ou de l'excédent si l'on choisit d'en autoconsommer une partie.

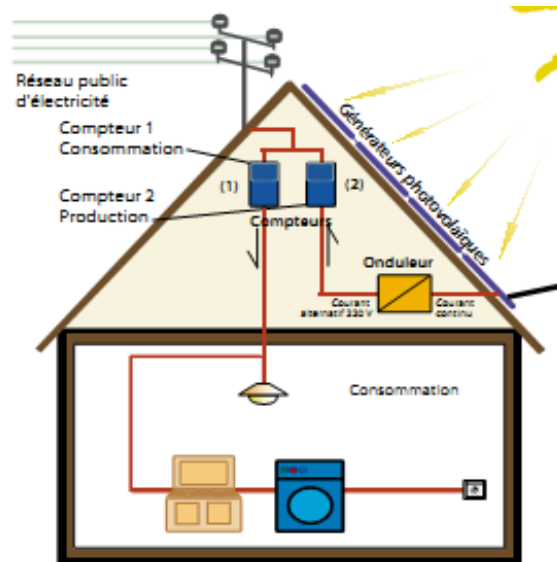


Figure II.11 : Système raccordé au réseau public d'électricité

Les modules photovoltaïques doivent être installés dans des endroits où il n'y aura pas d'ombre.

L'énergie solaire étant intermittente, il faut pouvoir stocker l'énergie produite dans des batteries, ou l'injecter dans un réseau de distribution électrique.

#### Performance :

$10 \text{ m}^2$  de panneaux =  $1000 \text{ W}_c$  de puissance =  $1000 \text{ kWh/an}$  d'énergie produite.

### II.2.6 L'énergie photovoltaïque en Algérie

Les travaux de réalisation de la première centrale photovoltaïque algérienne d'une capacité de  $1 \text{ MW}$  seront "bientôt" lancés, à la nouvelle ville de *Boughezoul*, au sud d'Alger, en partenariat entre le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) et le groupe privé national *Condor*.

La "totale disposition du Groupe Condor à intégrer le domaine des énergies renouvelables", il a souligné que l'unité des panneaux photovoltaïques de *Bordj Bou Arirridj* assure une production annuelle de  $75 \text{ MW}$ , avant d'inviter le Gouvernement à "impliquer son groupe



dans le projet national de réalisation de centrales photovoltaïques d'une capacité globale de 12.750 MW à l'horizon 2030, contre seulement 433 MW, actuellement".



Figure II.12 : Centrale photovoltaïque à la nouvelle ville de *Boughezoul*

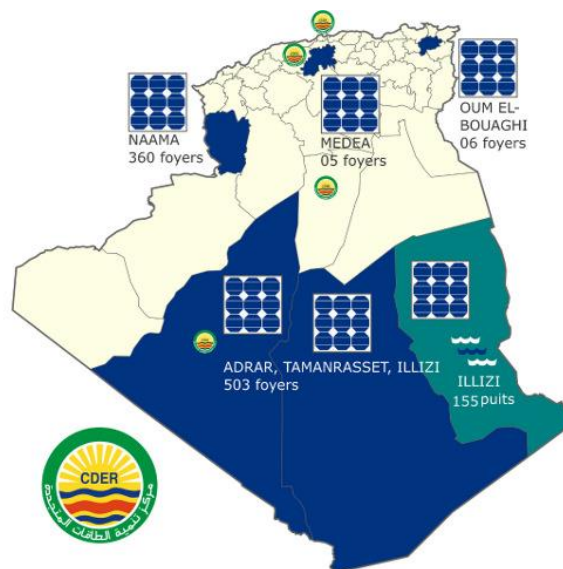


Figure II.13 : Carte géographique des installations photovoltaïques en Algérie.

### II.3 L'énergie solaire thermique

#### II.3.1 Principe

Les rayons solaires sont transformés en énergie thermique (en chaleur) grâce à des capteurs solaires thermiques. Ces derniers transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (qui peut être de l'eau, un liquide antigel, ou même de l'air). Ce fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point, va chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter un chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser directement la chaleur du rayonnement solaire, chauffe-eau (Fig. II.14) et chauffages solaire, ou bien indirectement (rafraîchissement solaire).

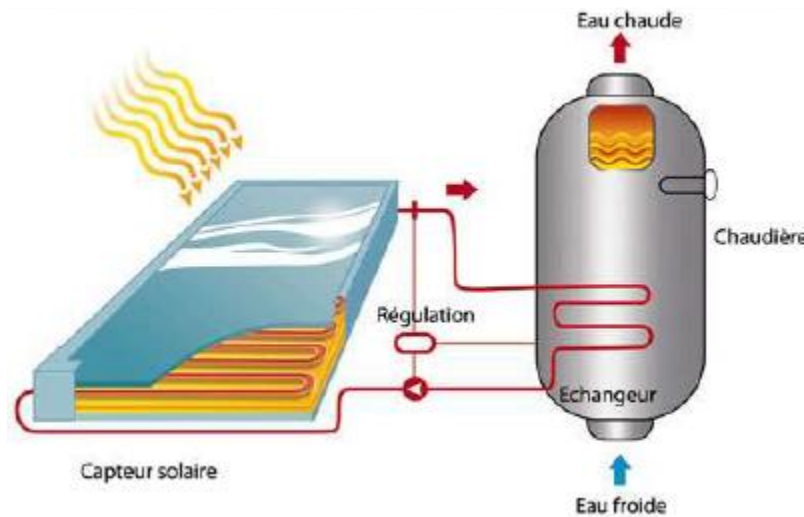


Figure II.14 : Schéma de principe pour l'alimentation de chauffe-eau.

### II.3.2 Les applications de l'énergie solaire thermique

On distingue deux types d'application d'énergie solaire thermique, à basse température (passive, active) et à haute température (concentrée).

#### II.3.2.1 La technologie solaire passive

L'énergie lumineuse du Soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres (Fig. II. 15) est absorbée par les murs, les planchers et les meubles, puis libérée sous forme de chaleur. Les techniques, utilisées pour capter l'énergie, misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire plutôt que sur de l'équipement mécanique. Aujourd'hui, la conception solaire passive utilise les éléments fondamentaux d'un immeuble (les murs, la toiture et les fenêtres) pour contrôler la quantité d'énergie solaire absorbée ou perdue. La conception solaire passive aide aussi à conserver la fraîcheur en été [12].



Figure II.15 : Structure d'une maison à énergie solaire passive [13]

### II.3.2.2 La technologie solaire active

Le système d'énergie solaire active utilise des capteurs solaires pour capter l'énergie du soleil et produire de l'électricité afin d'alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud, tel que les systèmes à chauffe eau solaire qui utilisent les capteurs plan vitrés ou non vitrés pour chauffer de l'eau (Fig. II.16), ou le chauffage des locaux et la ventilation solaire qui utilisent aussi des capteurs vitrés ou un bardage perforé pour chauffer l'air. Un autre exemple est celui qui utilise les centrales électriques solaires.



Figure II.16 : Un chauffe-eau solaire sur le toit d'une habitation [14].

### II.3.2.3 La technologie solaire concentrée ou « thermodynamique »

Différentes formes des capteurs sont utilisées pour concentrer le rayonnement solaire sur le récepteur (Fig. II.17), installé sur un foyer, pour atteindre des températures élevées allant de 250 à 800°C. Cette technique permet de réchauffer le fluide caloporteur, en général de l'huile ou des sels fondus. Ces fluides viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau, qui entraîne un alternateur ; comme dans le cas d'une centrale thermique conventionnelle, pour produire de l'électricité.

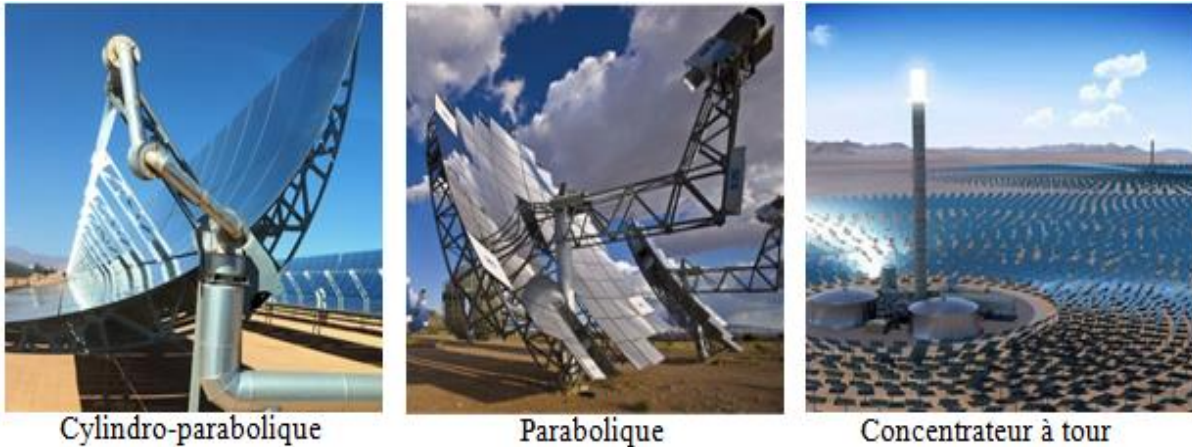


Figure II.17 : Schéma de principe de principales filières solaires à concentration [15].

#### II.3.2.4 Les types de capteurs solaires thermiques

L'énergie utile qu'il est possible d'obtenir au travers d'un capteur solaire dépend du modèle de capteur, de son inclinaison, de son orientation et du dimensionnement des composants de l'installation. La gamme des capteurs solaires du marché est si vaste qu'il existe nécessairement la solution qui convient pour chaque besoin et chaque utilisation. Le capteur solaire est choisi en général par l'installateur pour son rapport qualité/prix. Le revêtement est important, afin de capter un maximum d'énergie et d'assurer un rendement élevé et pour le plus longtemps possible. Les couleurs peuvent être individualisées et l'esthétique doit permettre de s'harmoniser avec le toit.

##### a. Capteur plan

C'est le modèle standard le plus répandu. Il est composé d'un caisson vitré isolant à l'intérieur duquel est disposée une feuille métallique recouverte de chrome noir qui va absorber l'énergie solaire (Fig. II.18). Un fluide caloporteur circule à l'intérieur de tubes placés entre la vitre et la feuille absorbante : on obtient un effet de serre permettant au liquide d'atteindre les 70°C.



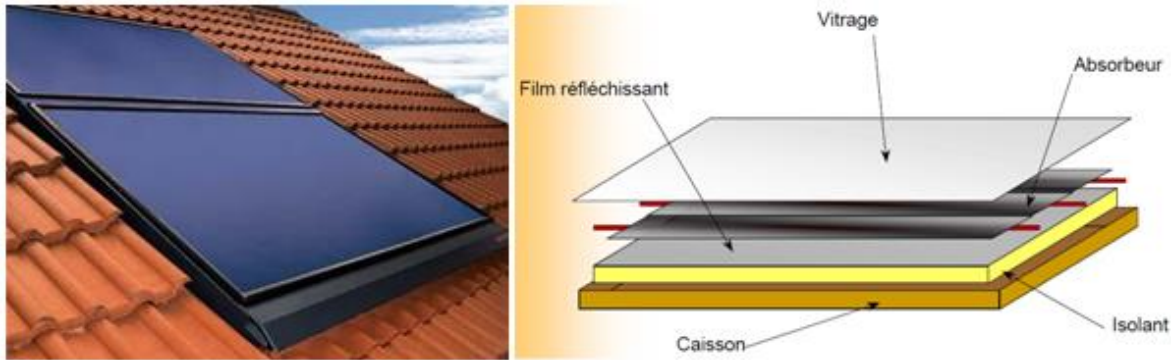


Figure II.18 : Concepts d'un capteur solaire plan [16].

#### b. Capteur sous vide

Le capteur sous vide est composé de tubes de verre sous vide. Son fonctionnement est le même que pour les capteurs de type plan. Il y a un assemblage de tubes en verre indépendants (Fig. II.19). Le vide créé à l'intérieur des tubes limite les déperditions de chaleur. De ce fait, son rendement est très performant. La forme tubulaire capte l'énergie des rayons soleil plus longtemps dans une journée qu'avec un capteur plan. Les températures atteintes sont très élevées. Mais le coût du capteur sous vide est supérieur aux autres modèles de capteurs.



Figure II.19 : Concepts d'un capteur solaire sous vide [17].

Les capteurs solaires plans sont les plus souvent utilisés pour les installations de chauffage solaire. Les capteurs à tube sous vides sont plus performants, mais plus chers [18].

### II.4 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

#### Avantages :

- Energie disponible partout à la surface de la Terre.
- Usage non polluant.

- Les cellules photovoltaïques n'ont pas de partie mécanique et ne nécessitent guère d'entretien.

Le solaire thermique présente plusieurs avantages :

- La technologie est simple et disponible,
- L'énergie est renouvelable, gratuite et fonctionne même en cas d'ensoleillement moyen,
- L'impact sur l'environnement est nul et la chaleur peut être stockée temporairement.

**Inconvénients :**

- Le soleil est intermittent et on ne peut pas le stocker.
- Le coût de production des cellules photovoltaïques est très élevé. (En effet, le silicium est cher (en raison d'une forte augmentation de la demande)).
- La fabrication des cellules dégage du CO<sub>2</sub>.

Toutefois, comme le souligne le site *Connaissance des Énergies*, le solaire requiert des capacités de chauffage d'appoint, la production de chaleur est soumise aux aléas, et les technologies thermiques à basse température ne produisent pas d'électricité.

# Chapitre III

## Energie éolienne

---

## Chapitre III : Energie éolienne

### III.1 Introduction

**Eole** : dieu du vent de la Grèce antique

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique [19].

### III.2 Principe d'une éolienne

Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.

Donc une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté.

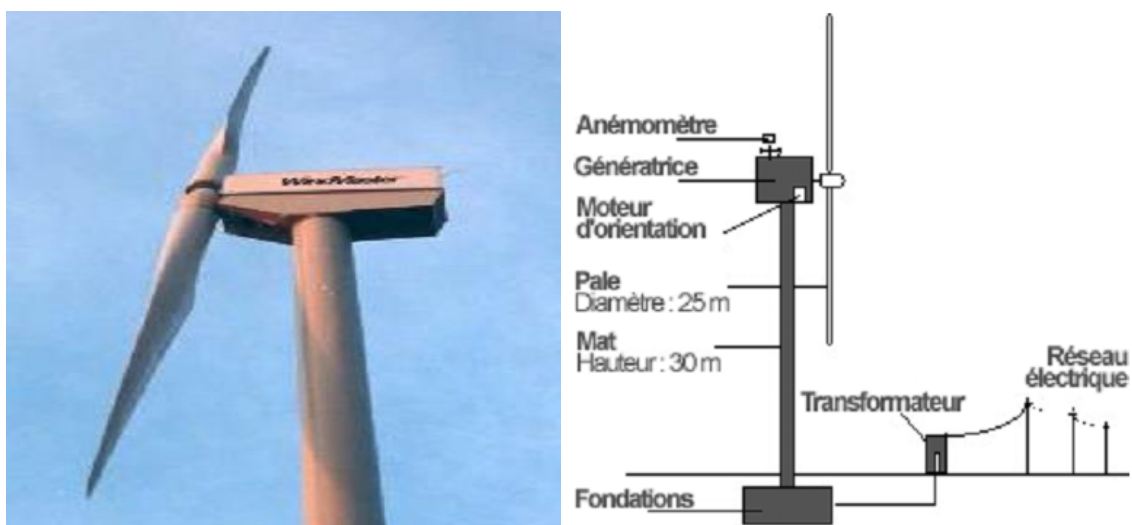


Figure III.1 : Schéma représentatif d'une centrale éolienne

Les applications de l'énergie éolienne sont variées mais la plus importante consiste à fournir de l'électricité à l'échelle d'une région, d'un pays. Ce sont des parcs d'aérogénérateurs ou « fermes » éoliennes. Ils mettent en œuvre des machines de moyenne et grande puissance (200 à 2000 KW), 10 MW actuellement en chine. Des systèmes autonomes, de 500W à quelques dizaines de KW, sont intéressants pour électrifier des sites isolés du réseau électrique (iles, villages...).



L'énergie du vent captée sur les pales entraine le rotor couplé à la génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette énergie est distribuée sur réseau via un transformateur.

### III.3 Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

- **Les éoliennes terrestres dites « onshore »** sont installées sur la terre.
- **Les éoliennes dites « offshore »** sont installées en mer.



Figure III.2 : Centrales éoliennes (Onshore « à droite » et Offshore « à gauche »)

On distingue par ailleurs deux topologies d'installations :

- **Industrielles** : les grands parcs éoliens (ou « fermes éoliennes ») raccordés au réseau électrique ;
- **Domestiques** : des petites éoliennes installées chez les particuliers.

#### III.3.1 Fonctionnement technique ou scientifique

L'énergie électrique ou mécanique produite par une éolienne dépend de trois paramètres :

- la forme et la longueur des pales,
- la vitesse du vent
- la température qui influe sur la densité de l'air.

#### Remarque :

1/ L'énergie récupérable par une éolienne correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

La puissance maximum récupérable (P) est donnée par la loi de **Betz** [20]:

$P=0,37.S.V^3$ ; où **0,37** est la constance de l'air à pression atmosphérique standard (1 013 25 Pa = 1.013 bar), **S** la surface balayée et **V** la vitesse du vent.

- En pratique, une éolienne produit quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande et huit fois plus d'énergie si la vitesse du vent double.
- La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit **3%** de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est plus froid de **10°C**.
- La puissance éolienne dépend principalement de l'intensité du vent et de ses variations. L'énergie éolienne est donc une énergie intermittente et aléatoire.

2/ Une éolienne démarre lorsque la vitesse du vent atteint environ **3m/s** et s'arrête lorsque cette vitesse atteint **25 m/s**. Généralement, les éoliennes sont paramétrées afin d'exploiter au mieux les vents de puissance intermédiaire.

Le vent est plus fort et plus constant en mer. Les éoliennes qui y sont installées sont également plus puissantes. L'ensemble pale/rotor est orienté face au vent par un système de gouvernail.

### III.3.2 Enjeux par rapport à l'énergie

L'énergie éolienne, considérée comme une énergie propre, connaît un essor important. Parmi les énergies renouvelables, elle est considérée comme une technologie mature et la plus économique après l'hydroélectricité.

D'après le **GWEC** (*Global Wind Energy Council*), la capacité installée du parc éolien mondial a plus que doublé entre fin 2010 et fin 2015. A cette date, elle atteint près de **432,4 GW**. Malgré cette croissance, sa part dans la production d'électricité mondiale totale reste limitée à environ **3%**.

Cette source d'énergie se trouve ainsi souvent au cœur des stratégies de développement de nouvelles capacités électriques malgré les limites qu'elle peut présenter comme : son caractère aléatoire, son rendement et.....

### III.4 Avantages et inconvénients

#### Les atouts de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est renouvelable et « décarbonée » en phase d'exploitation.

- Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole. L'installation peut être démantelée relativement facilement.
- Leur développement offshore présente un potentiel non négligeable.
- Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon leur taille.

### Les problèmes qui se posent [20]

- L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent.
- C'est une source d'énergie intermittente.
- Les zones de développement sont limitées.
- Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores.
- Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (exemple : pêcheurs, plaisanciers).

La France, par exemple, envisage avec le programme Eole 2005 de passer de 17 MW à 250 MW (ou 500 MW) : les principaux sites se situant en **BRETAGNE**.

L'un des défauts majeurs de la centrale éolienne est le bruit, 50 db à 150 mètres.

La durée de vie est de 25 ans. Et le prix du KWh entre 0.35 et 0.50 F.

### III.5 Centrales éoliennes en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 KW sur le site des Grands vents (Alger). Ce prototype avait été installé initialement à ST-Alban en Angleterre.

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à **Adrar**. Cette ferme a été fonctionnelle en 2012.

Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des énergies renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme, pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030.



Figure II.3 : La ferme éolienne de *Kaberten* (Adrar)

(Mise en service officielle 2014, puissance installé de 10.2 MW)

## **Chapitre IV**

### **Autres sources renouvelables**

## Chapitre IV : Autres sources renouvelables

### IV.1 Energie Hydraulique

L'eau est généralement une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.

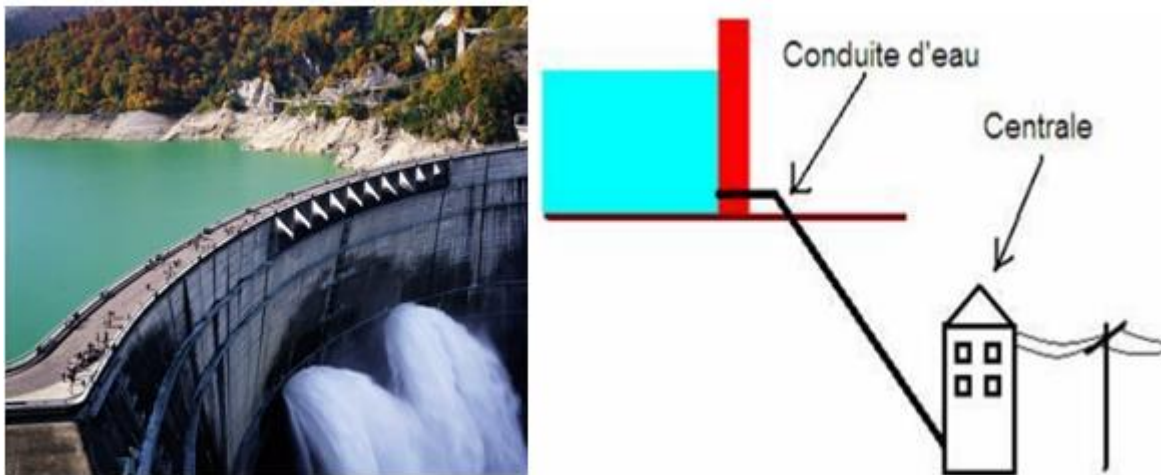


Figure IV.1 : Principe d'une centrale hydraulique [21]

#### IV.1.1 Principe d'une centrale hydraulique

En « haute chute », l'eau d'une source ou d'un ruisseau est captée par une prise d'eau sommaire. Elle est ensuite dirigée à travers une conduite vers une turbine située plus bas. L'écoulement de l'eau fait tourner la turbine qui entraîne un générateur électrique. L'électricité produite peut soit être utilisée directement, soit stockée dans des accumulateurs. Enfin l'eau est restituée à la rivière.

Une centrale transforme l'énergie potentielle en énergie cinétique qui est ensuite transformée en énergie mécanique à partir de la turbine, puis en électricité à partir de l'alternateur.

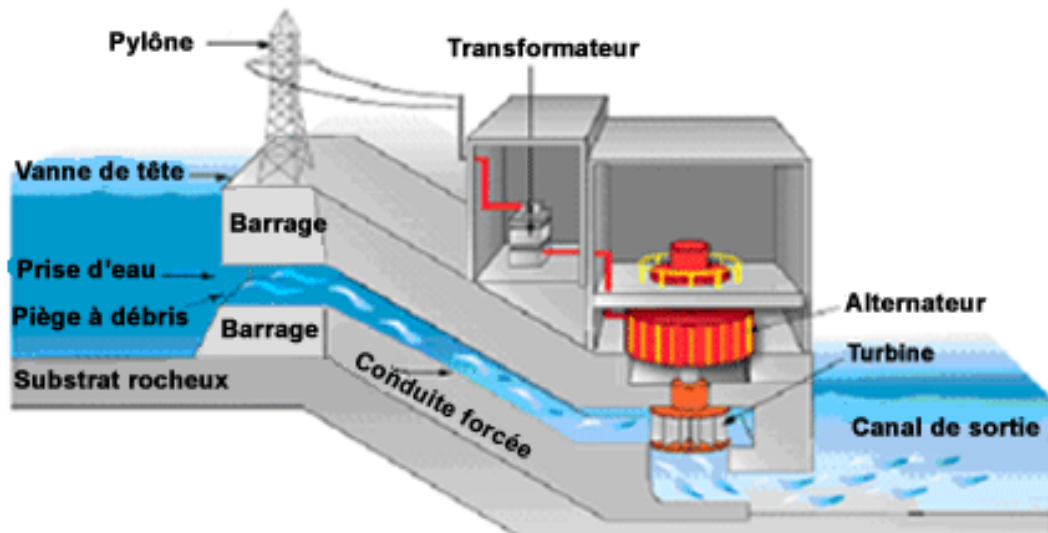


Figure IV.2 : Schémas d'une centrale hydraulique [22]

#### IV.1.2 Les différents types d'ouvrages hydrauliques

##### IV.1.2.1 Les bassins versants et le stockage naturel de l'eau

L'énergie hydraulique est une énergie d'origine solaire. L'eau évaporée par la chaleur solaire, pour la plus grande partie sur les grandes étendues d'eau (océans, mers, grands lacs) mais également sur les terres, par évapotranspiration, se condense sous forme de précipitations, et ceci de préférence sur les montagnes. Grâce à ce mécanisme, l'eau gagne une énergie potentielle directement proportionnelle à l'altitude de son point de chute.

Une partie de cette eau s'infiltre dans le sol, alimente des nappes phréatiques et réapparaît plus ou moins bas. Une autre partie est stockée sous forme de neige ou de glace, et elle est susceptible d'être déstockée au moment de la fonte des neiges. Le reste s'écoule vers les rivières.

Le bassin versant d'une rivière désigne l'ensemble des zones dont l'eau de pluie s'écoule vers la rivière. Plus il est grand, et plus il reçoit de précipitation, stockée ou pas sous forme de glace, plus le "potentiel hydraulique" de la rivière sera important.

##### IV.1.2.2 Les différents types d'aménagements hydrauliques

Chaque site possède ses propres caractéristiques, hydrologiques, géologiques, topographiques, et sera aménagé en fonction de ses caractéristiques et des objectifs poursuivis : fourniture quasi permanente d'électricité, fourniture en période de pointe uniquement, stockage temporaire, etc.. Bien que chaque aménagement hydraulique soit très spécifique du site choisi, les différents aménagements peuvent être classés en quelques grandes familles.



**a. Les aménagements avec retenue**

De nombreuses rivières ont un débit très variable au cours de l'année, notamment du fait de la variation saisonnière des précipitations et du stockage naturel de la neige en hiver, et ceci d'autant plus que leur bassin versant est limité. C'est le cas de la plupart des rivières en altitude, mais également de certaines autres. Lorsque l'on veut exploiter leur potentiel hydraulique, on est amené à construire des barrages qui vont eux-mêmes stocker l'eau lorsqu'elle arrive en abondance, et permettre de la restituer et de la turbiner lorsqu'on en a besoin. Ces barrages ont des hauteurs variables entre quelques dizaines de mètres et largement plus de 100 mètres en fonction de la topographie des lieux et des quantités d'eau à stocker [23]. Ces quantités sont elles-mêmes très variables, de quelques centaines de millions à quelques milliards de  $m^3$  (Serre-Ponçon) voire beaucoup plus (barrage Nasser sur le Nil en Egypte...).



Figure IV.3 : Le barrage de Serre-Ponçon et de la Durance en France [22]

**b. Les aménagements "au fil de l'eau" [23]**

Lorsque le débit d'une rivière ne varie pas trop au cours de l'année, on choisit généralement de l'équiper "au fil de l'eau", sans créer de retenue. C'est le cas de la plupart des fleuves une fois qu'ils sont arrivés en plaine, avec un débit important mais une faible pente. En France, c'est le cas du *Rhône*, en aval du *Lac Lemman*, et du *Rhin*. L'eau que l'on veut turbiner est en général dérivée dans un canal latéral, sur une distance suffisante pour obtenir une hauteur de chute suffisante (de l'ordre de 10 m.) Sur le Rhin, par exemple, chaque usine, en turbinant environ  $1000 m^3/s$  sur une hauteur de 10 à 15 m, a une capacité de 80 à 120 MW; la pente générale du fleuve permet d'installer une usine de ce type tous les 30 km environ.





Figure IV.4 : Lac de Lemman en France

### c. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

L'électricité ne peut pas être stockée, aussi cherche-t-on les moyens de stocker de l'énergie sous diverses formes. Une des plus efficaces est de la stocker sous forme d'énergie potentielle de l'eau. En heures creuses, alors que l'on dispose d'une production d'électricité excédentaire, on pompe de l'eau entre un bassin bas et un bassin haut ; en période de pointe, cette eau est turbinée pour fournir de l'électricité. Les hauteurs de chute sont en général très élevées (800 à 1000 m), les capacités des réservoirs (généralement artificiels) étant adaptées aux objectifs poursuivis. En France, la STEP de Revin est capable de fournir une puissance de pointe de 1000 MW environ et celle de Grand Maison, 1800 MW.

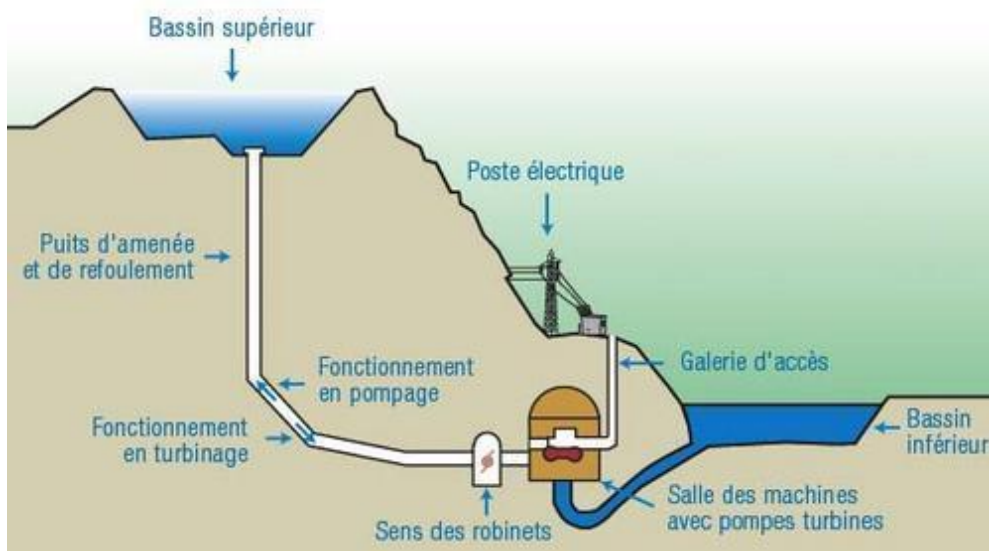


Figure IV.5 : Schémas de station de transfert d'énergie par pompage «STEP»[22]

### IV.1.3 Les différents types de turbines

La turbine va permettre de transformer l'eau qui s'échappe de la conduite en énergie de rotation. La forme et les caractéristiques des turbines dépendent des catégories d'installations hydroélectriques dans lesquelles elles sont employées :

- La turbine Pelton : généralement réservée aux usines de haute chute (de 300 à 1800 mètres), a été mis au point par **Pelton** au XIXe siècle. Cette turbine est constituée d'une roue, sur la périphérie de laquelle sont fixés des séries de cuillères doubles métalliques appelées augets. L'eau sort de la conduite forcée à grande vitesse et vient percuter avec force les augets de la roue par l'intermédiaire des injecteurs. La puissance maximale unitaire atteinte est de 400 MW.

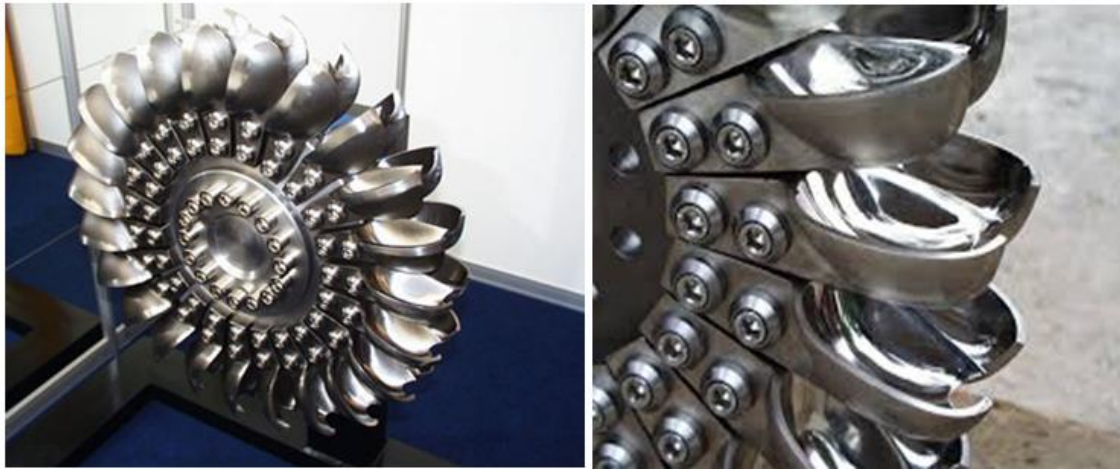


Figure IV.6 : Schémas de la turbine Pelton dans une centrale hydraulique « Haute chute » [22].

- La turbine Francis : est utilisée pour les moyennes chutes (entre 30 et 750 mètres). Elle ressemble à un cylindre évasé, divisé sur sa longueur par une série de cloisons longitudinales incurvées. Le pourtour élargi de la turbine est cerclé par une couronne percée d'une vingtaine d'ouvertures par lesquelles pénètre l'eau sous pression venant de la conduite forcée. Cette eau glisse sur les pales de la turbine et se dirige vers son cœur, d'où elle est évacuée. Lorsque l'eau s'écoule par les canaux de la turbine, elle abandonne sa pression aux pales de la turbine. C'est cette différence de pression qui est à l'origine de rotation de la turbine. La puissance maximale atteinte est de 800 MW par unité.



Figure IV.7 : Schémas de la turbine Francis d'une centrale hydraulique « Moyenne chute » [22].

- **La turbine Kaplan** : sert dans les usines de basse chute (10 à 80 m). L'eau est canalisée par des puits ou des conduites en acier ou en béton de cinq à dix mètres de diamètres vers une chambre dont le tracé en colimaçon permet à l'eau d'arriver sur la turbine avec la meilleure efficacité. Les turbines Kaplan ont une forme d'hélices de navire. Leurs pales sont généralement orientables et permettent, par simple variation de leur inclinaison, d'ajuster la vitesse de rotation des turbines aux conditions de niveau. La puissance maximale atteinte est de 200 MW. Une variante des turbines Kaplan est celle des « groupes bulbes », pour les très basses chutes (5 à 20 m) dont la technique a été développée en France pour l'usine marémotrice de la Rance. L'alternateur est accolé à la turbine. Grâce à un système de protection étanche, ces groupes peuvent être complètement immergés dans l'eau. La puissance maximale atteinte est de 60 MW.

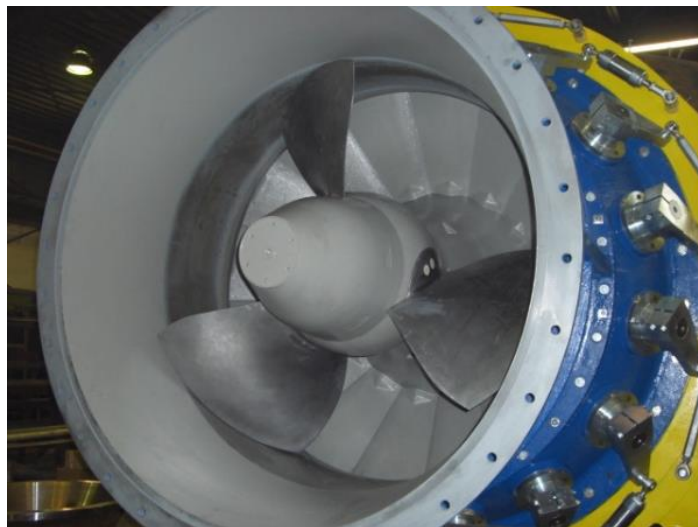


Figure IV.8 : Schémas de la turbine Kaplan d'une centrale hydraulique « Basse chute » [22].

- Pour les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), on emploie soit des groupes ternaires (dont la ligne d'arbre comporte la turbine, l'alternateur et la pompe) soit des groupes avec pompes-turbines réversibles capables d'assurer turbinage et pompage (de type Francis).

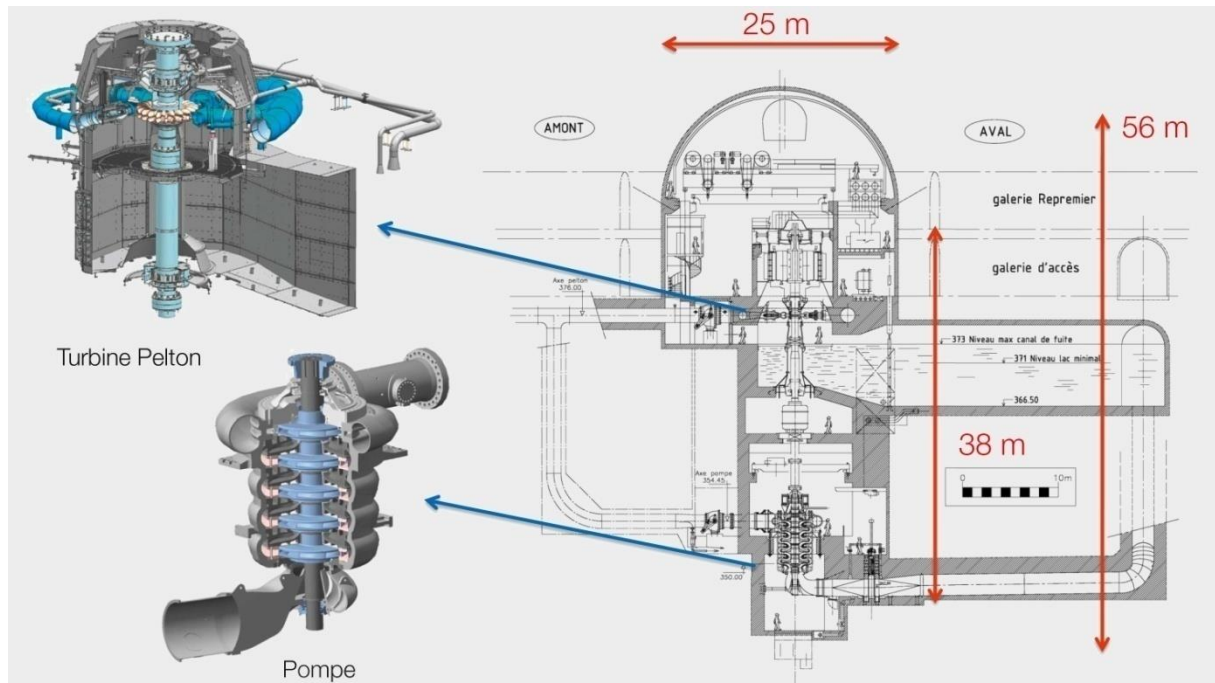


Figure IV.9 : Schéma d'un groupe pompe-turbine [24]

#### IV.1.4 Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique

L'exploitation de l'énergie hydraulique présente des avantages et des inconvénients, tant pour l'environnement, que pour la santé et pour les aspects sociaux.

Les principaux avantages de l'énergie hydraulique sont :

- Energie renouvelable
- Dans la plupart des cas, elle ne rejette pas de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ou déchet solide (énergie non polluante).
- Des équipements bien intégrés : aménagement de passe à poissons et bateaux.
- Un fonctionnement silencieux : isolation des locaux minimise les nuisances sonores.
- Préservation de la qualité de l'eau : 10% du débit de l'eau est turbiné, les propriétés physico-chimiques étant conservées.
- La construction de grands barrages contraint : à des déplacements de populations (pêcheurs, population pauvres, agriculteurs, à des modifications de l'environnement



(changement de régime des rivières et des conditions de fertilisations en aval, humidité de l'air,...)

### Les inconvénients :

- La construction de barrages peut bouleverser certains écosystèmes.
- L'installation de centrales hydroélectriques peut contraindre certaines populations à migrer vers un autre lieu. Elle peut aussi réquisitionner des surfaces agricoles.
- La construction d'un barrage est suivie d'une retenue d'eau formée par le barrage qui forme un réservoir de grande taille qui aboutira à la disparition de forêts, d'espèces animales et végétales ainsi qu'à de nombreux problèmes d'envasement.
- Le coût d'un barrage hydroélectrique est très important et est un des inconvénients.

Un barrage hydroélectrique de grande taille tel que le barrage des Trois Gorges en Chine qui est l'un des plus grands au monde a coûté environ 22 milliards d'euros (185 m de hauteur pour 2 km de long, puissance de 18 200 MW d'électricité soit l'équivalent de 10 centrales nucléaires !) [25].



Figure IV.10 : Barrage des trois gorges en chine [25]

### IV.1.5 Energie hydraulique en Algérie

«Les besoins en eau de la population sont tellement grands que le gouvernement a décidé de ne plus recourir aux barrages pour produire de l'électricité», a indiqué à l'APS une source au ministère de l'Energie. A cet effet, il compte porter le nombre de barrages de 70 à 100. Au-delà de l'augmentation du nombre de barrages, le gouvernement a décidé de fermer à terme

les centrales hydroélectriques du pays et de consacrer les deux barrages produisant de l'électricité, en l'occurrence le Barrage d'*IghilEmda* à *Kherrata (Bejaia)* et celui d'*Erraguen* à Jijel, à l'irrigation et à l'alimentation de la population en eau potable.

Cette décision a été motivée par le fait que le niveau de production des centrales hydroélectriques reste «insignifiant», en contribuant très peu au bilan énergétique de l'Algérie, a noté la même source, précisant que la production de la filière hydraulique ne représente que 389,4 MWh des 28950 MWh produits par SPE, la filiale de production d'électricité de Sonelgaz, tandis que l'essentiel de la production électrique, soit 18723 MWh, est assurée par le gaz.



Figure IV.11 : Barrage de *Beni Haroune* à Jijel

## IV.2 Energie Géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois :

- La science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre,
- La technologie qui vise à l'exploiter.
- Elle désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

La géothermie ou chaleur de la terre se présente sous forme de réservoirs de vapeur ou d'eaux chaudes ou encore de roches chaudes.

Lorsque le réservoir géothermique est à une température modérée, cette ressource est exploitée pour la production de chaleur distribuée par un réseau de chaleur.

Lorsque la température du réservoir géothermique est plus élevée et permet de produire de la vapeur, il est possible de produire de l'électricité.

On distingue habituellement deux formes d'énergie géothermique, la géothermie de surface et la géothermie profonde.

Les sous-sols de la terre contiennent de la chaleur dont la température augmente avec la profondeur. Utiliser l'énergie géothermique consiste à exploiter ce flux de chaleur naturel pour le transformer en chauffage ou en électricité.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

#### IV.2.1 Types de géothermie

On distingue habituellement trois types de géothermie :

- La géothermie peu profonde (moins de 1 500 m) à basse température ;
- La géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C).
- La géothermie très profonde à très haute température.

Ces trois types ont en commun de prélever la chaleur contenue dans le sol, issue de la pression, et, dans certains cas, d'une plus ou moins grande proximité du magma.

#### IV.2.2 Principes

Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30 km, un gradient de température appelé gradient géothermique qui définit que plus on creuse et plus la température augmente ; en moyenne de 3 K par 100 mètres de profondeur.

L'énergie géothermique dépend de la chaleur de la Terre. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales géothermiques, grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la Terre.

La température des roches augmente en moyenne de 1 °C tous les 30 m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m.

### IV.2.3 Centrale Géothermique

Une centrale géothermique est composée de trois parties :

- La pompe
- L'usine qui produit l'électricité
- Les lignes électriques qui la transportent

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur.

- L'infiltration d'eau

De l'eau de pluie ou de mer s'infiltré dans les fractures de la croûte terrestre pour constituer un réservoir dans le sous-sol, appelé nappe aquifère, à haute température, de 150 à 350 °C.

- Le pompage de l'eau

Grâce à un forage dans le sous-sol, l'eau chaude est pompée jusqu'à la surface. Pendant sa remontée, elle perd de sa pression et se transforme en vapeur.

- La production d'électricité

La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionné un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

- L'adaptation de la tension

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute tension.

### IV.2.4 Principe de fonctionnement et usages de la géothermie

#### IV.2.4.1 Géothermie très basse énergie (géothermie assistée par pompe à chaleur)

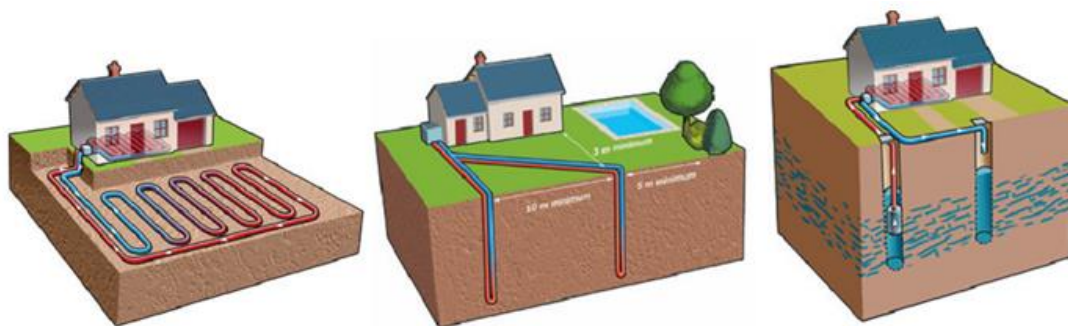
La géothermie très basse énergie (température inférieure à 30°C) ne permet pas une utilisation directe de la chaleur par simple échange. Elle nécessite la mise en œuvre de pompes à chaleur qui prélèvent cette énergie à basse température pour l'augmenter à une température suffisante pour le chauffage. Mais, au delà du chauffage, les applications de la géothermie sont très divers : chauffage et rafraîchissement des logements individuels, collectifs ou tertiaires, usage industriel, etc.



### Les pompes à chaleur géothermiques destinées aux maisons individuelles, bâtiments collectifs et tertiaires

La chaleur est puisée dans le sol par des capteurs qui peuvent être enterrés verticalement ou horizontalement, ou dans l'eau des nappes.

- **Capteurs horizontaux** : sont répartis et enterrés à faible profondeur (de 0.6 m à 1.20 m) (Fig. IV.12). Selon la technologie employée, de l'eau glycolée ou le fluide frigorigène de la pompe à chaleur circule en circuit fermé à l'intérieur de ces capteurs. La surface de capteurs nécessaire représentera environ 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer.
- **Sonde géothermiques verticales** : les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment (Fig. IV.12). La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. On fait circuler en circuit fermé de l'eau glycolée. L'emprise au sol est minime par rapport aux capteurs horizontaux. Pour chauffer une maison de 120 m<sup>2</sup> habitables, une sonde géothermique de 100m de profondeur est suffisante.
- **Les pompes à chaleur sur nappes ou sur aquifères** : les pompes à chaleur sur nappes puisent la chaleur contenue dans l'eau : nappes phréatique (où la température de l'eau est constante entre 7 et 12 °C), rivière ou lac (Fig. IV.12). Elles nécessitent deux forages pouvant atteindre chacun plusieurs dizaines ou centaines de mètre de profondeur. Ce type d'installation permet de fournir le chauffage et rafraîchissement aux bâtiments collectifs ou tertiaires et, si la nappe est située à faible profondeur, aux maisons individuelles.



Capteurs horizontaux

Sonde géothermiques verticales

pompes à chaleur

Figure IV.12 : Dispositions des capteurs

#### IV.2.4.2 Géothermie basse et moyenne énergie

La géothermie basse et moyenne énergie repose sur l'utilisation directe de la chaleur de l'eau chaude contenue dans les aquifères profonds, dont la température est comprise entre 30 et 150 °C.

- Réseaux de chaleur et doublets géothermiques

Le chauffage d'un quartier ou d'un ensemble d'immeubles d'habitat collectif peut s'effectuer par l'intermédiaire d'un réseau de chaleur, c'est-à-dire un réseau de canalisation chargé de distribuer la chaleur dans des sous-stations au pied de chaque immeuble ou de chaque groupe d'immeubles. Afin d'assurer une gestion durable de la ressource, la technique du doublet (un puits de production et un puits de réinjection) est généralement mise en œuvre. Elle permet de restituer l'intégralité des volumes d'eau extraits au milieu naturel d'origine (dans la même nappe).

#### IV.2.4.3 Géothermie haute énergie (production d'électricité)[26]

La production d'électricité d'origine géothermique est possible sur les réservoirs dont la température est comprise entre 150 et 350°C et permettant des débits de production de fluides suffisants.

Plusieurs méthodes et techniques de production d'électricité géothermiques existent actuellement :

- Pour les sources de vapeur haute température, que l'on retrouve notamment sur les zones de volcanisme récent, l'électricité peut être produite directement par injection de la vapeur dans une turbine haute pression ou haute et basse pression.
- Pour les sources moins chaudes (moins de 175°C), de nombreuses techniques (ex : cycle binaire) jouent sur la condensation puis la détente du fluide secondaire, souvent organique. Ce cycle binaire peut également valoriser l'énergie des eaux chaudes en sortie d'une unité haute pression.
- La géothermie dite conventionnelle vise à exploiter des réservoirs naturellement très perméables, où l'eau géothermale est abondante.
- La technologie EGS « géothermie profonde des roches chaudes fracturées », telle qu'elle est expérimentée à *soultz-sous-Forêt* en France, consiste à augmenter la perméabilité de la roche par stimulation, puis à faire circuler de l'eau dans les roches

chaudes à grande profondeur et enfin à exploiter la chaleur récupérée pour produire de l'électricité.

#### IV.2.5 Production de l'électricité dans le monde (énergie géothermique) [27]

On dénombre aujourd'hui plus de 350 installations géothermiques haute énergie dans le monde. La puissance totale de ces centrales électriques est d'environ 10700MW en 2010 (contre 800 MW en 2000), soit 0.3% de la puissance mondiale électrique installée sur la planète. Les principaux pays producteurs se situent sur la périphérie du pacifique : six sur le continent américain pour plus de 4550 MW, cinq en Asie pour plus de 3800 MW, deux en Océanie pour 630MW. L'Europe compte six pays producteurs (*Islande, Italie, Allemagne, Danemark, France, Suède*) pour une puissance de 1470 MW, et l'Afrique en compte deux pour 174 MW.

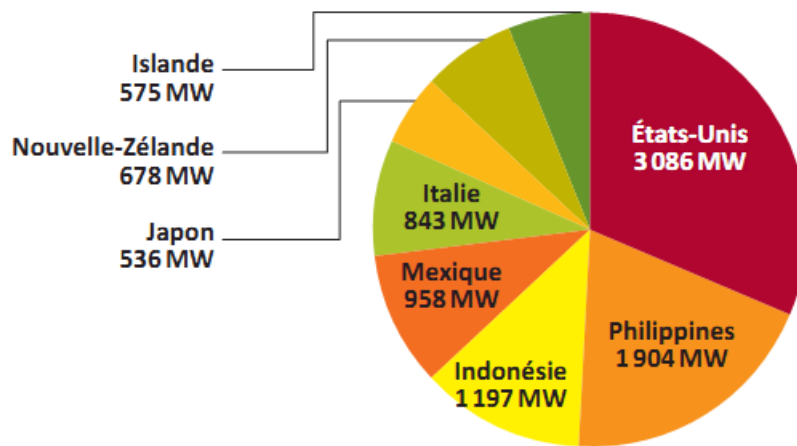


Figure IV.13: Capacités de production électrique installées des 08 principaux pays en 2010  
« source : International Géothermal Association »

#### IV.2.6 Avantages de l'énergie géothermique

- La géothermie est une énergie propre et durable : Elle produit peu de rejets, c'est une énergie propre qui ne participe pas à la dégradation du climat et qui ne nécessite ni transport ni stockage de substances polluantes ou dangereuses. En profondeur, la planète dispose d'un stock de chaleur illimité à l'échelle humaine et, à sa surface, le sol est réchauffé par le rayonnement solaire et la migration des eaux de pluie.
- Une énergie renouvelable : La quantité d'énergie disponible dans les masses d'eau souterraines et dans les sols est considérable.

- C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, la chaleur de la Terre, est totalement gratuite.
- La géothermie comme source d'énergie présente deux avantages : bien exploitée, elle est renouvelable et ne dépend pas des conditions atmosphériques (contrairement à l'énergie éolienne ou solaire par exemple), ce qui permet de l'utiliser d'une manière continue.

L'exploitation des ressources géothermales doit se faire dans le plus grand respect de l'équilibre entre prélèvements et recharge naturelle.

# Chapitre V

## Stockage d'énergie

---

## Chapitre V : Stockage d'énergie

L'énergie solaire, tout comme l'énergie éolienne et la plupart des énergies nouvelles et renouvelables ne peut, que très rarement, être utilisée au moment où elle est produite. De plus, nous ne pourrions jamais commander au vent de souffler ni au soleil de briller pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande. De cette simple constatation, il découle que l'énergie produite doit être stockée.

Le stockage de l'énergie peut être effectué sous quatre principales formes : stockage mécanique, stockage électromagnétique, stockage thermique, stockage électrochimique.

### V.1 Stockage mécanique

- Stockage Hydraulique : l'exploitation de l'énergie potentielle de chute d'eau, accumulée dans des lacs ou dans des réservoirs (montagnes), pour faire tourner des turbines afin de produire de l'électricité.
- Stockage d'énergie par air comprimé : c'est-à-dire d'énergie mécanique potentielle, qui se greffe sur des turbines à gaz. Cette dernière est raccordée avec un alternateur pour produire de l'énergie électrique.
- Stockage sous forme de vapeur sous pression : Par analogie avec les turbines hydrauliques et avec les accumulateurs hydrauliques, on cherche aujourd'hui à développer des accumulateurs de vapeur sous pression en liaison avec des turbines à vapeur utilisées en période de pointe.

### V.2 Stockage thermique

- Stockage par chaleur sensible : L'élévation de la température d'un matériau permet de stocker de l'énergie. Ce principe est, entre autres, celui des chauffe-eau solaires : ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite.
- Stockage par chaleur latente : Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état (par exemple solide-liquide). La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid.

### V.3 Stockage électromagnétique

L'énergie est stockée sous forme d'un champ magnétique généré par la circulation d'un courant électrique dans une bobine court-circuitée. Afin que cette énergie ne se dissipe pas, la bobine est réalisée en matériau supraconducteur (refroidi à environ 4 Kelvins). On décharge la bobine quand on le souhaite en la connectant au réseau. Ce système se destine au stockage de grandes quantités d'énergie, dont 50% peuvent être restituées en moins d'une seconde.

### V.4 Stockage électrochimique

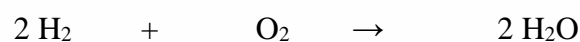
Le stockage électrochimique de l'énergie est un moyen de conserver l'énergie électrique sous forme chimique. Cette forme de stockage profite du fait que l'énergie électrique et chimique partagent le même vecteur, qu'est l'électron. Cet avantage permet de limiter les pertes liées à la conversion de l'énergie d'une forme à une autre. Les dispositifs électrochimiques capables d'effectuer une telle conversion, et qui sont connus sous les noms de piles à combustibles, supercondensateurs et batteries.

#### V.4.1 Piles à combustibles

Le principe consiste à récupérer, par un *processus chimique*, l'énergie d'un combustible, en l'occurrence l'hydrogène, en énergie électrique. C'est pour cela, d'ailleurs, qu'on la trouve également sous le nom de pile à hydrogène. En fait, le mélange d'*hydrogène* et d'oxygène produit non seulement de l'eau, mais aussi de l'électricité et de la chaleur.

La pile à combustible permet d'éviter de transporter l'électricité sur de longues distances, de la produire sur place et de l'emmagasiner pour en proposer aussi bien cette électricité que de la chaleur.

Le principe d'une pile à combustible repose sur une réaction chimique simple :



Hydrogène + Oxygène → Electricité + Eau + Chaleur

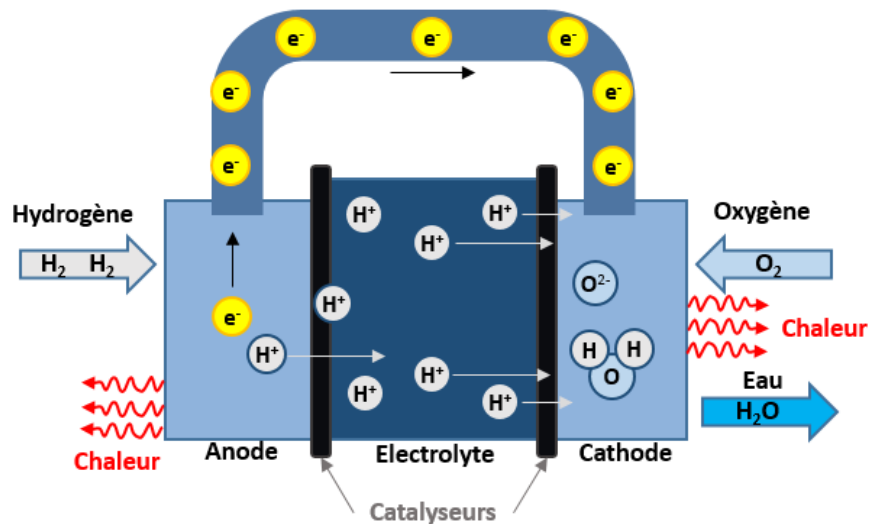


Figure V.1 : Schéma de principe d'une pile à combustible

- Au niveau de l'anode (Fig V.1), la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons qui vont créer le courant électrique (Equ. V.2). C'est l'oxydation.



- Au niveau de la cathode, l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit (Equ. V.3). C'est la réduction.



Enfin, les protons hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se recombinent avec les ions d'oxygène et forment de l'eau.



Cependant, même si le principe est simple, sa mise en application reste plus complexe.

#### V.4.1.1 Les différents types de piles à combustible

L'électrolyte est un des éléments principaux de la pile à combustible qui permet la mobilité des ions. Il détermine la nature de la pile, sa température et ses caractéristiques de fonctionnement. On distingue deux types d'électrolytes ; acide dans le cas où des ions positifs (les protons  $\text{H}^+$ ) migrent de l'anode à la cathode, ou basique dans le cas inverse où ce sont les ions négatifs qui se déplacent cette fois-ci de la cathode à l'anode.



a. Les piles à combustible avec électrolyte acide [28]

a.1 La pile à hydrogène « PEM » (Proton Exchange Membrane)

Elle transforme l'énergie chimique, libérée par la réaction entre de l'hydrogène et de l'oxygène, en énergie électrique, formant ainsi des molécules d'eau.

Pour que cette pile fonctionne, la membrane qui compose l'électrolyte doit conduire les protons hydrogène sans conduire les électrons (Fig.V.2).

La pile à hydrogène est l'une des seules piles à combustible garantissant une réaction sans production de gaz à effet de serre. L'usage d'autres gaz que l'hydrogène dégrade la membrane et réduit considérablement sa durée de vie. C'est ce type de pile qui est utilisé dans les véhicules à hydrogène et dans les générateurs H2SYS.

Le combustible sous forme d'hydrogène présente l'avantage d'une technologie plus simple à mettre en œuvre et qui produit les meilleures densités de courant. Par contre, il est plus délicat à utiliser puisque incolore, inodore et inflammable dans l'air. Il nécessite aussi de la place pour le stockage ce qui, dans certaines utilisations, peut devenir une contrainte.

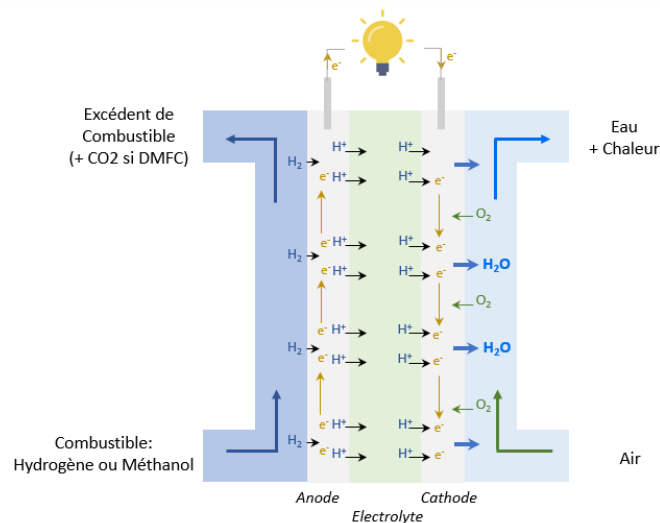


Figure V.2 : Schéma de principe d'une pile à Hydrogène et méthanol

a.2 La pile à méthanol « DMFC » (Direct Methanol Fuel Cell)

Le principe de pile à méthanol est le même que celui de la pile à hydrogène (Fig.V.2). Contrairement à l'hydrogène, qui est difficile à stocker qui doit être utilisé sous forme de gaz pressurisé pour faciliter l'usage, l'éthanol se stocke très facilement à température ambiante sous forme liquide. Néanmoins la membrane dans la pile à méthanol possède une faible efficacité et sa dégradation est importante avec le temps. De plus le méthanol reste un liquide toxique et inflammable et qu'il doit être manipulé avec précaution.

Au niveau des applications, ces piles à méthanol sont utilisés principalement pour la petite production énergétique (<3000W).

### **a.3 Les piles à acide phosphorique « PAFC » (Phosphoric Acid Fuel Cell).**

Dans ce cas, l'électrolyte de la PAFC est un liquide : l'acide phosphorique. Elle fonctionne sur la base d'une oxydoréduction électrochimique avec de l'oxygène et de l'hydrogène et permet la production d'électricité, d'eau et de chaleur. Fonctionnant sur une plage de température comprise entre 150°C et 200°C, de nombreux systèmes stationnaires ont été installés depuis les années 1990.

Elle permet notamment de répondre aux besoins sur des puissances importantes (100 kWe à 1MWe).

## **b. Les piles à combustible avec électrolyte basique**

### **b.1 La pile à oxyde solide « SOFC » (Solid Oxyde Fuel Cell)**

Les électrodes de la pile sont constituées avec des couches en céramiques poreuses permettant le passage des molécules de gaz. L'électrolyte, imperméable au gaz comme un isolant électrique, composé généralement par des matériaux polymère contenant de la zircone, de l'yttrium, ou du scandium. Ce type de pile est utilisé dans les chaudières.

### **b.2 La pile à potasse liquide « AFC » (Alkaline Fuel Cell).**

La pile est caractérisée par un électrolyte aqueux d'hydroxyde de métal alcalin, composé principalement de soude (NaOH) ou de potasse (KOH). Ces piles peuvent être utilisées à une température plus de 250°C comme dans le cas des navettes spatiales. On ne trouve pas ce type de pile dans des applications industrielles, son volume important, et l'intolérance au CO<sub>2</sub> (impossibilité d'utiliser de l'air ambiant) ont considérablement limité les usages.

### **b.3 La pile à carbonates fondus « MCFC » (Molten Carbonate Fuel Cell)**

L'électrolyte dans ce cas est formé le plus souvent d'un mélange de lithium-potassium. Ce type de pile fonctionne à haute température, environ 650°C, ce qui permet de valoriser les calories thermiques et d'utiliser des combustibles à base d'hydrocarbure en procédant à un reformage au niveau de l'anode. Elle est principalement utilisée dans des applications stationnaires.

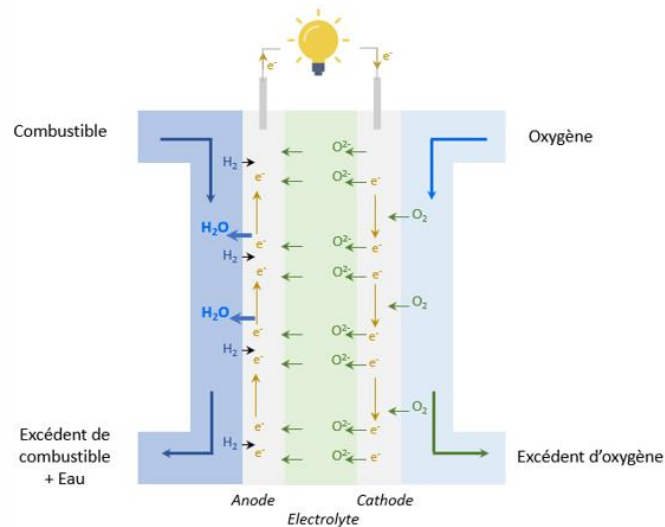


Figure V.3 : Schéma de principe d'une pile à combustible avec électrolyte basique

#### V.4.1.2 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

Avant de savoir si la pile à combustible est bien l'avenir dans le domaine du chauffage, vous avez certainement envie d'en connaître tous les avantages et les inconvénients pour vous laisser convaincre. Les voici résumés ici et vous pourrez constater que les avantages l'emportent très largement sur l'inconvénient majeur qui est le prix. La démocratisation du produit pourrait continuer à faire baisser ce tarif, cependant.

- Les avantages de la pile à combustible

- L'un des gros avantages de la pile à combustible est que l'électricité produite permet ce qui est appelé l'autoconsommation, c'est-à-dire à pourvoir le fonctionnement de vos appareils indispensables comme le réfrigérateur, le congélateur, votre box et vos appareils en veille. On considère que ce principe couvre environ 80 % des besoins en électricité réels d'une maison.
- Le rendement de la production de chaleur et d'électricité est particulièrement élevé.
- L'économie de consommation de gaz naturel dans le domaine de la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage est alors de l'ordre de 25 %.
- Elle réduit aussi considérablement la facture d'électricité.
- Le confort de chauffe est excellent.
- Le principe fonctionne sans perte sur le réseau de distribution puisque la production s'effectue sur place. Cette perte du réseau se chiffre à 20 %, sinon.
- Le fonctionnement est parfaitement économique, ce qui lui permet d'assurer une bonne rentabilité, malgré le coût élevé.

- La pile à combustible est parfaitement respectueuse de l'environnement et permet une réduction de l'ordre de 50 % des émissions de CO<sub>2</sub> du fait de la séparation entre chaleur et électricité.
- L'installation est pratiquement similaire à l'installation de tout autre principe de chauffage.
- **Les inconvénients de la pile à combustible**
  - Le principal inconvénient reste son prix, c'est certain, notamment pour le platine utilisé comme catalyseur au niveau des électrodes.
  - L'autre reproche qui pourrait lui être fait est de rester dépendant du gaz en partie, et donc de son prix, même s'il en réduit énormément la consommation.

#### **V.4.2 Batteries [29]**

Le stockage de l'énergie dans les batteries électrochimiques est la technique la plus répandue pour les petites quantités d'énergie électrique. En fonction du type de batterie (plomb-acide, lithium-ion, nickel-métal hydrure, etc.), différentes réactions chimiques sont provoquées à partir de l'électricité : il s'agit de la phase de charge de la batterie. Selon la demande, les réactions chimiques inversées produisent ensuite de l'électricité et déchargent le système.

Les batteries électrochimiques sont souvent destinées à des applications portables. De puissance relativement faible, elles présentent néanmoins une grande capacité de stockage pour des durées de décharge élevées (jusqu'à plusieurs heures) avec un taux de rendement de 70 à 80%. Ces dispositifs peuvent également avoir des fonctions de secours lorsque le réseau électrique est défaillant ou dans le cas d'une production d'électricité issue des énergies renouvelables, avec des valeurs d'énergie stockée de quelques Wh jusqu'à 40 MWh. L'inconvénient majeur est lié à leur durée de vie, limitée par les dégradations chimiques des réactions et leur coût.

#### **V.4.3 Supercondensateurs**

Les supercondensateurs sont des composants électriques constitués de deux armatures conductrices stockant des charges électriques opposées. Ils sont capables de délivrer une forte puissance pendant un temps très court. À la différence des batteries électrochimiques, ils peuvent se décharger en un temps de l'ordre de la seconde ou moins avec un rendement compris entre 80% et plus de 90%. Toutefois, ces dispositifs ne stockent pas de grandes

quantités d'énergie. Les supercondensateurs ont des applications dans le domaine des transports terrestres (système d'un feu rouge).

## Références

## Références

- [1] Mohamed Mladjao Mouhammad Al anfaf «Contribution a la modélisation et a l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 2016.
- [2] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et H. Mimouni « Evaluation du potentiel énergétique solaire » Bulletin des énergies renouvelables, N° 2, Décembre 2002.
- [3] Beslin Guy, Multon Bernard « Énergie éolienne : De son gisement à ses aérogénérateurs », Encyclopédie de l'énergie, 2016.
- [4] Roger Ginocchio, Pierre-Louis Viollet « l'énergie hydraulique », 2<sup>e</sup> édition, Collection EDF, Paris, 2012.
- [5] Nathalie Mayer« Énergies renouvelables : les avantages des matériaux composites », Revue de presse, Futura Planète, 2019.
- [6] Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi « Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque » Livre, 5<sup>ème</sup> Edition, Editions Techniques et Scientifiques Française, 2010.
- [7] Anne Labouret, Michel Villos « Installations photovoltaïques : Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau » Livre, 5<sup>eme</sup> édition, Editions le Moniteur, 2012.
- [8] Michel Tissot « L'énergie solaire, thermique et photovoltaïque » Livre, 2<sup>eme</sup> édition, Edition Eyrolles, 2012.
- [9] Robert Soler « L'énergie solaire : Des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain » Livre, Collection EDF, 2019.
- [10] Nicolas Richet « Les cellules photovoltaïques en silicium : Théorie et fabrication » Livre, EDP Sciences, 2016.
- [11] Jacques Bernard « Génie énergétique - Energie solaire : Calculs et optimisation » Livre, Collection Technosup, 2011.
- [12] Applications de l'énergie solaire thermique dans le bassin méditerranéen, AESTBM, Mars 2004.
- [13] [https://conseils.xpair.com/actualite\\_experts/maison-passive-quadri-solaire.htm](https://conseils.xpair.com/actualite_experts/maison-passive-quadri-solaire.htm)
- [14] <https://www.consoglobe.com/chauffe-eau-solaire-cg>
- [15] A. Ferrière, G. Flamant « Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration», 2005.

- [16] <http://www.chauffagesolaire.net/capteur-solaire.html>
- [17] <https://www.lepanneausolaire.net/les-differents-concepts-capteurs-tubes-sous-vide.php>
- [18] <http://www.chauffagesolaire.net/capteur-solaire.html>.
- [19] David J .C Mackay« L'énergie durable, pas que du vent ! » Livre, traduction de la 1ère édition anglaise par l'AMIDES, 2012.
- [20] Emmanuel Riolet « Le mini-éolien » Livre, Collection Eyrolles Environnement, 2010.
- [21] Alain Giret «Environnement, énergie hydraulique : Différentes formes, aménagements», Livre, Collection Technosup, 2014.
- [22] Roger Ginocchio, Pierre-Louis Viollet « L'énergie hydraulique » Livre, Collection EDF, 2012.
- [23] Régis Bourrier « Hydraulique appliquée : Milieux, écoulements, aménagements » Livre, Editions le Moniteur, 2018.
- [24] Pierre-Louis Viollet « Stockage de l'énergie par pompage », Techniques de l'ingénieur, 2014.
- [25] Philippe Savoie « Impacts du barrage des Trois Gorges sur le développement durable de la Chine », La revue électronique en sciences de l'environnement, volume 4, N.3, 2003.
- [26] Philippe Laplaige et Jean Lemale « Géothermie », Techniques de l'ingénieur, 2008.
- [27] Jean Lemale « La géothermie », Livre, Collection Technique et ingénierie, Dunod, 2015.
- [28] <https://www.h2sys.fr/fr/pile-a-combustible-pile-a-hydrogene-explications/>
- [29] Gabriel-Octavian Cimuca «système inertiel de stockage d'énergie associe à des générateurs éoliennes » Thèse de doctorat, L'école nationale supérieure D'arts et métiers, centre de Lille, 2005.