

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie  
Département de Génie Électrique  
Laboratoire de Génie Électrique de Bejaia

# Mémoire de Fin d'Étude

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique  
Option : Électromécanique*

## *THÈME*

*Etude technologique et amélioration des performances  
d'une centrale à énergie renouvelable.*

Présentés par :

Encadré par: Dr. DJERMOUNI  
Kamel

Mr : HABOUCHE Achour

Mr : BENYAHIA Hocine

Devant le jury :

Mr

Mr

Promotion : 2020/2021

# Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude en premier a 'DIEU' qui nous a toujours soutenu et Donné la force. Nous tenons à remercier notre encadreur pédagogique Dr. DJERMOUNI Kamel pour sa rigueur scientifique, ses exigences de disponibilité, en nous Faisant partager son expérience et ses connaissances scientifiques, ses précieux conseils et aussi Pour nous avoir épaulé durant cette épreuve .Aux membres de jury : On est très heureux et fier de l'honneur que vous nous faites en acceptant d'être présents dans le Jury de notre projet de fin d'études. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de Nos estime et de notre gratitude. Nos remerciements s'étendent aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, d'une Manière directe ou indirecte au bon déroulement de ce travail, en nous fournissant tous les Renseignements et les recommandations nécessaires.

<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	
<b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>	
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>01</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES</b>	
I.1.Introduction .....	03
I.2.Energies renouvelables .....	03
I.3. Différents types des énergies renouvelables .....	03
I.3.1. La biomasse .....	03
I.3.2. Energie hydraulique .....	04
I.3.3. Energie géothermique .....	05
I.3.4. Energie éolienne .....	05
I.3.5. Energie solaire .....	06
I.3.5.1. Energie solaire passive .....	06
I.3.5.2. Energie solaire thermique .....	07
I.3.5.3. Energie solaire à concentration .....	08
I.3.5.4. Energie solaire photovoltaïque .....	08
I.4. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables .....	09
I.4.1. Avantages des énergies renouvelables .....	09
I.4.2. Inconvénients des énergies renouvelables .....	09
I.5. Conclusion .....	10
<b>CHAPITRE II : ETUDE TECHNOLOGIQUE DES CENTRALES A ENERGIE RENOUVELABLE</b>	
II.1. Introduction .....	12
II.2. Etude technologique d'une éolienne .....	12
II.2.1. Energie éolienne .....	12

II.2.2. Différents types d'éoliennes .....	14
II.2.2.1. Eoliennes à axe horizontal .....	14
II.2.2.2. Eoliennes à axe vertical .....	14
II.2.3. Systèmes éoliens .....	15
II.2.3.1. Principe de la conversion éolienne .....	15
II.2.3.2. Eléments constitutifs d'une éolienne .....	16
II.2.3.3. Classification .....	19
II.2.3.4. Fonctionnement d'une éolienne .....	20
II.3. Etude technologique d'une centrale hydraulique .....	22
II.3.1. Energie hydraulique .....	22
II.3.2. Principe d'une centrale hydraulique .....	22
II.3.2.1. Puissance d'une chute d'eau .....	23
II.3.3. Turbines .....	24
II.3.3.1. Turbine PELTON .....	24
II.3.3.2. Turbine FRANCIS .....	24
II.3.3.3. Turbine KAPLAN .....	25
II.3.4. Classification des centrales hydrauliques .....	25
II.3.4.1. Centrales de hautes chutes .....	25
II.3.4.2. Centrales de moyennes chutes .....	26
II.3.4.3. Centrales de basses chutes .....	26
I.4. Etude technologique d'une centrale photovoltaïque .....	27
II.4.1. Principe d'une centrale photovoltaïque .....	27
II.4.2. Effet photovoltaïque .....	27
II.4.3. Cellules photovoltaïques ou photopiles .....	28
II.4.4. Différents types des cellules solaires .....	28
II.4.5. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque .....	30

II.5. Conclusion .....	30
<b>Chapitre III : Amélioration des performances d'une centrale à énergie renouvelable</b>	
III.1. Introduction .....	32
III.2. Amélioration du rendement.....	32
III.2.1. Modèle mathématique et modélisation .....	32
III.2.1.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque .....	32
III.2.1.2. Modèle d'un module photovoltaïque .....	34
III.2.2. Commande du système .....	35
III.2.2.1 Hacheur élévateur .....	35
III.2.2.2. Commande perturbation et observation .....	35
III.2.3. Modélisation des deux cerveaux moteurs .....	36
III.2.3.1. Correcteur utilise .....	37
III.2.4. Position du soleil .....	38
III.2.5. Panneau traqueur .....	38
III.2.6. Equation et calcule du rayonnement .....	39
III.2.7. Visualisation des résultats sous Matlab pour un panneau .....	42
III.2.8. Visualisation des résultats sous Matlab pour une centrale photovoltaïque .....	44
III.3. Amélioration du coût .....	46
III.3.1. Dimensionnement des panneaux solaire .....	46
III.3.1.1. Bilan des puissances .....	46
III.3.1.2. Calcule de l'énergie produite .....	46
III.3.1.3. Calcule de la puissance crête .....	47
III.3.1.4. Calcule le nombre de panneaux .....	47
III.3.2. Dimensionnement de batteries .....	47
III.3.2.1. Type de batteries et leurs caractéristiques .....	47

III.3.2.1.1 Caractéristique technique de la batterie choisie .....	47
III.3.2.2. Calcule de nombres de batterie .....	47
III.3.2.2.1. Capacité nécessaire .....	47
III.3.2.2.2. Nombre de batterie nécessaire .....	48
III.3.3. Dimensionnement du câblage .....	48
III.3.4. Calcule des pertes du câblage .....	48
III.3.5. Calcul du coût total .....	48
III.3.5.1. Calcul pour une centrale photovoltaïque proche du domicile .....	48
III.3.5.2. Calcul pour une centrale photovoltaïque loin du domicile .....	49
III.3.6. Interprétation des calculs .....	49
III.4. Conclusion.....	49
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>.....</b>

<i>N° Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<b>Chapitre II</b>		
<b>Tableau. II.1</b>	Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé	20
<b>Chapitre III</b>		
<b>Tableau. III.1</b>	Module PV dans les conditions de test standard	34
<b>Tableau. III.2</b>	Rayonnement pour la journée de 22 septembre à Bejaia	41
<b>Tableau. III.3</b>	Bilan de puissance	46
<b>Tableau. III.4</b>	Caractéristique des batteries	47

<i>N° figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure I.1</b>	Energie biomasse	04
<b>Figure. I.2</b>	Différent types de l'énergie hydraulique	04/05
<b>Figure I.3</b>	Source d'énergie géothermique	05
<b>Figure I.4</b>	Fonctionnement de l'énergie éolienne	06
<b>Figure I.5</b>	Energie solaire passive	07
<b>Figure I.6</b>	Energie solaire thermique	07
<b>Figure I.7</b>	Energie solaire à concentration	08
<b>Figure I.8</b>	Système Photovoltaïque	09
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Ferme eolienne	13
<b>Figure. II.2</b>	Eolienne on shore et offshore	13
<b>Figure II.3</b>	Eolienne Darrieus	14
<b>Figure II.4</b>	Eolienne Savonius	15
<b>Figure II.5</b>	Principe de la conversion d'énergie	16
<b>Figure II.6</b>	Eléments constitutifs d'une éolienne	19
<b>Figure II.7</b>	Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	21
<b>Figure II.8</b>	Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continûment variable	22
<b>Figure. II.9</b>	Principe d'une centrale hydroélectrique	23
<b>Figure. II.10</b>	Turbine PELTON	24
<b>Figure. II.11</b>	Turbine FRANCIS	24

<b>Figure. II.12</b>	Turbine KAPLAN	25
<b>Figure. II.13</b>	Turbine Bulbe	25
<b>Figure. II.14</b>	Centrales de hautes chutes	25
<b>Figure. II.15</b>	Centrales de moyennes chutes	26
<b>Figure. II.16</b>	Centrales de basses chutes	26
<b>Figure. II.17</b>	Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque	27
<b>Figure. II.18</b>	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	28
<b>Fig. II.19</b>	Cellule photovoltaïque (monocristalline)	29
<b>Fig. II.20</b>	Cellule PV poly cristalline	29
<b>Fig. II.21</b>	Cellule PV amorphes	29
<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure. III.1</b>	Cellule photovoltaïque a deux diodes	32
<b>Figure. III.2</b>	Hacheur Boost	35
<b>Figure. III.3</b>	Commande P&O	36
<b>Figure. III.4</b>	Organigramme de l'algorithme perturbation & observation	36
<b>Figure. III.5</b>	Schéma du panneau traqueur	37
<b>Figure. III.6</b>	position du soleil pour la journée du 22 Septembre par rapport à l'horizon	37
<b>Figure. III.7</b>	Panneau traqueur sur l'axe X	38
<b>Figure. III.8</b>	Panneau traqueur sur l'axe Y	39
<b>Figure. III.9</b>	Rayonnement du soleil reçu par les panneaux photovoltaïques	41
<b>Figure. III.10</b>	Allure de la puissance d'un panneau	42
<b>Figure. III.11</b>	Allure du courant d'un panneau	42
<b>Figure. III.12</b>	Allure de la tension d'un panneau	43
<b>Figure. III.13</b>	Allure de la puissance d'une centrale	44

<b>Figure. III.14</b>	Allure du courant d'une centrale	44
<b>Figure. III.15</b>	Allure de la tension d'une centrale	45

**EnR** : Energie Renouvelable

**PV** : Photovoltaïque

**GPV** : Générateur Photovoltaïque

**W** : Energie potentielle en Joules (J)

**m** : Masse de l'eau en kilogrammes (kg)

**G** : Rayonnement ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

**H** : Hauteur de la chute d'eau en mètres(m)

**Pp** : Puissance utile de la chute d'eau en Watt, (W)

**u** : Masse volumique en kilogrammes/mètres cube, ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

**Dt** : Volume en mètres cube, ( $\text{m}^3$ )

**Q** : Débit de la chute d'eau en mètres cube/secondes, ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

**CC** : Courant continu

**Eg** : Energie de gap

**Si** : Silicium

**Cds** : Sulfure de cadmium

**As Ga** : Arséniure de gallium

**Cd Te** : Tellure de cadmium

**Ge** : Germanium

**InP** : Phosphore d'indium

**Rs** : Résistance Série

**I<sub>ph\_ref</sub>** : Courant photonique sous condition de référence [A]

**$\mu_{cc}$**  : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

**G , G<sub>ref</sub>** : Eclairement réels et à la condition de référence [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

**T<sub>c</sub> , T<sub>c\_ref</sub>** : Température de cellule, réelle et à la condition de référence

**MPPT** : Maximum power point tracking

**P&O** : Perturbe and observe

**PI** : Proportionnelle intégrale

**δ** : Déclinaison solaire

**J** : Jour de l'année (de 1 à 366)

**α** : Inclinaison solaire

**φ** : Latitude

**η** : Angle horaire

**H** : Temps solaire en heure décimale

**P** : Pression relative

**P<sub>o</sub>** : Pression absolue

**E** : Energie produite

**A** : Autonomie en prend deux jours

**V** : Tension de la batterie choisie

**DOD** : Décharge maximum

**ρ** : Résistivité du matériau ( $\Omega.m^2/m$ )

**L** : Longueur du câble (m)

**I** : Courant de la centrale (A)

**ΔU** : Chute de tension (V)

**U** : Tension de la centrale (V)

**INTRODUCTION  
GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

L'énergie désigne toute capacité à altérer, modifier un état ou à créer, générer un travail induisant une réaction menant à un mouvement qui génère un rayonnement électromagnétique de la lumière. C'est un élément majeur et un besoin quasi primordiale pour l'être humain ainsi que pour son développement.

Les énergies renouvelables ou « EnR » quant à elles, sont un ensemble de procédés et de moyens de production de l'énergie à partir de source ou de ressources « illimitée » ou du moins « reconstituable », ces énergies peuvent être issues de plusieurs sources ; solaire, géothermique, biomasse, éolienne et hydraulique. Le terme d'énergie renouvelables est utilisé en opposition et pour se distinguer des énergies dites « conventionnelles » issues des combustibles fossiles, plus répandues et plus utilisées, notamment à l'échelle industrielles, qui sont à contrario des « EnR », limitées en termes de quantité et de temps.

Les énergies renouvelables et leur utilisation, sont, selon beaucoup, un enjeu majeur de ce début de millénaire, si ce n'est le plus importants d'entre tous, et ce au vue des nombreuses questions capitales, d'ordre écologique et sociale, qui secouent notre temps. En effet, ils permettent de résoudre un bon nombre de problématiques contemporaines, notamment en permettant une consommation de proximité caractérisés par une indépendance et une autonomie certaine vis-à-vis des ressources combustible inéquitablement réparties sur la planète, mais aussi soumis à la loi du marché et à la spéculation financière. Au contraire, les énergies « vertes », plus écologiques, mais aussi plus durables, et plus fiables, surtout en termes de temps et de ressources, ils permettent une consommation plus stable, et surtout une alternative sûre aux énergies conventionnels.

Malgré leur potentiel colossales les « EnR » disposent de certains inconvénients, qui se caractérisent d'abord, par leurs rendement qui est relativement moindre par rapport aux énergies standards, et ensuite, en termes des coûts onéreux qui caractérisent leurs installations et leurs utilisation. Ces inconvénients se justifient surtout par le retard accumulés par les énergies renouvelables, mais aussi au vue du besoin exponentiel et grandissant des besoins énergétique de la population mondiale, et de l'industrie.

L'énergie solaire désigne l'énergie transmise par les rayons du soleil sous forme de lumière et de chaleur, qui sert à générer de l'électricité principalement via des récepteurs nommés panneaux photovoltaïque et un circuit précis. C'est donc une énergie inépuisable et donc de facto, une énergie renouvelables.

Dans notre travail, nous allons aborder l'énergie solaire et plus principalement le solaire photovoltaïque, à travers une étude approfondie des caractéristiques, mais aussi des possibilités d'amélioration et de perfectionnement du photovoltaïque, notamment en termes de rendement et de coût.

Dans le premier volet de notre travail, nous allons parler de généralités sur les énergies renouvelables, puis dans un second temps, nous traiterons et étudierons les différents types de centrales à énergies renouvelable, nous enchaînerons en parlant d'amélioration de centrales à EnR et plus précisément d'une centrale solaire photovoltaïque. Enfin nous concluons nos propos par une conclusion générale aux travers des différents points auxquelles nous sommes arrivés.

# CHAPITRE I

# Chapitre I: Généralités sur les énergies renouvelables

## **I.1. Introduction**

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

Il est évident que la dynamique énergétique du 21<sup>ème</sup> siècle rassemblera de nouveaux acteurs issus du secteur des énergies renouvelables assurant ainsi un développement durable. Parmi les systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables, on mentionne les systèmes solaires fonctionnant avec l'énergie solaire.

Plusieurs technologies des systèmes solaires sont envisageables, mais les plus intéressants ce sont ceux du solaire photovoltaïque.

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables, et précisément sur les systèmes solaires photovoltaïques qui représentent l'actualité des énergies renouvelables.

## **I.2. Energies renouvelables**

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou constituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel...

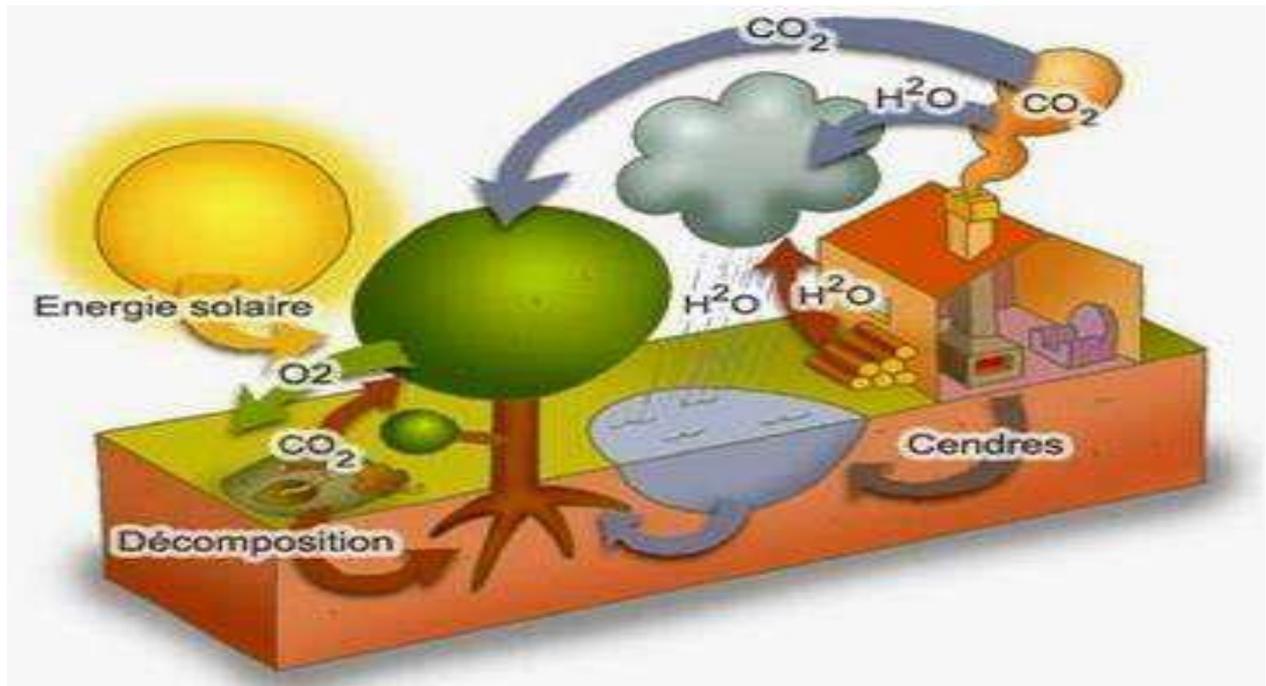
Les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme le vent ou les rayons du soleil qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine, les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres » [1].

## **I.3. Différents types des énergies renouvelables**

### **I.3.1. La biomasse**

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments. Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante grâce à la photosynthèse absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes.

La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.



**Fig. I.1** Energie Biomasse

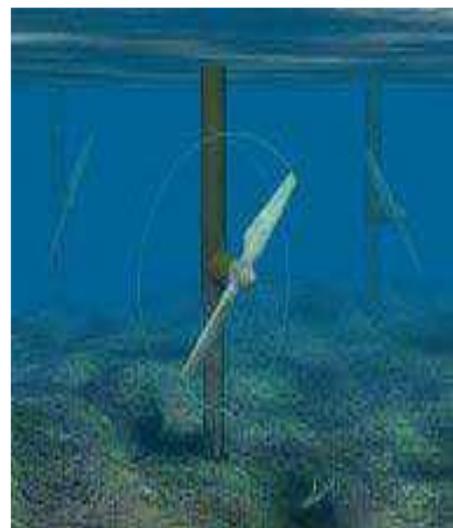
### I.3.2. Energie hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternatif relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée.

Le bruit et l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [2].



a) Marémotrice



b) Hydrolienne



c) Barrage

Fig.I.2 Différent types de l'énergie hydraulique

### I.3.3. Energie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple [3].

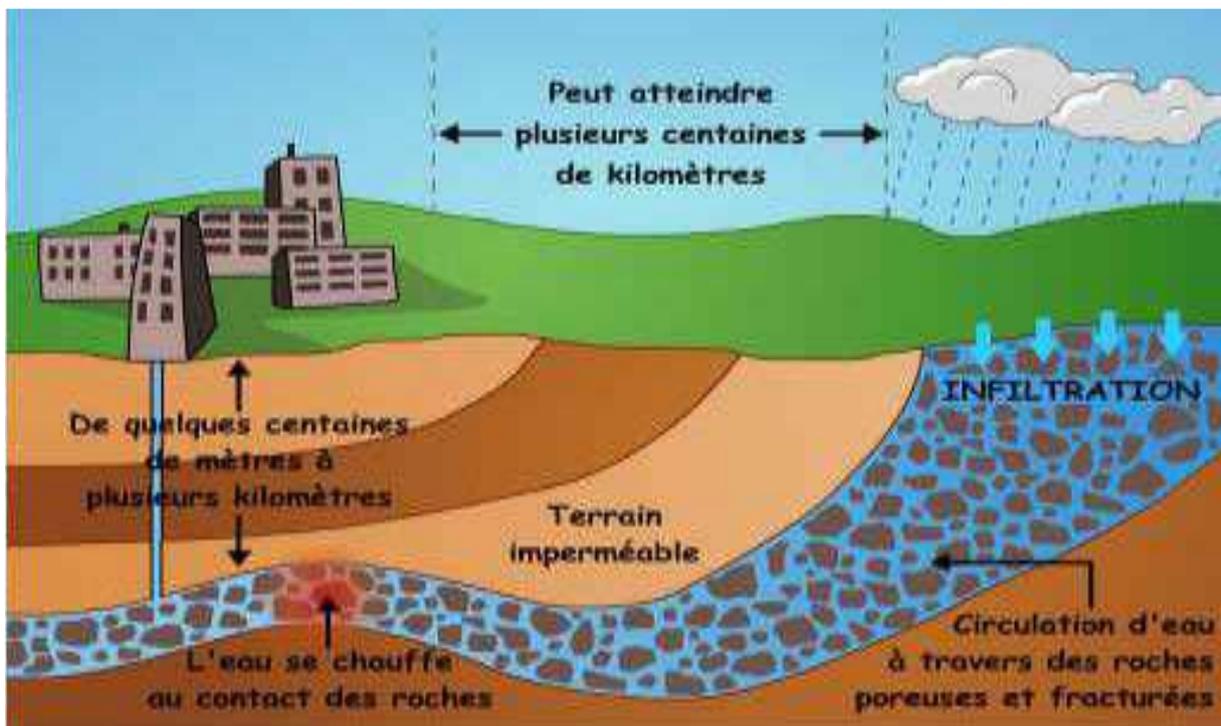
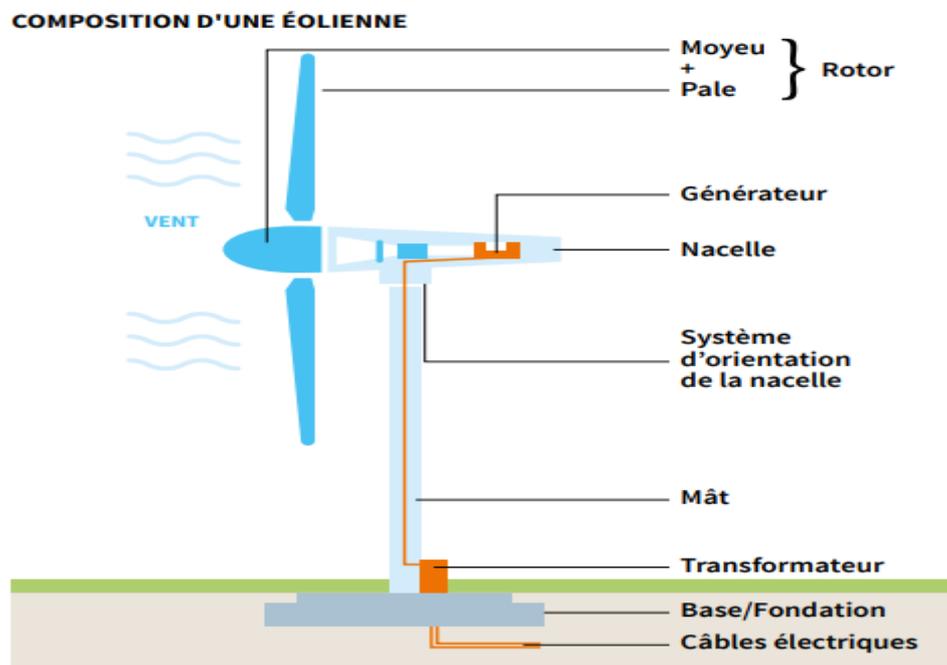


Fig. I.3 Source d'énergie géothermique

### I.3.4. Energie éolienne

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 qui se mettent en rotation à l'aide du vent et de tout un système qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.



**Fig. I.4** Fonctionnement de l'énergie éolienne

### I.3.5. Energie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [4].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- ❖ Energie solaire thermique
- ❖ Energie solaire photovoltaïque
- ❖ Energie solaire passive
- ❖ Energie solaire a concentration

#### I.3.5.1. Energie solaire passive

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage et pour l'éclairage naturel. Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planchées, est rejetée sous forme de chaleur.

### Active and Passive Solar Energy

### Systèmes d'énergie solaire actifs et passifs

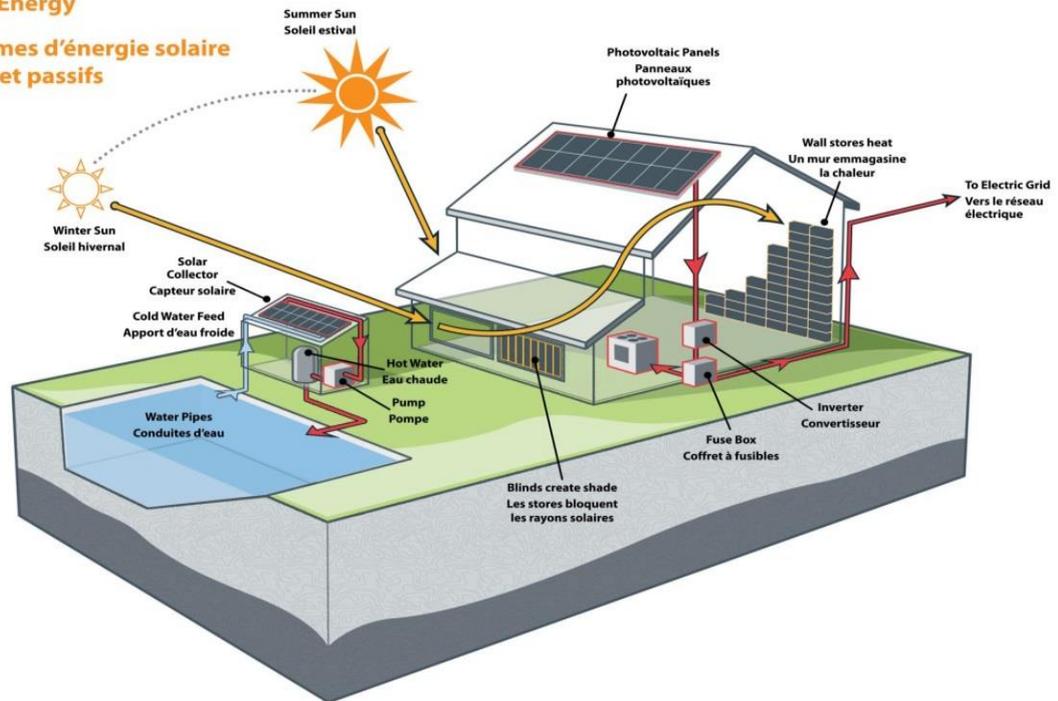


Fig. I.5 Energie solaire passive

#### I.3.5.2. Energie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques.

Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires [5,6].



Fig. I.6 Energie solaire thermique

### I.3.5.3. Energie solaire à concentration

Le principe de concentration consiste à faire converger les rayons du soleil en un point resserré, capable d'emmagasiner toute la chaleur. Les centrales solaires thermiques à concentration sont en effet conçues sur le même principe que les centrales thermiques classique. Des panneaux réfléchissants, dits aussi "miroirs" renvoient les rayons du soleil vers un système qui contient un liquide caloporteur (généralement de l'huile synthétique, du sel fondu ou de l'eau), qui va être chauffé à très haute température.

Ce fluide caloporteur est ensuite pompé et acheminé vers un échangeur qui l'utilise pour produire de la vapeur d'eau. Il s'agit ensuite d'un processus classique, que l'on rencontre dans toutes les centrales thermiques, de production d'électricité grâce à une turbine et un alternateur.

La différence entre le solaire thermique et le solaire photovoltaïques réside donc dans la manière de tirer parti des rayons du soleil. De plus, les panneaux réfléchissants, se servent seulement des rayonnements directs du soleil et non pas des rayonnements diffus.

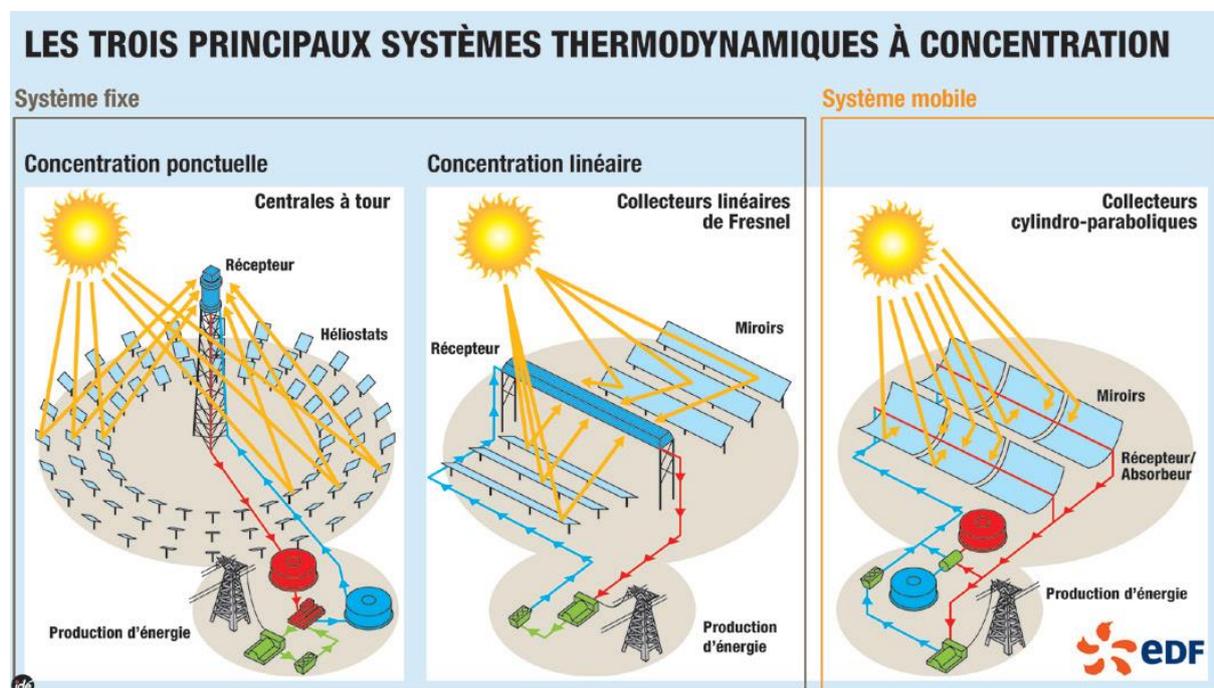


Fig. I.7 Energie solaire à concentration

### I.3.5.4. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce fait des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM).

Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [2].

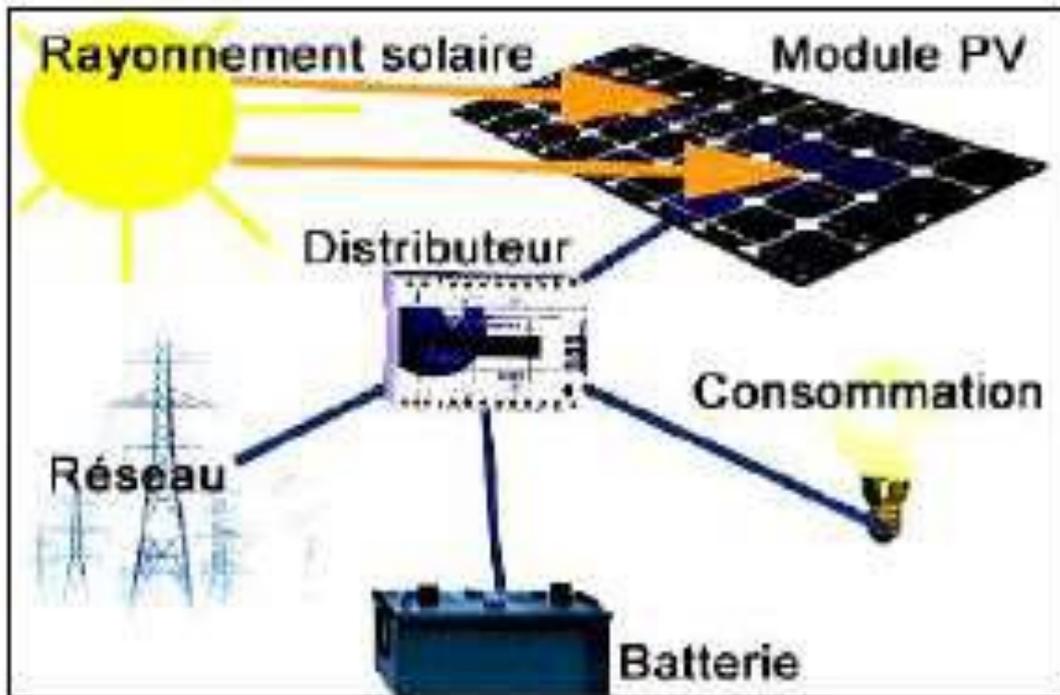


Fig. I.8 Système Photovoltaïque [7]

## I.4. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

### I.4.1. Avantages des énergies renouvelables

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, car ces dernières sont en général propres, sûres et surtout elles existent en quantité illimitée parmi lesquelles on peut citer :

- La sûreté est l'un des avantages principaux, car il existe de très faibles risques d'accident ;
- Elles génèrent également peu de déchets et ces déchets sont parfois recyclables ;
- La décentralisation des énergies renouvelables est aussi un facteur positif très important pour développer certains territoires et le développement local ;
- Ces énergies renouvelables permettent de réduire considérablement l'émission de CO<sub>2</sub> [8].

### I.4.2. Inconvénients des énergies renouvelables

- Leur disponibilité dépend du climat. Pour celles fonctionnant au solaire, il n'est possible d'utiliser que 50 % de leur capacité réelle dans les zones équatoriales et encore moins à cause de la disparition du soleil pendant plusieurs mois dans les pôles. En outre, quand le ciel est nuageux, le rayonnement solaire est moindre. Lors de périodes anticycloniques, il n'y a pas de vent. Cette énergie n'est pas très stable ;

- La responsabilité sur le réchauffement climatique des énergies renouvelables est un inconvénient majeur. Elles sont souvent présentées et admises pour justement résoudre ce problème, mais pour que ce soit réel, il faudrait diminuer considérablement la consommation des énergies fossiles comme le pétrole, le charbon ou le gaz et mieux maîtriser l'énergie renouvelable pour l'économiser davantage ;
- L'impact visuel sur le paysage est à prendre en compte surtout lors de constructions de grandes centrales solaires ou de champs d'éoliennes ;
- Les problèmes majeurs pour la faune sont les barrages hydroélectriques, car ils inondent des vallées entières et ont un fort impact négatif sur l'écosystème. Les poissons migrent difficilement vers leurs lieux de reproduction - même si des passes à poissons ont été construites. Les éoliennes sont un danger pour les oiseaux et les chauves-souris [9].

### **I.5. Conclusion**

D'après toutes les informations citées préalablement, nous pouvons conclure ce chapitre en disant que les énergies renouvelables sont des énergies jugées inépuisables, réutilisables est sûres, elles sont issues du soleil, du vent, des chutes d'eau et des marées, de la chaleur de la terre, voire mêmes de la croissance de végétaux. L'exploitation et l'utilisation de ces énergies ne créer et ne génère que très peu, voir absolument aucuns déchets ou éléments polluants.

# CHAPITRE II

## Chapitre II: Etude technologique des centrales à énergie renouvelable

### **II.1. Introduction**

Les énergies renouvelables soit l'éolienne, le solaire, la biomasse, la géothermie, et l'hydraulique, sont tous des sources d'énergie inépuisables, naturels et sûres, dont l'homme a à dispositions pour subvenir à ses besoins énergétiques.

Ces dites énergies sont utilisées et exploitées via des systèmes différents et spécifiques à chaque type d'entre elles. Bien que les énergies biomasse, géothermique aient plus en moins en communs le même schéma d'exploitation, les énergies hydrauliques et éoliennes ont quant à elles une méthode d'utilisation propre à chacune d'entre elles.

Dans ce chapitre, nous allons aborder les spécificités technologiques des sources brutes d'énergies renouvelables les plus utilisées soit le solaire, l'hydraulique et le vent, mais aussi les caractéristiques techniques qui régissent l'exploitation et l'utilisation de ces énergies.

### **II.2. Etude technologique d'une éolienne**

#### **II.2.1. Energie éolienne**

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- La transformation en énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- La production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.



**Figure. II.1** Ferme éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.

Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

- Les éoliennes terrestres dites « on shore » sont installées sur la terre ;
- Les éoliennes dites « offshore » sont installées en mer.



**Figure. II.2** Eolienne on shore et offshore

On distingue par ailleurs deux typologies d'installations :

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

## II.2.2. Différents types d'éoliennes

### II.2.2.1. Eoliennes à axe horizontal

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent et sont souvent constituées de trois pales. Ce sont celles les plus courantes.

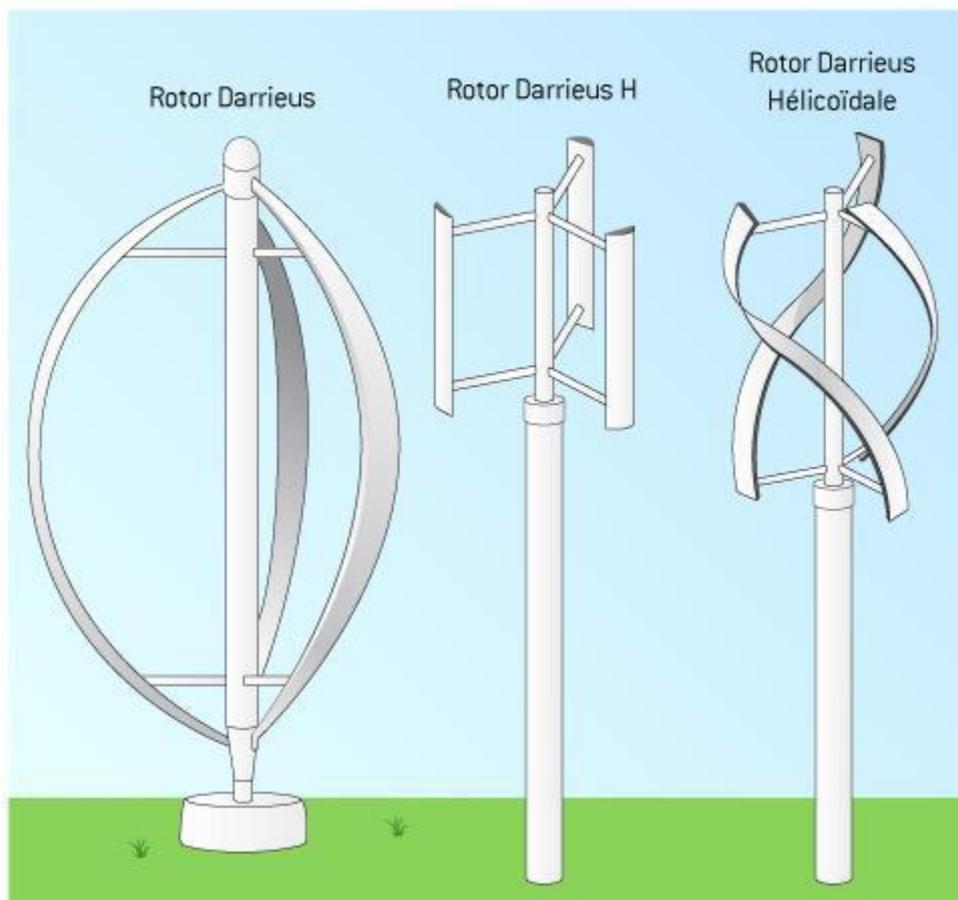
Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.

### II.2.2.2. Eoliennes à axe vertical

L'axe du rotor est perpendiculaire au sol. Elles n'ont besoin d'aucun système pour les orienter dans la direction du vent, cependant leur efficacité reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal puisqu'elles captent deux fois moins d'énergies du vent. Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : Savonius et Darrieus.

- Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus possèdent généralement un rendement plus faible que les éoliennes "classiques" à pôle.

Eolienne Darrieus



**Figure. II.3** Eolienne Darrieus

- Eolienne à axe vertical de type Savonius. Bien que possédant un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques" à pôle, l'éolienne Savonius a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions de vent. Ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants (haute montagne, front de mer...).

L'implantation d'éolienne verticale sur un bâtiment n'est pas une opération anodine car les vibrations peuvent endommager le bâti.



**Figure. II.4** Eolienne Savonius

### II.2.3. Systèmes éoliens

L'énergie éolienne, fiable, économique et écologique représente la source d'électricité idéale au regard de nombreuses applications. Les systèmes éoliens existent en plusieurs dimensions, allant des microsystèmes montés sur un mât, aux turbines de 1,5 mégawatt pouvant alimenter le réseau électrique. La plupart des systèmes autonomes appartiennent à l'une des trois catégories suivantes : les microsystèmes (100 W maximum), le mini système (de 100 W à 10 kW) et les petits systèmes (de 10 kW à 50 kW).

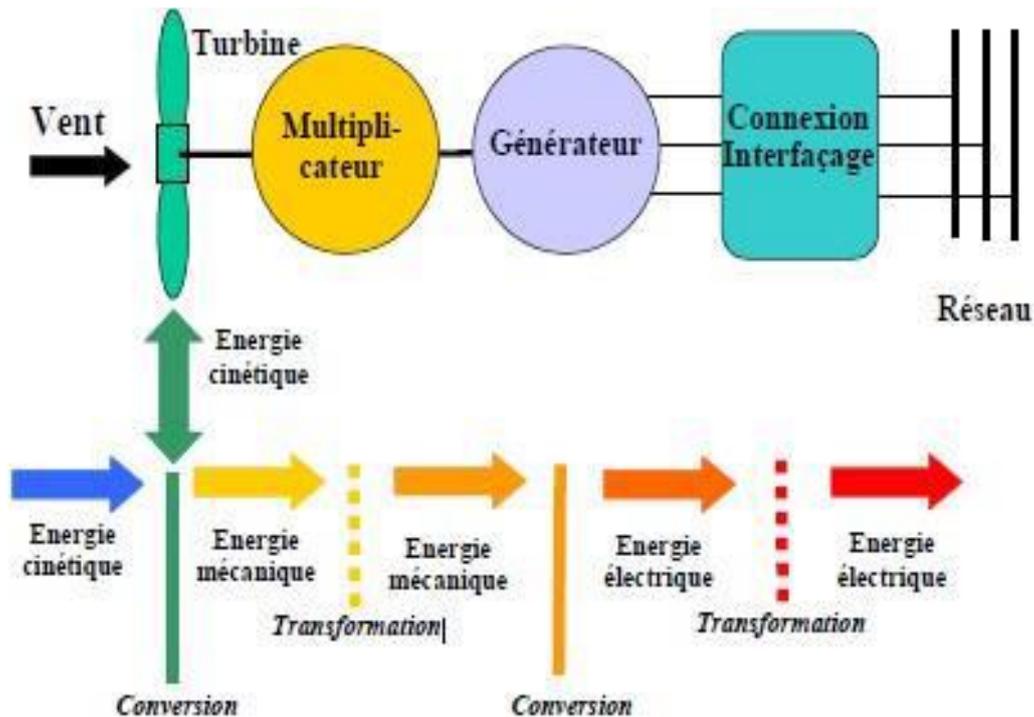
Les systèmes éoliens exigent que le vent qui les actionne ait une vitesse relativement constante. Ils sont conçus de manière à « enclencher » lorsque la vitesse du vent atteint 15 km/h et à « déclencher » lorsque la vitesse du vent est très élevée, et ce pour que le vent ne les endommage pas.

Lorsqu'on détermine si l'énergie éolienne d'un site est suffisante pour faire fonctionner efficacement un système éolien, il est très important de prendre en compte la vitesse annuelle moyenne du vent et le nombre de jours pendant lesquels la vitesse du vent est supérieure à la vitesse d'enclenchement.

Comme le vent n'a pas toujours la vitesse suffisante pour enclencher le système éolien, on combine fréquemment celui-ci avec d'autres sources d'énergie comme les panneaux solaires ou une génératrice diesel. Certains systèmes éoliens sont connectés à des batteries : quand la vitesse du vent est inférieure à la vitesse d'enclenchement, on utilise les batteries, et quand la vitesse du vent est suffisante, les turbines chargent ces batteries. Certains systèmes, comme les systèmes de pompage d'eau, n'ont besoin ni de source d'énergie d'appoint ni de batteries.

#### II.2.3.1. Principe de la conversion éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable.



**Figure. II.5** Principe de la conversion d'énergie

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...).
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [10].

### II.2.3.2. Eléments constitutifs d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne classique est constituée principalement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour.

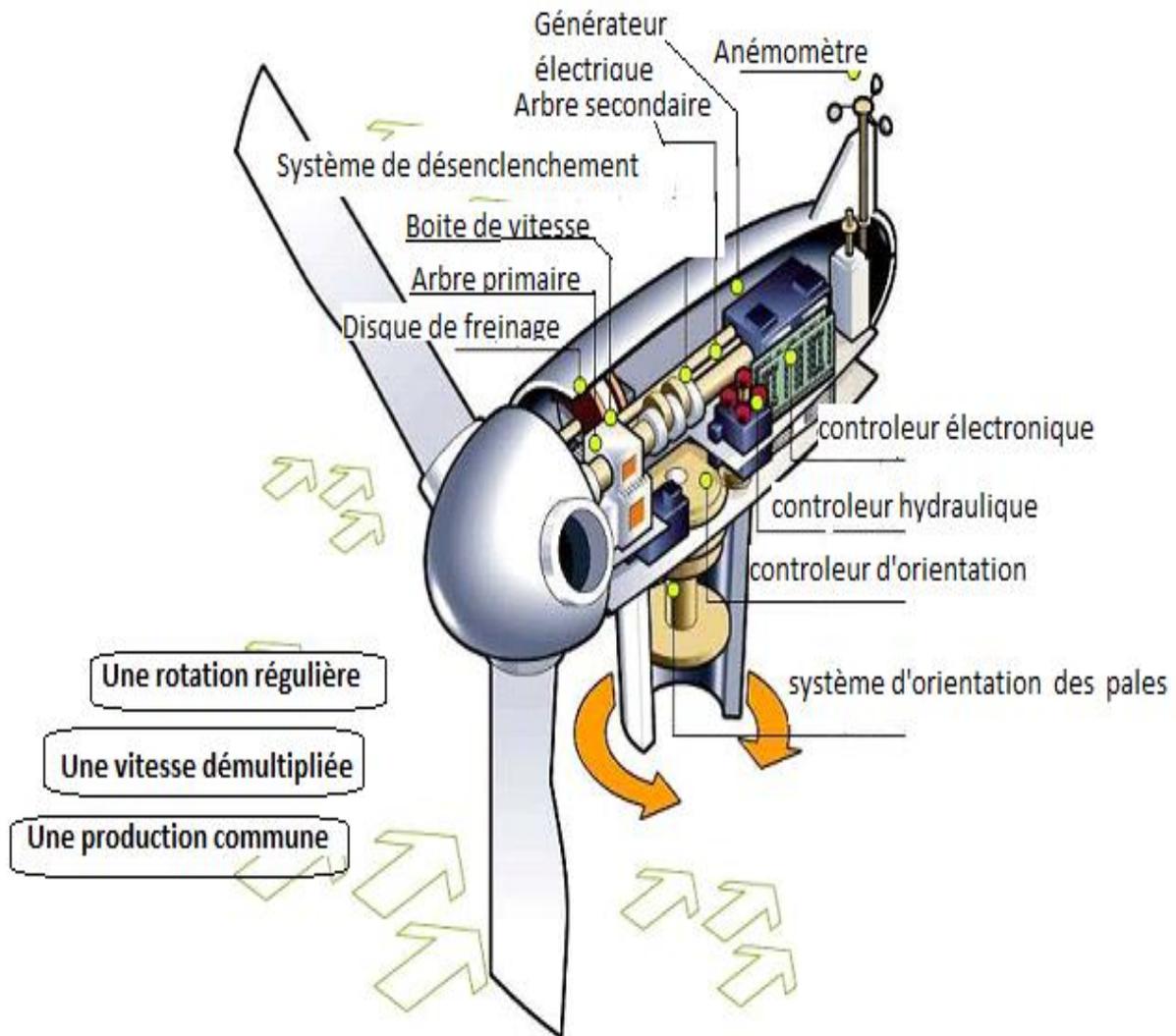
Chacune de ces éléments doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement:

- **Nacelle** : la nacelle contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur, se trouvent, la boîte de vitesse, la génératrice, les systèmes de contrôles, le capteur de température (huile de la boîte de vitesse afin de distinguer une usure prématurée), le capteur de vibration et le capteur de vitesse (une éolienne commence à tourner à partir de

20km/h, est à sa pleine puissance à 60km/h, et les pales arrêtent de tourner lorsque le vent dépasse 90km/h). La nacelle se situe à environ 60 mètres au-dessus du sol et les pales mesurent (sur une éolienne de 100 mètres) environ 32 mètres.

- **Le rotor** : il est constitué des pales et du nez (ou moyeu), ainsi que les nombreux dispositifs de commande situés dans le nez. De nombreuses études en souffleries ont été réalisées afin de déterminer le nombre optimal de pales pour le fonctionnement de l'éolienne. On a démontré que :
  - Moins les pales sont nombreuses, plus l'éolienne met du temps pour démarrer et inversement.
  - De plus, lorsque l'éolienne a deux pales, les vibrations sont très fortes et rendent ainsi l'éolienne fragile. Lorsqu'elle en possède plus de trois, les pales sont perturbées par l'air déplacé par la pale précédente. Le rendement s'en trouve ainsi réduit. Ainsi le nombre optimal de pales pour le fonctionnement d'une éolienne est de trois. Les pales sont torsadées afin d'offrir plus de surface au vent et peuvent aussi s'orienter. L'ensemble des éléments du rotor qui est reliée au multiplicateur par l'arbre principal sont toujours orientée de façon à être face au vent grâce à la girouette et à l'anémomètre.
- **Les pales** : captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.
- **La tour** : la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccordements nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Sa hauteur peut atteindre plus de 100 mètres, soit la hauteur d'un édifice de 20 étages. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.
- **Le moyeu** : le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.
- **Le multiplicateur** : transformer le mouvement lent et puissant de l'axe principal en un mouvement très rapide mais de force plus faible par un système complexe d'engrenages. Le principe est identique à celui d'un vélo doté de pignon et de plateau. Lorsque l'on met un grand plateau pour un petit pignon, la force exercée sur les pédales directement reliées au plateau va devoir être très puissante le mouvement sera par conséquent assez lent, en revanche le mouvement transmis grâce à la chaîne à l'engrenage des pignons sera beaucoup plus rapide mais moins fort.
- **La génératrice** : un élément indispensable pour une éolienne, c'est elle qui permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est soit directement sur l'axe de l'aéromoteur, soit entraînée par un multiplicateur. Il existe 2 types de génératrice (ou générateur) :
  - La dynamo qui permet de fournir un courant continu directement utilisable.
  - L'alternateur qui permet de fournir une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation. L'alternateur crée un courant en faisant tourner des bobines ou des aimants, placés sur le rotor et qui créent ainsi un champ magnétique.
- **L'arbre lent** : de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur.

- **L'arbre rapide** : tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.
- **Le système de direction** : c'est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.
- **La fondation** : est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.
- **L'armoire de couplage au réseau électrique** : transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.
- **Le système de freinage** : un système de freinage est très important dans une éolienne le dysfonctionnement des freins peut être fatal à l'éolienne. Le freinage a d'ailleurs été l'un des premiers problèmes rencontrés par les ingénieurs lors des débuts des éoliennes. Pour des vents trop forts le générateur « s'emballe » et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassant les 90km/h il permet alors d'empêcher le rotor de tourner.
- **L'anémomètre** : mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.
- **La girouette** : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.



**Figure. II.6** Eléments constitutifs d'une éolienne

### II.2.3.3. Classification

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor.

Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât,  $L$ , soit égale au diamètre du rotor,  $D$ . Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Dans le tableau II.1 suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées. Attention, il s'agit bien d'ordres de grandeur de puissance. Le but est uniquement de se donner une idée. En outre, cette puissance n'a de sens que si on a défini la vitesse de vent à laquelle elle est délivrée.

**Tableau. II.1** Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé

Dénomination	Diamètre du rotor (m)	Air balayé (m <sup>2</sup> )	Puissance (kW)
Micro	0,5-1,25	0,2-1,2	0,25
Mini	1,25-3	1,2-7,1	1,5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

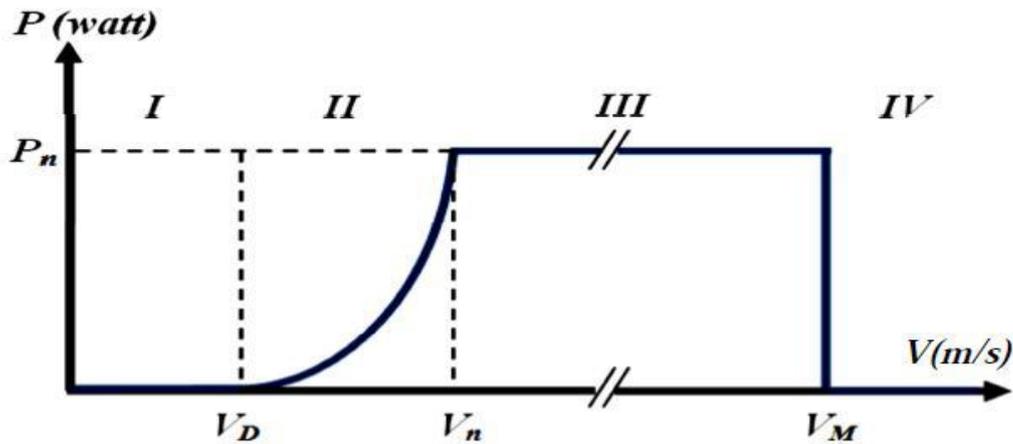
Pour être plus parlant, on trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

- **Micro-éoliennes** : en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).
- **Mini-éoliennes** : essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées).
- **Eoliennes domestiques** : elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers.
- **Eoliennes petites commerciales** : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- **Eoliennes moyennes commerciales** : elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens.
- **Eoliennes grands commerciales** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.

#### II.2.3.4. Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant le transfert vers le réseau.

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :



**Figure. II.7** Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

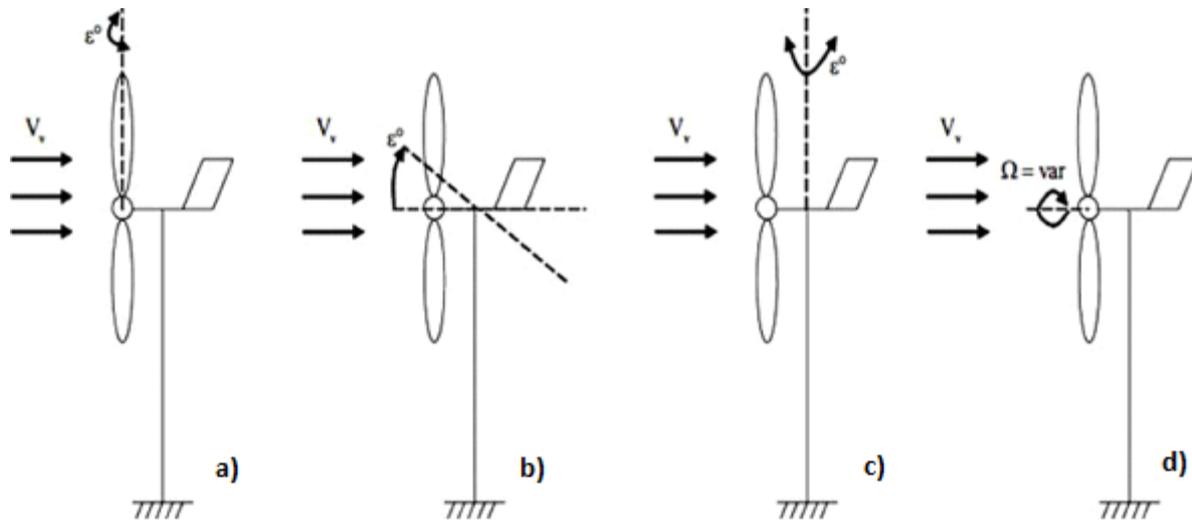
- $V_D$ : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs,  $V_D$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.
  - $V_n$ : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs,  $V_n$  varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.
  - $V_M$ : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes,  $V_M$  vaut 25m/s.
- **Zone I** :  $V < V_D$  : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
  - **Zone II** :  $V_D < V < V_n$  : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
  - **Zone III** :  $V_n < V < V_M$  : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées.

La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour

de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.



**Figure. II.8** Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continûment variable

## II.3. Etude technologique d'une centrale hydraulique

### II.3.1. Energie hydraulique

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau). Elle dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable.

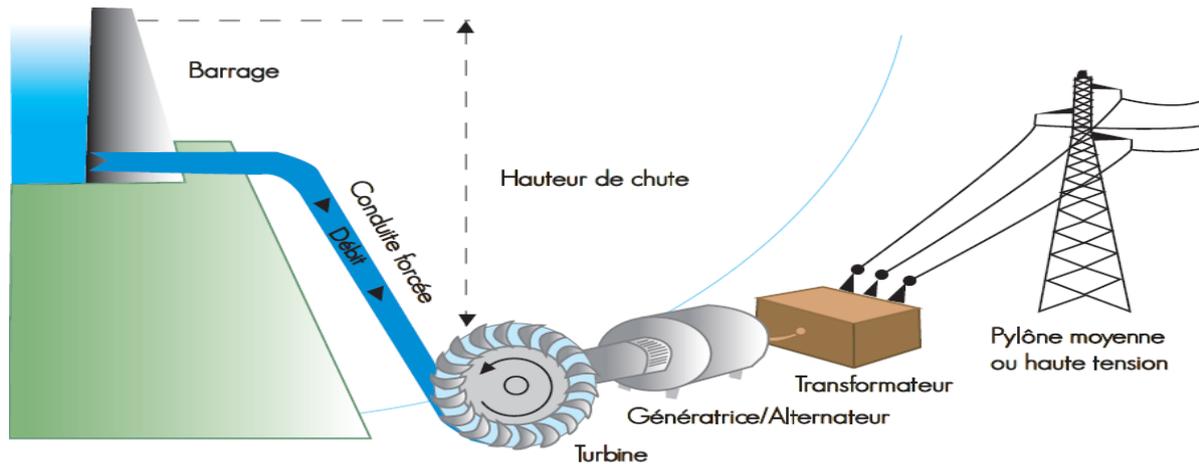
Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans. C'est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre, elle est utilisable rapidement grâce aux grandes quantités d'eau stockée et c'est une énergie renouvelable très économique à long terme. Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- Le barrage qui retient l'eau ;
- La centrale qui produit l'électricité ;
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

### II.3.2. Principe d'une centrale hydraulique

Il s'agit de capter la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité. L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie cinétique puis en énergie mécanique.

Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur entraîné en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.



**Figure. II.9** Principe d'une centrale hydroélectrique

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- Hauteur de la chute ;
- Débit de la chute.

**II.3.2.1. Puissance d'une chute d'eau**

La définition de l'énergie potentielle est :  $W = m \cdot g \cdot h$ .....(II.1)

Avec :

- $W$  : Energie potentielle en Joules (J) ;
- $m$  : Masse de l'eau en kilogrammes (kg) ;
- $g$  : Accélération de la pesanteur en mètres/secondes carrées ( $m/s^2$ ) ou Newton/kilogrammes (N/kg) ( $g = 9,81$ ) ;
- $h$  : Hauteur de la chute d'eau en mètres(m).

La définition de la puissance est :  $P = W/Dt$ .....(II.2)

Avec :

- $P_p$  : puissance utile de la chute d'eau en Watt ;
- $Dt$  : durée en secondes.

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

$P_p = (m \cdot g \cdot h)/Dt$ .....(II.3)

Or :  $m = u \cdot V$ .....(II.4)

Avec :

- $u$  : Masse volumique en kilogrammes/mètres cube, ( $kg/m^3$ )
- $Dt$  : Volume en mètres cube, ( $m^3$ )

Donc :  $P_p = (u \cdot V \cdot g \cdot h)/Dt$ .....(II.5)

Et :  $Q = V/Dt$ .....(II.6)

Avec :

- $Q$  : Débit de la chute d'eau en mètres cube/secondes, ( $m^3/s$ )

Au final on a :  $P_p = Q \cdot u \cdot g \cdot h$ .....(II.7)

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

- Remarque : La masse volumique de l'eau est 1, donc 1  $m^3$  correspond à une masse de 1000 kg. On obtient alors une expression de  $P_p$  en kiloWatt (kW) :

$P_p = Q \cdot g \cdot h$ .....(II.8)

### II.3.3. Turbines

Comme pour les centrales thermiques, les alternateurs sont entraînés par des turbines. Celles-ci sont adaptées aux caractéristiques de la chute : hauteur, vitesse de l'eau, débit.

#### II.3.3.1. Turbine PELTON

Les usines de haute chute sont généralement équipées de turbines PELTON, ou turbine à action : l'eau arrive en deux jets de forte pression contre le pourtour de la roue équipée de pales en forme de godets.

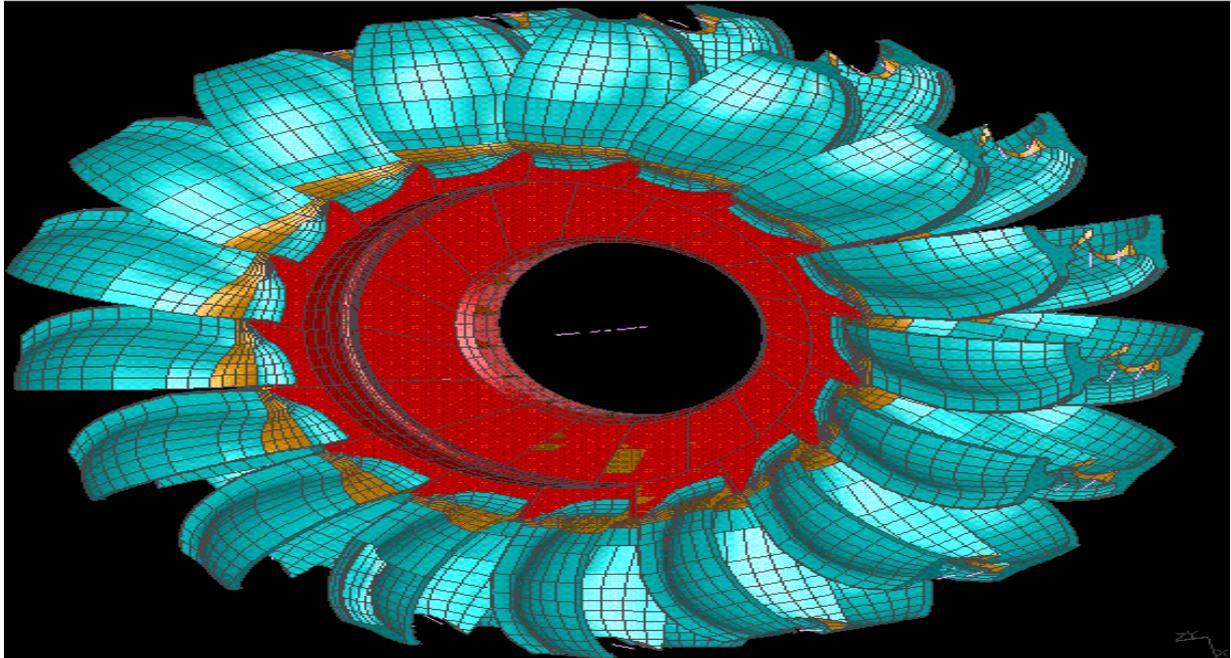


Figure. II.10 Turbine PELTON

#### II.3.3.2. Turbine FRANCIS

Les usines de moyenne chute sont équipées de turbine FRANCIS, ou turbine à réaction, qui permettent l'utilisation de l'eau à moyenne pression. L'eau est dirigée contre les pales de la turbine par des ailettes de guidage, puis rabattue vers le centre de la roue.

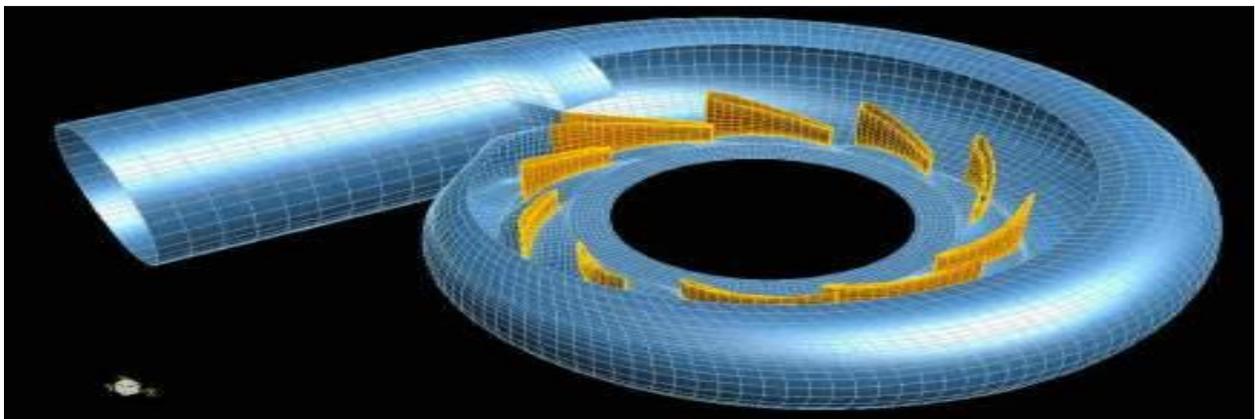


Figure. II.11 Turbine FRANCIS

### II.3.3.3. Turbine KAPLAN

Les usines de basse chute sont équipées soit de turbine à réaction type KAPLAN avec pales orientables en fonction du débit, soit de groupes bulbes.

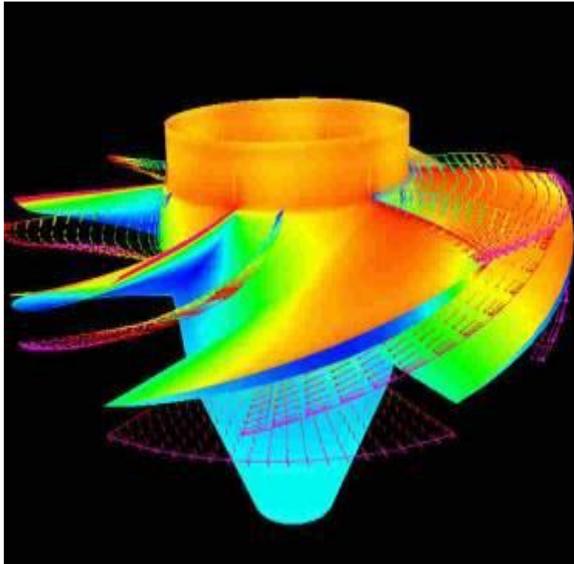


Figure. II.12 Turbine KAPLAN

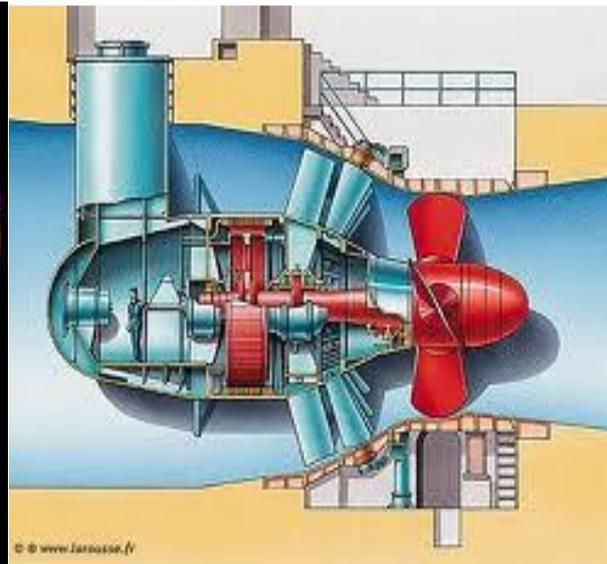


Figure. II.13 Turbine Bulbe

### II.3.4. Classification des centrales hydrauliques

#### II.3.4.1. Centrales de hautes chutes

La hauteur de chute est supérieure à 200m. Il s'agit de centrale située en montagne (fort dénivelé sur de courtes distances). L'eau est retenue par des barrages et évacuée par des conduites forcées vers la turbine. L'unité de production est éloignée du barrage.

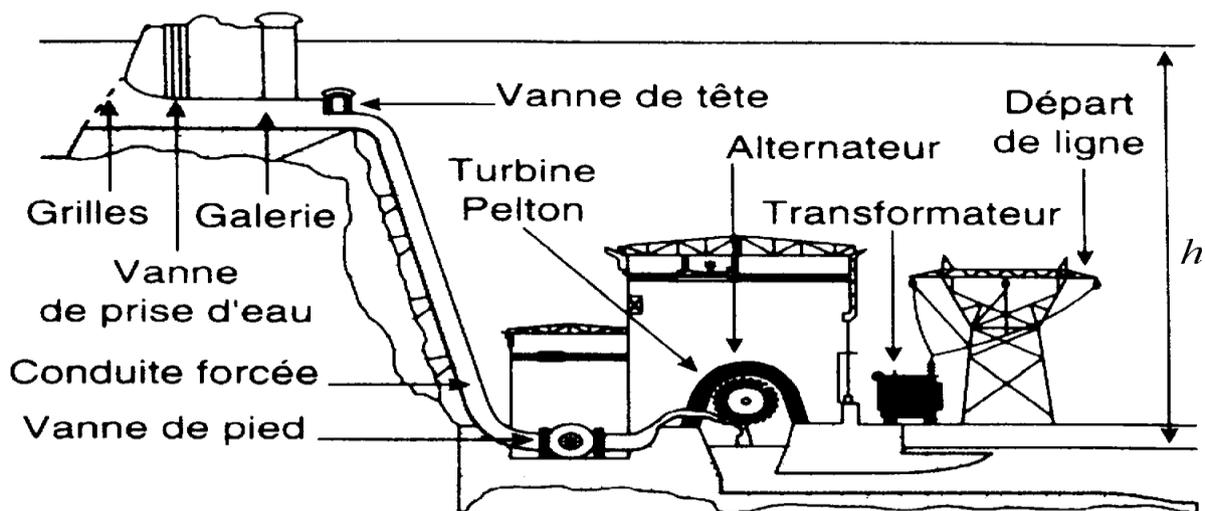


Figure. II.14 Centrales de hautes chutes

La turbine est de type PELTON. L'alternateur est en prolongement de la turbine, sa vitesse est donc celle de la turbine (solidarité mécanique). L'alternateur est couplé sur le réseau 50 Hz avec d'autres alternateurs ; il est donc nécessaire d'adapter constamment la vitesse de rotation de telle façon que la fréquence des FEM induites soit 50Hz.

### II.3.4.2. Centrales de moyennes chutes

La hauteur de chute est comprise entre 30m et 200m. L'unité de production est à proximité de la retenue.

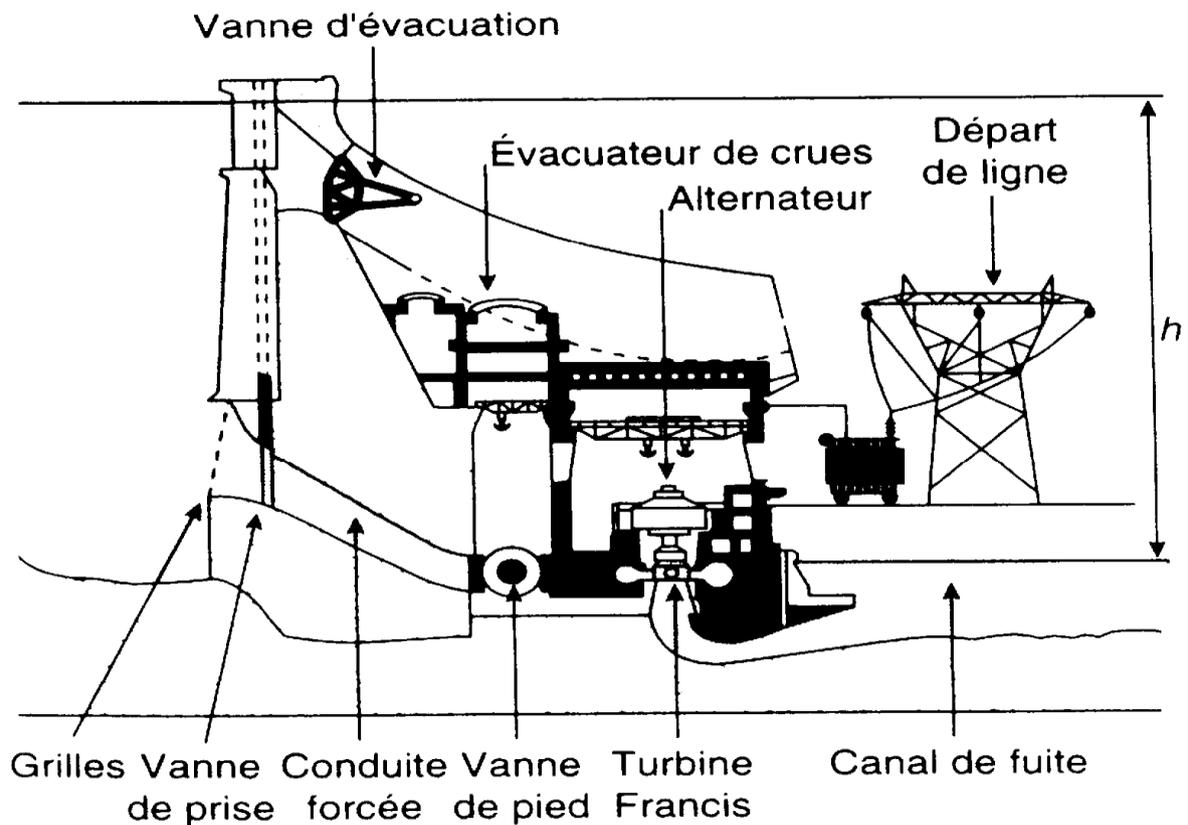


Figure. II.15 Centrales de moyennes chutes

La turbine est de type FRANCIS. Le groupe turbine-alternateur est disposé sur un axe vertical.

### II.3.4.3. Les centrales de basses chutes

La hauteur de chute est inférieure à 30m. On les appelle aussi centrale au fil de l'eau. Elles sont caractérisées par une hauteur très faible et un très fort débit.

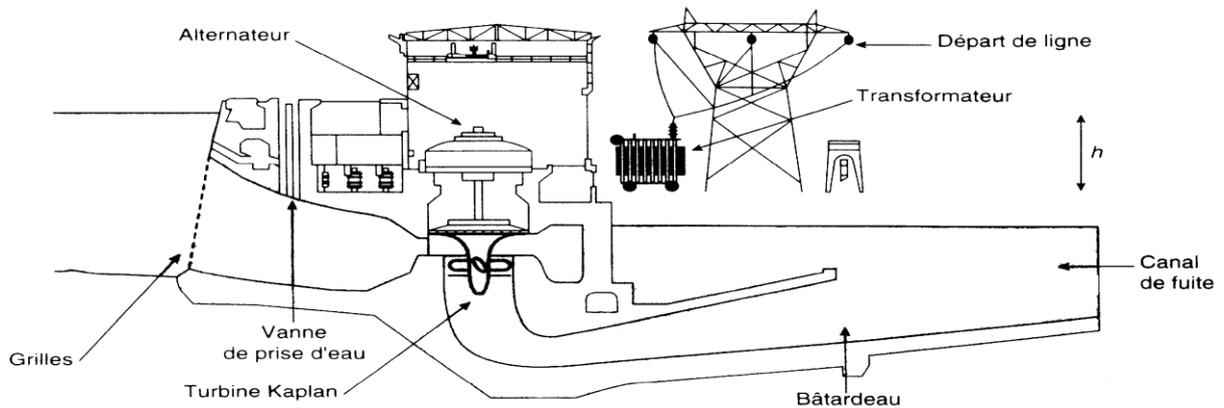


Figure. II.16 Centrales de basses chutes

La turbine est de type KAPLAN. Le groupe turbine-alternateur est disposé sur un axe vertical.

## II.4. Etude technologique d'une centrale photovoltaïque

### II.4.1. Principe d'une centrale photovoltaïque

Une centrale photovoltaïque est un moyen de production d'électricité industriel qui permet de produire de l'électricité grâce à la lumière du soleil. Les panneaux solaires installés en rangées et reliés entre eux captent la lumière du soleil. Sous l'effet de la lumière, le silicium, un matériau conducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu. Un onduleur transforme ce courant en courant alternatif pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau. L'électricité est consommée par les appareils électriques. Si l'installation n'est pas raccordée au réseau (site isolé), elle peut être stockée dans des batteries. Sinon, tout ou partie de la production peut être réinjectée dans le réseau.

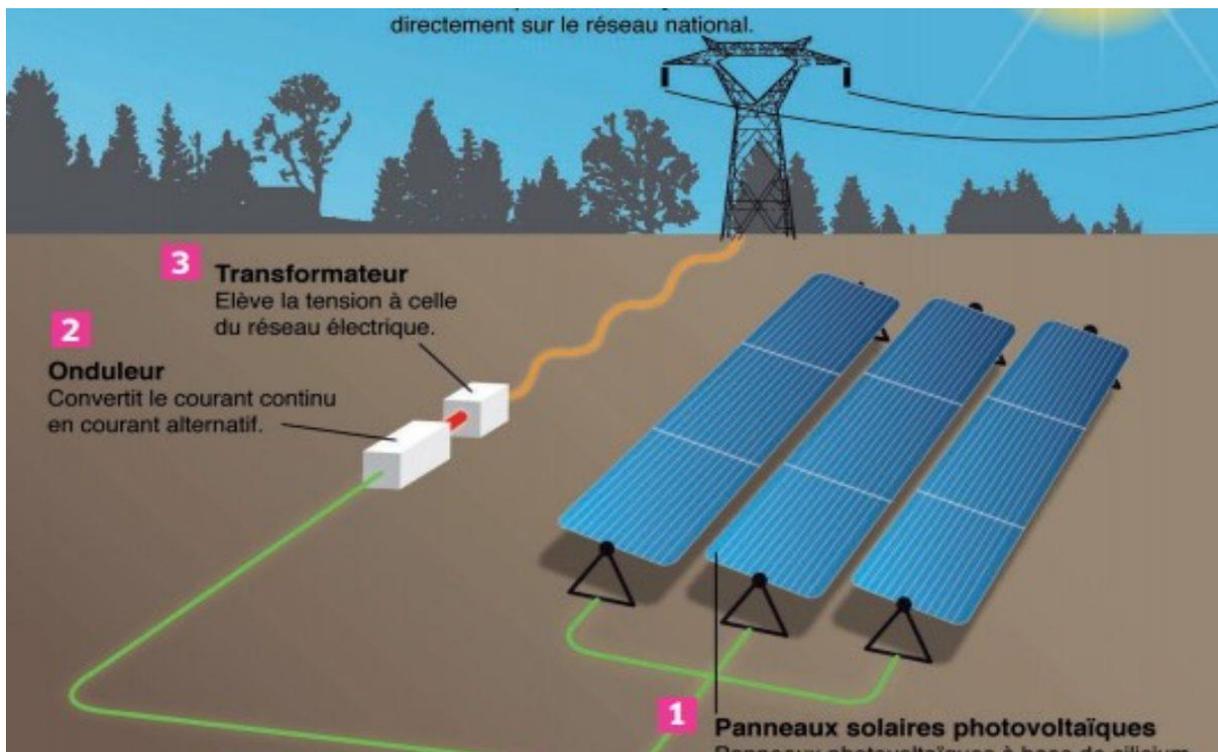


Figure. II.17 Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque

### II.4.2. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie. Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap ( $E_g$ ) de ce semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction [11].

Si les photons ont une énergie très supérieure à ( $E_g$ ), ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure ( $E_g$ ) ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

### II.4.3. Cellules photovoltaïques ou photopiles

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des composants électroniques à semi-conducteur qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Les matériaux les plus connus sont :

- Le silicium (Si)
- Le sulfure de cadmium (Cds)
- L'arséniure de gallium (As Ga)
- Le tellure de cadmium (Cd Te)
- Le germanium (Ge)
- Le phosphore d'indium (InP)

Toutefois, le matériau le plus couramment utilisé est le silicium pour obtenir à partir de la silice par transformations chimiques et métallurgiques [4].

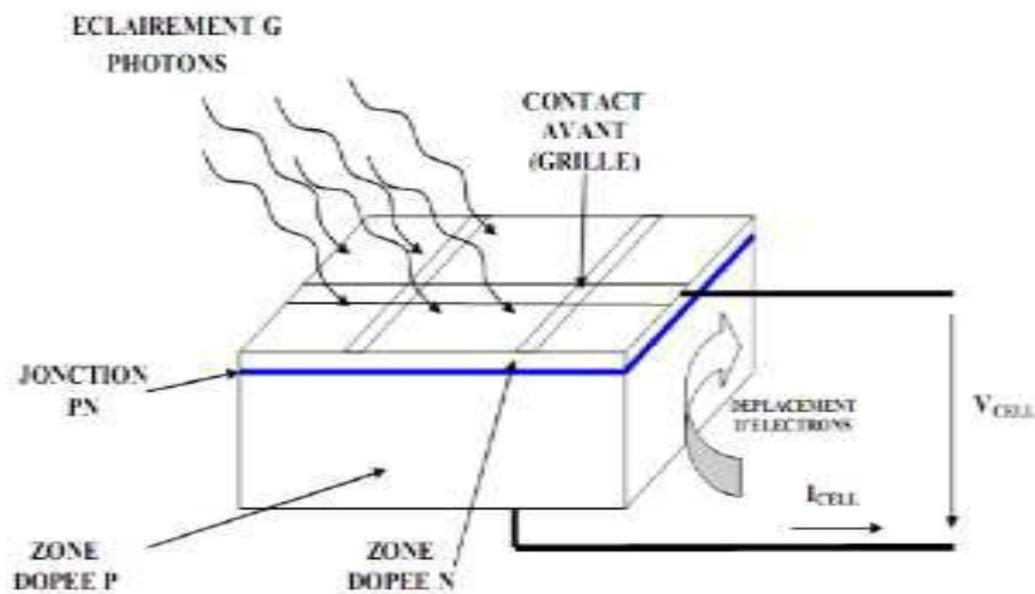


Fig. II.18 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [12]

### II.4.4. Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules :

#### a) Cellules mono- cristallines

Les cellules monocristallines qui s'approchent le plus du modèle théorique, est effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches [13].

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Première génération de photopiles ;
- Un taux de rendement de 15 % et jusqu'à 24 % en labo ;
- Méthode de production laborieuse et difficile donc très chère ;
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur [14].



**Fig. II.19** Cellule photovoltaïque (monocristalline) [15]

### b) Cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et hétérogènes [12].

Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé ;
- Procédé moins gourmand en énergie ;
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo [16].



**Fig. II.20** Cellule PV poly cristalline

### c) Cellules amorphes

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [12].

- Coût de production bien plus bas ;
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo ;
- Fonctionne sous très faible éclairément [14].



**Fig. II.21** Cellule PV amorphes

### II.4.5. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque

#### a) Avantage

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on cite :

- Une haute fiabilité où l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ;
- Leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet ;
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. Il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé ;
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes [17].

#### b) Inconvénients

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau du fonctionnement et de la fabrication :

- Une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels ;
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante [18].

### II.5. Conclusion

A la lumière de toutes les données abordées dans ce volet de notre travail, nous pouvons dire que les centrales à énergies renouvelables sont considérées comme des unités de production de l'électricité en grande quantité et à grande intensité, en utilisant des ressources et des sources naturels illimités disponibles en quantité importante sur terre, en utilisant des procédés variés et différents les uns des autres, mais qui ont en commun la même caractéristique qui est d'être plus écologique, et plus fiables que celles des énergies standards ou conventionnelles, malgré les inconvénients cités dans le point précédent.

# CHAPITRE III

## Chapitre III : Amélioration des performances d'une centrale à énergie renouvelable

### III.1. Introduction

Les habitants de la planète sont de plus en plus confrontés à des problèmes énergétiques et environnementaux largement reconnus à travers le monde, dont :

- La raréfaction des ressources primaires d'énergies traditionnelles;
- Le réchauffement de la planète par effet de serre.

La réponse à ces deux problèmes est un véritable défi qui nécessite d'agir en parallèle sur le développement des sources d'énergie renouvelables, ainsi qu'une consommation modérée des ressources énergétiques, l'amélioration des performances de nos systèmes pour but d'atteindre des rendements plus grand et d'avoir des systèmes plus rentable afin de satisfaire les besoins énergétique et économique, dans notre travail en vas s'intéresser à l'amélioration des performances des centrales PV.

### III.2. Amélioration du rendement

Afin d'améliorer notre système on a utilisé des panneaux solaire traqueurs à la place des panneaux classiques ces traqueurs équiper de deux cerveau moteur qui permettent la mobilité de notre panneau sur deux axes afin de suivre parfaitement le mouvement du soleil.

#### III.2.1. Modèle mathématique et modélisation

##### III.2.1.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous (Figure. III.1). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$ , les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$ , une résistance série  $R_s$  qui doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule, une résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit  $R_{sh}$ , cette valeur devra être la plus élevée possible [20].

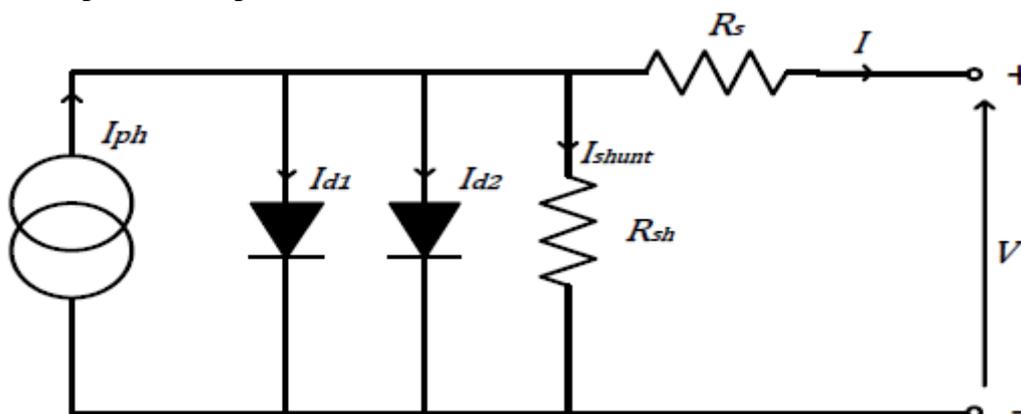


Figure. III.1 Cellule photovoltaïque a deux diodes

• **L'équation caractéristique [21] :**

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \dots \dots \dots (III.1)$$

$I_{ph}$  : Courant photonique ;

$I_{d1}$  : Courant de diode 1 ;

$I_{d2}$  : Courant de diode 2.

$$I_{d1} = I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_d}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \dots \dots \dots (III.2)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_d}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \dots \dots \dots (III.3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots (III.4)$$

$V_t = \frac{KT_c}{q}$  : Représentant le potentiel thermodynamique ;

$T_c$  : La température absolue ;

$q$  : La constante de charge d'électron,  $1,602 \cdot 10^{-19}$  ;

$K$  : La constante de Boltzmann,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J.K ;

$I_{sh}$  : Le courant de la résistance de shunt.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [21,22] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots (III.5)$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [21,23] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph\_ref} - \mu_{cc} (T_c - T_{c\_ref})) \dots \dots \dots (III.6)$$

$I_{ph\_ref}$  : Le courant photonique sous condition de référence [A] ;

$\mu_{cc}$  : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K] ;

$G, G_{ref}$  : L'éclairement réels et à la condition de référence [W/m<sup>2</sup>] ;

$T_c, T_{c\_ref}$  : La température de cellule réelle et la température de cellule aux conditions de référence.

Les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  sont donnés par les relations suivantes [21,24] :

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp \left( \frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot K} \right) \dots \dots \dots (III.7)$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp \left( \frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot K} \right) \dots \dots \dots (III.8)$$

Les constantes  $C_{s1}$  et  $C_{s2}$  sont généralement comprises respectivement entre  $150 - 180$  A. K<sup>-3</sup> et  $1,3 - 1,7 \times 10^{-2}$  A. K<sup>-5/2</sup> pour une cellule de 100 cm<sup>2</sup>.

$E_{gap}$  : Energie de gap (Silicium cristallin =1.12 eV, Silicium amorphe =1.7 eV, CdTe = 1.5 eV).

### III.2.1.2. Modèle d'un module photovoltaïque [25, 26, 27]

L'équation de base de la cellule photovoltaïque élémentaire ne représente pas la caractéristique d'un module photovoltaïque. Les modules sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle.

L'augmentation de la tension se fait par la connexion série des cellules, et l'augmentation du courant se fait par la connexion parallèle des cellules.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{q(V+R_s I)}{\alpha K T N_s} - 1 \right) - \frac{(V+R_s I)}{R_{sh}} \dots \dots \dots (III.9)$$

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T - 298.15)) \frac{G}{1000} \dots \dots \dots (III.10)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_i(T - 298.15)}{\exp \left( \frac{q(V_{oc} + K_v(T - 298.15))}{\alpha K T N_s} \right) - 1} \dots \dots \dots (III.11)$$

Le logiciel Matlab offre ses paramètres et ses caractéristiques pour la modélisation des équations mathématique qui régit notre module photovoltaïque, donc nous pouvons valider notre modélisation en se basant sur tout ce qu'est fourni par le logiciel Matlab

Spécifications du module PV dans les conditions de test standard

**Tableau. III.1** Module PV dans les conditions de test standard

$I_{ph}$	8.214 A
$R_{sh}$	415.405 $\Omega$
$R_s$	$221.10^{-3} \Omega$
$E_g$	1.1Ev
n1, n2	1, 3
K	$1,38.10^{-23} J.k$
Q	$1,602.10^{-19} C$
$N_s$	54

$I_{ph}$  : le photo-courant ;

$I_0$  : le courant de saturation inverse de la diode ;

$N_s$  : le nombre des cellules en série ;

V : la tension aux bornes du module ;

- I : le courant du module ;
- T : la température ambiante en K ;
- $\alpha$  : le facteur d'idéalité ;
- G : irradiation solaire en  $w/m^2$  ;
- $R_s$  : les résistances série du module ;
- $R_{sh}$  : les résistances shunt du module.

Par conséquent, le comportement physique du module photovoltaïque est en relation avec  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$  et de  $R_{sh}$  d'une part, et d'une autre part avec deux autres paramètres environnementaux à savoir la température et l'irradiation solaire.

### III.2.2. Commande du système

Pour que la puissance de la sortie soit optimale, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge, à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), il existe plusieurs méthodes dans cette perspective, nous allons étudier un convertisseur Boost, commandé par un MPPT de type perturbe and observe (P&O), en utilisant Matlab [28].

#### III.2.2.1 Hacheur élévateur

Le convertisseur statique continu/continu (DC/DC) utilisé, est le plus fréquemment utilisé comme convertisseur élévateur (Boost) (III.2) [29, 30].

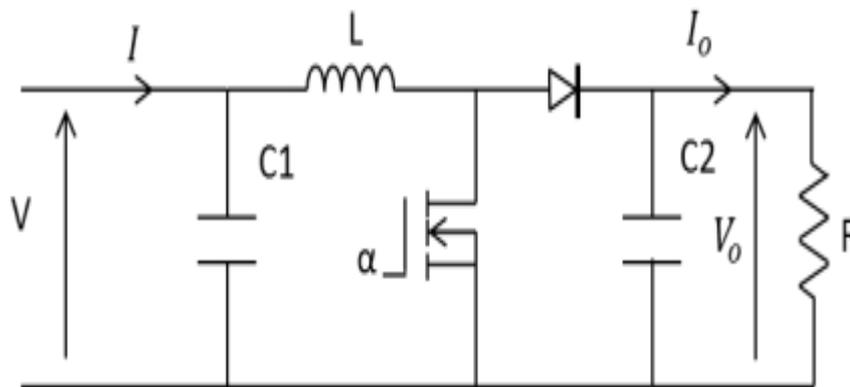


Figure. III.2 Hacheur Boost

#### III .2.2.2. Commande perturbation et observation

Le principe de cette commande est de générer des perturbations en diminuant ou en augmentant le rapport cyclique  $\alpha$  et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le GPV [29, 30].

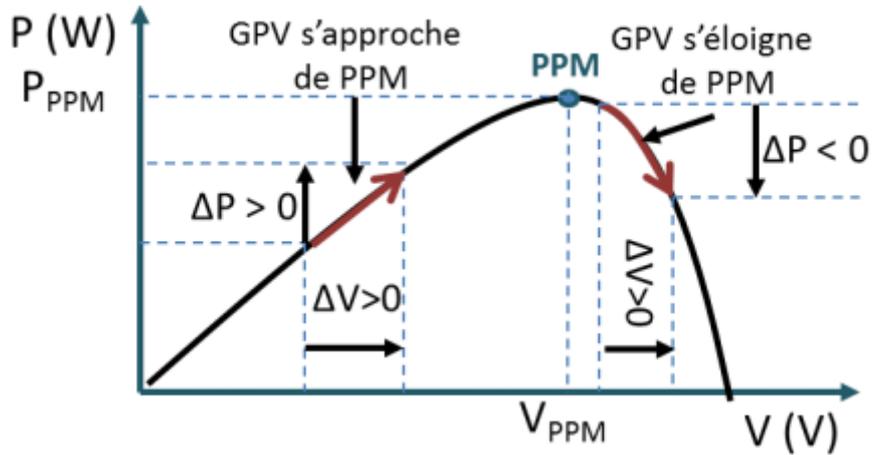


Figure. III.3 Commande P&O

L'organigramme de cette commande est représenté dans la figure III.4 suivante :

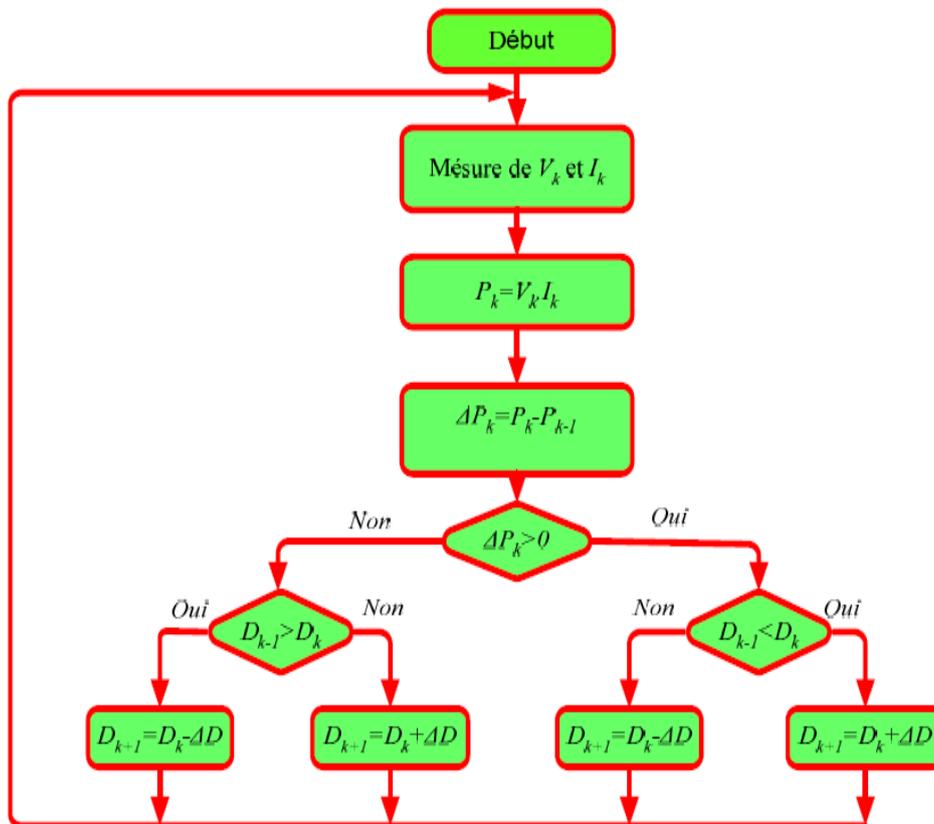


Figure. III.4 Organigramme de l'algorithme perturbation & observation

### III.2.3. Modélisation des deux cerveaux moteurs

Pour la modélisation sous Matlab des deux cerveaux moteurs qui dirige notre panneau photovoltaïque vers le soleil.

On a utilisé les équations suivantes :

- Pour le panneau :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} (T - K_d \frac{d\theta}{dt}) \dots\dots\dots (III.12)$$

J: Moment d'inertie ;

T: Couple(N.m) ;

K<sub>d</sub>: Constante ;

θ: Position.

- Pour les deux cerveaux :

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U - Ri - k_1 k_2 \Omega) \dots\dots\dots (III.13)$$

L : Inductance(H) ;

U : Tension(V) ;

R : Resistance(Ω) ;

i : Courant(A) ;

k<sub>1</sub> : Constante1 ;

k<sub>2</sub> : Constante2 ;

Ω : Vitesse(rd/s).

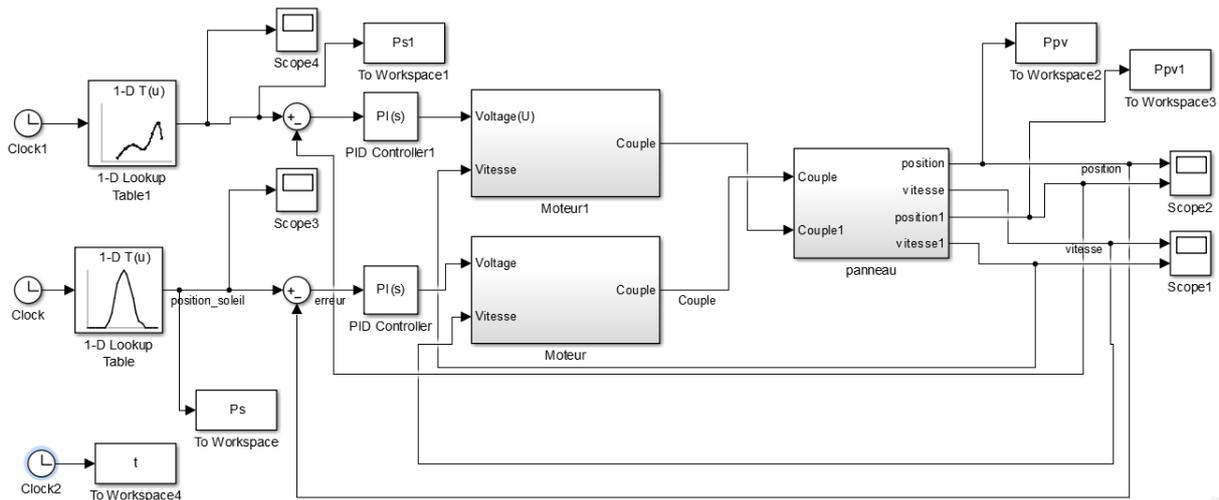


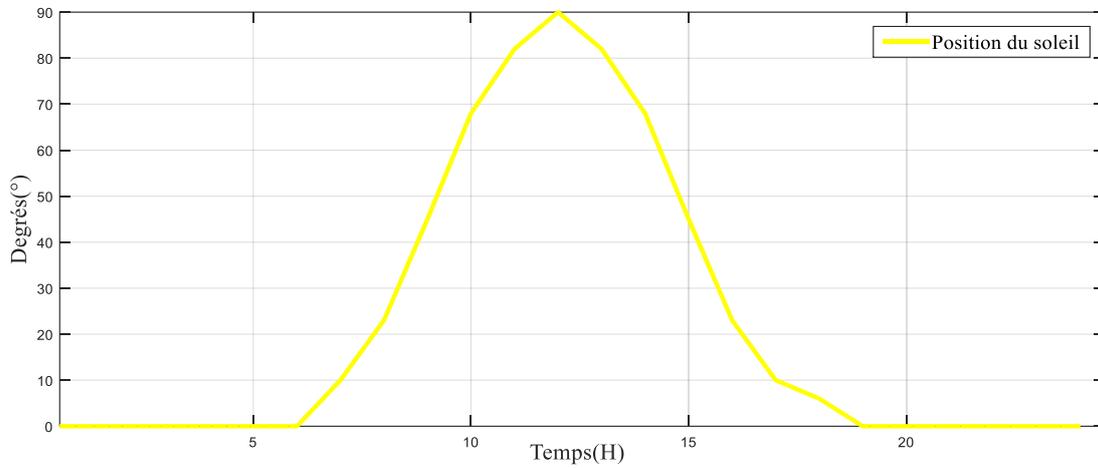
Figure. III.5 Schéma du panneau traqueur

### III.2.3.1. Correcteur utilise

Parmi les correcteur existant on a utilisé le régulateur PI (proportionnelle intégrale) ce dernier génère une commande qui nous permet d'amélioré le temps de réponse et d'annule complètement l'erreur statique.

Son équation ce définie par :  $C(p) = K \cdot P + \frac{1}{T_i \cdot P}$ ..... (III.14)

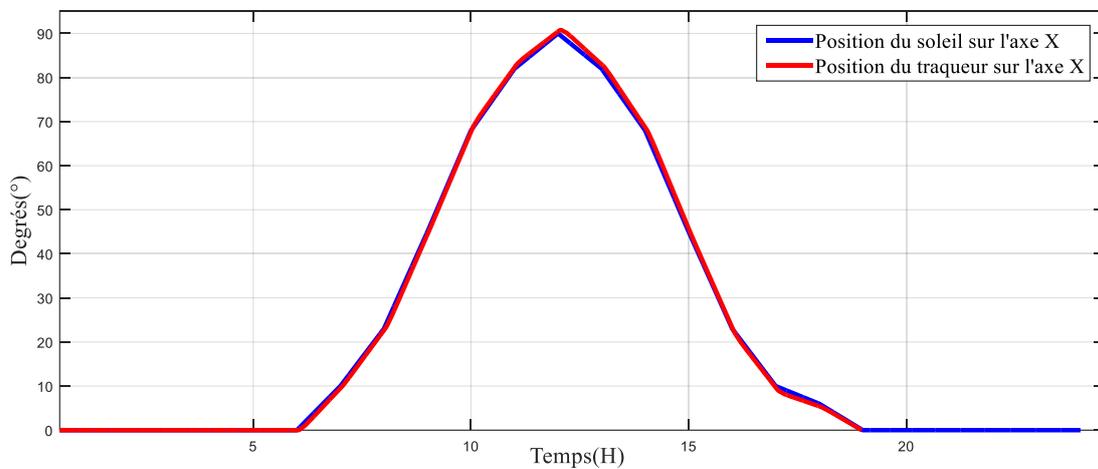
### III.2.4. Position du soleil



**Figure. III.6** position du soleil pour la journée du 22 Septembre par rapport à l’horizon

### III.2.5. Panneau traqueur

A l’aide des deux cerveaux moteurs on a eu un panneau photovoltaïque qui suit parfaitement la position du soleil sur les deux axes.



**Figure. III.7** Panneau traqueur sur l’axe X

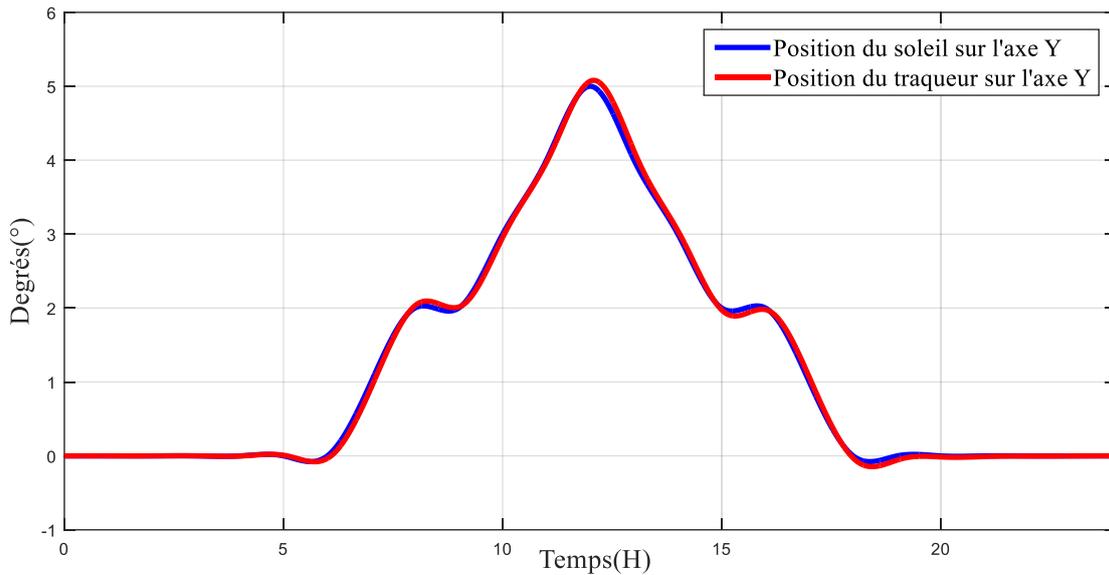


Figure. III.8 Panneau traqueur sur l'axe Y

### III.2.6. Equation et calcule du rayonnement [32]

- **Déclinaison solaire :**

La déclinaison solaire  $\delta$  correspond à l'angle que forme la direction Terre-Soleil par rapport au plan de l'équateur terrestre.

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284+J}{365} \right) \dots\dots\dots (III.15)$$

J : Correspond au jour de l'année (de 1 à 366).

- **Inclinaison solaire :**

L'inclinaison solaire  $\alpha$  correspond à l'angle entre le soleil est l'horizon.

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \eta \dots\dots\dots (III.16)$$

Avec  $\varphi$  la latitude (ex : 46.75°N pour Bejaia) et  $\eta$  l'angle horaire définie par:

$$\eta = 15(12 - H) \dots\dots\dots (III.17)$$

H : Etant le temps solaire (en heure décimale, ex: 6.12) défini par:

$$H = \text{HeureGMT} + \left( \frac{4L}{60} \right) - E \dots\dots\dots (III.18)$$

On additionne à l'heure GMT le décalage horaire induit par la longitude L (soit 4min/°)

E : Le résultat de l'équation du temps. Vu la précision des calculs ici, on considère que E=0.

• **Flux solaire :**

Le flux solaire est le rayonnement solaire (en W/m<sup>2</sup>) présent à l'entrée de l'atmosphère.

$$R_{out} = Sc \times \left(1 + 0.034 \times \cos\left(360 \times \frac{J}{365}\right)\right) \dots \dots \dots (III.19)$$

Sc : La constante solaire, définie par l'OMM, qui est égale à 1367 W/m<sup>2</sup> et J le jour de l'année

• **Influence de l'atmosphère et de l'altitude de la mesure :**

L'altitude de la mesure influe sur le flux de l'ensoleillement étant donné que plus haut on se situe, plus la couche de l'atmosphère a traversé est moins épaisse.

$$M = M_0 \times \frac{P}{P_0} \dots \dots \dots (III.20)$$

P : Est la pression relative, Po la pression absolue.

$$M_0 = \sqrt{1229 + (614 \sin \alpha)^2} - 614 \sin \alpha \dots \dots \dots (III.21)$$

Dans notre cas on néglige le facteur de correction de l'altitude donc M = M<sub>0</sub>

• **Rayonnement solaire global :**

Le rayonnement solaire global est le résultat de l'addition du rayonnement directe, du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement solaire diffus. Ici la mesure est effectuée à l'horizontal, le rayonnement réfléchi est donc nul.

• **Rayonnement directe :**

$$R_{dir} = R_{out} \times \tau^M \times \sin \alpha \dots \dots \dots (III.22)$$

Avec  $\tau = 0.6$

• **Rayonnement diffus :**

$$R_{diff} = R_{out} \times (0.271 - 0.294 \times \tau^M) \times \sin \alpha \dots \dots \dots (III.23)$$

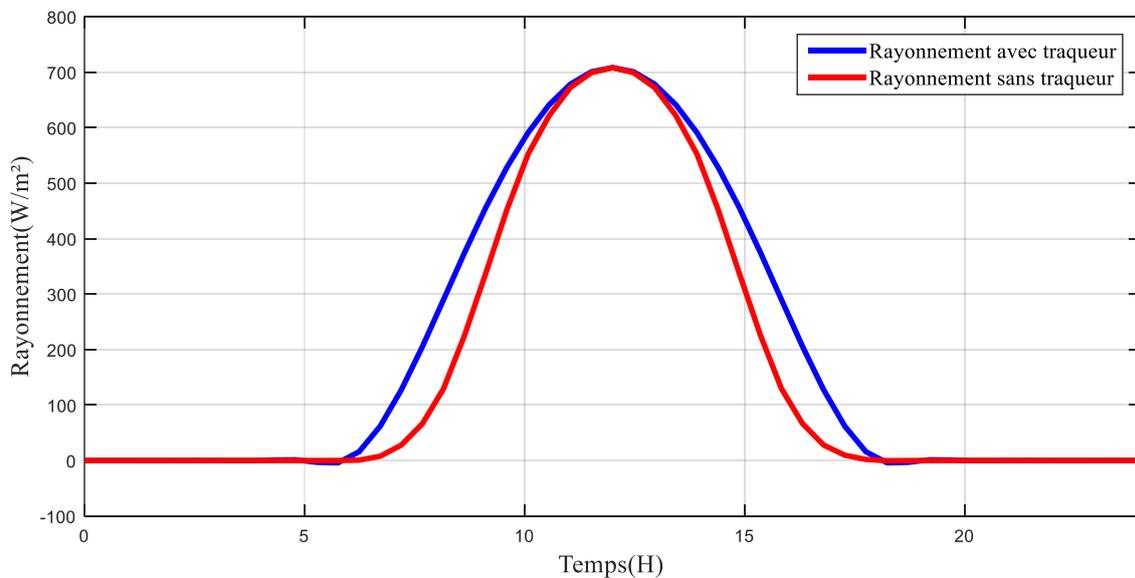
On en déduit ainsi le rayonnement solaire global

$$R_{tot} = R_{diff} - R_{dir} \dots \dots \dots (III.24)$$

Le tableau III.2, nous donne le rayonnement reçu par un site à la wilaya de Bejaia avec la latitude de 46.75°N pour la journée du 22 Septembre. Ce dernier a été calculé à l'aide des équations précédemment cités.

**Tableau. III.2** Rayonnement pour la journée de 22 Septembre à Bejaia

Heure(h)	Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )
00 : 00	0
01 : 00	0
02 : 00	0
03 : 00	0
04 : 00	0
05 : 00	0
06 : 00	2.305
07 : 00	98.072
08 : 00	261.3197
09 : 00	436.3623
10 : 00	581.16
11 : 00	675.5
12 : 00	708
13 : 00	675.5
14 : 00	581.16
15 : 00	436.3623
16 : 00	261.3197
17 : 00	98.072
18 : 00	2.305
19 : 00	0
20 : 00	0
21 : 00	0
22 : 00	0
23 : 00	0



**Figure. III.9** Rayonnement du soleil reçu par les panneaux photovoltaïques

### III.2.7. Visualisation des résultats sous Matlab pour un panneau

- **Puissance :**

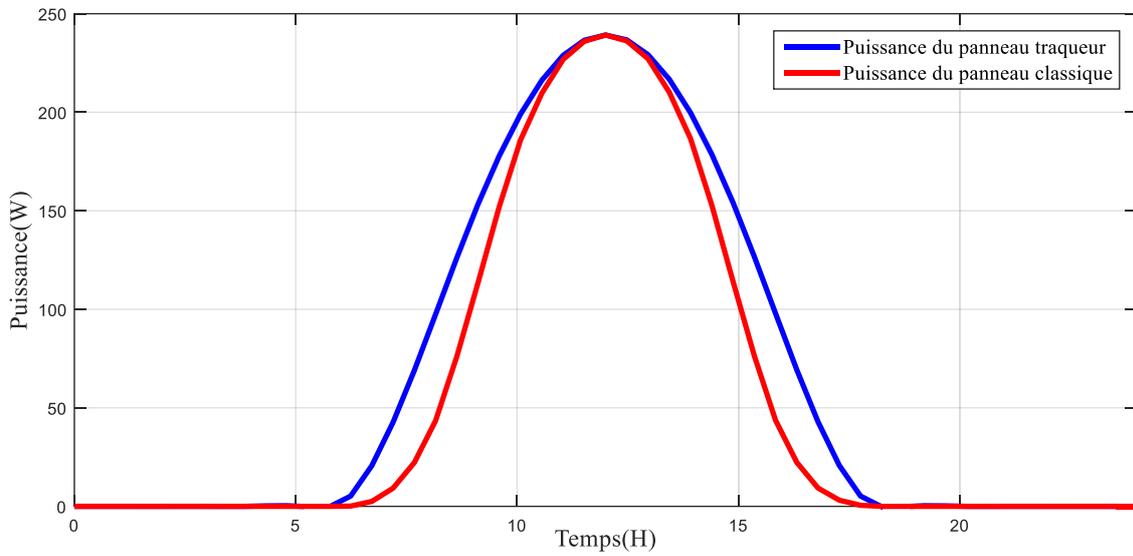


Figure. III.10 Allure de la puissance d'un panneau

- **Courant :**

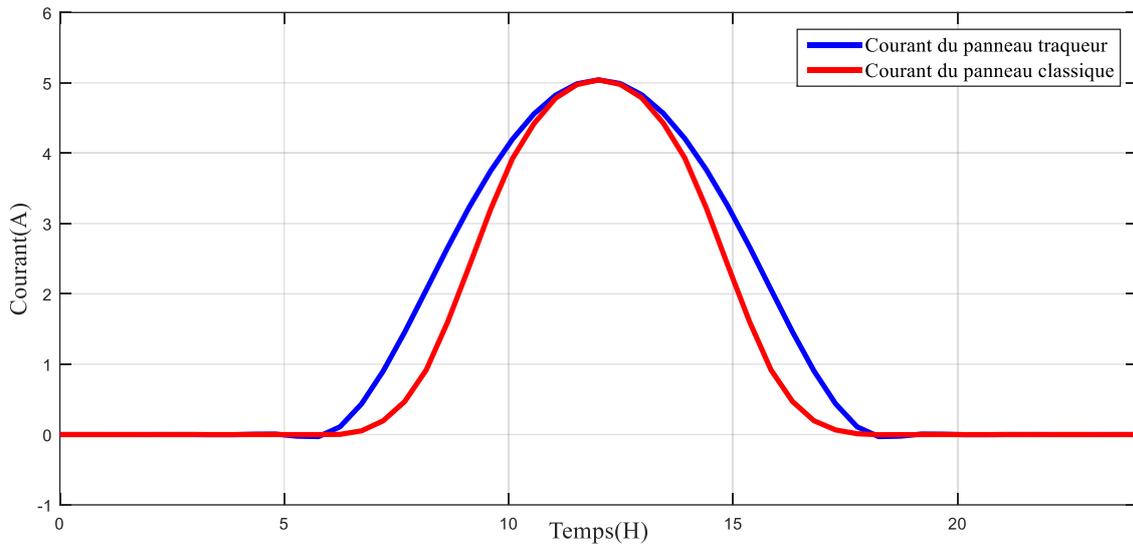
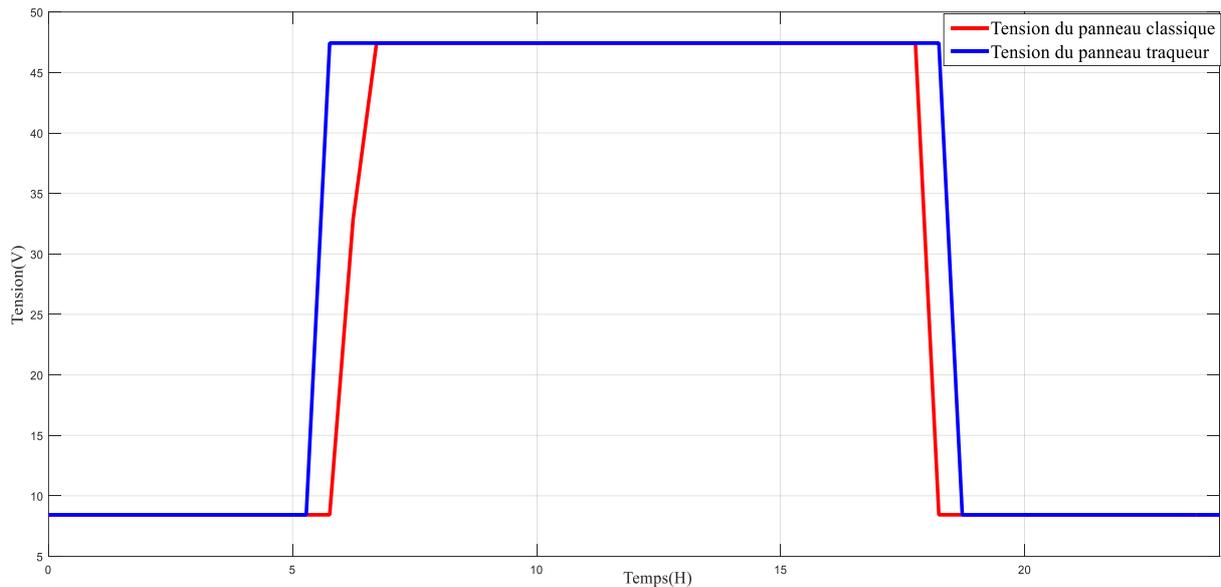


Figure. III.11 Allure du courant d'un panneau

• **Tension :**



**Figure. III.12** Allure de la tension d'un panneau

**Interprétation des graphes :**

➤ **Puissance :**

Nous constatons que dès le lever du jour le panneau traqueur nous fournit plus de puissance que le classique (sans traqueur) et cela dû au fait qu'il suit parfaitement la position du soleil, il est toujours perpendiculaire au rayons du soleil donc il absorbe toujours un maximum de rayonnement. Par exemple à 8h du matin notre panneau traqueur délivre une puissance de 88 W alors que le classique fournit une puissance de 36.5 W.

Certes les deux panneaux nous fournissent une puissance maximale de 239 W à 12h et cela est dû au fait qu'ils soient tous les deux face au rayons du soleil, mais dès que le soleil continue sa trajectoire la différence de puissance commence à se ressentir de nouveau, c'est le cas à 15h le traqueur nous fournit 147.2W de puissance et le classique reste inférieur et nous donne 104.6W.

➤ **Courant :**

Pour le courant on constate pratiquement la même chose que la puissance, le panneau traqueur nous délivre plus de courant que le classique, dès l'apparition du soleil jusqu'à sa disparition. On prend l'exemple de 9h du matin le traqueur délivre un courant de 3.091A tandis que le classique est à 2.2A, et la valeur du courant que nous délivre se dernier reste inférieur au panneau traqueur durant toute la journée. Cela toujours avec une valeur maximale de 5A pour les deux panneaux à 12h.

➤ **Tension :**

On constate que le panneau traqueur commence à nous fournir de la tension bien avant que le classique, la tension atteint sa valeur maximal de 47.25 V pour le panneau traqueur avant même que le classique ne commence à en fournir, après que la tension du panneau classique n'atteigne elle aussi la valeur max, les tensions reste les mêmes pour les deux panneaux durant toute la journée, jusqu'à la fin de cette dernière où le

soleil commence à se coucher ce qui cause la diminution de la tension fournis jusqu'à atteindre sa valeur initiale de tension de circuit ouvert, et bien sûr même dans la diminution de tension, celle fournis par le panneau traqueur est supérieure à celle du panneau classique.

On peut déduire de cette interprétation que le panneau traqueur est plus performant et nous donne des résultats beaucoup plus intéressant que le panneau classique, en termes de courant et de tension fournis ainsi donc de puissance.

### III.2.8. Visualisation des résultats sous Matlab pour une centrale photovoltaïque

- **Puissance :**

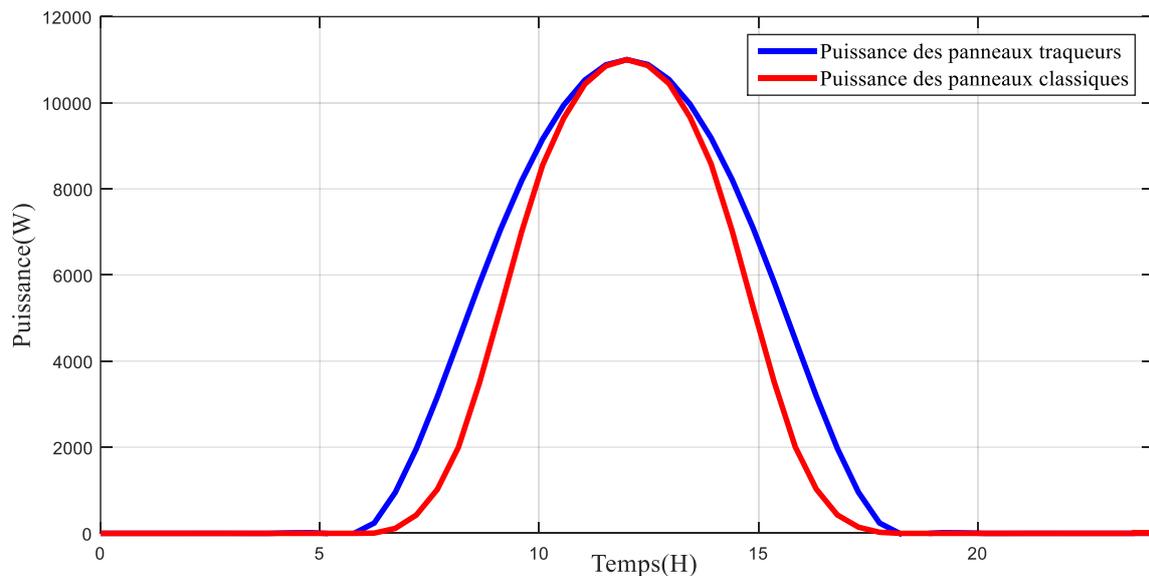


Figure. III.13 Allure de la puissance d'une centrale

- **Courant :**

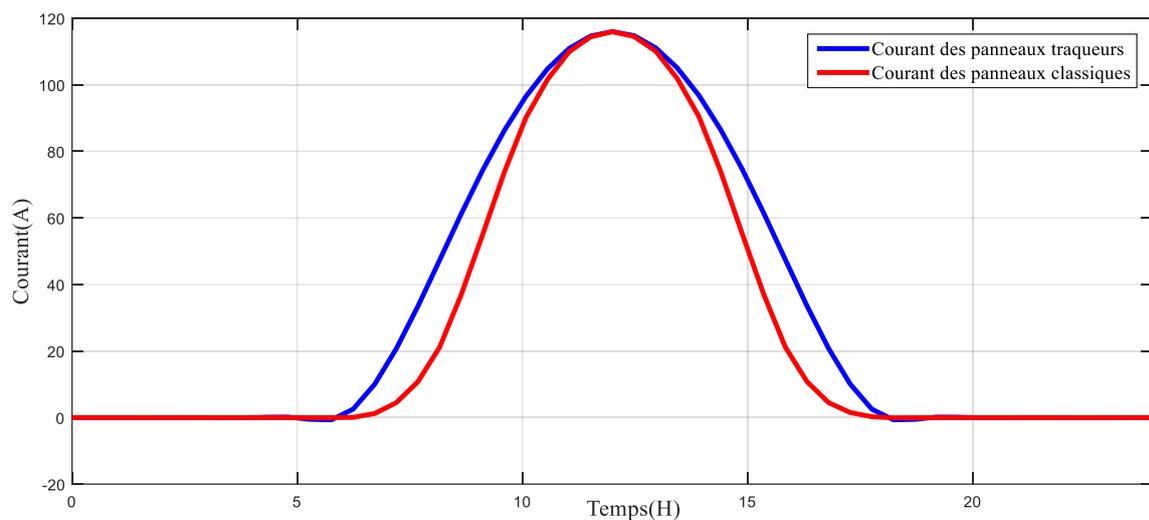
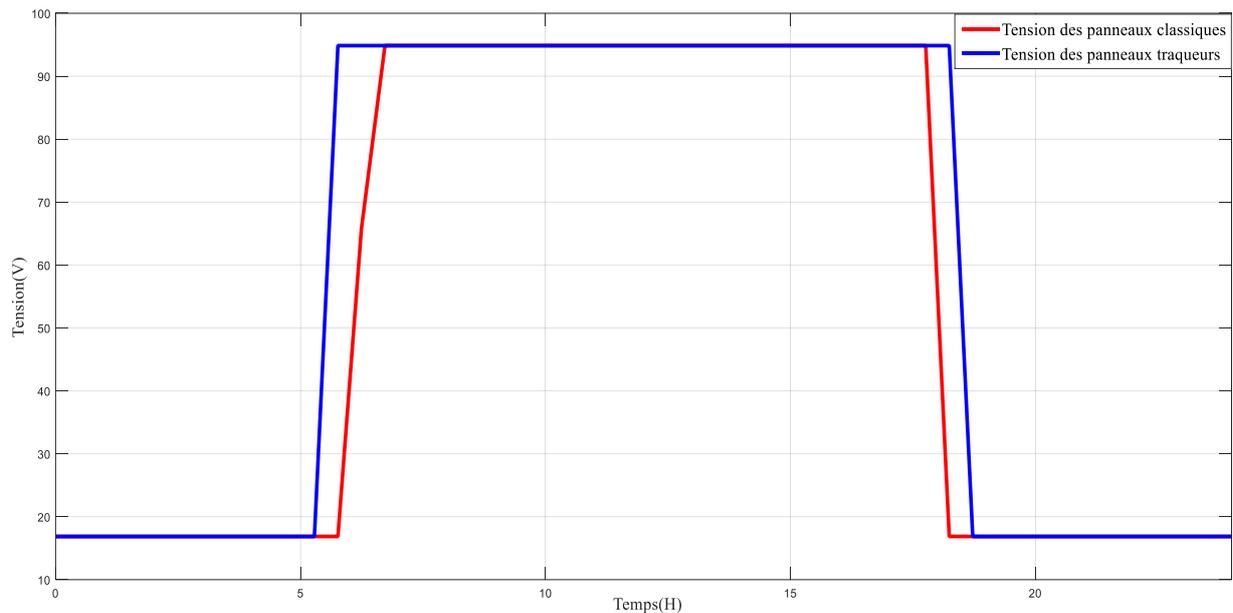


Figure. III.14 Allure du courant d'une centrale

• **Tension :**



**Figure. III.15** Allure de la tension d'une centrale

**Interprétation des graphes :**

On constate que pour une centrale les figures de puissance, de courant et de tension en exactement la même allure que celles pour un seul panneau, sauf que pour une centrale les valeurs de ces trois dernières ont été multipliées par le nombre de panneaux mis en série (23) pour le courant, multipliées par le nombre de panneaux mis en parallèle (2) pour la tension et multipliées par le nombre total de panneaux utilisés dans notre centrale (46) pour la puissance.

Donc on aura exactement les mêmes constatations pour les figures d'un seul panneau.

- **Remarque :** Le calcul du nombre de panneaux nécessaires pour la centrale photovoltaïque a été fait dans la suite de ce travail par un bilan de puissance nécessaire pour 3 domiciles.

On peut en déduire que même pour une centrale il est préférable d'installer des panneaux traqueurs au lieu des panneaux classiques, car ces derniers nous fournissent beaucoup moins de courant et de tension donc de puissance par rapport aux panneaux traqueurs qui sont plus performants et qui nous donnent un meilleur rendement. D'après nos calculs, notre centrale photovoltaïque munie de panneaux classiques offre une puissance moyenne de **61 944.5235 W** pendant une période de 12 heures d'ensoleillement, avec un pas de une (01) heure, alors que, notre centrale photovoltaïque, dotée de panneaux traqueurs, soit des panneaux améliorés grâce à des moteurs conçus pour suivre la position du soleil, nous permettent d'avoir une puissance moyenne **74 940.3501 W** sur la même période d'ensoleillement et avec le même pas de calcul. Donc, les panneaux photovoltaïques traqueurs nous fournissent un meilleur rendement (soit **17 %** de plus) que les panneaux dit «classiques».

### III .3. Amélioration du coût

#### III.3.1. Dimensionnement des panneaux solaire

##### III.3.1.1. Bilan des puissances

Pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque, il faut en premier lieu calculer la consommation énergétique autrement dit notre besoin journalier

•  $P_t = \sum_{i=1}^n P_i \dots \dots \dots (III.25)$   
 $P_t$  : Puissance total consommé en watt (w)

•  $E_t = \sum_{i=1}^n E_i \dots \dots \dots (III.26)$   
 $E$  : Energie total consommé en watt heure (wh)

**Tableau. III.3** Bilan de puissance

	Appareils	Nombre	Puissance unitaire (W)	Durée D'utilisation (h)	Puissance (W)	Energie (W*h)
Maison 1	Lampes	6	18	12	108	1296
	Congélateurs	2	100	24	200	4800
	Outils électronique	5	68	8	340	2720
	Pompe	1	1100	4	1100	4400
Maison 2	Lampes	6	18	10	108	1080
	Congélateurs	1	100	24	100	2400
	Outils électronique	6	68	6	408	2448
	Pompe	1	1100	3	1100	3300
Maison 3	Lampes	6	18	12	108	1296
	Congélateurs	1	100	24	100	2400
	Outils électronique	7	18	12	126	1512
	Pompe	1	1100	3	1100	3300
<b>Total</b>					<b>4898</b>	<b>30952</b>

##### III.3.1.2. Calcule de l'énergie produite

$E_p = \frac{E_c}{k} \dots \dots \dots (III.27)$

k: Coefficient k tient compte des facteurs suivant :

- Incertitude météorologique ;
- Inclinaison non corrigé des modules suivant la saison ;
- Point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par : la baisse des caractéristiques des modules et la perte de rendement des modules dans le temps (vieillesissement et poussières) ;
- Rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie (90%) ;



$$C = 4160AH$$

- $E_p$  : Energie produite ;
- $A$  : Autonomie en prend deux jours ;
- $V$  : Tension de la batterie choisie ;
- DOD : Décharge maximum 50% dans notre cas.

### III.3.2.2. Nombre de batterie nécessaire

$$N_b = \frac{C}{C_1} = 4 \dots \dots \dots (III.31)$$

$C_1$  : La capacité de la batterie utilisé 1000AH

### III.3.3. Dimensionnement du câblage

Calcule de la section d'un câble :

$$S = \frac{\rho \cdot L \cdot I}{\frac{\Delta U \cdot U}{100}} = \frac{1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 500 \cdot 116}{0,03 \cdot 94,5} \dots \dots \dots (III.32)$$

$$S = 368,25 \text{ mm}^2$$

- $\rho$  : Résistivité du matériau ( $\Omega \cdot m^2 / m$ ) ;
- $L$  : Longueur du câble (m) ;
- $I$  : Courant de la centrale (116A) ;
- $\Delta U$  : Chute de tension (V) ;
- $U$  : Tension de la centrale (94.5V).

On a utilisé deux câbles à la sortie de notre centrale photovoltaïque vue qu'elle nous fournit du courant continue.

### III.3.4. Calcule des pertes du câblage

- Calcule de la résistance :

$$R = \rho \frac{L}{S} = \frac{1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 500}{368,25 \cdot 10^{-6}} = 0.0244 \Omega \dots \dots \dots (III.33)$$

$$R = 0.0244 \Omega$$

- Calcule des pertes par effet joule dans un seul câble :

$$P_r = R \cdot I^2 = 328,73W \dots \dots \dots (III.34)$$

Donc la totalité de la puissance perdue dans le câblage est égale à  $2 \cdot P_r = 657,46W$

### III.3.5. Calcul du coût total

#### III.3.5.1. Calcul pour une centrale photovoltaïque proche du domicile

Les prix des panneaux solaires pour une installation de taille moyenne en Algérie varient généralement de 25.000 DA à 50.000 DA, donc pour nos calculs on prend un prix moyen de 37500 DA pour un panneau.

Pour 46 panneaux le prix sera de 1725000 DA.

Le prix d'une batterie lithium 48 V d'une capacité de 1000AH est de 300000 DA, pour nos 4 batteries sa sera 1200000 DA.

Pour le câblage on aura besoin d'environ 5 mètre de câble pour alimenter une de nos maison de la centrale photovoltaïque, avec un prix moyen de 1500 DA/mètre pour un câble de 368.25 mm<sup>2</sup> et vu qu'on aura deux câbles à la sortie de notre centrale car c'est du courant continu donc le prix du câblage total sera de 15000 DA.

Le prix total de notre installation sera donc de 2940000 DA.

### III.3.5.2. Calcul pour une centrale photovoltaïque loin du domicile

Pour le prix des panneaux et celui des batteries sa sera le même avec le cas précédent, le problème dans le cas d'une centrale loin du domicile sera dans le coût du câblage qui sera très coûteux et il y'aura aussi des pertes de puissance au niveau des câbles qui pourront aussi être traduite en un coût.

Donc pour une distance de 500 mètres entre les domiciles et la centrale le coût du câblage sera de 1500000 DA, un prix qui n'est pas du tout négligeable par rapport au prix de notre installation.

Le prix total de notre installation dans ce cas sera de 4425000 DA.

### III.3.6. Interprétation des calculs

Après le calcul de coût, fait entre l'installation de centrale relativement éloignée, et des centrales installées à proximité des domiciles, nous avons constaté que le coût des centrales situées le plus près des domiciles (distance calculée sur la base de 5 mètre de distance) coûtent 294 000 0 Da, alors que les coûts des centrales installées plus loin (calculée sur une base de 500 mètres de distance) sont d'environ 442 500 0 Da, soit un prix plus élevé de 33 % que les centrales de proximité. Suite à tous les calculs fait dans le point précédent on peut en déduire que c'est plus pratique et moins coûteux d'avoir une centrale proche de nos domiciles

### III.3.7. Conclusion

Suite aux multiples efforts fait dans ce chapitre, qui s'est concentré sur deux axes à savoir, l'amélioration du rendement, et l'amélioration du coût, nous pouvons conclure en énumérant les points suivants :

- A l'aide des calculs des données relatives aux panneaux photovoltaïque, au rayonnement et à la position du soleil, ainsi qu'à ceux des panneaux suiveurs (Traqueurs), mais aussi au vue des caractéristique des moteurs, nous avons pu prouver que les panneaux dit « traqueurs » disposent d'un meilleur rendement que les panneaux classiques, en d'autre termes ces derniers fournissent beaucoup moins de puissance que les premiers.
- En utilisant des calculs visant à quantifier les bilans de puissances généraux nécessaires à (03) trois domiciles, mais aussi en calculant les dimensionnements du câblage, ainsi que des batteries et les prix relatifs à tous ces éléments, nous avons conclu qu'il serait plus rentable et efficaces d'installer les centrales photovoltaïque les plus près possible des domiciles, et ce au vue des coût pharamineux que nécessite l'installation de ces centrales en termes de câbles.

# CONCLUSION GENERALE

# CONCLUSION GENERALE

A travers de toutes les informations théoriques, et de toutes les données techniques, nous avons pu évoquer les généralités sur les différentes énergies renouvelables, en soulignant le fait que les énergies renouvelables soient des énergies inépuisables, et réutilisables, issues de sources naturelles diverses et variées disponibles en profusion sur terre.

L'utilisation de ces sources d'énergies engendre extrêmement peu de pollutions, voir même aucunes. Puis, nous avons étudié les différents types de centrales à énergies renouvelable, en arrivons à la conclusion que ces dernières sont des centrales qui permettent de généré une quantité d'énergie importante, via des procédées différents, mais qui sont tous, sans exception, plus vert et donc écologique.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous nous sommes concentrés sur deux axes à savoir, l'amélioration du rendement, et l'amélioration du coût, grâce à nos calculs, nous avons prouvé que les panneaux traqueurs disposent d'un meilleur rendement que les panneaux classiques et qu'il serait plus rentable et efficaces d'installer les centrales photovoltaïque les plus près possible des domiciles.