

# *Remerciements*



Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre encadreur **M. Amara Mohamed** Pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période de la préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à accepter d'examiner ce travail, de le juger et de l'enrichir par leurs suggestions, remarques et propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé ou de loin à la réalisation de ce travail.

*Merci à tous*

# *Dédicaces*



C'est avec une grande joie je dédie ce mémoire :

A mes parents, à qui je dois tant et qui n'ont cessé de me témoigner affection, soutien et encouragement durant les longues années des études.

A mes cher grands parents qui m'ont soutenu et encourager.

A mes frères et mes sœurs.

A mon binôme Mustapha.

A mes oncles et mes tantes.

A mes cousins et mes cousines.

A toute ma famille et mes collègues.

A tout les étudiants de ma promotion.

Et à tous mes amis qui m'ont soutenu, encouragé durant mes études.

A tous ceux qui m'aime.

***A. Adjila***

# *Dédicaces*



C'est avec une grande joie que je me permets de dédie cet humble travail à ceux qui  
Sont les plus chers du monde :

Mes parents

Mes frères et sœurs.

A toute ma famille et mes collègues.

À mon binôme Adjila avec qui j'ai partagé ce travail.

Tous ceux qui veulent lire.

***S. Mustapha***

## **Sommaire**

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| Liste des figures            | I        |
| Liste des tableaux           | IV       |
| Nomenclature – Abréviations  | V        |
| <b>Introduction générale</b> | <b>1</b> |

## ***Chapitre I***

### ***Les différentes sources d'énergie renouvelables***

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I.1. Introduction</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>I.2. Définition de l'énergie renouvelable</b> | <b>4</b>  |
| <b>I.3. Différentes sources d'énergies</b>       | <b>5</b>  |
| <b>I.3.1. l'énergie solaire</b>                  | <b>5</b>  |
| <b>I.3.2. Biomasse</b>                           | <b>16</b> |
| <b>I.3.3. Géothermie</b>                         | <b>16</b> |
| <b>I.3.4. l'éolienne</b>                         | <b>17</b> |
| <b>I.3.5. L'énergie hydraulique</b>              | <b>17</b> |
| <b>I.4. Conclusion</b>                           | <b>20</b> |

## ***Chapitre II***

### ***Le Système Hybride***

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II.1. Introduction</b>                                    | <b>23</b> |
| <b>II.2. Définition</b>                                      | <b>23</b> |
| <b>II.3. But du système hybride</b>                          | <b>23</b> |
| <b>II.4. Avantages et inconvénients d'un système hybride</b> | <b>24</b> |

|   |    |
|---|----|
| <b>II.5. Classification</b>   | 24 |
| <b>II.6. Etudes des systèmes hybrides</b>                           | 25 |
| <b>II.7. Critères d'optimisation et logiciel de dimensionnement</b> | 26 |
| <b>II.8. Configuration de bus dans les systèmes hybrides</b>        | 28 |
| <b>II.9. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH</b>    | 30 |
| <b>II.10. Descriptions des composantes du système hybride</b>       | 33 |
| <b>II.11. Conclusion</b>  | 36 |

### ***Chapitre III***

#### ***Les différents éléments de système hybride micro (hydro/solaire)***

|  |    |
|--|----|
| <b>III.1. Introduction</b>   | 38 |
| <b>III.2. les différents éléments de système hybride micro (hydro/solaire)</b> | 38 |
| <b>III.2.1. Hydroélectricité (Hydro)</b>                                       | 38 |
| <b>III.2.2. Solaire photovoltaïque (PV)</b>                                    | 44 |
| <b>III.2.3. Générateur Diesel</b>  | 49 |
| <b>III.2.4. Batteries</b>  | 49 |
| <b>III.2.5. Convertisseurs</b>   | 51 |
| <b>III.2.5. Charges</b>  | 53 |
| <b>III.3. Conclusion</b>   | 53 |

## *Chapitre IV*

### *Optimisation et simulation d'un système d'énergie hybride micro*

#### *(Hydro/Solaire)*

|  |        |
|--|--------|
| <b>IV.1. Introduction</b>  | 53     |
| <b>IV.2. Présentation du logiciel HOMER</b>                          | 53     |
| <b>IV.3. Description d'HOMER</b>                                     | 54     |
| <b>IV.4. Caractéristique du site choisi</b>                          | 54     |
| <b>IV.5. Caractéristique météorologiques</b>                         | 56     |
| <b>IV.6. Optimisation du système hybride (photovoltaïque/ hydro)</b> | 58     |
| <b>IV.7. Simulation et interprétation</b>                            | 60     |
| <b>IV.8. Production et consommation d'énergie électrique</b>         | 60     |
| <b>IV.9. Détails des composants du système étudié</b>                | 61     |
| <b>IV.10. Détails économique</b>                                     | 65     |
| <b>IV.11. Coût</b>   | 66     |
| <b>IV.12. Analyse environnementale</b>                               | 64     |
| <b>IV.13. Analyse économiques</b>                                    | 64     |
| <b>IV.14. Conclusion</b>   | 67     |
| <br><b>Conclusion générale</b>                                       | <br>67 |
| <b>Référence Bibliographie</b>                                       | 68     |

**Liste des figures**

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure I.1 :</b> Structure de la production d'électricité mondiale en 2001 | 4  |
| <b>Figure I.2 :</b> Les énergies renouvelables                                | 5  |
| <b>Figure I.4 :</b> La carte d'éclairement solaire de l'Algérie               | 6  |
| <b>Figure I.5 :</b> Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné     | 7  |
| <b>Figure I.6 :</b> Système Photovoltaïque                                    | 10 |
| <b>Figure I.7 :</b> Schéma synthétique de l'échelle de la cellule             | 11 |
| <b>Figure I.8 :</b> Effet photovoltaïque à l'effet photovoltaïque             | 11 |
| <b>Figure I.9 :</b> Cellule amorphe   | 12 |
| <b>Figure I.10:</b> Cellule monocristalline                                   | 12 |
| <b>Figure I.11:</b> Cellule poly-cristalline                                  | 12 |
| <b>Figure I.12:</b> Système PV autonome ou isolé                              | 13 |
| <b>Figure I.13:</b> Système PV autonome ou isolé                              | 14 |
| <b>Figure I.14:</b> Système PV hybride  | 14 |
| <b>Figure I.15:</b> Energie biomasse  | 15 |
| <b>Figure I.16:</b> Centrale géothermique de Nesjavellir islande sud          | 15 |
| <b>Figure I.17:</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent                 | 17 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure I.18:</b> Différent types de l'hydraulique                                     | 18 |
| <b>Figure II.1 :</b> Classification des études   | 23 |
| <b>Figure II.2 :</b> Classification des systèmes hybride                                 | 25 |
| <b>Figure II.3 :</b> Structure de SHER à bus à courant continu                           | 25 |
| <b>Figure II.4 :</b> Configuration du SEH à bus CC                                       | 26 |
| <b>Figure II.5 :</b> Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA                        | 27 |
| <b>Figure II.6 :</b> Configuration du générateur diesel                                  | 31 |
| <b>Figure III.1 :</b> Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique          | 36 |
| <b>Figure III.2 :</b> Centrales au fil de l'eau (a) et au pied d'un barrage (b)          | 36 |
| <b>Figure III.3 :</b> Domaines d'utilisation des turbines hydrauliques                   | 39 |
| <b>Figure III.4 :</b> Rotors de génératrices synchrones à aimants permanents             | 40 |
| <b>Figure III.5 :</b> Génératrices synchrones à rotor bobiné (a)(b)                      | 40 |
| <b>Figure III.6 :</b> Rotor d'une GSRV   | 41 |
| <b>Figure III.7 :</b> Rotors de génératrices à double excitation                         | 41 |
| <b>Figure III.8 :</b> Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque            | 42 |
| <b>Figure III.9 :</b> Panneaux photovoltaïque  | 42 |
| <b>Figure III.10 :</b> Schéma d'une cellule élémentaire                                  | 43 |
| <b>Figure III.11 :</b> Influence des résistances série et shunt sur les caractéristiques | 43 |
| <b>Figure III.12 :</b> Caractéristiques courant- tension d'une cellule PV                | 45 |
| <b>Figure III.13 :</b> Influence de la température                                       | 45 |
| <b>Figure III.14 :</b> Configuration de générateur diesel                                | 46 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Figure III.15 :</b> Principe d'un accumulateur électrochimique           | 48 |
| <b>Figure III.16 :</b> exemple de convertisseur DC/DC vers le haut          | 49 |
| <b>Figure III.17 :</b> Convertisseur typique DC/DC vers le bas              | 49 |
| <b>Figure III.18 :</b> Circuit simple utilisant un pont de transistors,     | 50 |
| <b>Figure III.19 :</b> Filtrage de la tension par l'inductance de sortie    | 50 |
| <b>Figure IV.1 :</b> Espace de travail sous HOMER                           | 53 |
| <b>Figure IV.2 :</b> La localisation de barrage Ouizert (El Fakia)          | 54 |
| <b>Figure IV.3 :</b> Profil de l'éclairement moyen mensuel                  | 55 |
| <b>Figure IV.4 :</b> Variations de l'éclairement au cours des mois          | 55 |
| <b>Figure IV.5 :</b> Résultat du l'eau pendant une année                    | 56 |
| <b>Figure IV.6 :</b> Montage électriques du système autonome                | 57 |
| <b>Figure IV.7 :</b> Total NPC  | 58 |
| <b>Figure IV.8 :</b> Émission de polluants atmosphérique                    | 58 |
| <b>Figure IV.9 :</b> Système optimal choisi par Homer                       | 61 |
| <b>Figure IV.10:</b> Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source | 61 |
| <b>Figure IV.11 :</b> Production d'énergie pendant une journée              | 59 |



**Liste des tableaux**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau (I.1) : Principaux pays producteurs d'électricité d'origine hydraulique</b> | 20 |
| <b>Tableau (II.1) : Classification des SEH par gamme de puissance</b>                  | 24 |
| <b>Tableau (II.2) : Les différents types de PC</b>                                     | 35 |
| <b>Tableau (III.1) : Classification des centrales hydroélectriques</b>                 | 40 |
| <b>Tableau (IV.1) : l'estimation des besoins énergétiques journalier</b>               | 55 |
| <b>Tableau (IV.2) : Irradiation solaire à ouizert</b>                                  | 56 |
| <b>Tableau (IV.3) : Les données Hydraulique de chaque pas de temps de l'année</b>      | 57 |
| <b>Tableau (IV.4): résultats d'optimisation et classement systèmes</b>                 | 64 |
| <b>Tableau (IV.5) : comparaison économiques</b>  | 64 |
| <b>Tableau (IV.6) : Emission de polluants atmosphériques</b>                           | 64 |
| <b>Tableau (IV.7): Energie annuelle produite</b>                                       | 60 |
| <b>Tableau (IV.8): Energie annuelle consommée</b>                                      | 60 |
| <b>Tableau (IV.9) : Les paramètres du PV utilisé</b>                                   | 62 |
| <b>Tableau (IV.10) : Les paramètres du Générateurs diesel utilisé</b>                  | 62 |
| <b>Tableau (IV.11) : Les paramètres du Turbine Hydro utilisé</b>                       | 63 |
| <b>Tableau (IV.12) : Les paramètres du convertisseur utilisé</b>                       | 64 |
| <b>Tableau (IV.13) : Détails du système de batterie dans le système hybride</b>        | 64 |

### *Nomenclature - Abréviations*

|       |  |
|-------|--|
| PV    | Photovoltaïque                                   |
| GPV   | Générateur Photovoltaïque                        |
| SEH   | Systèmes Hybrides                                |
| GD    | Générateur Diesel                                |
| HOMER | Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable |
| KW    | Kilo Wat   |
| CC    | Le Courant Continu                               |
| CA    | Le Courant Alternatif                            |
| Rs    | Résistance série                                 |
| Rsh   | Résistance Shunt                                 |
| Icc   | Courant de court circuit                         |
| Ms    | Machine synchrone                                |

### *Nomenclature*

|           |   |
|-----------|---|
| TSV       | Temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.  |
| TSM       | Temps Solaire Moyen c'est le temps qui " s'écoule " à vitesse constante de la Terre sur son orbite au cours de l'année (celui mesuré par les horloges). |
| $\lambda$ | Longitude du lieu.  |
| $\theta$  | L'attitude de lieu [ $^{\circ}$ ].  |
| $\delta$  | Déclinaison du soleil [ $^{\circ}$ ].   |
| DE        | Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.  |
| TL        | Temps légal = temps donné par une montre.   |
| Et        | Correction de l'équation du temps [heure].  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| N               | Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier. |
| H               | Angle horaire du soleil [°].                                   |
| <b>DI</b> s     | Durée d'ensoleillement.  |
| H <sub>c</sub>  | Le coucher correspond à la valeur positive.                    |
| H <sub>L</sub>  | Le lever à la valeur négative.                                 |
| IM              | Le courant parcourant max [A].                                 |
| VCO             | La tension de circuit ouvert (m/s).                            |
| E <sub>s</sub>  | Flux lumineux.   |
| IPhLe           | Photo-courant.   |
| V <sub>co</sub> | Tension circuit ouvert.  |
| PN              | Jonction dopée   |
| SEH             | Système énergie hybride  |
| RAPS            | Remote Area Power Simulation                                   |
| GSAP            | Génératrice synchrone à aimants permanents                     |
| GSRB            | Génératrice synchrone à rotor bobiné                           |
| GSRV            | Génératrice synchrone à réluctance variable                    |
| PWM             | Pont de transistors commandé.                                  |

## **Introduction Générale**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessant de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de la production mondiale d'énergie provient des sources fossiles.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. De plus le recours excessif au stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, la biomasse et l'énergie éolienne, sont des solutions prometteuses pour suppléer les sources d'énergie de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire. On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse.

Ces énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ses besoin en énergie solaire [2].

Tandis que l'énergie Hydraulique est une énergie peu concentrée : pour produire 1 kWh électrique dans une usine ayant un rendement de 85 %, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 m. Il en résulte que, pour produire des quantités importantes d'électricité, il faut soit disposer de gros débits (se comptant en milliers de m<sup>3</sup> par seconde), soit disposer d'une grande hauteur de chute (se comptant en centaines de mètres, soit les deux. Il faut en outre que l'eau soit disponible en quantités suffisantes, ce qui dépend du bassin versant et de la pluviométrie.

Le rôle d'un système hybride (micro hydro / solaire) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le

nombre de kilowatt heures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté [2].

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

- ✚ En premier chapitre, nous avons présenté les différentes sources d'énergies renouvelables (hydraulique / photovoltaïque).
- ✚ Dans le deuxième chapitre est consacré sur le système hybride.
- ✚ Le troisième chapitre étudie les différents éléments de système hybride micro (hydro/solaire).
- ✚ Le quatrième chapitre, on donne une présentation du logiciel HOMER avec la partie de la simulation.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale qui résume notre étude.

# CHAPITRE I

## LES DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLES

---



## I.1. Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

La Figure (I.1) présente la production mondiale d'électricité en 2021[1].

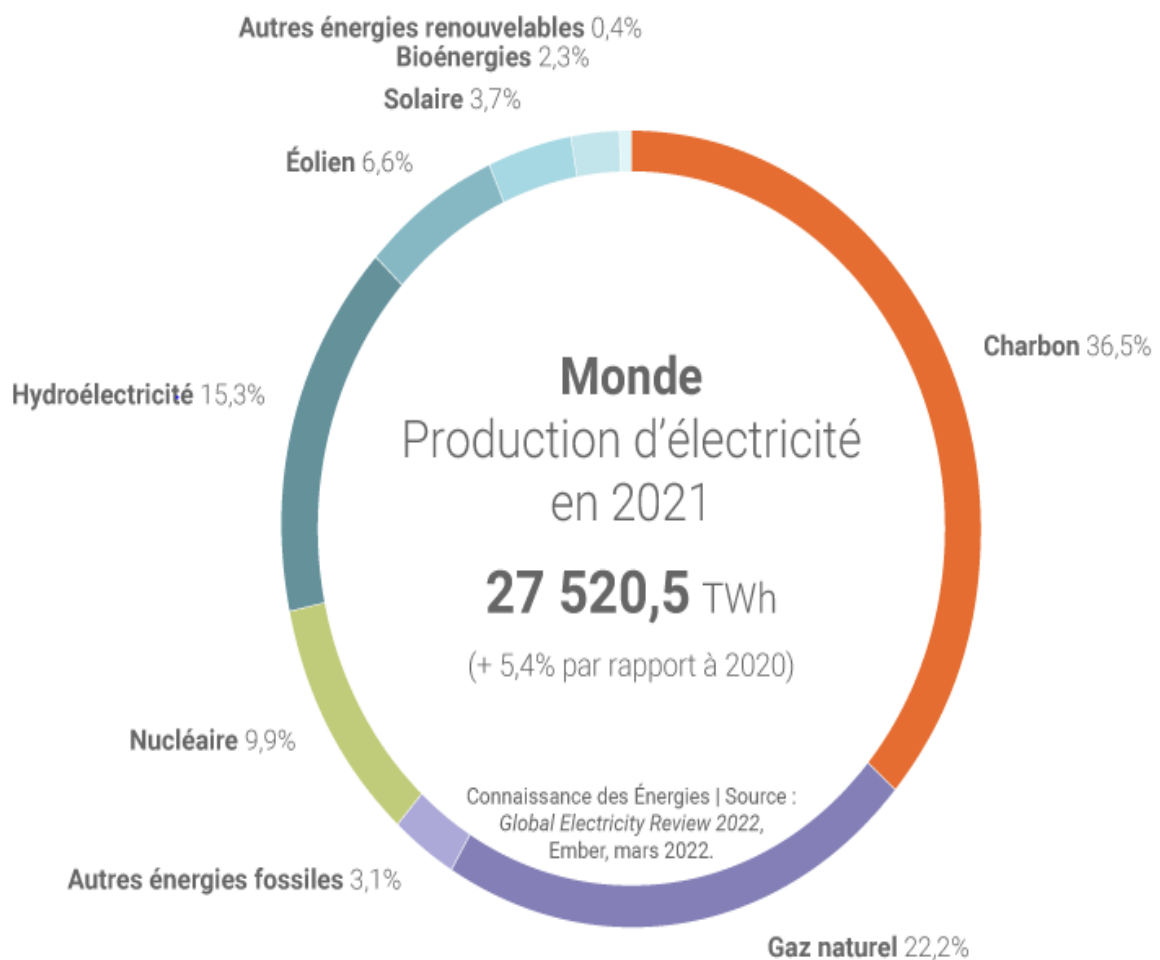


Figure I.1 : Structure de la production d'électricité mondiale en 2021

## I.2. Définition de l'énergie renouvelable

Il existe de nombreux concepts relatifs aux énergies renouvelables on les a trouvés dans de nombreuses sources. Mais elle peut être définie comme une énergie produite à partir de sources naturelles renouvelables est toujours disponible c'est-dire sont des sources qui se renouvelle assez rapidement de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future, dans ce sens on appelle les énergies renouvelables ou énergies vertes toutes énergies qui ne nuit pas à l'environnement, parce qu'elle fait appel à des éléments qui se recréent naturellement [3].

Parmi les énergies renouvelables :

- ✚ Energie solaire
- ✚ L'énergie éolienne
- ✚ La biomasse
- ✚ L'énergie hydraulique
- ✚ L'énergie géothermique.



Figure I.2 : Les énergies renouvelables

## I.3. Différentes sources d'énergies

### I.3.1. 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 (KW c/m<sup>2</sup>) 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 [5].

### I.3.1.1. Définition

L'énergie solaire est la source énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [5].

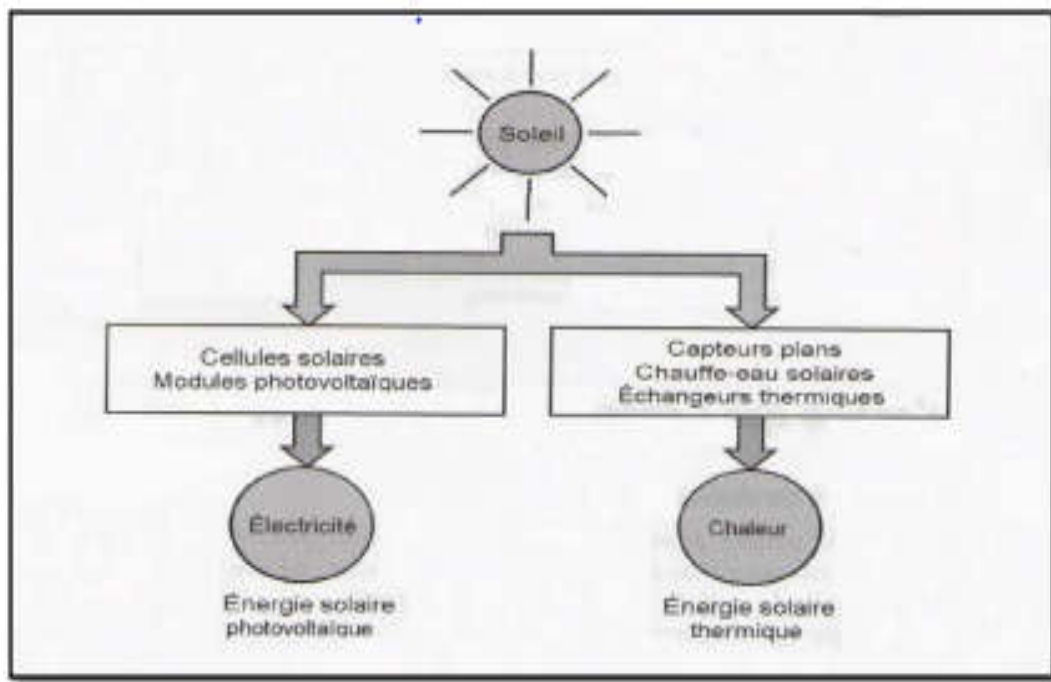


Figure I.3 : Les deux types d'énergie solaire

### I.3.1.2. Gisement solaire en Algérie

Pour saisir la portée des énergies renouvelables en Algérie et les enjeux considérables et inépuisables existant de ces énergies non encore exploitées à savoir le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2381745 Km<sup>2</sup>. L'Algérie est l'un des pays qui ont une diversité de sites du à son grand secteur, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les zones du nord de l'Algérie sont à ciel - couvert plus que ceux du sud.

Les régions Sahariens reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu varie entre 4,5 et 7.5 (kWh/m<sup>2</sup>).

En tenant compte de cette diversité, l'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène comme indiqué sur La Figure (I.4) [6].

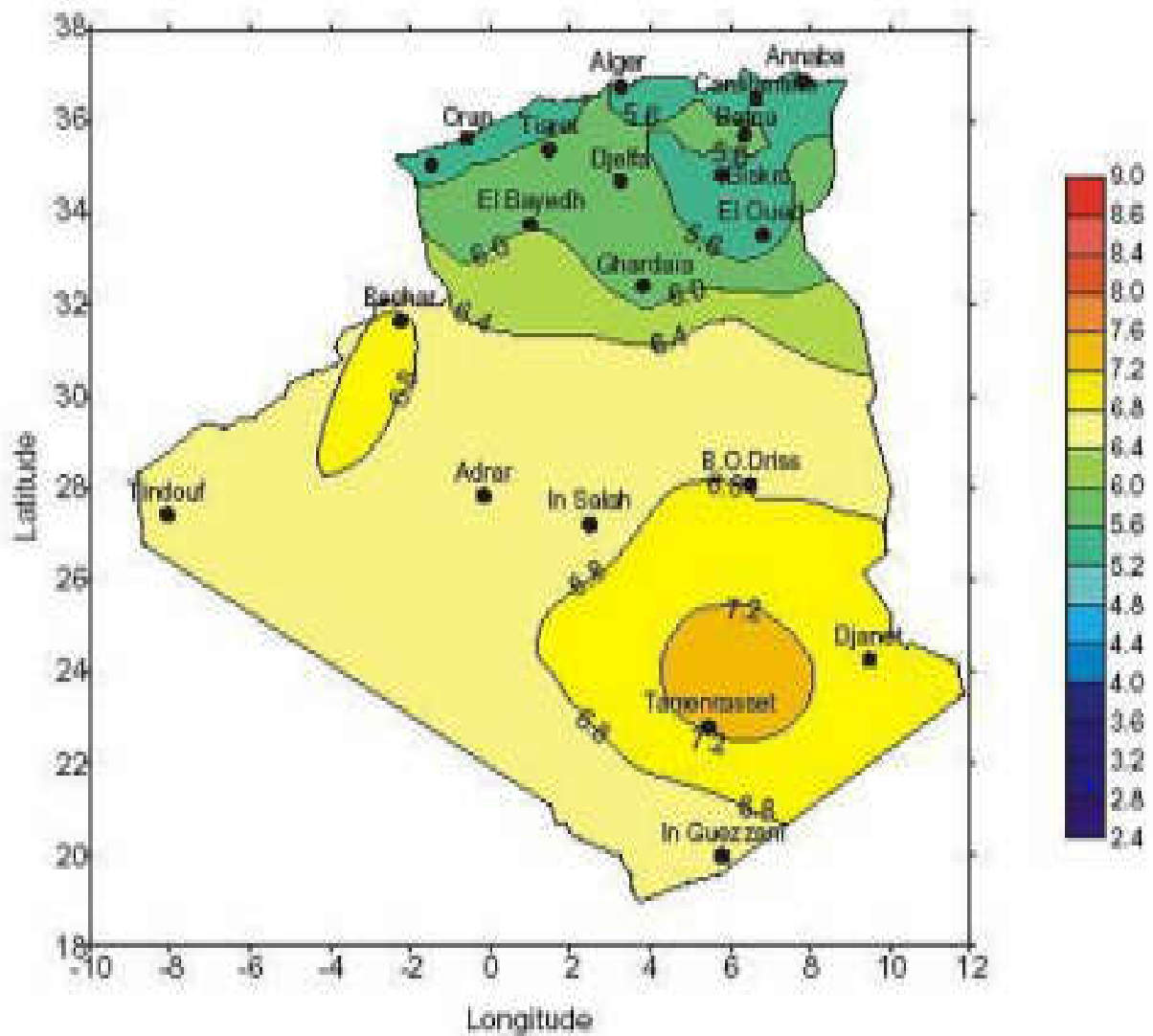


Figure I.4 : La carte d'éclairement solaire de l'Algérie

### I.3.1.3. Position du soleil

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice, Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale [7].

#### I.3.1.3.1. Coordonnées géographiques terrestres

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

- ✓ **Latitude  $\phi$**  : Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud.
- ✓ **Longitude  $\lambda$**  : Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'est de la méridienne origine.

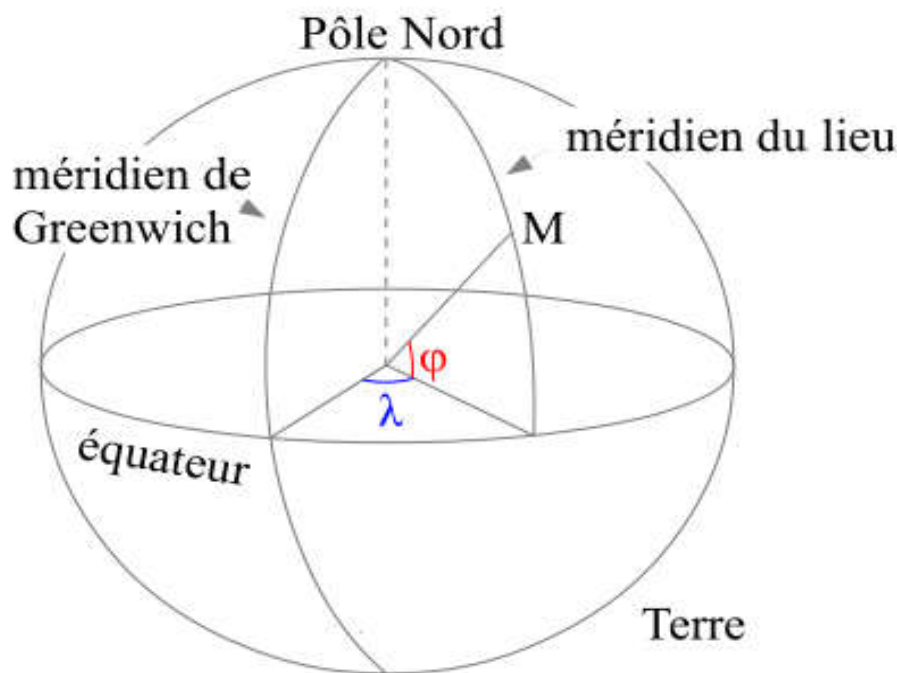


Figure I.5 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

#### I.3.1.3.2. Déclinaison $\delta$

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre).

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de  $0,5^\circ$ , Elle est calculée parue équation simple approximative :

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{360}{365} (284 + n) \right) \quad (\text{I.1})$$

$\delta$  : Déclinaison du soleil

$n$  : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

### I.3.1.3.3. Angle horaire du soleil (H)

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction de méridien du lieu l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (I.2)$$

$$TSV = TL - DE + \left( \frac{Et + 4\lambda}{60} \right)$$

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

TSV : Temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

TL : Temps légal = temps donné par une montre.

Et : Correction de l'équation du temps.

$\lambda$  : Longitude du lieu.

L'angle horaire  $H$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ .

On prend :

$H > 0$ : après midi

$H = 0$  : le matin

$H = 0$ : midi TSV

### I.3.1.3.4. Equation du temps (ET)

C'est l'écart entre le temps solaire moyen  $TSM$  et le temps solaire vrai  $TSV$  selon le jour de l'année considérée.

$$ET = TSV - TSM \quad (I.3)$$

Avec :

TSV : Temps Solaire Vrai c'est le temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

TSM : Temps Solaire Moyen c'est le temps qui " s'écoule " à vitesse constante de la Terre sur son orbite au cours de l'année (celui mesuré par les horloges).

#### I.3.1.3.5. Durée du jour

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur  $h$  du soleil nulle sont appelés: le lever et le coucher du soleil.

La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire :

$$\sin h = \cos \delta \sin H + \sin \delta \sin \theta \quad (I.4)$$

Avec :

$\delta$ : Déclinaison du soleil

$H$ : l'angle horaire du soleil

$\theta$ : L'attitude de lieu

#### I.3.1.3.6. Durée d'ensoleillement $DI$ s d'un capteur ( $\alpha, \gamma$ )

La durée d'insolation ( $DI$ s) est la durée effective d'ensoleillement d'un capteur mesurée par héliographe et définie à partir d'un seuil minimum ( $\approx 250 \text{ W/m}^2$ ).

$$\cos(i) = A \sin(H) + \cos(H) + C \quad (I.5)$$

#### I.3.1.4. Types de l'énergie solaire

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

##### I.3.1.4.1. Energie solaire thermique

Qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité [11].

##### I.3.1.4.2. Energie solaire passive

Est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage [11].

##### I.3.1.4.3. Energie solaire photovoltaïque (PV)

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout

dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [5].

### I.3.1.5. Principe de fonctionnement

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par **Edmond Becquerel** en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière.

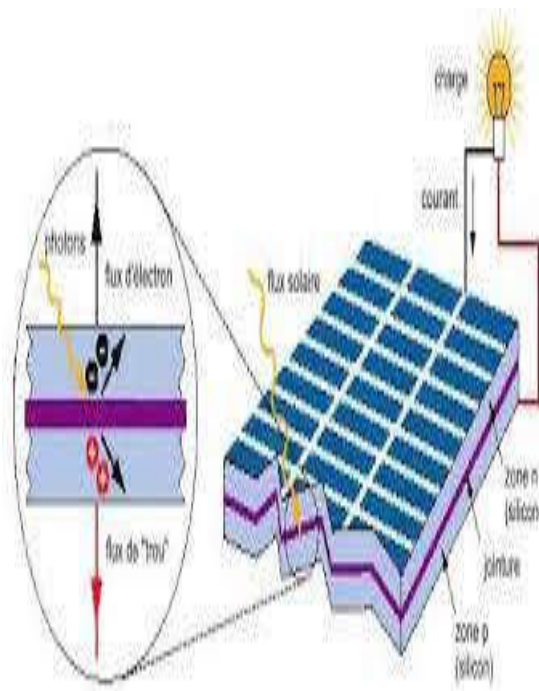


Figure I.6 : Schéma synthétique

de l'échelle de la cellule

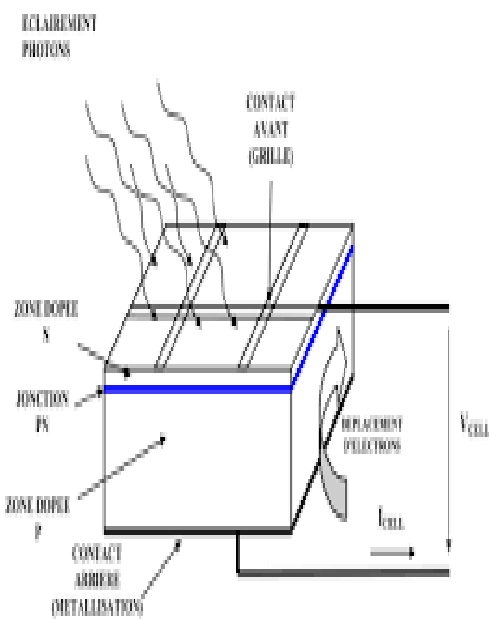


Figure I.7 : Effet photovoltaïque

à l'effet photovoltaïque

Plus précisément, comme le montre la Figure (I.6), l'effet Photovoltaïque est propre à la cellule (unité fondamentale de conversion). Dans le cas des panneaux photovoltaïques, les cellules sont réalisées à partir de deux couches de silicium, une dopée P (en général dopée au bore) et l'autre dopée N (en général dopée au phosphore). Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau



utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [8].

#### **I.3.1.6. Types des cellules solaires**

Les technologies des cellules solaires se divisent en deux grandes familles :

##### **1. La cellule amorphe**

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).

1. Coût de production bien plus bas.
2. Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.
3. Fonctionne sous très faible éclaircissement.

##### **2. La cellule monocristalline**

Les cellules sont fabriquées avec du silicium parfaitement cristallisé découpé dans des barres. C'est le matériau le plus répandu, et de plus il a l'avantage d'avoir un très bon rendement, entre 12 % et 16 %. L'inconvénient en est le prix, du fait d'un procédé de fabrication long et énergivore. Il est utilisé en extérieur pour les fortes et moyennes puissances (habitations, relais, télécommunications...).

##### **3. La cellule poly-cristalline**

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. Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

1. Coût de production moins élevé.
2. Procédé moins gourmand en énergie.
3. Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.

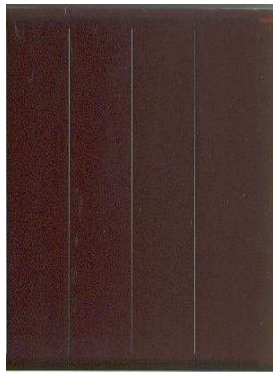


Figure I.8 : Cellule amorphe

Figure I.9: Cellule monocristalline

Figure I.10: Cellule poly-cristalline

### I.3.1.7. Différent types de système PV

- **Système autonome**

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [1] :

- ✚ Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- ✚ Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil).

#### A. Systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée Figure (I.12).

Donc le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [1].

#### B. Les systèmes autonomes sans stockage

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible.

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique. La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif, le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et en fonction du rayonnement solaire.

- **Système PV raccordé au réseau**

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonel-gaz en Algérie). Généralement Sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage.

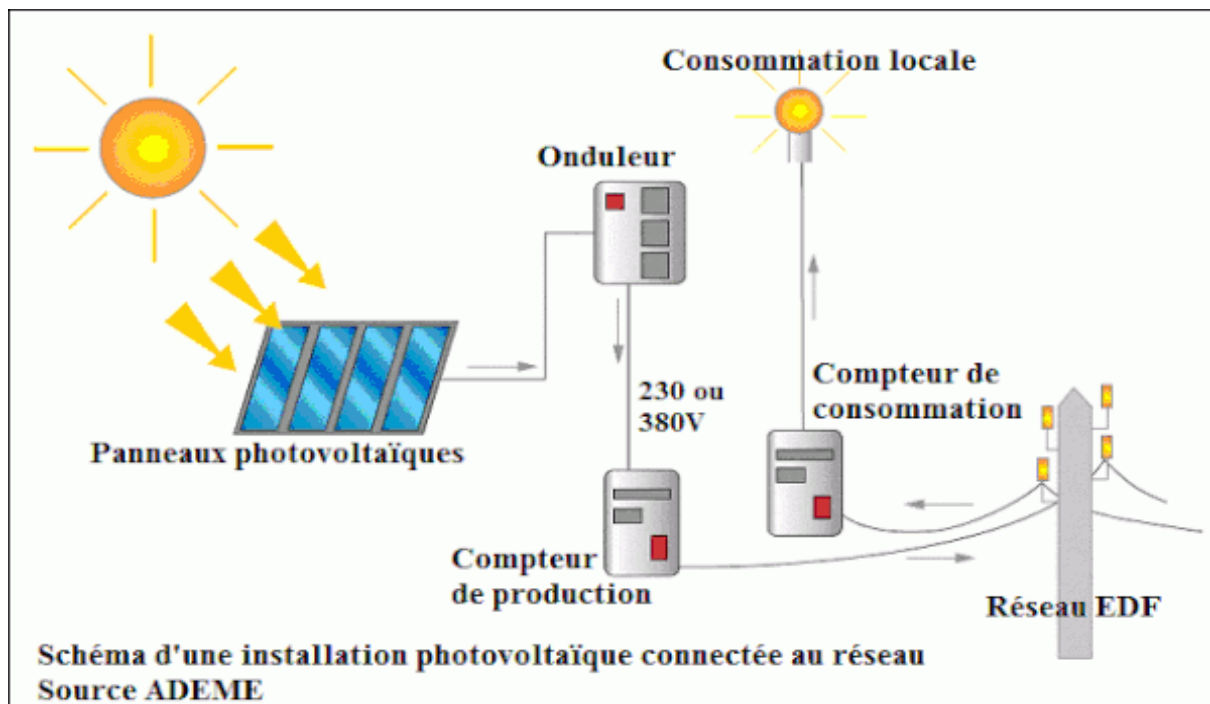


Figure I.11: Système PV autonome ou isolé

- **Système PV hybride**

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité. En général, un système de batterie stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien.

La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gasoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours.

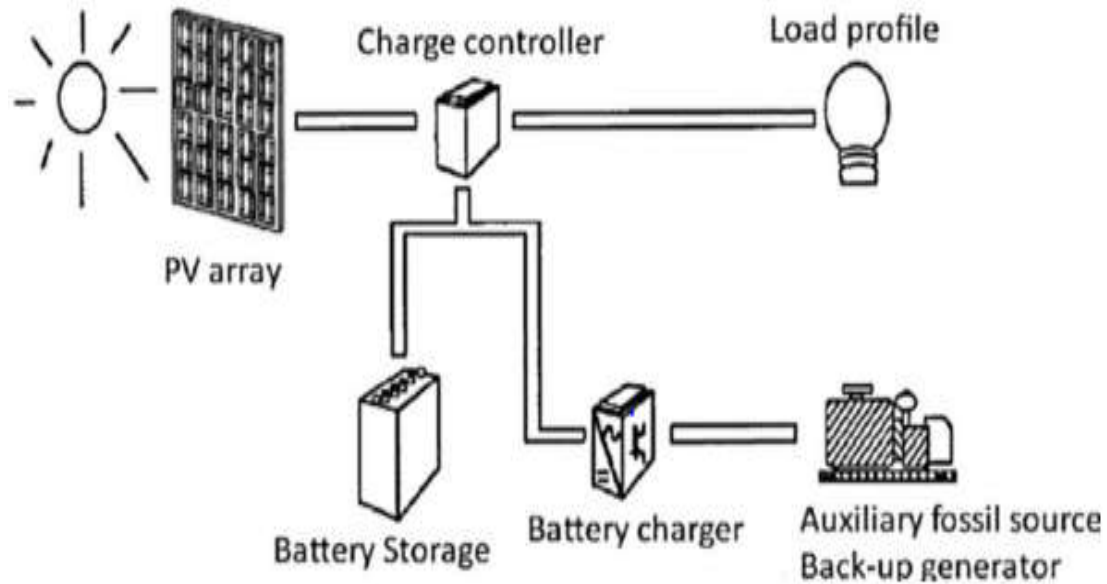
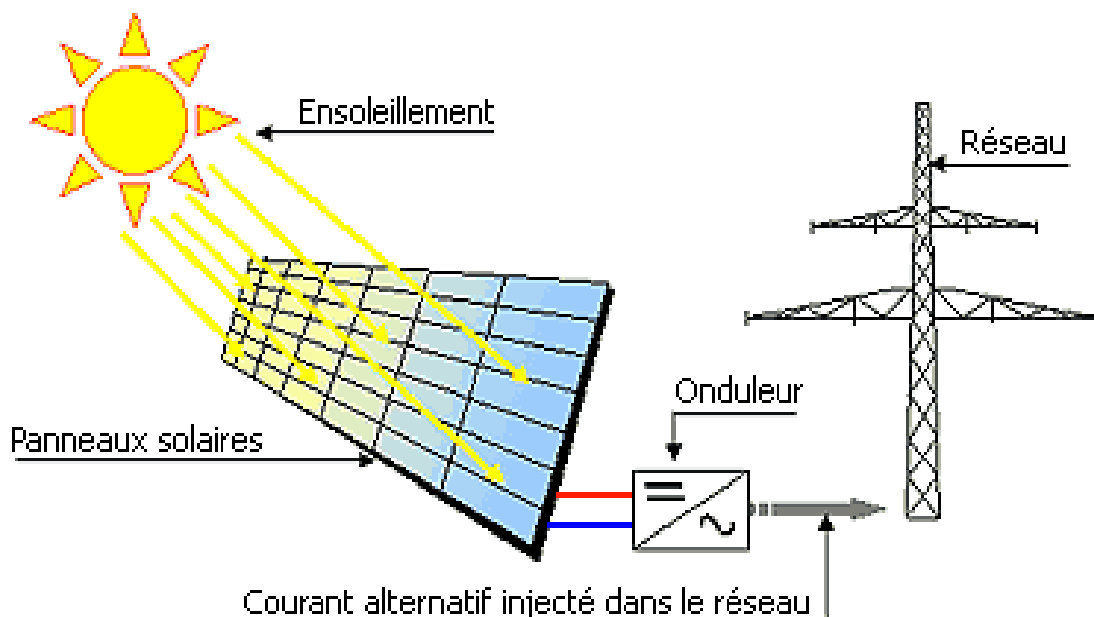


Figure I. 12: Système PV hybride

#### I.3.1.8. Conversion de la lumière en électricité

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.



**Figure I.13: Conversion de l'énergie solaire en électricité**

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

- ✚ Dans un isolant électrique : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- ✚ Dans un conducteur électrique (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- ✚ Dans un semi-conducteur : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

### **I.3.2. Biomasse**

La biomasse représente l'ensemble de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des coproduits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage.

Elle est la source d'énergie principale pour cuisiner et se chauffer. Cette biomasse qui comprend tous les produits obtenus à partir de plantes ou de résidus de plantes, secs ou déshydratés comme le bois, la paille, les grignons d'olives, la bagasse de la canne à sucre, est exploitée par combustion ou métabolisation. Mais pour être une réelle énergie renouvelable, les quantités brûlées ne doivent pas excéder les quantités produites. En fonction des besoins, elle permet une production de chaleur ou d'électricité. De ce fait, sa participation à la production d'énergie mondiale est énorme par rapport aux autres énergies [4].

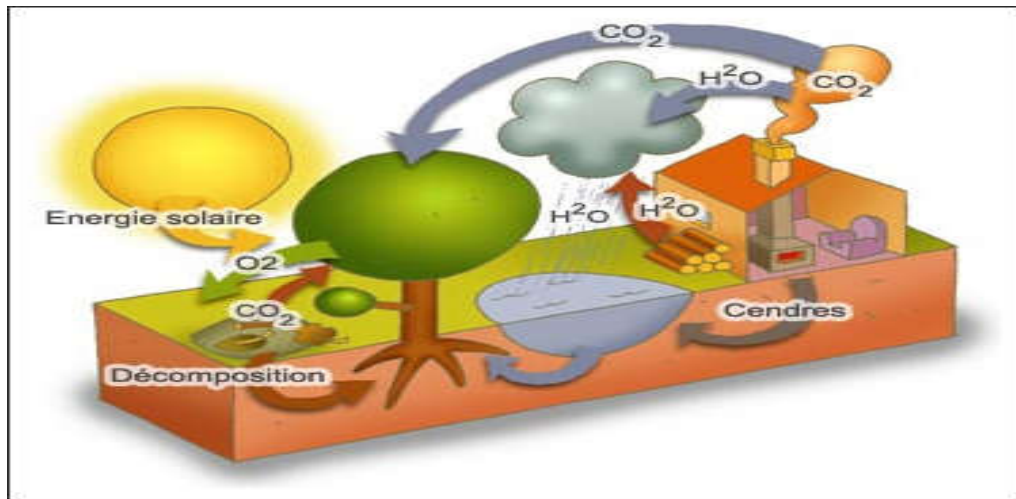


Figure I.14: Energie biomasse

### I.3.3. Géothermie

Le principe de la géothermie consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C.

Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques qui constituent le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères (nappe souterraine renfermant de l'eau ou de la vapeur d'eau). On distingue quatre types de géothermie ; la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie.



Figure I.15: Centrale géothermique de Nesjavellir islande sud



### I.3.4. Éolienne

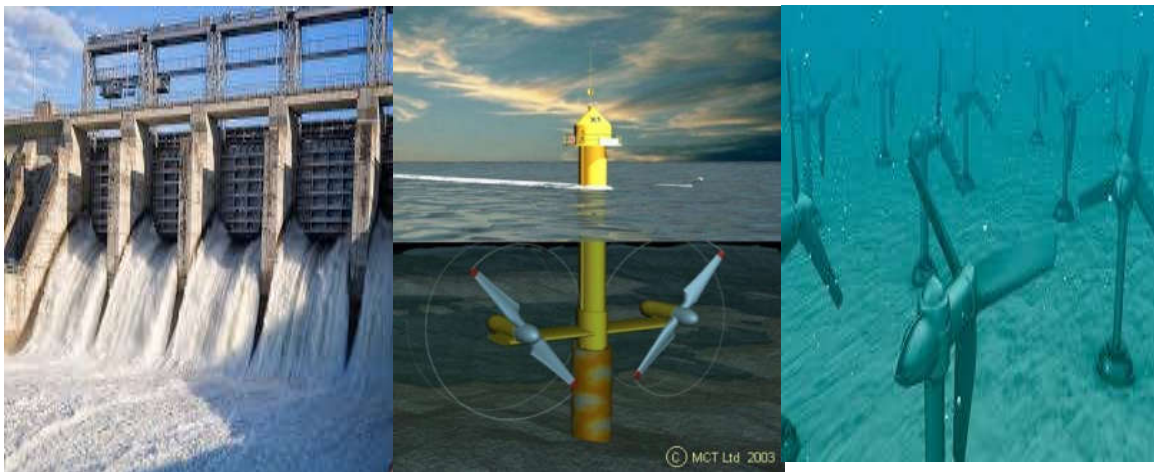
L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables [14].



Figure I.16: Eolienne à axe vertical et horizontal

### I.3.5. Énergie hydraulique

Cette énergie provient de la force de l'eau en mouvement, Plusieurs technologies permettent d'exploiter cette énergie, les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité [8].



a) barrage

b) hydrolienne

c) marémotrice

Figure I.17: Différent types de l'hydraulique

### I.3.5.1. Typologie des turbines hydraulique

#### Turbines à réaction

Une turbine à réaction est une machine complètement immergée dans l'eau et mise en rotation par effet tourbillon au moyen d'une bêche, et des aubages directeurs fixes ou mobiles. Les aubages de la turbine sont profilés de manière à donner aux filets d'eau une direction parallèle à l'axe de rotation à la sortie de la turbine, il existe deux types de turbine à réaction :

##### A. Turbine Francis

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l. s<sup>-1</sup> et 6000 l. s<sup>-1</sup>), elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10 m à 100 m, elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min).

##### B. Turbine Kaplan

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2 m) et des débits importants de l'ordre de (300 l à 15000 l), elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible ; les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement de la turbine.

#### Turbines à action

La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aube a lieu à pression constante (généralement la pression atmosphérique), la roue de la turbine est tournée dans l'air, divisée en deux types :

##### A. Turbine Pelton

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur, les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue. La vitesse nominale de la turbine varie de (500 tr/min) à (1500 tr/min), ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique.

##### B. Turbine Crossflow « Banki Mitchell »

La turbine crossflow, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue, de construction simple, elle est constituée de trois parties principales (un injecteur de section rectangulaire, une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques



profilée, un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine). En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice [8].

### I.3.5.2. Types des centrales hydrauliques

Les centrales hydroélectriques sont classées en trois grandes catégories selon la hauteur de la chute d'eau et par voie de conséquence selon le débit, on trouve :

#### ✚ Les centrales de haute chute ( $h > 300\text{m}$ )

Les centrales de haute chute ont des hauteurs de chute supérieures à 300 m, ces centrales se trouvent dans les Alpes et dans d'autres régions très montagneuses, la capacité du réservoir est relativement faible, elles utilisent des turbines Pelton ; est une turbine à injection partielle et à veine libre, cette turbine ne comporte pas de diffuseur à la sortie de la roue l'eau s'écoule librement.

#### ✚ Les centrales de moyenne chute ( $30 < h < 300\text{m}$ )

Elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur des courtes périodes Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse, elles comportent un réservoir de grande capacité (centrale Manic, hauteur de chute 155 m, puissance de 1528 MW).

#### ✚ Les centrales de basse chute ( $h < 30\text{m}$ )

Ont des hauteurs de chute inférieures à 30 m elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis, ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit centrale Beauharnois, sur la Saint-Laurent hauteur de chute 25 m, puissance de 1575 MW, dans ce cas il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel [12].

### I.3.5.3. Énergie hydraulique dans le monde

L'énergie hydraulique première source d'énergie renouvelable au monde, elle a fourni à elle seule plus de 16 % de l'électricité mondiale en 2017, malheureusement la croissance a été anormalement faible en 2019, vraisemblablement du fait que plusieurs grands projets ne sont pas arrivés à leur terme aux dates prévues.

| Pays  | Production (TW/h) | National (%) |
|-------|-------------------|--------------|
| Chine | 1155.8            | 28.5         |

|        |       |     |
|--------|-------|-----|
| Canda  | 396.9 | 9.8 |
| Brésil | 369.5 | 9.1 |

**Tableau (I.1) : Principaux pays producteurs d'électricité d'origine hydraulique**

#### **I.4. Conclusion**

Ce chapitre s'est consacré à la représentation d'une grande partie de notre avenir énergétique. Elles permettent le développement futur et sont une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux. Il y a plusieurs énergies renouvelables qui existent mais sont peu utilisées par l'Homme car elles ont un coût élevé. Leur création est due aux changements climatiques et à la pollution et aux gaz échappés des industries.

Elles ont des avantages propres à elles : elles sont inépuisables, respectueuses de l'environnement (aucun déchets rejetés dans la nature) comparées aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. Elles aident aussi à lutter contre l'effet de serre et la pollution atmosphérique. Elles sont aussi source d'emplois. Un argument permet de parler plus des énergies renouvelables, c'est l'épuisement des énergies fossiles (charbon, pétrole,...).

# CHAPITRE II

## LE SYSTEME HYBRIDE

---

## II.1. Introduction

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables.

Et afin d'atténuer le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné, on peut multiplier les sources de natures différentes. On obtient alors un système dit multi-sources.

Il présente en somme le double avantage de minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et d'une sécurité d'approvisionnement maximale. Raisons pour lesquelles il se trouve utilisé dans de très nombreuses applications d'intérêt très sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontières, les dispensaires, etc., hors réseau d'électricité conventionnel, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est vitale et conditionne dans une très large mesure la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent[19].

## II.2. Définition

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride. Un système d'énergie hybride est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies.

Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources différentes permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [8].

## II.3. But du système hybride

Le but du système hybride est d'assurer une alimentation à la charge sans interruption, et la possible de maximiser le bilan d'énergie provenant des sources d'énergies renouvelables. Dans tous les cas, la bonne qualité de l'énergie doit être garantie par rapport aux normes de sécurités des personnes et d'usage des équipements, le champ d'application des SEH est très

large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance [21].

| Puissance du SEH [KW] | Application   |
|-----------------------|---|
| Faible : 5            | Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau,..... |
| Moyenne : 10-250      | Micro réseau isolés : alimentation d'un village                         |
| Grande : >500         | Grand réseaux isolés (ex : réseaux insulaire)                           |

Tableau (II.1) : Classification des SEH par gamme de puissance

## II.4. Avantages et inconvénients d'un système hybride

### A. Avantage

- ✚ Assurer la continuité énergétique.
- ✚ Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- ✚ Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- ✚ Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits [2].

### B. Inconvénients

- ✚ Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- ✚ Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel [2].

## II.5. Classification

Plusieurs classifications des systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi, Dans la suite sont présentes les classifications les plus répandues.

### II.5.1. Régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes :

Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectes réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés

du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière [22].

### II.5.2. La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système:

- ✚ Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.
- ✚ Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, ....etc.
- ✚ La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle... etc.

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur La Figure(II.1) [22]:

### II.6. Etudes des systèmes hybrides

Au vu de ces nombreux critères, il est aisé d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe.

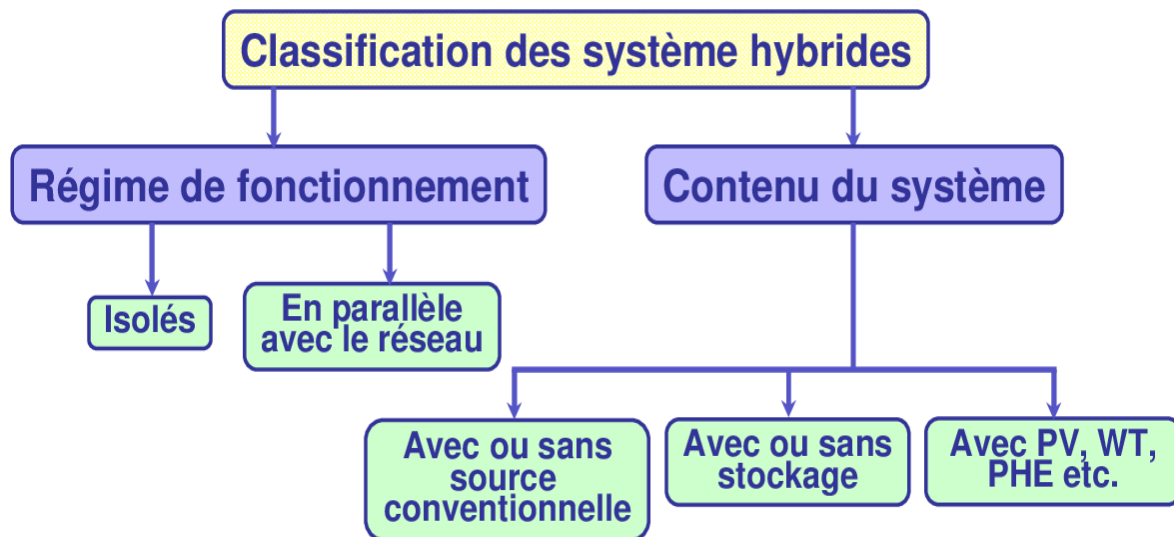


Figure II.1 : Classification des études

## II.7. Critères d'optimisation et logiciel de dimensionnement

### II.7.1. Critères d'optimisation du système hybride

Différents critères sont utilisés pour optimiser le système en fonction du site d'installation, Les critères les plus fréquemment utilisés sont :

- ✓ **La probabilité de perte de la charge** ou la probabilité de perte d'approvisionnement ces deux critères sont univoques et rendent compte du rapport énergie non satisfaite et énergie totale consommée sur la période d'étude choisie. En général, le calcul de ce paramètre est réalisé en utilisant l'équation (II.1).

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^m (E_{load,i} - E_{prod,i})}{\sum_{i=1}^m E_{load,i}} \quad (II.1)$$

Où  $E_{load,i}$  est l'énergie demandée par le consommateur pour la période  $i$ ,  $E_{prod,i}$  est l'énergie produite, et  $m$  est le nombre de périodes pour lesquelles la recherche est réalisée.

- ✓ **Le coût d'énergie produite** diverses approches sont utilisées pour le calcul du coût : il dépend de l'énergie demandée par le consommateur, du coût d'investissement initial pour l'achat des composants du système, du coût de leur installation, du coût de maintenance et de remplacement (pour les éléments qui ont une vie d'exploitation plus courte que celle de l'élément qui définit la vie d'exploitation du système hybride)..etc.

### II.7.2. Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement parmi lesquels les plus connus sont :

- A. **Hybrid2** : ce logiciel est destiné à l'étude des différents systèmes hybrides avec divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer une analyse économique. La présentation des résultats peut être réalisée de deux manières : des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps.
- B. **HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)** : avec ce logiciel, il est possible de modéliser des systèmes hybrides qui travaillent en parallèle avec le réseau électrique ou en régime autonome. Il dispose de modèles de générateurs conventionnels et à sources d'énergie renouvelables. De plus, le logiciel contient des algorithmes d'optimisation à l'aide desquels il est possible de choisir le meilleur système hybride.
- C. **RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator)** : c'est un logiciel de simulation pour différents modes d'un approvisionnement en courant alternatif. Il peut être utilisé pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques, de générateurs éoliens et diesel dans des systèmes hybrides isolés.

De plus, il faut signaler que l'utilisation de ces logiciels a des inconvénients puisqu'ils limitent les modifications de l'utilisateur et empêchent une analyse approfondie des systèmes hybrides à cause du code protégé, la classification des études générales est systématisée sur La Figure (II.2).

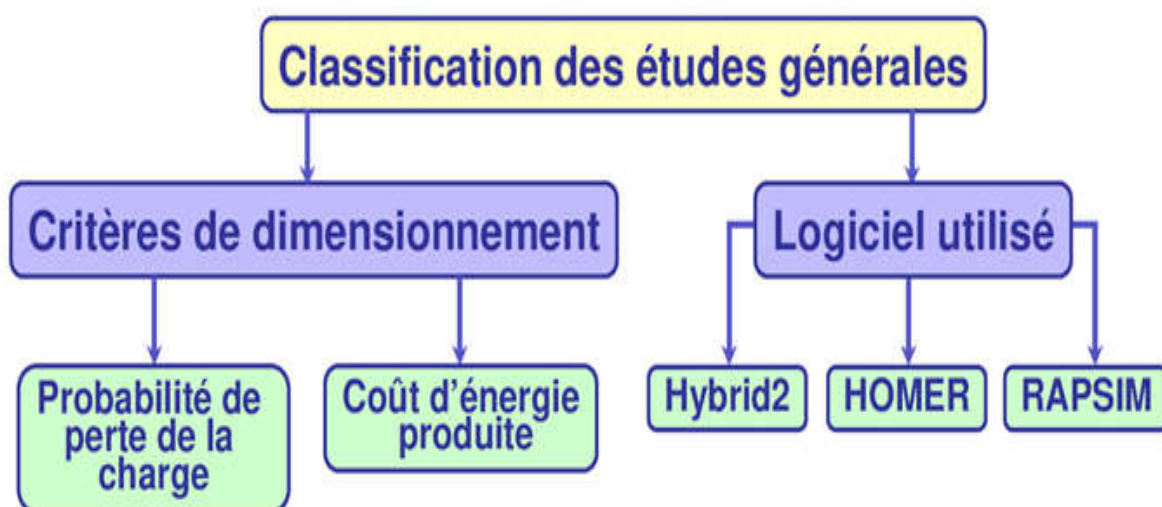


Figure II.2 : Classification des systèmes hybrides



## II.8. Configuration de bus dans les systèmes hybrides

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, des batteries et des générateurs diesels se résument en trois types : Architecture à Bus CC (bus à courant continu) et architecture à Bus CC-CA (la connexion mixte, bus à CA et bus à CC). Nous présenterons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

### II.8.1. Architecture à bus à CC

Cette technologie est née du besoin de coupler des consommateurs CA (plage de puissance moyenne) avec des générateurs CC et, de plus, de charger la batterie du côté CC par le biais d'un groupe électrogène. Ces configurations d'installation servent à l'alimentation de consommateurs éloignés (par ex : petites entreprises ou fermes). La plage de puissance globale est située entre 1 et 5 kW, la tension CC allant de 12 à 48 V [18].

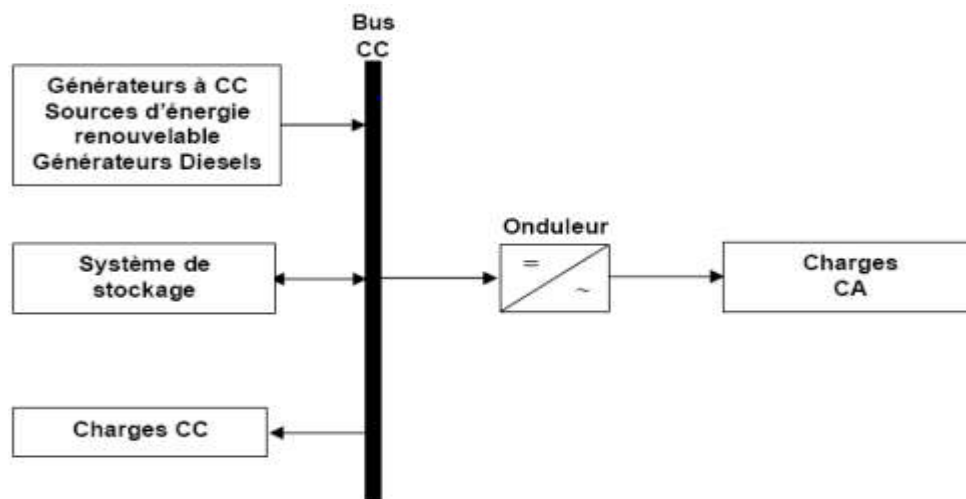


Figure II.3 : Structure de SHER à bus à courant continu

Dans le système hybride présenté dans la Figure (II.3), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la

commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable.

Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés :

#### A. Avantage:

- ✚ La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- ✚ Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

#### B. Inconvénients:

- ✚ Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- ✚ Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

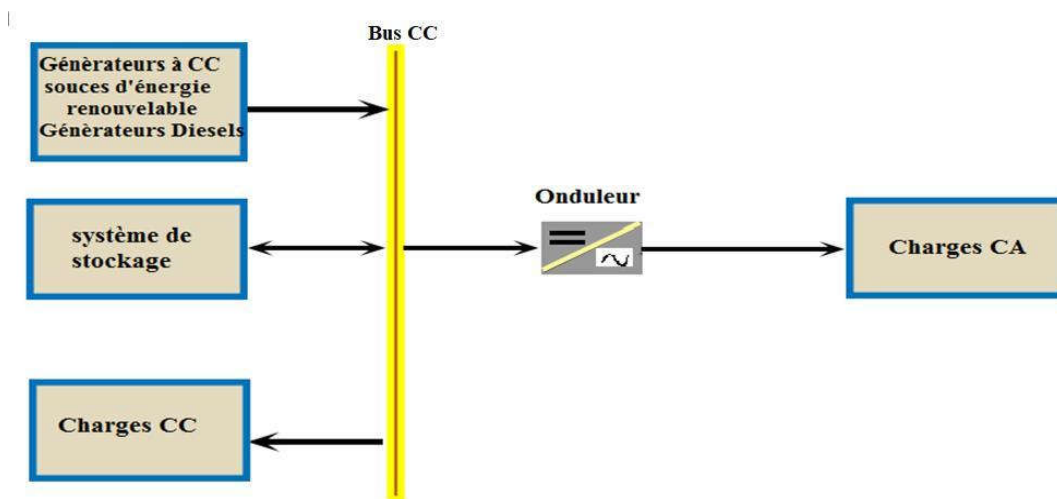


Figure II.4 : Configuration du SEH à bus CC

### II.8.2. Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans La Figure (II.5). Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure (un couplage CC). Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en

synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur). Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est sur chargé [23].

Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue.

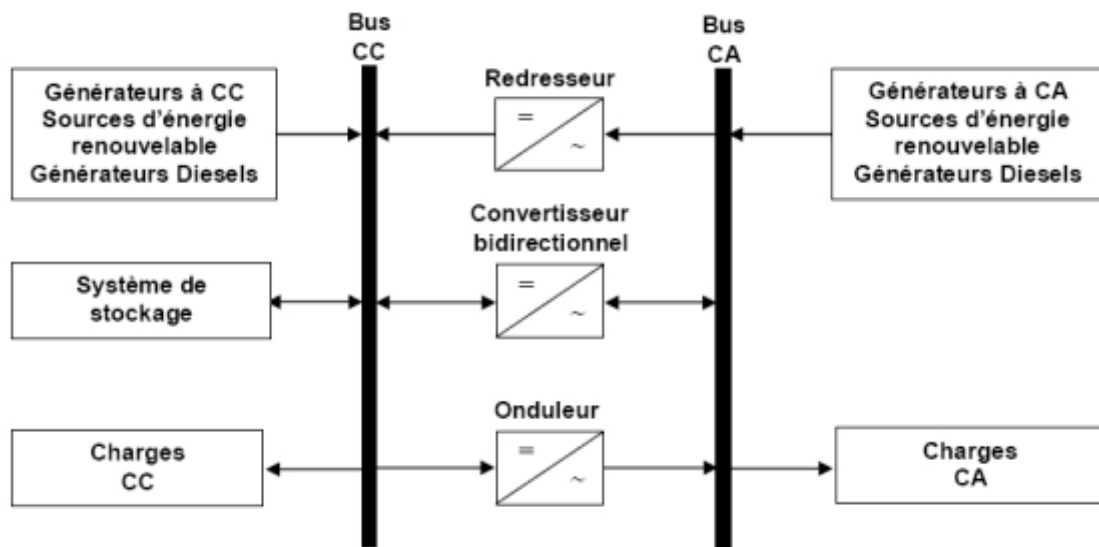


Figure II.5 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA

### A. Avantage

- ✚ Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- ✚ La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

### B. Inconvénients

- ✚ La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD).

## II.9. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH

Les systèmes d'énergie en site isolé rencontrent en général les mêmes problèmes que les réseaux faibles [23].

Ces difficultés, qui ne se présentent pas dans les grands réseaux interconnectés, sont en général causées par:

- ✚ Les variations de l'énergie d'origine renouvelable (indépendamment de la charge).
- ✚ Le manque de connaissances dans le domaine de la qualité de l'énergie en réseau faible.

Compte tenu de la nature stochastique des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge.

Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels en parallèle, de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt).

Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesels. Ces derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible (en fonctionnement à vide, la consommation de carburant s'estime à 25-30 % de la consommation à pleine charge) [25]. Ainsi, garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable.

Si l'énergie renouvelable est suffisante pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisée peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels par intermittence. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesels démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels peut, par conséquent, être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs.

Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt. Le système peut, par exemple, s'effondrer subitement pendant le démarrage du générateur diesel, si l'énergie renouvelable diminue plus vite que le temps nécessaire pour la phase de démarrage. Il arrive

parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la charge.

Si l'excès d'énergie dans le réseau ne peut pas être éliminé, la production d'énergie renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée. En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir l'équilibre énergétique et la stabilité de la fréquence.

D'autres applications nécessitent des systèmes de commande supplémentaires pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui peut ne pas être justifié par les avantages du système hybride. Seule une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer de manière optimale différents composants et donc de rendre le système rentable.

La perturbation qui peut poser des problèmes est la surtension. Une surtension peut être causée par un court circuit, l'arrêt d'une charge importante ou la connexion d'un banc de condensateurs. Un inconvénient majeur dans un SEH connecté en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré ou des récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolé triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- ✚ Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- ✚ Les variations de la charge à court terme: en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes. des valeurs minimales sont suivies par des pics.
- ✚ Les ressources d'énergie renouvelable : les ressources, comme le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.
- ✚ Les perturbations du réseau : les défauts, tels que les courts-circuits, peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi, au pire des cas, détruire certains composants.

Le système est largement instrumenté, des capteurs permettent d'obtenir les [11] :

- Conditions météo :
  - ✚ Vitesse du vent ;
  - ✚ Direction du vent ;
  - ✚ Ensoleillement dans le plan horizontal ;
  - ✚ Température ambiante ;
  - ✚ Ensoleillement dans le plan des panneaux ;
  - ✚ Température des panneaux.
- Des capteurs nous permettent de mesurer les courants, tensions et puissances des :
  - ✚ Chaînes de production hydraulique ;
  - ✚ Chaîne de production photovoltaïque ;
  - ✚ Batterie ;
  - ✚ Bus continu ;
  - ✚ Réseau, en cas de connexion.

Ces données seront ensuite envoyées vers un système de gestion et de pilotage qui permet de commander le niveau de tension de la batterie. Avec une telle structure, nous pouvons contrôler les transferts d'énergie en intervenant sur le niveau de la tension batterie, Toutes les données des capteurs sont stockées pour permettre l'affichage et l'analyse des grandeurs caractéristiques du dispositif.

## **II.10.Descriptions des composantes du système hybride**

### **II.10.1. Générateurs photovoltaïques**

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques, elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

### **II.10.2. Système Hydraulique**

Un système hydraulique (ou installation hydraulique), en Hydro mécanique, est un ensemble complet de composants qui utilise un fluide sous pression pour effectuer un travail mécanique.

### II.10.3. Générateur diesel

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone. La Figure (II.6), la fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel[26].

Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

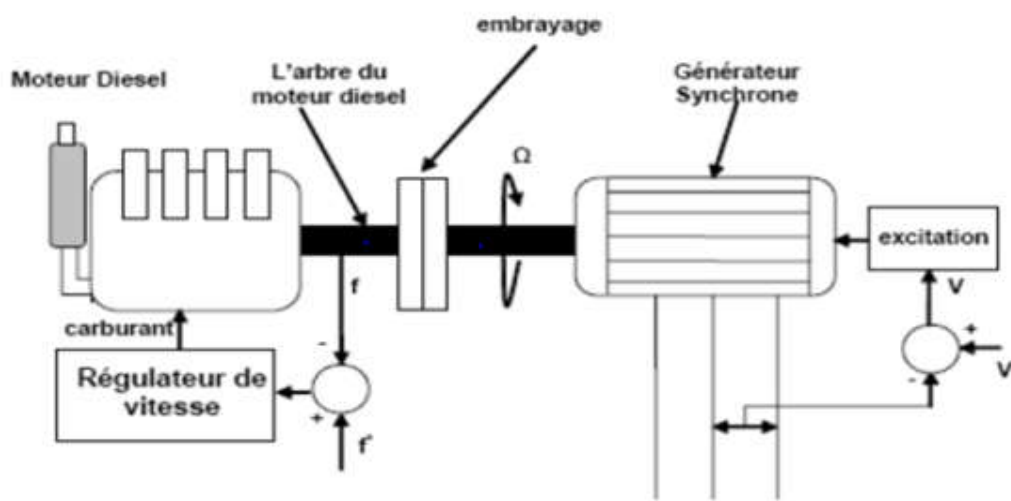


Figure II.6 : Configuration du générateur diesel

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

### II.10.4. Les Systèmes de stockage

#### II.10.4.1. Les Batteries

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est par fois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés, dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [23].

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb acide. les batteries nickel cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

#### II.10.4.2. Les piles à combustible [20]

L'intérêt accru dans le monde entier à la technologie PC rend relativement énormes, centrales, fixes de 200W à 2 MW. Ces piles sont disponibles dans le commerce, avec des rendements allant de 30 à 50%.

La pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie statique électrochimique qui produit un courant continu à travers la réaction d'hydrogène et de l'oxygène en présence d'un électrolyte, une électrode positive (cathode) et une électrode négative (anode). L'électrolyte porte des charges électriques par une électrode à l'autre.

Un catalyseur est habituellement exploité pour accélérer la réaction aux électrodes. Il existe plusieurs types de piles à combustible, le plus souvent classés selon le type d'électrolyte sont résumées dans le Tableau (II.2).

| Acronyme | Nom                                     | Température de fonctionnement | Electrolyte |
|----------|---|-------------------------------|-------------|
| PEMFC    | Polymere Electrolyte Membrane Fuel Cell | 50-80°C                       | Polymère    |
| HT-PEMFC | High Temperature                        | 120-180°C                     | Polymère    |
| DMFC     | Direct Methanol Fuel cell               | 25-50°C                       | Polymère    |
| DCFC     | Direct Ethanol Fuel Cell                | 25-50°C                       | Polymère    |
| SOFC     | Solid Oxide Fuel Cell                   | 700-1000°C                    | Céramique   |
| MCFC     | Molten Carbonate Fuel Cell              | 650°C                         | Liquide     |
| PAFC     | Phosphoric Acid Fuel Cell               | 150-200°C                     | Liquide     |
| AFC      | Alkaline Fuel Cell                      | 60-120°C                      | Liquide     |

Tableau (II.2) : Les différents types de PC

#### II.10.4.3. Système de supervision

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants.



Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

#### II.10.4.4. Convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

- ✚ Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.
- ✚ Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge.
- ✚ Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

#### II.10.4.5. Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

### II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système hybride. Nous avons présenté la définition et les différentes configurations des systèmes hybrides (bus à CC et CC/AC) avec les avantages et les inconvénients. En fin, nous avons parlé sur les principaux composants des systèmes hybrides.



# CHAPITRE III

## LES DIFFERENTS ELEMENTS DE SYSTEME HYBRIDE MICRO (HYDRO/SOLAIRE)

---

### III.1. Introduction

Les systèmes hybrides de production d'électricité se présentent aujourd'hui comme une alternative aux systèmes conventionnels utilisant uniquement des générateurs Diesel pour les zones rurales et isolées. Cependant différentes éléments des systèmes hybride micro (hydro/solaire) sont souvent rencontrées dans les travaux scientifiques.

Dans ce chapitre nous présentons, les éléments de systèmes hybride micro (hydro/solaire) sur lesquelles se focaliseront nos travaux.

Ensuite nous décrivons chacun des composants de ces configurations. Un accent est mis sur les modèles énergétiques choisis pour simuler chacun de ces composants. Le choix est porté sur des modélisations à la fois simples, n'utilisant que des paramètres accessibles (généralement des paramètres fournis par les constructeurs comme le rendement, les puissances ou capacités nominales par exemple) et assez précis pour rendre compte par simulation des transferts énergétiques dans le système.

### III.2. Différents éléments de système hybride micro (hydro/solaire)

#### III.2.1. Hydraulique

L'**hydraulique** est une technologie et une science appliquée ayant pour objet d'étude les propriétés mécaniques des liquides et des fluides. La mécanique des fluides est une science fondamentale qui constitue la base théorique de l'hydraulique.

##### III.2.1.1. Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

Le principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique est représenté par la Figure (III.1). La conduite forcée canalise l'eau (sous pression) jusqu'à la turbine. L'énergie de l'eau est communiquée aux pales de la turbine qui se met à tourner et entraîner le générateur qui produit l'électricité. En effet, l'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie mécanique qui est finalement convertie en électricité par le générateur (synchrone ou asynchrone).

Ensuite, un transformateur élève la tension de l'électricité produite par le générateur pour qu'elle puisse être plus facilement transportée.

Enfin, l'eau turbinée rejoint le cours d'eau par le canal de fuite.

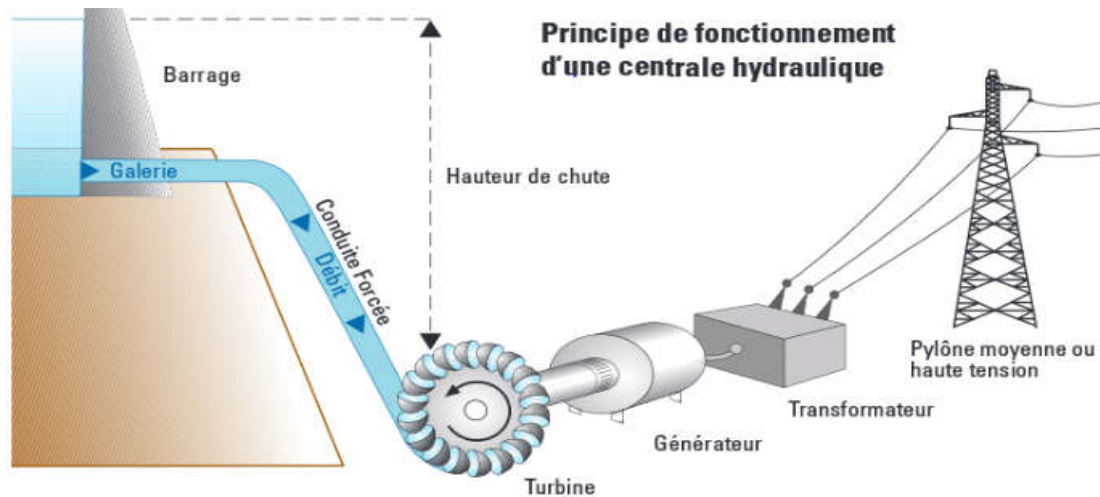


Figure III.1 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

### III.2.1.2. Classification des centrales hydroélectriques

La puissance électrique fournie par une centrale hydroélectrique est proportionnelle aux caractéristiques (débit et hauteur de chute) du cours d'eau sur lequel elle est installée. Selon ces caractéristiques, on peut classer les centrales hydroélectriques par leurs types de fonctionnement.

Notamment, on distingue : les centrales au fil de l'eau La Figure (III.2 a). Et les centrales en pied de barrage La Figure (III.2 b). Dans la catégorie des centrales hydroélectriques au fil de l'eau, l'énergie électrique est produite à partir du débit d'eau instantané prélevé dans le cours d'eau. Il n'y a pas de retenue d'eau, donc pas de possibilité de stocker l'eau. L'eau est acheminée par la conduite forcée vers la turbine hydraulique. Lorsque le débit du cours d'eau est inférieur au débit d'équipement minimum de la turbine hydraulique, la production cesse. Pour le cas des centrales en pied de barrage, on forme un réservoir d'eau en construisant un barrage pour arrêter le débit du cours d'eau. Ainsi l'eau se dirige vers la turbine quand il y a demande d'énergie. Pour des raisons économiques, l'aménagement hydroélectrique au fil de l'eau est préféré pour des petites centrales hydroélectriques. Cependant, si le réservoir existait déjà sur le site pour d'autres fins, par exemple pour l'irrigation, on peut adopter l'aménagement au pied d'un barrage [37].

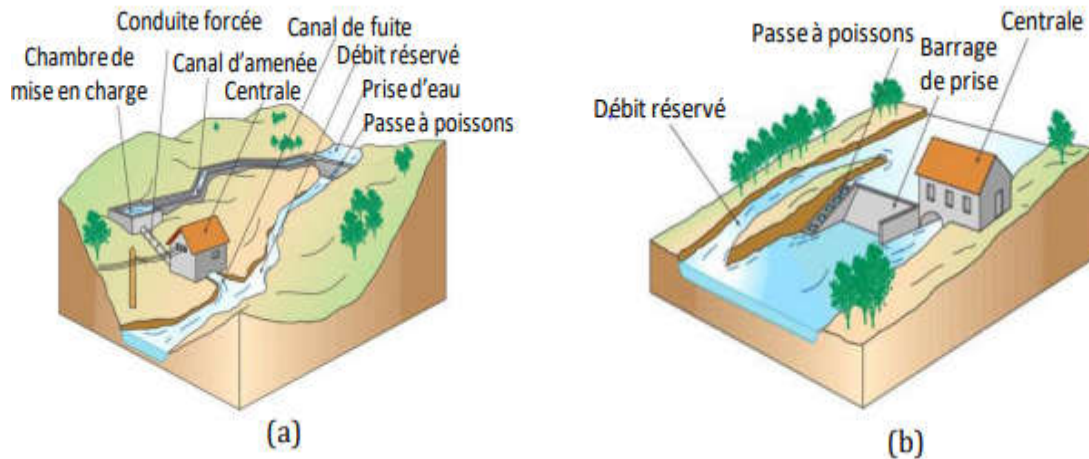


Figure III.2 : Centrales au fil de l'eau (a) et au pied d'un barrage (b)

Les centrales hydroélectriques peuvent être aussi catégorisées en fonction de leur hauteur de chute. On distingue en effet [38]:

- ✚ Centrales de haute chute (hauteur de chute supérieure à 100 m), La puissance dépend principalement de la hauteur de chute. La conduite constitue le plus important ouvrage de cette catégorie de centrale.
- ✚ Centrales de moyenne chute (hauteur de chute compris entre 15 et 100 m), La puissance dépend à la fois du débit d'eau turbinée et de la hauteur de chute.
- ✚ Centrales de basse chute (hauteur de chute inférieure à 15 m), La puissance est liée au débit d'eau turbinée. Le barrage constitue le plus important ouvrage dans cette catégorie de centrales.

La classification des centrales peut être aussi faite selon la puissance délivrée, Le classement varie d'un pays à l'autre le Tableau (II.1) [39] [40].

| Pays    | Micro (MW) | Mini (MW) | Petite (MW) | Grande (MW) |
|---------|------------|-----------|-------------|-------------|
| Bénin   | 0,01 1     | 1 10      | 10 30       | > 30        |
| Chine   | 0,005 5    |           |             |             |
| France  | 0,02 0,5   | 0,5 2     | 2 10        |             |
| Ghana   |            |           | ≤ 1         | > 10        |
| Inde    | < 0,1      | 0,101 1   | 1 15        | > 15        |
| Mali    | ≤ 0,1      | 0,1 1     | 1 10        | > 10        |
| Nigéria | ≤ 0,5      | ≤ 1       | ≤ 10        | > 10        |

|              |            |         |        |        |
|--------------|------------|---------|--------|--------|
| Sierra Leone | $\leq 0,1$ | 0,1 – 1 | 1 – 30 | $> 30$ |
| USA          | $< 0,1$    | 0,1 – 1 | 1 – 30 | $> 30$ |

Tableau (III.1) : Classification des centrales hydroélectriques en fonction de la puissance

### III.2.1.3. Principaux éléments d'une centrale hydroélectrique

Une centrale hydroélectrique est subdivisée en trois parties principales : les structures de génie civil, les équipements mécaniques et les équipements électriques.

#### Structures de génie civil

Les structures de génie civil contrôlent la circulation de l'eau dans une centrale hydroélectrique Figure (III.2). Il est important que ces ouvrages soient situés aux endroits appropriés et conçus pour des performances et une stabilité optimale. Les structures de génie civil sont essentiellement composées de [41] :

#### A. Ouvrages de dérivation

Ils sont composés d'un barrage, d'une prise d'eau et des ouvrages de protection à la prise d'eau servant à détourner l'eau en toute sécurité vers le canal d'amenée.

#### B. Canal d'amenée

Il achemine l'eau de la prise d'eau au bief d'amont. Généralement, le canal est parallèle au cours d'eau et a une dénivellation croissante par rapport au cours d'eau.

#### C. Bief d'amont et dessableur

Le dessableur est conçu pour faire déposer les particules de limon en suspension dans l'eau et rincer le bassin. Le bief d'amont raccorde le canal d'amenée à la conduite forcée. Il permet de filtrer l'eau qui entre dans la conduite forcée. Une fine grille est utilisée pour couvrir l'entrée de la conduite forcée afin d'empêcher l'entrée des débris qui pourraient endommager la turbine et les vannes.

#### D. Conduite forcée

Elle permet d'acheminer l'eau sous pression du bief d'amont à la turbine où l'énergie potentielle de l'eau est convertie en énergie cinétique afin de faire tourner la turbine. La conduite forcée est souvent l'élément le plus coûteux du budget du projet. Elle peut représenter jusqu'à 40% du coût d'installation d'une centrale à grande hauteur de chute. Ainsi, il y a lieu d'optimiser son dimensionnement afin de minimiser son coût.

### E. centrale et canal de fuite

La centrale est un bâtiment qui loge la turbine, la génératrice et les appareils de régulation. Bien qu'elle puisse être une simple construction, sa fondation doit être solide. Le canal de fuite est un canal qui permet à l'eau, sortant de la turbine, de retourner au cours d'eau.

### 🚧 Turbine hydraulique

Une turbine consiste à convertir l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique. Il existe principalement quatre types de turbines regroupés en deux catégories: turbine à action (Pelton et Crossflow) et turbine à réaction (Francis et Kaplan) [42].

#### A. Choix de turbines hydrauliques

Le choix de la turbine hydraulique constitue l'une des plus importantes phases de la conception d'une centrale hydroélectrique. La sélection du type de turbine se fait principalement en fonction des caractéristiques du site, notamment le débit du cours d'eau et la hauteur de chute du site. A partir de la connaissance de ces deux paramètres, le type de turbine appropriée peut être sélectionné en utilisant le graphe présenté à la Figure (III.3).

Les domaines d'utilisation des différents types de turbines hydrauliques sont donnés en fonction du débit du cours d'eau et de la hauteur de chute du site [43].

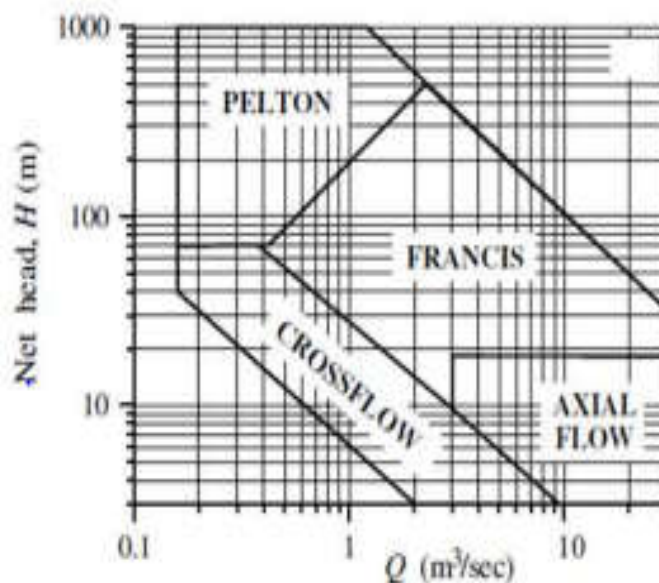


Figure III.3 : Domaines d'utilisation des turbines hydrauliques



## **B. Connexion de la turbine à la génératrice**

En fonction de la vitesse requise pour le fonctionnement de la génératrice électrique, la turbine est soit directement connectée à cette dernière, soit au moyen d'un adaptateur de vitesse (engrenages ou un ensemble courroies-poulies).

### **Génératrice**

La génératrice convertit l'énergie mécanique produite par la turbine hydraulique en électricité. Les génératrices sont composées de deux parties principales : le stator qui est la partie fixe et le rotor la partie mobile, Ces deux parties sont séparées par un espace d'air appelé entrefer. Elles sont généralement constituées de matériaux ferromagnétiques qui servent à concentrer l'énergie électromagnétique dans l'entrefer.

Les matériaux ferromagnétiques (saturables) constituent les armatures dans lesquelles sont entaillées des encoches qui permettent de loger des conducteurs électriques [60].

Les génératrices électriques peuvent être classées selon différents facteurs, notamment : leurs principes de fonctionnement et leurs domaines d'application. Le domaine d'application implique la quantité de puissance à fournir, Selon le principe de fonctionnement, on distingue principalement trois types de génératrices : les génératrices synchrones, les génératrices asynchrones et les génératrices paramétriques [61].

### **A. Génératrices synchrones à aimants permanents**

Il existe plusieurs sortes de génératrices synchrones à aimants permanents, dont les rotors les plus couramment rencontrés sont : GSAP avec aimants montés en surface la Figure (III.3 a), GSAP avec saillance et aimants en surface la Figure (III.3 b). GSAP avec aimants à concentration de flux la Figure (III.3 c), et GSAP avec aimants enterrés la Figure (III.3 d).

Ces types de génératrices ont pour avantage : leur structure est simple et économique [44].

Le risque permanent de désaimantation accentué par l'effet de la température constitue leur principal inconvénient.

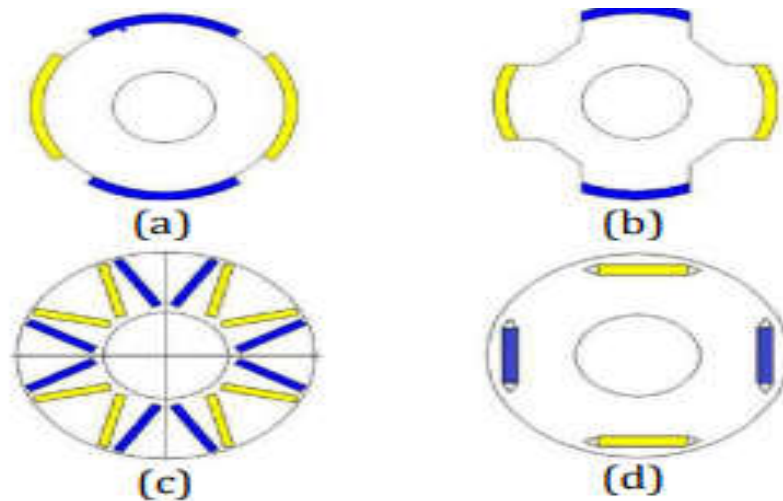


Figure III.4 : Rotors de génératrices synchrones à aimants permanents

### B. Génératrices synchrones à rotor bobiné

Ce type de génératrice (GSRB) est constitué d'un rotor comportant des bobines qu'on alimente par des courants continus afin de générer le champ magnétique inducteur dans l'entrefer. On distingue deux types de GSRB : les génératrices à pôles lisses la Figure (III.4 a) et les génératrices à pôles saillants la Figure (III.4 b).

Les génératrices à pôles saillants ont un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui conduit à une variation d'inductance en fonction de la position des pôles.

Par contre, les génératrices à pôles lisses ont une inductance constante quelle que soit la position du rotor car l'entrefer ne varie pas.

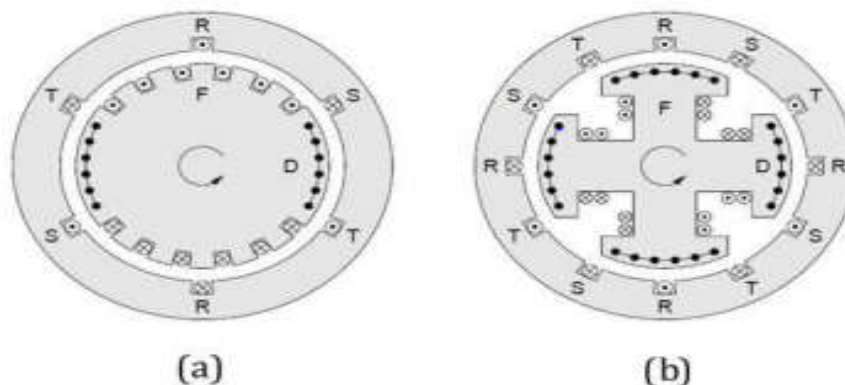


Figure III.5 : Génératrices synchrones à rotor bobiné (a) à pôles lisses, (b) à pôles saillants

### C. Génératrices synchrones à réluctance variable

Le rotor d'une génératrice synchrone à réluctance variable (GSRV) est présenté à La Figure (III.5), Ce rotor ne dispose ni d'aimants, ni de bobine d'excitation. Le couple est créé

grâce à l'effet de variation de réluctance, Le rotor est construit de telle sorte que l'on ait un rapport entre l'inductance de l'axe direct et celle de l'axe en quadrature ( $L_d/L_q$ ) qui soit le plus élevé possible, La plage de fonctionnement à puissance constante dépend de ce rapport. Plus ce rapport est élevé, plus le facteur de puissance l'est aussi. L'obtention d'un rapport  $L_d/L_q$  élevé implique des contraintes de fabrication, d'où une répercussion négative sur le coût [65].

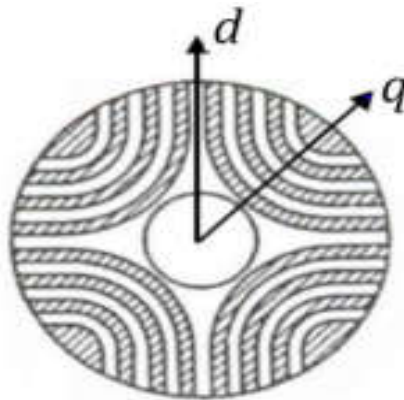


Figure III.6 : Rotor d'une GSRV

#### D. Génératrices synchrones à double excitation

Les génératrices synchrones à double excitation disposent de deux sources de flux magnétiques : une source à aimants permanents et une autre avec des bobines. Ainsi, ce type de génératrice profite des avantages des GSAP et GSRB, à savoir : un bon rendement et un bon couple massique en contrôle de flux [44].

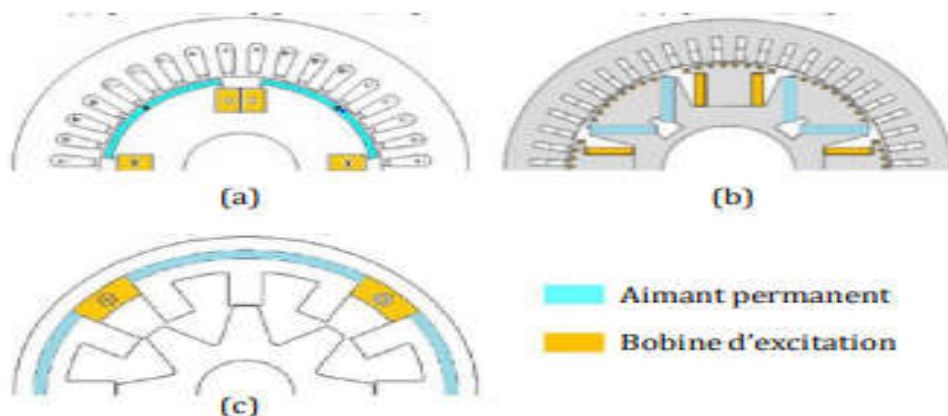


Figure III.7 : Rotors de génératrices à double excitation

#### III.2.2. Solaire photovoltaïque (PV)

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie électrique produite à partir de l'effet photovoltaïque, Ce dernier consiste à convertir l'énergie lumineuse issue des rayons solaires en énergie électrique, la Figure (III.7).

### III.2.2.1. Principe de fonctionnement

La Figure (III.7) schématise le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque dont la structure générale est celle d'une diode à jonction PN fortement dopée. La diode est constituée d'une région de type N, où la conduction se fait principalement par des électrons, et d'une région de type P où la conduction électrique se fait principalement par les trous chargés positivement. Dès que la diode est éclairée et que la température dépasse 100K, ses atomes dopés sont tous ionisés et cèdent un électron mobile ou un trou mobile [66]. Si la cellule photovoltaïque est connectée à un circuit extérieur, elle se comporte comme une source d'énergie électrique et la puissance fournie dépend de l'éclairement qu'elle reçoit. Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques sont disponibles suivant la nature des matériaux utilisés pour constituer la jonction. Les plus connues sont présentées dans le paragraphe suivant.

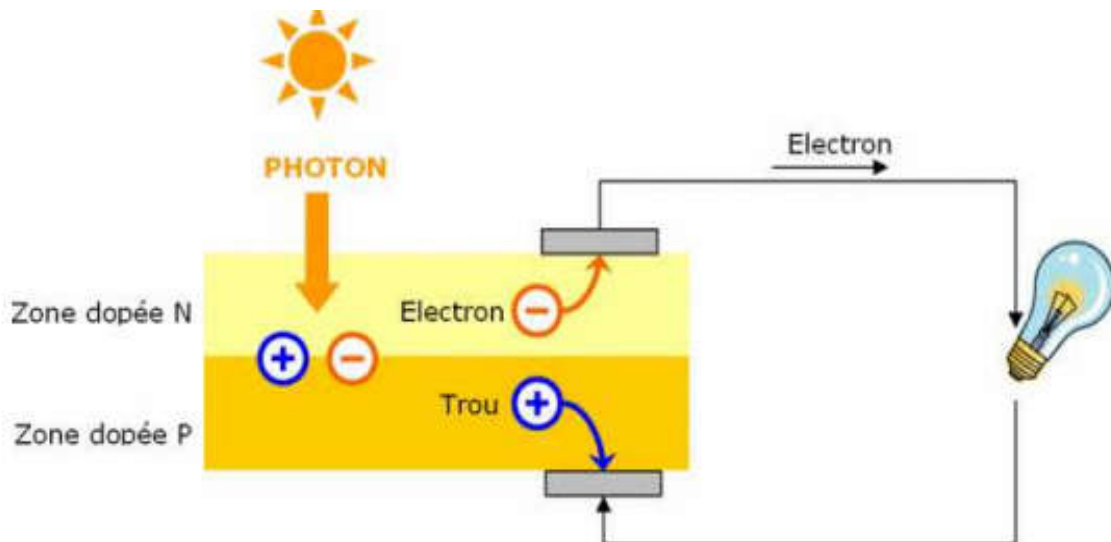


Figure III.8 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### III.2.2.2. Panneau solaire photovoltaïque

Le panneau solaire est constitué de cellules photovoltaïques qui convertissent l'éclairement énergétique du soleil en courant continu. L'assemblage des cellules en série permet d'obtenir une tension compatible avec la charge de la batterie. Le courant produit par le panneau est directement proportionnel à l'ensoleillement reçu : le panneau solaire fonctionne comme un générateur de courant. Les conditions d'installation du panneau solaire permettent la meilleure exposition au soleil tout au long de l'année : orientation sud, inclinaison égale à la latitude.

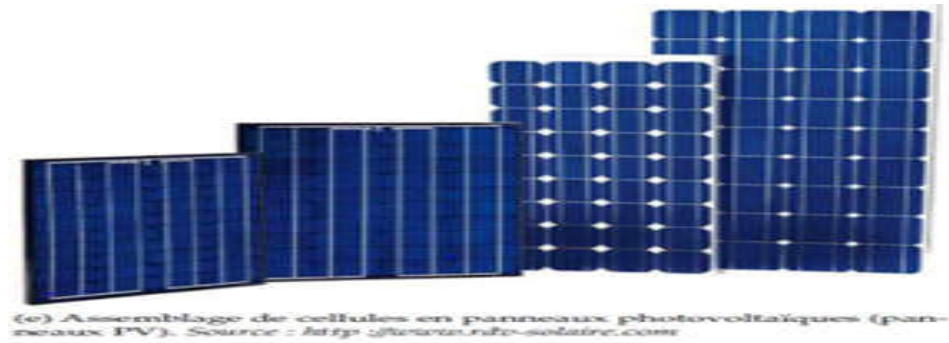


Figure III.9 : Panneaux photovoltaïques

### III.2.2.3. Caractéristiques statiques des panneaux

De nombreux constructeurs offrent une gamme importante des panneaux PV. On prend l'exemple d'un module Axitec, AC-150P/13S, Photon Mag, dont les caractéristiques complètes sont reportées en annexe. Telle qu'elle a été représentée, une cellule photovoltaïque est un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à celui d'une source de courant shuntée par une diode [67].

#### III.2.2.3.1. Influence des résistances série et shunt

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. Cependant, il est possible, sous certaines hypothèses de dégager des valeurs limites acceptables ( $R_{s1}$ ,  $R_{sh1}$ ) [68].

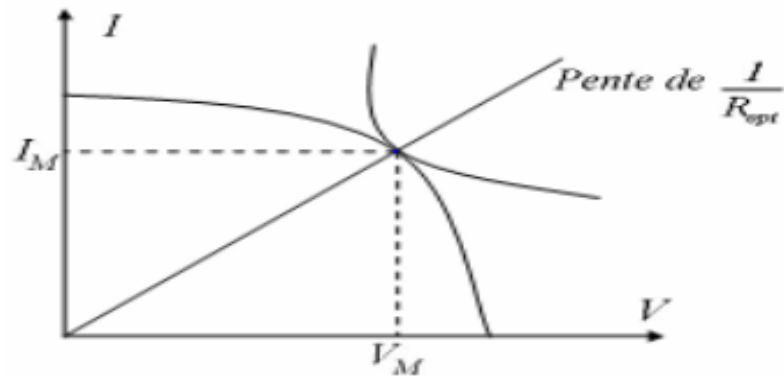
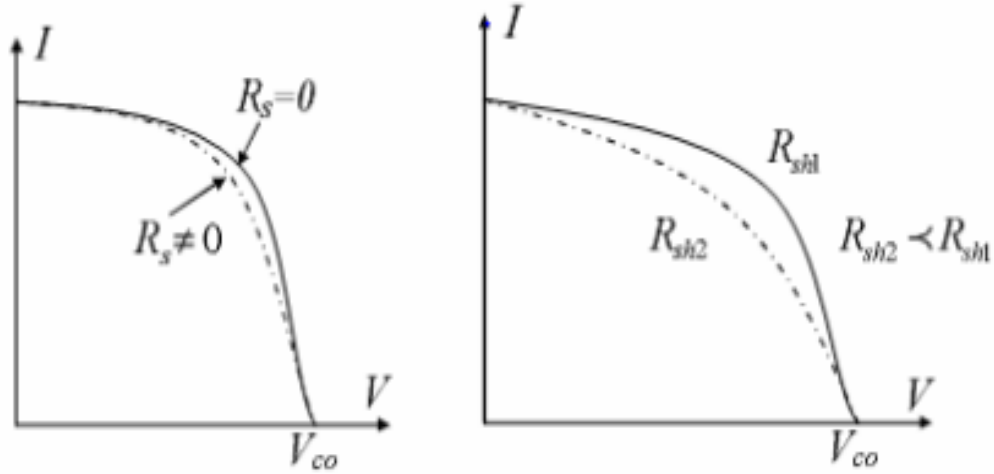


Figure III.10 : Schéma d'une cellule élémentaire



a) Influence de la résistance série      b) Influence de la résistance shunt

**Figure III.11 : Influence des résistances série et shunt sur les caractéristiques**

En effet, si on suppose que la cellule est en régime optimal, et si les pertes sont attribuées à la résistance série, le rapport de la puissance dissipée dans celle-ci à la puissance délivrée par la cellule est donnée par :

$$Q_{RS} = \frac{R_s I^2 M}{I M V_M} = \frac{R_s I_{CC}}{V_{co}} \quad (III.1)$$

Où :

$V_M$  et  $I_M$  sont respectivement tension aux bornes et courant parcourant, max ;  $I_{CC}$  et  $V_{co}$  représente respectivement, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

De même, si on attribue toutes les pertes à la résistance shunt, et en supposant qu'on est au point de fonctionnement optimal, on aura:

$$Q_{RS} = \frac{\frac{V^2 M}{R_{sh}}}{I M V_M} = \frac{V_{co}}{R_{sh} I_{CC}} \quad (III.2)$$

La Figure (III.10 a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de  $R_s$ . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I = f(V)$  dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point M de La Figure (III.9)). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant. La Figure (III.10 b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de La Figure(III.9)). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

### III.2.2.3.2. Influence du flux lumineux

Le photo-courant  $I_{ph}$  est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux  $E_s$ . Le courant  $I_d(V_d)$  étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous de faibles concentrations. En effet, la densité des porteurs de charge et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de température et de la concentration de l'éclairement [67].

Le photo-courant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface 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.

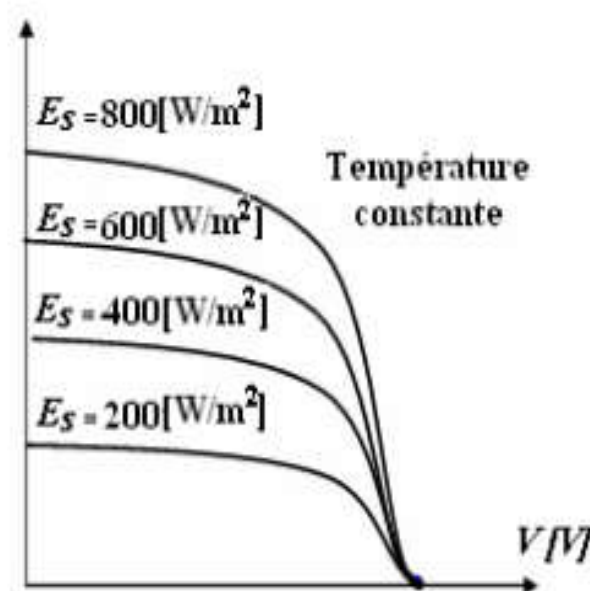


Figure III.12 : Caractéristiques courant- tension d'une cellule PV

La Figure (III.11) représente les caractéristiques  $I=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque sous diverses valeurs d'éclairement. A chacune de ces valeurs de  $E_s$ , correspond une puissance

électrique maximale que pourrait fournir la cellule. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert VCO, suite à une chute du flux lumineux.

### III.2.2.3.3. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de  $3.10^{-2}$  [mA.K<sup>-1</sup> / cm<sup>2</sup>] de cellule. Par contre, le courant  $I$  augmente très rapidement avec  $T$ . il engendre une diminution de la tension du circuit ouvert VCO. Cette diminution est de l'ordre de 2 [mV/°], comme le montre la figure (III.12).

L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, d'un ordre de  $5.10^{-5}$  [W/K/cm<sup>2</sup>] de cellule, soit une variation de 0,35 [% /°]. Le paramètre  $T$  peut être intégré dans l'équation caractéristique ( $I/V$ ) d'une simple cellule PV, comme le montre Sukamongkol dans [13];

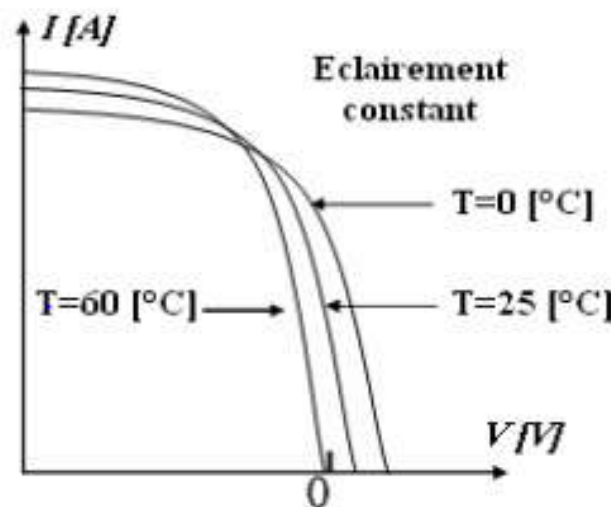


Figure III.13 : Influence de la température

## III.3. Générateur Diesel

### III.3.1. Description d'un Générateur Diesel

Dans le cas des installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH (système énergie hybride), le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux du carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constant [14].



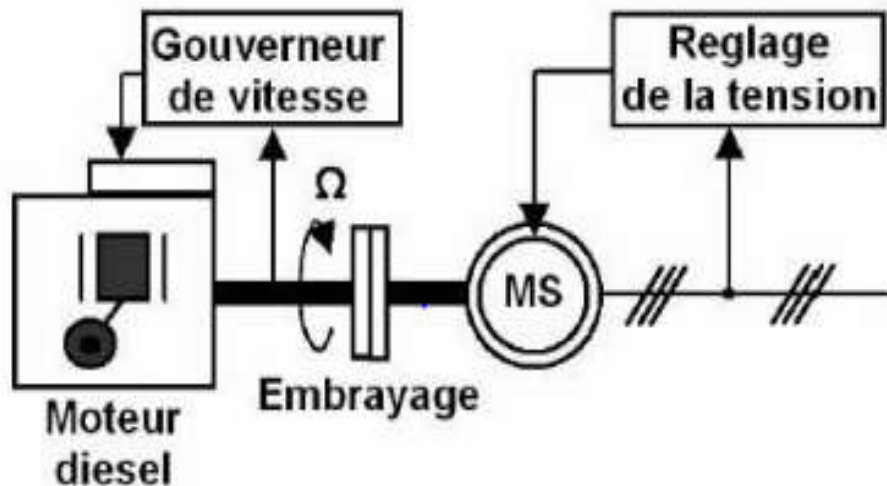


Figure III.14 : Configuration de générateur diesel

**Le générateur diesel est constitué par :**

✓ **Moteur**

C'est le générateur de puissance mécanique ; la vitesse et le couple sont asservis par un régulateur de vitesse en jouant sur le débit de fuel ce qui permet le réglage de la puissance active fournie au système.

✓ **L'alternateur**

Il s'agit d'une machine synchrone (MS) ; il est la source d'énergie électrique est asservi par un système d'excitation qui s'occupe de maintenir constante la tension de sortie de l'alternateur en jouant sur la puissance réactive fournie au réseau. Cette puissance réactive fournie est limitée ( $\cos \varphi = 0,8$  ; donnée constructeur) [69].

#### III.4. Batteries

Une batterie est constituée d'accumulateurs électrochimiques associés en série et/ou en parallèle. Chaque accumulateur est un système électrochimique qui permet de convertir de manière réversible l'énergie chimique stockée en électricité. Il comporte une électrode positive et une électrode négative immergées dans un électrolyte la figure (III.13). Il existe différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques que l'on peut classer en fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte. Les plus utilisées sont : plomb-acide, nickel-cadmium, lithium-ion et nickel-hydrure métallique [71].

### III.4.1. Principe de fonctionnement d'une batterie

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique est illustré à la figure (III.11). En mode décharge, à travers des réactions d'oxydoréductions, l'accumulateur convertit l'énergie chimique stockée en énergie électrique (générateur d'énergie électrique). Les électrodes libèrent des ions qui migrent dans l'électrolyte, entraînant le transit des électrons par le circuit extérieur afin de conserver la neutralité électrique [72]. En effet, à l'anode (électrode négative en décharge), s'effectue la réaction d'oxydation, et les électrons libérés à l'anode passent dans le circuit extérieur pour arriver à la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère la réaction de réduction [73]. A contrario, le phénomène s'inverse durant la charge. L'accumulateur fonctionne en récepteur d'énergie électrique.

L'électrolyte d'un accumulateur au plomb-acide ( $P - Ac$ ) est une solution aqueuse d'acide sulfurique, sa cathode est constituée d'oxyde de plomb ( $PbO_2$ ) et son anode de plomb  $P$ . Quant à l'accumulateur au nickel-cadmium ( $Ni - Cd$ ), l'électrolyte est à base de potasse, la cathode est composée d'hydroxyde de nickel et l'anode de cadmium [73]. Pour l'accumulateur nickel-hydrure métallique ( $Ni - MH$ ), l'électrode négative est constituée d'un alliage d'hydrure métallique MH. L'électrode positive est à base d'oxyde hydroxyde de nickel et est à capable d'absorber et de désorber l'hydrogène [74].

Il utilise une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) comme électrolyte. Par rapport à l'accumulateur au lithium-ion ( $Li - ion$ ), l'électrolyte est constitué d'une solution d'hexafluorure phosphate de lithium ( $LiPF_6$ ) dans un mélange de solvants organiques, l'électrode positive est composée d'oxydes de métaux de transition ( $LiCoO_2$ ,  $LiNiO_2$  ou  $LiMn_2O_4$ ) et l'électrode négative de carbone graphité ( $LiC_x$ ) [75].

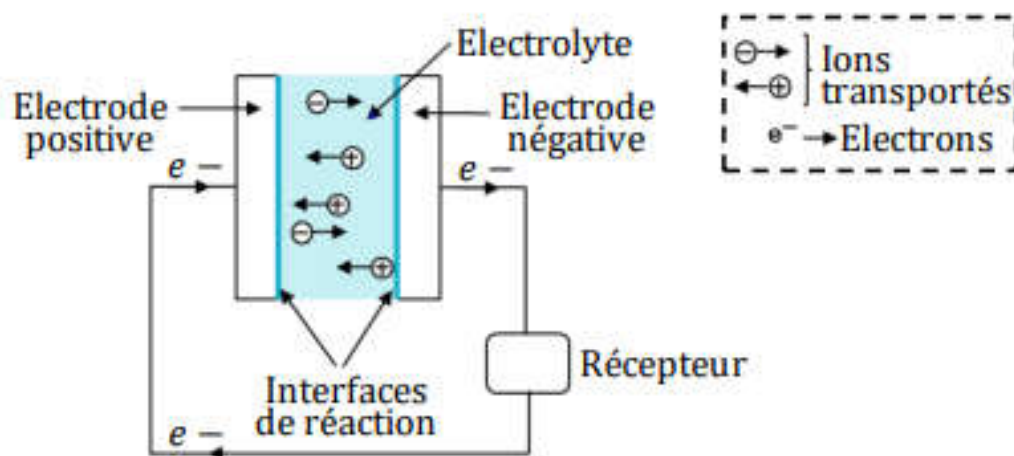


Figure III.15 : Principe d'un accumulateur électrochimique

### III.5. Convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, à une tension alternative [7].

#### 🔌 Convertisseurs continu/continu (DC/DC)

Ce type de composant est utilisé pour transformer la tension des batteries en une tension DC différente pour alimenter un appareil spécial comme par exemple un chargeur pour téléphone portable, une radio, un ordinateur portable...

Deux types de convertisseurs DC/DC sont possibles : les convertisseurs « vers le haut » pour augmenter la tension et les convertisseurs « vers le bas » pour abaisser la tension.

##### A. Convertisseurs vers le haut (élevateur de tension)

La Figure (III.16) présente les composants typiques d'un convertisseur vers le haut.

Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inductance stocke le courant provenant de la batterie ; lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption du courant dans l'inductance provoque une surtension qui est dérivée dans le condensateur et le récepteur ; la diode empêche tout retour de courant.

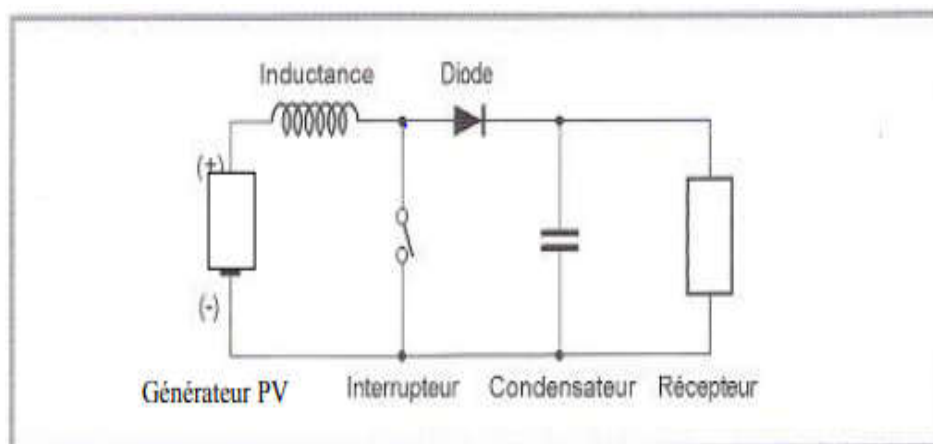


Figure III.16 : exemple de convertisseur DC/DC vers le haut

Le condensateur sert à lisser la tension de sortie et l'interrupteur est commandé par une électronique de contrôle qui mesure en permanence la tension et le courant de sortie pour ajuster la fréquence et la largeur de commande de l'interrupteur et limite le courant à une valeur sûre pour les composants. Le rendement typique dépasse en général 70% et peut atteindre 85 à 90% pour les meilleurs convertisseurs.

## B. Convertisseurs vers le bas (abaisseur de tension)

La Figure (III.13) présente les composants typiques d'un convertisseur vers le bas.

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant circule de la batterie vers le récepteur à travers l'inductance et lorsque l'interrupteur s'ouvre, la tension aux bornes de l'inductance s'inverse, ce qui fait conduire la diode qui protège l'interrupteur. L'électronique de contrôle commande la fréquence et la durée de fonctionnement de l'interrupteur en fonction de la tension désirée et du courant maximal possible. Le rendement typique est ici légèrement supérieur au modèle précédent et en générale de 80 à 90 % pour les appareils modernes.

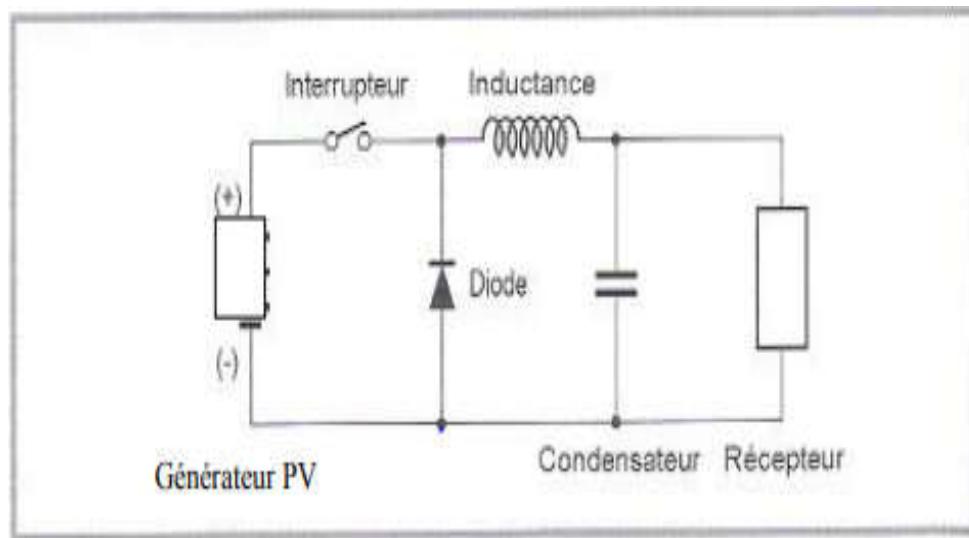


Figure III.17 : convertisseur typique DC/DC vers le bas

## ⚡ Onduleurs DC/AC

### III.5.1. Principe de fonctionnement

Un onduleur est un convertisseur de tension continue /alternative. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique photovoltaïque en énergie électrique alternative soit pour faire fonctionner des charges, soit pour débiter de l'énergie au réseau. Généralement à base de thyristors, selon l'exploitation de cet onduleur peut être monophasé ou triphasé [18].

La figure présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM ; l'onduleur (monophasé ou triphasé) de tension impose à sa sortie un système de tension sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsion (MLI, ou PWM en anglais). Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance  $L_d$  située avant le transformateur afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau.

Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage.

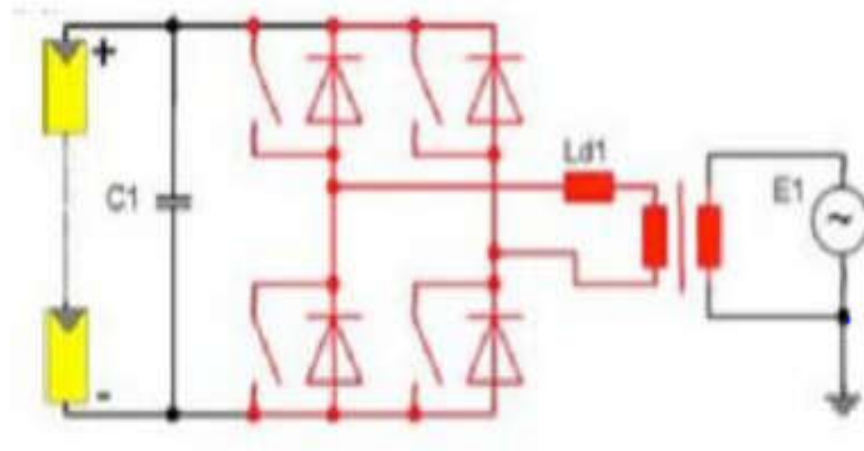


Figure III.18 : Circuit simple utilisant un pont de transistors [18]

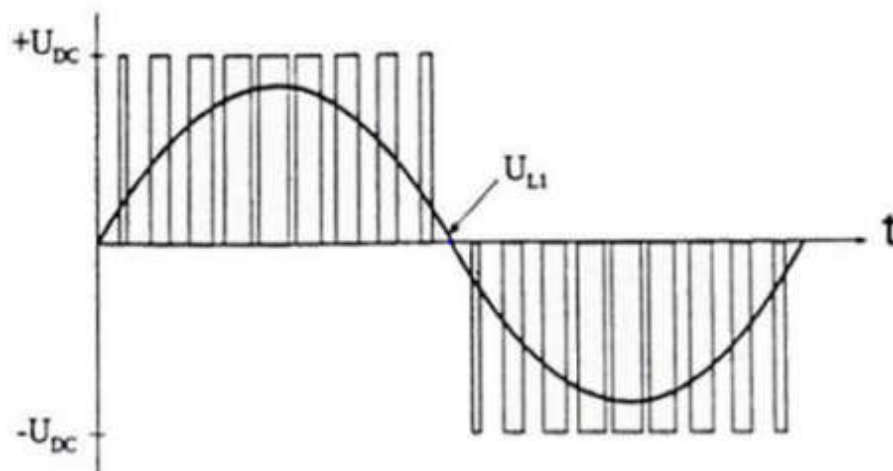


Figure III.19 : Filtrage de la tension par l'inductance de sortie

### III.6. Charges

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

### III.7. Conclusion

Dans cette partie, on a données des explications générales sur les différents éléments du système étudié, nous avons aussi donné le principe et leur importance dans le système hybride.

## CHAPITRE IV

### OPTIMISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE MICRO (HYDRO/SOLAIRE)

---

## IV.1. Introduction

Dans but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposé dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulée sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site situé dans une région de la Wilaya de Mascara, pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé.

Après avoir effectué le dimensionnement des différents composants des SEH, on va simuler les différentes configurations de notre système d'étude. Ce qui implique l'insertion des données suivantes dans le logiciel HOMER:

- ✚ Les Coûts associés à l'utilisation de chaque composant du système.
- ✚ Les Coûts de remplacement de chaque matériel en tenant compte de leur durée de vie, laquelle est dépendante de leur sollicitation.
- ✚ Pour chaque composant: la production utile, le taux d'utilisation, les horaires d'utilisation, la durée de vie moyenne.

On obtient de nombreux résultats sous forme de liste de plusieurs configurations possibles:

- ✚ La configuration triée par coût et cycle de vie.
- ✚ La configuration triée par type de système.

Toutes les deux sont classées selon le critère du coût actuel (NPC) et le coût d'énergie (COE). Ces coûts permettent de comparer les différentes options pour la conception d'un système hybride optimal. Enfin, le système optimal choisi est comparé à la situation connecté au réseau, afin de calculer la distance minimale séparant le site d'étude au réseau et correspondante au seuil de rentabilité du SEH.

## IV.2. Présentation du logiciel HOMER

### IV.2.1. Définition

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) a été initialement développé dès 1993 par le National Renewable Energy Laboratory pour les programmes d'électrification rurale. Depuis 2009, il est disponible sous la licence HOMER Energy.

HOMER est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybrides, composés de groupes électrogènes, de systèmes de

cogénération, d'éoliennes, de systèmes photovoltaïques, de systèmes hydrauliques, de batteries, de piles à combustible, de la biomasse et bien d'autres. Que l'installation soit reliée au réseau électrique ou non, HOMER permet de déterminer comment les sources d'énergies intermittentes comme l'hydraulique et le solaire peuvent être intégrée de manière optimale au sein des systèmes hybrides.

L'espace HOMER se présente comme ainsi :

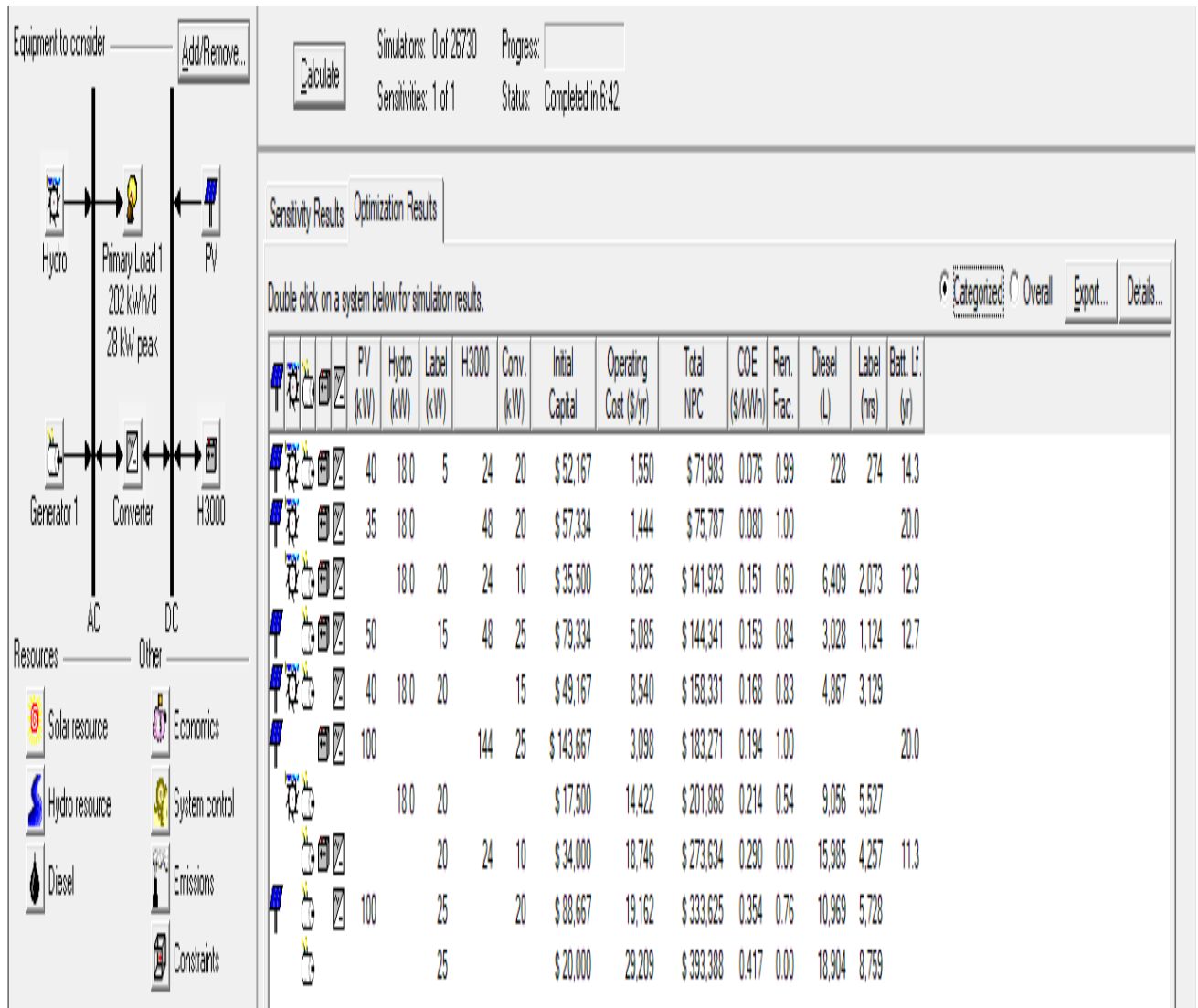


Figure IV.1 : Espace de travail sous HOMER

### IV.3. Description d'HOMER

Le logiciel calcule et affiche alors les résultats sous forme de tableaux et de graphiques. Il s'utilise selon un processus fréquentatif. Homer s'utilise pour simuler des systèmes de production d'électricité et optimiser l'efficacité et les coûts ainsi l'analyse de comportement du système.



Logiciel fonctionne sur une base horaire, la durée de la simulation est établie sur une année. Tout d'abord Homer est un modèle économique. Il permet à comparer les différentes combinaisons de tailles et de nombres de composants, et d'étudier comment les variations de la disponibilité des ressources affectent le coût d'installation et d'exploitation des différentes solutions de systèmes.

#### IV.4. Caractéristique du site choisi

##### IV.4.1. Données géographique

Nous avons choisi un village isolé, non connecté aux réseaux de distribution d'énergie classiques et équipé de tous les dispositifs nécessaires. Le site que nous avons choisi appartient à la zone nord-ouest de l'Algérie (Ouizert wilaya de Mascara) située à 570m de latitude et dont les coordonnées géographiques sont:

Latitude:  $35^{\circ} 7' N$ , Longitude: et  $0^{\circ} 02' W$  [50] [51].



Figure IV.2 : La localisation de barrage Ouizert (El Fakia)

##### IV.4.2. Bilan énergétique

La charge est basée sur une zone rurale comptant 40 familles. La charge journalière de ce village est de 202 KWh par jour, la charge journalière d'un ménage est de 5.06 KWh par jour.

Le Tableau (IV.1) fournit les données de l'estimation des besoins énergétiques journaliers ;

| Appareils électriques | Puissance Totale(W) | Heure<br>fonctionnement(h) | Energie totale (kWh /J) |
|-----------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| Chambre adulte        | 15                  | 5                          | 75                      |
| Chambre d'enfants     | 20                  | 4                          | 80                      |
| Salon                 | 125                 | 6                          | 150                     |
| couloire              | 15                  | 2                          | 30                      |
| Salle de bain         | 20                  | 2                          | 40                      |
| toilette              | 15                  | 3                          | 45                      |
| cuisine               | 20                  | 7                          | 140                     |
| Réfrigérateur         | 200                 | 12                         | 2400                    |
| Télévision            | 75                  | 8                          | 600                     |
| climatiseur           | 400                 | 3                          | 1200                    |
| Autre chose           | 100                 | 3                          | 300                     |
| <b>Total (Wh/d)</b>   | <b>5060</b>         |                            |                         |

Tableau (IV.1) : l'estimation des besoins énergétiques journalier

## IV.5. Caractéristique météorologiques

### IV.5.1. Données relatives à l'éclairement

Mesuré sur une surface horizontale, le rayonnement solaire quotidien varie entre 2,4 [KWh/ m<sup>2</sup>/ j] au mois de décembre et 7,08 [KWh/ m<sup>2</sup>/ j] au mois de juin, avec une moyenne annuelle de 4,859 [KWh/ m<sup>2</sup>/ j].

| Mois    | Indice de clarté | Rayonnement quotidien<br>(KW/m2/j) |
|---------|------------------|------------------------------------|
| Janvier | 0.537            | 2.720                              |
| Février | 0.569            | 3.640                              |
| Mars    | 0.577            | 4.740                              |
| Avril   | 0.597            | 5.940                              |
| mai     | 0.590            | 6.550                              |
| Juin    | 0.614            | 7.080                              |
| juillet | 0.613            | 6.920                              |

|                         |       |       |
|-------------------------|-------|-------|
| <b>Août</b>             | 0.605 | 6.260 |
| <b>Septembre</b>        | 0.598 | 5.250 |
| <b>Octobre</b>          | 0.570 | 3.940 |
| <b>Novembre</b>         | 0.523 | 2.800 |
| <b>Décembre</b>         | 0.516 | 2.400 |
| <b>Moyenne annuelle</b> | 0.585 | 4.859 |

Tableau (IV.2) : Irradiation solaire à Ouizert

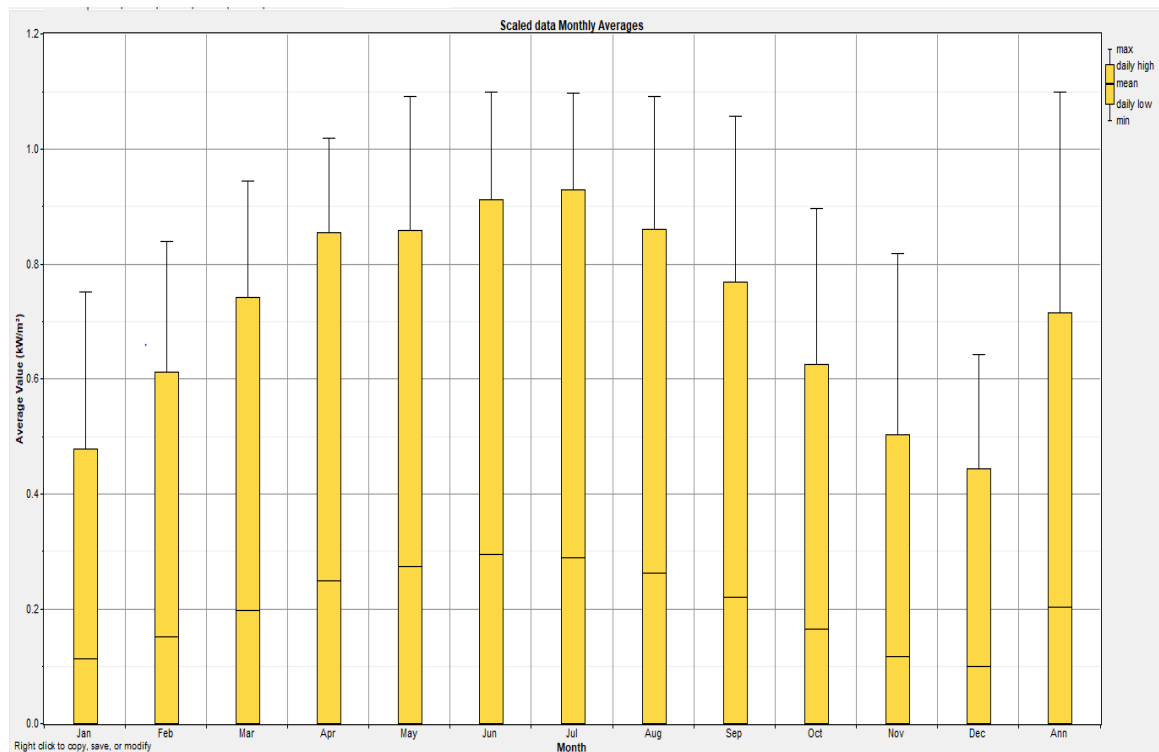
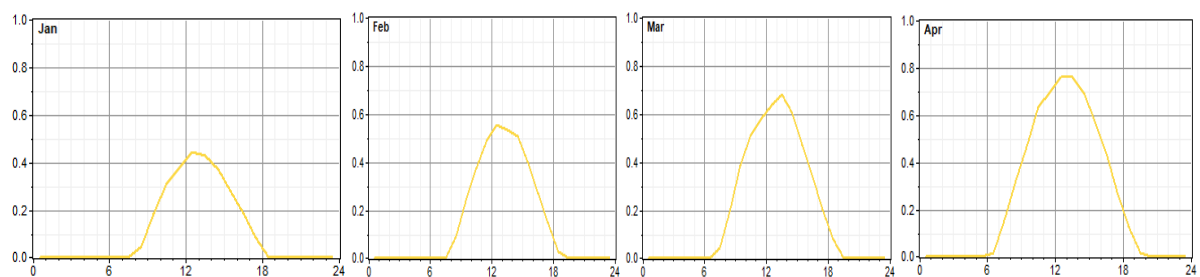


Figure IV.3 : Profil de l'éclairement moyen mensuel



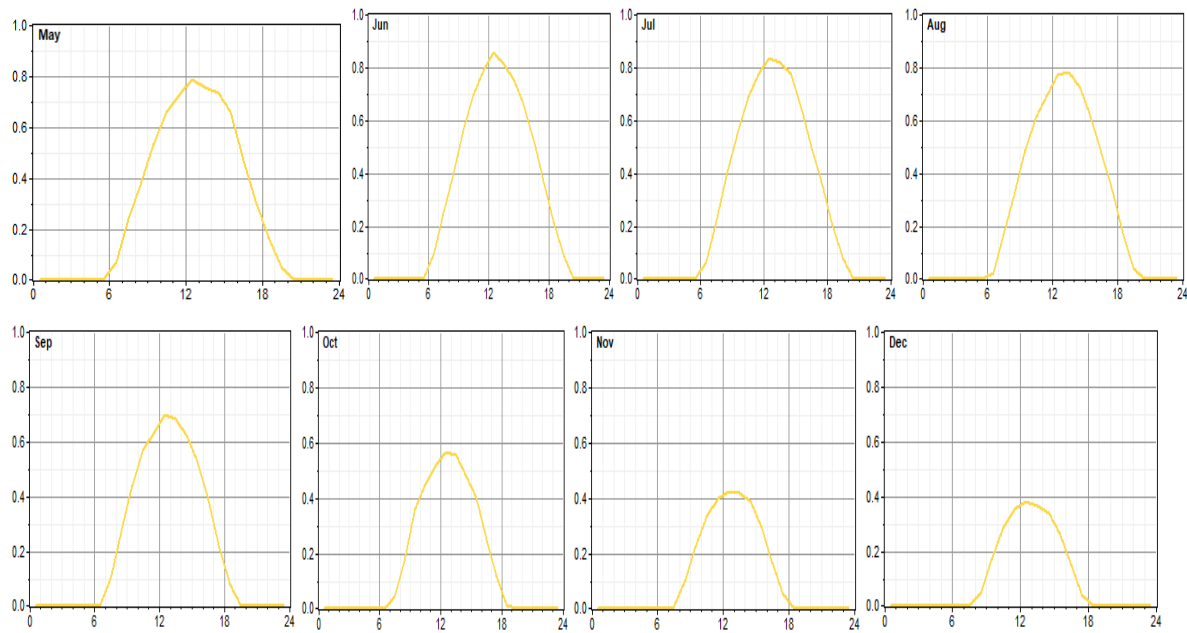


Figure IV.4 : Variations de l'éclairement au cours des mois

#### IV.5.2. Source des données hydro

Les données de référence sont une série chronologique d'un an représentant le débit moyen du cours d'eau, exprimé en litres par seconde, pour chaque pas de temps de l'année.

| Mois      | Flux de ruisseaux (L/s) |
|-----------|-------------------------|
| Janvier   | 250                     |
| Février   | 250                     |
| Mars      | 250                     |
| Avril     | 245                     |
| May       | 240                     |
| Juin      | 220                     |
| Juillet   | 190                     |
| Aout      | 180                     |
| Septembre | 210                     |
| Octobre   | 235                     |
| Novembre  | 245                     |
| décembre  | 250                     |

|             |     |
|-------------|-----|
| Débit moyen | 230 |
|-------------|-----|

Tableau (IV.3) : Les données Hydraulique de chaque pas de temps de l'année

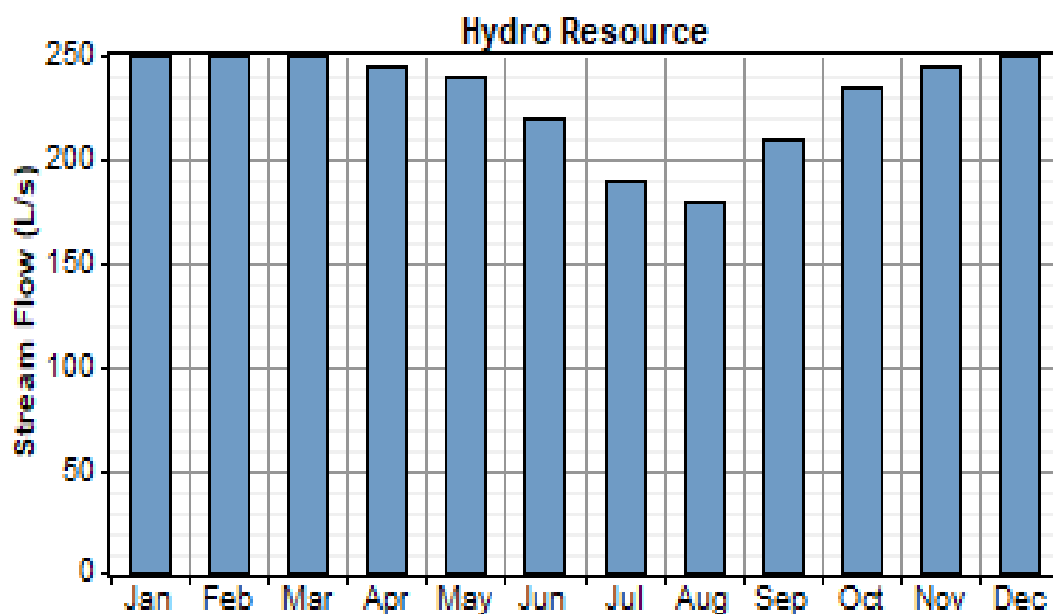


Figure IV.5 : Résultat du l'eau pendant une année

#### IV.6. Optimisation du système hybride (photovoltaïque/ hydro)

La figure suivante montre le système global que nous allons étudiés en utilisant le logiciel Homer, il contiendra les panneaux solaires, les groupes électrogènes, les turbine hydraulique, les convertisseurs et les systèmes de stockage avec batteries.

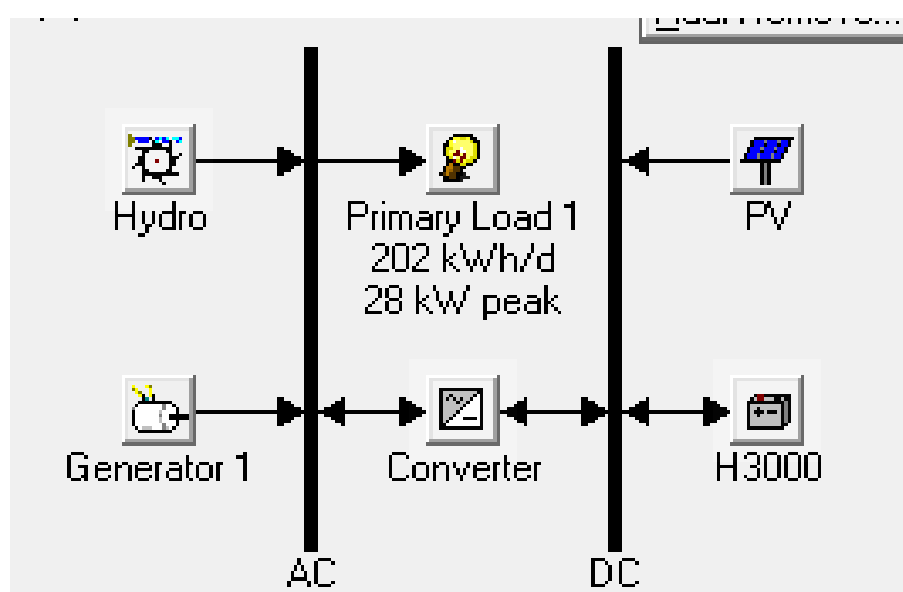


Figure IV.6 : Montage électriques du système autonome

### IV.6.1. Cas d'étude

- ✚ Charge valeur moyenne : 202 kWh/j
- ✚ Eclairage, valeur moyenne : 4,86 kWh/m<sup>2</sup> /j
- ✚ Moyenne annuelle de flux : 23.3 L/s
- ✚ Diesel Prix du carburant : 0,2 \$/L.

Après la compilation de notre système, nous allons entamer l'étape suivante, qui est la simulation, nous allons voir toutes les combinaisons faisables de point de vue économique et technique. au moment où la simulation est terminée, il affichera la meilleure combinaison de chaque système trouvé.

À noter que pour notre cas, nous pouvons avoir quatre configurations possibles :

1. PV, hydro, groupe électrogène, convertisseur et batteries.
2. PV, hydro, convertisseur et batteries.
3. Hydro, Groupe électrogène, convertisseur et batteries.
4. PV, groupe électrogène, convertisseur et batteries

De ce fait nous allons montrés les résultats d'optimisation et le classement des systèmes obtenus :

|                      |                     | PV<br>KW | hydro | Diesel | H3000 | Conv<br>KW | Initial<br>Capital<br>\$ | Total<br>NPC \$ | COE<br>(\$kW/h) | Diesel<br>(L) |
|----------------------|---------------------|----------|-------|--------|-------|------------|--------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| <b>système<br/>1</b> | PV<br>+hydro+diesel | 40       | 18    | 5      | 24    | 20         | 52167                    | 71983           | 00.076          | 228           |
| <b>système<br/>2</b> | PV+ hydro           | 35       | 18    | 0      | 48    | 20         | 57334                    | 75787           | 0.080           | 0             |
| <b>système<br/>3</b> | Hydro+diesel        | 0        | 18    | 20     | 24    | 10         | 35500                    | 141923          | 0,151           | 6409          |
| <b>système<br/>4</b> | PV+diesel           | 50       | 0     | 15     | 48    | 25         | 79334                    | 144341          | 0,153           | 3028          |

Tableau (IV.4) : Résultats d'optimisation et classement des systèmes

### IV.6.2. Analyse économiques

Ce tableau nous a détaillé l'analyse économiques dans les quatre configurations, a partir de ce tableau on remarque que le cout nette actuel total NPC et le cout d'énergie COE de la configuration 1 est le moins chère.

|                             | Configuration 1 | Configuration 2 | Configuration3 | Configuration4 |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| <b>Capital initial (\$)</b> | 52167           | 57334           | 35500          | 79334          |
| <b>Maintenance (\$/AN)</b>  | 1550            | 1444            | 8325           | 5085           |
| <b>COE (\$/kWh)</b>         | 0.076           | 0.080           | 0.151          | 0.153          |
| <b>Total NPC</b>            | 71983           | 75787           | 141923         | 144341         |

Tableau (IV.5) : Comparaison économiques

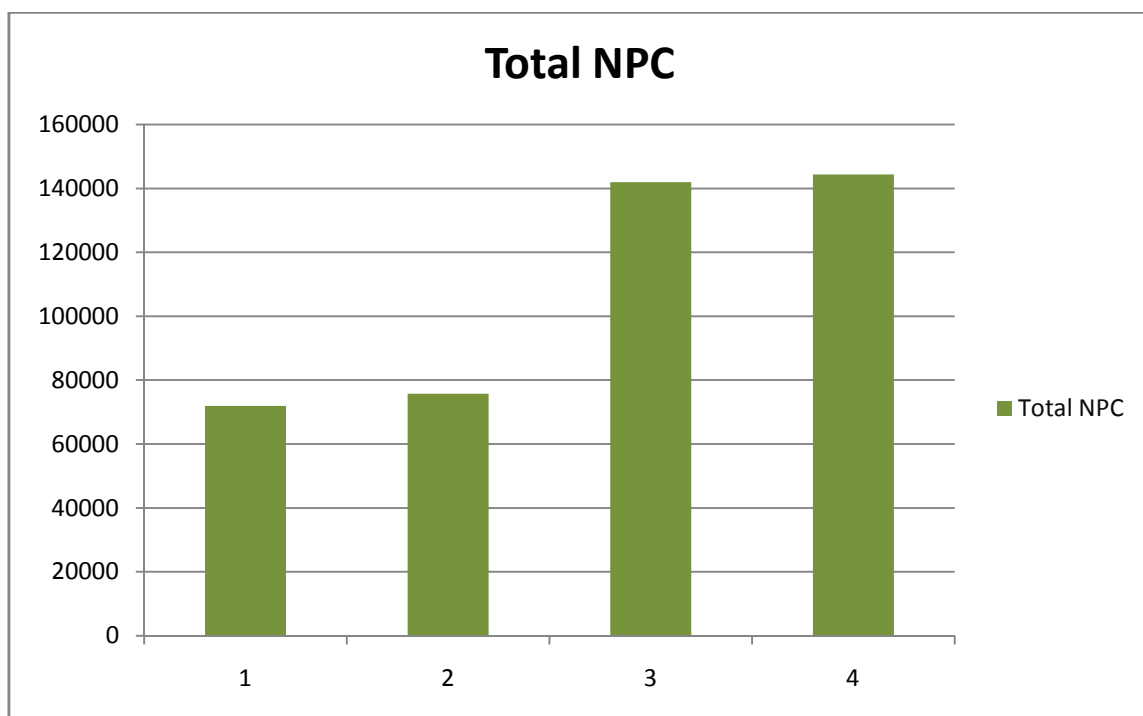


Figure IV.7 : comparaison le cout nette actuel total NPC

#### IV.6.3. Analyse environnementale

Le tableau (IV.6) Résume les émissions totales de polluants dans les quatre configurations examinées. À partir de ce tableau (IV.6), il est possible de réduire considérablement les émissions de polluants ou les éliminés complètement en diminuant l'utilisation du générateur diesel. Selon les résultats, les émissions de polluants peuvent être nulles si on n'utilise pas un

générateur diesel dans le système hybride, en particulier les émissions de CO<sub>2</sub> et de CO responsables des polluants atmosphériques et de l'environnement.

| Emission of air pollutants (kg/an) | Configuration 1 | Configuration 2 | Configuration3 | Configuration4 |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| Le dioxyde de carbone              | 600             | 0               | 16 876         | 7 974          |
| Monoxyde de carbone                | 1.48            | 0               | 41.7           | 19.7           |
| Hydrocarbures non brûlés           | 0.164           | 0               | 4.61           | 2.18           |
| Affaire particulaire               | 0.112           | 0               | 3.14           | 1.48           |
| Le dioxyde de soufre               | 1.2             | 0               | 33.9           | 16             |
| Oxydes d'azote                     | 13.2            | 0               | 372            | 176            |

Tableau (IV.6) : Emission de polluants atmosphériques

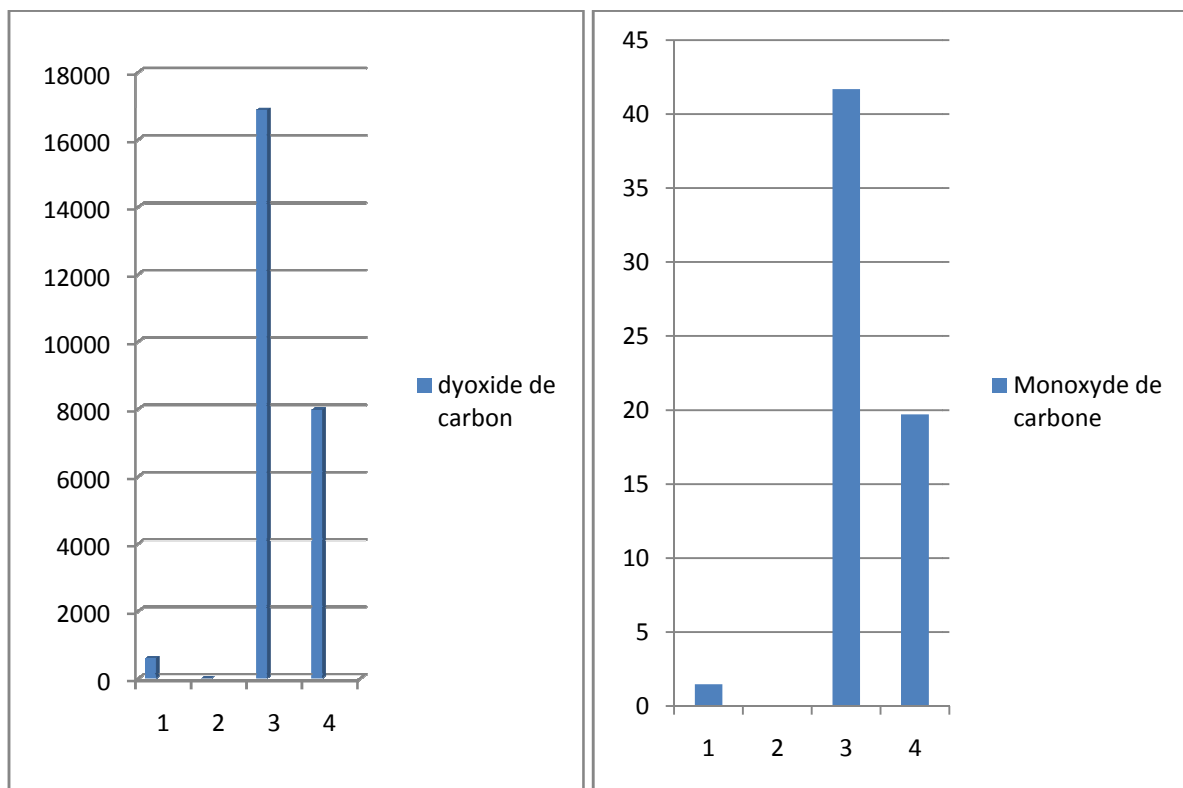


Figure IV.8 : Émission de polluants atmosphériques



### IV.7. Simulation et interprétation

La figure ci-dessus montre toutes les configurations du système faisables pour ce projet. Homer affiche le système le plus rentable par rapport au coût et l'efficacité basé sur son coût nette actuelle « NPC ». La Configuration PV /hydro / diesel/batteries/convertisseur est la plus rentable conception.

|  | PV<br>(kW) | Hydro<br>(kW) | Label<br>(kW) | H3000 | Conv.<br>(kW) | Initial<br>Capital | Operating<br>Cost (\$/yr) | Total<br>NPC | COE<br>(\$/kWh) | Ren.<br>Frac. | Diesel<br>(L) | Label<br>(hrs) | Batt. Lf.<br>(yr) |
|--|------------|---------------|---------------|-------|---------------|--------------------|---------------------------|--------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|
|  | 40         | 18.0          | 5             | 24    | 20            | \$52,167           | 1,550                     | \$71,983     | 0.076           | 0.99          | 228           | 274            | 14.3              |

Figure IV.9: Système optimal choisi par Homer

#### IV.7.1. Architecture du système optimal

- ✚ PV : 40 kW
- ✚ Hydro : 18 kw
- ✚ Générateur Diesel: 5 kW
- ✚ Batteries: Hoppecke 24 OPzS avec 3000 Ah chacune
- ✚ Convertiseur : 20 kw

### IV.8. Production et consommation d'énergie électrique

La production et la consommation d'énergie sur une année sont démontrées dans les deux tableaux qui suivent Tableau (IV.7) et Tableau (IV.8).

| Composant         | Production (kWh/ans) | Fraction |
|-------------------|----------------------|----------|
| Surface PV        | 63646                | 56       |
| Turbine hydro     | 49628                | 43       |
| Générateur Diesel | 1174                 | 1        |
| Total             | 114447               | 100      |

Tableau (IV.7): Energie annuelle produite

| Composant                           | consommation (kWh/ans) | Fraction |
|-------------------------------------|------------------------|----------|
| Charge AC                           | 73696                  | 100      |
| Total                               | 73696                  | 100      |
| Surplus d'électricité               | 33047                  | 28,9     |
| Charges électriques non satisfaites | 34.0                   | 0,0      |
| Manque de capacité                  | 63.7                   | 0,1      |

Tableau (IV.8): Energie annuelle consommée

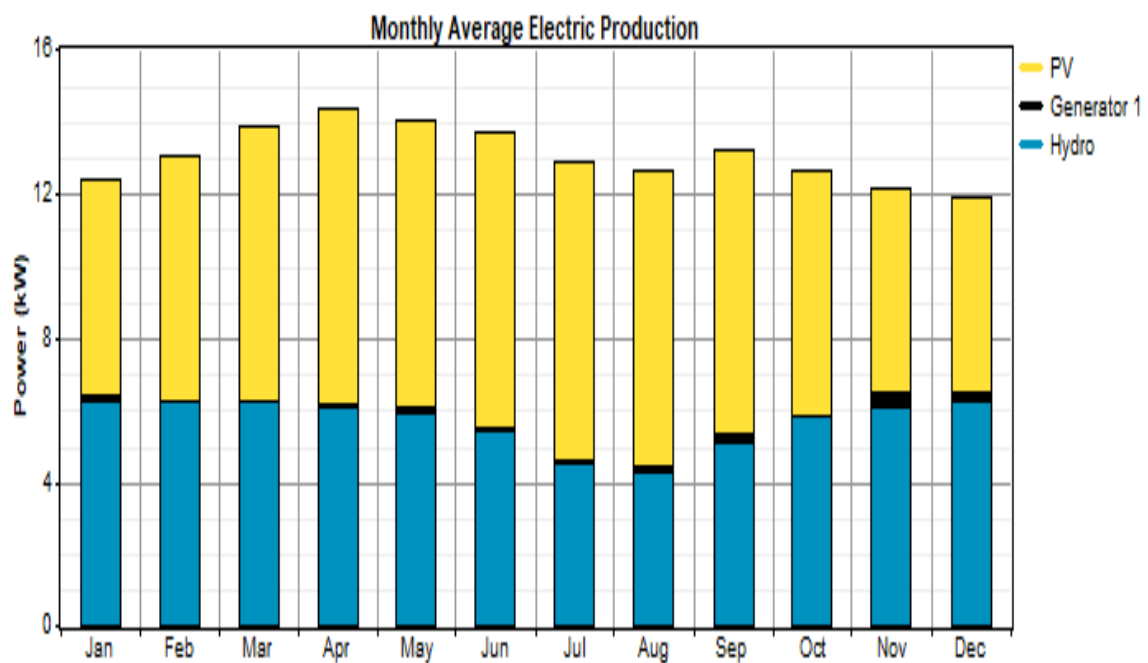


Figure IV.10: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source

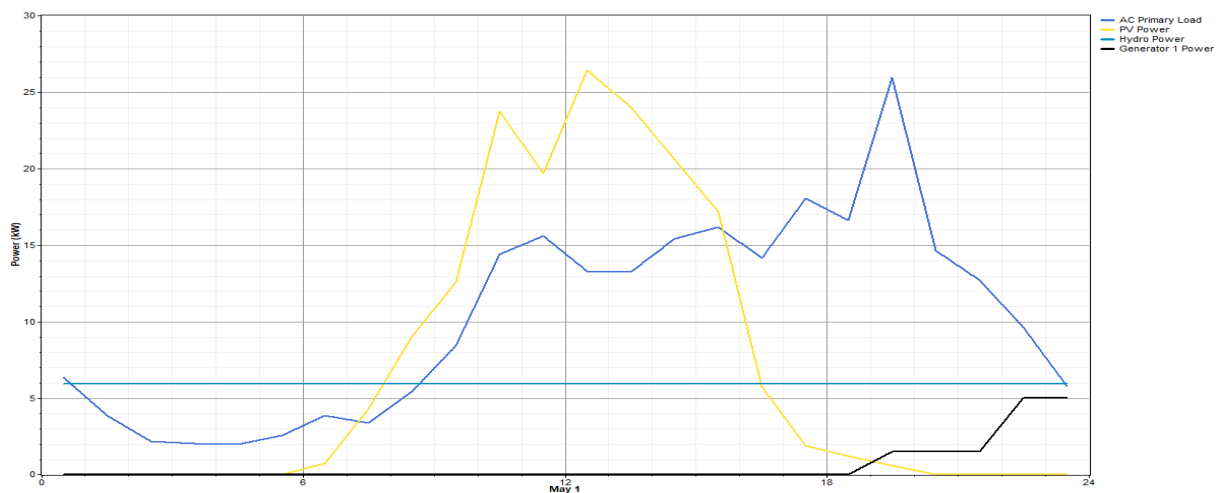


Figure IV.11 : Production d'énergie pendant une journée

## IV.9. Détails des composants du système optimal

### IV.9.1. Panneau photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques utilisés ici coûtent 850 \$ / kW. La plupart des panneaux photovoltaïques ont une durée de vie de 25 ans, bien qu'ils durent probablement plus long temps [52] [53].

| Variable   | Valeur | Unité  |
|--|--------|--------|
| Heures de fonctionnement   | 4386   | h/ans  |
| Facteur de capacité (l'état de charge moyenne du PV sur l'année) | 18.2   | %      |
| Puissance minimale   | 0      | kW     |
| Puissance moyenne  | 174    | KWh/j  |
| Puissance maximale   | 41.2   | kW     |
| Coût spécifique de l'énergie                                     | 0,0341 | \$/kWh |
| Pénétration PV   | 86.3   | %      |
| Heure de pénétration   | 4386   | h/ans  |

Tableau (IV.9) : Les paramètres du PV utilisé

Suite à l'analyse des résultats qu'on a eus pour les des puissances moyennes journalières du PV, on distingue que la période de fonctionnement du PV est plus élevée durant les mois d'été, (Juin, Juillet et Aout) et vice versa pendant l'hiver, ce qui nécessite le recours au générateurs.

### IV.9.2. Générateurs diesel

Le générateur diesel utilisé dans cette l'étude en tant que serveur de charge de base. Le capital initial de ce générateur est de 800\$, le coût de remplacement de 450 \$ et le coût d'exploitation et d'entretien de 0,050 \$ / h. La durée de vie de la génératrice est d'environ 25 000 heures et le taux de charge minimal est de 30%. La taille du groupe électrogène diesel est considérée comme comprise entre 0 kW et 40 kW par intervalles de 5 kW.

| Variable                            | Valeur | Unité          |
|-------------------------------------|--------|----------------|
| Heure de fonctionnement             | 274    | h/ans          |
| Nombre de démarrage                 | 34     | Démarrages/ans |
| Durée de vie                        | 91.2   | Ans            |
| Facteur de capacité                 | 2.68   | %              |
| Cout fixe du générateur             | 0.378  | \$/h           |
| Cout marginal du générateur         | 0.144  | \$/kWh         |
| Production électrique               | 1174   | KWh/ans        |
| Puissance moyenne                   | 4.28   | KW             |
| Puissance minimale                  | 1.50   | kW             |
| Puissance maximale                  | 5      | kW             |
| Carburant utilisé annuellement      | 228    | L/ans          |
| Utilisation spécifique du carburant | 0.194  | L/kWh          |
| Apport d'énergie de carburant       | 2241   | kWh/ans        |
| Efficacité électrique moyenne       | 52.4   | %              |

Tableau (IV.10) : Les paramètres du Générateurs diesel utilisé

### IV.9.3.Turbine Hydro

Une turbine hydraulique est une machine tournante qui produit une énergie mécanique à partir d'eau en mouvement destinées à produire de l'électricité à partir d'un flux d'eau. Les turbines utilisées dans cette étude coûtent 1500 \$. Sa puissance nominale est de 18kw.

La durée de vie est de 25 ans, bien qu'ils durent probablement plus longtemps.

| Variable  | Valeur | Unité |
|---|--------|-------|
| Heures de fonctionnement  | 8760   | h/ans |
| Facteur de capacité (l'état de charge moyenne du hydro sur l'année) | 31.4   | %     |
| Puissance minimale  | 4.26   | kW    |

|                              |         |         |
|------------------------------|---------|---------|
| <b>Production électrique</b> | 49628   | KWh/ans |
| <b>Puissance moyenne</b>     | 5.67    | KWh/j   |
| <b>Puissance maximale</b>    | 6.22    | kW      |
| <b>Coût nivelé</b>           | 0,00639 | \$/kWh  |
| <b>Pénétration hydro</b>     | 67.3    | %       |
| <b>Heure de pénétration</b>  | 8760    | h/ans   |

Tableau (IV.11) : Paramètres du Turbine Hydro utilisé

#### IV.9.4. Convertisseur

Pour générer suffisamment de puissance, des convertisseurs sont nécessaires. L'efficacité de conversion de l'inverseur et du redresseur est supposée être de 90% et la durée de vie du convertisseur de 15 ans. Le dimensionnement du convertisseur est considéré comme compris entre 0 kW et 70 kW à un intervalle de 5 kW, tandis que le rapport de conversion relatif du courant alternatif et du courant continu est de 100%.

| Quantité                   | Onduleur | Redresseur | Unités      |
|----------------------------|----------|------------|-------------|
| <b>Capacité</b>            | 20.0     | 20.0       | KW          |
| <b>Production moyenne</b>  | 3.8      | 1.0        | KW          |
| <b>Sortie minimum</b>      | 0.00     | 0.00       | KW          |
| <b>Sortie maximale</b>     | 20.0     | 9.0        | KW          |
| <b>Facteur de capacité</b> | 19.1     | 4.8        | %           |
| <b>Heures d'ouverture</b>  | 5226     | 3291       | Heures / an |
| <b>L'énergie dans</b>      | 37224    | 9 905      | KWh/an      |
| <b>Énergie sur</b>         | 33501    | 8419       | KWh/an      |
| <b>Pertes</b>              | 3723     | 1486       | KWh/an      |

Tableau (IV.12) : Les paramètres du convertisseur utilisé

#### IV.9.5. Batterie

Nous avons utilisé une batterie, la tension au bus continu est de 24V, d'après Homer l'autonomie de notre système de stockage pour l'alimentation du village est 22.6 heures la durée de vie pour cette batterie est 10ans.

| Quantité                     | Valeur | Unités   |
|------------------------------|--------|----------|
| <b>Batteries</b>             | 24     | batterie |
| <b>La tension de bus (V)</b> | 24     | V        |

|                                     |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|
| <b>Capacité nominale</b>            | 384    | KWh    |
| <b>Capacité nominale utilisable</b> | 101    | KWh    |
| <b>Autonomie</b>                    | 12.0   | Heure  |
| <b>Vie débit</b>                    | 244704 | KWh    |
| <b>Usure de la batterie coût</b>    | 0,026  | \$KWh  |
| <b>Coût de l'énergie moyenne</b>    | 0,004  | \$/KWh |
| <b>L'énergie dans</b>               | 18390  | KWh/an |
| <b>Énergie sur</b>                  | 15893  | KWh/an |
| <b>Épuisement de stockage</b>       | 70     | KWh/an |
| <b>Pertes</b>                       | 2427   | KWh/an |
| <b>Débit annuel</b>                 | 17138  | KWh/an |
| <b>Durée de vie prévue</b>          | 14.3   | An     |

Tableau (IV.13) : Détails du système de batterie dans le système hybride (PV/hydro/Batterie)

#### IV.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude relative à la simulation et à l'optimisation d'un système hybride (PV/diesel/Hydro) par logiciel HOMER et nous avons conclu que le choix idéal système hybride micro (hydro/solaire) puisque ce dernier est le moins coûteux et polluant.

## *Conclusion Générale*

La ressource globale en énergie hydraulique et photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

La production d'électricité par le système hybride micro (hydro/solaire). En Algérie, la nature du terrain et la durée de l'ensoleillement lui a permis d'être un des pays modèle dans la production d'énergies renouvelables.





Le travail présenté dans ce mémoire a concerné l'étude de l'application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque et de l'énergie hydraulique en hybride.

A cet effet, La modélisation et la simulation numérique des deux chaînes de conversion d'électricité ont été effectuées en utilisant le logiciel Homer, qui a un langage interactif, permettant la prédiction des tâches système d'une manière rapide et précise.

La région en question possède un potentiel en énergie très important. La concrétisation de la configuration choisie à travers une étude de cas pour un site isolé à Ouizert la wilaya du mascara, permet l'implémentation et la validation d'applications spécifiques tenant compte des spécificités du site.

En suite, les résultats de simulation et d'optimisation que nous avons obtenue montrent que le combinez des panneaux solaires hydrauliques, vous obtenez de bons résultats.

On peut dire qu'avec une installation hybride et une bonne stratégie de contrôle on peut atteindre des objectifs principaux qui sont :

-  Minimiser la consommation en combustible fossile.
-  Protéger les composants du système donc prolonger leurs durée de vie.
-  Réduire les émissions de tous les gaz.
-  Alimenter les charges électriques sans interruption.

Enfin, ce travail nous a permis de déterminer l'architecture optimale d'un système hybride (PV/hydro) en donnant à l'utilisateur les éléments nécessaires pour décider de l'approche qui conduit au meilleur compromis entre coûts et besoins.

### *Bibliographie*

- [1] **S. BELAKEHAL**, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE 2010.
- [2] **Kernif Hakim, Mebarki Amel**, "Contribution à l'amélioration des performances d'un système d'énergie hybride (éolien photovoltaïque)", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2016/2017.
- [3] **Mekki Mounira**, Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, thèse de doctorat, Algérie, 2014, page 15.
- [5] **Bounaceur Amin**, "Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie", Mémoire de Master, Université kasdi-merbah Ouargla, 2014-2015.
- [6] **Belabbas Arezki, Cherif Aghiles**, "Dimensionnement d'une Centrale Photovoltaïque Autonome de 16 kW", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 29 /09/ 2016.
- [8] **I. Vechiu**, « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Université du Havre, le 15 /12/2005.
- [9] **BONAL Jean.ROSSETTI Pierre** : Energies alternatives. Edition omniscience, France 2007.
- [10] **Bernard Thonon**, Question de physique autour de l'énergie solaire, page 8,23.
- [9] **Alain Damien**, Livre, la biomasse Energie, Paris, 2008, page 5, 181, 184.
- [7] **Ferrah Billel**, " Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien)", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014/2015.
- [11] **Anne Labouret**, Michel Violez, préface de Jean-Louis Bal, énergie solaire photovoltaïque, Livre, France, 2009, page 7,8.
- [8] **Allaoua Ferhat, Albane Amirouche**, " Etude et implémentation contrôle d'une stratégie de d'un système hybride (Photovoltaïque Diesel)", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2011/2012.
- [12] **Mekki Mounira**, Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, thèse de doctorat, Algérie, 2014, page 15.



- [13] **A. A. Williams** and **R. Simpson**, "Pico hydro – Reducing technical risks for rural electrification," *Renew. Energy*, vol. 34, pp. 1986–1991, 2009 [Online].
- [14] **A. Beluco**, **P. Kroeff**, **D. Souza**, and **A. Krenzinger**, "A method to evaluate the effect of complementarity in time between hydro and solar energy on the performance of hybrid hydro PV generating plants," *Renew. Energy*, vol. 45, pp. 24–30, 2012 [Online].
- [15] **Kara Abdelfattah**, "Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie", Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas–Setif1, 24/06/2014.
- [16] **Hassad Mohamed Amine**, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, Université Sétif 1, 2012.
- [14] **Hassini Née, Belghitri Houda**, "Modélisation, Simulation et optimisation d'un système hybride éolien-Photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [17] **S Bahramara**, **M Parsa Moghaddam**, **M R Haghifam**. Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER A review. *elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, (62), 609–620.
- [18] **J F Manwell**, **A Rogers**, **G Hayman**, **C T Avelar** et **J G McGowan**, "Hybrid2- A hybrid system simulation model," Theory manual, NREL Subcontract XL-11126-1-1, University of Massachusetts, 1998.
- [19] **Baghdadi Fazia**, "Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou, 26 /09 /2011.
- [21] **Benchiha Abdessamed**, **Elhacen Ould Abdallahie**, "Evaluation de la fiabilité d'un système de production hybride (éolienne- solaire)", Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2012/2013.
- [22] **Ludmil Stoyanov**, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Thèse de Doctorat, Université technique de Sofia, 28 octobre 2011.
- [30] **M. KARA Abdelfattah** : Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie, Mémoire de Master, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1, Faculté de Technologie Département.

## Bibliographie

---

- [35] **Tammam Basbous**, " Etude de faisabilité d'un jumelage éolien — diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé", Mémoire de Recherche, Université Du Québec à Rimouski, Février 2009.
- [38] **S. BREBAN**, "Etude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable," Thèse, 'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France, 2008.
- [39] **M. NASSER**, "Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés," Thèse, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France, 2011.
- [40] Site of United Nations IndustrialDevelopmentOrganization (UNIDO) and International Center on Small Hydro Power (ICSHP), "World Small HydropowerDevelopment Report 2013," Report, 2013.
- [41] Site des Ressources naturelles Canada, "Microsystèmes hydroélectriques : Guide de l'acheteur," Canada, 2004.
- [42] Programme d'Action Energies Renouvelable (PACER), "Petites centrales hydrauliques: Turbines hydrauliques," Report, Suisse, 1995.
- [50] **Sonelgaz Dalil**. Direction de la Comptabilité et du Contronle de Gestion. Electricity and Gas National Enterprise, Alger, Algérie, 2007.
- [51] Centre de la technologie de l'énergie de CANMET. Ressources naturelles Canada RETScreenInternational . Modèle RETScreen pour projets de petite centrale hydroélectrique, Canada, 2004, 30-123.
- [52] **T Lambert, P Gilman, P Lilienthal**. The Micropower System Modeling with HOMER. HOMER Energy, USA, 2011, 4-24.
- [53] **SayedusSalehin, M TanvirulFerdaous**, Ridhwan M Chowdhury, SumaiaShahidShithi, M S R BhuiyanRofi, MahirAsif Mohammed. Assessment of renewableenergysystemscombininingtechno-economicoptimizationwithenergy scenario analysis. Elsevier Energy, 2016, (112), 729-741.
- [43] **J. S. Anagnostopoulos and D. E. Papantonis**, "Optimal sizing of a run-of-river smallhydropower plant," Energy Convers. Manag., vol. 48, no. 10, pp. 2663–2670, 2007.

- [44] **A. Ammar**, “Modélisation et optimisation d’un générateur synchrone à double excitation de forte puissance,” Thèse, Ecole Centrale de Lille, 2013.
- [60] **B. LAPORTE**, *Machines électriques tournantes: Conception, dimensionnement*, Ellipses. 2007.
- [61] **I. BOLDEA**, *Synchronous generators*, Second Edi. 2016.
- [65] **Y. Amara**, “Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation. Application au véhicule hybride,” Thèse, Université Paris XI, 2001.
- [66] **P. PETIT**, “Optimisation du transfert d’énergie dans les systèmes photovoltaïques,” Thèse, Université de Metz, 2011.
- [67] **A. V. Anayochukwu**, “Optimal control of PV/wind/hydro-diesel hybrid power generation system for off-grid micro base transmitter station site,” *Electron. J. Energy Environ.*, vol. 1, no. 2, pp. 37–55, 2013.
- [68] Singal S. K., Saini R. P, and Raghuvanshi C. S, “Cost Optimisation Based on ElectroMechanical Equipment of Canal Based Low Head Small Hydropower Scheme,” *Open Renew. Energy J.*, vol. 1, pp. 26–35, 2008.
- [69] Site of World Bank International Energy Agency (IEA), “Electricity generation by region 1974-2016,” 2017 [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/electricity/>.
- [70] **G. Bekele** and **G. Tadesse**, “Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia,” *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 5–15, 2012.
- [71] **A. Eddahech**, “Modélisation du vieillissement et détermination de l’état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride,” Thèse, Université Sciences et Technologies- Bordeaux I, 2013.