

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2018/2019

Faculté: Sciences de l'ingéniorat  
Département: Electrotechnique

**MEMOIRE**

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : **MASTER**

**Intitulé**

**Etude et simulation d'une machine asynchrone alimentée par  
un système de production d'énergie photovoltaïque**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité: Commande électrique**

**Par : REDJEB Roukaia**

**DEVANT Le JURY**

<b>Président :</b>	<b>CHINE A/Ghani</b>	<b>MAA</b>	<b>UBMA</b>
<b>Directeur de Mémoire :</b>	<b>SOLTANI Fatma</b>	<b>MCA</b>	<b>UBMA</b>
<b>Examineur :</b>	<b>MERABET leila</b>	<b>MCA</b>	<b>UBMA</b>
	<b>MOUHAMMEDI Moufid</b>	<b>MCB</b>	

## ***Remerciements :***

*Tout d'abord je tiens à remercier Madame **SOLTANI Fatma** Maitre de conférence A à l'université de Badji Mokhtar Annaba pour l'encadrement qu'il m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Elle trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance profonde.*

*Par ailleurs, je tiens à exprimer mes vifs remerciements au président du jury Monsieur **CHINE A/Ghani**, Maitre de conférence A à l'université Badji Mokhtar Annaba.*

*Je remercie sincèrement Monsieur **MERABET Leila** Maître de Conférences A à l'université de Badji Mokhtar Annaba, Monsieur **MOUHAMMEDI Moufid** Maître de Conférences B à l'université Badji Mokhtar Annaba d'accepter de faire partie du Jury.*

*Je tiens également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Dédicace :*

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé  
de m'encourager que Dieu me les garde.

Toute ma famille

# SOMMAIRE

---

## SOMMAIRE :

### CHAPITRE I LES ENERGIES RENOUVELABLES

I. Introduction .....	1
I.1. Les différents types d'énergie renouvelables .....	2
I.1.1.Génération de la chaleur.....	2
I.1.1.1L'énergie Biomasse.....	2
I.1.1.2.L'énergie géothermique .....	3
I.1.1.3.L'énergie solaire thermique .....	5
I.1.2.Génération d'électricité .....	7
I.1.2.1.L'énergie éolienne.....	7
I.1.2.2.L'énergie hydraulique .....	10
I.1.2.3 L'énergie photovoltaïque .....	11
I.2. CONCLUSION.....	14

### CHAPITRE II L'ENERGIE SOLAIRE

II.1 Introduction .....	15
II.2 Potentiel solaire en Algérie : .....	15
II.2.1 bilan des réalisations : .....	17
II.3 L'énergie solaire et l'effet photovoltaïque : .....	18
II.3.1 Spectre solaire : .....	19
II.3.2 Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur :.....	21
II.3.3 Angle d'inclinaison :.....	23
II.4 La cellule photovoltaïque :.....	25

## SOMMAIRE

---

II.4.1 Historique : .....	25
II.4.2 Définition : .....	25
II.4.3 Différents types de cellules : .....	26
II.4.3.1 Cellule photovoltaïque en silicium amorphe : .....	26
II.4.3.2 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin : .....	27
II.4.3.3 Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin : .....	28
II.4.3.4 Cellule photovoltaïque tandem : .....	29
II.4.4 Technique de fabrication : .....	30
II.4.5 Structure d'une cellule photovoltaïque : .....	30
II.4.6 Principe de fonctionnement d'une cellule PV : .....	31
II.5 Association des cellules (le panneau solaire) : .....	32
II.5.1 Groupement en série : .....	32
II.5.2 Groupement en parallèle : .....	33
II.5.3 Le Générateur photovoltaïque (Groupement mixte) .....	34
II.6 Rendement maximal d'une cellule PV : .....	36
II.7 Les avantages et Les inconvénient d'une installation PV : .....	37
II.8 Conclusion : .....	39

### CHAPITRE III MODELISATION D'UN PANNEAU PV

III.1 Introduction : .....	40
III.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque : .....	40
III.2.1 Modèle mathématique : .....	40
III.3 Modélisation d'un panneau photovoltaïque : .....	44
III.3.1 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque : .....	44
III.4 Calcul de $R_s$ et $R_p$ : .....	46

## SOMMAIRE

---

III.5 Evaluation de facteur de qualité :.....	48
III.6 Résolution de l'équation $I=f(V)$ :.....	48
III.7 Simulation :.....	49
III.7.1 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement constante :.....	50
III.7.2 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable :.....	52
III.7.2.1 L'influence de l'éclairement :.....	53
III.7.3 L'influence de la température :.....	54
III.7.4 L'influence de la résistance série $R_s$ et parallèle $R_p$ :.....	56
III.7.4.1 L'influence de la résistance série :.....	56
III.7.4.2 L'influence de la résistance parallèle .....	57
III.8 Conclusion .....	58

## CHAPITRE IV ALIMENTATION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE PAR UN PANNEAU

IV.1 Introduction :.....	60
IV.2 Présentation de la structure du système photovoltaïque :.....	60
IV.3 Convertisseur continu-alternative :.....	61
IV.4 Classification des onduleurs :.....	62
IV.5 Modélisation de l'onduleur triphasé :.....	63
IV.6 Types de commande :.....	64
IV.6.1 Commande plein onde :.....	64
IV.6.2 Commande décalée :.....	65
IV.7 Principe de la commande à MLI des onduleurs triphasés :.....	65

## SOMMAIRE

---

IV.8 Modulation à largeur d'impulsion : .....	65
IV.8.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion : .....	66
IV.8.2 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion : .....	66
IV.9 Qualité de l'énergie électrique : critères et définitions : .....	68
IV.9.1 Creux de tension et coupures : .....	68
IV.9.2 Surtension temporaires ou transitoires : .....	70
IV.9.3 Fluctuation lente de la tension (flicker) : .....	71
IV.9.4 Déséquilibre du système triphasé de tensions : .....	71
IV.9.5 Variations de la fréquence : .....	72
IV.9.6 Harmoniques et inter harmoniques : .....	73
IV.10 Caractéristiques d'un signal : .....	73
IV.10.1 Rang d'un harmonique [24] : .....	73
IV.10.2 Représentation spectrale : .....	74
IV.10.3 Analyse de Fourier : .....	75
IV.10.4 Taux de Distorsion THD : .....	76
IV.10.5 Les principales sources d'harmoniques : .....	77
IV.10.6 Effet des harmoniques : .....	77
IV.10.7 Les principales sources d'harmoniques : .....	78
IV.10.8 Effet des harmoniques : .....	79
IV.11 Constitution de la machine asynchrone .....	79
IV.12 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone : .....	80
IV.13 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone : .....	80
IV.14 Hypothèses : .....	81
IV.15 Modèle dynamique de la machine asynchrone : .....	81

## SOMMAIRE

---

IV.16 Transformation de Park .....	84
IV.17 Transformation de Park appliqué au moteur asynchrone : .....	85
IV.18 Simulation globale du système PV : .....	87
IV.18 .1 Résultats de simulation : .....	87
Réponse du système dans le régime permanent : .....	88
IV.18 .2Interprétation des résultats : .....	95
IV.19.Conclusion .....	97



## Liste des figures

---

### CHAPITRE I LES ENERGIES RENOUVELABLES

Figure I.1 l'énergie de biomasse.....	3
Figure I.2. L'énergie géothermique .....	4
Figure I.3. L'énergie solaire thermique .....	6
Figure I.4. L'énergie éolienne .....	7
Figure 5. Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	8
Figure 6 l'nergie solaireFigure I.7 L'énergie solaire .....	12

### CHAPITRE II L'ENERGIE SOLAIRE

Figure .II.1 Potentiel solaire [9].....	16
Figure II.2 Programme d'électrification des 18 villages .....	17
Figure .II.3 rayonnement solaire.....	18
Figure .II.4 Déférent inclinaisons du soleil.....	19
Figure II.5 Spectre du corps noir et solaire à différents angles d'inclinaison a par rapport à l'horizon.....	21
Figure II.6 Schéma caractérisant les trois bandes dans un matériau semi Conducteur.	22
Tableau. II.2.Valeurs de la bande interdite pour différents semi-conducteurs ...	22
Figure II.7 Angle d'inclinaison .....	24
Figure II.8 Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.....	27
Figure II.9 Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.....	28
Figure II.10 Structure d'une cellule PV .....	31

## Liste des figures

---

Figure II.11. Caractéristique résultante d'un groupement en série de <b>N<sub>s</sub></b> cellules identiques .....	32
Figure 13 Figure II.12 Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de <b>N<sub>p</sub></b> cellules identiques .....	33
Figure. II.13 Caractéristique résultante d'un groupement mixte .....	35

### CHAPITRE III MODELISATION D'UN PANNEAU PV

Figure 1 Figure III.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle .....	41
Figure 2 Figure III.2 les différentes zones de la Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle. ....	42
Figure 3 Tableau. II.1 caractéristiques électriques du module SIT, SI1632G1 .....	50
Figure 4 Figure. III.5 Schéma de simulation d'un PV .....	51
Figure III.6 caractéristique $I=f(v)$ d'un panneau solaire .....	51
Figure III.7 caractéristique $P=f(v)$ d'un panneau solaire .....	52
Figure III.7.a) caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes irradiations solaires à température constante égale à 25°C .....	53
Figure III.7.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements solaires à température constante égale à 25°C .....	54
Figure III.8.a) caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal à 1000 w/m <sup>2</sup> . ....	55
Figure III.8.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal 1000 w/m <sup>2</sup> . ....	55

## Liste des figures

---

Figure III.9.a) caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes résistances série à température constante égale à $25^{\circ}\text{C}$ et éclairement constant égal $1000\text{ w/m}^2$ .....	56
III.9.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes résistances série à température constante égale à $25^{\circ}\text{C}$ et éclairement constant égal $1000\text{ w/m}^2$ .....	57
III.10.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes résistances parallèles à température constante égale à $25^{\circ}\text{C}$ et éclairement constant égale $1000\text{ w/m}^2$ .....	58

### CHAPITRE III MODELISATION D'UN PANNEAU PV

Figure IV.1 Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	64
Figure IV.2 Principe de la modulation.....	66
Figure IV.3 Creux de tension et coupures brèves.....	70
Figure IV.4 Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases.....	71
Figure IV.6 Représentation des intes et infra harmoniques.....	73
Figure IV.7 Harmonique de rang 3.....	74
Figure IV.8 spectre d'harmonique.....	75
Figure IV.9 Représentation électrique de la machine asynchrone.....	80
Figure. IV.10 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	80
Tableau IV.2 : Les avantages et les inconvénients de moteur asynchrone. ....	81
Figure IV.11 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....	82
Figure IV.12 Modèle de Park de la machine asynchrone.....	85
Figure IV.13 Représentation vectorielle des enroulements du Moteur Asynchrone.....	86
Figure IV.14 Simulation globale du système PV.....	87

## Liste des figures

---

Fig. IV-15. Tension continue alimentant l'onduleur de tension .....	88
Fig. IV-16. Formes d'ondes de la tension composée à la sortie de l'onduleur...	89
Fig. IV-17. Formes d'ondes de la tension composée après filtrage .....	90
Fig. IV-18. Formes d'ondes du courant de ligne à la sortie de filtre LC.....	91
Fig. IV-19. Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur.....	92
Fig. IV-20. Spectre d'harmonique de la tension composé après filtrage .....	93
Fig. IV.21 : courant statorique $I_s$ [A].....	94
Figure IV.22: courant rotorique $I_r$ [A] .....	94
Figure IV.23 : couple électromagnétique [Nm] .....	94
Figure IV.24 : vitesse triangulaire [tr/min].....	95

## Résumé :

L'augmentation importante de la consommation de l'électricité produites a partir des énergies fossiles ou nucléaire et la conscience écologique naissante ont fortement influencé l'intérêt pour les énergies renouvelables

Unes source d'énergie est dite renouvelable si le fait d'en consommer contrairement aux combustibles fossiles ne limite pas son utilisation future ;c'est le cas de l'énergie du vent, du soleil, des cours d'eau et de la biomasse.

Le potentiel solaire de l'Algérie fait que le photovoltaïque pourrait devenir l'énergie d'avenir dans notre pays.

Dans le présent travail on a étudié et modélisé un panneau photovoltaïque.

Les résultats de simulation montrent que les caractéristiques  $P=f(v)$  et  $I=f(v)$  sont fortement influencées par les conditions climatiques (l'éclairement et la température).

## **Introduction générale**

L'électricité, est aujourd'hui produite, à près 80% ,à partir de combustible fossiles (pétrole, gaz,.....)ou fissiles (nucléaire) .qui sont à la fois des ressources épuisables et polluantes . Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont propres et inépuisables , donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins .Après de nombreux ,les contraintes environnementales ,le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d' indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d' origine renouvelable.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil ,du vent ,de la géothermie ,des chutes d' eau, des marées ou de la biomasse ;leur exploitation d'engendre pas ou peu de déchets et polluantes :ce sont les énergies de l'avenir .Aujourd'hui,elles sont sous exploitées par apport à leur potentiel.

L'utilisation d'un système de production (photovoltaïque-éolien) est de plus en plus utilisé dans diverses applications en sites isolés pour l'éclairage, les télécommunications, rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu, la durée de l'ensoleillement dépassant les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ces besoins en énergie solaire.

Les systèmes photovoltaïque présentent toute fois des inconvénients tels que : le coût de fabrication élevé, le faible rendement de la conversion photovoltaïque et enfin la dépendance des conditions météorologiques (irradiation, température ...) souvent très variables et difficiles à prévoir avec précision

L'utilisation d'un système photovoltaïque, pour l'alimentation des charges de nature alternative telque le moteur asynchrone induit l'intégration d'un onduleur de tension et de filtres pour améliorer la qualité de l'énergie électrique

### I. Introduction

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous forme de chaleur (chauffage, procédés industriels ...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables.

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

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière. Notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

-elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets.

-elles sont inépuisables.

-elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux.

-elles offrent une importante indépendance énergétique.



Compte tenu de deux usages importants de l'énergie, chaleur et électricité, on classera les énergies renouvelables en deux groupes :

- -génération de la chaleur.
- -génération d'électricité.

### **I.1. Les différents types d'énergie renouvelables**

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres, permis ces énergies cite :

#### **I.1.1.Génération de la chaleur**

Une grande partie de l'énergie consommé par l'humanité est la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels ...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables.

##### **I.1.1.1L'énergie Biomasse**

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale.

Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion

de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux.(figure I.1).[1]



**Figure I.1 l'énergie de biomasse**

### **a) Les avantages**

C'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée. Concernant particulièrement le bois-énergie, il y a une large disponibilité de la ressource et le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

### **b) Les Inconvénients**

Elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie), d'érosions des sols, de pollution des sols et des eaux (en cas de production intensive de biocarburant).

### **I.1.1.2.L'énergie géothermique**

Désigne l'énergie provenant de la chaleur contenue dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la terre.

On distingue habituellement deux formes d'énergie géothermique avec la géothermie de surface et la géothermie profonde. La géothermie de surface consiste en la récupération de la chaleur pendant la période de l'hiver et de la fraîcheur pendant l'été à partir de la couche superficielle du sol. La géothermie profonde consiste quant à elle à capter la chaleur contenue par la croûte terrestre en vue de produire du chauffage lorsque la température est inférieure à 90°, ou même de l'électricité dès lors que la température est comprise entre 90 et 150°.

[2]

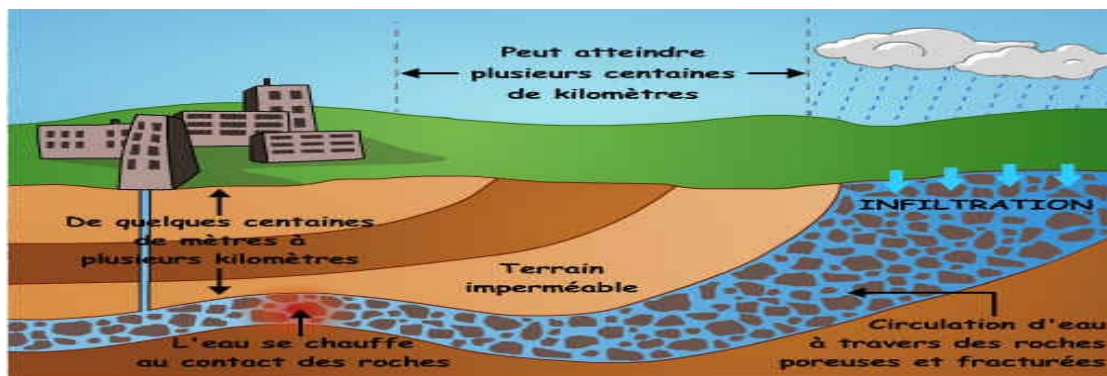


Figure 1.2. L'énergie géothermique

### ❖ Les Avantages et les inconvénients

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse. C'est donc une énergie stable dans le temps.

Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable ce sens qu'un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer.

Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais si la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul.

L'épuisement de la ressource est possible sur certains stocks trop petits lors de leur exploitation. L'expansion de la géothermie se heurte également à l'absence de réelle volonté politique, exprimée notamment dans la lourdeur des taxes.

Les seuls risques de pollution existants sont rejetés à la surface du sol : l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol.

L'expérience a déjà été tentée avec succès dans plusieurs pays et même en Alsace à Soultz-sous-Forêts. Bien sûr la technologie de forage est complexe et le prix de revient du Kilowatt/heure encore dissuasif : le double de l'énergie nucléaire. Mais si l'on intensifie les recherches le coût de production devrait chuter considérablement.

### **I.1.1.3.L'énergie solaire thermique**

L'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire. Elle peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques. [3]

Deux principes fondamentaux sont appliqués et éventuellement parfois combinés :

- capter l'énergie du rayonnement solaire grâce à un corps noir ;

- concentrer le rayonnement solaire en un point (four solaire).



**Figure I.3. L'énergie solaire thermique**

### **a) Les Avantages**

L'énergie solaire est inépuisable et non polluante

L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre l'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage l'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles

### **b) Les inconvénients**

Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé

L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint

La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre et chrome

### I.1.2. Génération d'électricité

#### I.1.2.1. L'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure.4). [4]



**Figure I.4. L'énergie éolienne**

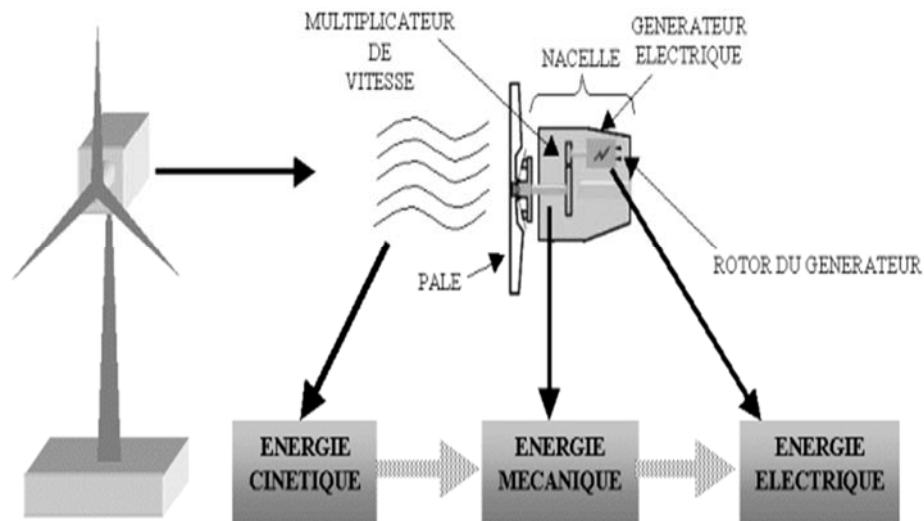


Figure 5. Conversion de l'énergie cinétique du vent

### a) Les avantages

Chaque éolienne est garante d'une peu moins de gaz carbonique dans l'atmosphère ou d'un peu moins de déchets nucléaires à gérer par les générations à venir.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale :

- ❖ Il s'agit d'une fore d'énergie indéfiniment et propre.
- ❖ Elle ne nécessite aucun carburant.
- ❖ Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermique constamment au ralenti ce qui pollue afin de réguler les variations imprévisibles de la production éolienne).
- ❖ Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- ❖ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

- ❖ Les propriétaires fonciers reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur terrain.
- ❖ La propriété des aérogénérateurs par des particuliers et la communauté permet aux gens de participer directement à la conservation de notre environnement.
- ❖ Chaque mégawatt par heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel.
- ❖ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies notamment durant le pic de consommation, en hiver par exemple. Mais des pics de production en été, aux USA la production est en été, comme cela est écrit ce n'est qu'une source d'appoint.

### **b) Les inconvénients**

On constate des freins à l'implantation de champs de production :

- ❖ Les riverains craignent généralement une dégradation de l'aspect visuel des sites concernés, ainsi qu'un impact des cinq secondes en haut des mâts éoliens à la demande de l'aviation civile. Ces flashes perturbent la quiétude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire la nuit.
- ❖ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci plus le parc éolien est dense plus ce risque grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger, mais peut conduire à de la pollution lumineuse pour les riverains.
- ❖ Un aspect qui commence à être réalisé est celui de l'interférence avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques. En effet, les éoliennes



peuvent constituer un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus différentiable d'une cible en mouvement comme la pluie. Habituellement, on filtre les échos indésirables de sol par leur vitesse doppler qui est nulle mais on ne peut pas dans ce cas. Pour empirer la situation, si da la vraie précipitation passe ce secteur.

### I.1.2.2.L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique (Figure I.6).[5]



Figure I.6. L'énergie hydraulique

#### a) Les Avantages

- L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable.
- Sa production n'entraîne pas d'émission de CO<sub>2</sub> et ne génère pas des déchets toxiques.
- On peut rapidement augmenter la puissance produite en cas de panne d'électricité.

- Plus de régularité pour produit de l'énergie (par apport au vent par exemple) Les moulins à eau on permit de développer de grande voie de communication et du développement de grandes villes.

### **b) Les Inconvénients**

- Outre que les sites potentiels se situent généralement en montage entraînant des surcoûts importants de construction, le nombre de ces sites est limité.
- De plus ce système implique parfois de noyer des vallées entières de terre cultivable, où les hommes vivent bien souvent depuis des générations.
- On ne peut jamais garantir le risque 0 de rupture des barrages, en particulier lors de conditions météorologiques exceptionnelles.

### **I .1.2.3 L'énergie photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessité. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. [6]

## CHAPITRE I : LES ENERGIES RENOUVELABLES

---

Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale. Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises, etc.).

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est en très forte croissance. En 2001, en Europe on comptait environ 250MW installés et en 2003 ce chiffre est monté jusqu'au 560MW de puissance installée. Montre l'évolution mondiale de cette ressource qui est en très nette progression depuis le début du siècle.



**Figure I.7 L'énergie solaire**

### **a) Les avantages**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### **b) Les inconvénients**

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les

performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

### I.2. CONCLUSION

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

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles car, elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets.

Vue sa situation géographique, l'Algérie est un pays qui dispose d'un potentiel solaire de plus important, au monde. Des programmes en matière de réalisation d'installation photovoltaïque doivent être engagés.

### II.1 Introduction

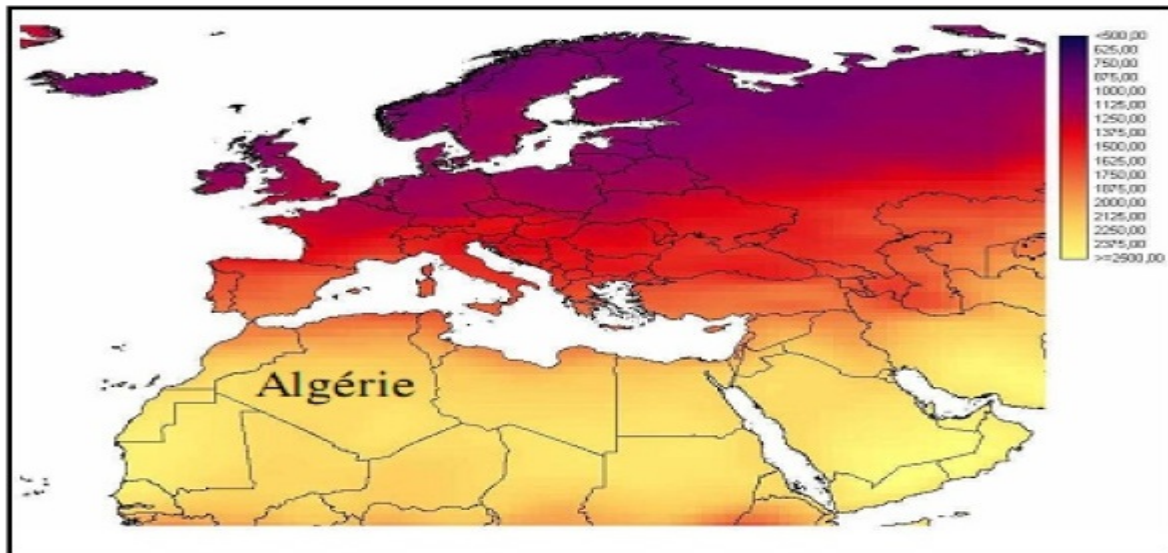
Le 9 décembre 2011, la société algérienne de l'électricité et du gaz Sonelgaz et Desertec Industry Initiative ont signé à Bruxelles un accord de coopération visant au renforcement des échanges d'expertise technique, à l'examen des voies et moyens pour l'accès aux marchés extérieurs et à la promotion commune du développement des énergies renouvelables en Algérie .

Pour que l'Algérie préserve les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire. Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a réalisé la première centrale électrique de Hassi R'mel à Tilghemt dans la wilaya de Laghouat dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts. C'est la société New Energie Algérie (NEA), qui est chargée du secteur des énergies nouvelles et renouvelables. La première usine privée algérienne de fabrication de panneaux solaires est opérationnelle à partir du mois de mars 2012 avec un taux d'intégration nationale.

### II.2 Potentiel solaire en Algérie :

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région MENA (figure II.1).

## Chapitre II : L'énergie solaire



**Figure .II.1 Potentiel solaire [9]**

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1 \text{ m}^2$  est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au sud du pays. Le tableau suivant résume le potentiel solaire en Algérie. [10]

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kwh/m2/an)	1700	1900	2650

**Tableau .II.1. Potentiel solaire**

## Chapitre II : L'énergie solaire

### II.2.1 bilan des réalisations :

Les réalisations en matière d'installations photovoltaïques concernent en plus grande partie les applications liées à l'électrification rurale avec près de 60%. En effet, avec un taux d'électrification au niveau national avoisinant les 98%, les foyers restants à électrifier sont très épars et éloignés du réseau. La solution la plus adéquate techniquement et la plus compétitive financièrement est l'électrification à l'énergie photovoltaïque.

Un premier programme d'électrification a été réalisé durant la période 1995-2002 et a concerné l'alimentation de 18 villages du sud de l'Algérie en énergie électrique, soit l'électrification de près de 1000 foyers. Pour faire bénéficier ces foyers d'un minimum de confort, une quantité d'énergie de 02 kWh par jour et par foyer a été mise à leur disposition, ce qui correspond à la consommation de 05 réglettes d'éclairage, un réfrigérateur, une télévision avec récepteur numérique, un poste radio et un ventilateur.

Les villages touchés par ce programme apparaissent sur la (figure. II.2).

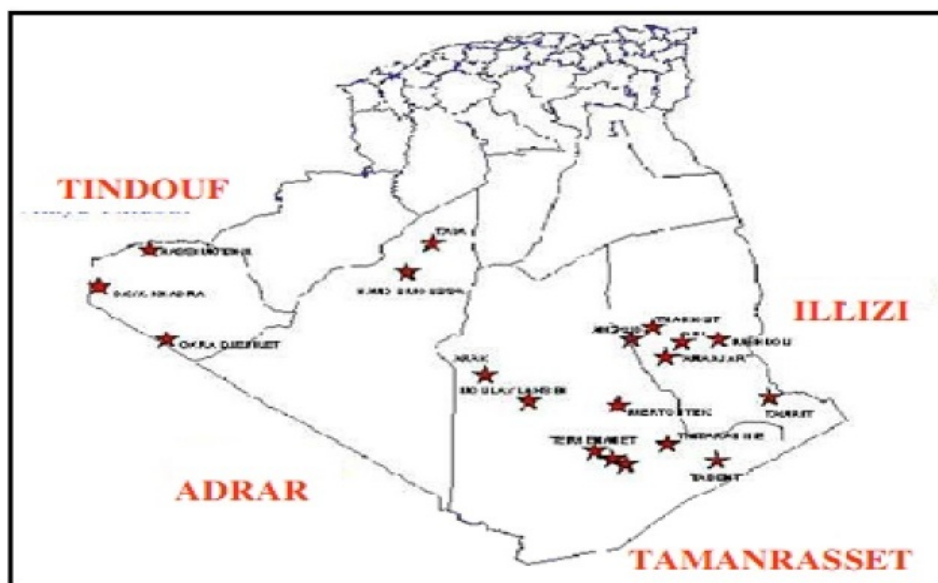
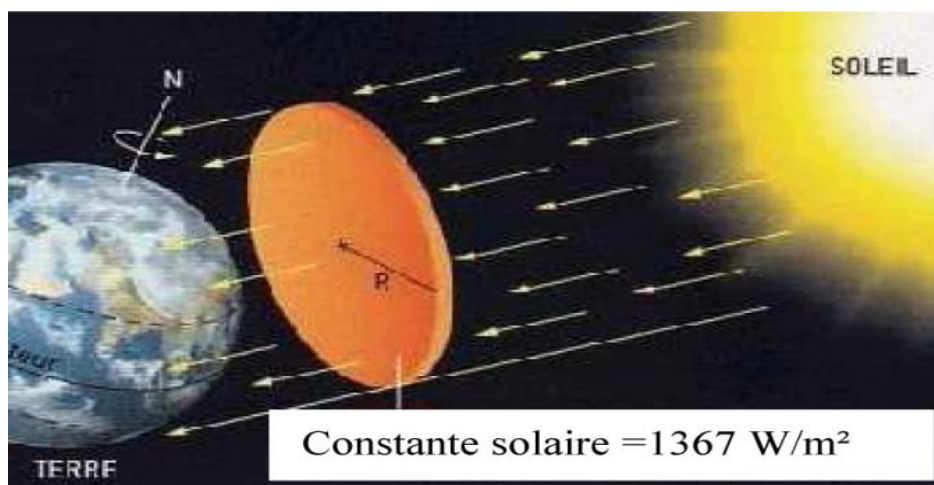


Figure II.2 Programme d'électrification des 18 villages



### II.3 L'énergie solaire et l'effet photovoltaïque :

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

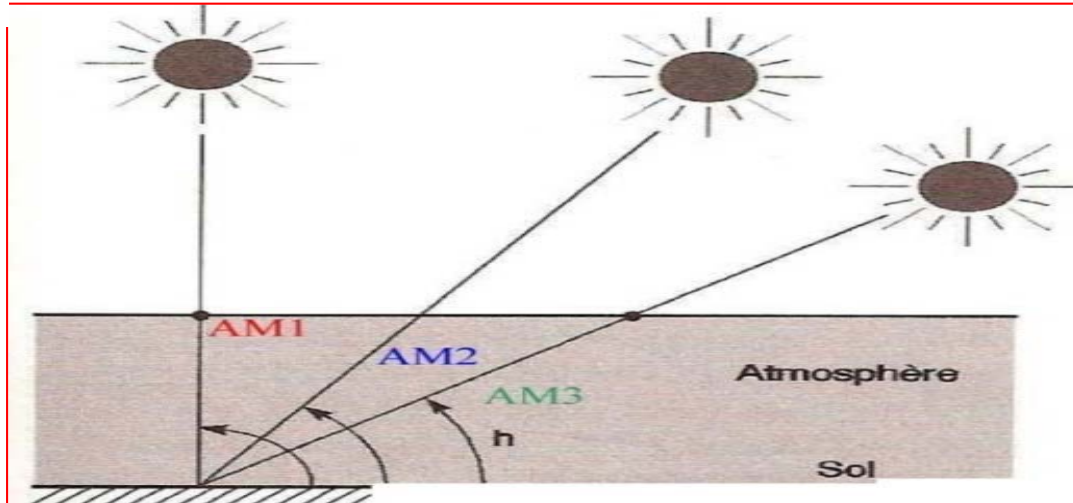


**Figure .II.3 rayonnement solaire**

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

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un Ciel clair est de  $1000\text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que Rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus Grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000\text{ W/m}^2$ .

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G.



**Figure .II.4** Défèrent inclinaisons du soleil

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière Dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours Le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (Correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant Rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre «D » tient compte seulement du rayonnement direct. [8]

### II.3.1 Spectre solaire :

Le soleil de rayon  $R_S$  de 696 000 km, de masse  $1,99 \times 10^{30}$  kg et de température intérieure supérieure à 10 millions de degrés, permet grâce aux réactions nucléaires de fusion de transformer à chaque seconde environ 6 millions de tonnes de sa masse en énergie rayonnée dans l'espace. En première approximation, le soleil rayonne globalement comme un corps noir de température  $T_S = 5800$  °K. Ce qui équivaut une puissance totale rayonnée par le Soleil de  $3,85 \times 10^{23}$  kW. Le flux énergétique reçu par la terre de rayon  $R_T$  Vaut environ  $1,7 \times 10^{17}$  km

Les satellites ont permis de mesurer avec précision le spectre réel solaire hors de l'atmosphère terrestre, qui diffère légèrement du spectre théorique du corps

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

noir à 5800 K dont la répartition spectrale  $M_\lambda$  ( $\lambda$ ) du rayonnement électromagnétique est donnée par la loi de Planck [8]:

$$M_\lambda = A\lambda^{-5} \exp\left(\frac{B}{\lambda T} - 1\right) \quad \text{II.1}$$

$$A = 3.75 \times 10^{-10} \text{w.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$$

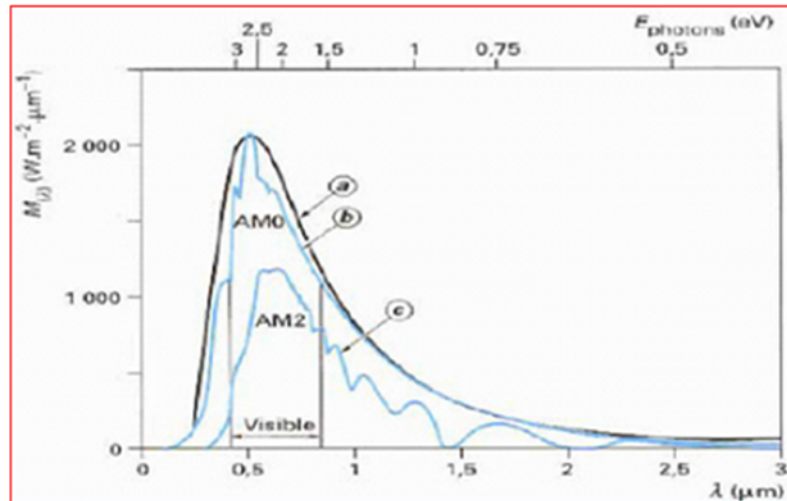
$$B = 14.39 \times 10^{-3} \text{m.k}$$

Avec :

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) longueur d'onde

Sur la figure est représenté le spectre du corps noir a 5 800 °K (courbe a) et le spectre réel hors atmosphère du soleil a différentes inclinaison par rapport à l'horizon (courbe b et c). Ces spectres montrent que les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont comprises entre 0,2  $\mu\text{m}$  (ultraviolet) et 4  $\mu\text{m}$  (infrarouge) ; 97,5 % de l'énergie est comprise dans la zone des longueurs d'onde inférieures à 2,5  $\mu\text{m}$ , notamment dans la zone du rayonnement visible :

- a) Spectre du corps noir
- b) Spectre AM0 :  $\theta=90^\circ$
- c) Spectre AM2 :  $\theta=30^\circ$



**Figure II.5 Spectre du corps noir et solaire à différents angles d'inclinaison a par rapport à l'horizon. [8]**

### II.3.2 Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur :

Dans le schéma simple d'un matériau à deux niveaux d'énergie (figure .II.6.),

Un électron possédant l'énergie  $E_1$  appartient à la bande de valence et se trouve lié à l'atome. S'il reçoit une énergie (sous la forme d'un photon par exemple) qui lui permet d'atteindre le niveau  $E_2$ , énergie correspondant à la bande de conduction, il devient libre et peut alors participer à un courant électrique .

cette énergie, nécessaire pour que l'électron devienne libre, est notée  $E_g$  (« g » pour gap en anglais). On la donne le plus souvent en électronvolt (ev). On a bien sûr :

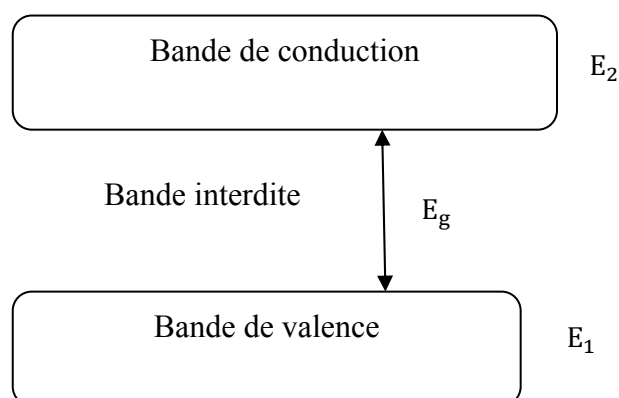
$$E_g = E_2 - E_1$$

II.2

On appelle largeur de bande interdite cet écart énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction. la tension de sortie du générateur est donnée par  $E_g/q$  ou  $q$  est la charge de l'électron. (Figure. II.6).

## Chapitre II : L'énergie solaire

Une photopile est constituée d'un matériau absorbant l'énergie des photons et la transformant en énergie électrique. [1]



**Figure II.6 Schéma caractérisant les trois bandes dans un matériau semi Conducteur.**

Si on choisit un matériau ayant une large bande interdite étroite, cela favorisera le déplacement des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction mais alors la tension aux bornes de la cellule élémentaire sera faible. C'est le cas des métaux. Si par contre on choisit un matériau ayant une largeur de bande interdite élevée, les électrons auront du mal à se libérer de la bande de valence et aucun courant n'apparaîtra. C'est le cas des isolants électriques ( $E_g > 5\text{eV}$ ). Le cas des semi-conducteurs est un compromis qui permet d'obtenir un courant sous une tension acceptable. [1]

Le tableau II.2 : donne la valeur d' $E_g$  pour quelques matériaux semi-conducteurs.

Matériau	Symbole	$E_g$ (eV)
Germanium	Ge	0.67
Silicium	Se	1.11
Arséniure de gallium	GaAs	1.35
Sulfure de cadmium	Cds	2.40

**Tableau. II.2. Valeurs de la bande interdite pour différents semi-**

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

Mais pour qu'un électron libéré par l'absorption d'un photon participe à un courant utile. Faut-il encore la canaliser, le collecter ; C'est le rôle de la dissymétrie électrique que l'on obtient par création d'une jonction entre deux semi-conducteurs dopés différemment.

Ainsi du silicium tétravalent dopé par du phosphore pentavalent fournit un matériau du type N dans lequel des électrons restent libres. Ce même silicium dopé avec de bore trivalent donnera un matériau de type P dans lequel apparaîtra une lacune d'électrons. Le contact entre ces deux type de silicium fournit une jonction où règne un champ électrique qui oriente sélectivement les porteurs positifs et négatifs. Ceux-ci donnent alors naissance à un courant.

$$E_v(\lambda) = hc/\lambda \quad \text{II.3}$$

Avec : **h** : constante de Planck ( $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ j}\cdot\text{s}$ )

**c** : vitesses de la lumière ( $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ ).

Si cette énergie est inférieure à l'énergie  $E_g$  de la bande interdite, il ne produira pas de paire électron-trou. On peut donc définir une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  donnée par l'égalité suivante :

$$\lambda_c = hc/E_g \quad \text{II.4}$$

### II.3.3 Angle d'inclinaison :

Le rendement des panneaux solaires dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels, l'angle d'incidence des rayons du soleil. Figure II.6.

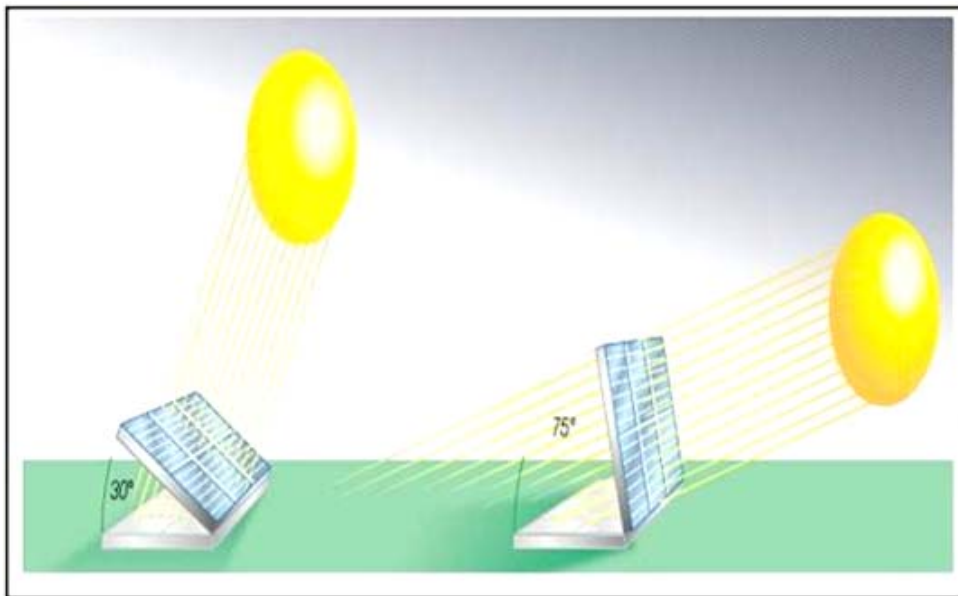
## Chapitre II : L'énergie solaire

---

L'idéal serait que l'angle d'incidence des rayons du soleil, c'est – à – dire l'angle formé par le plan des panneaux solaires et ces rayons, soit toujours égal à  $90^\circ$ , car c'est ainsi que les panneaux reçoivent le plus de photons .tel n'est malheureusement pas le cas.

D'abord, l'angle incident varie au fil de la journée : s'il augmente progressivement depuis le lever du soleil jusqu'à midi, heure du zénith, il diminue à nouveau jusqu'au couchant. Ensuite, il atteint rarement  $90^\circ$ .

Des essais ont donc été effectués sur des panneaux pourvus de mécanismes d'orientation, c'est – à – dire capables d'adapter leur inclinaison en fonction de la position du soleil.



**Figure II.7 Angle d'inclinaison**

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année.

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

---

La meilleure inclinaison des panneaux solaires photovoltaïques pour un usage à longueur d'année est celle de la latitude de l'endroit où sont installés les capteurs. Toutefois, ce sont souvent les dispositions constructives de l'habitation qui déterminent l'inclinaison.

### **II.4 La cellule photovoltaïque :**

#### **II.4.1 Historique :**

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué.

La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.

#### **II.4.2 Définition :**

Une cellule photovoltaïque, également dénommée cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. La



## Chapitre II : L'énergie solaire

---

puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et est fonction du rendement de la cellule. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à un circuit électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie).

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et séléniure d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ), tellurure de cadmium ( $\text{CdTe}$ ), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée. [10]

### **II.4.3 Différents types de cellules :**

#### **II.4.3.1 Cellule photovoltaïque en silicium amorphe :**

Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont fabriquées par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz, une des techniques les plus utilisées étant la PECVD. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ». [11]

Elle a comme avantages de fonctionner avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3000 lux) ; d'être un peu moins chère que les autres techniques, et d'être intégrée sur supports souples ou rigides.

Elle a cependant pour inconvénients : un rendement faible en plein soleil, de 5 % à 7 %<sup>6</sup> ; une nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

l'utilisation de silicium cristallin (ratio  $Wc/m^2$  plus faible, environ  $60 Wc/m^2$ )<sup>7</sup> ; et performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à -20 % selon la structure de la jonction).

### a) **Avantage :**

Fonctionnent avec un éclairage faible

Bon marché par rapport aux autres types de cellules

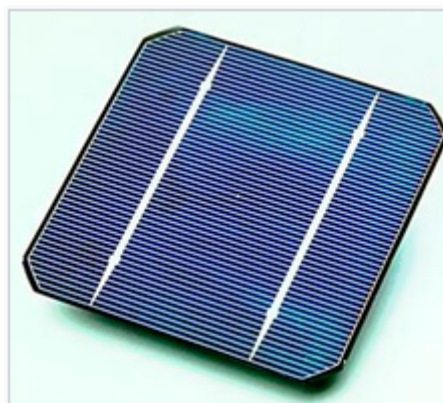
Moins sensible aux températures élevées

### b) **Inconvénients :**

Rendement faible en plein soleil (environ  $60 Wc/m^2$ ), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses

Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps

### II.4.3.2 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :



**Figure II.8 Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Elle a comme avantage un bon rendement, de 16 % à 24 % (en 2015) ( $\sim 150 \text{ Wc/m}^2$ )<sup>7,6,10,11</sup> ; et un nombre de fabricants élevé. Cependant, elle a un coût élevé, un rendement plus faible sous un faible éclairement ou un éclairement diffus<sup>12</sup>, et baisse du rendement quand la température augmente.

### a) **Avantage :**

Très bon rendement (environ  $150 \text{ Wc/m}^2$ ).

Durée de vie importante (+/- 30 ans).

### b) **Inconvénients :**

Coût élevé.

Rendement faible sous un faible éclairement.

### II.4.3.3 Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin :



**Figure II.9 Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin**

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. [11]

Elle a comme avantages de : cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module ; bon

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

rendement de conversion, environ  $100 \text{ Wc/m}^2$  (voire plus)<sup>7</sup>, mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin ; rendement de 14 à 18 % <sup>10,11</sup> ; et lingot moins cher à produire que le monocristallin. Cependant, elle a un rendement faible sous un faible éclairement ou soleil diffus.

Poly cristallin (ou multi cristallin ?). Le terme « silicium multi cristallin » est utilisé par la CEI (réf. IEC TS 61836, vocabulaire international photovoltaïque). Le terme poly cristallin est utilisé pour les couches déposées sur un substrat (petits grains).

### **a) Avantage :**

Bon rendement (environ  $100 \text{ Wc/m}^2$ ).

Durée de vie importante (+/- 30 ans).

Meilleur marché que le monocristallin.

### **b) Inconvénients :**

Rendement faible sous un faible éclairement.

### **II.4.3.4 Cellule photovoltaïque tandem :**

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux connexes, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines. Elle a une sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde, et un excellent rendement. Mais un coût élevé dû à la superposition de deux cellules. [11]

### **▪ Avantage :**

sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde. Excellent rendement.

- **Inconvénient :**

coût élevé dû à la superposition de deux cellules.

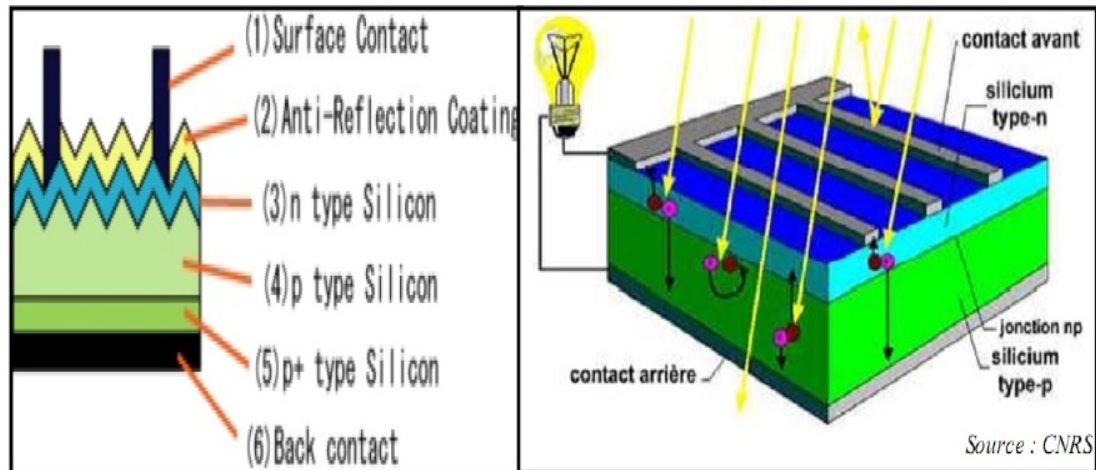
### **II.4.4 Technique de fabrication :**

Le processus de fabrication standard des systèmes photovoltaïques que présentent plusieurs étapes. Les explications qui suivent valent pour la filière silicium cristallin. En 2011, 88% du marché photovoltaïque était en effet encore basé sur les technologies du silicium cristallin. Chacune de ces étapes est décrite plus en détail dans le document "systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental"

### **II.4.5 Structure d'une cellule photovoltaïque :**

La photovoltaïque c'est la manière la plus élégante de produire de l'électricité. Elle se produit sans bruit, sans parties mécaniques et sans que des produits toxiques soient libérés dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un <<trou>>. Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombine simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme une pile. [12]

Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N. (figure II.8)



**Figure II.10 Structure d'une cellule PV**

### II.4.6 Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à la matrice, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombiner, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. L'une des solutions, couramment utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous utilise un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N.

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne transmission des photons vers l'absorbeur. Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau

## Chapitre II : L'énergie solaire

d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonctions.

### II.5 Association des cellules (le panneau solaire) :

#### II.5.1 Groupement en série :

La courbe courant-tension du montage en série de plusieurs cellules est obtenue en additionnant les tensions de chacune des cellules.

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en série de deux cellules est représentée à la figure II.11

. La puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale d'une cellule.

Pour le montage en série, le courant optimal est le même que pour une seule cellule et la tension optimale est le double de la tension optimale d'une cellule.

Ces résultats se généralisent sans difficultés au cas de « $N_s$ » cellules identiques montées en série. Il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur « $N_s$ » dans la direction de l'axe des tensions

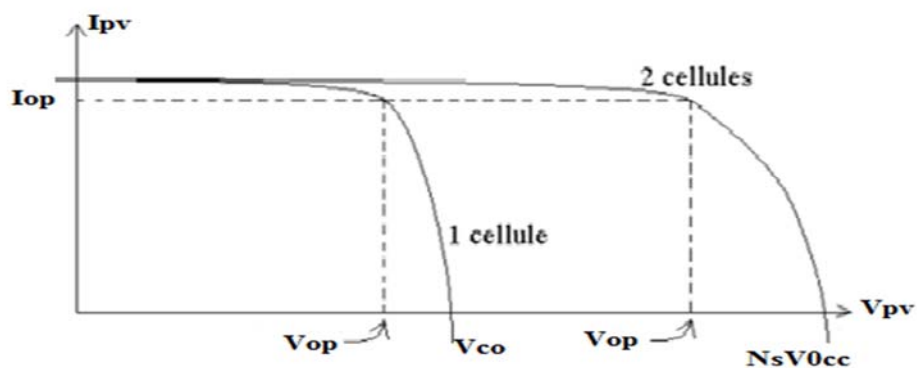


Figure II.11. Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $N_s$

### II.5.2 Groupement en parallèle :

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en parallèle de deux cellules identiques est représentée à la figure (II.12).

La puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale d'une cellule. La tension optimale de l'ensemble est la même que pour une seule cellule, alors que le courant optimal de l'ensemble est égal au double du courant optimal d'une seule cellule.

Ce résultat se généralise sans difficulté au cas de « $N_p$ » cellules identiques montées en parallèle : il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur « $N_p$ » dans la direction de l'axe des courants.

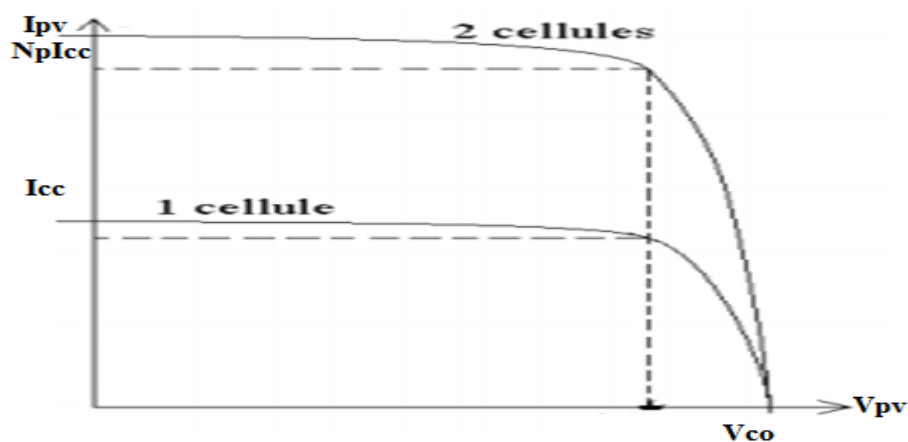


Figure II.12 Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $N_p$  cellules identiques

### II.5.3 Le Générateur photovoltaïque (Groupement mixte)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux.

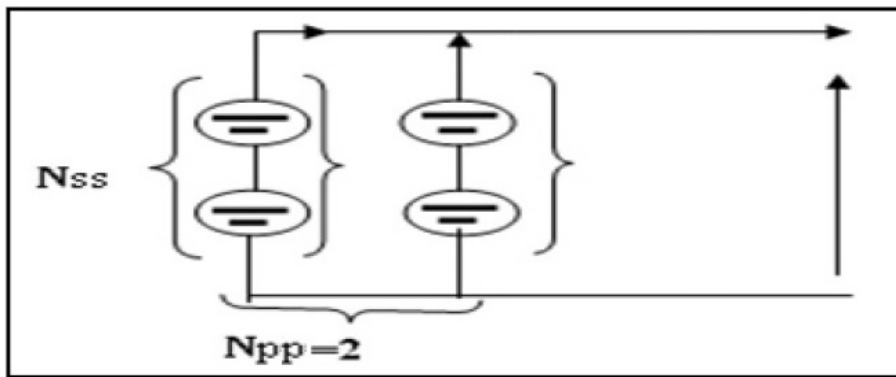


## Chapitre II : L'énergie solaire

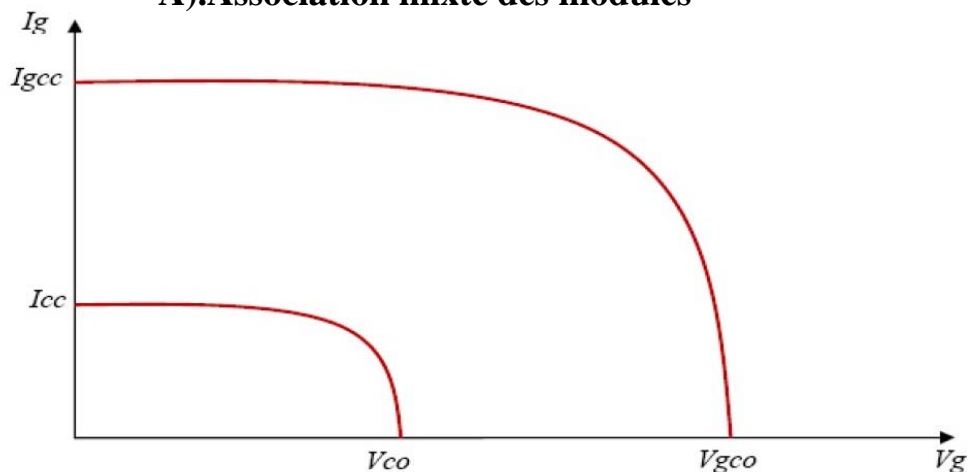
Modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques. La figure A La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $n_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $N_p$  parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure B,  $n_s$  et  $N_p$  étant respectivement les nombres totaux de panneaux en série et en parallèle la figure B. [14]

$I_{GCC} = N_p \cdot I_{cc}$ : courant de court-circuit du générateur résultant.

$V_{GCO} = N_s \cdot V_{CO}$ : Tension du circuit ouvert du générateur résultant.



### A). Association mixte des modules



### B). Caractéristique résultante d'un groupement mixte

**Figure. II.13 (A.B)**

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les ( $N_{ss}$ ,  $N_{pp}$ ) panneaux se comportent toutes de façon identique.

Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale Notée  $P_{max}$ . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique  $P(V)$  du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée  $V_{op}$  et d'un courant optimal noté  $I_{op}$ . [14]

### II.6 Rendement maximal d'une cellule PV :

Le rendement d'une cellule ou d'un module photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite par cette cellule ou module et l'énergie lumineuse reçue sur la surface correspondante :

$$\eta [\%] = P \text{ produite [kW]} / P \text{ incidente [kW]}$$

Le rendement réel varie donc continuellement, en fonction notamment de l'énergie solaire incidente.

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de  $1\,000\text{ W/m}^2$ , température de  $25\text{ °C}$ , conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de  $41.8^\circ$  par rapport à l'horizontale).

La puissance crête est définie comme la puissance électrique produite par la cellule (ou un panneau) lorsqu'elle est soumise aux conditions STC. Cette valeur est utilisée comme référence pour comparer les panneaux photovoltaïques entre eux.

On obtient alors le rendement par la formule suivante :

$$N_{stc} [\%] = \text{Puissance crête [W/m}^2\text{]}^* / \text{Puissance du spectre STC [W/m}^2\text{]}$$

Avec :

$$\text{Puissance du spectre STC} = 1\,000 \text{ [W/m}^2\text{]}.$$

### II.7 Les avantages et Les inconvénient d'une installation PV :

#### a) Avantage : [15] [16]

- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Le photovoltaïque est une technologie sûre et sans risque. En général, les panneaux photovoltaïques sont garantis 25 ans (et peuvent fonctionner 40 ans quasiment sans diminuer leur rendement).
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
- Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- Cette technologie utilisée dans l'aérospatiale a prouvé sa stabilité et sa fiabilité durant des dizaines d'années. Les systèmes sont conçus pour résister aux intempéries, au rayonnement UV et aux variations de température.
- Les installations photovoltaïques présentent un bilan énergétique positif. Les modules sont recyclables et la majorité des composants peut être réutilisée ou recyclée.
- En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.
- La mise en place d'une installation photovoltaïque donne de la valeur au logement qui en est équipé car sa classe énergétique augmente.
- Ce système produit de l'électricité sur place ; il peut donc être installé là où on en a besoin, sans être raccordé à un quelconque réseau.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes.

### **b) Inconvénients :**

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.

- Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires. Idéalement, il faudrait donc que la position du panneau varie suivant les saisons et au cours de la journée, ce qui n'est quasiment pas réalisable.
- Pour cette même raison d'ensoleillement, les panneaux solaires ne peuvent pas s'installer n'importe où, ni n'importe comment, sous peine de voir le gain d'énergie divisé par deux par rapport aux valeurs théoriques.
- La production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit.
- Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec le réseau EDF).
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisés par les panneaux photovoltaïques sont composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement.
- Les usines de production de cellules photovoltaïques émettent un grand taux de Dioxyde de Carbone.
- La transformation du silicium de sa forme naturelle (non exploitable) à sa forme traitée (exploitable) nécessite une très haute température (donc beaucoup d'énergie).
- Le photovoltaïque souffre d'une "pénurie" de silicium : l'accroissement de la demande ayant été sous-estimé, la production de cet élément chimique n'arrive pas à couvrir la demande actuelle des industries électroniques et solaires.
- Les panneaux noirs ne sont pas toujours esthétiques, notamment sur des bâtiments non modernes.

### II.8 Conclusion :

L'énergie solaire est donc transformée en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, qui consiste à créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule en libérant des électrons sous l'action des photons.

En effet le silicium, contenu dans les semi - conducteurs, nous permet d'utiliser la lumière comme source d'électricité à travers les cellules photovoltaïques. Les panneaux solaires, constitué d'un grand nombre de ces cellules, permet d'utiliser l'effet photovoltaïque dans la vie courante. Même si cette source est très abondante, nous avons vu que l'énergie solaire photovoltaïque ne pouvait

Vrais emballement pas être utilisé comme énergie principale à cause des faibles rendements des cellules.

Malgré tout, certains domaines d'applications semblent plus adaptés au photovoltaïque comme le spatial, les lieux isolés, les télécommunications, la « petite » électronique, nécessitant peu de puissance.

Le photovoltaïque pourrait devenir l'énergie du futur si, d'une part son coût de production diminuait car, pour l'instant, seule une minorité de gens peuvent se procurer ces systèmes; et si d'autre part le rendement des cellules augmentait.

Le photovoltaïque serait alors une énergie propre, économique et surtout rentable.

Nous pouvons alors nous demander dans quelles mesures les énergies renouvelables peuvent-elles remplacer les énergies fossiles.

## Chapitre II : L'énergie solaire

---

### III.1 Introduction :

Lorsque la jonction PN est éclairée, elle peut fonctionner en générateur. Dans ce chapitre nous allons établir le modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque, qui nous permette de tracer la caractéristique courant-tension de sortie.

### III.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

#### III.2.1 Modèle mathématique :

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant  $I_{PV}$  proportionnel à la quantité de photons reçus par la cellule [20], ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant  $I$  issu de la cellule s'écrit alors.

$$I = I_{pv\text{cette}} - I_{sat\text{cette}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad \text{III.1}$$

Ou :

$$I_{pv\text{cette}} = a_1 \cdot w \cdot \text{photo courant (A)}.$$

Avec :

$$a_1 = 2.5 \cdot 10^{-7} T + 2 \cdot 10^4 \text{ [en A/ (w/m}^2\text{)]}$$

$$I_D = I_{stacette} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad \text{III.2}$$

Avec :

$$I = I_{pv\text{cette}} - I_D$$



### CHAPITRE III : Modélisation d'un panneau PV

$V_T = kT/q$  : la potentielle thermodynamique à une température donnée.

$I_D$  : le courant d'une jonction PN (A).

$I_{sat}$  : le courant de saturation(A).

$R_s$  : résistance série ( $\Omega$ ).

$R_p$  : résistance parallèle (shunt)( $\Omega$ ).

$K$  : la constante de Boltzmann ( $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ (j /°k)).

$q$  : la charge de l'électron ( $q=1.6 \cdot 10^{-19}$ (c)).

$T$  : la température de la cellule (°k).

$a$  : le facteur d'idéalité ( $1 \leq a \leq 2$  ,  $a=2$  pour une diode en silicium).

On peut déduire de ces expressions, un schéma équivalent comme le montre la figure.III.1

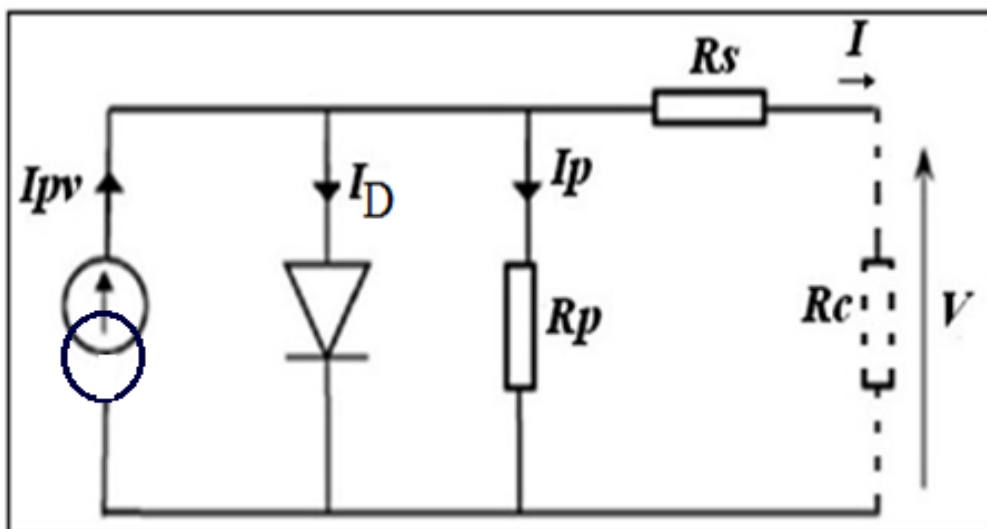
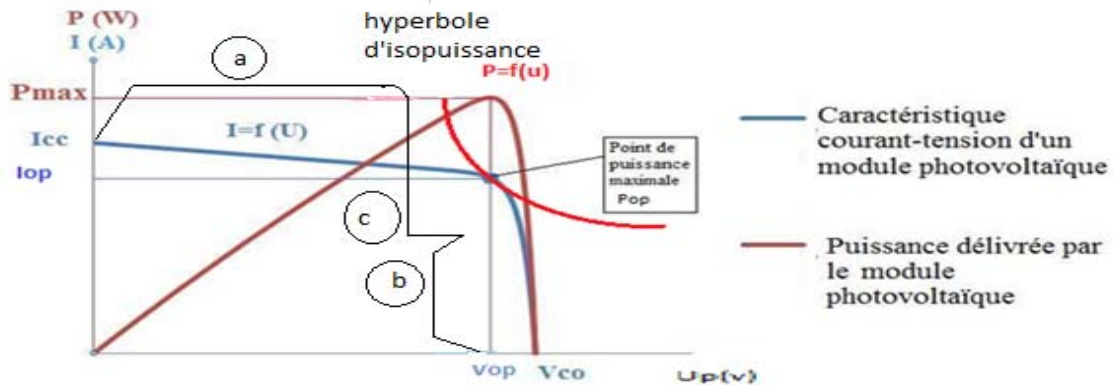


Figure III.1 Schéma équivalent d'une cellule

## CHAPITRE III : Modélisation d'un panneau PV

Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule réelle en particulier les caractéristiques courant-tension  $I = f(V)$  comme le montre la figure III.1



**Figure III.2 les différentes zones de la Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle. [11]**

❖ Quatre données essentielles permettent de déterminer la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque :

- le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$ .
- la tension à vide noté  $V_{co}$ .
- le courant de puissance maximale noté  $I_{op}$ .
- la tension de puissance maximale noté  $V_{op}$ .

-Le courant de puissance maximale et la tension de puissance maximale sont définis tels que le produit  $I_{op} * V_{op}$  est maximale.

-La valeur des 4 paramètres ci-dessous sont dépendants de l'éclairement et de la température de module.

La figure III.2 montre que la caractéristique  $I=f(v)$  se divise en 3 parties. [11]

- 1- **La zone (a)**: où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- 2- **La zone (b)**: qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.
- 3- **La zone (c)**: correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant  $I_{pv}$  [9].

Enfin les deux résistances modélisent les pertes internes :

- $R_S$  (résistance série) : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- $R_P$  (résistance parallèle) : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Généralement, on peut négliger le terme  $R_S \cdot I$  devant  $V$ , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \quad \text{III.3}$$

Comme la résistance parallèle est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans  $R_P$ , on obtient :

III.4

$$I = I_{pv\text{celle}} - I_{\text{satcelle}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right)$$

### III.3 Modélisation d'un panneau photovoltaïque :

#### III.3.1 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque :

Une fois que l'on a caractérisé la cellule photovoltaïque, on modélise le module comme une association de  $N_S$  cellules en série,  $N_P$  cellule en parallèles en supposant qu'elles sont identiques. Le courant de court-circuit du module se multiplie par  $N_P$ , tandis que la tension à circuit ouvert du module se multiplie par  $N_S$ .

La caractéristique d'un module qui comporte  $N_S$  cellules connectées en série et en  $N_P$  cellules connectées en parallèle est donnée par :

$$I = I_{pv\text{celle}} - I_{\text{satcelle}} \left( \exp \left( \frac{V + R_S I}{a \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad \text{III.5}$$

Avec :  $I_{pv} = I_{pv\text{cell}} * N_P$  et  $I_{\text{sat}} = I_{\text{satcelle}} * N_P$

Et  $V_T = N_S k T / q$  : la potentielle thermodynamique d'un panneau photovoltaïque.

Les équations du modèle sont présentées en détails et le modèle

Est validé avec les données expérimentales

### CHAPITRE III : Modélisation d'un panneau PV

Le courant généré par le panneau photovoltaïque dépend linéairement de l'irradiation solaire et est également influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_I \Delta T) \cdot W / W_n \quad \text{II.6}$$

$$\text{Avec : } I_{pvn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{ccn}$$

$I_{pvn}$  : est le courant généré par la lumière à la valeur nominale. (Généralement de 25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>),

$\Delta T = T - T_n$  : (T et T<sub>n</sub> étant la température réelle et nominale [K]),

G [W/m<sup>2</sup>] : est l'irradiation sur la surface du dispositif,

G<sub>n</sub> : est l'irradiation nominale [17], [18], [19].

L'hypothèse  $I_{cc} \approx I_{pv}$  est généralement utilisée dans les modèles photovoltaïques, car dans les dispositifs pratiques la série la résistance est faible et la résistance parallèle est élevée

$$I_{cc} = (I_{ccn} + k_I \Delta T) G / G_n$$

$I_{cc}$  : courant de court-circuit

Le courant de saturation  $I_{sat}$  de diode et de sa dépendance sur la température peut être exprimée par [20], [21], [19] :

$$I_{sat} = I_{satn} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left( \frac{qE_g}{aK} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad \text{III.7}$$

Avec

$$I_{satn} = \frac{I_{ccn}}{\exp \left( \frac{V_{ccn}}{aV_{Tn}} \right) - 1} \quad \text{III.8}$$

$E_g$  : l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur ( $E_g \approx 1,12\text{eV}$  pour le silicium à  $25^\circ\text{C}$ )

$I_{\text{sat},n}$  : le courant de saturation nominale

$V_{T,n}$  : la tension thermique à la température nominale [21] , [22].

Le modèle photovoltaïque décrit dans la section précédente peut être améliorée si l'équation (III.7) est remplacé par :

$$I_{\text{sat}} = \frac{I_{\text{ccn}} + K_i \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{\text{ccn}} + K_V \Delta T}{aVT}\right) - 1} \quad \text{III.9}$$

L'équation (III.10) peut être introduite dans le modèle :

$$I_{\text{pvn}} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{\text{ccn}} \quad \text{III.10}$$

#### III.4 Calcul de $R_s$ et $R_p$ :

La relation entre  $R_s$  et  $R_p$  , les seules inconnues de l'équation (III.5) , peut être trouvée en faisant :

$P_{\text{maxm}} = P_{\text{maxe}}$  et la résolution de l'équation résultante pour  $R_s$  , comme le Montre les équations (III.11) et (III.12) :

$$P_{\text{max,m}} = P_{\text{max,e}} = V_{\text{op}} * I_{\text{op}}$$

Ou  $P_{\text{maxm}}$  : la puissance maximale mesurée

$P_{\text{maxe}}$  : la puissance maximale expérimentale

$$P_{\max} = V_{mp} \left( I_{pv} - I_{sat} \left( \frac{q}{KT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a.N_s} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right) = \quad \text{III.11}$$

$$R_p = \frac{V_{mp}(V_{mp} + I_{mp})}{V_{mp}I_{mp} - V_{mp}I_{mp} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{a.N_s} \frac{q}{KT}\right) + V_{mp}I_{sat} - P_{\max}} \quad \text{III.12}$$

Les valeurs initiale de  $R_p$  et  $R_s$  peuvent être proposées par :

$$R_{pmin} = \frac{V_{mp}}{I_{ccn} - I_{mp}} - \frac{(V_{ccn} - V_{mp})}{I_{mp}} \quad \text{III.13}$$

Et :

$$R_{smax} = \frac{(V_{ccn} - V_{mp})}{I_{mp}}$$

La résistance série ( $R_s$ ) du module PV a un grand impact sur la pente de la courbe I-V, par conséquent la valeur de  $R_s$  est calculée en évaluant la pente  $dI / dV$  de la courbe I-V au point  $V_{CC}$  [23].

D'après l'équation (II8), la valeur de  $R_s$  est évaluée de la façon suivante :

$$dI = 0 - I_{sat} * q \left( \frac{dV + R_s * dI}{aKT} \right) * \exp\left(q \left( \frac{V + IR_s}{aKt} \right)\right) \quad \text{III.14}$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{aKT/q}{I_{sat} * \exp\left(q \left( \frac{V + IR_s}{aKt} \right)\right)} \quad \text{III.15}$$

Alors, d'après l'équation (III.15), la valeur de  $R_s$  est estimée en fonction de  $V_{CC} = V$ .

$$R_s = \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{CC}} - \frac{aKt/q}{I_{sat} * \exp(\frac{qV_{CC}}{aKt})} \quad \text{III.16}$$

### III.5 Evaluation de facteur de qualité :

Le facteur de qualité de diode ( $a$ ) est inconnu et doit être estimé, généralement il prend une valeur entre 1 et 2. On prend la valeur d' $a=2$  (pour la diode idéale en silicium). [23]

### III.6 Résolution de l'équation $I=f(V)$ :

Finalement après la détermination des différents paramètres du circuit équivalent, il est possible de résoudre l'équation de la caractéristique  $I(V)$ , donc on peut résoudre numériquement pour un éclairage donné et une température de module, l'ensemble des paramètres inconnus qui sont ( $I_L$ ,  $I_0$ ,  $n$ ,  $R_s$ ), puis les autres variables inconnues dans l'équation  $I(V)$  originale sont  $I$  et  $V$  du module [24].

Bien qu'il puisse être possible de trouver la réponse par des itérations simples, la méthode du newton est choisie pour la convergence rapide de la réponse [23].

La méthode de newton est décrite par la formule suivante :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Ou :  $f'(x_n)$  est le dérivé de la fonction  $f(x)$ .

$x_n$  : la valeur de l'itération  $n$ .

$x_{n+1}$  : la valeur de l'itération  $n+1$ .



Par conséquent, l'équation (III.4) devient :

$$f(I) = I_{pv} - I - I_{sat} \left( \exp \left( q \left( \frac{V + IR_s}{aKT} \right) \right) \right) \quad \text{III.17}$$

La substitution de cette équation dans la formule (III.2) donne l'équation (III.4) et le courant de sortie  $I$  est calculé itérativement :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{pv} - I_n - I_{sat} \left( \exp \left( q \left( \frac{V + I_n R_s}{aKT} \right) \right) - 1 \right)}{-1 - I_{sat} \left( \frac{qR_s}{aKT} \right) \exp \left( q \left( \frac{V + I_n R_s}{aKT} \right) \right)} \quad \text{III.18}$$

### III.7 Simulation :

Le module photovoltaïque (SI 1088 T2), est choisi pour la simulation.

Il contient 176 cellules solaires de silicium, et fournit une puissance maximum nominale 1119.4 w.

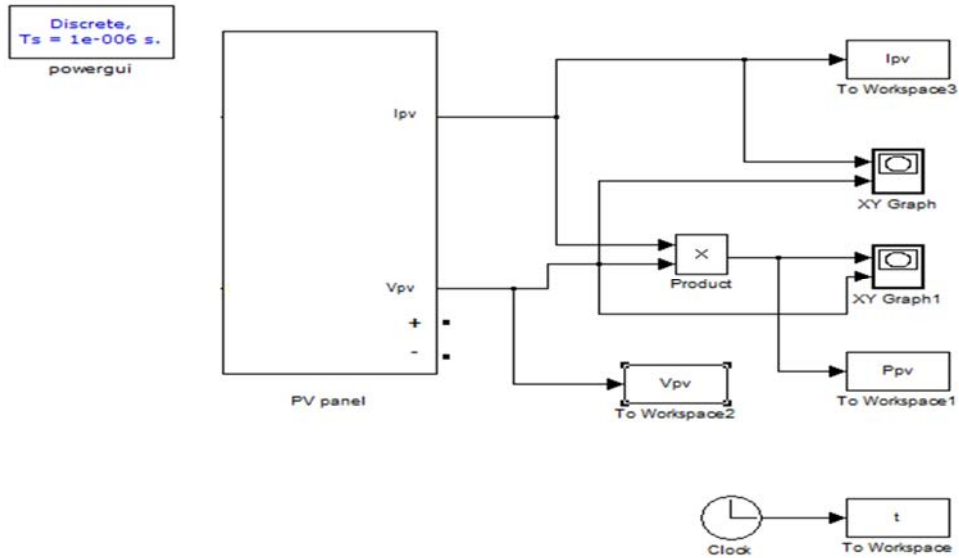
Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau (III.1) suivant :

LES PARAMETRES	SYMBOLE	UNITE
Tension nominale	$V_N$	222
Tension de circuit ouvert	$V_{co}$	370V
Courant de court-circuit	$I_{cc}$	5.10A
Tension de puissance maximale	$V_{mp}$	264.00V
Courant de puissance maximal	$I_{mp}$	3.89V
Puissance maximal	$P_{MAX}$	1119.4W
Nombre de cellule en série	NS	8
Nombre de cellule en parallèle	NP	22
Coefficient de température		0.10%/°C
Facteur d'idéalité	A	4.25

**Tableau. II.1 caractéristiques électriques du module SIT, SI1632G1**

#### **III.7.1 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement constante :**

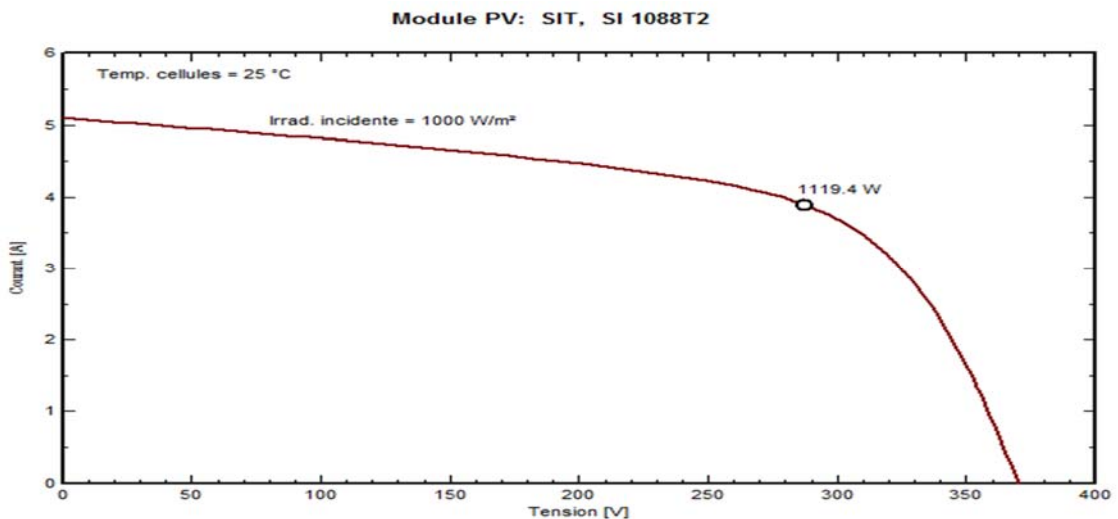
Le schéma de la simulation est donné par la figure III.5



**Figure. III.5 Schéma de simulation d'un PV**

❖ **caractéristique (  $I_{pv} = f(V_{pv})$  ) :**

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ), la caractéristique (  $I_{pv} = f(V_{pv})$  ) est donnée par la figure III.6



**Figure III.6 caractéristique  $I=f(v)$  d'un panneau solaire**

### ❖ caractéristique ( $P_{pv} = f(V_{pv})$ ) :

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ), la caractéristique ( $P_{pv} = f(V_{pv})$ ) est donnée par la figure III.7

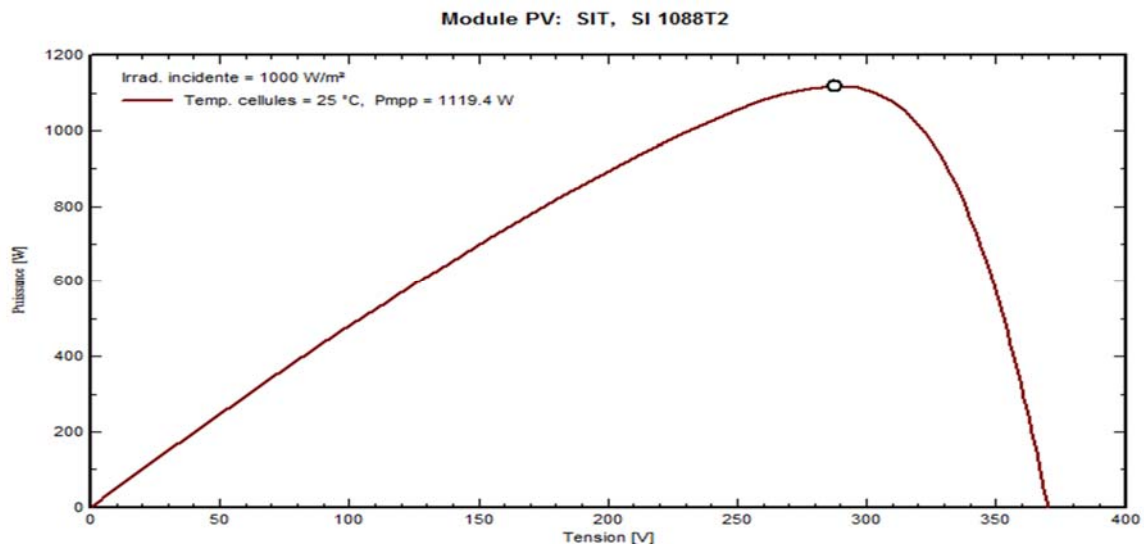


Figure III.7 caractéristique  $P=f(v)$  d'un panneau solaire

### III.7.2 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable :

Afin de constater l'influence des conditions externes, de l'éclairement et la température ( $G,T$ ) sur les caractéristiques ( $I_{pv}-V_{pv}$ ,  $P_{pv}-V_{pv}$ ) nous avons adopté la méthode suivants :

-Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ( $T=25^\circ\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

-Pour un éclairement constant ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ), nous ferons varier la température afin de voir l'influence de celle-ci par rapport aux caractéristiques du générateur photovoltaïque.

### III.7.2.1 L'influence de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement (G) entre 200 et 1000 avec un pas de 200, les caractéristiques [ $I_{pv}=f(V_{pv}), P_{pv}=f(V_{pv})$ ] sont données par les figures III.7.a,b

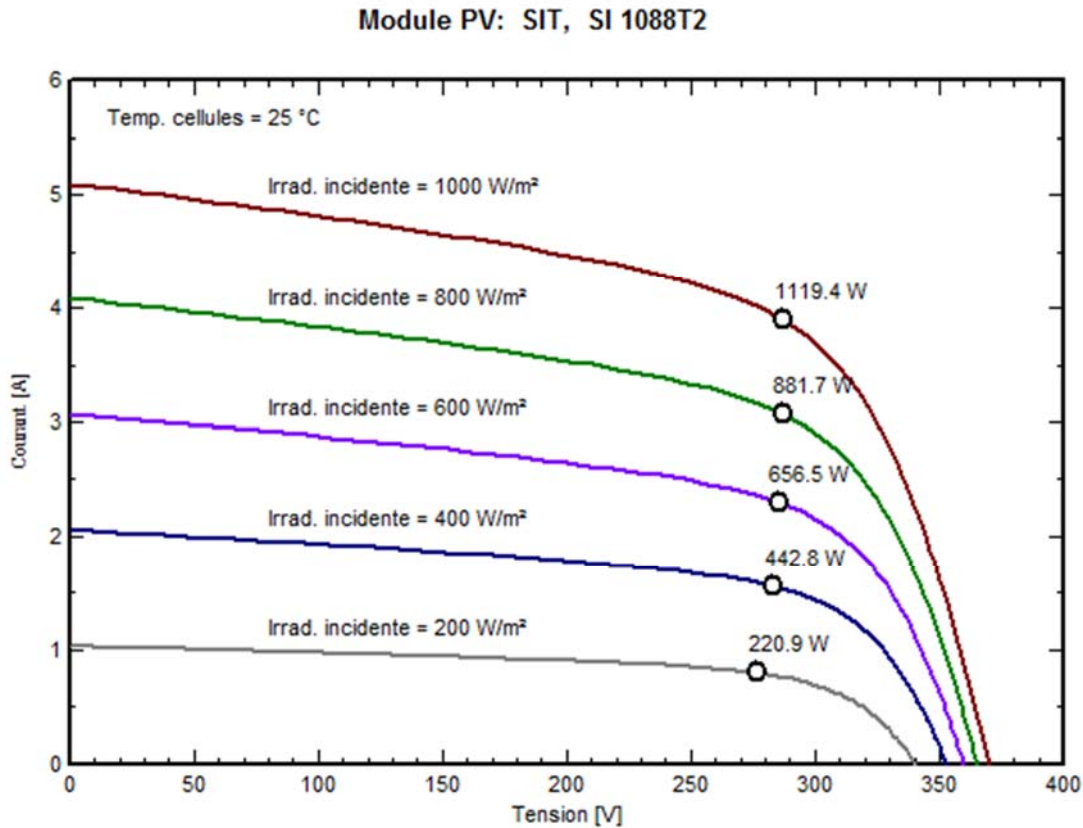
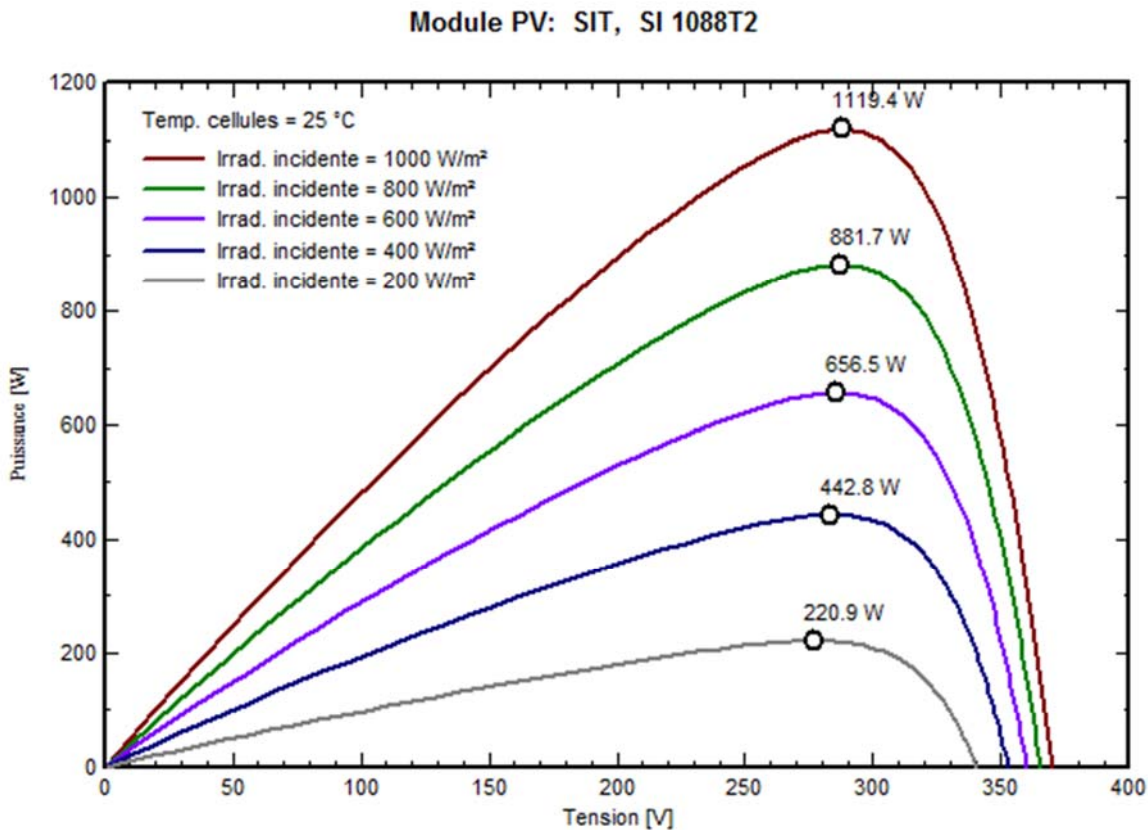


Figure III.7.a) caractéristique  $I=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes irradiances solaires à température constante égale à 25°C.

D'après la figure III.7.a, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement ( $G$ ) et une faible diminution de la tension de circuit ouvert.



**Figure III.7.b) caractéristique  $P=f(V)$  d'un panneau solaire pour différents éclairements solaires à température constante égale à 25°C.**

On remarque aussi sur la figure III.7.b que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque

### III.7.3 L'influence de la température :

On faisant varier la température ambiante ( $T$ ) entre (0°C et 100°C) avec un pas de 25°C, L'influence de celle-ci sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ) est donnée par la figure III.8.a avec un éclairement ( $G=1000$  W/m<sup>2</sup>).

### CHAPITRE III : Modélisation d'un panneau PV

On constate d'après la figure III.8.a que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constante.

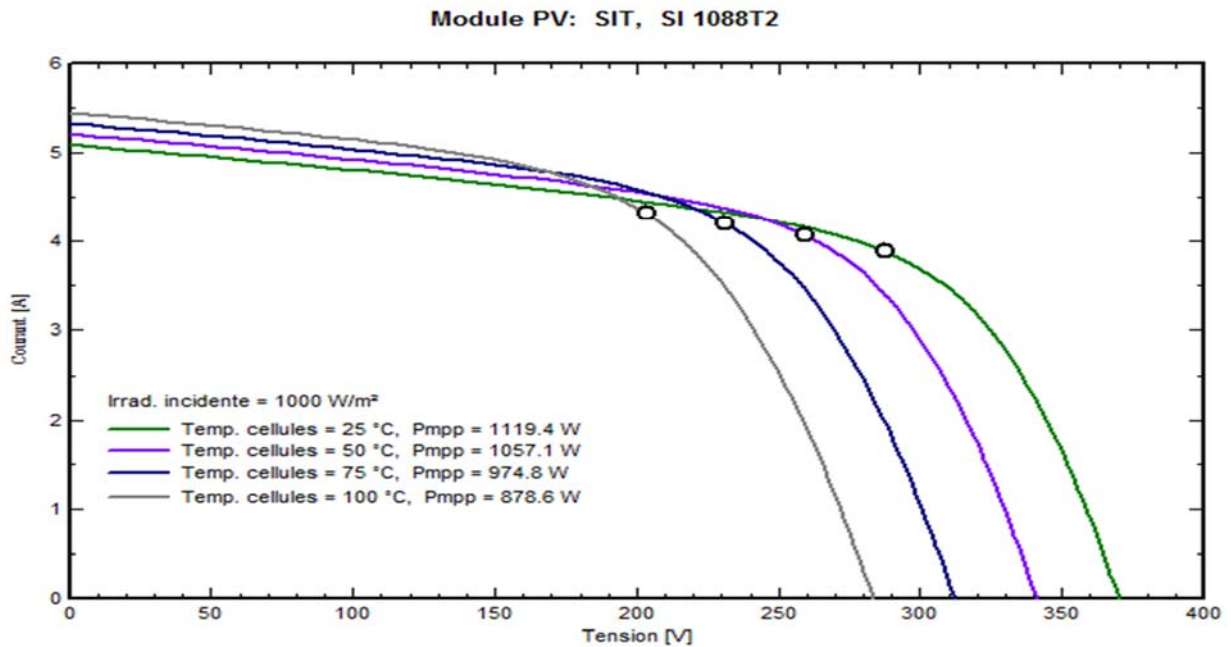


Figure III.8.a) caractéristique  $I=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal à 1000 w/m<sup>2</sup>.

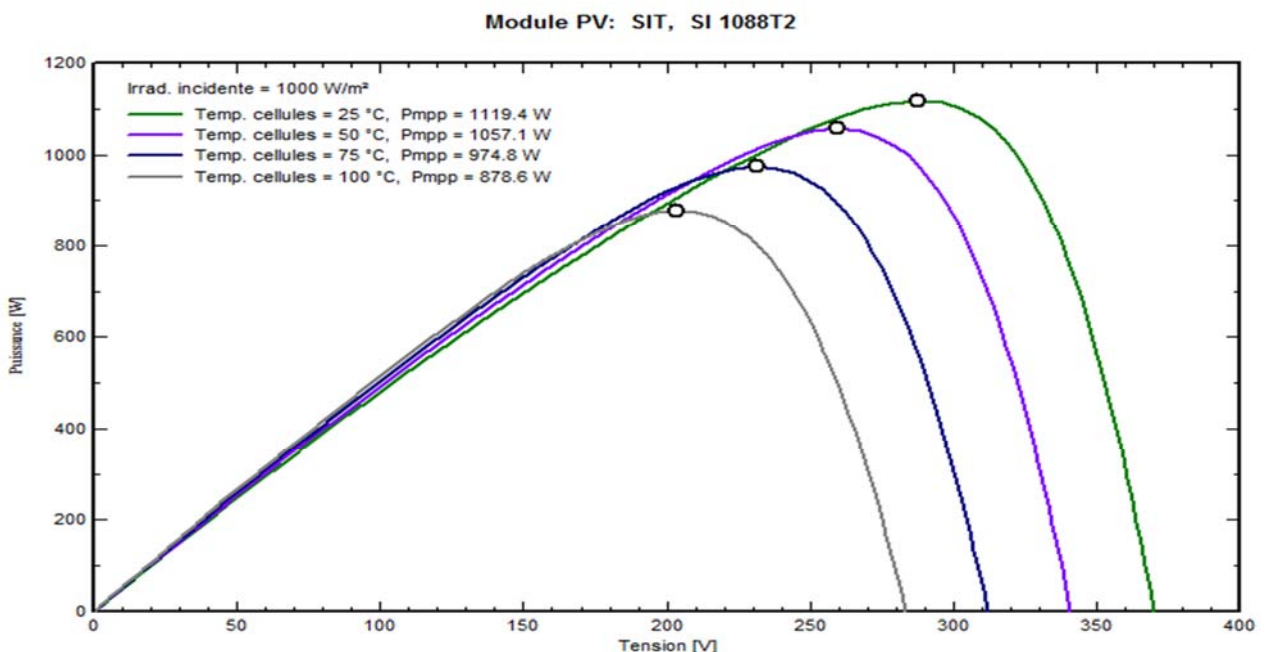


Figure III.8.b) caractéristique  $P=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal 1000 w/m<sup>2</sup>.

D'après la figure III.8.b, l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ ) fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert de générateur photovoltaïque

### III.7.4 L'influence de la résistance série $R_s$ et parallèle $R_p$ :

Le matériau semi-conducteur présente une résistance série  $R_s$  le plus souvent inférieur à  $1 \Omega$  et une résistance parallèle  $R_p$  bien supérieure à  $R_s$  due au contact métallique. Ces deux résistances altèrent sensiblement la puissance maximale fournie par le panneau PV comme le montrent les résultats de la simulation.

#### III.7.4.1 L'influence de la résistance série :

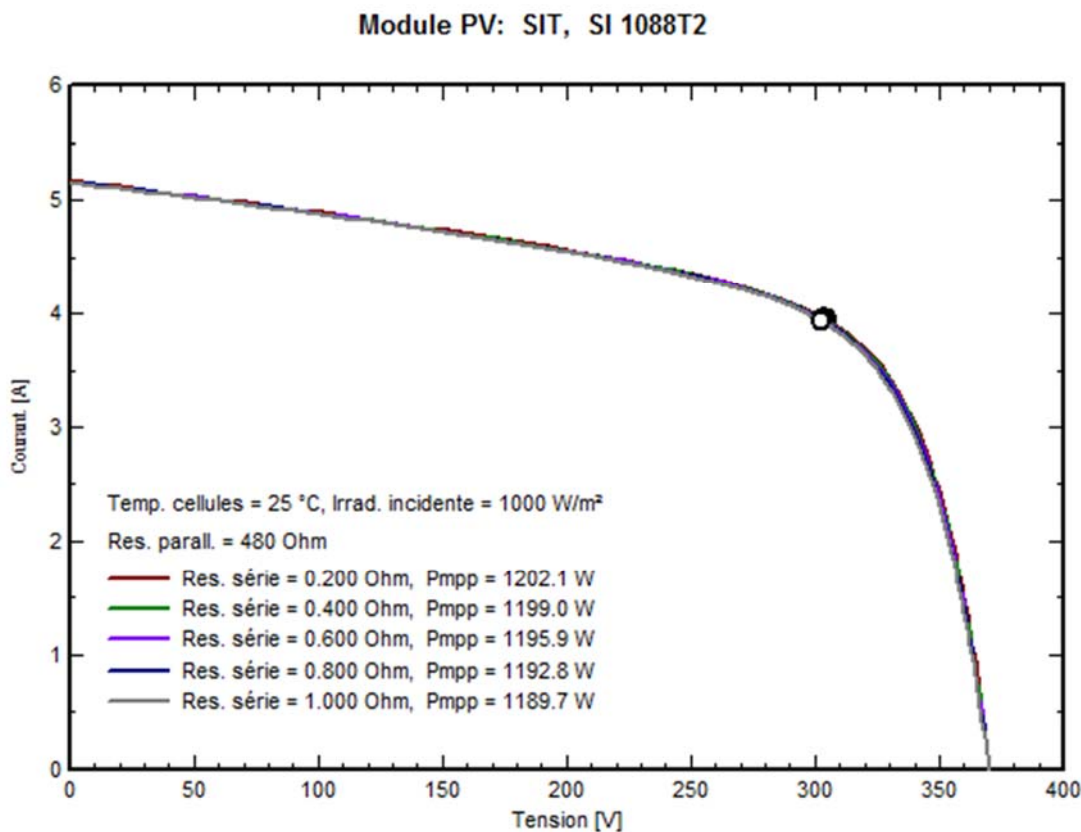
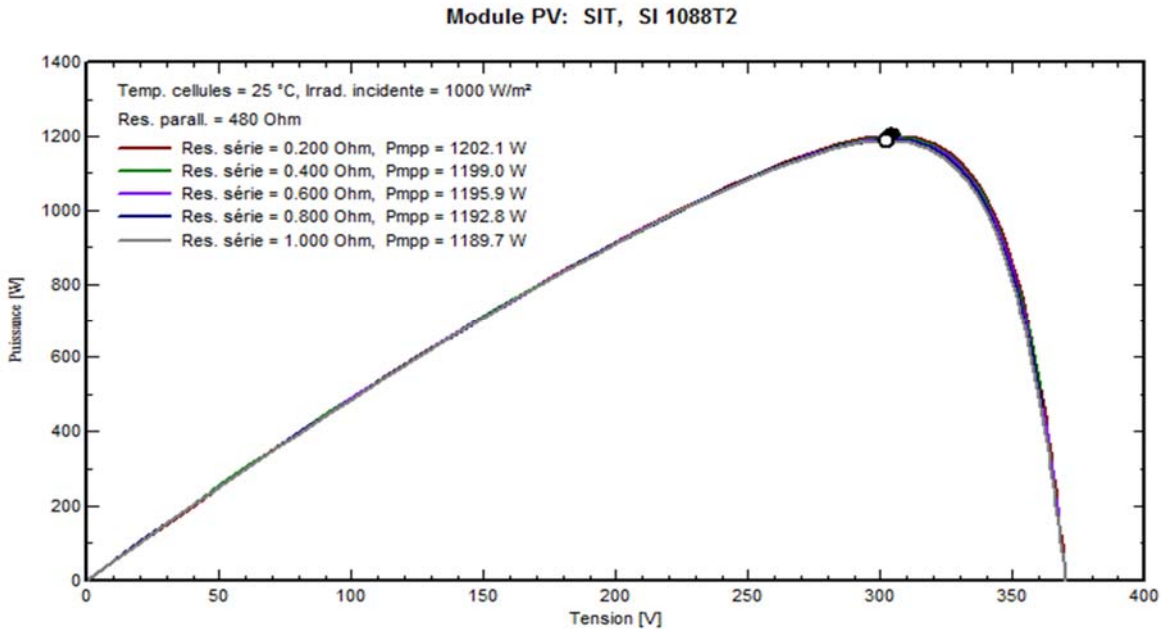


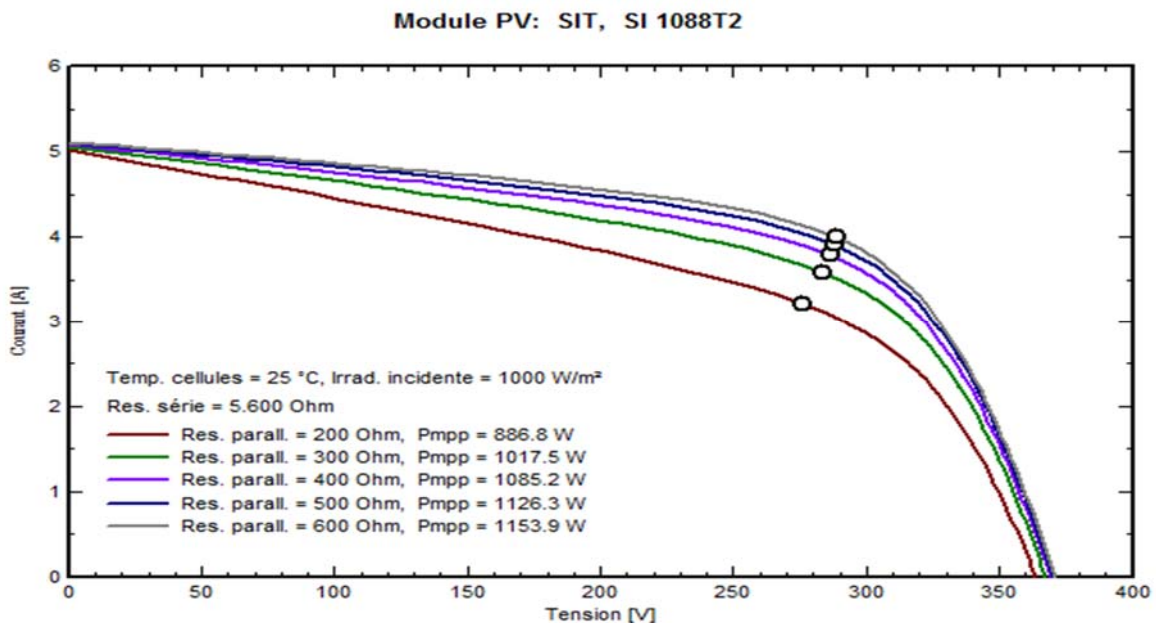
Figure III.9.a) caractéristique  $I=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes résistances série à température constante égale à  $25^\circ\text{C}$  et éclairement constant égal  $1000 \text{ w/m}^2$ .



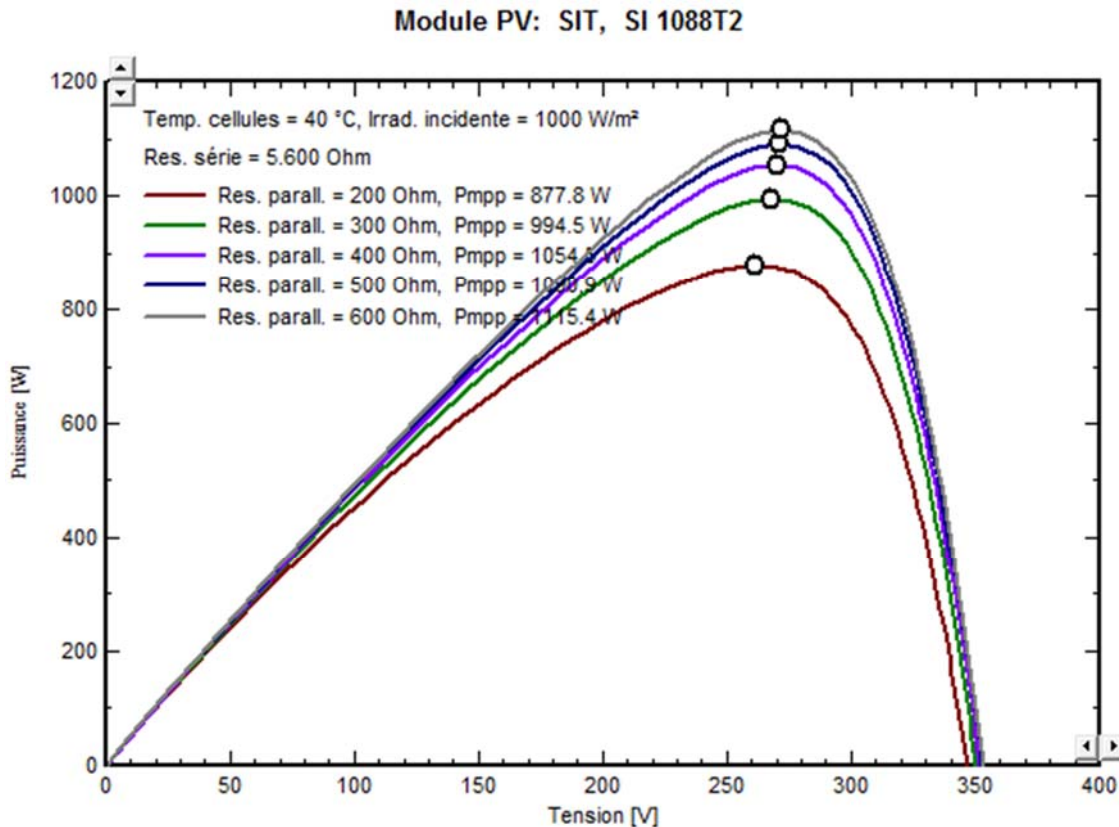


**III.9.b) caractéristique  $P=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes résistances série à température constante égale à 25°C et éclairement constant égal 1000 w/m<sup>2</sup>.**

**III.7.4.2 L'influence de la résistance parallèle :**



**III.10.a) caractéristique  $I=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes résistance à température constante égale à 25°C et éclairements constante égale 1000 w/m<sup>2</sup>.**



### III.10.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes résistances parallèles à température constante égale à 25°C et éclairement

## III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons établi le modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque à partir de celui d'une cellule éclairée.

Les résultats de simulation montrent que les performances d'un panneau PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement solaire et la température.

### CHAPITRE III : Modélisation d'un panneau PV

---

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, ce qui permet au module de produire une puissance électrique plus importante.

L'évolution de la caractéristique  $I=f(V)$  en fonction de la température montre que le courant augmente lorsque la température s'élève.

Et que les performances d'un panneau PV sont d'autant plus dégradées que  $R_s$  est grande, cette influence se traduit par une diminution du point de puissance maximum.

La caractéristique  $P=f(V)$  comporte un point de puissance maximal ( PPM ). Le raccordement direct du générateur PV ne permet de transmettre une puissance maximale que dans les conditions restreintes. C'est l'inconvénient majeur des générateurs PV.

### **IV.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'alimentation d'un moteur asynchrone à partir d'un générateur photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque étant une source continue, l'utilisation d'un convertisseur continu-alternatif est nécessaire, cependant lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la charge.

On doit donc améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par la commande de l'onduleur et l'utilisation de filtres.

Système photovoltaïque proposé

### **IV.2 Présentation de la structure du système photovoltaïque :**

- **Générateur (PV) :**

Composé de 2 panneaux type (SI 1088 T2), en série

Formée de 176 cellules avec un nombre  $N_s = 8$  de cellules en série et  $N_p = 22$  branchées en parallèle étudié au chapitre II.

- **Convertisseur continu alternatif :**

Ils sont relativement peu nombreux ; ils se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phase de la source alternatif.

-si l'étage continu vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de courant.

-si l'étage continu vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de tension.

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases, mais dans les applications de grande puissance, le nombre de phase peut être plus élevé ([12],[24]) par transformation de ce nombre

- **Le filtre LC :**

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux des fréquences voisines de la fréquence fondamentale.

- **Moteur Asynchrone :**

Dont les données sont les suivantes :

Triangle/étoile

380/660 V

$I_n=0.5 \text{ A}$  ,  $P_n= 0.9 \text{ kW}$

$\cos \theta =0.7$ ,  $N=1420 \text{ tr/min}$

$F=50 \text{ Hz}$

### **IV.3 Convertisseur continu-alternatif :**

Ils sont relativement peu nombreux ; ils se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phase de la source alternatif.

-si l'étage continu vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatif associé sont des onduleurs de courant.

-si l'étage continu vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatif associé sont des onduleurs de tension.

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases, mais dans les applications de grande puissance, le nombre de phase peut être plus élevé (12,24) par transformation de ce nombre

### **IV.4 Classification des onduleurs :**

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonome et onduleur autonome. Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance »

#### **IV.4.1 Onduleurs non autonome :**

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif

#### **IV.4.2 Onduleur autonome :**

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

- les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant.

##### **IV.4.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension :**

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable) ,la tension «  $u$  » n'est pas affecté par les variations du courant «  $i$  » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

Le courant à la sortie «  $i'$  » et donc le courant à l'entrée «  $i$  » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

### **IV.4.2.2 Les onduleurs (autonome) de courants :**

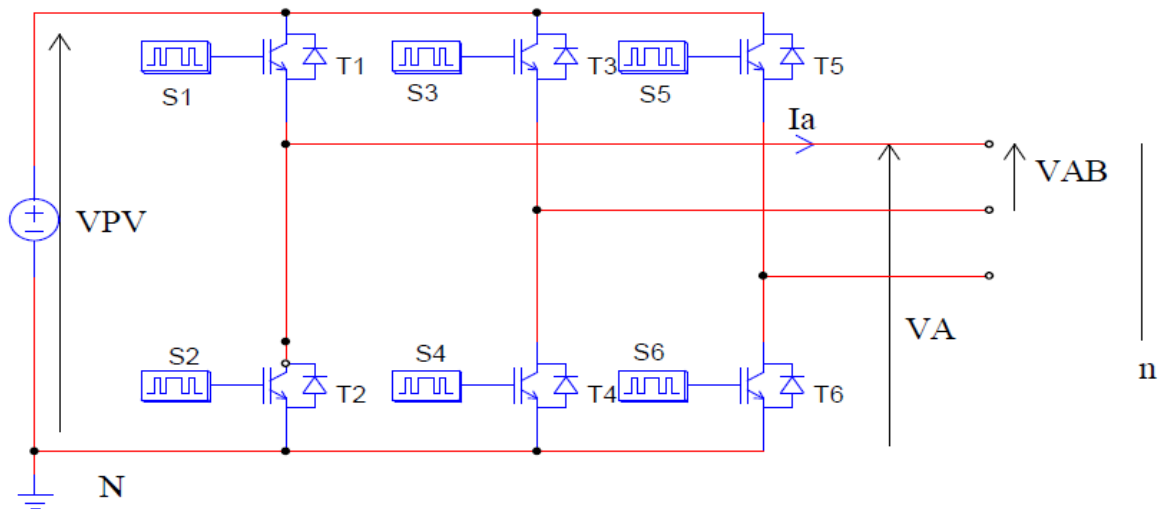
Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est –à – dire par une source d'inductance interne si grande que le courant «  $i$  » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension «  $u$  » à ses bornes.

### **IV.4.3 Les onduleurs à résonance :**

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome.

### **IV.5 Modélisation de l'onduleur triphasé :**

L'onduleur triphasé dit deux niveaux illustré par son circuit de puissance de la figure III.1. on doit distinguer d'une part les tensions de branche  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$  mesurées par rapport à la borne négative de tension continue  $V_{pv}$ , d'autre part, il y a les tensions de phases  $V_{An}$ ,  $V_{Bn}$  et  $V_{Cn}$  mesurées par rapport à un point neutre flottant  $n$  représentent une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  et  $V_{CA}$ . [27]



**Figure IV.1 Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé**

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure IV.2, il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurée par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit [28]:

Où S1, S2 et S3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement.

Et; Vdc est la borne négative de la tension continue.

$$V_{AN} = S_1 \cdot V_{pv}$$

$$V_{AN} = S_2 \cdot V_{pv} \quad \text{VI.1}$$

$$V_{AN} = S_3 \cdot V_{pv}$$

➤ **Les tensions composées sont :**

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_3) V_{pv}$$

$$V_{BC} = V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3) V_{pv}$$



## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

---

$$V_{CA} = V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1) V_{pv}$$

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} * V_{pv}$$

VI.3

$$V_{AN} = \left(\frac{2}{3}\right)V_{AN} - \left(\frac{1}{3}\right)(V_{BN} + V_{CN})$$

$$V_{BN} = \left(\frac{2}{3}\right)V_{BN} - \left(\frac{1}{3}\right)(V_{CN} + V_{AN})$$

VI.4

$$V_{CN} = \left(\frac{2}{3}\right)V_{CN} - \left(\frac{1}{3}\right)(V_{AN} + V_{BN})$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \times \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

VI.5

### **IV.6 Types de commande :**

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

#### **IV.6.1 Commande plein onde :**

Deux transistors d'un même bras sont commandés à  $180^\circ$  de décalage. Les transistors de deux bras voisins sont commandés à  $120^\circ$  de décalage. On obtient ainsi des tensions composées dont les valeurs sont  $E$ ,  $0$  ou  $-E$  volts, la durée d'un niveau non nul étant de  $120^\circ$  par alternance.

#### **IV.6.2 Commande décalée :**

Dans le schéma de la (figure V.1), des signaux de commande complémentaires sont envoyés aux transistors T1 et T2. On envoie aussi aux transistors T3 et T4 des signaux de commande complémentaires, mais décalés d'un angle  $\theta_r$  par rapport aux précédents.

La tension générée a une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier a montré que cette forme d'onde est riche en harmoniques.

Dans notre travail on s'intéresse à la commande à MLI.

### **IV.7 Principe de la commande à MLI des onduleurs triphasés :**

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion, au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec un seul créneau rectangulaire, on la forme de plusieurs créneaux de largeur convenable. Le schéma de l'onduleur reste le même c'est la commande des interrupteurs qui est modifiée. Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont donnés par les intersections de signal de référence avec la porteuse.

### **IV.8 Modulation à largeur d'impulsion :**

Nous avons dit auparavant que les ondes délivrées par les onduleurs à commande pleine onde ou à commande décalée sont riches en harmoniques. Pour atténuer ces harmoniques on peut placer en sortie de l'onduleur un filtre. Le filtrage de la tension ou de courant de sortie d'un onduleur ne délivrant qu'un créneau de tension ou de courant par alternance est difficile et onéreux, car le premier harmonique à éliminer (L'harmonique 3 ou 5) à une fréquence très voisine de celle du fondamental. La modulation de largeur d'impulsion s'avère être la technique la plus appropriée pour la commande de l'onduleur tout en ayant une bonne neutralisation de l'onde de sortie.

#### **IV.8.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion :**

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $f$ , avec un signal appelé porteuse d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$  très élevée. (Figure V.2)

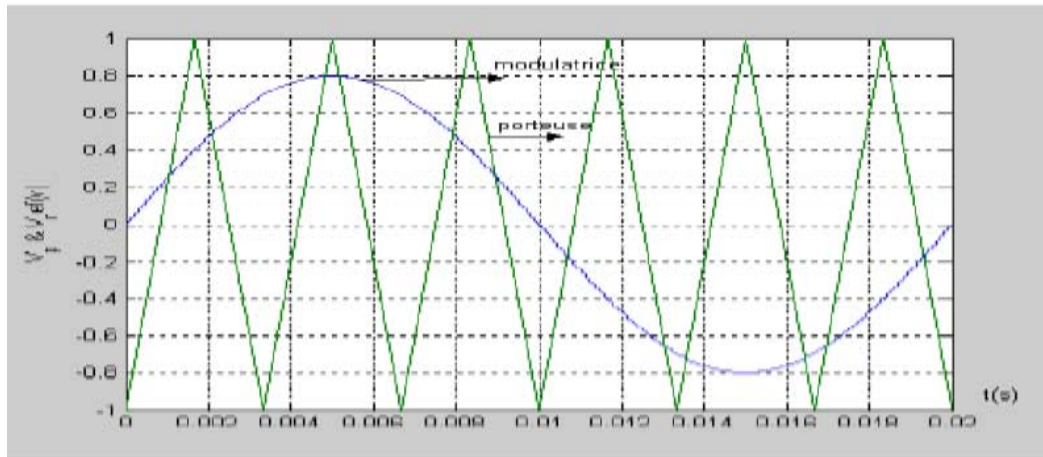


Figure IV.2 Principe de la modulation

### IV.8.2 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion :

- Les paramètres essentiels de la MLI sont :
- La fréquence de la modulation :  $f_p$
- L'indice de modulation :  $m = \frac{f_p}{f_r}$  ou  $f_r$  est la fréquence de la référence.
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  :  $r = \frac{A_r}{A_p}$

Avec

$A_r$ : Amplitude de la référence.

$A_p$ : Amplitude de la porteuse.

La modulation montre que plus «  $m$  » est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de  $r$  la plus élevée possible.

- La modulation est dite synchrone si «  $m$  » est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie «  $U'$  » qui se reproduit identiquement à elle-même tous les

$$T = \frac{1}{f}$$

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

- Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de modulation  $f_p$  donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.

- Pour le choix de « m », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente.

- On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à « 1 », car il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras.

La tension efficace de sortie peut être variée en variant l'indice de modulation m. on peut observer que la zone de chaque impulsion correspond approximativement à la zone au dessus de l'onde sinusoïdale entre la moitié des points adjacents de la fin de la période au début des signaux de commande. Si  $\delta_m$  est la largeur de la  $m^{\text{ième}}$  impulsion, la tension efficace de sortie peut être écrite sous la forme suivante :

$$v_0 = v_s \left( \sum_{m=1}^p \frac{\delta_m}{\pi} \right)^{1/2}$$

### **IV.9 Qualité de l'énergie électrique : critères et définitions :**

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, est des échanges entre client, constructeur, Installateur, concepteur et distributeur. Ou bien une transformation l'énergie de la source vers la charge.

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

- La fréquence.
- L'amplitude de trois tensions.
- La forme d'onde : Qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- Le déséquilibre : La symétrie du système triphasé caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées :

- basse fréquence (< 9 kHz),
- haute fréquence ( $\geq$  9 kHz),
- de décharges électrostatiques.

### **IV.9.1 Creux de tension et coupures :**

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension.

Il est caractérisé par :

- sa profondeur ( $\Delta U$ )
- sa durée ( $\Delta t$ ).

La norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre

1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de  $\frac{1}{2}$  période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute.

La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les  $\frac{1}{2}$  périodes (avec recouvrement d'une  $\frac{1}{2}$  période).

## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution.

Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclenchés, isolations de défaut).

On observe un plus grand nombre de creux de tension et de coupures sur les réseaux aériens que sur les réseaux souterrains du fait des intempéries (excepté, bien entendu, s'ils sont raccordés sur le même départ). [28]

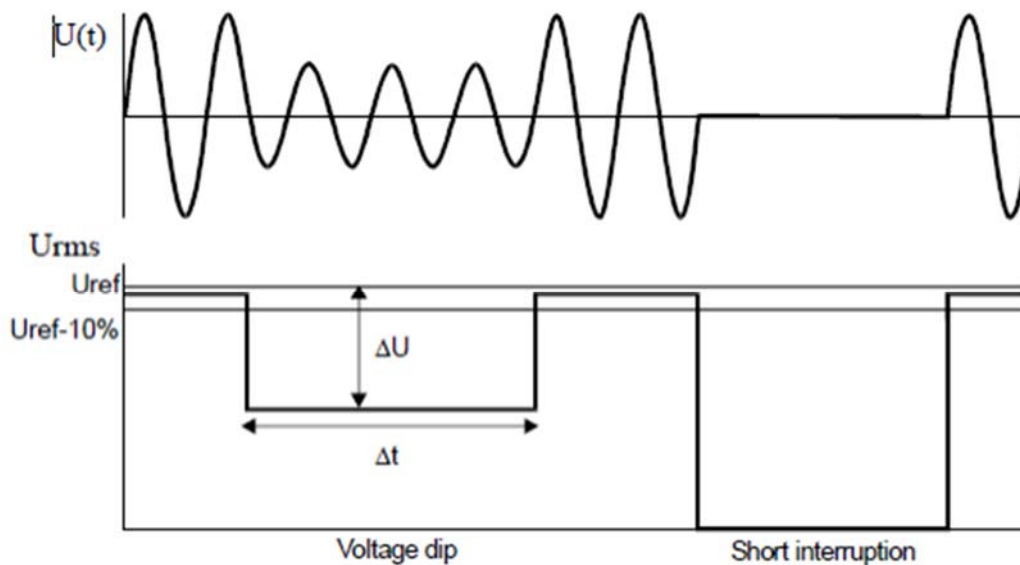


Figure IV.3 Creux de tension et coupures brèves.

### IV.9.2 Surtension temporaires ou transitoires :

La norme EN50160 fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation :

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

- réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance) : la surtension ne devra pas dépasser  $1,7 U_n$  ;

- réseaux à neutre isolé ou résonant : la surtension ne devra pas dépasser  $2 U_n$ .

Les surtensions sont de trois natures :

Surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz) ; surtensions de manœuvre ;

Surtensions atmosphériques. Elles apparaissent selon deux modes :

Mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre)

Mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase – phase ou phase – neutre).

[28]

### **IV.9.3 Fluctuation lente de la tension (flicker) :**

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.

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.

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées à 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. [28]

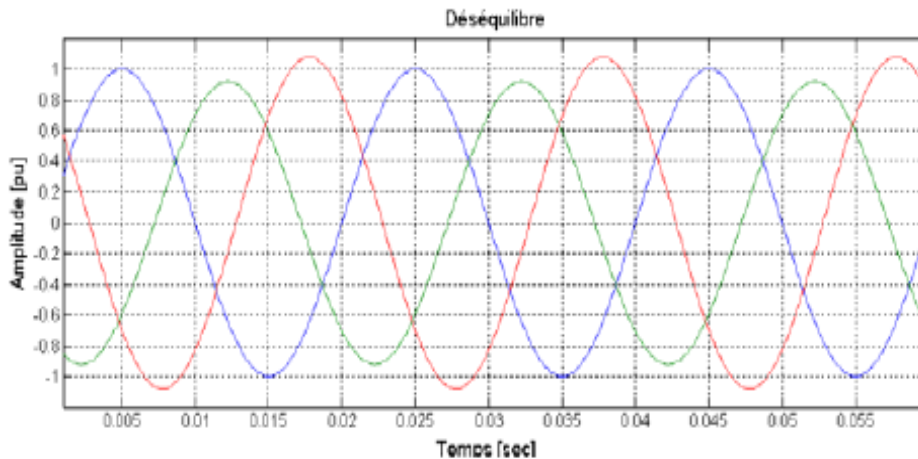
### **IV.9.4 Déséquilibre du système triphasé de tensions :**



## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de  $\pm 120^\circ$ .

Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré (Figure V.4).



**Figure IV.4 Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases**

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 phase différente, 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  $120^\circ$ .

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. [29]

### IV.9.5 Variations de la fréquence :

## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

En ce qui concerne la fréquence. Les variations lentes autour de la valeur nominale 50 ou 60 Hz sont généralement faibles. Dans les pays européens. Dont les réseaux sont interconnectés, la norme précise 50 Hz est  $\pm 1\%$  pendant 95% d'une semaine et  $[+4\%, -6\%]$  en cas de perturbation très importante. Ces variations peuvent être bien plus importantes pour des réseaux autonomes, par exemple sur une île. [29]

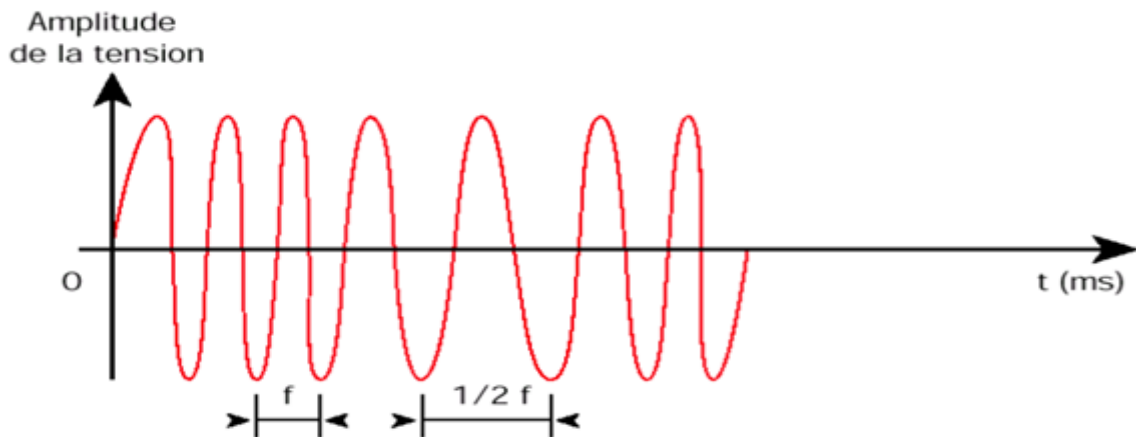


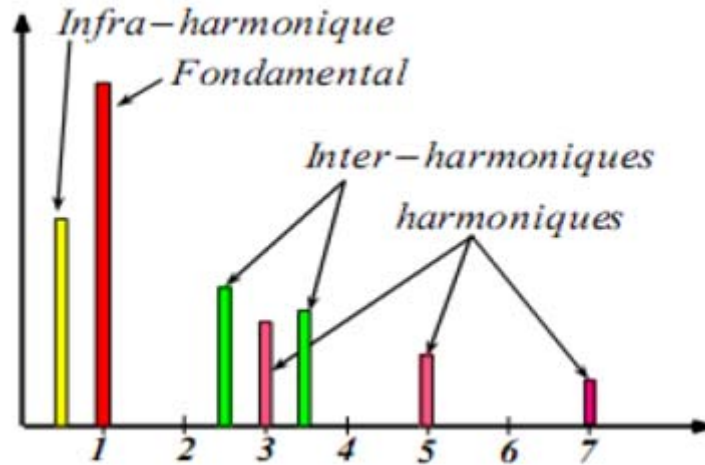
Figure IV.5 Forme d'onde de la variation de la fréquence

### IV.9.6 Harmoniques et inter harmoniques :

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence (l'onde fondamentale à 50 Hz) est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau.

En générale. Les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impaires existent. Les principaux harmoniques présents sont le troisième, le cinquième, le septième et le neuvième.

- L'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. [30]



**Figure IV.6 Représentation des inter et infra harmoniques**

**IV.10 Caractéristiques d'un signal :**

**IV.10.1 Rang d'un harmonique [24] :**

Les harmoniques sont classés selon leur rang, leur fréquence et leur sens.

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fréquence	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Sens	+	-	0	+	-	0	+	-	0

**Tableau VI.1 : Les harmoniques**

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamentale. Généralement la fréquence industrielle 50 Hz ou 60Hz. Par principe . Le fondamentale  $f_1$  a le rang 1

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

Les harmoniques de rang pair, très souvent négligeables, s'annulent en raison de la symétrie du signal.

Par contre Les harmoniques les plus fréquentes et donc les plus gênantes sont les harmoniques de rang impair.

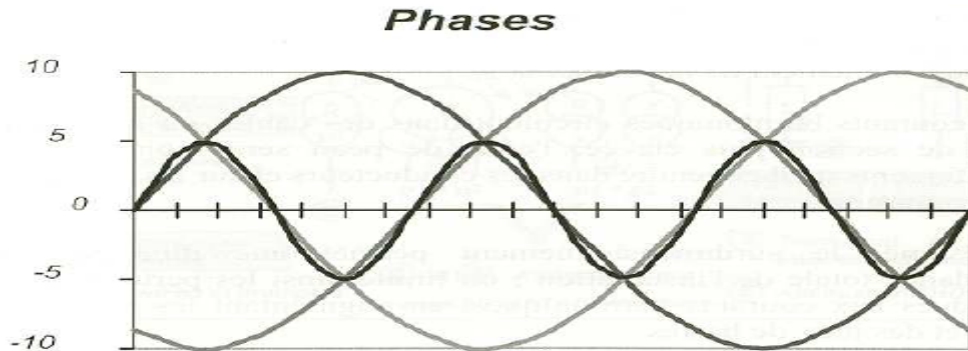


Figure IV.7 Harmonique de rang 3.

### IV.10.2 Représentation spectrale :

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang.

L'amplitude en donnée on valeur relative par rapport au fondamentale en un point spécifié.

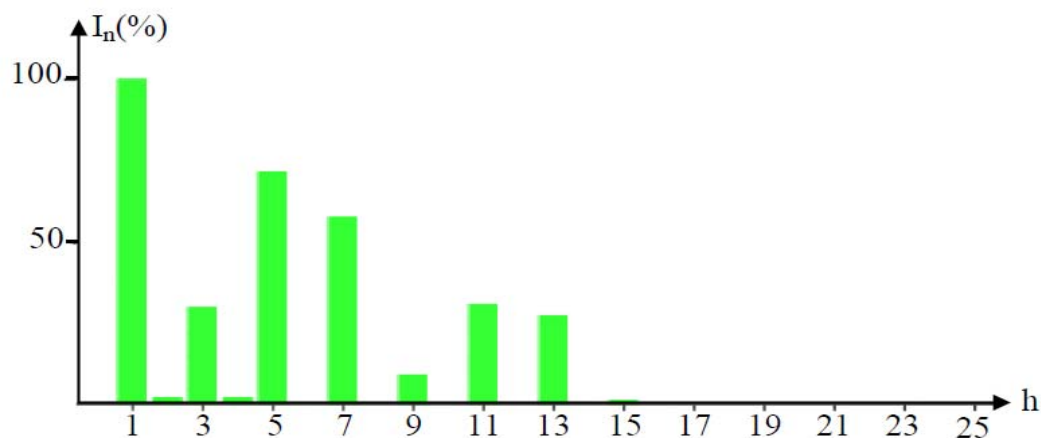


Figure IV.8 spectre d'harmonique

### IV.10.3 Analyse de Fourier :

## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

Sur le plan mathématique. On peut décomposer tout signal périodique en une série de sinusoides dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale du signal. Cette série se nomme série de Fourier. D'après le mathématicien français Joseph Fourier du début du XIX<sup>e</sup> siècle.

Par définition, une fonction  $f(t)$  est dite périodique si elle vérifie la relation  $f(t) = f(t + T_0)$ , où  $T_0$  est sa période fondamentale.

Un signal  $x(t)$  périodique de période fondamentale  $T_0$  peut, sous les conditions de Dirichlet ( $x(t)$  borné, continu par morceaux, monotone par morceaux), se décomposer en une série convergente de la forme :

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)].$$

Où :  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$  est la pulsation fondamentale du signal. On définit également la

fréquence fondamentale du signal par  $f_0 = \frac{1}{T_0}$ .

Avec :

$A_0$  : Composante continue ou valeur moyenne du signal, généralement nul en distribution électrique en régime permanent.

$A_n$  et  $B_n$  : amplitude crête des composant harmonique de rang  $n$ .

$\omega$ : Pulsation fondamentale.

En électrotechnique, on utilise habituellement les valeurs efficaces plutôt que les valeurs crête.

Par conséquent, l'équation précédente devient

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{A_n}{\sqrt{2}} \cos(n\omega t) + \frac{B_n}{\sqrt{2}} \sin(n\omega t) \right].$$

On obtient les coefficients  $A_n$  et  $B_n$  par résolution analytique ou numérique des intégrales suivantes :

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t.$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t.$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t.$$

Où  $T=2\pi$ .

### IV.10.4 Taux de Distorsion THD :

Le THD (Total Harmonic Distorsion) permet la quantification en un point de mesure donné.

Le THD mesure la distorsion harmonique totale par rapport au fondamental.

$$\text{THD}_f = \frac{\sqrt{h^2_2 + h^2_3 + \dots + h^2_n}}{h_1} \times 100\%$$

La distorsion harmonique totale peut dépasser 100%, cela signifie que sur cette installation, en ce point de mesure, la contribution harmonique sera supérieure au fondamental.

En l'absence d'harmonique, le THD est nul. Dans la pratique un THD inférieur à 10-15% constitue une bonne référence.

### IV.10.5 Les principales sources d'harmoniques :

Ce sont des charges, qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques.

- Les charges industrielles
  - Équipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage
  - Charges utilisant l'arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

- Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage :

Téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes.

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes

### **IV.10.6 Effet des harmoniques :**

Les courants harmoniques n'ont pas d'effet direct sur la consommation énergétique mais ils augmentent les pertes par échauffement dans les installations (transformateurs, câblage, etc.). On peut distinguer leurs effets dans le temps en deux catégories:

Les principaux effets instantanés ou à court terme:

- Le déclenchement intempestif des protections;
- Les vibrations et bruits acoustiques;
- Les pertes de précision des appareils de mesure.

Les principaux effets à long terme:

- L'échauffement des sources;
- La fatigue mécanique des installations;
- L'échauffement des récepteurs;
- La destruction de matériel.

### **IV.10.7 Les principales sources d'harmoniques :**

Ce sont des charges, qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques.

- Les charges industrielles

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

- Équipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage

- Charges utilisant l'arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).

- Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage :

Téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes.

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes

### **IV.10.8 Effet des harmoniques :**

Les courants harmoniques n'ont pas d'effet direct sur la consommation énergétique mais ils augmentent les pertes par échauffement dans les installations (transformateurs, câblage, etc.). On peut distinguer leurs effets dans le temps en deux catégories:

Les principaux effets instantanés ou à court terme:

- Le déclenchement intempestif des protections;
- Les vibrations et bruits acoustiques;
- Les pertes de précision des appareils de mesure.

Les principaux effets à long terme:

- L'échauffement des sources;
- La fatigue mécanique des installations;
- L'échauffement des récepteurs;
- La destruction de matériel.

### **IV.11 Constitution de la machine asynchrone**



## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

Le moteur asynchrone représentée ci-dessous (voir la Fig-I-1) est constituée par :

### 1. Le stator

Le stator d'un moteur asynchrone est identique à celle d'un moteur synchrone (MS), 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de  $2\pi/3$  qui sont alimentés par un système de tensions équilibrées.

### 2. Le rotor

Le rotor du moteur supporte un bobinage semblable à celle du stator du MS, bobinage triphasé décalés de  $2\pi/3$  à même nombre de pôles que celle du stator du MS. Ces 3 bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. Ce type de rotor est dit bobiné mais on peut envisager un rotor plus sommaire constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité.

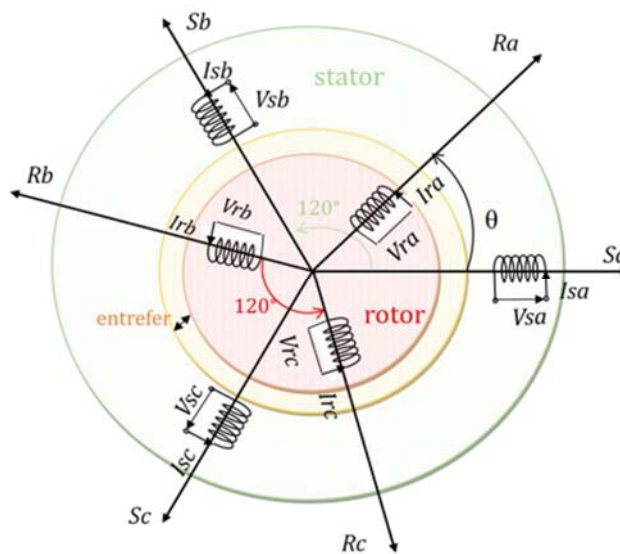


Figure IV.9 Représentation électrique de la machine asynchrone

### IV.12 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique  $\vec{B}$ . Ce champ est dans

## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont fonction du courant  $I$ . C'est une grandeur vectorielle.

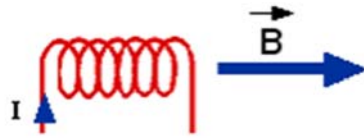


Figure. IV.10 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

### IV.13 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Structure simple.</li><li>➤ robuste et facile à construire.</li><li>➤ coût réduit.</li><li>➤ absence d'un système bague balais</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Non découplage naturel.</li><li>➤ Non linéarités.</li></ul>

Tableau IV.2 : Les avantages et les inconvénients de moteur asynchrone.

### IV.14 Hypothèses :

La modélisation de la machine asynchrone est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le bobinage est réparti de manière à donner une f.é.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.
- Nous supposerons également que nous travaillons en régime non

## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.

- Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.
- Ces choix signifient entre autres que les flux sont additifs, les inductances propres sont constantes, il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques [2.18].

### IV.15 Modèle dynamique de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est représentée schématiquement par la figure 4.1 elle est munie de six enroulements.

- Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et traversés par trois courants variables.
- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de  $120^\circ$

Ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

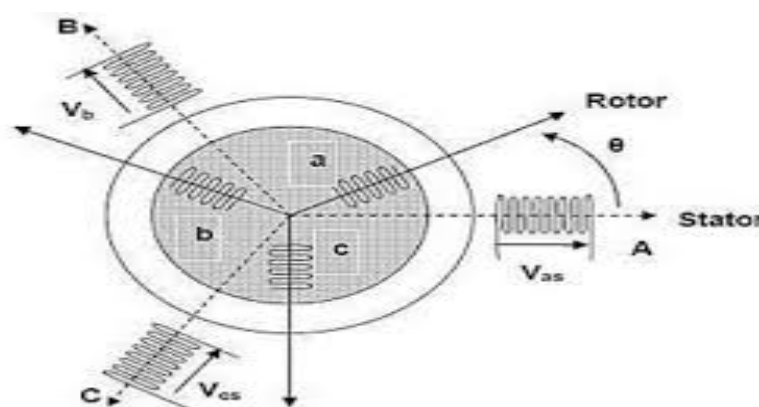


Figure IV.11 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

**a-Équations électriques de la machine asynchrone dans le repère triphasé :**

## CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau

D'après la loi de Faraday, on peut écrire que  $V = Ri + \frac{d\phi}{dt}$ . Nous avons appliqué cette formule dans les trois phases de le moteur asynchrone, et obtenu les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_s = |R_s|.i_s + \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_r = 0 = |R_r|.I_r + \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta_s = |L_s|.I_s + |M_{sr}|.I_r \\ \theta_r = |L_r|.I_r + |M_{rs}|.I_s \end{cases}$$

Avec :

$V_s = (V_{as} V_{bs} V_{cs})^T$  : Tension des phases statoriques.

$V_r = 0 = (V_{ar} V_{br} V_{cr})^T$  : Tension des phases rotoriques.

$I_s = (I_{as} I_{bs} I_{cs})^T$  : Courant des phases statoriques.

$I_r = (I_{ar} I_{br} I_{cr})^T$  : Courant des phases rotoriques.

$\theta_s = (\theta_{as} \theta_{bs} \theta_{cs})^T$  : Flux totaux à travers les bobines statorique.

$\theta_r = (\theta_{ar} \theta_{br} \theta_{cr})^T$  : Flux totaux à travers les bobines rotoriques.

$$|R_s| = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad |R_r| = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$|M_{sr}| T = |M_{rs}| = M' = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Où :

$L_s$  est l'inductance propre d'une phase statorique

$L_r$  est l'inductance propre d'une phase rotorique

$M_s$  est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques

$M_r$  est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques

### b-Equation mécanique :

$$\begin{cases} C_{em} - c_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \\ \omega = p\Omega \end{cases}$$

Avec :

**J** : Moment d'inertie du rotor.

**$\Omega$** : vitesse angulaire mécanique du rotor.

**f**: Coefficient de frottement visqueux.

**$C_{em}$** : Couple électromagnétique délivré par le moteur.

**$C_r$** : Couple résistant, ou de charge.

**$\omega$** : Vitesse angulaire électrique du rotor.

**P** : Nombre de paires de pôles

**IV.16 Transformation de Park :**

La transformation de Park est une transformation du repère triphasé fixe par rapport au stator dans un repère biphasé. Cette transformation permet de réduire la complexité du système.

La position du repère peut être fixée par rapport aux trois référentiels

La figure suivante figure IV.12. Illustre cette transformation :

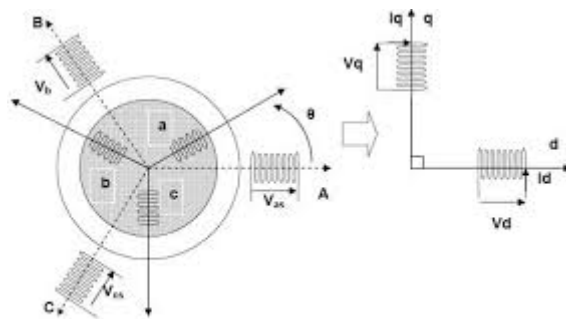


Figure 1.2 Modèle de Park de la MAS

**Figure IV.12 Modèle de Park de la machine asynchrone**

Pour transformer un système triphasé [a, b, c] en un système biphasé [d, q] avec une composante homopolaire comme indique dans l'équation suivante :

$$X_{dq} = [P] X_{abc}$$

Tel que :

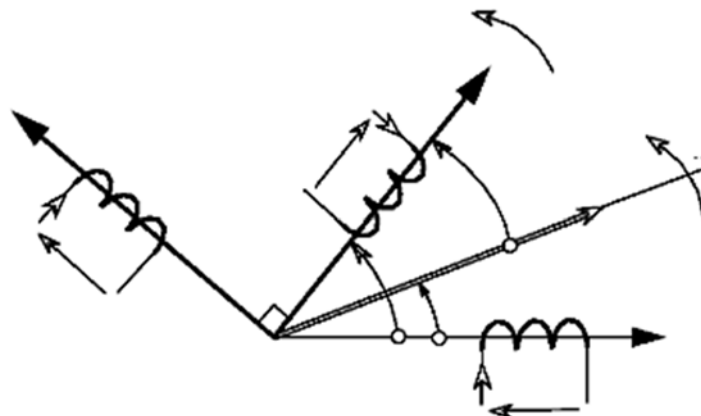
X : peut être : la tension, le courant ou le flux.

[P] : est la matrice de la transformation de Park définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

**IV.17 Transformation de Park appliquée au moteur asynchrone :**

Cette transformation est schématisée P ( $\theta$ ) la figure représentée ci-dessous.



**Figure IV.13 Représentation vectorielle des enroulements du Moteur Asynchrone**

**a-Equation électrique :**

En application la transformation de Park sur les équations électrique et en admettant que le rotor étant en court-circuit il en résulte :

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \phi_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega \phi_{ds}$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\phi}{dt} \cdot \phi_{qr}$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \phi_{dr}$$

**b-Equation magnétique :**

$$\begin{cases} P_{ds} = L_{sids} + M_{dr} \\ P_{qs} = L_{siqs} + M_{iqr} \\ P_{dr} = L_{ridr} + M_{ids} \\ P_{qr} = L_{riqr} + M_{iqs} \end{cases}$$

**c-Expression de couple électromagnétique :**

On a:

$$P_m = C_{em} \cdot \Omega = \omega_s (\Theta_{sdisq} - \Theta_{sqisd})$$

$$\omega = P \Omega$$

$$C_{em} = \frac{\omega}{\Omega} \omega_s (sdisq - \Theta_{sqisd}) = P(\Theta_{sqisq} - \Theta_{sqisd})$$

$$C_{em} = P(\Theta_{sdisq} - \Theta_{sqisd})$$

**IV.18 Simulation globale du système PV :**



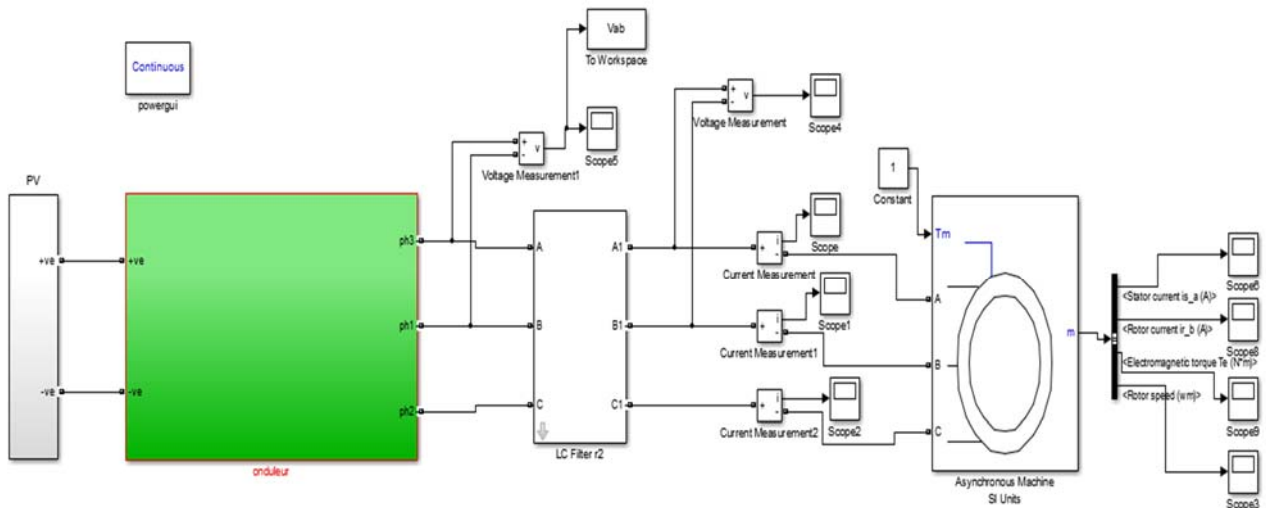


Figure IV.14 Simulation globale du système PV

### IV.18.1 Résultats de simulation :

Après l'analyse théorique nous abordons maintenant la simulation en utilisant un logiciel bien approprié, à savoir le matlab.R2009a.

La simulation est faite pour deux cas :

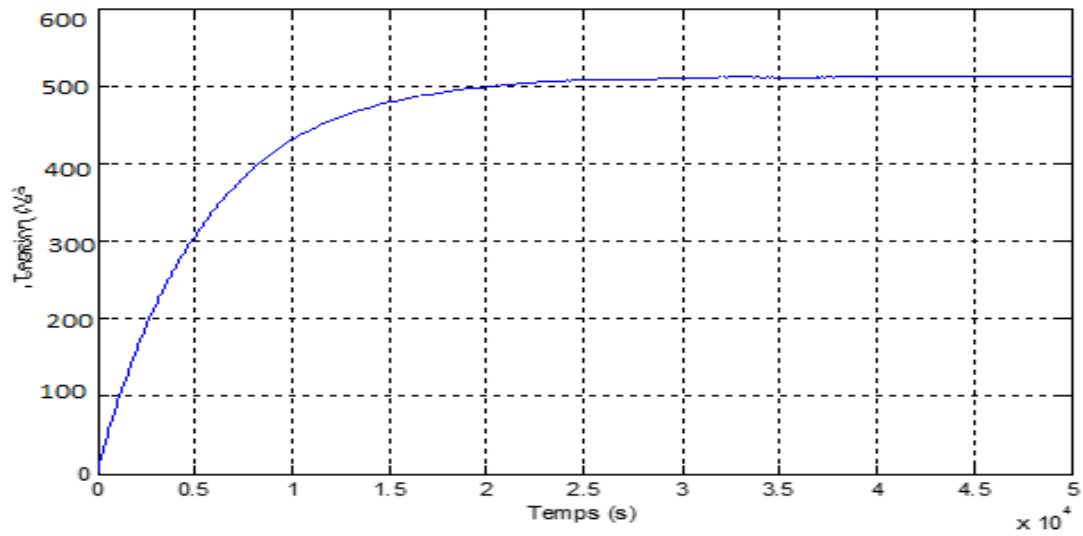
A:  $m=17$  et  $r=0.8$

B:  $m=33$  et  $r=0.8$

Les résultats de simulation sont représentés par les figures Fig. (IV-15),(IV-16) ,(IV-17),(IV-18),(IV-19),(IV-20)et qui expriment la tension d'alimentation de l'onduleur, la tension composée à la sortie de l'onduleur pour les deux cas, les tensions composés et les courants de ligne à la sortie de filtre LC, ainsi que les spectres d'harmoniques des tensions composés avant et après filtrages bien sur pour les deux cas citer ci-dessus.

### Réponse du système dans le régime permanent :

- Tension d'alimentation de l'onduleur de tension

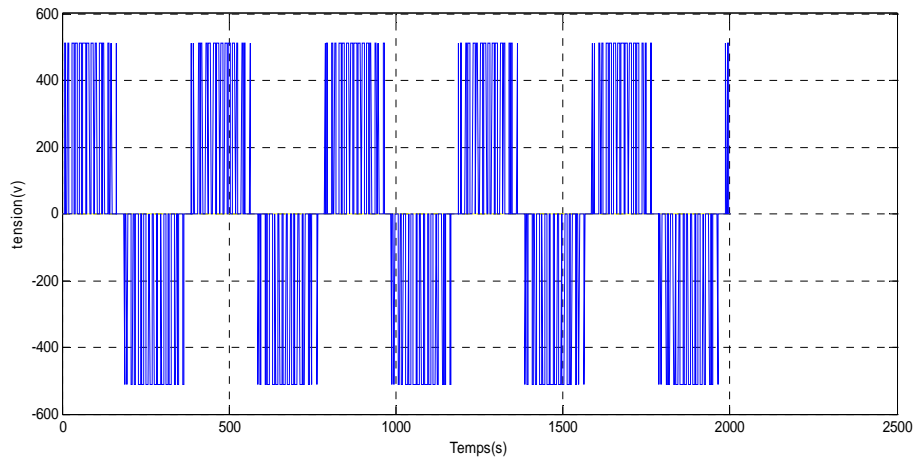


**Fig. IV-15. Tension continue alimentant l'onduleur de tension**

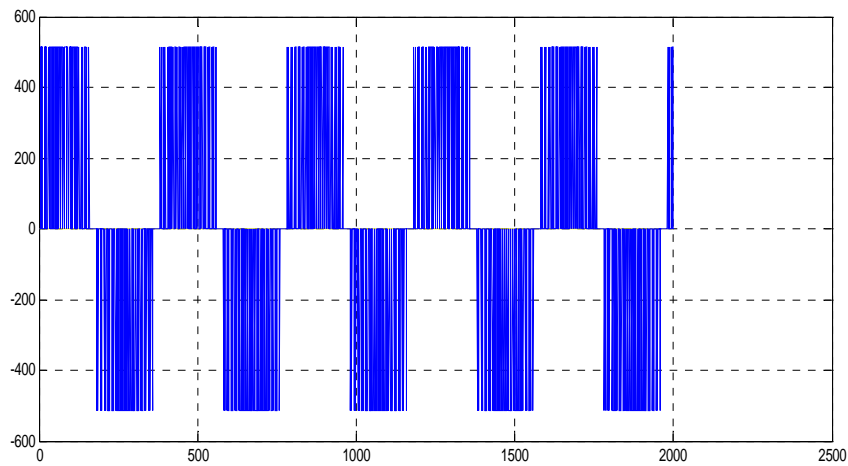
### **Avant filtrage :**

- Tension composée à la sortie de l'onduleur

A)



**B)**



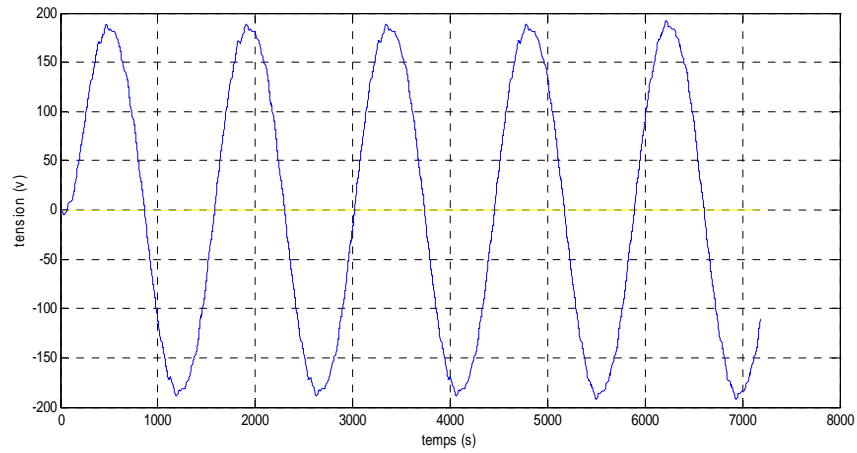
**Fig. IV-16. Formes d'ondes de la tension composée à la sortie de l'onduleur**

**A) Pour  $m=17$**

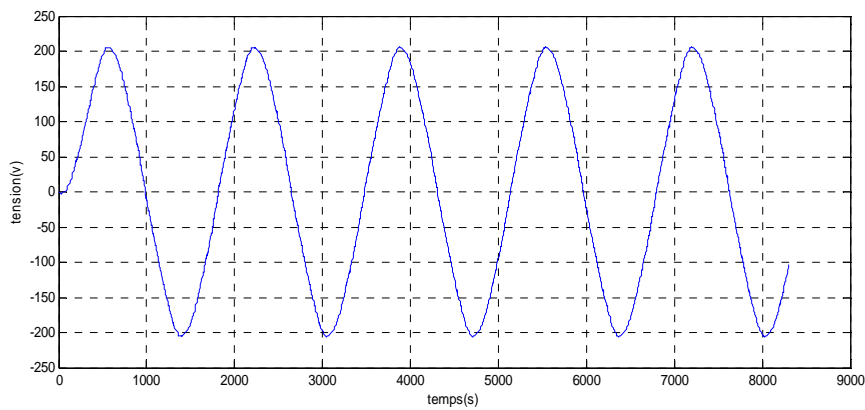
**B) Pour  $m=33$**

**Tension composée après filtrage**

**A)**



**B)**



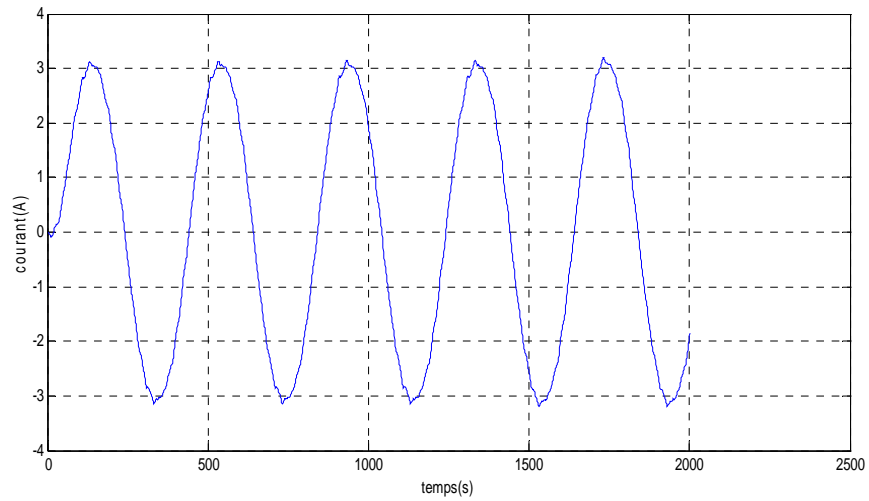
**Fig. IV-17. Formes d'ondes de la tension composée après filtrage**

**A) Pour  $m=17$**

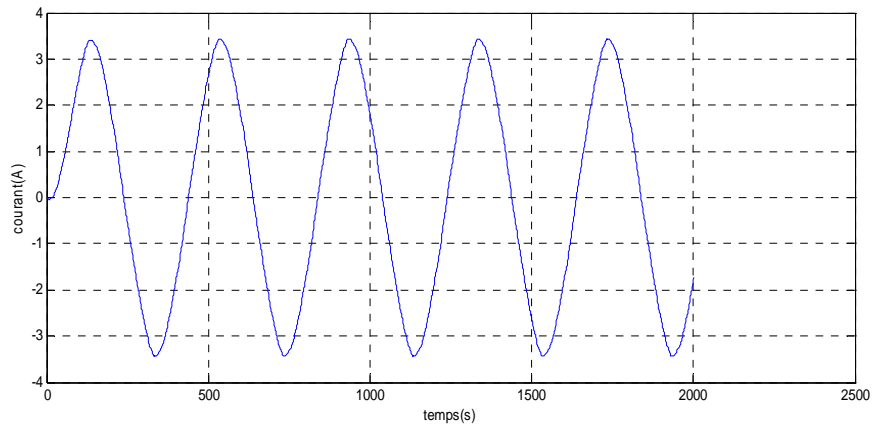
**B) Pour  $m=33$**

- **Courant de ligne à la sortie du filtre**

**A)**



**B)**



**Fig. IV-18. Formes d'ondes du courant de ligne à la sortie de filtre LC**

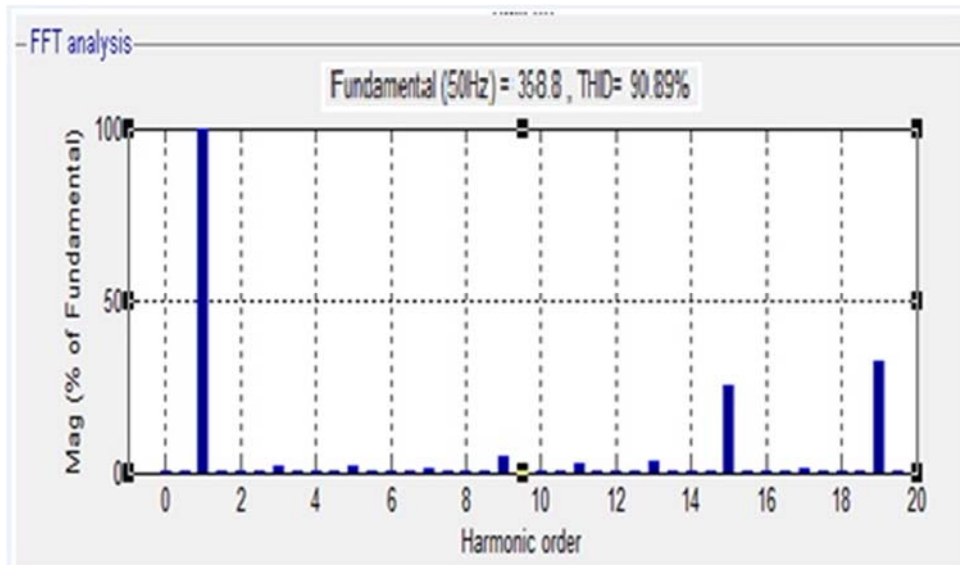
**A) Pour  $m=17$**

**B) Pour  $m=33$**

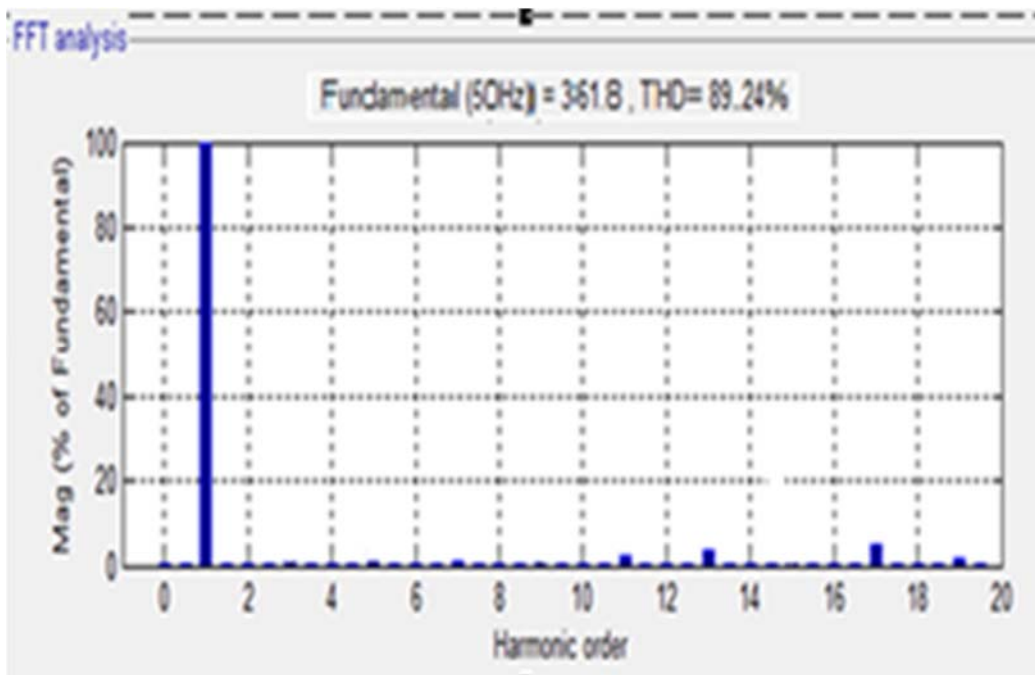
- **Spectre d'harmonique de la tension composée**

**Avant filtrage**

**A)**



**B)**



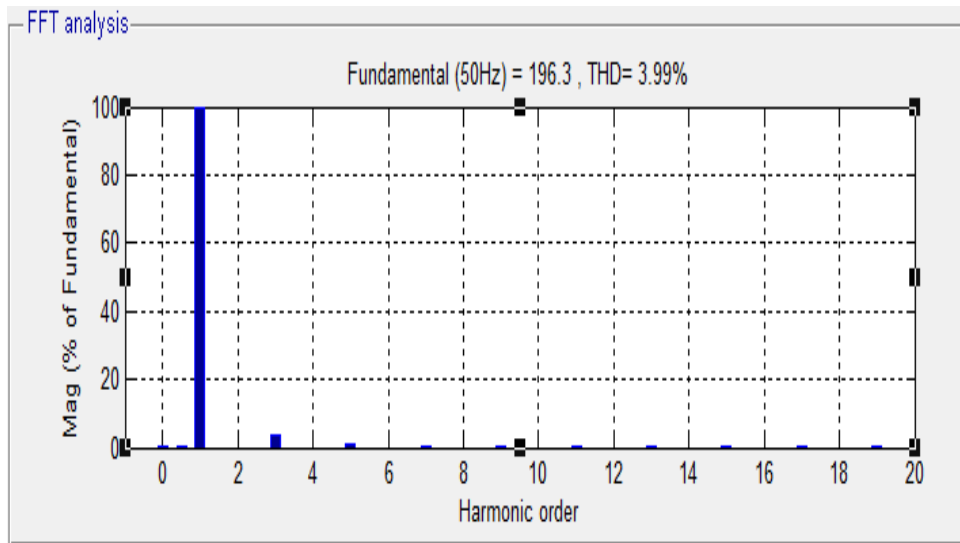
**Fig. IV-19. Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur**

**A) Pour m=17**

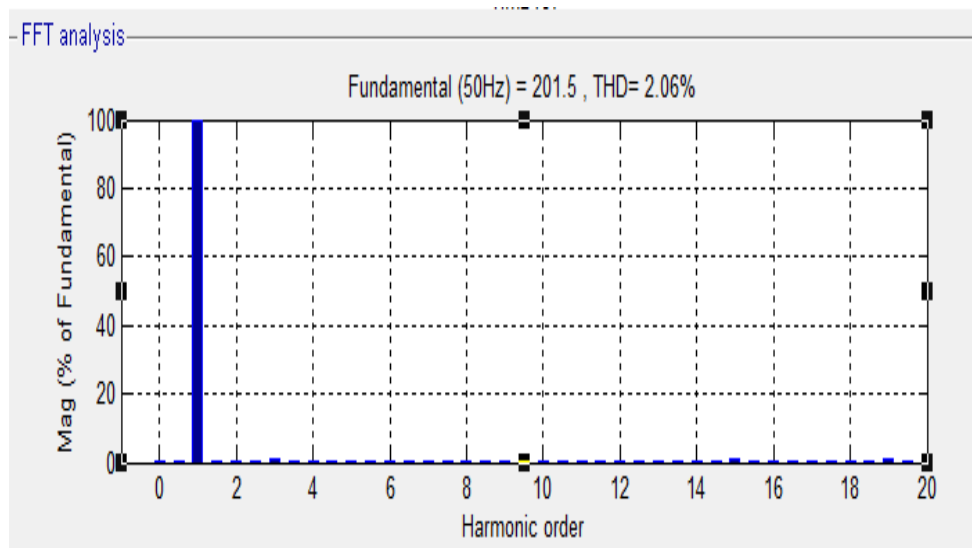
**B) Pour m=33**

**Après filtrage :**

**A)**



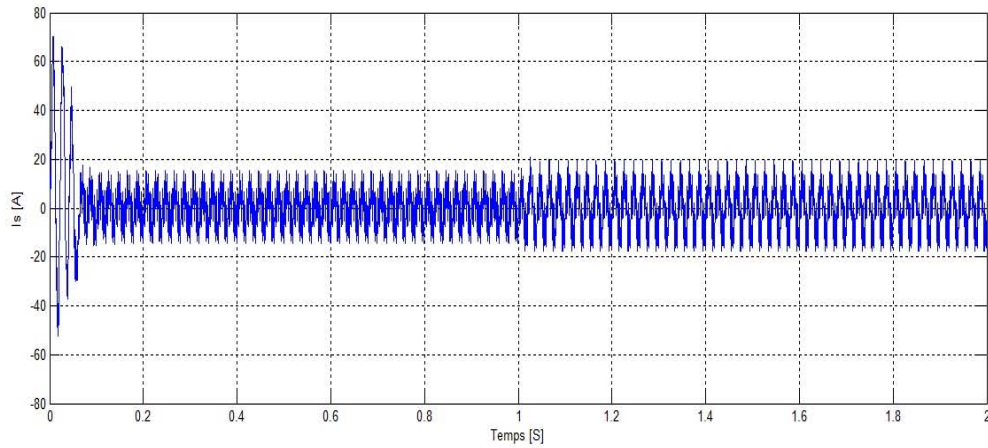
**B)**



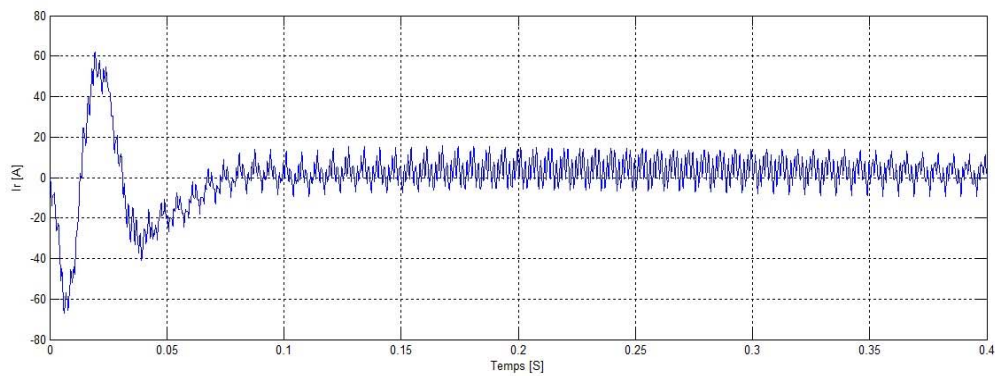
**Fig. IV-20. Spectre d'harmonique de la tension composé après filtrage**

**A) Pour m=17**

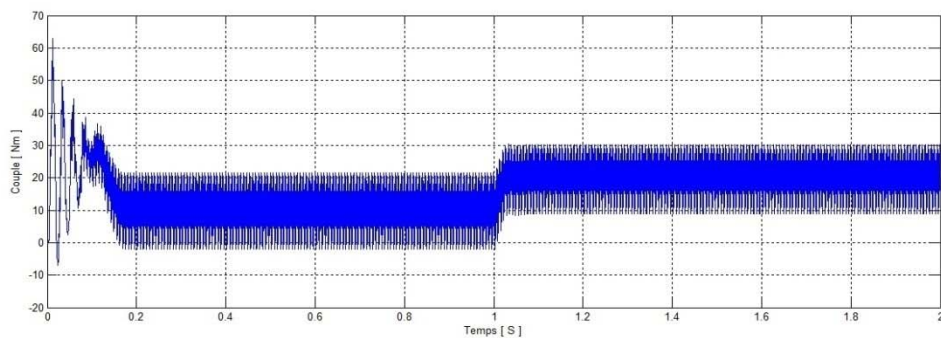
**B) Pour m=33**



**Fig. IV.21 : courant statorique  $I_s$  [A]**



**Figure IV.22: courant rotorique  $I_r$  [A]**



**Figure IV.23 : couple électromagnétique [Nm]**



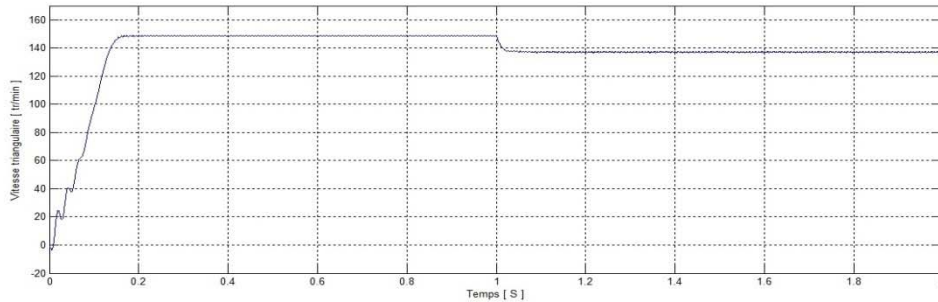


Figure IV.24 : vitesse triangulaire [tr/min]

### IV.18 .2Interprétation des résultats :

D'après les résultats de Simulation on remarque :

#### ❖ avant filtrage

- 1) L'augmentation de l'indice de modulation « m » permet de repousser les harmoniques de la tension de phase vers les fréquences très élevées.
- 2) Pour un indice de modulation « m » impair, on trouve seulement les harmoniques impairs et qui se regroupent autour des familles  $mf$  ,  $3mf$  .....etc.
- 3) La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamental ne dépend pas de la variation de l'indice de modulation « m ».

On observe que le taux de distorsion harmonique THD à une grande valeur de 90.88 %, donc l'utilisation d'un filtre LC raccordé entre l'onduleur et la charge s'avère nécessaire pour réduire la propagation des harmoniques fournie à la charge.

#### ❖ Apres filtrage

Après l'application du filtre LC, on observe que pour  $m=17$  une amélioration dans l'allure de la tension et du courant avec des courbes peu bruitées, par contre lorsqu'on prend  $m=33$  on enregistre une nette amélioration dans l'allure de la tension et du courant avec des courbes moins bruitées.

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

Le courant et la tension ont été dépollués à un niveau peu satisfaisant pour  $m=17$ , ceci est conforté par le spectre harmonique de tension THD V d'un taux 2.06% qui est inférieur à 4%.

D'autre part c, pour  $m=33$  le courant et la tension ont été dépollués à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique de tension THD V d'un taux 3.99% qui est inférieure à 4% (norme IEEE standard 519) comme illustré la figure

Les résultats de simulation réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink<sup>®</sup>, montrent clairement l'intérêt du filtre LC qui joue un rôle prépondérant pour fournir à le moteur asynchrone une énergie propre de bonne qualité issue du panneau photovoltaïque.

- Lors de l'alimentation du moteur à travers la sortie alternative de l'onduleur ; on remarque sur la forme du courant statorique absorbé au démarrage de la machine asynchrone qu'il ya un fort appel de courant
- La vitesse augmente progressivement. Si le moteur est alimenté à partir d'un onduleur ; on remarque que le régime transitoire est un peu plus long.
- Cependant, ces oscillations ne sont pas visibles sur la vitesse car ils sont filtrés par le moment d'inertie de la machine, mais ils apparaissent sur l'allure du courant statorique et rotorique.

### **IV.19.Conclusion :**

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

Dans ce chapitre nous avons étudié l'alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV.

L'utilisation du convertisseur continu-alternatif enrichit les formes d'ondes des tensions d'harmoniques, ce qui affecte le bon fonctionnement de la charge.

La commande à MLI de l'onduleur et l'utilisation de filtre LC nous ont permis d'améliorer la qualité de l'énergie électrique fournie à la charge.

Les résultats de simulation ont montré que la commande à MLI repousse les harmoniques de la tension vers des fréquences de rangs élevés.

L'utilisation de filtre entraîne une nette amélioration de la forme de tension composée, en effet pour un indice de modulation  $m=33$  par exemple, le THD est passé de 89.24% avant filtrage à 2.06% après filtrage.

L'association machine asynchrone onduleur de tension MLI confirme l'efficacité du convertisseur choisi et la commande adoptée.

En conclusion, on peut dire qu'avec la commande MLI et l'utilisation de filtres on arrive à obtenir des caractéristiques de sortie de la machine comparables à celles obtenues en pleine tension.

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---



## **CHAPITRE IV : Alimentation d'un moteur asynchrone par un panneau**

---

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale :

Dans le premier chapitre nous avons étudié les différents types d'énergies renouvelables.

Nous avons vu qu'elles constituent une alternative aux énergies fossiles, car elles sont moins perturbatrices de l'environnement, inépuisables et n'émettent pas de gaz à effet de serre.

Le deuxième chapitre c'est articulé sur le principe de la production de l'énergie solaire notamment l'étude de la cellule PV.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

Le premier problème majeur surgissant est le faible rendement de conversion de ce matériau (dans les meilleurs des cas, il est de 17%).

Dans le troisième chapitre à été consacré à la modélisation d'un panneau PV afin d'analyser son fonctionnement et l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques de sortie.

Enfin, dans le quatrième chapitre nous avons simulé le panneau PV (PV module : SIT, SI 1088T2). Les résultats obtenus montrent que les performances d'un module PV sont fortement influencées par les conditions climatiques notamment l'éclairement solaire et la température.

Le problème majeur est que les modules photovoltaïques se comportent comme des générateurs non linéaires. Le module photovoltaïque possède un point de fonctionnement optimum appelé le point de puissance maximal (PPM).

L'addition d'un dispositif d'optimisation (convertisseur DC-DC) au système PV peut être proposée comme thème pour une nouvelle étude.

## **CONCLUSION GENERALE**

Notre travail peut être alors poursuivi par les perspectives suivantes :

- Une commande MPPT ( maximum power tracking ) qui a pour rôle la poursuite de PPM en forçant le système PV à délivrer la puissance maximale.
- Des éléments de stockage de l'énergie : super condensateur, batterie à combustible...

[1] : H.S Raus chenbach.Solar cell array desing hand book . Van Nostrand, 1980

[2] : P.W.Carlin, A.S. Laxon, E.B.Muljadi,” the history and state of art of variable speed wind turbine technology “ ,NRLE/TP\_500\_28607,Fèvrier 2001

[3] : Ksouentini Fatma Zohra,Bouhaddada Ahmed . “L’ENERGIE EOLIENNE” Mémoire de mastre d’electrotechnique, università badji mokhtar , annaba, 2012.

[4] : J.Martin , “Energies èoliennes “ ,technique de l’ingènieur , traitè de genie energitique , pp.B 8 585 1 \_B8 585 21 .

[5] :  
[http ://www.lei.ucl.ac.be/multimedial/eLEE/realisations/energiesRenouvelable Filière solaire/Solaire.htm](http://www.lei.ucl.ac.be/multimedial/eLEE/realisations/energiesRenouvelableFilièresolaire/Solaire.htm)

[6] : Ksouentini Fatma Zohra,Bouhaddada Ahmed . “L’ENERGIE EOLIENNE” Mémoire de mastre d’electrotechnique, università badji mokhtar , annaba, 2012.

[7] : Akihiro Oi ,“Design and Simulation of photovoltaic waterpumping System“ A thesis presented to the Faculty of california Polytechnic State university San Louis Obispo,2005

[8] : Technique d’ingenieur (energie solaire)

[9] : [http://www.lei.ucl.ac.be/multimedial/eLEE/realisations/energiesRenouvelable Filière solaire /Solar.htm](http://www.lei.ucl.ac.be/multimedial/eLEE/realisations/energiesRenouvelableFilièresolaire/Solar.htm)

[10] : BOUZERIA HAMZA , ZOUTEN ISSAM “ètude des hacheurs et leurs opplications dans l’optimisation des generateurs photovoltaique“ Mémoire de mastre d’electrotechnique, Università badji mokhtare annaba,2011.

[11] : Programme indicatif des besoins en moyens de production d’electricità 2008-2017, commission de la regulation de l’electricità et de gez

[12] : B . Flèche \_ D.delagnes“Energie solaire photovoltaïque .doc“juin07

[13] : D.Turcotte ,M.Ross and F.Sheriff.^Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools ^^ PV horizon , Canada ,2001 .ARTICLE PDF.

[14] : **Extrait d'un cours magistral de Stéphane ASTIER Professeur Des universités \_INPT\_ENSEEIHT**

[15] : D.Turcotte ,M.Ross and F.Sheriff.^Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools ^^ PV horizon , Canada ,2001 .ARTICLE PDF.

[16] : Belhadji Mohammed. “modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. mémoire de magister, centre universitaire de bechar

[17] : D.sera ,R teodrescu,and P . Rodriguez. PV anel model bases on datasheet values .In proc .IEEE inter\_national Symposium on industrial Electronics, ISIE, P2392\_2396, 2007

[18] : W . De soto,S.A .Klein ,and W .A.Beckman .Improvement and validation of a model for voltaic array performance . Solar energy, 80(1):78\_88, January 2006.

[19] : A.Driess,S.Harrison,and P .Jain . Evaluating the effectiveness of maximum power point tracking methods in photovoltaic power Electronics Specialists Conference, PESC, p.145\_151, 2007

[20]: D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff. ^^Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools ^^ PV horizon, Canada, 2001 .ARTICLE PDF.

[21] : W . De soto,S.A .Klein ,and W .ABeckman .Improvement and validation of a model for voltaic array performance . solar energy ,80(1):78\_88,January 2006.

[22] : Geoff walker . Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model. Journal of electrical & Electronics Engineering Australia, 21(1), 2001.rnia

[23]: Akihiro Oi , ‘‘Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System’’, A Thesis Presented to the faculty of California Polytechnic State University,San Luis Obispo,2005.

[24]:

P.Leconte,M.Rapin,E.Szèchenyi,<<Eoliennes>>,techniques de l’ingénieur,de Génie mécanique,pp.BM 4 640 21.

[25]: A.Ould mohamed Yahya et I.Youm,’’étude et modélisation d’un gènerateur photovoltaïque ‘’, ènergie renouvelables, vol.11 N03 (2008) 473-483 Modulisation gè.

[26]: Y.Sukamonglok,S.Chungpaibulapatana and W.Ongsakul, ‘‘Simulation Model For predicting the performance of a solar phovoltaic system with alternating current loads’’,Renewable Energy,Vol.27,N02,pp.237-235, 2002.

[27]: <https://fr.scribd.com/doc/31140407/9/I-6-classification-des-onduleurs>

[28]: Qualité de l’energie électrique et enseignement de l’electrotechnique par bertrand charier

[28]: Qualité de la tension , Qualité de l’électricité AAT 0025, Nevenbre 2008

**Copyright 2008 Véronique Beauvois, ULg**

- [29]: Cahier technique N0 199 La qualité de l'énergie électrique
- [30]: Cahier technique N0 152 perturbation harmoniques dans les réseaux
- [31]: Jean-Paul Louis: Modelisation des machines electriques en vue de leur commande
- [32]: J.P. Caron, J.P Hautier <<modélisation et commande de la machine asynchrone>> Edition technique France-1998.
- [33]: Bose, B.K, Power electronique and AC drivers, prentice Hall, 1986, 402p.
- [34]: Vas,P., Vector control of AC machines, ed. Oxford University press, 1990.223p.