

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université de Ghardaïa**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de l'automatique et de l'électromécanique**

**Cours des énergies renouvelables**

*Préparés par :*

**Dr. Bouaraour Kamel**

Maître de Conférences A  
Université de Ghardaïa

## **Avant-propos**

Le présent document est destiné aux étudiants de Master 1 en énergies renouvelables en électrotechnique du système LMD. Ce module fait partie des modules de l'unité découverte avec un coefficient 2, et un crédit égal à 2. Le document est constitué de cinq chapitres. Le cours commence par un chapitre qui met en évidence les différents types des énergies fossiles et la relation entre les énergies renouvelables et le développement durable, suivi par le deuxième chapitre qui traite l'énergie solaire thermique avec ses deux principales branches qui sont: le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Le troisième chapitre concerne l'énergie éolienne, avec les différentes configurations présentes, tout en citant leurs avantages et leurs inconvénients. L'énergie hydraulique ou hydro-électrique est l'objet du quatrième chapitre, avec les différents types des centrales hydro-électriques. Le dernier chapitre est consacré à l'étude d'énergie géothermique, une énergie qui permet de produire de l'électricité à partir des sources thermiques, en impliquant des techniques de l'extraction de la chaleur stockée à la profondeur. Ce cours est souvent ré-enrichi par des statistiques issues des sites internet, des tableaux et des figures démonstratifs.

Certains chapitres vont aider les étudiants à comprendre ou approfondir leurs connaissances dans quelques modules fondamentaux comme le module de transfert de chaleur, la mécanique des fluides et le module de gisement solaire.

## Sommaire

### **Chapitre 1 : Les ER et le développement durable**

1.1 Introduction .....	02
1.2 Définition des énergies renouvelables .....	02
1.3 Les formes des énergies renouvelables .....	02
1.4 Protocole de Kyoto .....	03
1.5 Pourquoi les énergies renouvelables .....	03
1.5.1) Changement climatique .....	04
1.5.2) Augmentation de la demande d'énergie .....	05
1.5.3) Limitation des réserves de combustible fossile .....	05
1.5.4) Ouverture du marché de l'électricité .....	06
1.6 Perspectives technologiques .....	07

### **Chapitre 2 : L'énergie solaire**

2.1 Introduction .....	10
2.2 L'énergie solaire thermique .....	11
2.2.1 Constitution physique du soleil .....	11
2.2.2 Rayonnement thermique .....	12
2.2.3 Le spectre électromagnétique .....	13
2.2.4 Réception du rayonnement par un corps réel .....	13
2.2.5 Les lois du rayonnement thermique .....	15
• La loi de Planck .....	15
• La 1 <sup>ère</sup> loi de Wien .....	15
• La 2 <sup>ème</sup> loi de Wien .....	16
• La loi de Stefan-Boltzman .....	16
2.2.7 Les avantages et les limites .....	16
2.3 L'énergie solaire Photovoltaïque .....	17
2.3.1 Principe de fonctionnement .....	17
2.3.2 L'effet photovoltaïque .....	17
2.3.3 Principe des cellules photovoltaïque .....	19
2.3.4 Technologies de cellules photovoltaïques .....	20
2.3.5 Rendement d'une cellule .....	21
2.3.6 Influence de la température .....	22
2.3.7 Influence de l'éclairement .....	22
2.3.8 Avantages et inconvénients .....	23

### **Chapitre 3 : L'énergie éolienne**

3.1 Définition .....	25
3.2 Principe de fonctionnement .....	25
3.3 Classement des éoliennes .....	26
3.4 Type d'installation éolienne .....	26
3.4.1 Eolienne à axe vertical .....	27

•    Le rotor de Savonius .....	27
•    Le rotor de Darrieus .....	28
3.4.2 Eolienne à axe horizontal .....	28
3.5 Composantes d'une éolienne .....	29
3.5.1 Le rotor .....	30
3.5.2 La nacelle .....	30
3.5.3 La tour .....	31
3.6 Avantages et inconvénients .....	33

#### **Chapitre 4 : Energie hydraulique**

4.1 Définition .....	34
4.2 Principe de fonctionnement .....	34
4.3 Les installations hydro-électriques .....	34
4.3.1 Les centrales de basse chute .....	35
4.3.2 Les centrales de moyenne chute .....	35
4.3.3 Les centrales de haute chute .....	37

#### **Chapitre 5 : Energie géothermique**

5.1 Introduction .....	39
5.2 Définition .....	39
5.3 La géothermie à très basse énergie .....	39
5.4 La géothermie basse énergie .....	39
5.5 La géothermie haute énergie .....	40
5.6 Les avantages et les limites .....	41

<b>Références bibliographiques</b> .....	42
--	----

**Chapitre 1 :**  
**Les énergies renouvelables et le**  
**développement durable**

## 1.1 Introduction

C'est en 1986 qu'a été défini le concept du développement durable comme suit : « satisfaire les besoins du présent sans hypothéquer la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ».

Ce concept implique de s'intéresser au développement de nouvelles sources d'énergie et de minimiser les rejets affectant l'environnement. Les combustibles fossiles apparaissent comme une ressource finie et économiquement limitée, induisant des émissions affectant l'environnement et contribuant au changement climatique. Un système énergétique durable doit intégrer des sources d'énergies renouvelables et des chaînes combustibles à faible émissions, accessibles à des coûts acceptables. Malgré le fait que la mise en place de nouvelles infrastructures énergétiques prend plusieurs décennies, un nombre croissant de grandes compagnies s'impliquent dans le développement et la commercialisation de ces nouvelles technologies.

## 1.2 Définition des énergies renouvelables

Les énergies sont dites "renouvelables" tant qu'elles dépendent du système écologique de la terre, de l'insolation et de l'énergie géothermique de la terre. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités.

## 1.3 Les formes des énergies renouvelables

En pratique, les sources énergétiques renouvelables sont :

- **l'énergie solaire** : se manifeste sous forme de chaleur solaire à basse température, chaleur solaire à haute température, électricité éolienne et photovoltaïque. La chaleur solaire à basse température est produite par l'absorption de la lumière du Soleil par des surfaces assombries qui la convertissent en chaleur pour être utilisée pour chauffer de l'eau ou d'autres fluides.

La chaleur solaire à haute température, au contraire, est obtenue en faisant concentrer la lumière du Soleil et les fluides de chauffage à haute température pour générer de l'électricité.

Le photovoltaïque (appelé aussi électricité solaire) est la transformation directe du composant ultraviolet de la lumière du Soleil en électricité dans des endroits appropriés.

- **l'énergie éolienne** : est générée par les vents issus de turbulences causées par le réchauffement (inégal) de l'atmosphère par la chaleur solaire. La plupart des parcs éoliens sont aujourd'hui constitués

d'éoliennes (connectées en réseau) qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Les moulins à vent –qui ont été des applications du vent au début du siècle dernier - sont pour la plupart utilisés aujourd'hui pour le pompage de l'eau.

- **l'énergie géothermique** : se manifeste sous forme d'eau chaude ou de vapeur et peut être utilisée pour le chauffage ou pour la production d'électricité dans certaines régions spécifiques. Actuellement les technologies utilisant l'énergie géothermique favorisent la production de l'électricité et sont encore à un stade de développement embryonnaire [01].
- **la puissance hydraulique** : L'énergie hydraulique désigne l'énergie que les centrales hydrauliques arrivent à produire à partir de la force de l'eau. Basée sur le principe du barrage qui par sa construction va réussir à capter l'ensemble de la force produite par l'eau, l'énergie hydraulique ou hydroélectricité a des avantages certains, mais également quelques inconvénients comme notamment celui du coût de la construction d'une centrale [02].
- **l'énergie biomasse** : La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux [03].

#### **1.4 Protocole de Kyoto**

En 1997, le protocole de Kyoto a fixé comme objectif de réduire de 5,2% les rejets de gaz à effet de serre du monde vers 2010 par rapport à 1990. L'Union Européenne s'est engagée à une réduction de 8% de ses émissions pour 2010, et chacun de ses membres s'est vu attribuer son propre quota de réduction de ses émissions en tenant compte des particularités de chaque pays. Plus de la moitié des pays doivent réduire leurs émissions (Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Italie, Luxembourg, Pays-Bas), certains pays doivent stabiliser leurs émissions (France, Finlande), tandis que d'autres pays sont autorisés à accroître leurs émissions (Grèce, Irlande, Portugal, Espagne, Suède).

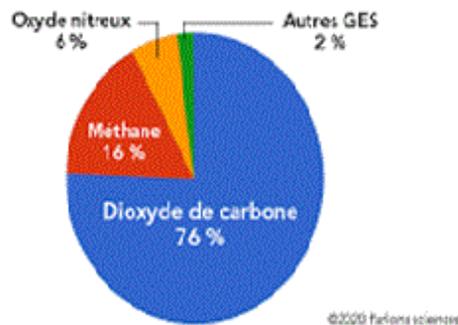
Pour cesser à l'horizon 2050, d'augmenter la concentration de gaz carbonique présent dans l'atmosphère, il faudrait diviser par deux nos émissions actuelles au niveau planétaire et donc les diviser par 3 à 5 dans les pays développés [04].

#### **1.5 Pourquoi les énergies renouvelables**

La capacité de l'atmosphère à absorber sans danger des substances toxiques est depuis longtemps dépassée. L'utilisation de pétrole, de gaz naturel, de charbon et d'uranium comporte encore d'autres risques : ces ressources sont seulement disponibles en quantité limitée, leurs prix sont en forte augmentation et elles créent des dépendances politiques et économiques. Grâce aux énergies renouvelables, nous disposons de sources d'énergie qui peuvent être utilisées sans qu'elles émettent de substances toxiques, et qui se renouvellent constamment par des processus naturels si bien que, mesurée à l'échelle de la vie humaine, elles seront disponibles à l'infini.

### 1.5.1 Changement climatique

L'augmentation de l'effet de serre augmente la température globale de la surface de la planète. Or, du fait de l'activité humaine, la concentration des gaz à effet de serre a explosé depuis la période préindustrielle (1750-1800). La concentration de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), principal gaz à effet de serre, a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle. Les effets combinés de tous les gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane, ozone,...) équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% du CO<sub>2</sub> depuis cette période. Depuis 1860, la température moyenne à la surface de la terre a augmenté de 0,6°C. Différents scénarios prospectifs prévoient que d'ici 2100, cette température devrait encore augmenter entre 1,5 et 6°C si les filières énergétiques et les habitudes de consommation actuelles ne sont pas modifiées. Cette augmentation considérable s'accompagnerait, en particulier, d'une montée du niveau des mers de 20 cm à 1 m. La figure 1.1 présente l'émission mondiale des gaz à effet de serre en 2015.



**Figure 1.1** : Emissions mondiale des gaz à effet de serre [05]

Les puits naturels de CO<sub>2</sub> que sont les sols, les arbres et les océans ne seraient capable de résorber qu'un peu moins de la moitié de la production de CO<sub>2</sub> d'origine humaine (produite en 2000). Afin de stabiliser la concentration de CO<sub>2</sub> à son niveau actuel, il faudrait donc réduire immédiatement de 50 à 70% les émissions de ce gaz. Si cette réduction brutale est impossible, il est cependant urgent d'agir, car on se trouve face à un problème cumulatif. En effet, la durée de vie du gaz carbonique dans

l'atmosphère étant de l'ordre du siècle, il faudra plusieurs générations pour obtenir la stabilisation des concentrations de CO<sub>2</sub> à un niveau acceptable.

Le CO<sub>2</sub> est produit par la combustion de tous les combustibles fossiles : pétrole, gaz et charbon. Les rejets de CO<sub>2</sub> sont environ deux fois plus importants pour le charbon que pour le gaz naturel, ceux liés au pétrole se situant entre les deux.

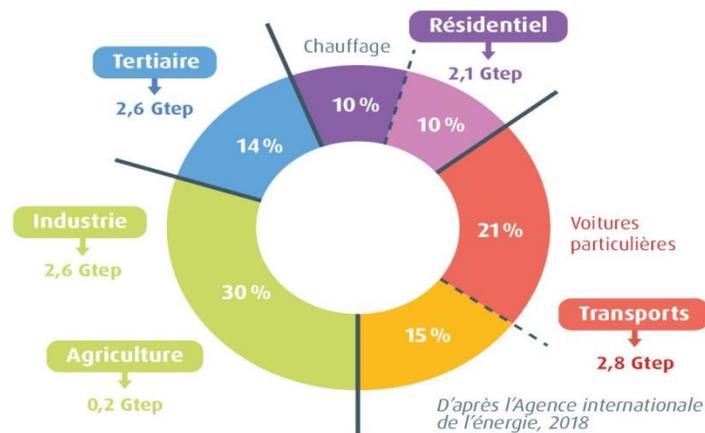
Au début des années 2000, la répartition par secteur des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde est la suivante : production électrique 39%, transport 23%, industrie 22%, résidentiel 10%, tertiaire 4% et agriculture 2%. Cette répartition est cependant très différente d'un pays à l'autre.

### 1.5.2 Augmentation de la demande d'énergie

On appelle « énergie fossile », l'énergie que l'on produit à partir de roches issues de la fossilisation des êtres vivants : pétrole, gaz naturel et charbon. Elles sont présentes en quantité limitée et sont non renouvelables.

Le pétrole est l'énergie fossile la plus utilisée. Il est concentré d'énergie idéal : liquide, il est facilement transportable. En le brûlant en petites quantités, on obtient suffisamment d'énergie pour faire tourner des moteurs qui entraînent toutes sortes de véhicules et permettent à toutes sortes de machines de fonctionner. De plus, on peut le transformer en une grande quantité de produits qui sont devenus les matières premières de notre environnement quotidien : plastiques, textiles synthétiques... et bien d'autres produits divers et variés.

En 2000, la consommation énergétique mondiale était d'environ une dizaine de **Gtep** (tep = tonne équivalent pétrole, 1 tep correspond à l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole). Les combustibles fossiles représentent environs 8 Gtep. La figure ci-dessous montre la consommation mondiale d'énergie en 2018.



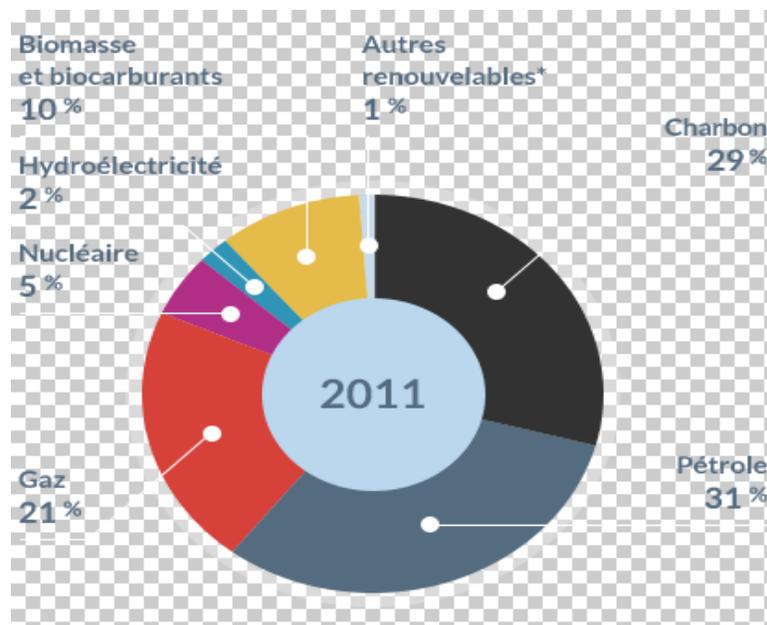
**Figure 1.2 :** Consommation mondiale d'énergie en 2018 [06]

De nombreux scénarios énergétiques sont élaborés chaque année par des organismes spécialisés dans le domaine de l'énergie. Ces scénarios pour la demande d'énergie en 2050 vont de 15 à 25 Gtep. Cela est dû à l'augmentation de la population mondiale, l'accès progressif à l'électricité et les besoins croissants des pays en voie de développement.

### 1.5.3 Limitation des réserves de combustible fossile

Les réserves connues du pétrole sont d'environ 40 ans de consommation, à consommation inchangée. Cependant, les avis des experts varient entre 20 ans et 80 ans suivant qu'ils prévoient un accroissement de la consommation ou la découverte de nouvelles réserves.

Les réserves connues de gaz naturel sont de plus de 60 ans à consommation inchangée et l'on trouve chaque année plus de gaz que nous n'en consommons. Mais si l'on remplaçait le pétrole et le charbon par le gaz pour réduire les émissions à effet de serre, les réserves ne seraient plus que de 17 ans. L'abandon du nucléaire au profit du gaz par certains pays pourrait accélérer la consommation des ressources. Le charbon est le combustible fossile dont les réserves sont les plus importantes. Ces réserves sont estimées à plus de 200 ans. La figure 1.3, représente la répartition des ressources fossiles en 2011 [14].



**Figure 1.3 :** Répartition des ressources fossiles en 2011 [07].

### 1.5.4 Ouverture du marché de l'électricité

Depuis le début des années 2000, le secteur de l'électricité connaît une profonde restructuration résultant de la Directive européenne CE 96-92. Cette Directive impose une gestion des activités inhérentes au transport de l'électricité indépendante de celles de production de l'énergie électrique. L'épine dorsale du réseau électrique reste uniquement le réseau de transport, géré dans chaque état par un gestionnaire unique désigné par le gouvernement concerné.

Une des conséquences de l'ouverture du marché de l'électricité est le développement d'une production décentralisée, sur la base d'unités de cogénération, de sources d'énergie renouvelable ou de production traditionnelle installée par des producteurs indépendants.

L'intégration dans les réseaux électriques des sources à énergie renouvelables, et plus particulièrement celles soumises aux aléas du climat telles que les énergies éolienne et solaire, et d'une manière plus générale de la production décentralisée nécessite d'importants aménagements de ces réseaux, ainsi que la mise en œuvre de nouveaux équipements et de nouvelles méthodes de gestion. Le tableau ci-dessous représente la production mondiale de l'électricité par les différentes sources [08].

**Tableau 1.1** : Production mondiale de l'électricité en 2006 (Mtep).

Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Électricité nucléaire	Électricité hydraulique	Énergies renouvelables	Total
12,4	91,8	40,3	112	5,6	13,1	275,3
4,5 %	33 %	14,4 %	41 %	2 %	4,6 %	100 %

Dans ce bilan primaire, l'électricité d'origine nucléaire occupe la première place avec 41 %, devant le pétrole et loin devant les autres sources.

### 1.6 Perspectives technologiques

Il est difficile d'identifier les technologies qui joueront un rôle déterminant à l'avenir dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre. Un système énergétique futur à faibles émissions de gaz à effet de serre reposera probablement sur une combinaison d'énergies, de vecteurs et de convertisseur d'énergie qui revêtira des formes différentes dans les diverses régions du monde.

Il est cependant possible de cerner quelques tendances de notre futur énergétique :

- Un accroissement de la part des énergies renouvelables est prévisible, mais son importance dépendra de la réduction de leurs coûts et des progrès réalisés dans le stockage massif de l'électricité qui permettrait d'intégrer dans les réseaux électriques de grandes quantités de productions discontinues et éparpillées. A long terme, il est cependant peu probable que chacune des sources d'énergie renouvelable dépasse 10% de l'approvisionnement mondial en

énergie, mais d'après les plus prévisions les plus optimistes leur combinaison pourrait leur permettre d'atteindre 30 à 50% du marché vers le milieu du siècle.

- Les énergies fossiles seront encore utilisées durant plusieurs dizaines d'années en favorisant les énergies à contenu carboné faible tel que le gaz. Cependant la capture et le stockage du gaz carbonique dans des conditions économiquement supportables constitue la seule option technologique susceptible d'autoriser un usage des ressources fossiles tout en limitant la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, et en attendant des évolutions technologiques importantes.
- L'énergie nucléaire ne génère pas de CO<sub>2</sub>, à l'exception du CO<sub>2</sub> émit lors de la construction des centrales et de l'enrichissement de l'uranium consommé dans les centrales. Ce type d'énergie continuera à être développée dans un certain nombre de pays, dont la France, moyennant un traitement satisfaisant de la gestion des déchets, le développement d'une nouvelle génération de réacteur plus sûr, puis à long terme le développement de la fusion nucléaire dont les perspectives se situent cependant bien au-delà de 2050.
- Le développement des piles à combustible pourrait permettre le développement d'une « économie de l'hydrogène ». La production d'hydrogène ne génère pas de CO<sub>2</sub> si l'hydrogène est produit à partir d'énergies renouvelables, nucléaire ou fossiles avec séquestration du CO<sub>2</sub>.
- Enfin, la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre ne pourra se concrétiser sans des progrès importants de l'efficacité énergétique dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports. L'enjeu est d'utiliser moins d'énergie pour satisfaire les mêmes besoins.

## **Chapitre 2 : L'énergie solaire**

## L'énergie solaire

### 2.1 Introduction

Elle se manifeste sous forme de chaleur solaire à basse température, chaleur solaire à haute température, électricité éolienne et photovoltaïque. La chaleur solaire à basse température est produite par l'absorption de la lumière du soleil par des surfaces assombries qui la convertissent en chaleur pour être utilisée pour chauffer de l'eau ou d'autres fluides. La chaleur solaire à haute température, au contraire, est obtenue en faisant concentrer la lumière du soleil et les fluides de chauffage à haute température pour générer de l'électricité. Le photovoltaïque (appelé aussi électricité solaire) est la transformation directe du composant ultraviolet de la lumière du soleil en électricité dans des endroits appropriés.

### 2.2 L'énergie solaire thermique

Il consiste à produire de l'eau chaude utilisable dans des bâtiments ou permettant d'actionner des turbines comme dans les centrales thermiques classiques pour produire de l'électricité. Cette technique de production de l'électricité a fait l'objet de centrales expérimentales dont le rendement net de 15% s'avère faible.

#### 2.2.1 Constitution physique du 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. La masse du soleil représente 99.85 % de la masse totale du système solaire et 330000 fois la masse de la terre. L'âge du soleil est approximativement de 5 milliards d'années. La température apparente de la surface du soleil a voisine 5750 °C.

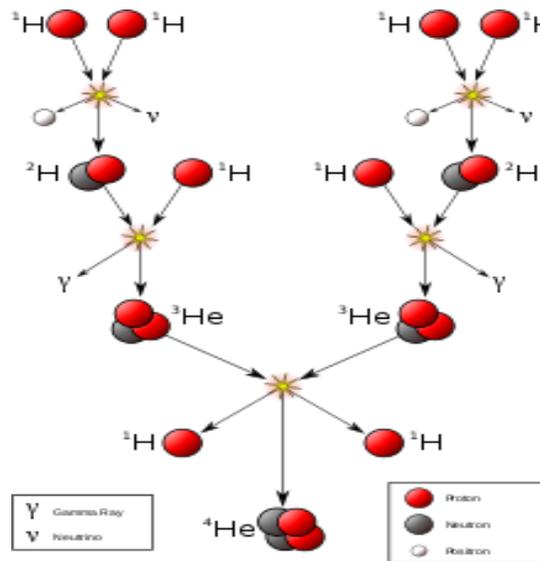
**Tableau 2.1** : Informations sur le soleil [09]

Diamètre (km)	$14 \times 10^5$
Masse (kg)	$2 \times 10^{30}$
Surface (km <sup>2</sup> )	$6.09 \times 10^{12}$
Volume (km <sup>3</sup> )	$1.41 \times 10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5 \times 10^{17}$

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de  $14 \times 10^5$  km de diamètre, sa masse est de l'ordre de  $2 \times 10^{30}$  kg. Il est constitué principalement de 75% d'hydrogène, de 24% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km.

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

Le noyau : contient 40% de la masse du soleil, c'est dans le cœur que se produisent les réactions thermonucléaires exothermiques (fusion nucléaire) qui transforment, dans le cas du soleil, l'hydrogène en helium.



**Figure 2.1** : La fusion nucléaire

Le Soleil tire son énergie des réactions de fusion nucléaire qui transforment, en son noyau, l'hydrogène en hélium. Environ  $3,4 \times 10^{38}$  protons (noyaux d'hydrogène), soit 619 millions de tonnes d'hydrogène, sont convertis en 614 millions de tonnes d'hélium chaque seconde, libérant une énergie correspondant à l'annihilation de 4,26 millions de tonnes de matière par seconde, produisant 383 Yottajoules ( $383 \times 10^{24}$  J) par seconde, soit l'équivalent de l'explosion de  $91,5 \times 10^{15}$  tonnes de TNT (voir la figure 2.1)

C'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25.10^4$  km, elle présente les caractéristiques suivantes : [10]

- Une température de  $15.10^6$  °C.
- Une densité est de  $10^{15}$  kg/m<sup>3</sup>.

La zone radiative : où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes :

- Une épaisseur de 244160 km.
- Une température variant de  $5.10^5$  °C à  $10.10^6$ °C.

La zone de convection : où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes:

- Une température comprise entre  $50.10^4$ °C à 6400 °C.
- Une épaisseur de l'ordre 199758 km.

La photosphère : est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes: [10]

- La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
- Une épaisseur de 500 km.

La chromosphère : constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes :

- Une épaisseur 2000 km.
- Une température augmentant de 4200 °C à  $10^5$  °C.

La couronne : est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont :

- Elle est sans limite précise.
- La température augmente de  $10^6$ °C à  $2.10^6$ °C. [10]

### 2.2.2 Rayonnement thermique

Tous les corps, quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie dit "thermique" s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur. Une des particularités de ce rayonnement est qu'il peut se propager dans le vide. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission. Le flux total émis par une surface rapporté à l'unité de cette surface exprimé en W/m<sup>2</sup> est appelé émittance énergétique [11]:

$$M_T = d\phi/dS \quad (2.1)$$

Cette émittance peut être définie en fonction de la longueur d'onde. Il s'agit alors de l'émittance monochromatique  $M_\lambda$  telle que :

$$M_T = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda \quad (2.2)$$

- Lorsque le rayonnement est le même dans toutes les directions de l'espace on dit qu'il est *isotrope*.
- Lorsque la répartition spatiale du rayonnement est indépendante de la longueur d'onde on dit qu'il est *homogène*.
- Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit. Dans ces conditions, le flux réfléchi est nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis.

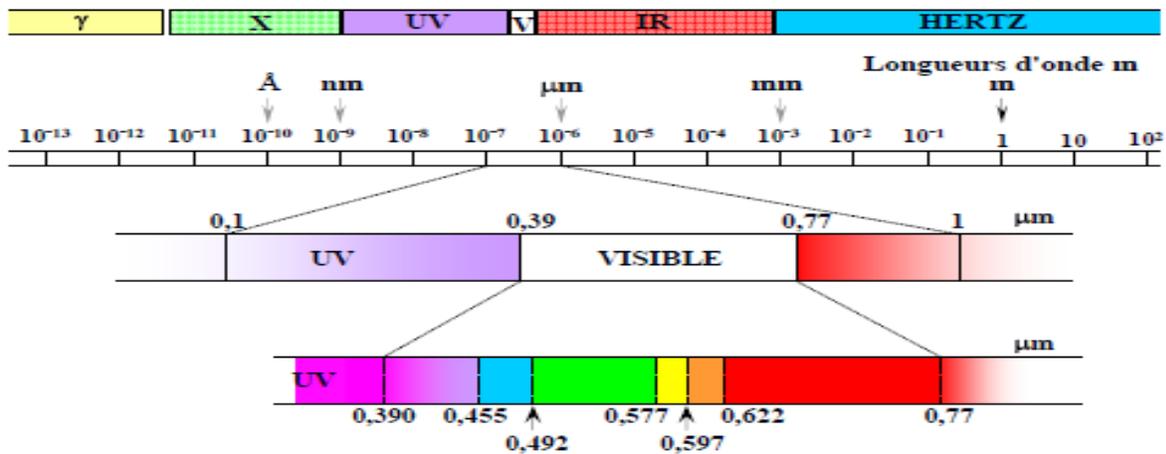
### 2.2.3 Le spectre électromagnétique

Les ondes sont caractérisées par leurs longueurs d'onde  $\lambda$  ou par leurs fréquences  $\nu$ , tel que :

$$C = \lambda \cdot \nu \quad (2.3)$$

dans un milieu d'indice  $n$ , ( $C = C_0/n$ ).

$C_0 = 3 \cdot 10^8$  m/s est la vitesse de la lumière dans le vide.

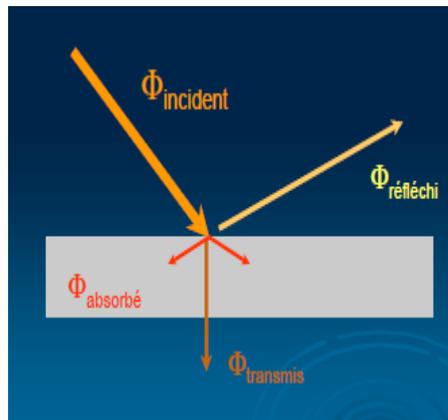


**Figure 2.2 :** Le spectre électromagnétique

### 2.2.4 Réception du rayonnement par un corps réel

Le flux incident  $\varphi_i$  est défini comme la puissance surfacique du rayonnement incident en un point considéré de la surface du corps étudié (figure suivant). Une partie de l'énergie incidente est réfléchie par la surface  $S$ , une autre partie est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste est transmis :

$$\varphi_i = \varphi_{\text{abs}} + \varphi_{\text{trans}} + \varphi_{\text{réf}} \quad (2.4)$$



**Figure 2.3** : Réception du rayonnement par un corps réel

- **Absorption**

Il s'agit de l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé (noté  $\varphi_{abs}$ ). Le rapport entre le flux absorbé et le flux incident est appelé coefficient d'absorption :

$$\alpha = \varphi_{abs} / \varphi_i \quad (2.5)$$

- **Réflexion et diffusion**

Au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi. Dans ces conditions on distingue 2 cas :

- Le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique (un angle d'incidence, un angle de réflexion). Il s'agit alors de réflexion.
- Le renvoi se fait dans toutes les directions (même si l'on a une seule direction incidente). On parle alors de diffusion. On note que l'onde diffusée ou émise a la même fréquence que l'onde incidente. La somme de ces deux flux est notée  $\varphi_{réf}$ . Le rapport entre le flux réfléchi et le flux incident est appelé coefficient de réflexion :

$$\rho = \varphi_{réf} / \varphi_i \quad (2.6)$$

- **Transmission**

Le rapport entre le flux transmet et le flux incident est appelé coefficient de transmission :

$$\tau = \varphi_{trans} / \varphi_i \quad (2.7)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.8)$$

## 2.2.5 Les lois du rayonnement thermique

- **La loi de Planck**

La loi de Planck donne la répartition suivant la longueur d'onde du flux émis d'un corps noir à la température T [12].

$$M_{\lambda}^0 = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{k\lambda T} - 1} \quad (W/m^3) \quad (2.9)$$

$h = 6,6255 \cdot 10^{-34}$  J.s est la constante de Planck.

$k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$  J/K est la constante de Boltzmann.

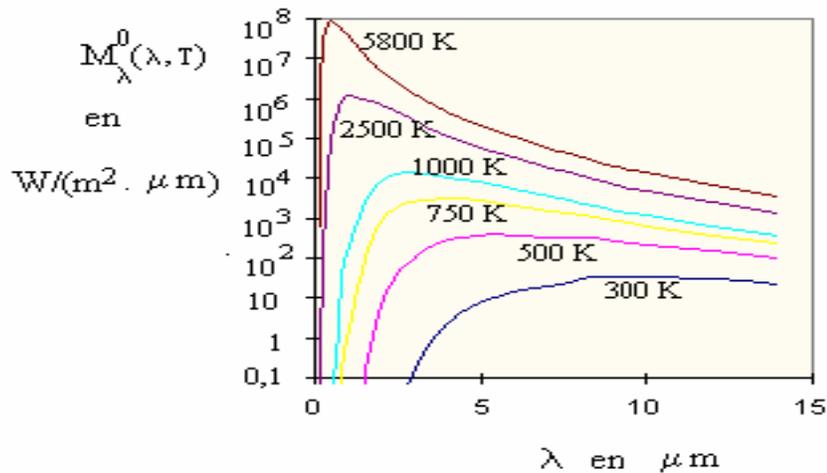
Dans le vide ( $n=1$ ) ou dans l'air sec, la loi de Planck se simplifie a :

$$M_{\lambda}^0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (W/m^3) \quad (2.10)$$

$\lambda$  en mètre et T en Kelvin.

$$C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3,741 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2$$

$$C_2 = h C_0 / k = 0.014388 \text{ m.K}$$



**Figure 2.4** : L'émissance en fonction de la longueur d'onde

- **La 1<sup>ère</sup> loi de Wien**

Cette loi permet d'exprimer pour quelle longueur d'onde  $\lambda_m$  l'émissance monochromatique est maximale. Il suffit d'annuler la dérivée de l'émissance [12]:

$$\frac{dM_{\lambda}}{d\lambda} = 0 \quad (2.11)$$

On obtient alors une relation simple :

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \quad (2.12)$$

- **La 2<sup>ème</sup> loi de Wien**

Elle exprime la valeur de l'émittance monochromatique maximale. Pour cela il suffit de remplacer  $\lambda_m$  par sa valeur dans la loi de Planck [12] :

$$M_{max} = B \cdot T^5 \quad (2.13)$$

Avec :  $B=1,287 \cdot 10^{-11}$  (W/ $\mu\text{m.m.K}^{-5}$ ) et T en Kelvin.

- **La loi de Stefan-Boltzman**

La loi de Stéfán est la simple intégration de la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde. Elle définit l'émittance totale du corps noir dans le vide en fonction de sa température absolue.

$$M^0 = \sigma \cdot T^4 \quad (2.14)$$

Avec la constante :  $\sigma = 5.67 * 10^{-8}$  ( $\frac{W}{m^2K^4}$ )

## 2.2.7 Les avantages et les limites

### Les avantages

- C'est une énergie renouvelable qui contrairement à des idées reçues peut être utilisée dans de nombreuses régions. L'intérêt de l'énergie solaire tient autant à l'ensoleillement au  $m^2$  qu'à la durée de son utilisation (période de chauffage longue). C'est pourquoi le chauffage solaire est aussi intéressant à développer.
- C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas l'atmosphère.
- Pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le chauffage, les coûts d'installation ne sont pas très élevés.

### Les limites

- La nuit, la source d'énergie n'existe plus, il faut donc prévoir des systèmes de stockage.
- La production d'électricité à partir du solaire est pour l'instant encore assez coûteuse car les cellules photovoltaïques sont chères à fabriquer.
- La rentabilité économique des projets dépend du prix de rachat de l'électricité.

## 2.3 Le solaire photovoltaïque

Il consiste à produire directement de l'électricité au moyen de cellules au silicium. La production d'un panneau photovoltaïque varie avec l'ensoleillement : 100 kWh/m<sup>2</sup>/an en Europe du Nord, deux fois plus en région méditerranéenne.

Les principaux freins à l'utilisation massive du solaire photovoltaïque (et thermique) sont la disponibilité de la puissance fournie qui contraint au stockage de l'électricité pour une utilisation autonome ou à l'utilisation de solutions énergétiques complémentaires, d'une part, et de la compétitivité économique, d'autre part.

### 2.3.1 Principe de fonctionnement

Lorsqu'il brille et que les conditions climatiques sont favorables, le soleil fournit une puissance de 1 kW/m<sup>2</sup>. Les panneaux photovoltaïques commercialisés permettent de convertir directement en électricité 10 à 15% de cette puissance. Un toit photovoltaïque de 5x4 mètres a une puissance de 3 kW et produit de 2 à 6 MWh/an, suivant l'ensoleillement.

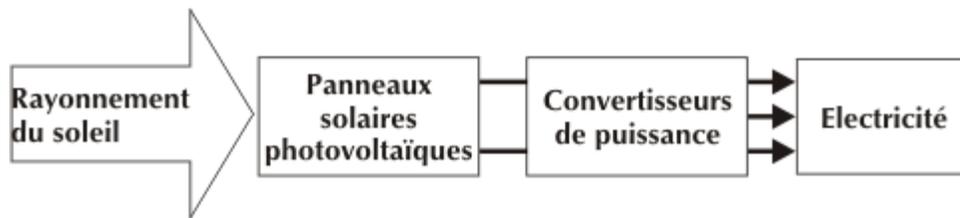


Figure 2.5 : Principe de fonctionnement

### 2.3.2 L'effet photovoltaïque

La transformation de l'énergie solaire «photon» en énergie électrique «volt» a été découverte en 1839 par le physicien A. Becquerel. Cet effet met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

#### ❖ L'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques [12]:

- La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet
- La transmission : la lumière traverse l'objet
- L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

L'énergie d'un photon est donnée par :

$$E=h.v= h.C/\lambda \quad (2.15)$$

avec : h : constante de Planck ( $6,62.10^{-34}$  J.s).

v : fréquence (Hz).

c : vitesse de la lumière ( $3.10^8$  m/s).

$\lambda$  : longueur d'onde (m).

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restitué sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir : lumière du soleil ou des autres sources artificielles.

#### ❖ Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Comment l'énergie lumineuse est-elle convertie en électricité ?

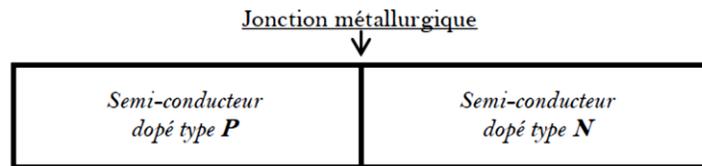
Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires contenus dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons vont absorber leur énergie aux électrons périphériques, ce qui leur permet de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur.

#### ❖ La collecte des charges

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Il faut donc les attirer hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique.

Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté. C'est possible grâce au dopage du semi-conducteur. La jonction d'une photopile au silicium est constituée d'une partie dopée au phosphore ( P), dite de type n, accolée à une partie dopée au bore ( B ), dite de type p. C'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives (voir la figure 2.6).



**Figure 2.6** : Création du champ électrique [13]

### 2.3.3 Principe des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photo-sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque.

En effet, une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- Pour la couche P, déficit d'électrons.

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (cf. figure 1). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti-reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

### 2.3.4 Technologies de cellules solaires

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium, semi-conducteur de type IV. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature.

On utilise également l'arséniure de gallium et des couches minces comme de CdTe (tellurure de cadmium) et le CIS (cuivre-indium-diséléniure) et encore le CIGS.

Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- Les cellules monocristallines
- Les cellules poly-cristallines
- Les cellules amorphes
- Les cellules CdTe, CIS, CIGS

Le tableau suivant présente les rendements typiques et théoriques que l'on peut obtenir avec ces différentes technologies.

Le tableau suivant présente les rendements typiques et théoriques que l'on peut obtenir avec ces différentes technologies.

**Tableau 2.2:** Rendements des différentes technologies

	Rendement typique	Rendement théorique
mono	12-16	24
poly	11-13	18.6
amorphe	5-10	12.7

### 2.3.5 Rendement d'une cellule

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \quad (2.16)$$

avec : E : éclairement (W/m<sup>2</sup>)

S : surface active des panneaux (m<sup>2</sup>)

P<sub>m</sub> est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5 (**Air Mass 1.5** : composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale) [14], une température de 25°C, et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

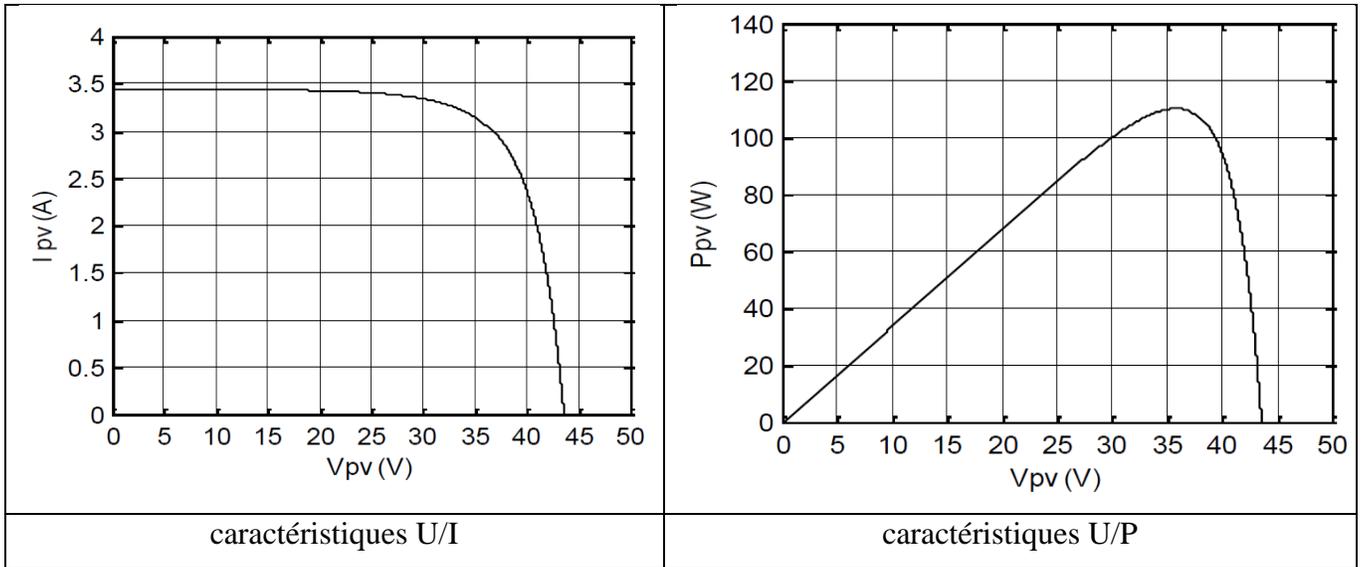
Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium AsGa donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre.

Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%.

D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

Le courant de court-circuit I<sub>cc</sub>, soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du photo-courant I<sub>ph</sub>.

- La tension de circuit ouvert V<sub>co</sub>, soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P<sub>max</sub> ou MPP.



**Figure 2.7** : Les courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [15]

Le facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2.17)$$

### 2.3.6 Influence de la température

Le rendement d'une cellule solaire dépend de l'éclairement et grandement de la température. La température est un paramètre important puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire, susceptible de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température d'une cellule est toujours plus élevée que la température ambiante.

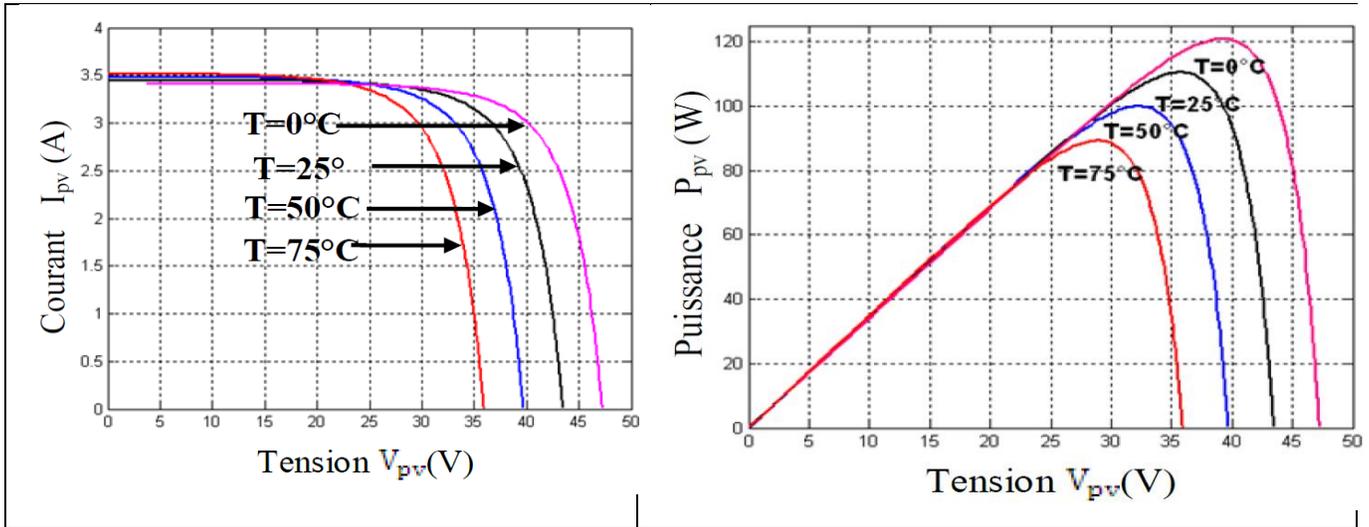
Pour estimer la température de cellule  $T_c$  à partir de la température ambiante  $T_a$ , on peut utiliser la formule de correction suivante :

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (T_{UC} - 20) \quad (2.18)$$

avec :

$E_m$  : éclairement moyen ( $W/m^2$ ).

$T_{UC}$  : Température d'utilisation de cellule ( $^{\circ}C$ ).

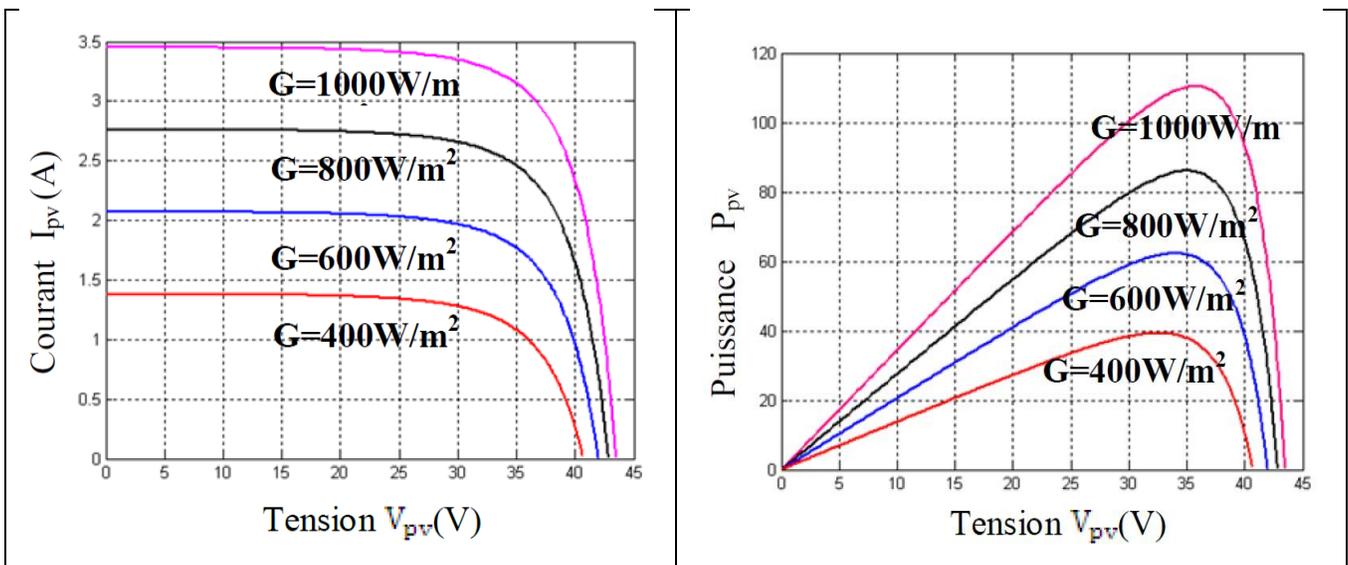


**Figure 2.8** : Influence de la température sur le courant et la puissance d'une cellule [15]

### 2.3.7 Influence de l'éclairement

Le photo-courant est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux. Le courant est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous de faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charge et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement.

Le photo-courant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface  $S$  de la jonction soumise au rayonnement solaire; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée.



**Figure 2.9** : Influence de l'éclairement sur le courant et la puissance d'une cellule [15]

On peut également travailler à tension  $U$  constante, car la variation de  $U_p$  max avec l'éclairement est infime (figure 2.9). La perte de puissance ne serait pas significative.

Pour augmenter l'éclairage des cellules, il est conseillé de les orienter pour que les rayons solaires les frappent perpendiculairement. Pour ce faire, on peut utiliser des panneaux possédant une orientation fixe mais des panneaux à inclinaison variable sont encore plus efficaces. Par exemple, en hiver un panneau couché sur le sol est deux fois moins efficace qu'un panneau incliné pour faire face au soleil.

### **2.3.8 Avantages et inconvénients**

Les panneaux solaires photovoltaïques présentent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients que nous allons citer ci-dessous [13]:

#### **Avantages**

- Cette énergie renouvelable est gratuite. Elle n'est pas taxée et n'engendre pas de rejets dans l'environnement tout au long de son utilisation.
- L'énergie photovoltaïque est modulable et permet de répondre à tous les besoins.
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés aussi bien en ville qu'à la campagne.
- La vente du surplus de production permet aux propriétaires d'amortir les investissements réalisés lors de l'installation.
- Les panneaux résistent aux intempéries et au froid.
- Les panneaux ont une durée de vie de 20 à 35 ans.

#### **Inconvénients**

- Un investissement important lors de leur installation.
- Le retour sur investissement est rallongé de 9 à 18 mois.
- L'onduleur doit être remplacé au bout de 10 ans et les panneaux au bout de 25 à 35 ans.
- Les démarches administratives pour installer des panneaux photovoltaïques sont longues, environ 2 à 6 mois et même un an en cas de difficultés de raccordement.

# **Chapitre 3 :** **L'énergie éolienne**

## L'énergie éolienne

### 3.1 Définition

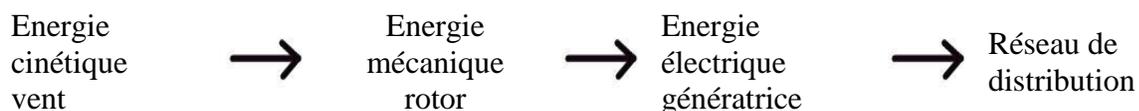
L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. Elle est générée par les vents issus de turbulences causées par le réchauffement (inégal) de l'atmosphère par la chaleur solaire. La plupart des parcs éoliens sont aujourd'hui constitués d'éoliennes (connectées en réseau) qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Le mot éolienne vient du : « Eole » qui présente : dieu du vent de la Grèce antique. Les moulins à vent –qui ont été des applications du vent au début du siècle dernier - sont pour la plupart utilisés aujourd'hui pour le pompage de l'eau.

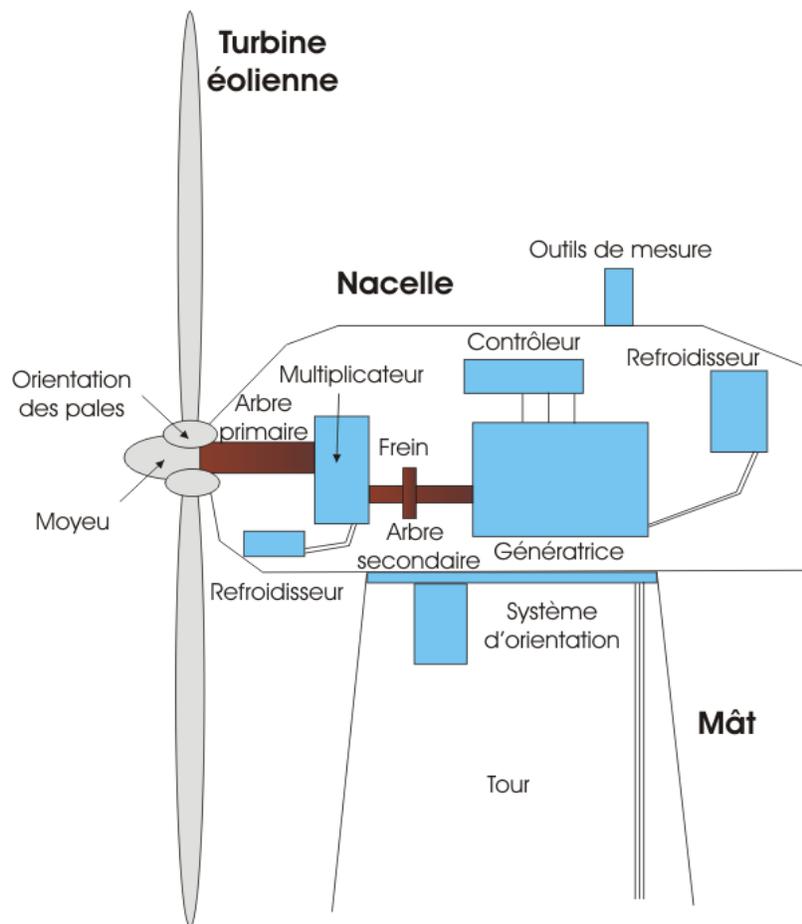
### 3.2 Principe de fonctionnement



**Figure 3.1** : Principe de fonctionnement.

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien produit également des pertes. Ainsi, on peut indiquer un rendement de 59 % au rotor de l'éolienne, 96% au multiplicateur. Il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.





**Figure 3.2** : Principe de fonctionnement

### 3.3 Classement des éoliennes

Les éoliennes sont classées suivant leur puissance. Avec 1 MW, on alimente 900 foyers de 3 personnes, hors chauffage électrique (voir tableau 3.1).

**Tableau 3.1** : Classement des éoliennes

	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12 m	< 40 kW
Moyenne puissance	12 à 45 m	40kW à 1 MW ( qq 100 kW)
grande puissance	> 46 m	> 1 MW

### 3.4 Type d'installation éolienne

Une éolienne occupe une faible surface au sol. Ceci est un énorme avantage pour son installation qui perturbe peu les sites et permet de conserver des activités industrielles ou agricoles à proximité. On retrouve l'éolienne dite **individuelle** installée en site isolé. L'éolienne n'est pas raccordée au réseau,

elle n'est pas reliée à d'autres éoliennes. Sinon les éoliennes sont regroupées sous forme de **fermes éoliennes**. Les installations peuvent être réalisées sur terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes offshore où la présence du vent est plus régulière. Avec ce dernier type d'installation, on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique.

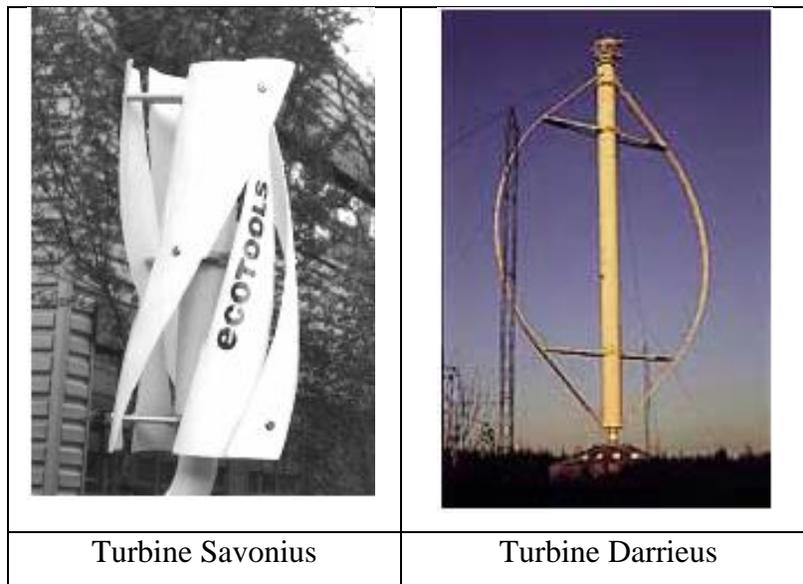
Il existe différents profils d'éolienne. On distingue deux grands types d'éolienne : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice.

### 3.4.1 Eolienne à axe vertical

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- **Le rotor de Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.
- **Le rotor de Darrieus** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.



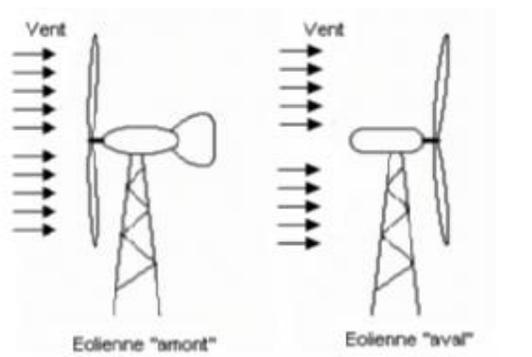
**Figure 3.3** : Types des turbines à axe vertical [16].

### 3.4.2 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées de trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



**Figure 3.4** : Configurations à axe horizontal [16]

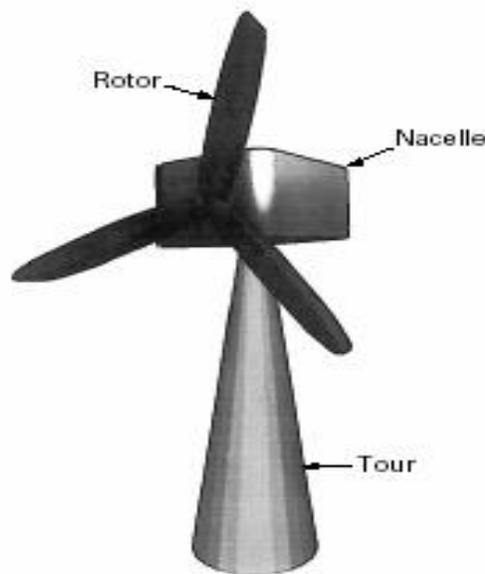
La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.

### 3.5 Composantes d'une éolienne

Une éolienne à axe horizontale (les plus courantes) se compose de trois parties principales [17] :

- Le rotor
- La nacelle
- La tour.



**Figure 3.5** : Composantes d'une éolienne

#### 3.5.1 Le rotor

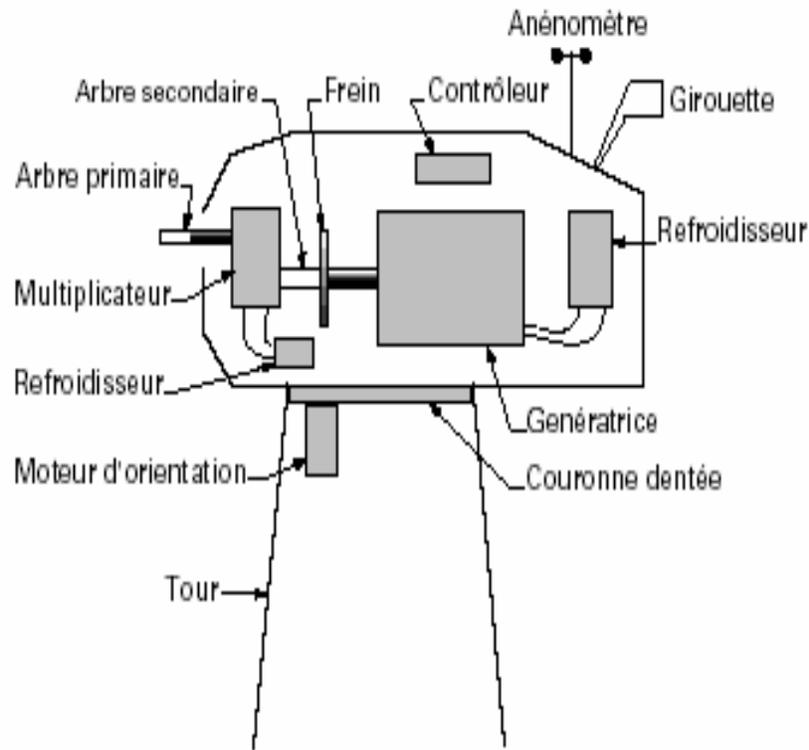
C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif

permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...) [18].

### 3.5.2 La nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure 3.6 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [18].
- la génératrice: Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir [18], [17].
- divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- le dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance [18], [17].



**Figure 3.6** : Composantes d'une nacelle.

### 3.5.3 La tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation.

### 3.5.6 Avantages et inconvénients [19]

#### Les avantages :

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO<sub>2</sub>.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

**Les inconvénients :**

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.

- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés [20].

- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs.

# **Chapitre 4 :** **L'énergie Hydraulique**

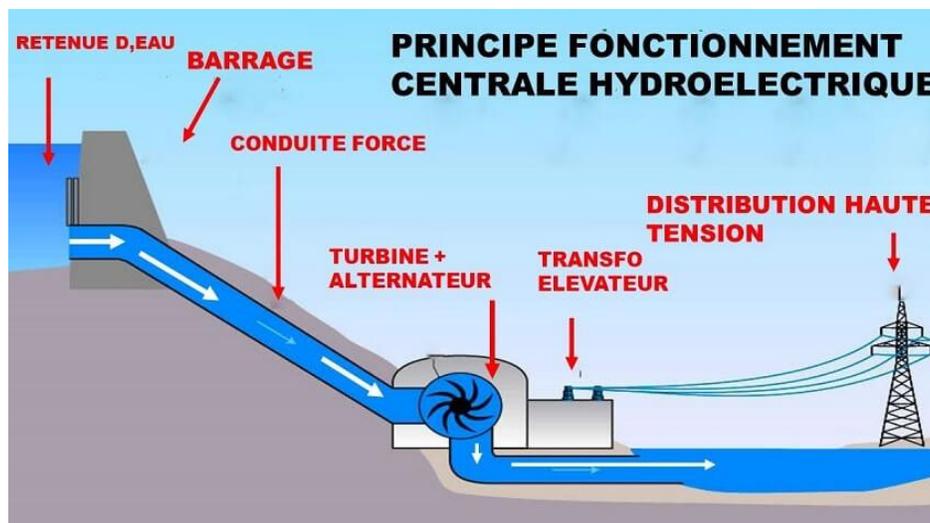
## L'énergie hydraulique

### 4.1 Définition

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. Le potentiel mondial pourrait cependant être davantage exploité. La production mondiale au début des années 2000 est de 2700 TWh par an, avec une capacité installée de 740 GW. Elle pourrait passer à 8100 TWh à l'horizon 2050 avec un doublement économique compétitif de la capacité installée. 14 000 TWh seraient techniquement exploitables et le potentiel théorique serait de 36 000 TWh.

### 4.2 Principe de fonctionnement

Le principe consiste à utiliser l'énergie mécanique de l'eau pour faire tourner une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité. Cette forme d'énergie est essentiellement produite en contrebas des barrages hydrauliques et parfois en travers des cours d'eau et canaux artificiels à l'aide de microcentrales. La puissance produite dépend de la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.



**Figure 4.1 :** Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique [21].

### 4.3 Les installations hydro-électriques

La filière hydraulique comprend les grands barrages, les usines marémotrices, les petites centrales au fil de l'eau et les moulins à eau. Il existe une grande diversité d'installations hydroélectriques, en fonction de leur situation géographique, du type de cours d'eau, de la hauteur de la chute, de la nature du barrage et de sa situation par rapport à l'usine de production électrique. Une hauteur de chute importante augmente la puissance qu'on peut extraire du cours d'eau. Les barrages permettent

d'augmenter la hauteur de chute en créant un réservoir artificiel en amont de la centrale [22]. On classe les ouvrages en fonction de leur hauteur de chute maximale:

- les hautes chutes, plus de 200 mètres;
- les moyennes chutes, entre 50 et 200 mètres;
- les basses chutes, de moins de 50 mètres.

#### 4.3.1 Les centrales de basse chute

D'une puissance inférieure à 10 MW, est constituée en partie de centrales au fil de l'eau qui sont fortement dépendantes du débit des cours d'eau. Ces petites centrales sont attractives pour une production décentralisée. La production mondiale est estimée à 85 TWh.

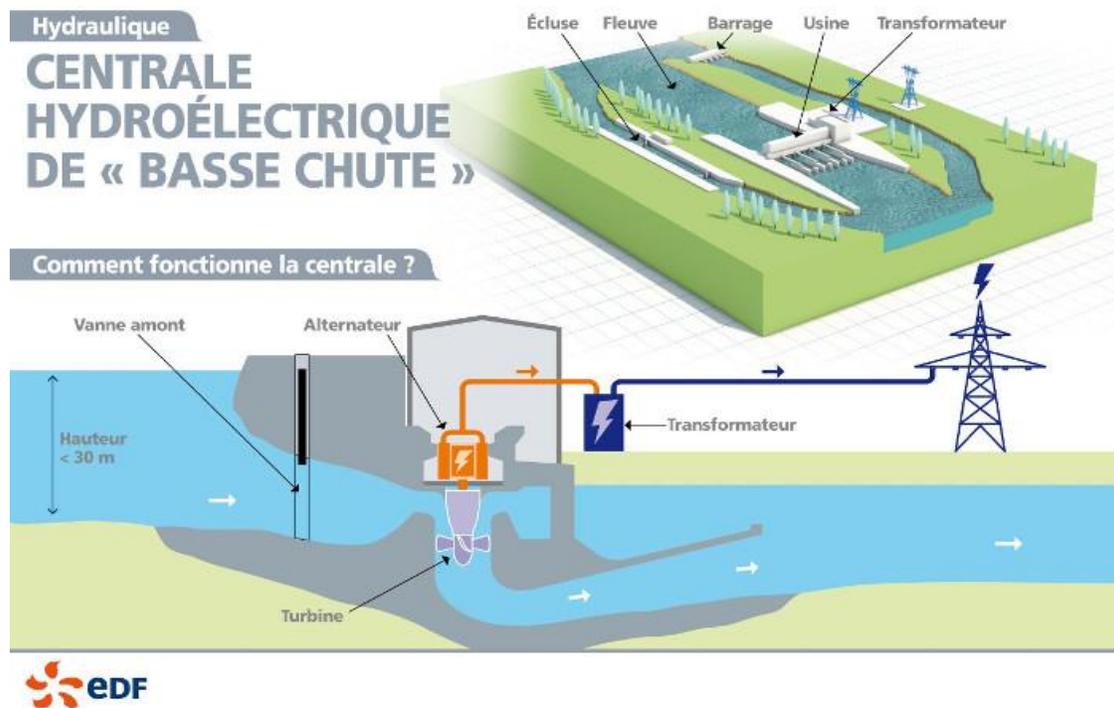
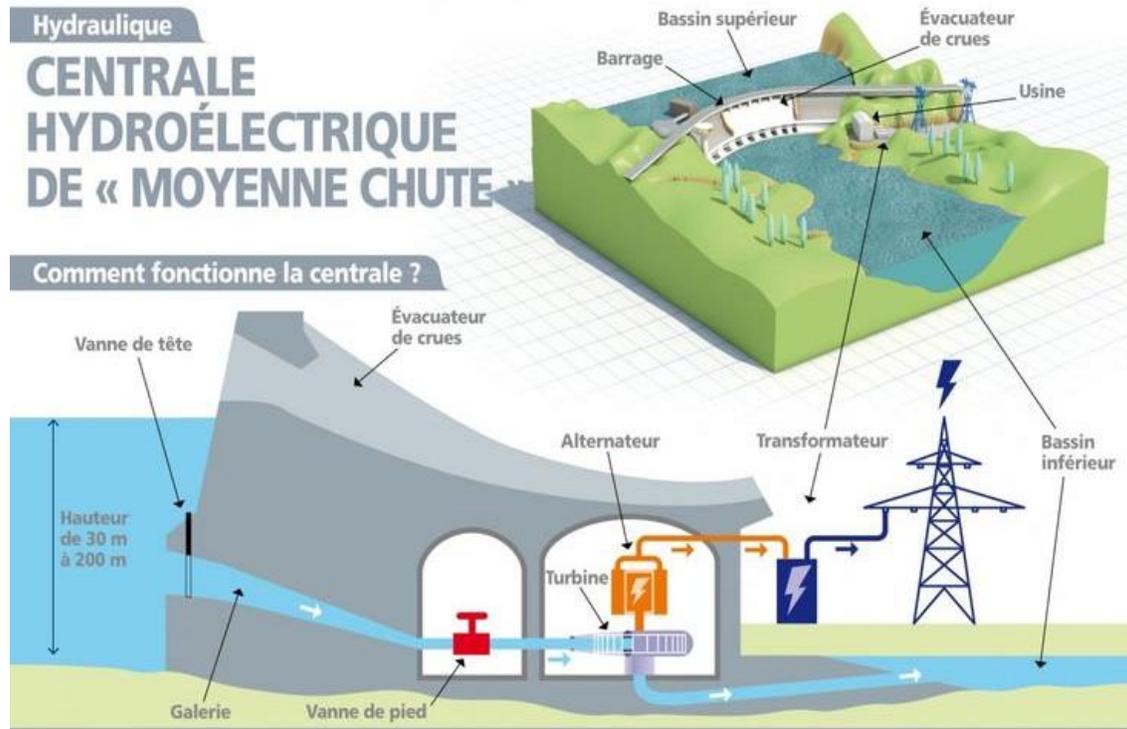


Figure 4.2 : Barrage hydroélectrique basse chute [23]

#### 4.3.2 Les centrales de moyenne chute

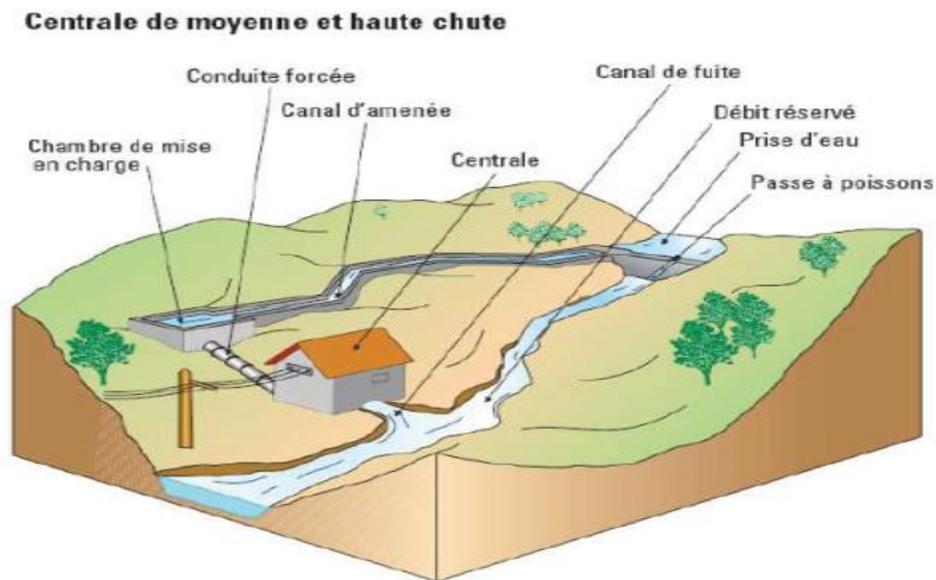
Les barrages de moyenne chute, aussi appelés installations hydroélectriques d'éclusées, révèlent beaucoup de similarités avec les barrages de haute chute. Ce qui les différencie est la hauteur de chute dont ils servent pour produire de l'électricité. La hauteur de chute doit être comprise **entre 50 et 200m** pour que le barrage soit qualifié de moyenne chute. Au-delà il s'agit d'un barrage de haute chute et en deçà d'un barrage au fil de l'eau. Parmi les barrages de moyenne chute, nous distinguons deux grandes familles : les barrages en béton et les barrages en terre [24].



**Figure 4.3 :** Barrage hydroélectrique moyenne chute [23]

### 4.3.3 Les centrales de haute chute

D'une puissance supérieure à 10 MW, est exploitée au voisinage du maximum de son potentiel dans les pays industrialisés. Les barrages permettent de stocker l'énergie et de la fournir dans les moments de forte demande. Dans certains cas, des bassins de stockage haut et bas permettent d'effectuer un véritable stockage d'énergie en utilisant des groupes turbo-alternateurs réversibles qui réalise le pompage en période creuse. Cette forme de stockage est très utilisée dans le monde. Un exemple de la production mondiale de l'électricité en 2004 est donné dans le tableau 4.1.



**Figure 4.3 : Barrage hydroélectrique moyenne chute [25]**

**Tableau 4.1 : Production mondiale en 2004**

<b>ENERGIE HYDROELECTRIQUE</b>	
<b>CONTINENT</b>	<b>PRODUCTION HYDROELECTRIQUE EN 2004 (milliards de KWh)</b>
<b>Asie</b>	<b>735</b> (dont 397 en Chine, 99 en Inde, 77 au Japon)
<b>Amérique du Nord</b>	<b>658</b> (dont 360 au Canada, et 270 aux USA)
<b>Amérique Centre et Sud</b>	<b>613</b> (dont 334 au Brésil, 74 au Vénézuéla, et 51 au Paraguay)
<b>Europe Occidentale</b>	<b>543</b> (dont 134 en Norvège, 72 en Suède, 51 en France, et 41 en Italie)
<b>CEI</b>	<b>241</b> (dont 173 en Russie)
<b>Afrique</b>	<b>89</b>
<b>Moyen Orient</b>	<b>21</b>
<b>TOTAL</b>	<b>2900</b>

Cette production hydroélectrique représente 89% de la production renouvelable, contre seulement 11% pour le solaire, l'éolien, la biomasse et la géothermie.

Elle est indirectement liée au rayonnement solaire qui évapore l'eau des océans pour former avec la pluie les rivières des continents. On construit des barrages sur les rivières pour constituer des réservoirs, qui garantissent une production stable en eau pour produire de l'électricité. On différencie généralement les grandes centrales hydroélectriques de puissance électrique supérieure à 10 MW.

Les grandes centrales à puissance hydraulique inondant de grandes étendues engendrent des déplacements de la population et ont des conséquences indésirables et souvent imprévisibles à long terme tant sur le plan environnemental que sur le plan social ; c'est pourquoi elles sont considérées par certains comme ressources non-renouvelables. Les centrales plus petites ne génèrent pas de tels problèmes.

# **Chapitre 5 :** **L'énergie géothermique**

## L'énergie géothermique

### 5.1 Introduction

La température de notre planète augmente considérablement lorsque l'on se rapproche de son centre. Dans certaines zones de notre planète se trouve en profondeur de l'eau à température élevée. La température dans les couches internes de la Terre reste constante pendant les différentes saisons de l'année. Les couches internes de la croûte terrestre sont plus chaudes que la surface en hiver et plus fraîches en été. Parfois, cette énergie est liée à d'autres phénomènes géologiques tels que la présence de geysers, de volcans ou de sources chaudes. Ces phénomènes facilitent grandement la possibilité d'extraire de l'énergie thermique dans des installations proches de ces zones [26].

### 5.2 Définition

Le terme de géothermie est formé à partir des mots grecs Gê (la Terre) et thermos (chaud). La chaleur souterraine est stockée dans les nappes phréatiques de faible profondeur, les aquifères plus profonds (réservoirs rocheux renfermant des eaux souterraines) ou les roches granitiques. Cette énergie calorifique provient en parts à peu près égales de la chaleur résiduelle produite par les phénomènes de formation de la planète (il y a 4,5 milliards d'années) et de la radioactivité naturelle [27].

Elle se manifeste sous forme d'eau chaude ou de vapeur d'eau et peut être utilisée pour le chauffage ou pour la production d'électricité dans certaines régions spécifiques. Actuellement les technologies utilisant l'énergie géothermique favorisent la production de l'électricité et sont encore à un stade de développement embryonnaire.

### 5.3 La géothermie à très basse énergie

Elle est caractérisée par une température comprise entre 10°C et 30°C. Cette technologie est appliquée au chauffage et à la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique

### 5.4 La géothermie basse énergie

Les ressources géothermiques à basse température (entre 30°C et 100°C) sont valorisées avec des pompes à chaleur pour les besoins de chauffage. Le potentiel de la géothermie naturelle est cependant limité, car il existe de nombreux sites où la température est élevée (supérieure à 200°C) mais sans eau. Cette ressource thermique peut être exploitée au moyen de la technologie dite des « *roches chaudes et sèches* » en cours de développement. Elle consiste à injecter par un premier puit de l'eau sous pression

dans des zones profondes (supérieures à 3000 m) de roches fracturées. Cette eau réchauffée remonte par un second puit et permet de produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques classiques. Toutefois, la part de ce potentiel qui sera techniquement accessible n'est pas encore précisée (voir la figure ci-dessous).

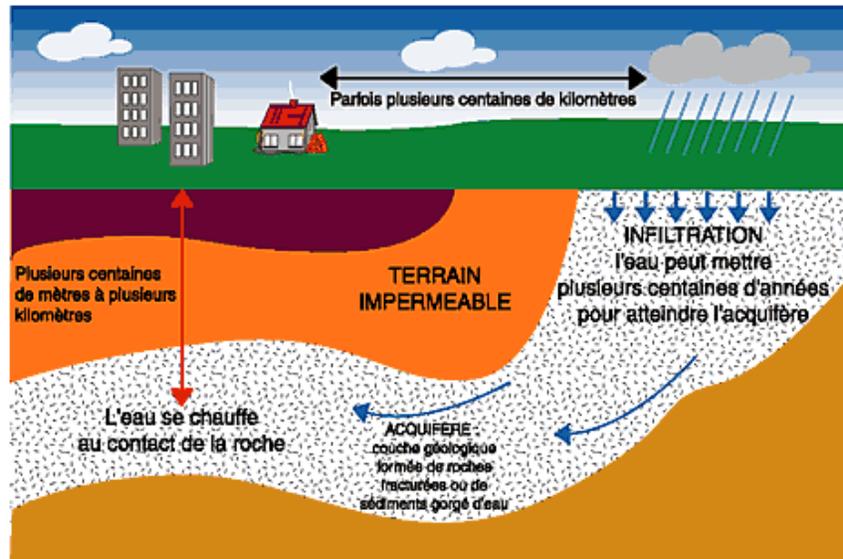


Figure 5.1 : La géothermie à basse énergie [27].

### 5.5 La géothermie haute énergie

La géothermie haute énergie dont la température est comprise entre 150°C et 300°C, consiste à pomper cette eau vers la surface, à produire de la vapeur via des échangeurs pour ensuite turbiner cette vapeur comme dans les centrales thermiques classiques et ainsi produire de l'électricité (figure 5.2).

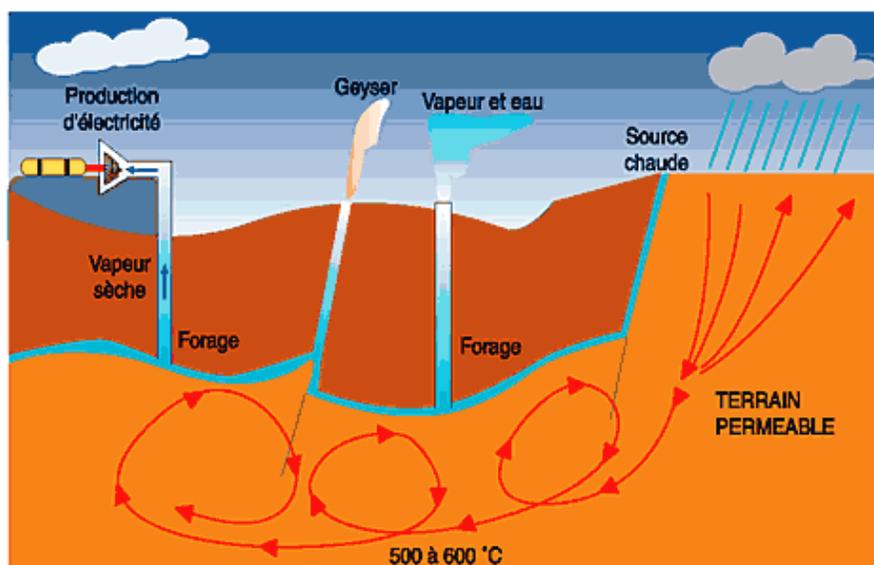


Figure 5.2 : La géothermie à haute énergie [27].

## **5.6 Les avantages et les limites**

### **Les avantages**

- C'est une source d'énergie gratuite, renouvelable et dont l'exploitation ne coûte pas cher.
- Les installations qui utilisent la géothermie ne polluent pas l'atmosphère.
- La cogénération, c'est-à-dire la production d'électricité en même temps que la chaleur peut encore augmenter l'intérêt de la géothermie.

### **Les limites**

- C'est une énergie qui se transporte difficilement, elle doit donc être utilisée sur place.
- Les investissements pour pomper l'eau chaude peuvent parfois être importants.

## Références bibliographiques

- [01] <https://www.climamaison.com/lexique/energie-geothermique.htm>
- [02] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-hydraulique-6659/>
- [03] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>
- [04] <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/climat--affaires-internationales/politique-climatique-internationale--protocole-de-kyoto.html>
- [05] <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/vaches-methane-et-changement-climatique>.
- [06] [https://manuelnumeriquemax.belin.education/enseignement\\_scientifique-terminale/topics/es-tle-c04-088-a\\_une-consommation-d-energie-a-toutes-les-echelles](https://manuelnumeriquemax.belin.education/enseignement_scientifique-terminale/topics/es-tle-c04-088-a_une-consommation-d-energie-a-toutes-les-echelles)
- [07] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/infographies/le-mix-energetique-mondial-de-1990-2035>.
- [08] Petit mémento des énergies renouvelables, les cahiers de Global Chance, Septembre 2007 - ISSN 1270-377X.
- [09] H. Souna, simulation d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon a eau : application au site de Ghardaïa, mémoire Master, université de Ghardaïa, 2017.
- [10] BENKHELIFA, A. Optimisation d'un capteur solaire plan. Revue des Energies Renouvelables, 1998, p. 13-18.
- [11] Y. Jannot, transferts thermiques, école des mines Nancy, 2012
- [12] O. PERROT, cours de rayonnement, Département de génie Thermique et énergie, I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque, France
- [13] AH. Souici, Physique des semi-conducteur, polycopié des cours, université de Bejaia, 2014.
- [14] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaiques/>
- [15] S. Belaid lalouni, Cours énergie solaire photovoltaïque, polycopié des cours, université de Béjaia, 2015.
- [16] M. Adem, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [17] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, Éoliennes, Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.

- [18] M. Stiebler, Wind Energy Systems for Electric Power Generation, Springer Series in Green Energy and Technology ISSN 1865-3529- 2008, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [19] M. Mayouf, Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents, thèse de doctorat, université de Batna, 2014.
- [20] Observatoire des énergies renouvelables -Quinzième inventaire, Edition 2013- EurObserv'ER  
<http://www.energies-renouvelables.org>
- [21] <https://bricoleurs.info/comment-fonctionne-une-centrale-hydraulique/>
- [22] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Hauteur\\_de\\_chute](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hauteur_de_chute)
- [23] <http://tpemicentralehydraulique.e-monsite.com/pages/i-les-centrales-hydrauliques/bref.html>.
- [24] <https://www.ecosources.org/barrage-de-moyenne-chute>.
- [25] [https://ued.univ-perp.fr/module2/co/3-types\\_centrales.html](https://ued.univ-perp.fr/module2/co/3-types_centrales.html).
- [26] <https://lenergie-solaire.net/energies-renouvelables/energie-geothermique>
- [27] M. Jarkas, Les énergies renouvelables, <https://docplayer.fr/5023238-Les-energies-renouvelables-dr-marwan-jarkas.html>.