

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LARECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

*Mémoire de fin d'études*

*En vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechnique*

*Option : Energie renouvelable*

# Thème

**Sur la maîtrise de l'insertion des  
ressources renouvelables aux réseaux  
électriques**

**Réalise par :**

*M<sup>r</sup> : HOCINI Nassim.*

*M<sup>r</sup> : TAZAMOUCHEE Elyazid.*

**Encadre par :**

*M<sup>r</sup> : MEDJOUDEJ Rabah.*

**Promotion 2015/2016**

# Remerciements

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.*

*Nous tenons à témoigner notre gratitude et reconnaissance à notre encadreur Mr MEDJOUJ Rabah de nous avoir accompagné tout le long de ce mémoire, pour la confiance qu'il nous a transmis et d'avoir mis à notre disposition tout son savoir faire et ses qualités intellectuelles, professionnelles et humaines.*

*Nos vifs remerciements vont aux membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail et d'avoir contribué à son aboutissement.*

*Un grand merci à nos familles et à tous nos amis (es) qui nous ont soutenu, aidé et encouragé tout le long de notre parcours.*

*Nassim et Yazid.*

## DÉDICACES

*Tout d`abord, je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui grâce à leurs sacrifices, leur soutien inébranlable et leurs encouragements que j`ai pu accomplir mon parcours.*

*À mes adorables frères Sofiane et Yacine.*

*À mon binôme Yazid et sa famille.*

*À tous mes amis (es) que je ne peux énumérer.*

*Nassim*

## DÉDICACES

Avant tout, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les Protège pour leurs soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont  
endurés.

A mon frère Hocine

A mes sœurs

A mon binôme Nassim

Et mes chers ami(es)

A tous ce que j'aime

A tous mes collègues d'études on Energie renouvelable et automatisme industrielle.

*El yazid*

# SOMMAIRE

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les différentes ressources du renouvelables.....	4
I.2.1 L'énergie hydroélectrique.....	4
I.2.2 L'énergie solaire (photovoltaïques).....	6
I.2.3 Les éoliennes.....	7
I.2.4 La biomasse.....	8
I.2.5 L'énergie des mers ou énergie marine .....	9
I.3 Etat actuel de la production énergétique à travers le monde.....	9
I.4 Aspiration des peuples et pays .....	11
I.5 Etat de l'art sur l'impact de l'insertion des ressources du renouvelable au réseau.....	11
I.5.1 La production d'électricité décentralisée .....	12
I.5.2 Le réseau électrique et son rôle .....	13
I.5.2.1. Les réseaux de transport .....	13
I.5.2.2 Les réseaux de répartitions .....	14
I.5.2.3 Les réseaux de distribution .....	14
I.5.2.4 Vers un réseau intelligent (Smart Grid).....	14
I.6 Conclusion .....	16

## **Chapitre II : Caractéristiques des différentes ressources du renouvelable**

II.1 Introduction.....	17
II.2 Caractéristiques du système photovoltaïque .....	17
II.2.1 Le rayonnement solaire .....	17
II.2.2 L'effet photovoltaïque .....	18
II.2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	18
II.2.4 Type de cellules photovoltaïques .....	19
II.2.5 Les paramètre des cellules photovoltaïques .....	20
II.2.5.1 Influence de l'éclairement.....	23
II.2.5.2 Influence de la température .....	23
II.2.6 Le module photovoltaïque.....	24
II.2.6.1 Association des cellules photovoltaïques .....	24
II.2.6.2. Protection d'un module photovoltaïque .....	24
II.2.7 Différents types de systèmes photovoltaïques .....	25
II.3 Les caractéristiques du système éolien.....	28
II.3.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	28

## SOMMAIRE

---

II.3.2 Les différents types d'éoliennes .....	29
II.3.2.1 Les éoliennes à axe vertical .....	29
II.3.2.2 Les éoliennes à axe horizontal .....	30
II.3.3 Constitution d'une éolienne à axe horizontal .....	30
II.3.4 Les éoliennes connectées au réseau électrique .....	33
II.3.4.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	33
II.3.4.2 Les éoliennes à vitesse variable .....	34
II.3.5 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome .....	34
II.4 Caractéristiques de l'énergie hydroélectrique.....	35
II.4.1 Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques .....	35
II.4.2 Les différents types de barrages.....	35
II.4.3 Les turbines.....	36
II.4.3.1 Les turbines à action.....	36
II.4.3.2 Les turbines à réaction .....	37
II.5 Conclusion .....	38

### Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

III.1 Introduction.....	39
III.2 Avantages et inconvénients des ressources renouvelables.....	39
III.2.1 l'énergie photovoltaïque.....	39
III.2.2 Energie éolienne .....	40
III.2.3 Energie hydroélectrique .....	41
III.3 Capacité d'accueil du réseau.....	42
III.3.1 Courants en régime permanent .....	42
III.3.2 Le profil de tension .....	43
III.4 La gestion de l'équilibre et le maintien de la tension et de la fréquence.....	43
III.5 Problèmes de dégradation de la qualité de l'énergie électrique.....	43
III.5.1 Creux de tension et coupures brèves .....	43
III.5.2 Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements industriels.....	44
III.5.3 Surtensions .....	45
III.5.4 Variations de tension .....	46
III.6 Les Flicker .....	46
III.7 Variation de la fréquence .....	47
III.8 Déséquilibre.....	47
III.9 Harmoniques et inter- harmoniques.....	48
III.9.1 Origines des harmoniques .....	49
III.9.2 Effets des perturbations harmonique .....	49
III.10 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution .....	50
III.10.1 Influence sur le plan de tension.....	50
III.10.2 Influence sur la qualité de l'énergie .....	51

## SOMMAIRE

---

III.11 Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques .....	51
III.11.1 Régime de neutre et courants de fuite.....	51
III.11.2 Creux de tension et tenue des systèmes.....	52
III.11.3 Présence de composante continue et d'harmoniques de tension.....	52
III.12 Hacheur survolteur (Boost) .....	52
III.13 Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC.....	54
III.14 L'onduleur .....	55
III.14.1 Principe de fonctionnement .....	56
III.14.2 Commande MLI.....	56
III.15 Conclusion .....	58

### **Chapitre IV : Etude de cas, simulation et résultat**

IV.1 Introduction .....	59
IV.2 Motivations particulières .....	59
IV.2.1 Appartement individuel dans une résidence .....	59
IV.2.2 Promotions immobilières en général .....	59
IV.2.3 Consommation de la charge.....	60
IV.3 Modélisation du réseau avant l'insertion de Gpv.....	60
IV.4 Modélisation de la source Gpv a inséré.....	63
IV.5 Le gestionnaire du réseau .....	66
IV.6 Résultats de la simulation .....	67
IV.7 Conclusion .....	73
Conclusion générale .....	74

## Introduction générale

Au jour d'aujourd'hui, la tendance est de développer des réseaux intelligents dans tous les domaines de la vie ou de l'activité humaine (énergie, eau, télécommunication et habitat). Plusieurs chercheurs ont lancé des investigations dans ce sens, où deux orientations se dégagent :

1<sup>ère</sup> orientation : développement des systèmes intelligents en y intégrant des technologies d'information et de communication (TIC) pour s'assurer de la continuité de service et de la sécurité de l'alimentation en énergie. Cette définition est soutenue par les pays dont les réseaux sont très grands et ayant une grande étendue tels que : les USA, la Chine et l'Inde. C'est aussi ceux qui sont souvent touchés par le phénomène des blackouts. Cette affirmation ne contredit surtout pas le regard positif de ces pays vers le développement durable, car on note que les USA sont ceux qui ont déjà fait le grand pas dans le développement des ressources propres.

2<sup>ème</sup> orientation : développer ces systèmes pour assurer un développement durable. Cette définition est beaucoup plus apparentée chez les européens, où une Task Force a été créée pour soutenir et évaluer des projets gigantesques européens dans le développement des énergies propres. Notons aussi l'orientation assez évidente de ces pays vers le développement des véhicules électriques, nécessitant plus que jamais la décentralisation des systèmes de productions. C'est dans la deuxième orientation que s'inscrit notre problématique, car elle prend en charge les mécanismes et impacts de l'intégration des ressources du renouvelable aux réseaux électriques. Certes le développement durable a ses principaux piliers basés sur les indicateurs sociétaux, environnementaux et économiques mais nous allons nous limiter à l'électricité durable. Il s'agit de mettre en exergue l'état actuel de la production en énergie, les aspirations des peuples et des décideurs dans les deux décennies suivantes (prochaines) et de développer les bénéfices, les opportunités, les coûts et les risques (BOCR) de cette entreprise. Par rapport au travail développé dans ce mémoire portant sur la maîtrise de l'insertion des ressources du renouvelable aux réseaux, nous l'avons subdivisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est dédié aux développements des différentes ressources du renouvelables et à la problématique de leur insertion aux réseaux. Afin de mieux analyser l'impact, nous avons jugé utile de développer les caractéristiques des sources renouvelables et un intérêt particulier a été accordé au solaire, à l'éolien et à l'hydraulique. Cette partie du travail a été développée dans le chapitre II. Notons que ces trois sources ont été distinguées avec un regard particulier suite à leur disponibilité en Algérie.

En partant du principe que la pertinence de la chose est beaucoup plus dans la position du problème que dans l'obtention de la solution, nous avons tenté de bien situer les problèmes, de les cerner et de situer l'intérêt de chacun des composants et les retombées



de son intégration sur le comportement du réseau, ce paradoxe a été mis en évidence dans le chapitre III.

Quant au chapitre VI, il a fait l'objet de simulation sous Matlab de l'insertion de sources renouvelables aux réseaux. Il s'agit tout d'abord de maîtriser l'outil informatique, les paramètres du réseau et surtout de pouvoir schématiser les liaisons entre composants et de se familiariser avec les principes d'attribution de données de bases et des consignes et d'interpréter les résultats obtenus.

# Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

## I.1 Introduction

Lors de cette dernière décennie, l'attention des scientifiques s'est de plus en plus tournée vers des préoccupations plus grandes pour l'avenir de l'humanité: la demande en énergie à tendance à croître constamment (fig.1.1) et en même temps l'utilisation des carburants fossiles contribue à la pollution globale et aux changements climatiques.

Néanmoins, les ressources de la planète sont limitées. L'optimisation et l'augmentation de l'efficacité énergétique sont des mesures qui peuvent contribuer à assurer un développement durable

La répartition de la consommation finale d'énergie par secteur dans le monde est représentée dans la figure (1.2) Une analyse statistique montre que les plus grands consommateurs sont le secteur des transports, le secteur résidentiel et l'industrie. Aussi, une grande partie de l'énergie est consommée sous la forme d'énergie électrique.

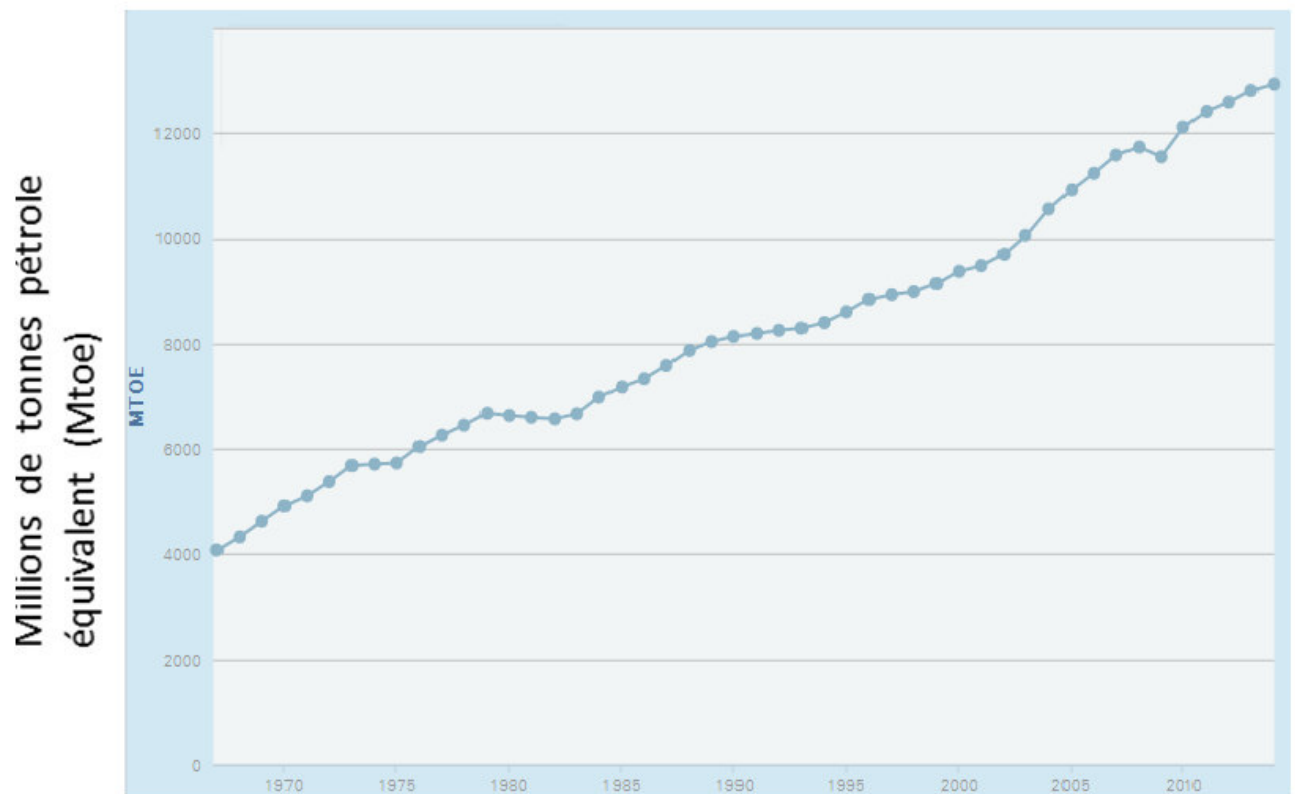


Fig I.1 : Consommation d'énergie dans le monde, 2014 [1]

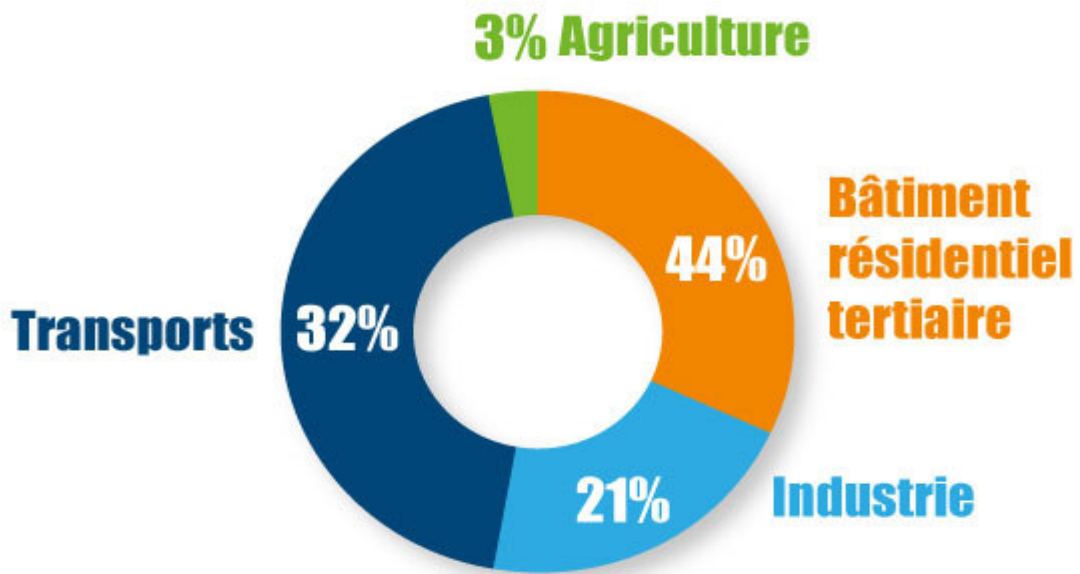


Fig 1.2 : Répartition de la consommation d'énergie par secteur (2014) [2]

## I.2 Les différentes ressources du renouvelables

Les ressources du renouvelable sont diverses, à savoir :

### I.2.1 L'énergie hydroélectrique

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques (fig. 1.3).

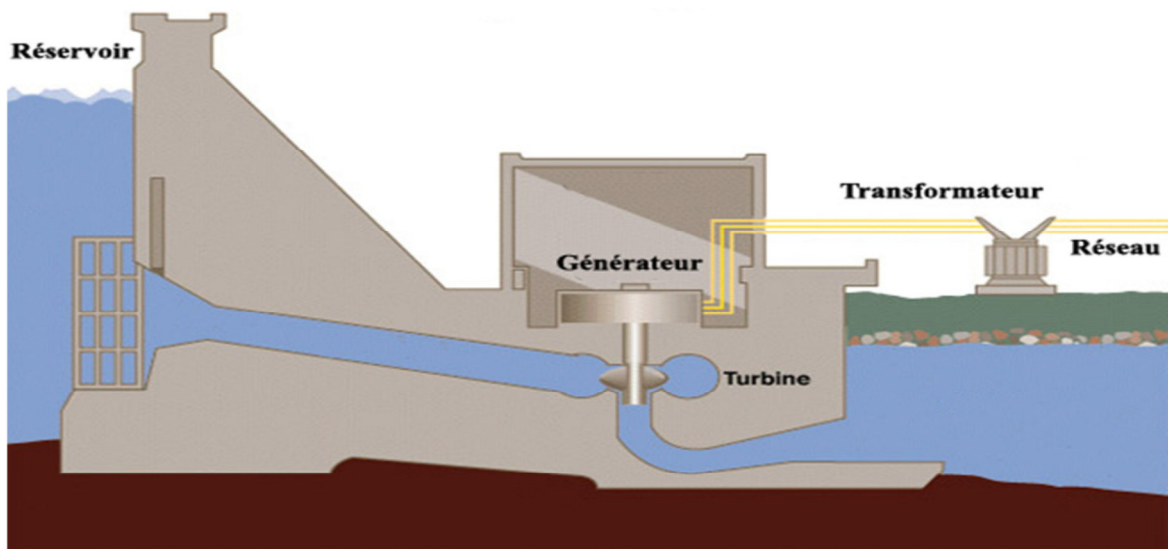


Fig 1.3 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [4]

## Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

---

La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques:

- **Les centrales dites gravitaires** pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation,
- **Les Stations de Transfert d'Energie par Pompage (S.T.E.P.)** aussi connues sous l'appellation centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrale de pompage turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles sont souvent utilisées comme une forme de stockage : pompage durant le creux de la demande à partir d'électricité produite par des équipements de base (nucléaire) et production d'électricité par turbinage durant la pointe, plus coûteuse, des équipements de pointe.
- **Les usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (dites aussi hydroliennes) ou du mouvement des vagues.

Les centrales gravitaires et celles de transfert d'énergie par pompage peuvent aussi être classées en trois types selon la hauteur de la chute de l'eau :

- chute haute (> 200 m),
- chute moyenne (entre 50 et 200 m),
- chute basse (< 50 m).

Malgré des coûts de réalisation généralement élevés, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour fonctionner longtemps et l'énergie de l'eau est gratuite et renouvelable si elle est bien gérée. Donc le bilan est plutôt positif, et les centrales hydrauliques sont parmi les systèmes de production d'électricité les plus rentables.

Les impacts environnementaux varient avec le type et la taille de la structure mise en place : ils sont faibles s'il s'agit des barrages de taille modérée, des courants marins, des vagues, mais ils peuvent devenir importants s'il s'agit de créer des grands barrages. Dans ce dernier cas, la critique est généralement sur la disparition de terres agricoles et de villages, ainsi que la perturbation du déplacement de la faune (pas seulement aquatique) et globalement de l'écosystème environnant [5].

En Algérie, on peut citer le cas de la centrale hydroélectrique de Darguina qui au jour d'aujourd'hui produit 71.5 MW. L'orientation de la société vers cette énergie contribuera à sa remise à niveau et à son développement en construisant d'autres centrales dans le pays.

# Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

## I.2.2 L'énergie solaire (photovoltaïques)

Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques (PV) s'appelle l'effet photoélectrique. Ces cellules produisent du courant continu à partir de l'irradiation solaire. La majorité des installations PV sont connectées aux réseaux de distribution (basse tension).

Il existe aussi des grands parcs PV, jusqu'à quelques dizaines ou centaines de MW, connectées au réseau de transmission [6].

L'énergie du rayonnement solaire peut être aussi convertie en chaleur ou indirectement en électricité par la production de vapeur qui entraîne un générateur électrique. Dans ce cas, on parle de solaire thermique. Deux principes de base sont utilisés pour faire cela :

- Capter l'énergie des rayons solaires grâce à un corps noir,
- Concentrer le rayonnement solaire dans un point : four solaire, miroirs paraboliques, concentrateurs.

Cependant, aujourd'hui la forme de conversion de l'énergie solaire en électricité la plus fréquente reste le photovoltaïque. L'évolution de la puissance PV installée dans le monde est présentée sur la fig. 1.4, aujourd'hui elle dépasse 139 GW. L'Europe tient la partie majeure de la puissance installée mondialement.

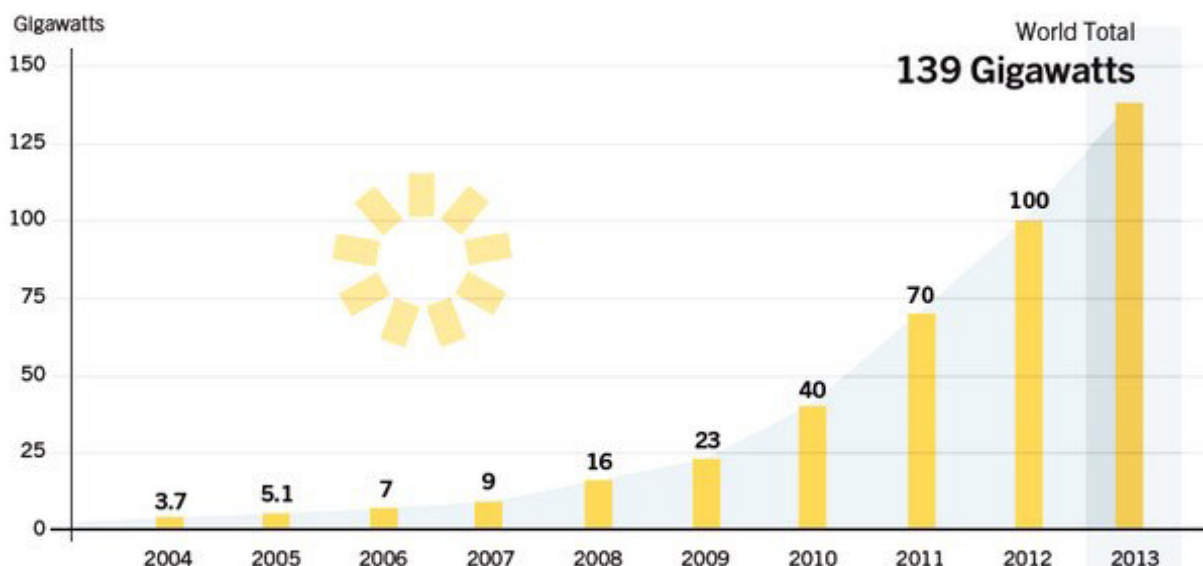


Fig 1.4 : Puissance PV installée dans le monde jusqu'en 2013 [7]

# Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

---

Les systèmes PV peuvent être classés en deux catégories [8] :

- les systèmes autonomes, isolés du réseau,
- les systèmes raccordés au réseau.

En Algérie, cette énergie est à son stade infantile mais l'état a misé sur elle dans son programme ambitieux et sa stratégie énergétique en voie pour le développement durable (2015-2030), de plus que son gisement solaire est vraiment favorable à l'exploitation de cette énergie surtout au sud du pays où seront implantés la majorité de ses projets.

En 2014, Condor (firme investissant dans le domaine des technologies nouvelles) a mis sur le marché des panneaux photovoltaïques mono et poly-cristallin, pour une gamme de produits allant de 70 W à 320 W.

## 1.2.3 Les éoliennes

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre « onshore » ou dans la mer « offshore ». Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le « offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit [9]. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts avec les troupeaux sur les oiseaux.

Les petites éoliennes peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal :



**Eolienne à axe horizontal**



**Eolienne à axe verticale**

## Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

La puissance éolienne installée dans le monde est actuellement près de 318 GW (Fig. 1.5) [7]. L'éolien peut jouer un grand rôle dans la résolution des problèmes énergétiques de l'humanité, mais le plus grand problème de l'exploitation des éoliennes reste le caractère non-constant de l'énergie produite par ces générateurs [10].



Fig 1.5 : Puissance éolienne installée dans le monde jusqu'à 2013 [7]

L'Algérie dispose d'une ferme éolienne à Adrar avec une capacité 10MW qui a été mise en service en juillet 2014, d'autres projets programmés qui seront concrétisés à l'avenir.

### 1.2.4 La biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux [11]. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autre, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro [11].

# Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

---

## I.2.5 L'énergie des mers ou énergie marine

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'au jour d'aujourd'hui. Elle désigne l'énergie produite par les vagues, par les courants et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil qui travaille sur le gradient thermique entre les couches d'eau de surface et celle des profondeurs. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable [12].

## I.3 Etat actuel de la production énergétique à travers le monde

La dominance actuelle des productions fossiles et nucléaires est apparente et évidente, pour les énergies fossiles sont à base de pétrole, gaz et charbon. Cela reste une évidence pour les producteurs ou pour ceux qui ont la facilité de les importer. A l'instar des USA, Russie, l'Inde. On distinguera :

- **La France**

Le cas de la France est frappant car environ 80% de la production énergétique est produite par des centrales nucléaires, elle compte 19 centrales, avec un total de 58 réacteurs nucléaires en se classant au deuxième rang mondial, derrière les Etats-Unis en termes d'énergie nucléaire. Certaines de ces centrales de production actuellement en exploitation ont un avenir incertain en raison de l'accident nucléaire au Japon qui a mis en exergue les dangers imminents de ce type d'installation. En revanche elle gagne du terrain dans l'exploitation des énergies renouvelables qui présente 14% de sa production énergétique, on site l'hydraulique est la deuxième source de sa production d'électricité après le nucléaire ainsi elle exploite l'énergie éolienne, solaire, des marres et la biomasse, mais elle est loin de ses objectifs tracés.

- **Les Etats Unis d'Amérique**

Les États-Unis, deuxième consommateur mondial d'énergie après la Chine, occupent une place centrale sur la scène énergétique. La politique énergétique du pays fait l'objet d'une attention particulière, notamment de l'Union européenne, compte tenu de l'impact global qu'elle peut avoir sur les marchés et leurs équilibres. Les États-Unis ont une prédominance des combustibles fossiles dont la part dans la production d'électricité atteint 67,2 % en 2014 (38,7 % pour le charbon et 27,7 % pour le gaz naturel) en exploitant les gaz de schiste. Ils se placent au 1<sup>er</sup> rang mondiale possédant le premier parc nucléaire au monde, grâce à ses 62 centrales nucléaires, pour un total de 99 réacteurs en opération qui fournissent une puissance cumulée de 98,7 GW de quoi couvrir 19,5% de ses besoins en électricité. Ils sont aussi l'un des principaux pays



## Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

---

producteurs d'électricité renouvelable, ils affichent des taux de croissance élevés en matière de puissance installée mais ses sources demeurent en retrait avec 13,2 % de la production (hydroélectricité : 6,3 %, éolien : 4,4 %, solaire : 0.4% etc.)

- **Les pays émergents :** Dans ce qui suit, on citera les cas de la chine et du Brésil

- **La Chine :**

La Chine est le premier consommateur mondial d'énergie, le charbon occupe la place centrale dans son mix énergétique dont 73,8 % de sa production ; en 2<sup>e</sup> position vient, la biomasse (bois, biocarburants, déchets, etc.) : 8,4 %, en 3<sup>e</sup> position le pétrole : 8,2 %, puis le gaz naturel : 3,9 % et l'hydroélectricité : 3,0 % ; la part du nucléaire n'était que de 1,1 % et celle des autres énergies renouvelables (éolien, solaire, énergies marines) de 1,4 %. La production d'énergie primaire de la Chine représentait 18,9 % du total mondial en 2013. Elle investit lourdement dans la production d'énergies renouvelables : elle était dès 2012 le leader mondial de la production d'électricité d'origine renouvelable.

- **Le Brésil :**

Le profil énergétique du Brésil, interpelle dans 3 domaines principaux : ses immenses réserves de pétrole dans des champs pré-salifères (gisements offshore très profonds situés sous une épaisse couche de sel), sa production de bioéthanol (biocarburant) dont il a été pionnier, et son important parc hydroélectrique qui couvre 70% de sa production totale d'électricité.

Actuellement, il construit la plus grande ligne de transport d'électricité au monde (2500Km) qui acheminera l'électricité produite par deux nouvelles centrales hydroélectriques.

- **Les pays en voie de développement :**

- **L'Algérie :**

Un pays producteur du pétrole, gaz et avec un gisement solaire et éolien important, sa principale source de production d'énergie électrique sont les centrales thermiques à base de gaz naturel et du pétrole avec 98% de sa production totale, et l'hydroélectricité avec 1.8% de sa production. Le gouvernement algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011, avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national. Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 :

- 13 575 MW<sub>c</sub> de solaire photovoltaïque,
- 5 010 MW d'éolien,
- 2 000 MW de solaire thermodynamique(CSP),
- 1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets),
- 400 MW de cogénération,

## Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

---

-15 MW de géothermie

A-propos du nucléaire, selon certaines sources, l'Algérie dispose d'une réserve de 26 000 tonnes d'uranium et compte se doter d'une centrale nucléaire tous les cinq ans après sa première centrale dont l'acquisition est prévue probablement en 2020.

Saura-t-elle faire le grand pas vers les énergies renouvelables ?

### I.4 Aspiration des peuples et pays

Les catastrophes humaines engendrées par le nucléaire (Fukushima), les catastrophes naturelles engendrées par la dérégulation climatique (Tsunami, tremblement de terre, élévation de la température, la fonte des glaciers) a fait sonner l'alerte et la communauté internationale essaye de s'organiser a l'exemple de l'organisation de la COP21 à Paris (France) en déc. 2015

Des aspirations ont été exprimées à savoir :

- L'Allemagne cible une fermeture de ses centrales nucléaires d'ici à l'horizon 2025 [13].
- La France s'engage pour un objectif de 32% des énergies renouvelables en 2030 [14].
- les 28 Etats de l'Union européenne se sont engagés à réduire de 40 % ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030 par rapport à 1990.
- Les États-Unis s'y sont engagés à réduire leurs rejets de gaz à effet de serre de 28% d'ici à 2025 (par rapport à 2005) [15].
- La Chine veut atteindre la part de 36% de l'énergie renouvelable dans l'économie mondiale d'ici 2030 [16].
- L'Algérie mise sur un programme qui doit permettre de produire 37 % de son électricité à partir des énergies renouvelables d'ici à 2030 [17].

### I.5 Etat de l'art sur l'impact de l'insertion des ressources du renouvelable au réseau

Plusieurs recherches ont été entrainées ces dernières années sur la gestion de l'énergie électrique qui nous a amené à nous pencher sur l'impact de l'intégration des éoliens et des photovoltaïques sur l'ordre de la production et de la consommation. Dans la référence [18] les auteurs ont pris en charge l'impact du photovoltaïque dans la production globale de l'énergie électrique, ainsi une étude économique pour la configuration optimale du système hybride. D'autres chercheurs [19] se sont intéressés à la gestion de l'énergie électrique produite par les photovoltaïques et les éoliens raccordés avec un réseau d'achat en stockant l'énergie tout en minimisant le coût.

Cependant dans l'article [20], le travail s'est basé sur l'examen de la consommation de l'énergie électrique en utilisant des modèles mathématiques pour obtenir les meilleures performances dans le réseau électrique avec une minimisation des coûts.

## Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

---

Le travail C.T.M Clack [21] est articulé autour des techniques de la programmation linéaire pour développer un système de transmission à haute tension à courant continu avec le stockage de l'énergie électrique ainsi que les techniques de minimisation des coûts par cette méthode.

L'impact de l'association des énergies renouvelables dans le réseau électrique sur l'équilibre de production-consommation mènent le système de plus en plus complexe, ce qui nécessite à faire une recherche de nouvelle solution pour la combinaison entre les différentes sources d'énergie.

Le raccordement d'un système éolien ou photovoltaïque sur le réseau électrique entraîne des problèmes liés à :

La fréquence, la tension, le courant de court circuit.

On rencontre deux méthodes d'optimisation utilisées pour la combinaison des énergies renouvelables notamment (l'éolien et le photovoltaïque) dans les réseaux électriques. P. Dessante [22], préconise la **méthode déterministe** qui se base sur l'analyse d'une quantité réduite de positions estimées a priori comme incertaines pour lesquelles on examine la tenue du système électrique. Et la **méthode probabiliste** qui considère tous les cas possibles avec leurs probabilités de circonstance afin d'apprécier le danger de ne pas respecter une contrainte du système. Il faut noter qu'actuellement, les études de raccordement se basent sur des cas déterministes en introduisant une détermination probabiliste des moyens de production et de la consommation.

Les techniques de la programmation linéaire pour développer un système électrique optimale y compris le système HVDC (courant continu à haute tension) ont été mises au point pour le transport ainsi que la transmission et le stockage de l'énergie. Les résultats obtenus par cette méthode sont satisfaisants. C.T.M. Clack [21] et S. HOUNDEDAKO [23] ont utilisé le système HVDC (courant continu à haute tension) pour la synchronisation entre deux réseaux différents aussi que le transport de l'énergie électrique. Avec une simulation sous le logiciel Matlab/Sim Power Systems, l'auteur a confirmé que la faisabilité de cette synchronisation fiable et robuste pour la stabilité du réseau électrique.

### I.5.1 La production d'électricité décentralisée

La production décentralisée dite encore « dispersée » ou « distribuée » est la production d'énergie électrique à l'aide des installations de petites puissances raccordées aux réseaux à basse tension (et plus rarement moyenne) contrairement à la production centralisée de grandes puissances, raccordées au réseau de transmission. La production décentralisée est à base de sources d'énergies renouvelables, mais dans certains cas elle peut être effectuée aussi avec des générateurs conventionnels (groupes diesel et micro-turbines à gaz en cogénération) [24].

Actuellement, la puissance cumulative de la production d'électricité décentralisée est en forte augmentation. Cet accroissement est du à différents facteurs, mais principalement

## **Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux**

---

c'est la libéralisation progressive des marchés de l'énergie dans une grande majorité des pays. Les études montrent que la production décentralisée peut être avantageuse à tout les niveaux et pour tous les acteurs du système électrique [25] :

- Les consommateurs peuvent diminuer leurs factures d'électricité en produisant une partie de leur énergie en local.
- Avec une coordination entre les producteurs décentralisés et les opérateurs des réseaux, la congestion des réseaux de distribution dans les heures de pointe peut être assouplie et ainsi les investissements pour le renforcement des réseaux réduits.
- Réduction des pertes de par la proximité des générateurs et des consommateurs.
- La production décentralisée est aussi bénéficiaire pour des sites de consommations éloignés du réseau de distribution, dont la consommation ne justifie pas l'installation de générateurs de grande puissance et les approvisionnements de carburant sont difficiles.
- Avec des dispositifs de production décentralisée, la fiabilité d'alimentation des charges critiques peut être augmentée.

### **I.5.2 Le réseau électrique et son rôle**

Le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Son rôle est pour garantir un approvisionnement sûr et économique de l'énergie .Il n'est pas possible que ce rôle soit assuré par un type unique de réseau qui relierait moyens de production et utilisateur. Une bonne solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseau dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par le niveau de tension de leur ligne ou le niveau de puissance qui transite [26].Ces fonctions sont les suivantes :

- L'acheminement de l'énergie des centrales de production aux abords des grands centres de consommation, c'est le rôle du réseau de transport.
- La répartition de cette énergie en différents points de chacun des centres de consommation de manière à mieux assuré la sécurité de l'alimentation de l'ensemble des consommateurs, c'est le rôle des réseaux de répartitions.
- L'alimentation directe de chacun des consommateurs à partir du réseau de répartition, c'est le rôle des réseaux de distribution [27].

#### **I.5.2.1. Les réseaux de transport**

Leur fonction est principalement le transport de l'énergie électrique sur grandes distances. Pour réduire les pertes, ces réseaux sont à haute et très haute tension (de 63 kV à 450 kV). Pour des raisons de sécurité du fonctionnement, les réseaux de transport ont une

## **Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux**

---

structure maillée. Cela est fait aussi pour éviter une congestion forte sur une seule branche du réseau. L'optimisation technico-économique de ces réseaux est une tâche complexe, à cause de leur structure maillée et des fortes variations de la consommation dans le temps et le grand territoire couvert par ces réseaux. Pour ces raisons, en général les réseaux de transport par rapport aux réseaux de distribution sont supervisés et automatisés [28].

### **I.5.2.2 Les réseaux de répartitions**

Leur fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Ils doivent de ce fait assurer l'alimentation du territoire qu'ils desservent qui sont en générale des zones importantes de consommation. Pour assurer cette fonction, ces réseaux auront une topologie de réseau bouclé, ce qui permet d'assurer l'acheminement de l'énergie dans des conditions de sécurité raisonnablement garanties [28].leur niveau de tension, est souvent compris entre 45 et 160 kV [29].

### **I.5.2.3 Les réseaux de distribution**

La fonction des réseaux de distribution est l'approvisionnement de l'énergie électrique aux consommateurs et sous-stations locales (résidentiels, petit industrie). Leur tension est inférieure à 50 kV (HTA), ils sont constitués de deux types de réseaux: le réseau moyen tension (MT) entre 4 et 45 kV, qui sert comme interface avec le réseau de transport et le réseau basse tension (BT) entre 230 et 400 V. Les réseaux de distribution, sont en générale à structure radiale [28].

Accueillant aujourd'hui de plus en plus de production d'énergie décentralisée, ils constituent le cadre de notre recherche.

### **I.5.2.4 Vers un réseau intelligent (Smart Grid)**

Le « réseau intelligent » une autre appellation en anglais « Smart Grid » est un réseau de distribution d'électricité qui utilise des technologies informatiques de manière à optimiser et coordonner la production, la distribution et la consommation d'électricité afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité de ce système. Les nouvelles technologies permettront de faire des économies en lissant les pointes de consommation en utilisant la production décentralisée et ainsi de diminuer les appels aux capacités qui sont couteuses et plus polluantes. De cette manière l'alimentation des consommateurs sera plus fiable et le coût de l'énergie électrique pourrait être réduit. Le déploiement des réseaux intelligents sera aussi un des catalyseurs de l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique [30].

La pénétration des générateurs basés sur des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution actuels est souvent limitée pour des raisons techniques.

## Chapitre I : Etat d'art sur les sources énergies renouvelables et leur insertion dans les réseaux

---

La production doit s'adapter instantanément à la demande pour préserver la stabilité du système. Les réseaux intelligents permettront d'agir sur la demande à travers des compteurs intelligents, capables de déplacer certaines charges dans le temps à l'arrivée d'un signal tarifaire.

L'architecture des réseaux intelligents se compose de trois niveaux [31] :

- le premier sert à acheminer l'électricité par une infrastructure classique d'ouvrages électriques (lignes, transformateurs, etc.)
- le deuxième niveau est formé par une architecture de communication fondée sur différents supports et technologies de communication (fibre optique, GPRS, CPL, etc.) servant à collecter les données issues des capteurs installés sur les réseaux électriques.
- le troisième niveau est constitué d'applications et de services, tels que des systèmes de dépannage à distance ou des programmes automatiques de réponse à la demande d'électricité utilisant une information en temps réel.

Les technologies de l'électronique de puissance, de détection et de mesures, de communication, de contrôle avancé et les interfaces évoluées d'aide à la décision permettront de mieux optimiser le fonctionnement du système électrique [31].

Certaines de ces technologies sont en cours de perfectionnement (supraconductivité, tolérance des défauts, stockage, conducteurs composites et appareils plus intelligents), tandis que d'autres sont considérées comme matures, à la fois dans leur développement et dans leur mise en œuvre, et sont déjà en cours de déploiement. Enfin, d'autres sont encore au stade de la recherche ou des démonstrateurs (RD&D - électronique de puissance, communication et informatique). Néanmoins, la large diffusion de ces technologies se heurte encore à la constitution de modèles d'affaires rentables [32].

La difficulté réside dans le fait de conserver voir d'améliorer la fiabilité et la sécurité du réseau électrique actuel tout en introduisant l'ensemble de ces technologies.

### I.6 Conclusion

De nos jours le développement durable n'est pas seulement une affaire d'environnementalistes mais aussi celle de tous les acteurs de la société qu'il soit producteur, exploitant ou consommateur. Le domaine des énergies est très prépondérant et crucial, au point qu'il est à l'origine de la majorité des conflits locaux, régionaux et internationaux. Rappelons un exemple du conflit social au sud Algérien, relatif à l'exploitation du gaz de schiste. Néanmoins le développement des énergies propres est pris en charge par la totalité des pays dans le monde mais à des échelles différentes. Contrairement aux idées reçues, où il est souvent dit que ces énergies ne sont pas onéreuses, abondantes et faciles à exploiter, plusieurs problèmes sont à soulever, à l'exemple de l'insertion de ces ressources aux réseaux.

Cette problématique a été prise en charge dans ce travail, tout d'abord en la vulgarisant et en mettant en exergue les différents mécanismes mis ou à mettre en place pour assurer une transition d'une production centralisée à une autre décentralisée. Un état d'art sur les différentes ressources du renouvelable a été présenté. Puis, vient un autre état d'art sur les travaux et les investigations menés dans le sens de faciliter l'intégration de ces dernières aux réseaux. Les développements mathématiques et les simulations seront traités dans le projet de fin d'études qui suivra cette recherche bibliographique.

### II.1 Introduction

De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale. On parle des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressources illimitées qui regroupent un certain nombre de techniques et de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Dans ce chapitre on va étudier les caractéristiques de quelques ressources du renouvelable.

### II.2 Caractéristiques du système photovoltaïque

#### II.2.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K°), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75  $\mu\text{m}$ ) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4  $\mu\text{m}$  environ) [33].

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit :

- Le rayonnement direct :

La conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

- Le rayonnement diffus :

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

- Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

- Le rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.



## Chapitre II : Caractéristiques des différentes ressources du renouvelable

Dans la figure ci-dessous figure (II.1) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

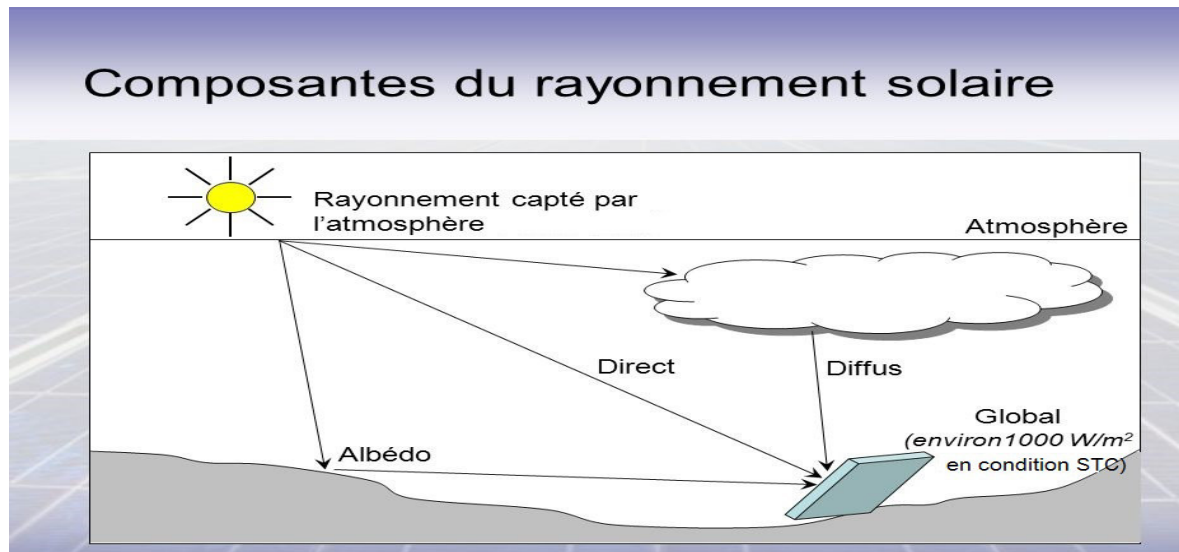


Fig II.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre  $G$ ), il s'exprime en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [34].

### II.2.2 L'effet photovoltaïque

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique à travers d'un capteur constitué de matériaux sensible à l'énergie contenue dans les photons délivrant une tension de l'ordre de 0,4 à 0,7 V. Ce capteur est présenté à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule PV. L'effet photovoltaïque fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell, aux Etats-Unis parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire ou de base de la conversion photovoltaïque.

### II.2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

Les cellules solaires permettent de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première

## Chapitre II : Caractéristiques des différentes ressources du renouvelable

est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau  $n$  diffusent dans le matériau  $p$ . La zone initialement dopée  $n$  devient chargée positivement, et la zone initialement dopée  $p$  chargée négativement [35].

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone  $n$  et les trous vers la zone  $p$ . Une jonction (dite  $p-n$ ) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones  $n$  et  $p$ , une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone  $n$  rejoignent les trous de la zone  $p$  *via* la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiels: le courant électrique circule.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (II.2)

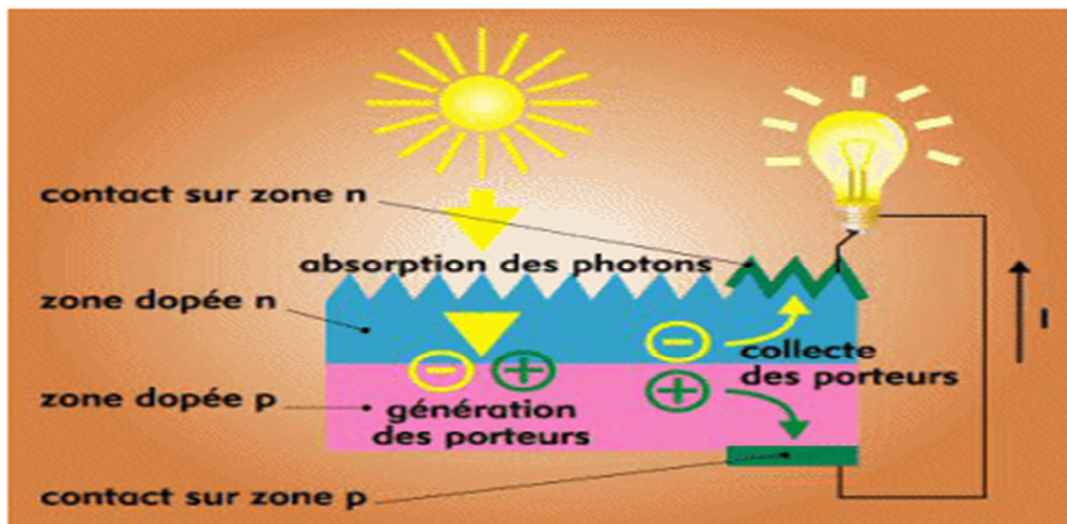


Fig II.2: Principe de la conversion photovoltaïque

### II.2.4 Type de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteur, principalement à base de Silicium [36]. On trouve trois principaux types de cellules :

- **Les cellules monocristallines:**

C'est la première génération de photopiles, elles ont un excellent rendement ainsi une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.

- **Les cellules poly-cristallines:**

Un rendement élevé et un coût de production moins élevé ainsi un procédé nécessitant moins d'énergie.

## Chapitre II : Caractéristiques des différentes ressources du renouvelable

---

- **Les cellules amorphes:**

Un rendement faible et un coût de production bien plus bas ainsi une durée de vie plus faible, (cellules de calculatrices par exemple).

Les différents rendements en fonction de technologie des cellules donnée par le tableau II.1

De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

Type de cellules	Rendement des cellules(%)		
	Théorique	Au labo	Production
Silicium monocristallin	27	24.7	13-17
Silicium poly cristallin	27	19.8	11-15
Silicium amorphe	25	13	5-9

**Tableau II.1 :** Rendement

$$\eta_{stc} = \frac{P_m}{E_{stc} \times S_{cellule}} \quad (II.1)$$

$\eta_{STC}$  : Le rendement de la cellule photovoltaïque,

$P_m$  : La puissance produite par le générateur PV,

$E_{STC}$ : L'éclairement absorbé par la cellule,

$S_{cellule}$ : La surface de la cellule [m<sup>2</sup>].

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs [37]:

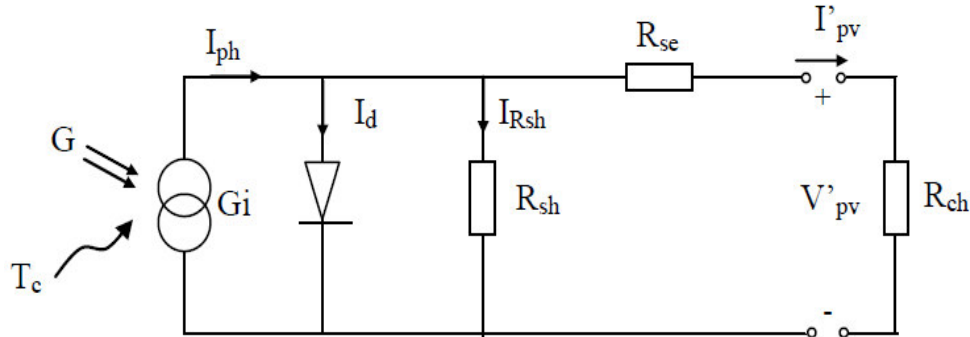
- Réflexion à la surface,
- Température de jonction des cellules,
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication,
- La résistance série et parallèle responsable des pertes par effet Joule,
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

### II.2.5 Les paramètre des cellules photovoltaïques

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique  $I(V)$ . Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un

## Chapitre II : Caractéristiques des différentes ressources du renouvelable

générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction P-N. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistif parasite du à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.



**Fig II.4 :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec charge

$G_i$  : Source de courant parfaite,

$R_{sh}$ : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule,

$R_{se}$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact) ,

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens,

$R_{ch}$  : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré [35],

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants:

- **Courant de court circuit ( $I_{sc}$ )** : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ( $V'_{pv}=0$ ).
- **Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ )** : Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant  $I_{ph}$  ( $I_d = I_{ph}$ ) quand ( $I'_{pv}=0$ ). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = \frac{mkT_c}{e} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_t \left( \frac{I_{PH}}{I_0} \right) \quad (II. 2)$$

Où :  $V_t = \frac{mkT_c}{e}$  Avec :

$V_t$  : La tension thermique,

$T_c$  : La température absolue,

$m$  : Facteur idéal de la jonction,

$K$  : Constante de Boltzmann ( $K= 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k) ,

$e$  : Charge de l'électron ( $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ ).

- **Point de puissance maximale (Pmax)**: est le point M ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_{max} = V_{opt} \times I_{opt} \quad (II.3)$$

Avec :

$V_{opt}$ : La tension optimale,

$I_{opt}$ : Le courant optimal.

- **Rendement maximum** : est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{IN}} = \frac{V_{opt} \times I_{opt}}{A_{pv} \times G} \quad (II.4)$$

$G$  : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface ( $W/m^2$ ).

$A_{pv}$ : Surface effective des cellules.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires (STC) sont caractérisées par un rayonnement instantané de  $1000W/m^2$  d'une température ambiante de  $25^\circ C$  et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort.

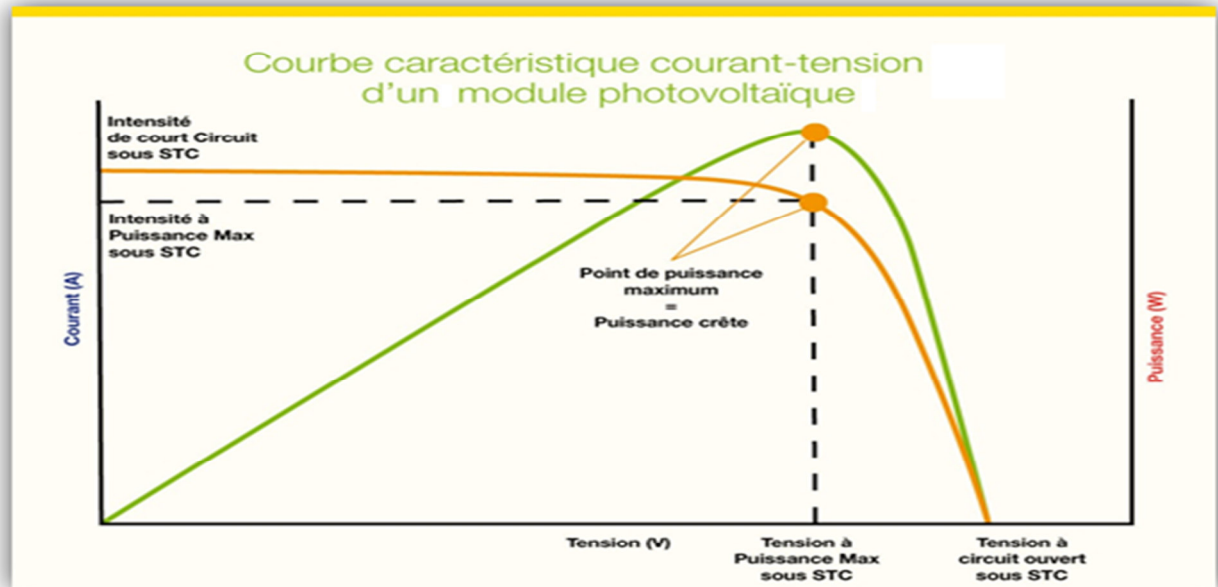


Fig II.5 : Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque

### ➤ Facteur de forme FF:

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule, il dépend d'un ensemble de paramètres [38], il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (II.5)$$

$V_m$ : Tension maximale,

$I_m$ : Courant maximal.

### II.2.5.1 Influence de l'éclairement

L'augmentation du flux lumineux fait accroître le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , ainsi qu'une légère augmentation de la tension de circuit ouvert.

### II.2.5.2 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. La figure (II.7) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une légère augmentation de courant de court-circuit.

### II.2.6 Le module photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque (GPV) est par définition un ensemble de photopiles (cellules solaires) assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement solaire utile. En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt

(1 V) : entre 0,5V et 1,5 V selon les technologies. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque [39].

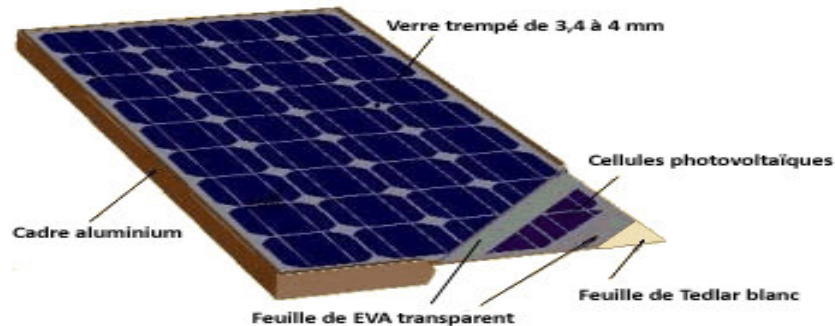


Fig II.6 : Module photovoltaïque

### II.2.6.1 Association des cellules photovoltaïques

- **Association en série:**

L'association des cellules photovoltaïques en série permet d'atteindre une tension désirée (Figure II.9). Le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement selon le nombre de cellules mises en série. Les fabricants trient les cellules de même courant pour les mettre en série par ce que si une d'elles était d'un faible courant elle imposerait son courant aux autres. Cette technique est appelée l'appairage en courant.

- **Association en parallèle:**

L'association des cellules photovoltaïques en parallèle permet d'avoir le courant voulu (Figure II.10). La tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle. On trie aussi les cellules de même tension (l'appairage en tension) pour avoir un module robuste.

### II.2.6.2. Protection d'un module photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexions en parallèle de cellules photovoltaïques pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de cellules photovoltaïques permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass).



### II.2.7 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes **autonomes**, les systèmes **hybrides** et les systèmes **connectés à un réseau** qu'on a définie ci-dessous. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées [35].

- **Système photovoltaïque connecté au réseau électrique**

Dans ce genre de système, l'électricité est produite en courant continu par les capteurs, puis transformée en courant alternatif par un onduleur. Ce dernier contrôle la puissance injectée au réseau, le courant alternatif (converti par l'onduleur) est identique à celui qui circule sur le réseau et peut, soit être consommé sur place, soit être injecté sur le réseau.

#### **La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation (continu-alternatif)**

Il existe différentes topologies de gestion de ces installations. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un GPV raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion.

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum.

De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. Nous décrivons brièvement leur propriété ci-dessous [38].

#### **L'onduleur central**

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres (Figure II.7). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension



## **Chapitre II : Caractéristiques des différentes ressources du renouvelable**

---

continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance.

Le couplage direct des installations PV avec des onduleurs sans transformateur gagne en importance. En effet, ils sont peu onéreux et offrent un rendement énergétique imbattable (entre 95% et 97% pour les fortes puissances). Pour pouvoir alimenter le réseau, la tension d'entrée doit toujours dépasser la tension crête de la tension réseau redressée. Soit, pour une valeur de tension efficace réseau de 250V, une source de tension minimale de 354V est nécessaire pour pouvoir injecter un courant sinusoïdal dans le réseau. Par conséquent, un panneau mal adapté ou encore un ombrage partiel porte préjudice à une exploitation optimale de chaque chaîne PV et entraîne une réduction du rendement énergétique. L'onduleur central possède de plus en plus souvent au moins un système de contrôle MPPT lui permettant de fonctionner à son PPM. Cela marche parfaitement tant que les panneaux sont identiques et qu'ils fonctionnent sous un ensoleillement homogène. Mais lorsque les caractéristiques électriques entre les panneaux diffèrent, dues à des ombrages, des salissures, au vieillissement ou au stress, la commande MPPT devient incertaine et le champ photovoltaïque ne produit pas autant qu'il le pourrait. En outre, la fiabilité de l'installation est limitée parce qu'elle dépend d'un seul onduleur. Ainsi, lorsqu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production.

### **Les onduleurs string**

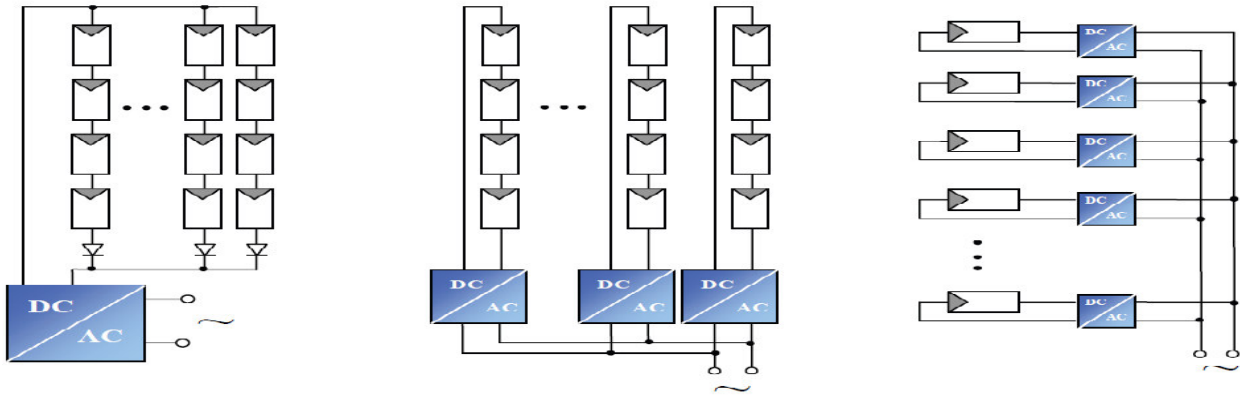
De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure II.7). Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente [38].

### **Les onduleurs intégrés aux panneaux photovoltaïques:**

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure II.7), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation

## Chapitre II : Caractéristiques des différentes ressources du renouvelable

doit être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W [38].



Onduleur central

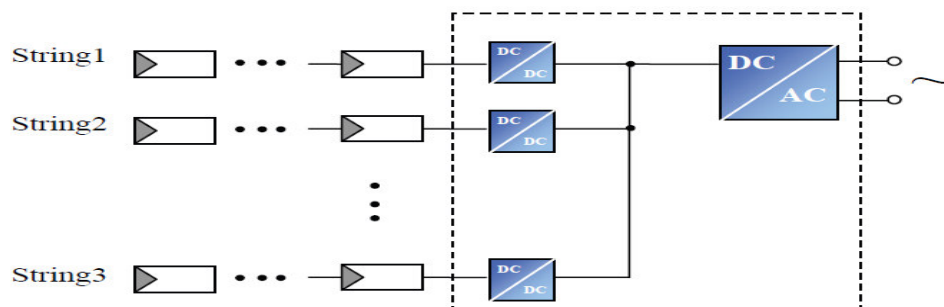
Onduleur string

Onduleur intégré au PV

**Fig II.7:** Schémas de principe de différentes topologies d'installations PV connectés à un réseau électrique.

### La conversion multi-string:

En fait, la gestion multi-string est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings. Comme illustré en (Figure II.8), le principe de la conversion multi-string est basé sur de nombreux convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM. Par conséquent, le dysfonctionnement d'un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le dysfonctionnement d'un seul GPV. Grâce aux convertisseurs DC-DC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des DC/DC) optimisant ainsi la production photovoltaïque.



**Figure II.8:** structure de conversion multi-string mixte.

### II.3 Les caractéristiques du système éolien

#### II.3.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur, couramment appelé « éolienne », est un système qui capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique puis en énergie électrique. D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome. La puissance  $P_v$ , issue de l'énergie cinétique d'un vent incident d'une vitesse  $V$ , traversant une surface  $S_t$ , s'exprime par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S_t V^3 \quad (\text{II. 6})$$

Où  $\rho$  représente la masse volumique de l'air.

Cette puissance ne peut être intégralement extraite et convertie car cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur, ce qui est physiquement impossible. La puissance  $P_t$  captée par la turbine éolienne est alors liée à la puissance  $P_v$  par un coefficient, appelé coefficient de puissance  $C_p$ , dont l'expression est donnée sous la forme suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho S_t V^3} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t^2 V^3} \quad (\text{II. 7})$$

Où  $R_t$  représente le rayon de la turbine.

Ce coefficient de puissance est intrinsèque à la turbine. Il est fonction de plusieurs paramètres (profil des pales, matériaux... etc.) et admet une valeur maximale théorique, appelée limite de Betz, qui est de  $\frac{16}{27} \approx 0.5926$ .

On définit également le coefficient de couple  $C_m$ , plus pratique pour élaborer les stratégies de commande d'une éolienne, par l'expression suivante :

$$C_m = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \quad (\text{II.8})$$

Où  $T_t$  est couple de la turbine éolienne de vitesse  $\Omega_t$ .

Sachant que  $P_t = T_t * \Omega_t$ , les coefficients  $C_m$  et  $C_p$  sont liés par la relation suivante :

$$C_p = \lambda * C_m \quad (\text{II. 9})$$

Où  $\lambda$  appelée vitesse réduite, est définie comme étant le rapport de la vitesse linéaire des extrémités des pales ( $\Omega_t R_t$ ) sur la vitesse instantanée du vent ( $v$ ) Soit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{II. 10})$$

### II.3.2 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

#### II.3.2.1 Les éoliennes à axe vertical

Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible, une autorégulation en vitesse pour les vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible. Par contre, elles ne conviennent pas pour la conversion de grandes puissances. Suite aux recommandations récentes en matière de production de l'énergie électrique par des sources renouvelables, ces structures connaissent un fort regain d'intérêt depuis une dizaine d'années pour des applications, à petite et moyenne puissances, en milieu urbain.

Il existe deux principales technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) :

Les turbines Darrieus classiques, à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales.

#### II.3.2.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales

sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol.

### II.3.3 Constitution d'une éolienne à axe horizontal

Une centrale éolienne typique est composée de différents organes. La figure (II.9) donne un aperçu des principales parties dans le cas d'une éolienne à axe horizontal pour la production de masse [42]. Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement chacune des diverses parties ainsi que ses fonctions.

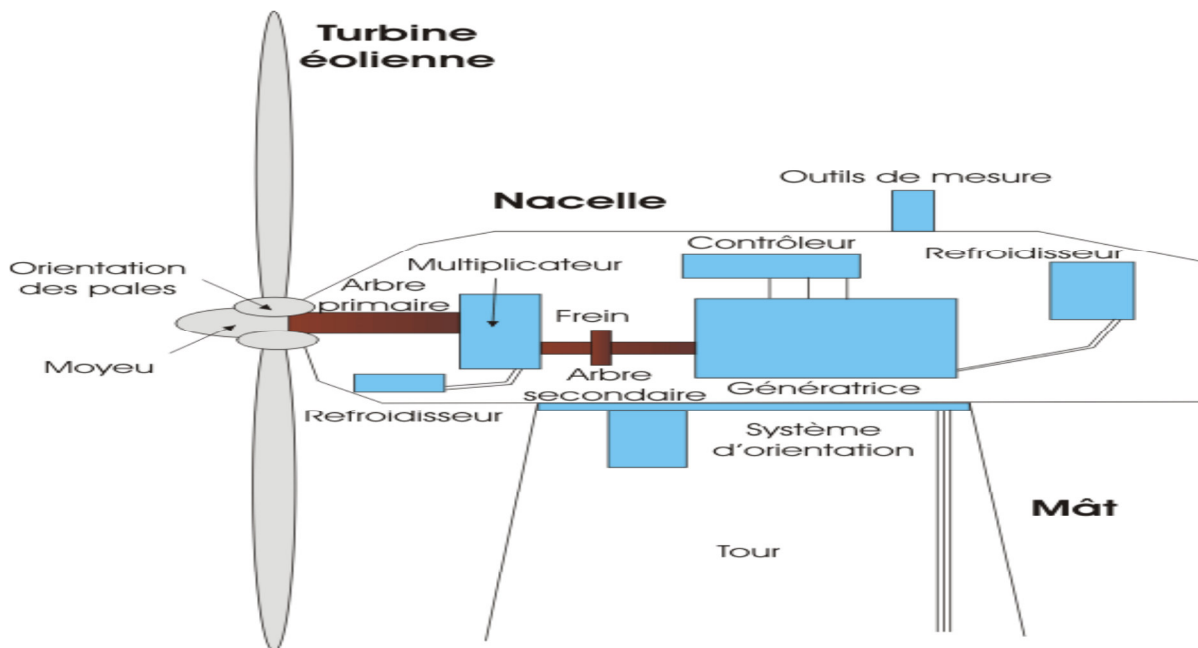


Fig II.9 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal [42]

#### ➤ Le moyeu

Le moyeu est la partie mécanique, en bout de l'éolienne, qui supporte les pales. Il est pourvu d'un système passif (aérodynamique), actif (vérins hydrauliques) ou mixte (active stall) qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent) [42]. Trois systèmes de régulation existent:

- La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "**pitch control**", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.

- Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "**stall control**", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor.
- Un dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "**active stall**". On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.

### ➤ **Les pales ou capteur d'énergie**

Les pales sont généralement réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes.

### ➤ **L'arbre primaire**

C'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 - 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur mécanique de vitesse.

### ➤ **Le multiplicateur mécanique de vitesse**

Dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. Le multiplicateur relie donc l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. La présence de ces multiplicateurs induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance [43]. Il existe des possibilités d'entraînement direct sans multiplicateur. Les éoliennes à attaque directe sont constituées d'une génératrice directement connectée à l'axe de la turbine. Cela permet alors de réduire le coût de l'énergie électrique produite et le bruit du multiplicateur de vitesse [44].

### ➤ **Le système de refroidissement**

Le multiplicateur de vitesse, comme la génératrice, connaissent un échauffement suite aux efforts mécaniques. Des refroidisseurs sont donc utilisés pour limiter les températures de ces organes. Ils se présentent sous la forme de ventilateurs, de radiateurs d'eau ou d'huile. Ce dernier est plutôt destiné pour le refroidissement des multiplicateurs [42].

### ➤ **L'arbre de la génératrice ou arbre secondaire**

L'arbre secondaire est celui de la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique (dispositif de sécurité) qui limite la vitesse de rotation en cas de vent violent.

### ➤ **Les capteurs des caractéristiques du vent**

Deux capteurs des caractéristiques du vent équipent généralement une éolienne : Une girouette pour en évaluer la direction et un anémomètre pour en mesurer la vitesse. Les mesures sont ensuite traitées par la commande pour assurer les différents réglages de l'éolienne.

### ➤ **Le système d'orientation de la nacelle**

Le système d'orientation de la nacelle est constitué d'une couronne dentée (crémaillère) équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne et de bloquer sa position, grâce à un frein, dans l'axe du vent.

### ➤ **Mât**

Le mât est un tube en acier ou une tour en treillis qui supporte le rotor et la nacelle. Il renferme également les câbles qui assurent la liaison électrique. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition souhaitée au vent. En effet, plus le mât est haut, plus la vitesse du vent, et donc la puissance captée augmentent mais cela s'accompagne également de l'accroissement du coût de la structure [42].

### ➤ **Le système de contrôle électronique**

Une éolienne est généralement munie d'un système électronique destiné à contrôler son fonctionnement général et son mécanisme d'orientation. Il sert à gérer le démarrage, à régler le pas des pales, le freinage ainsi que l'orientation de la nacelle par rapport au vent.

### ➤ **Les convertisseurs d'électronique de puissance**

La plupart des éoliennes, connectées au réseau ou en fonctionnement autonome sur un banc de capacités, utilisent uniquement des dispositifs mécaniques pour commander la puissance électrique débitée [45]. Ces derniers sont :

- Les servomoteurs d'orientation de la nacelle qui permettent de placer cette dernière face au vent lors des phases de fonctionnement,
- Le mécanisme hydraulique qui permet d'orienter les pales afin d'adopter l'angle d'incidence adéquat pour capter une puissance du vent donnée.

Ainsi, pour une puissance désirée, il est possible de déterminer l'angle de calage des pales ainsi que celui que doit présenter la nacelle face au vent. Ce système de commande aboutit à des résultats satisfaisants mais présente des limites et notamment une plage de vitesse de fonctionnement restreinte. Pour palier ces inconvénients, on introduit des convertisseurs statiques entre la génératrice et la charge [46]. Ces dispositifs de connexion assurent alors le réglage de la puissance, le démarrage en douceur et les fonctions d'interconnexion des turbines. Leur insertion permet d'avoir de nouveaux degrés de liberté utilisables pour une commande adaptée afin d'améliorer le fonctionnement de la centrale.

Quelles soient à axe vertical ou horizontal, les éoliennes sont classifiées en trois catégories selon leur puissance nominale [47] :

- les éoliennes de petite puissance : Moins de 40kW ;
- les éoliennes de moyenne puissance : De 40kW à quelques centaines de kW ;
- les éoliennes de grande puissance : 1MW et plus.

### II.3.4 Les éoliennes connectées au réseau électrique

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques: les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [48].

#### II.3.4.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques [48]. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif) [49]. Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%.

Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle de puissances.

Par ailleurs, la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor [50].

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjointes.

#### II.3.4.2 Les éoliennes à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable permet de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du



caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire [52].

Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [53]. Les avantages de cette configuration sont les suivants [50]:

- Augmentation du rendement énergétique;
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient. Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage.

### II.3.5 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate allée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de part leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation [54]. Ces derniers sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation.

Des générateurs synchrones sont également utilisés [55]. Ils offrent un bon couple massif et peuvent éventuellement s'affranchir de multiplicateur de vitesse.

Néanmoins, leur utilisation est limitée essentiellement à cause de leur prix qui est plus élevé que celui des générateurs à induction de la même taille [50].

Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages.

### II.4 Caractéristiques de l'énergie hydroélectrique

#### II.4.1 Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques

Un aménagement hydroélectrique se compose d'une prise d'eau ou d'une retenue d'eau, créée par un barrage, et d'une centrale de production électrique, les deux étant reliées par un canal ou une conduite. La partie du cours d'eau entre le barrage et la sortie de la centrale s'appelle le tronçon court-circuité. L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur qui l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. La puissance d'une centrale hydraulique peut se calculer par la formule suivante:

$$P = Q * \rho * H * g * r \quad (\text{II. 11})$$

Avec:

- P : puissance en kW ;
- Q : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde ;
- $\rho$  : masse volumique de l'eau, soit 1 000 kg/m<sup>3</sup> ;
- H : hauteur de chute en mètres ;
- g : constante de gravité, soit près de 9,8 (m/s<sup>2</sup>) ;
- r : rendement de la centrale (compris entre 0,6 et 0,9)

#### II.4.2 Les différents types de barrages

Ils existent plusieurs types de barrages, ces barrages sont choisis en fonction de l'environnement et les moyens disponibles.

➤ **Barrage à poids**

Est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ils sont encore très utilisés de nos jours. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangle.

➤ **Barrage en voûte**

Les barrages voutes en béton adaptés aux vallées relativement étroites et dont les rives sont constituées de rocher de bonne qualité. La subtilité de leurs formes permet de diminuer la quantité de béton et de réaliser des barrages économiques.

### ➤ Barrage en contreforts ou multi voûtes

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

### ➤ Le barrage en matériaux meubles :

Il a les mêmes caractéristiques que le barrage poids mais il n'est pas réalisé en béton mais en enrochement de blocs de pierre ou en terre compacte, sans élément de liaison particulier. Il possède une base très large, et il comporte sur toute la hauteur un élément assurant l'étanchéité. Ce sont les barrages les plus résistants aux tremblements de terre.

## II.4.3 Les turbines

Une turbine hydraulique est une machine qui effectue une rotation qui génère une énergie mécanique à partir de l'eau. C'est la partie la plus importante des centrales hydroélectriques destinées à produire de l'électricité à partir de chutes d'eau. Leur rendement se situe généralement entre 60 et 80%.

Ils existent deux types de turbines hydrauliques :

### II.4.3.1 Les turbines à action

La pression de l'eau est entièrement convertie en énergie cinétique avant d'entrer en contact avec la roue et de lui transmettre son énergie. L'énergie cinétique est véhiculée par un jet à haute vitesse s'écoulant dans ces augets montés sur la périphérie de la roue. On va citer quelques unes :

- **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. La turbine Pelton est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres) et faible débit.

- **Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell):**

La turbine Crossflow, appelée aussi turbine à flux traversant, 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 et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon.
- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées.

- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

### II.4.3.2 Les turbines à réaction

La partie mobile provoque une différence de pression entre l'entrée et la sortie. Une machine complètement immergée dans l'eau et mise en rotation par effet tourbillon au moyen d'une bêche en forme de spirale 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. C'est à la fois l'énergie cinétique de l'eau et la différence de pression entre les aubages qui génère le couple, contrairement aux turbines à action pour lesquelles seule l'énergie cinétique de l'eau est impliquée. Voici quelques unes :

- **Turbine Francis :**

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit. Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 40m à 500m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min). Actuellement, ces machines sont toutes montées avec une bêche spirale qui alimente le distributeur. C'est une conduite en forme de colimaçon de section progressivement décroissante reliée, d'une part à l'extrémité aval de la conduite forcée, et d'autre part à la section d'entrée du distributeur. La bêche est tracée de telle façon que le débit passant à travers chaque arc de cercle de la section d'entrée du distributeur soit constant. Le distributeur est constitué par une série de directrices (aubes rotatives) entraînées par des biellettes liées à un cercle de vannage. Celui-ci est mis en rotation par la tige de commande du distributeur qui l'entraîne par deux tirants. La roue de la turbine est placée à l'intérieur des distributeurs, et l'arbre qui la relie à la génératrice ou à un multiplicateur de vitesse est guidé par le palier principal de la turbine.

- **Turbine Kaplan :**

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes de 5m à 50m et des débits importants. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible. La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement  $H_t$  de la turbine. La turbine Kaplan offre une analogie intéressante avec les turbines éoliennes sur l'aspect du réglage de l'orientation des pâles.

### II.5 Conclusion

Après avoir établi l'état de l'art sur les ressources du renouvelable en général dans le chapitre I, nous avons développé les caractéristiques de trois principales ressources, à savoir : le photovoltaïque, l'éolien et l'hydro-électrique. Cela nous permet d'introduire en premier lieu les avantages et les inconvénients de ces différentes ressources et puis de mettre en exergue les problèmes de leur insertion dans les réseaux. Cette thématique fera l'objet du troisième chapitre.

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---

### III.1 Introduction

Ce chapitre vise à exposer les principaux défis techniques auxquels les réseaux électriques sont ou seront exposés de part la croissance de la pénétration des énergies renouvelables décentralisées. Les réseaux électriques tels que définis dans tout pays ne datent pas d'hier. Les infrastructures ont évolué au cours du temps pour arriver à la situation actuelle. Mais une seule et unique chose n'a pas changé, la structure des réseaux reste une structure globalement radiale, au départ des nœuds du réseau de transport.

Les réseaux de distribution actuels ont été pensés et dessinés pour faire passer un flux de puissance (réelle  $P$ , et réactive  $Q$ ) des hautes vers les basses tensions. Avec l'augmentation du taux de pénétration d'unités décentralisées, le circuit qui était purement passif et ne faisait qu'alimenter des appareils électriques, devient actif: les flux de puissance et les tensions  $y$  sont à présent déterminées par la dynamique des consommations mais aussi des productions décentralisées qui y sont raccordées.

Les opérateurs des réseaux ont d'abord réagi en définissant des standards de connexion de ces unités décentralisées aux réseaux. L'approche considérée a été de garantir que ces unités ne réduisent pas la qualité de l'électricité offerte aux consommateurs tout en privilégiant une approche où l'unité décentralisée est considérée comme une charge négative.

Nous allons passer en revue les problèmes les plus connus des productions d'énergie décentralisées et renouvelables sur les réseaux électriques, en passant tout d'abord par l'exposé des avantages et des inconvénients des ressources du renouvelable.

### III.2 Avantages et inconvénients des ressources renouvelables

#### III.2.1 l'énergie photovoltaïque :

Les avantages [41]:

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit,
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets,
- Génère l'énergie requise,
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité,
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge,

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---

- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus,
- Entretien minimal,
- Aucun bruit.

### Les inconvénients :

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles,
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est élevé.

### III.2.2 Energie éolienne

#### Les avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environnant est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.

#### Les inconvénients

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---

- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

### III.2.3 Energie hydroélectrique

#### Les avantages

- L'hydroélectricité est la seule énergie renouvelable et modulable, et présente donc plusieurs atouts. Il s'agit d'une source d'énergie renouvelable. Elle permet un stockage de l'énergie et la modulation de la production électrique, apportant ainsi une contribution appréciable à la stabilité du système électrique.
- L'électricité ne se stockant pas, l'équilibre d'un système électrique ne peut être réalisé qu'en ajustant en permanence la production à la consommation, en étant capable de moduler quasiment instantanément la puissance produite et injectée sur le réseau. La possibilité de pouvoir moduler rapidement la production d'électricité a donc une importance particulière.
- Cette source d'énergie n'émet pas directement des gaz à effet de serre, ni d'autres gaz polluants.
- L'hydroélectricité, lorsqu'elle est associée à un réservoir (lac, barrage, etc.), est la seule énergie renouvelable modulable, avec de surcroît la possibilité de faire monter très rapidement la puissance électrique produite.

#### Les inconvénients

- La construction des barrages à un coût très important en énergie et en main d'œuvre et reste limitée vue la nécessité des caractéristiques spécifiques du terrain (relief, ou présence de fleuves et rivières).
- La mise en eau des barrages a des conséquences sur l'environnement telle que les déplacements de population, la disparition de zones agricoles et entraîne des bouleversements dans certains écosystèmes notamment la migration des espèces aquatiques.
- Le risque de la rupture d'un barrage existe, cela entraînerait une crue phénoménale qui détruirait sans doute tout ce qui se trouverait en aval du barrage.



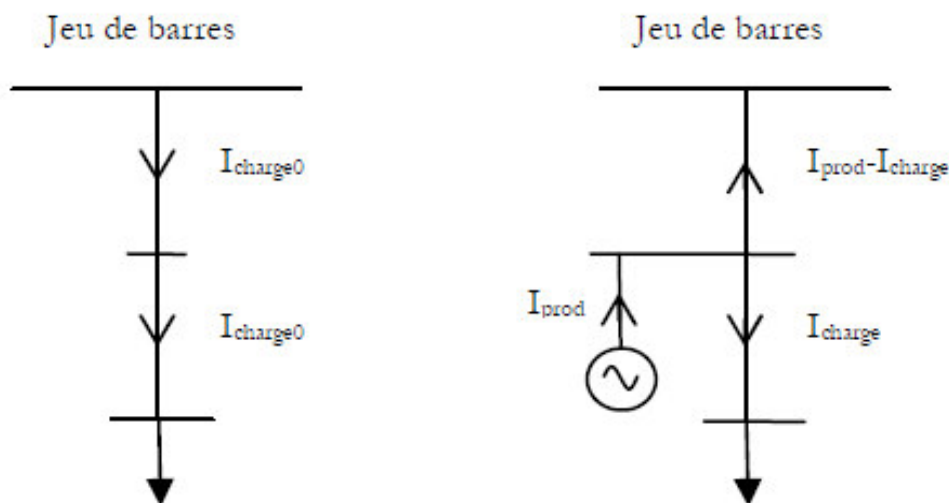
### III.3 Capacité d'accueil du réseau

#### III.3.1 Courants en régime permanent

Suite au raccordement d'un producteur EnR (énergie renouvelable) ou pas sur le réseau, l'intensité du courant en fonctionnement normal parcourant un ou plusieurs éléments du réseau (lignes, câbles) peut augmenter. Il y a donc risque de dépassement des valeurs admissibles pour les différents équipements de réseau. Ceci implique naturellement la première contrainte à respecter qui est de ne pas dépasser ces valeurs admissibles quel que soit la configuration et le point de fonctionnement de la centrale connectée et du système électrique dans lequel elle s'insère.

Lorsque l'installation d'EnR est reliée au réseau de distribution et qu'elle n'exporte pas ou peu de puissance sur le réseau de transport, les contraintes thermiques éventuelles liées au régime permanent apparaissent en général sur les conducteurs proches de l'installation (Figure III.1). Elles sont liées à la puissance de l'installation raccordée et aux caractéristiques des conducteurs existants.

Lorsque l'installation de production d'EnR est reliée aux réseaux de distribution ou de transport et qu'elle exporte de la puissance sur le réseau HTB, des phénomènes de congestion peuvent apparaître. Ces phénomènes de congestion seront d'autant plus probables et importants que les installations éoliennes seront de forte puissance. Suivant les puissances raccordées, les phénomènes de congestion pourront par exemple être observés à l'échelle d'une région.



**Fig III.1** : Courant en régime permanent avant et après raccordement d'un producteur sur réseau de distribution

## **Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables**

---

### **III.3.2 Le profil de tension**

Les changements de puissances actives et réactives dus aux sources (quelque soit leur nature) se répercutent sur le profil de tension en régime permanent selon les caractéristiques du réseau. Des simulations sont nécessaires pour vérifier que ce profil s'inscrit dans un gabarit prédéfini. En général, le niveau de tension s'élève au point de raccordement d'une installation de production, ainsi que plus loin dans la ligne, tel qu'illustré sur la Figure III.2, pour une ferme éolienne raccordée sur une artère de distribution (réseau HTA).

### **III.4 La gestion de l'équilibre et le maintien de la tension et de la fréquence**

Atout moment il convient d'équilibrer sur un réseau électrique la consommation et la production. Tout déséquilibre de l'une par rapport à l'autre conduit à modifier à la hausse ou à la baisse la tension et la fréquence, paramètres devant rester impérativement dans les normes fixées au risque de ne pouvoir garantir le bon fonctionnement et partant la sécurité des installations.

Les conséquences d'une instabilité étant dramatiques pour la continuité de la fourniture de l'électricité aux consommateurs, le gestionnaire de réseau de transport (GRT) doit mettre tout en œuvre pour limiter au maximum les risques de survenance de ces phénomènes. Dans le cadre d'un réseau classique, la gestion de l'équilibre passe par un ajustement de la production pour compenser la hausse ou la baisse de la consommation. Cet équilibre fait l'objet de règles strictes, édictées par le régulateur.

Le réglage de la fréquence se fait au niveau global, en utilisant la puissance classique tandis que le réglage de la tension fait appel à la puissance réactive, au niveau local.

### **III.5 Problèmes de dégradation de la qualité de l'énergie électrique**

#### **III.5.1 Creux de tension et coupures brèves**

Les creux de tension désignent la diminution de l'amplitude des tensions d'une valeur comprise entre 10% et 90% de la valeur nominale pour une durée de 0.5 secondes jusqu'à une minute.

Les creux de tension sont associés aux défauts survenus sur le réseau, comme le foudroiement d'une structure du réseau ou le contact d'un arbre avec la ligne. Néanmoins, ils peuvent être causés par des variations brusques de la production décentralisée ou des charges connectées au réseau ainsi que par les courants d'appel à la mise sous tension des transformateurs et au démarrage des moteurs.

Une coupure brève désigne la diminution de l'amplitude de la tension au dessous de 10% de la valeur nominale pour une durée ne dépassant pas 1 minute, et peut être

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---

généralement causé par un court-circuit survenant sur le réseau. Ce type d'anomalie est caractérisé par sa durée qui est fonction du temps de fonctionnement des dispositifs de protection. Les coupures sont parfois précédées par un creux de tension dans le cas d'un défaut survenant sur la source d'alimentation.

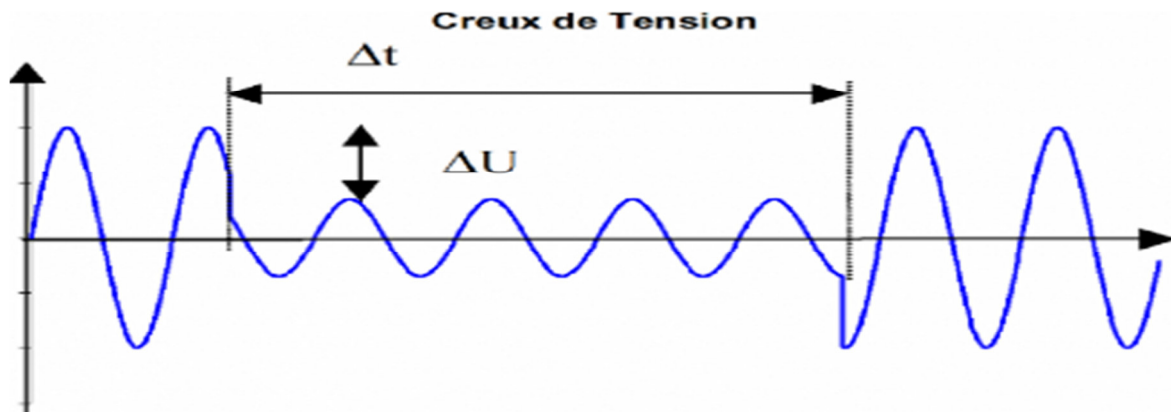


Fig III.2: Creux de tension et coupure brève.

### III.5.2 Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements industriels

Les creux de tension et les coupures brèves sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles. Les conséquences techniques dépendent du type de matériel et sont conditionnées par le type de charge du système.

Certains effets sont instantanés ou à court terme. Nous rappelons qu'ils se produisent principalement au niveau :

- Des contacteurs et relais thermiques : les creux de tension provoquent des manœuvres intempestives des contacteurs et relais.
- Des convertisseurs: défauts de commutation des onduleurs.
- Systèmes électroniques analogiques ou numériques: défauts de fonctionnement d'exécution de calculs informatiques.

Enfin, les conséquences des creux de tension et des coupures économiques. Ces perturbations peuvent engendrer une perte ou une altération de la production, une détérioration de l'outil de production, une perte de temps pour la remise en état et la remise en route de l'outil de production.

### III.5.3 Surtensions

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de **1,1 pu** à **1,8 pu**. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions.

En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à **1,73 pu**, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à **1,5 pu**.

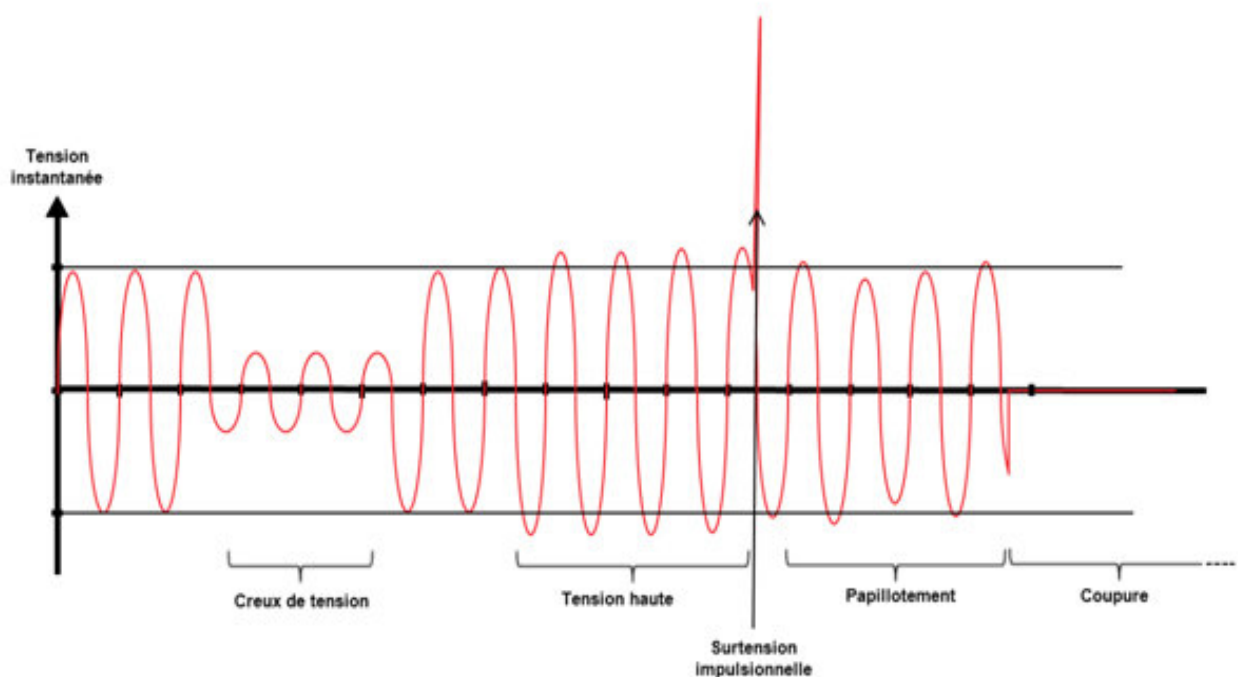


Fig III.3 : Exemple de Surtension

#### Conséquences des surtensions

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence [8] :

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...).
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées).

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---

- Coupure longue entraînée par la destruction du matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels).
- Perturbations des circuits de contrôle et de communication à courant faible
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :
  - La foudre essentiellement.
  - Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue.

### III.5.4 Variations de tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à **10 %** de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, comme illustré sur la figure (III.3).

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau. Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

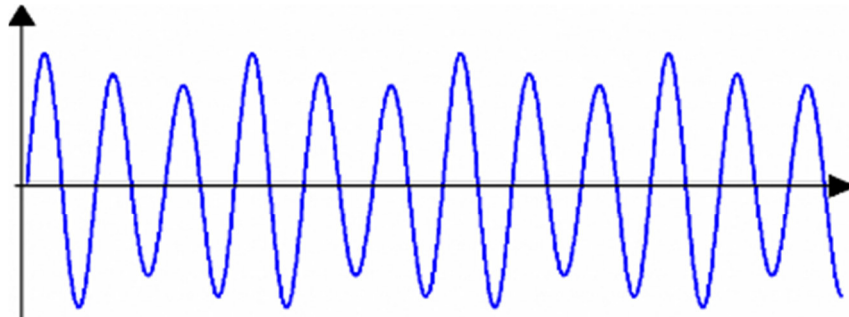


Fig III.4 : Fluctuations de tension

### III.6 Les Flicker

Le terme flicker désigne les variations de tension de courte durée apparaissant dans le réseau électrique et risquant de provoquer le scintillement des ampoules électriques à incandescence. Ce phénomène peut surgir si l'unité de production d'EnR est raccordée à un réseau ayant une faible puissance de court-circuit, les variations fréquentes de son énergie primaire causant alors des variations importantes de puissance.

Ce phénomène est surtout observé pour les éoliennes à vitesse constante car il n'existe pas de tampon entre l'énergie mécanique en entrée et l'énergie électrique injectée

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---

au réseau. Afin de déterminer le flicker produit durant un fonctionnement continu, des mesures sont effectuées et comparées avec la tension de référence pour quantifier le taux de flicker en tension. Le phénomène de flicker peut également se produire lors d'un basculement d'une zone de fonctionnement à une autre.

Les commutations typiques sont les mises en/hors service de l'unité de production d'EnR. Ces opérations provoquent des changements dans la puissance produite.

### III.7 Variation de la fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome tel que indiqué sur la figure III.5.

Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle **50Hz  $\pm$  1%**.

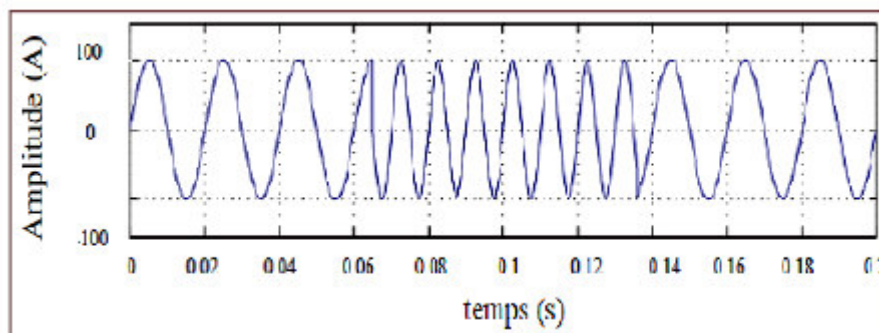
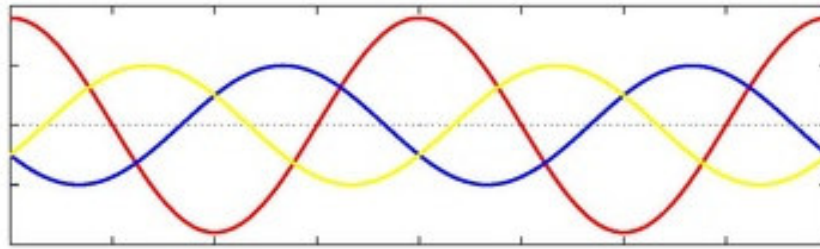


Fig III.5 : Variation de fréquence

### III.8 Déséquilibre

Un système triphasé est dit équilibré ou symétrique si les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et présentent un déphasage de  $120^\circ$  les uns par rapport aux autres. Si l'une, au moins, de ces conditions n'est pas remplie, le système est dit déséquilibré ou asymétrique, comme illustré sur la figure (III.6).



**Fig III.6 :** déséquilibre du système triphasé de tension

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phases différentes, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques.

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de **120°**.

Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre.

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase.

### **III.9 Harmoniques et inter- harmoniques**

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de fréquence fondamentale (**50 ou 60 Hz**).

Les inter-harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle commande.

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

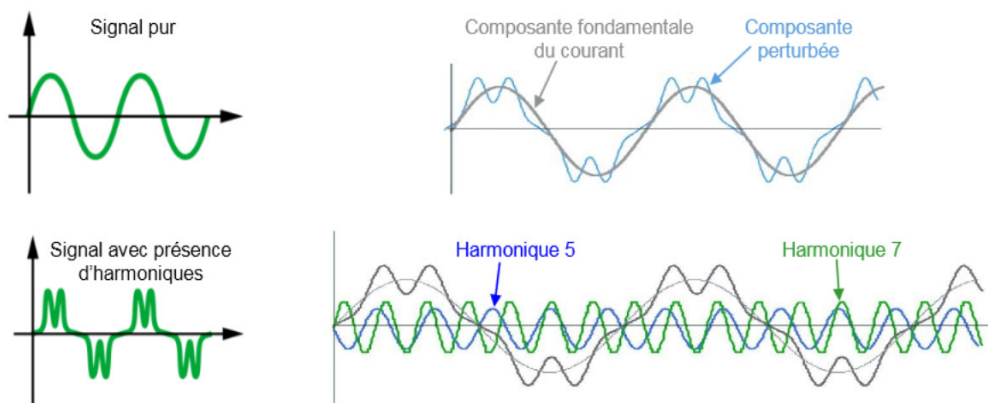


Fig III.7: Exemple d'harmoniques

### III.9.1 Origines des harmoniques

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques. Ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peuvent entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

### III.9.2 Effets des perturbations harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements. Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types :

- **Les effets instantanés ou à court- terme**
  - Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ...).
  - Pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation,...).
  - Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques.
  - Vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques.
  - Vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques.



## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---

- **Les effets à long- terme**

- Échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements.
- Echauffement des condensateurs : l'échauffement est causé par les pertes due au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques .Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- Surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions sont déphasées de  $120^\circ$  si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sont des multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représente l'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

### III.10 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution

Dans le passé, les réseaux de distribution se comportaient comme des éléments passifs dans lesquels les flux de puissance s'écoulaient de manière unidirectionnelle du poste source vers les consommateurs finaux. Du fait de l'insertion des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont impactés non seulement par les charges mais aussi par les sources. Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau peut avoir des impacts important sur son fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivantes.

#### III.10.1 Influence sur le plan de tension

La présence de générateurs PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible.

### III.10.2 Influence sur la qualité de l'énergie

- **Injection d'harmoniques de courant**

La présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale), ainsi les **THD** sont plus importants. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques : troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie.

- **Déséquilibre entre phases**

L'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT.

### III.11 Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques

Les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations des réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes.

Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs. Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques peuvent se résumer comme suit :

#### III.11.1 Régime de neutre et courants de fuite

Pour un régime de neutre de TT (point milieu du transformateur du poste de distribution à la terre, masse métallique des appareils à la terre). La protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différentiels qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant.

Les installations PV peuvent produire des courants de fuite du fait des caractéristiques capacitatives des panneaux, et des onduleurs (capacités des filtres MEC).

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

Ces capacités en présence d'une composante alternative sur le circuit à courant continu engendrent des courants de fuite dans la liaison de mise à la terre. Ces courants de fuite peuvent être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre.

### III.11.2 Creux de tension et tenue des systèmes

Les creux de tension sont ainsi l'une des principales causes de déclenchements des systèmes PV. La déconnexion d'un nombre important de systèmes PV pourrait avoir des impacts locaux et globaux sur le fonctionnement du réseau, en particulier sur des réseaux faibles.

### III.11.3 Présence de composante continue et d'harmoniques de tension

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent le courant continu issu des modules photovoltaïques en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM pour "Pulse Width Modulation") pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal.

Le fonctionnement des onduleurs sans transformateurs peut être affecté par une asymétrie des tensions du réseau (déformation de la sinusoïde par addition d'harmoniques paires), par exemple en présence d'harmoniques issues de charges non-linéaires, qui se traduirait par l'ajout d'une composante DC dans la tension injectée par l'onduleur.

### III.12 Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui illustré sur la figure (III.8). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

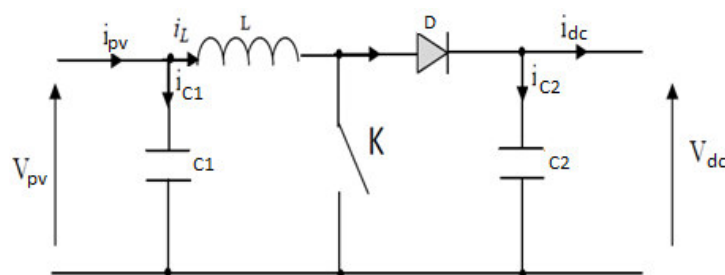
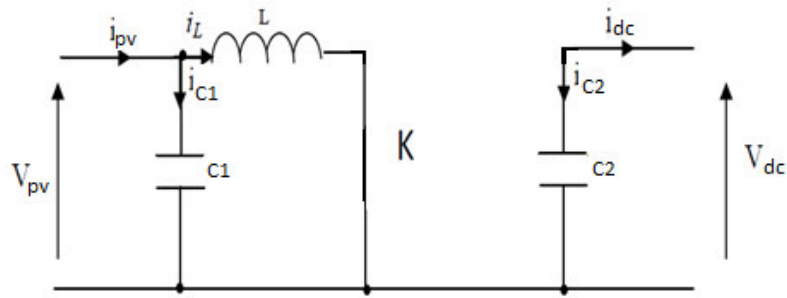


Fig III.8 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure III.9) des deux phases de fonctionnement donne :

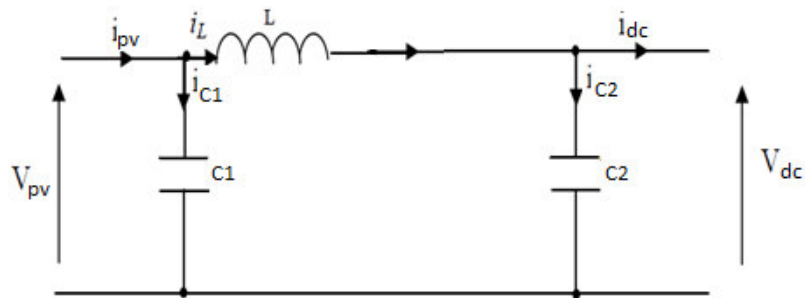
## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

---



**Figure (III.9.a) :** Schémas équivalents du hacheur survolteur

(a) : K fermé



**Figure (III.9.b) :** Schémas équivalents du hacheur survolteur

(b) :K ouvert

Pour la première période d.Ts :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = -i_{dc}(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_{pv} - R_L I_L \end{cases} \quad (III.1)$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = i_L(t) - i_{dc}(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_{PV}(t) - V_{dc}(t) - R_L I_L \end{cases} \quad (III.2)$$

Après un artifice de calcul, on obtient :

$$\begin{cases} i_L(t) = I_{pv}(t) - c1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} \\ i_{dc}(t) = (1 - d)i_L(t) - c2 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} \\ V_{pv}(t) = L \frac{di_L}{dt} + (1 - d)V_{dc}(t) \end{cases} \quad (III.3)$$

### III.13 Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (**PPM**) correspondent à la tension nominale de batterie de **12V** ou **24 V**. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (**GPV**) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques.

L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée. De nombreuses recherches sur les commandes (**MPPT**) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (**PPM**) selon l'évolution de la puissance fournie par le **GPV**. Les commandes (**MPPT**) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe, (**P&O**).

#### Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (**PPM**) le plus utilisé, et comme son nom l'indique, il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (**DC-DC**), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (**D**).

Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du générateur est supérieure à la valeur précédente  $P(k - 1)$  alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (**P et O**) est donné par la Figure (III.10).

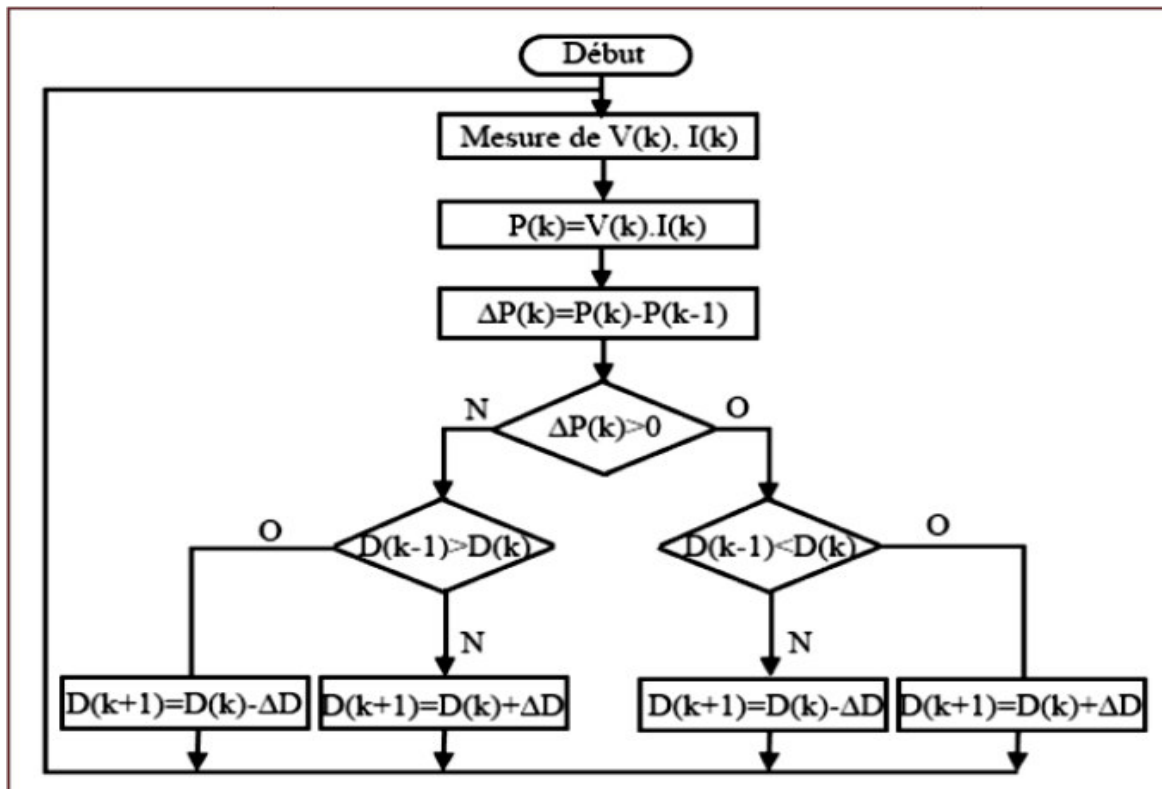


Fig III.10 : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)

### III.14 L'onduleur

Les onduleurs triphasés sont constitués de trois bras. Chacun d'eux se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue  $V_e$ .

Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, et se composent soit d'un thyristor et d'une diode en antiparallèle ou bien d'un transistor avec une diode en antiparallèle.

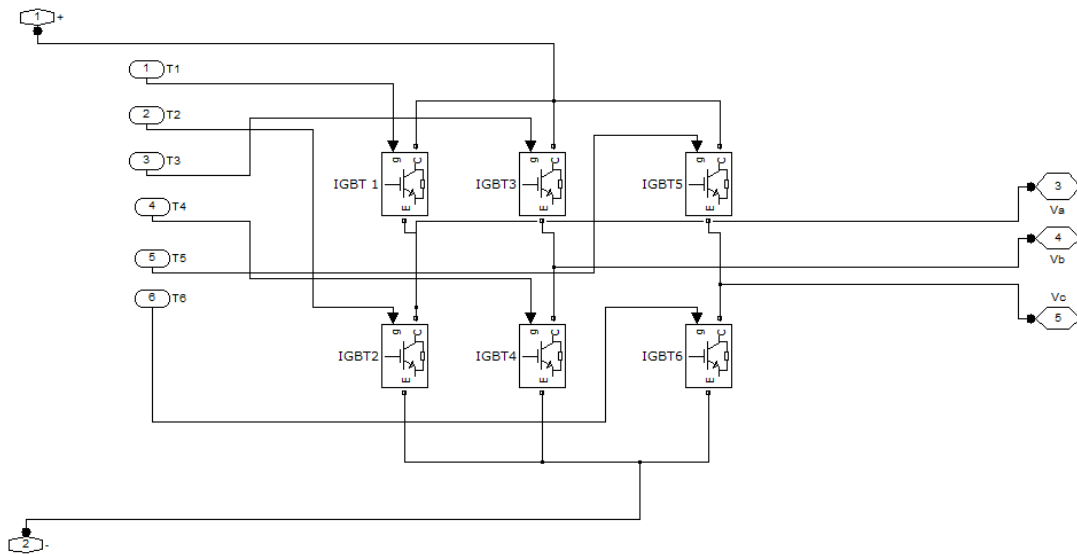


Fig III.11 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasé

### III.14.1 Principe de fonctionnement

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (**commande symétrique**) (adjacente), **Décalée** (disjointe), **MLI**....). Les différentes commandes ont pour but d'obtenir l'allure sinusoïdale au niveau de la sortie et pour chaque commande le principe de fonctionnement change.

### III.14.2 Commande MLI

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

## Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables

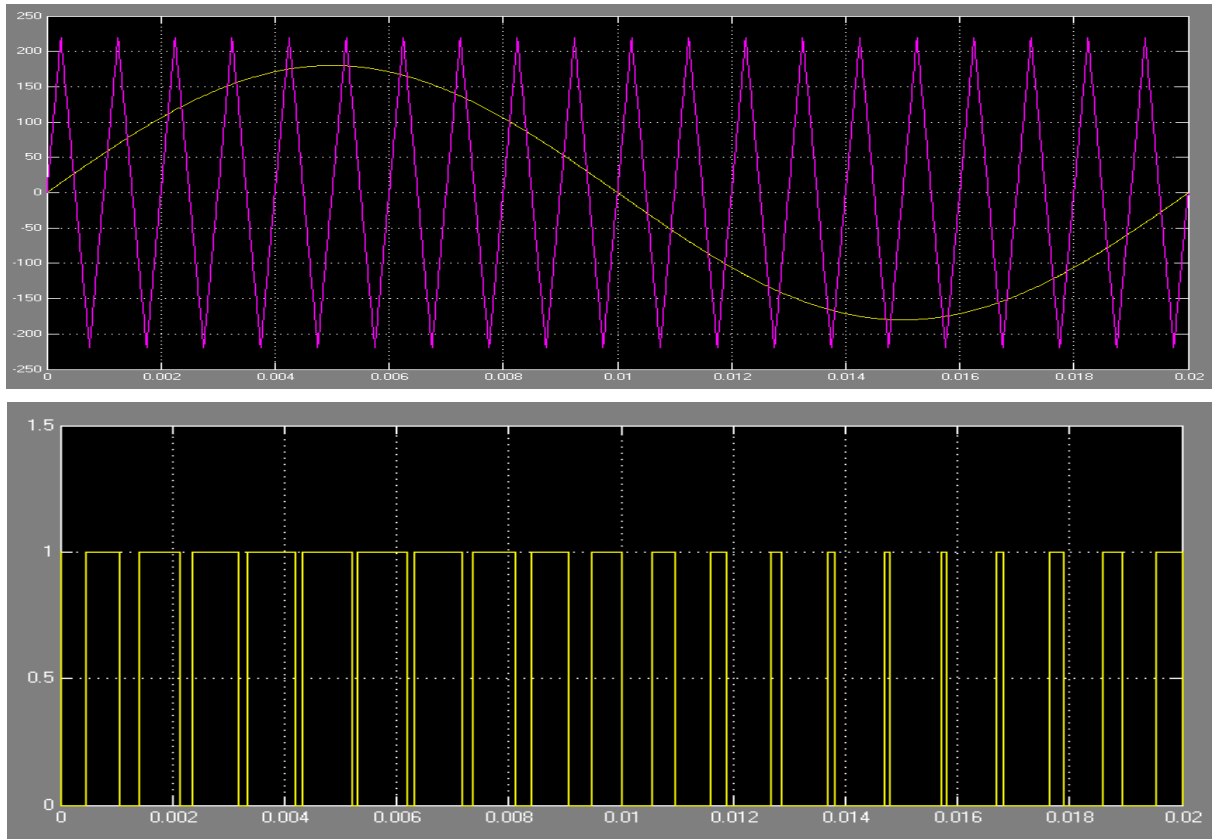


Fig III.12 : Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur

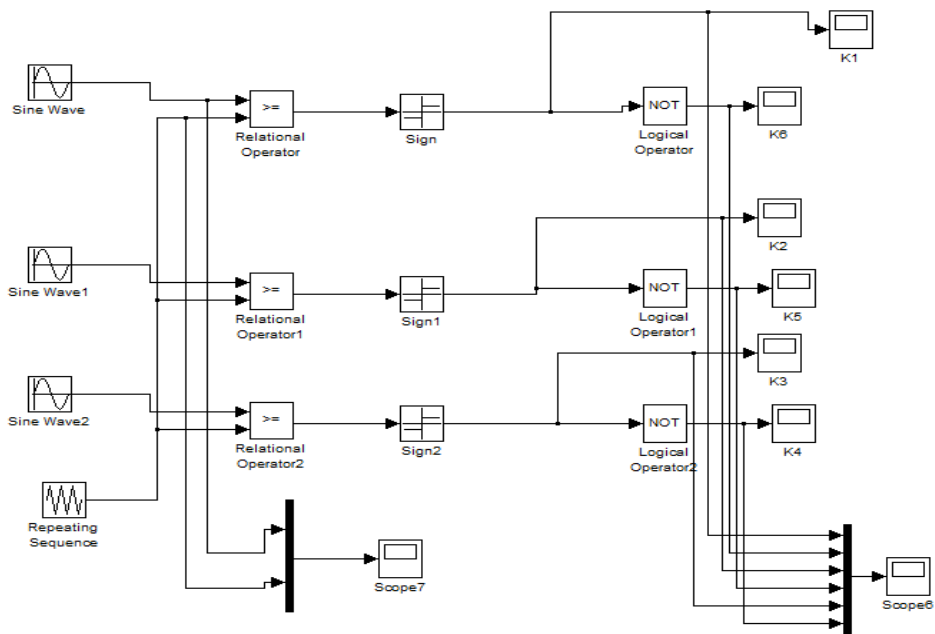


Fig III.13 : Schéma de simulation d'une commande MLI



## **Chapitre III : Problèmes et solution de l'insertion des ressources renouvelables**

---

### **III.15 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé en premier lieu les avantages et inconvénients des ressources du renouvelable qui ont été bien explicitées dans les chapitres précédents (I et II). Par la suite, nous avons mis en exergue les différents problèmes susceptibles de surgir dans l'insertion de ces ressources aux réseaux.

Il était évident d'apporter des éclaircissements que ces derniers sont dus à l'utilisation de nouveaux composants qui n'avaient lieu d'être présents dans le cas de l'utilisation des réseaux conventionnels. En général, comme cela a été indiqué dans les études de sûreté de fonctionnement, dans la recherche de la performance d'un système, on adjoint des équipements qui eux même peuvent constituer des points faible du même système.

Dans ce troisième chapitre nous avons aussi mis en évidence certains éléments utiles et indispensables aux schémas de la simulation sous Matlab du principe d'insertion des sources renouvelables aux réseaux qui va être développée au chapitre VI.

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons effectué une simulation d'une installation PV raccordée au réseau de distribution sous la librairie (Tool box) SimPowerSystems du logiciel Matlab. Nous avons ainsi présenté chaque étage du système depuis le générateur PV en passant par le hacheur boost commandé par la commande MPPT vers l'onduleur et finalement jusqu'à la charge. On a aussi modélisé la gestion d'équilibre (production-consommation) au niveau du centre de répartition.

### IV.2 Motivations particulières

Certes ce travail est destiné à toute application relevant de l'exploitation d'une source d'énergie propre et de son raccordement au réseau basse tension, c'est-à-dire touchant directement les consommateurs, mais dans ce qui suit nous allons citer deux cas réels qui de nos jours sont d'actualité et peuvent intéresser plusieurs personnes ou groupes de personnes. Comme indiqué dans l'introduction générale de ce travail, tout porteur de projet doit se positionner par rapport à quatre attributs, à savoir : les bénéfices, les opportunités, les risques et les coûts.

Ce travail nous donne l'opportunité de solutionner un problème d'actualité qui se pose dans les habitations résidentielles pour certains particuliers et aussi pour des promoteurs dans l'électrification des parties communes (voir les cages d'escaliers, les patios et les parkings).

#### IV.2.1 Appartement individuel dans une résidence

Pour des raisons de sécurité et d'économie, combien de personnes choisissent d'habiter dans des résidences offrant un bon confort et une sécurité comparée à des maisons individuelles isolées nécessitant un gardiennage et une présence en permanence de personnes. Le problème réside dans l'absence d'électricité en cas de coupure du réseau SONELGAZ. Certes, on aurait pensé à un groupe électrogène à fuel ou à gaz, mais cela aurait été considéré comme un signe distinctif de richesse que les gens préfèrent s'abstenir. Dans ce cas il ya lieu de leur proposer des installations PV sur une structure métallique servant d'abris pour leur terrasses d'un coté et produisant de l'énergie pour leur consommation.

#### IV.2.2 Promotions immobilières en général

Une simple enquête auprès des promoteurs, fait ressortir les problèmes de prise en charge des factures d'électricité des parties communes, telles que : les cages d'escaliers, les patios et les parkings. Même si ces dernières années, la notion de syndic est apparue et a fait ses preuves dans la gestion des promotions immobilières après acquisition des logements

par leur acquéreurs, les problèmes de cotisations pour honorer les factures d'électricité reste posé.

Ce travail apporte une solution durable, en proposant de raccorder directement les charges sus citées à un générateur photovoltaïque dont le coût d'installation est pris en charge initialement par le promoteur qui sera intégré dans le coût du bien immobilier.

### IV.2.3 Consommation de la charge

Dans notre simulation, nous avons évalué la charge à hauteur de 2kW. Elle découle de ce qui suit :

Pour les deux cas étudiés, la charge ne dépasse pas une consommation de 2 kW. En partant du principe qu'en général la SONELGAZ autorise l'installation d'un disjoncteur de 32A donc mettant à disposition d'un consommateur une puissance théorique de 6kVA. Cette puissance est déduite à partir d'un calcul simple, qui pour une tension de 220V et à un courant de 32 A, la charge peut atteindre 6kVA. Or dans une résidence donnée, la simultanéité de consommation peut être évaluée à 60% et pour un logement donné, l'utilisation des équipements est évaluée à un maximum de 60%, d'où un foisonnement de 36%. En définitif, la charge est estimée à 36% de 6kVA, et en considérant un facteur de puissance de 0,9, on aboutit à une consommation active moyenne de 2kW.

### IV.3 Modélisation du réseau avant l'insertion de Gpv

Le réseau de distribution considéré se compose de trois éléments, à savoir : la charge (le consommateur), la ligne de distribution et l'arrivée basse tension (jeux de barres de sortie du transformateur).

- **Modélisation de la charge** : étant donnée que cette dernière consomme une puissance variable, notre choix s'est porté sur le block << Three-Phase Dynamique Load >>. La configuration de ce dernier est représentée sur la figure IV.1

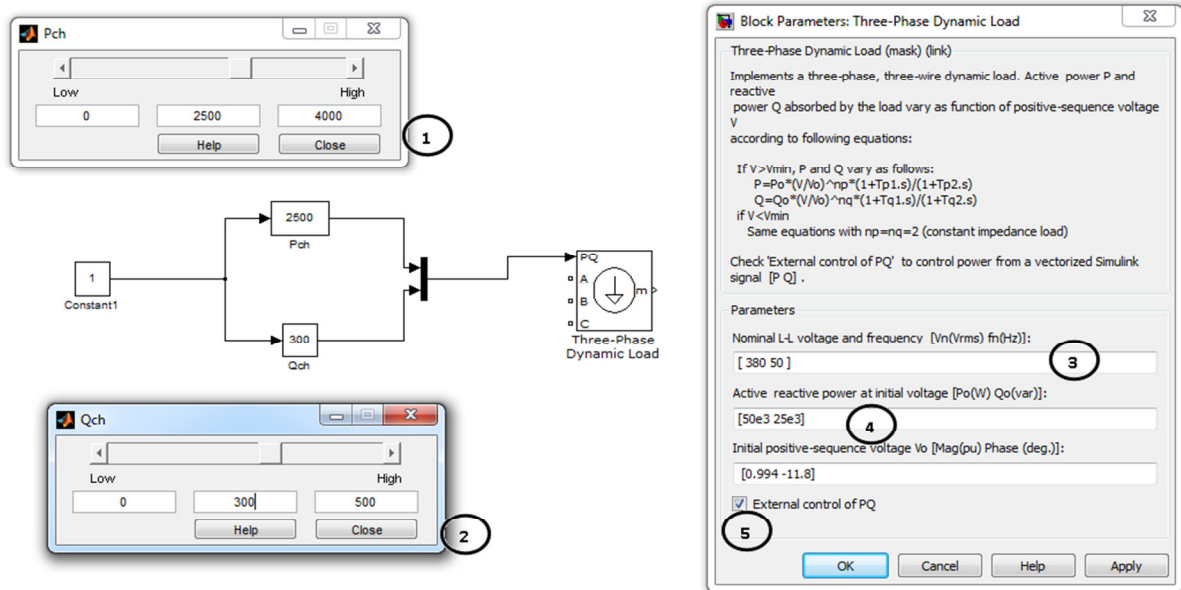
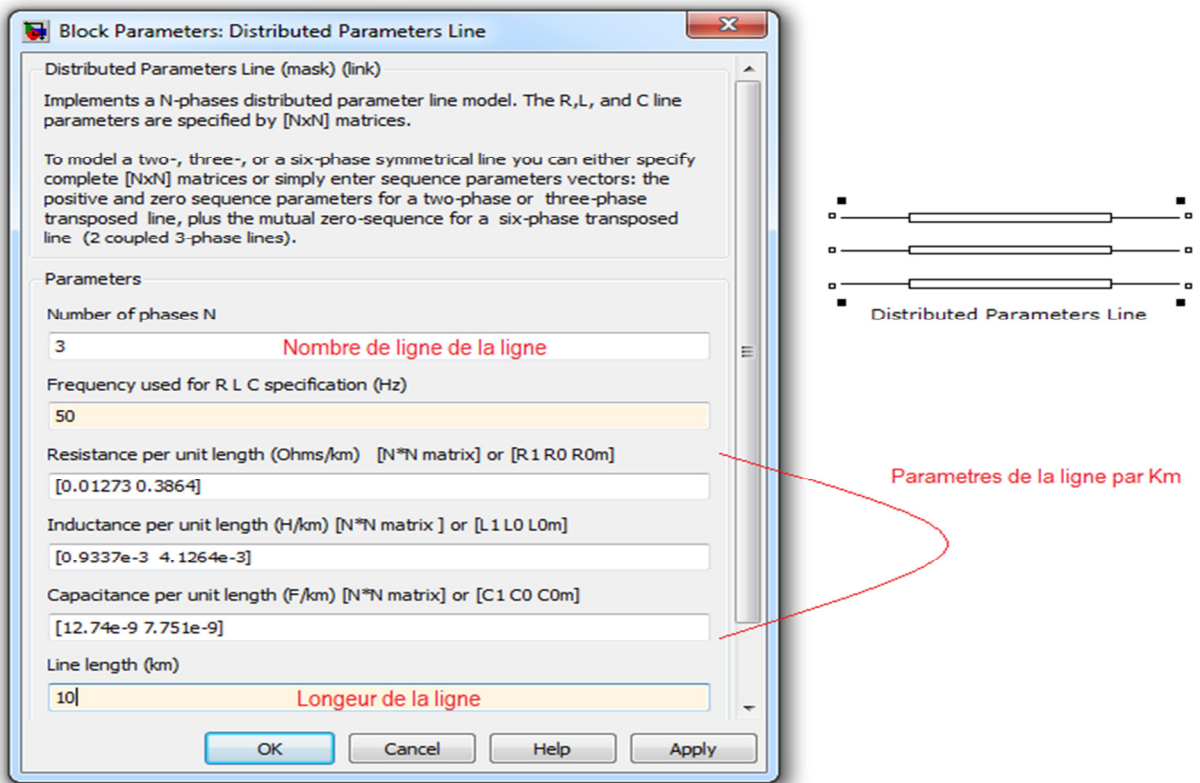


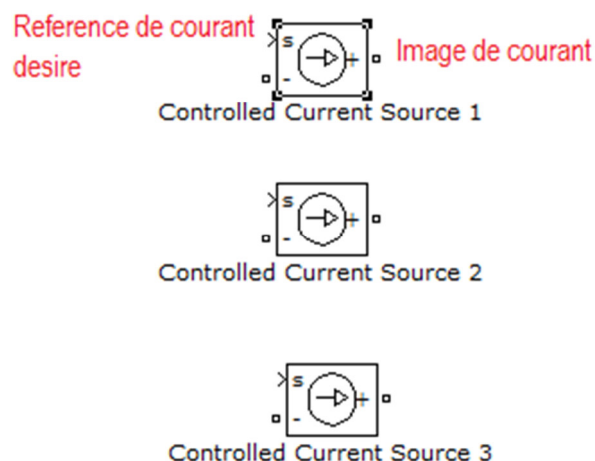
Fig IV.1 : configuration de la modélisation de la charge

- Légende :**
  - 1,2 : variation de  $P_{CH}$  et  $Q_{CH}$  respectivement par deux sliders,
  - 3 : Tension nominale et fréquence,
  - 4 :  $P_{CH}$  et  $Q_{CH}$  nominales,
  - 5 : Variation externe des puissances,
- Modélisation de la ligne de distribution :** Le bloc << Distributed Parametre Line>> simule le comportement d'une ligne de distribution à la longueur préalablement définie ou choisie.



**Fig IV.2** : Bloc, paramètres de la ligne par Km

- Modélisation de l'arrive basse tension** : La variation de la puissance est modélisée par une variation du courant sachant que dans la pratique, la tension reste fixe sur l'ensemble des charges. On a utilisé le bloc <<Controlled Current Source>> comme élément de conversion de la consigne d'entrée sous forme de signal (courant) sur le système SimPowerSystème.



**Fig IV.3** : Bloc arrivée basse tension

### IV.4 Modélisation de la source Gpv à insérer

Pour notre étude, on a choisi le modèle d'une installation qui nous fournit une puissance maximale dans les conditions STC  $P_m=2200$  W. Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{co}$ ,  $V_{mpp}$ ) sous les conditions standard de fonctionnement (un ensoleillement de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ ). Les paramètres du panneau photovoltaïque, de type SIEMENS SM 110-24, qui seront utilisés pour la simulation, sont regroupés dans le tableau IV.4.

Puissance maximale du panneau $P_{mpp}$	110 W
Courant au point de puissance maximale $I_{mpp}$	3.15 A
<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Tension au point de puissance maximale $V_{mpp}$	35 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	3.45 A
Tension en circuit ouvert $V_{cc}$	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{cc}$ ( $\alpha_{cc}$ )	1.4 mA/ $^\circ\text{C}$
Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{co}$ ( $\beta_{co}$ )	-152 mV/ $^\circ\text{C}$

**Tableau IV.4** : Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24.

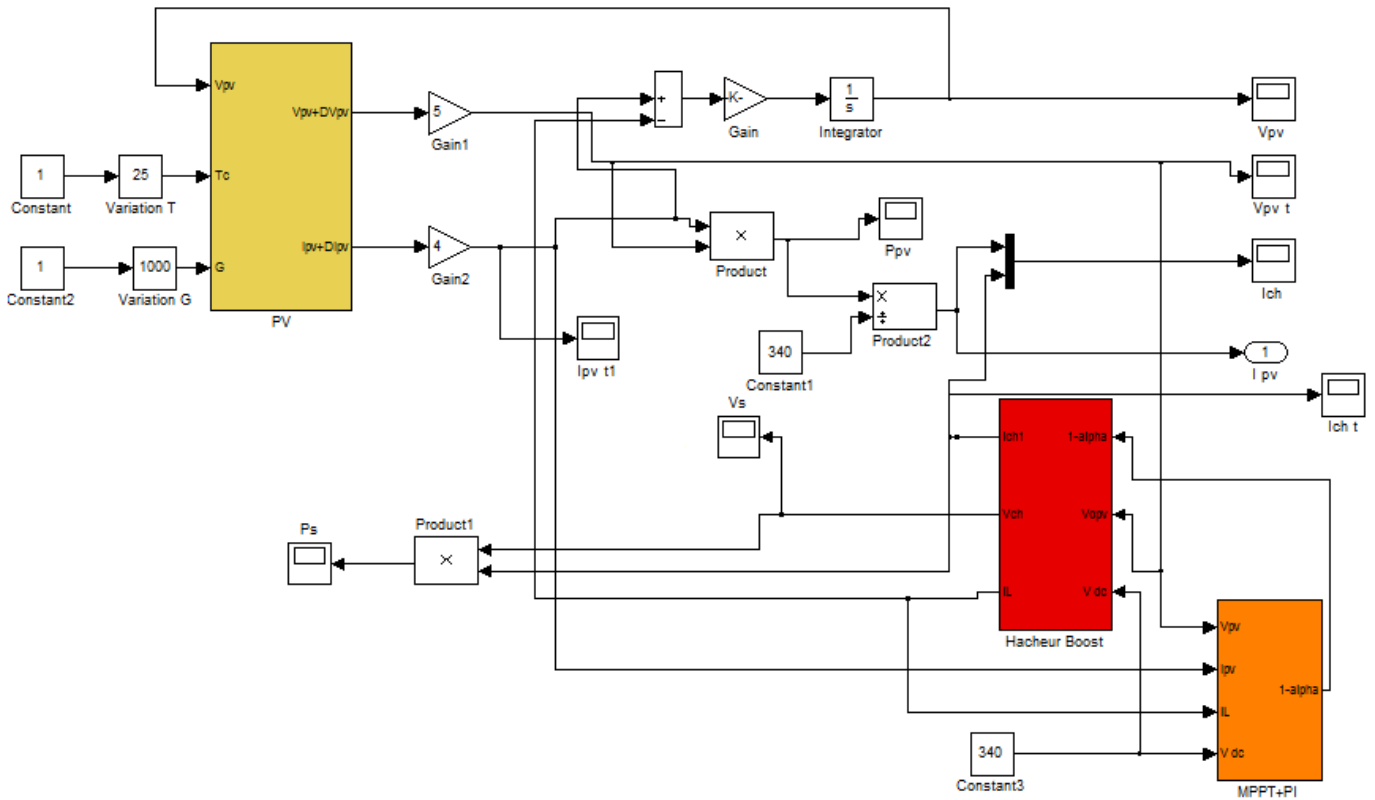
Pour obtenir la puissance désirée de  $P_m=2200$  W, on a mis en liaison 4 branches en parallèle de 5 panneaux en série  $N_s=5$ ,  $N_p=4$

La conversion est réalisée en deux étapes, à savoir : une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans cette configuration, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse fabriquer un courant sinusoïdal à la tension du réseau. Les fonctions demandées par les applications PV peuvent ici être réparties entre les deux convertisseurs.

Les convertisseurs de puissance hacheur et onduleur sont implantés pour les raisons suivantes :

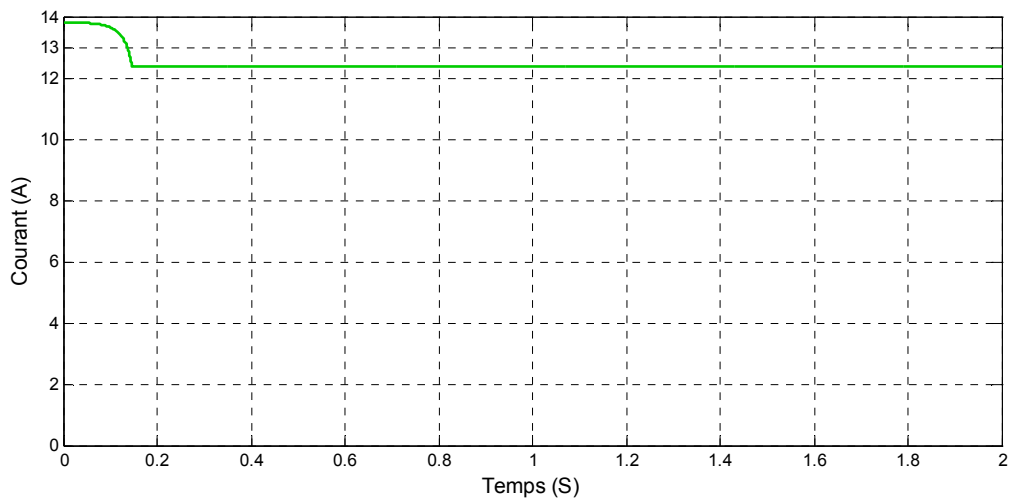
- Forcer le générateur photovoltaïque à fonctionner au point de puissance maximale,

- Produire le courant de sortie  $I_s$  sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau,
- Conversion de la puissance avec un rendement  $\eta$  plus proche de 100%.



**Fig IV.4 :** Schéma de la modélisation du Gpv

On a visualisé les différentes grandeurs de cette installation : courant  $I_{pv}$ , tension  $V_{pv}$  et la puissance  $P_s$  comme indiqué sur les figures IV.6, IV.7, IV.8.



**Fig IV.5 :** Courant de Gpv

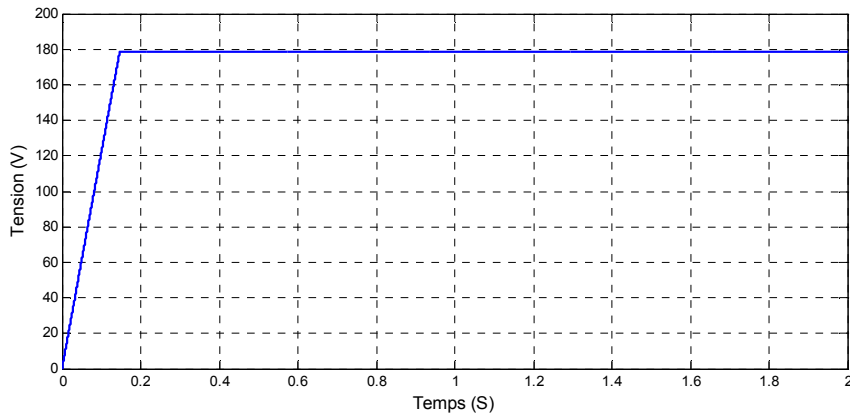


Fig IV.6 : Tension de Gpv

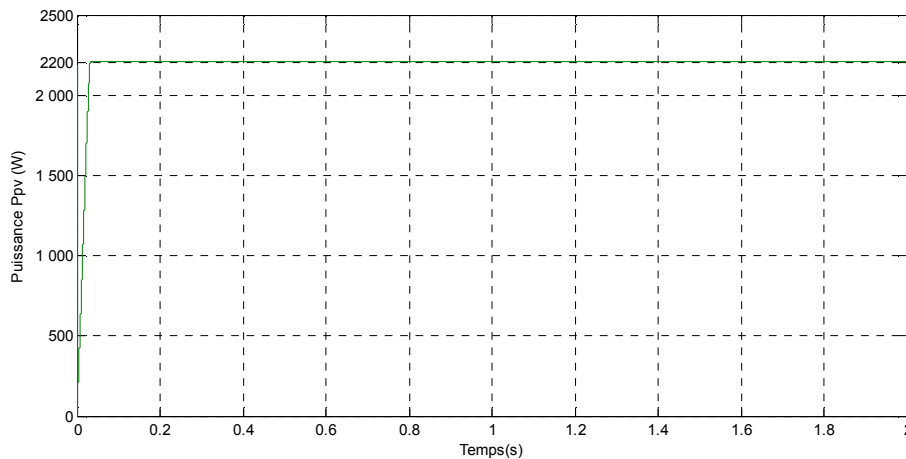


Fig IV.7 : La puissance délivre par le Gpv

➤ L'effet de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  est montré sur la figure (IV.9).

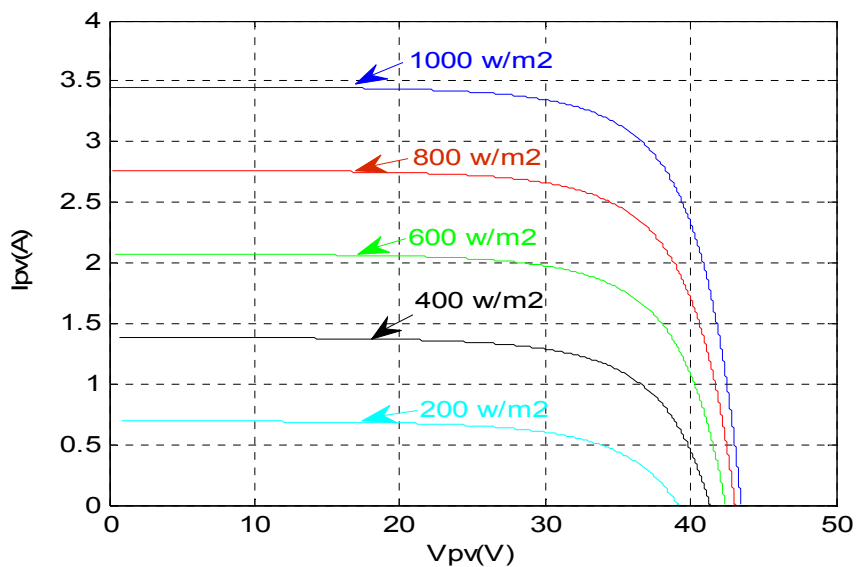


Fig IV.8 : Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ .



On remarque qu'à température constante, le courant augmente à mesure que l'ensoleillement augmente et que ce dernier ne semble pas influencer la tension de circuit ouvert indiqué sur la caractéristique.

- L'effet de la température sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  est montré sur la figure (IV.10).

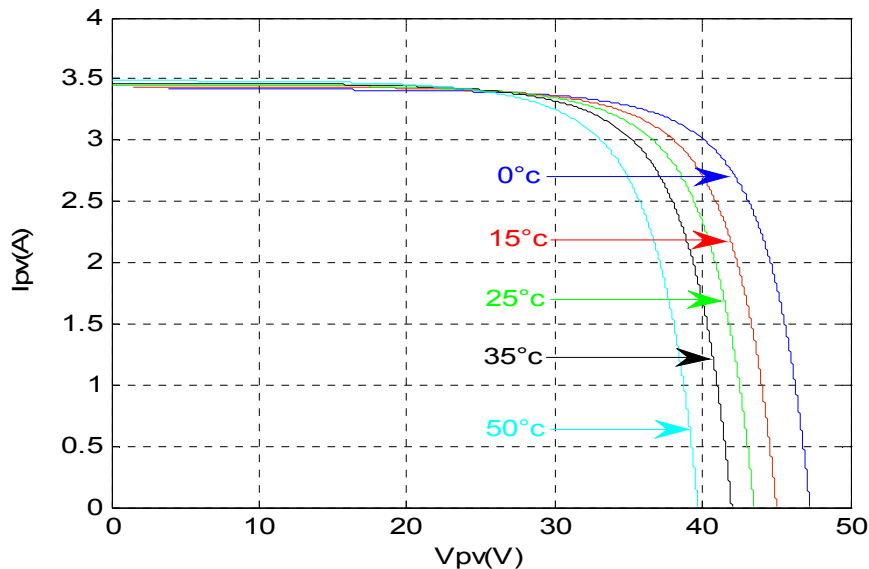


Fig I.V 9 : Effet de la température sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ .

En prenant l'ensoleillement constant et en faisant varier la température, on constate que c'est la tension de circuit ouvert qui varie légèrement en diminuant, quand la température augmente. Par conséquent, la puissance  $P_{pv}$  change considérablement avec la variation du niveau d'ensoleillement, alors que le changement est minime suivant la variation de la température. Ceci s'explique par le fait que le courant photovoltaïque varie considérablement avec la variation de l'irradiation, alors que la variation de la tension reste minime. Par contre, cette dernière varie considérablement avec la variation de la température.

### IV.5 Le gestionnaire du réseau

Ce dernier assure plusieurs tâches. Quant à notre travail, on a limité son apport à l'équilibre offre-demande, de manière à ajuster la puissance fournie au réseau en fonction de celle appelée par la charge.

Le bloc réalisé calcule les consignes à donner (imposer) au bloc d'alimentation (arrivée basse tension) en fonction de deux mesures, la puissance générée par le  $G_{pv}$  et la puissance appelée par la charge, telles que schématisées sur la figure (IV.11).

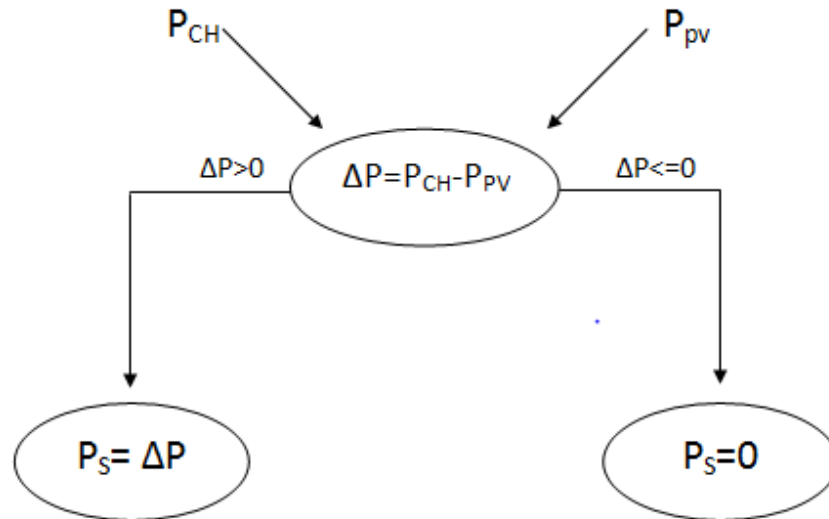


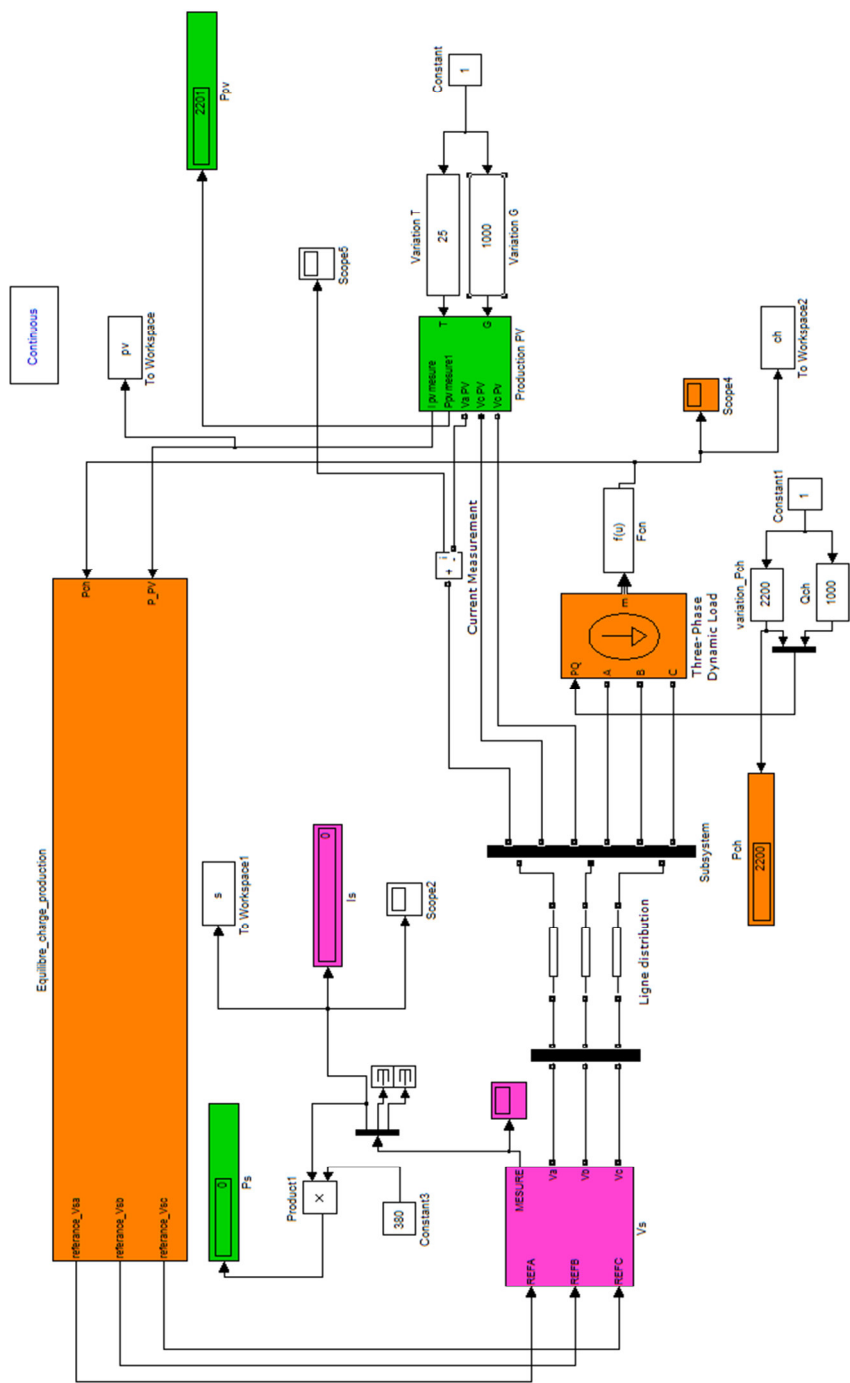
Fig IV.10 : principe de fonctionnement du bloc de gestion du réseau réalisé.

#### IV.6 Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation correspondent à cinq cas distincts selon la période de la journée.

- **1 cas** : on a considéré le  $G_{PV}$  en fonctionnement optimale (condition STC)

$G=1000W/m^2$ ,  $T=25\text{ C}^\circ$



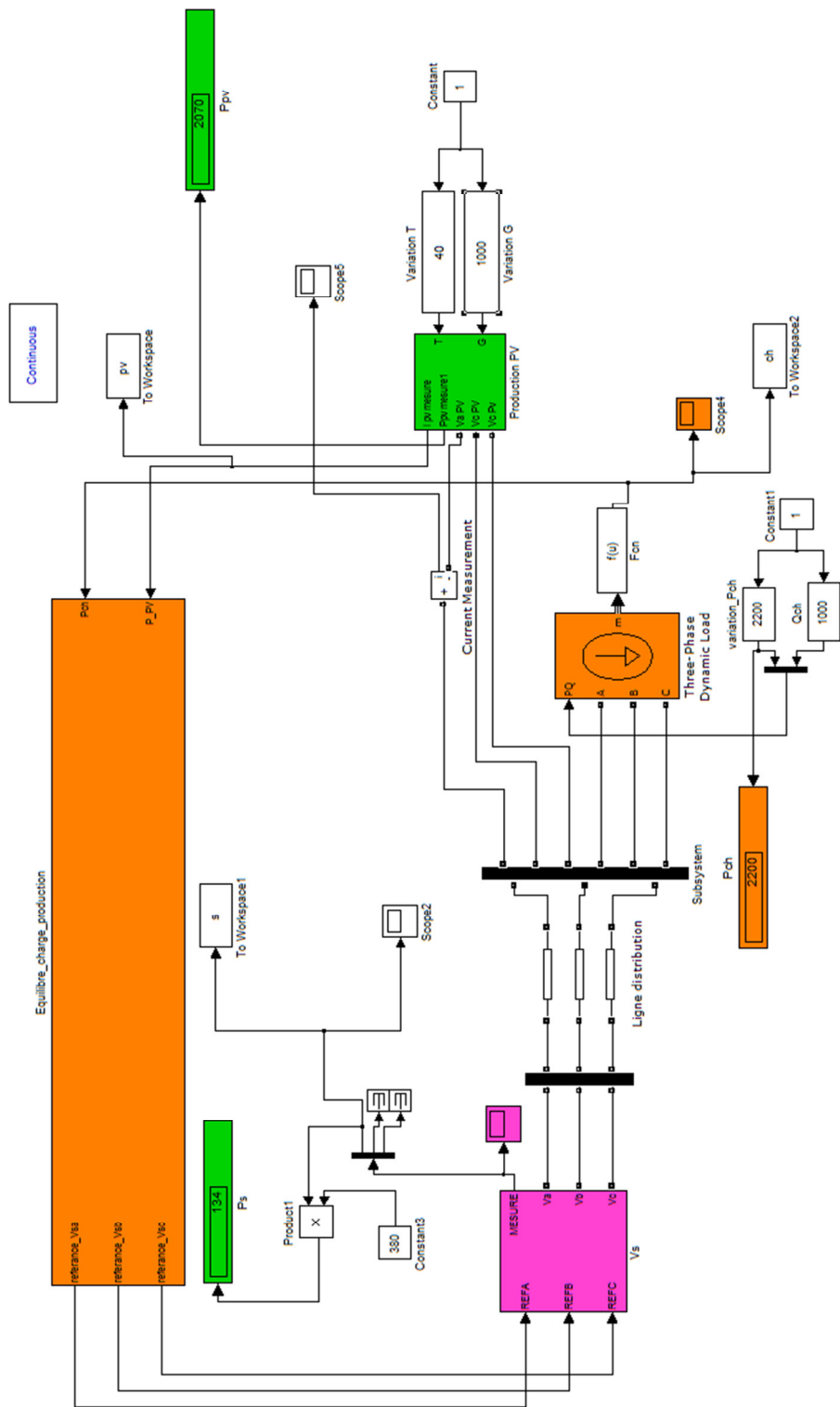
**Fig IV.11** : Simulation du premier cas.

On remarque que:  $P_{PV}=2200\text{ W}$  ,  $P_S=0\text{ W}$

La puissance récupérée du réseau est nulle car le  $G_{PV}$  satisfait la puissance appelée par la charge.



- 3<sup>ème</sup> cas : on a considéré les grandeurs suivantes :  $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=40 \text{ C}^\circ$



**Fig IV.13** : Simulation du troisième cas.

On remarque que  $P_{pv}=2070 \text{ W}$  et  $P_s=134 \text{ W}$ , donc on se situe dans le cas précédent.





### IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons énuméré des situations réelles vécues qui nous ont motivés pour procéder à des simulations de raccordement de sources d'énergie propres. Par la suite nous avons présenté les caractéristiques de variations des courants en fonction des tensions.

Pour finir nous avons imaginé quelques cas possibles traduisant des situations variables durant une même journée pour simuler l'apport de puissance et la demande de cette dernière par la charge pour montrer l'utilité du gestionnaire du réseau.



### Conclusion générale

L'orientation des sociétés qu'elles soient développées, immergentes ou sous développées vers le développement durable est conçue comme un impératif. Cela passe forcément par le développement des ressources d'énergies renouvelables. Chacun dans situation, et suivant la disponibilité de la source, les distributeurs d'énergie sont confrontés à la problématique de l'insertion de ces sources aux réseaux d'électricité conventionnels. Les plus avancés ont déjà effectué un grand pas dans l'intégration des technologies nouvelles de communication et d'information aux réseaux donnant ainsi naissance aux smart grids.

Ce passage est obligatoire car il offre l'opportunité d'exploiter d'une manière aisée les sources suscitées et encourage le développement de la production décentralisée. Nous assistons ainsi à un changement catégorique dans la conception même des réseaux. Comme indiqué dans l'intitulé de notre projet, portant sur la maîtrise de cette thématique, nous avons tenté d'apporter une modeste contribution, à savoir : la vulgarisation des énergies renouvelables, par l'accès à la connaissances des aboutissements actuels donnés sous forme d'état d'art, la mise en exergue des caractéristiques de trois principales sources, eu égard à leur disponibilité dans notre pays, et enfin la mise en exergue des motivations réelles qui poussent un jeune universitaires à mettre à profit la société de par l'apport de cette énergie dans des conditions de vie quotidienne. Certes, la valorisation passe essentiellement par la mise en pratique des recommandations sur des cas réels, mais il ya lieu de souligner l'intérêt de la simulation en passant par l'implémentation de certains modèles sous logiciel Matlab.

Ce modeste travail, ouvre une voie parmi d'autres pour mieux comprendre l'impact des sources volatiles et instables sur le réseau électrique déjà mis en place. Il ya lieu de souligner que des perspectives de recherches se dégagent ayant trait à l'impact de ces sources sur la tarification de l'énergie ou en général sur le marché d'électricité, sur la contribution du consommateur en devenant un consom-acteur et surtout les différents impacts sur les cotés social et environnemental qui de par nature sont des chasses gardées des spécialistes de l'environnement et du social.

## LISTE DES FIGURES

---

Fig I.1 : Consommation d'énergie dans le monde, 2014 [1] .....	3
Fig I.2 : Répartition de la consommation d'énergie par secteur (2014) [2] .....	4
Fig 1.3 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [4] .....	4
Fig 1.4 : Puissance PV installée dans le monde jusqu'en 2013 [7] .....	6
Fig 1.5 : Puissance éolienne installée dans le monde jusqu'à 2013 [7] .....	8
Fig II.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol .....	18
Fig II.2: Principe de la conversion photovoltaïque .....	19
Fig II.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec charge .....	21
Fig II.4 : Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque .....	23
Fig II.5 : Module photovoltaïque .....	24
Fig II.6: Schémas de principe de différentes topologies d'installations PV connectés à un réseau électrique .....	27
Fig II.7 : structure de conversion multi-string mixte .....	28
Fig II.8 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal [42] .....	31
Fig III.1 : Courant en régime permanent avant et après raccordement d'un producteur sur réseau de distribution .....	42
Fig III.2: Creux de tension et coupure brève .....	44
Fig III.3 : Exemple de Surtension .....	45
Fig III.4 : Fluctuations de tension .....	46
Fig III.5 : Variation de fréquence .....	47
Fig III.6 : déséquilibre du système triphasé de tension.....	47
Fig III.7: Exemple d'harmoniques .....	48
Fig III.8 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost .....	52
Fig III.9.a : Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	52
Fig III.9.b : Schémas équivalents du hacheur survolteur .....	52
Fig III.10 : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).....	54
Fig III.11 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasé.....	55
Fig III.12 : Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur .....	56
Fig III.13 : Schéma de simulation d'une commande MLI .....	56
Fig IV.1 : configuration de la modélisation de la charge .....	59
Fig IV.2 : Bloc, paramètres de la ligne par Km.....	60
Fig IV.3 : Bloc arrivée basse tension .....	61
Fig IV.4: Schéma de la modélisation du Gpv .....	62
Fig IV.5 : Courant de Gpv.....	63
Fig IV.6 : Tension de Gpv .....	63
Fig IV.7 : La puissance délivre par le Gpv .....	63
Fig IV.8 : Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ . .....	64

## LISTE DES FIGURES

---

Fig IV.9 : Effet de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .....	64
Fig IV.10 : principe de fonctionnement du bloc de gestion du réseau réalisé.....	65
Fig IV.11 : Simulation du premier cas.....	66
Fig IV.12 : Simulation du deuxième cas.....	67
Fig IV.13 : Simulation du troisième cas .....	68
Figure IV.14 : Simulation du quatrième cas. ....	69
Fig IV.15 : Simulation du cinquième cas.....	70

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

### Références bibliographiques

- [1]: Statistical review of world energy 2014, British Petroleum (BP), <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/electricity.html>
- [2] : Source SOeS 2014 (Service de l'observatoire et des statistiques).
- [3] : Riffonneau, Y., « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque Avec stockage, connecte au réseau », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, G2ELAB, Grenoble, France, soutenue en 2009
- [4] : Hydro power, Alternative Energy News, 2010, [réf de janvier 2013], disponible Sur: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/>
- [5] : <http://www.futura-sciences.com/energie-renouvelable-energie-hydroelectrique>
- [6] : Mehdi *Merad-Boudia*, <<Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique>>, Université de Tlemcen Abou Berk Belkaid, 2010
- [7] : dd magazine le développement durable en pratique
- [8]: Luque, A. and Hegedus, S., « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons.
- [9] : Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies Ile-de-France.
- [10] : [www.planete-energies.com](http://www.planete-energies.com)
- [11] : Direction Générale de l'Energie et du Climat, L'industrie des énergies décarbonées en 2010. [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Biomasse\\_energie.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Biomasse_energie.pdf)
- [12] : [http://www.energies-renouvelables.org/energies\\_marines.asp](http://www.energies-renouvelables.org/energies_marines.asp)
- [13] : Réseau sortir du nucléaire : <http://reporterre.net/Cinq-ans-apres-Fukushima-l-Allemagne-sort-sans-trop-de-mal-du-nucleaire>
- [14] : COP21 : <http://www.gouvernement.fr/special-cop-21-les-engagements-nationaux-de-la-france-3390>
- [15] : COP21 : <http://macop21.fr/contributions/united-states/>
- [16] : COP21 : <http://macop21.fr/contributions/china/>
- [17] : CDER : <http://portail.cder.dz/spip.php?article4565>

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

**[18]** : L.Styanov et al, (2007). « *Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelable* » Equipe Energies Renouvelables, Laboratoire SPE UMR, CNRS 6134, Université de Corse, Centre Scientifique de Vignola, Route des sanguinaires, 2000 Ajaccio, France.

**[19]** : B. Paris et al, (2010) « Programmation linéaire pour la gestion de l'énergie électrique d'un habitat ». IBPSA. Moret-sur-Loing, France.

**[20]**: Snezana Tilvoska et al, (2012). « Power consumption analyzes with mathematical models into the overall electrical network». University "St.kiril and Metodij", Skopje, the Former Yugoslav Republic of Macedonia

**[21]**: C.T.M. Clack et al, (2013). «Linear programming techniques for developing an optimal electrical system including high-voltage direct-current transmission and storage». Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), University of Colorado.

**[22]** : Philippe Dessante. Optimisation, conception et modélisation des systèmes électrotechniques. Physique des plasmas [physics.plasm-ph].Université Paris Sud - Paris XI, 2012.

**[23]**: S. HOUNDEDAKO et al, (2014). «Étude pour synchronisation des réseaux électriques de la communauté électrique du Benin (CEB) FEMTO-ST Département Energie, Université de Franche-Comté, France.

**[24]** : Solucom Energystream, Le blog Energie des consultants Solucom.<http://www.energystream-solucom.fr/2014/02/la-decouverte-de-la-production-decentralisee>

**[25]** : Gil H.A. and Joos, G., Models for quantifying the economic benefits of distributed generation, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 327-335, 2008

**[26]** : Richardot, O., "Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée", Thèse de doctorat, INP Grenoble, soutenue en 2006.

**[27]** : Gilbert NAUDET et Paul REUSS, Energie, électricité et nucléaire, EDP Sciences, France 2008

**[28]** : Jean Claude SABONNADIERRE, Nouridine HADJ-SAID, ligne et réseaux électrique, Lavoisier Paris 2003

**[29]** : Asif HAMMOUD, Etude des convertisseurs haute tension pour la protection et la coordination des réseaux de distribution, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Oct 2010

**[30]** :Dr.Ing.Dhaker ABBES Intégration des énergies renouvelable aux réseaux électrique Ecole des haute études d'Ingénierie HEI-Lille.France

**[31]**: SMART GRIDS-CRE

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=technologiesintroduction>

**[32]** : SmartGrids – CRE, "U-City : mutualisation des infrastructures de communication et partage de l'information, 2011, [réf de août 2013] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=smartcities-u-city>

**[33]** : José Miguel Navaro «Cellules organiques transparentes dans le visible» Thèse de Doctorat .Université de Toulouse III, 2008.

**[34]** : Z.Benjellouli « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de magistère université de Bechar .Algérie 2009.

**[35]** : Dr. Belaid Lalouni Sofia «Cours Energie Solaire Photovoltaïque» Université de Bejaia, <http://elearning.univ-bejaia.dz/2015>

**[36]** : N. Debili << Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque>> mémoire magister université Constantine I

**[37]** : F.Slama ; « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Mémoire de magister ; université Ferhat Abbas, Sétif. 2011.

**[38]** : S.Petibon «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques» Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008 .

**[39]** : A. Labouret , M. Viloz «Energie solaire photovoltaïque» Edition Dunod, 2006.

**[40]** : Vighetti Stéphane «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion» Thèse Doctorat Université de Grenoble ,2010.

**[41]** : S. Lalouni. Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie, Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2005

**[42]** : B. Robyns (responsable) et S. Labrique (réalisation), site: [www.e-lee.net](http://www.e-lee.net) « Composants classiques d'une éolienne », consulté juin 2009.

**[43]** : L. Leclercq « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France 2004.

**[44]**: A. Grauers – « Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines», Technical Report No. 292, Chalmers University of Technology ,Göteborg, Sweden, 1996.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [45]: A. Tounzi – « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp.1-14.
- [46]: L. Chang – « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [47]: F. Poitiers – « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [48]: A. Davigny « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.
- [49]: A. Tounzi « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp.1-14.
- [50]: H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.
- [51]: E. Muljadi, K. Pierce et P. Migliore « Control strategy for variable-speed, stall regulated wind turbines », American Controls Conference, Philadelphia, PA , Juin 24-26, 1998.
- [52]: L. Chang « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [53]: F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [54]: F. A. Farret, B. Palle et M. G. Simoes– « Full expandable model of parallel self-excited induction generators », IEE Proc-Electr, Power Appl, vol 152, No 1, January 2005.
- [55]: O. Gergaud, B. Multon et H. Ben Ahmed – « Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance », Electrotechnique du Futur, Nancy, France, 14-15 Novembre 2001, pp. 1-6.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---