

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

## **MEMOIRE DE MASTER**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : Génie ELECTRIQUE

OPTION : SYSTEMES ELECTRO-ENERGETIQUES DE SOURCES D'ENERGIES  
RENOUVELABLES

### **THEME**

Modélisation et simulation d'un système  
photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une  
commande vectorielle.

*Proposé et dirigé par :*

*Dr. DJAZIA Kamel*

*Réalisé par :*

*MAYOUF Somia*

*N° D'ordre: 2016/S3ER12/89/385*

**PROMOTION: JUIN 2016**



# Remerciements



*Je remercie tout particulièrement Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnés durant toutes ces longues années.*

*J'exprime ma profonde gratitude à mes chers parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et les sacrifices endurés.*



*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Monsieur DJAZIA Kamel tout d'abord pour avoir proposé ce thème et qui n'a eu cesse de me donner de précieux conseils et remarques.*

*Je remercie, aussi, tous les enseignants, le chef de département d'Electrotechnique et Mr S.khanouf qui ont contribué à ma formation.*

*Par ailleurs, je remercie tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.*

*Je tiens, également, à remercier vivement toutes les personnes qui m'ont aidée à élaborer et réaliser ce mémoire, surtout : les enseignants Mr A.laatali F.barabah, A.Ben daykha et Mr Badboudi, mes amis A.dilmé, S.boudilmé, O.hadj doudou, R.ben herira et A .Abassi, mon cousin Youssef.*

*Enfin je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour leurs soutiens moral et matériel.*





# Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à dédier ce modeste travail :*



*A mon très cher père, l'homme qui m'a donnée le désir d'apprendre et le savoir-vivre en souhaitant qu'il soit au paradis et qu'il soit fier de moi .*

*A ma très chère mère, ma fierté et mon bonheur à qui je souhaite une très longue vie.*

*A mes très chers frères « Billal, Hécham et Ayoub », Mes soeurs « Asma, Fatima ,Marwa et Shahed » et toute ma famille .*

*A tous mes amis et surtout « Merabat Samia et Délmi Ali ».*

*A tous mes collègues de promotion et à tous ceux qui m'ont aidée, de près ou de loin, à accomplir ce travail.*



## Sommaire

Listes des figures	
Liste des tableaux	
<b>Introduction générale</b>	
<b><i>Chapitre 1 Généralité sur Les Système Photovoltaïques</i></b>	
Introduction .....	03
1 –1 Le Systèmes photovoltaïque .....	04
1-1 Définition .....	04
1-2 Types d'un système solaire photovoltaïque .....	04
1-2-1 Système autonome .....	04
1-2-1-1 Système autonome sans batterie .....	04
1-2-1-2 Système autonome avec batterie .....	05
1-2-2 Système hybride .....	05
1-2-3 Système raccordé au réseau électrique .....	06
1-2-3-1 Injection de la totalité de la production .....	06
1-2-3-2 Injection du surplus de production .....	06
1-2 Les éléments de captages d'un système PV raccordé au réseau électrique .....	07
1-2-1 La cellule PV .....	07
1-2-1-1 Définition .....	07
1-2-1-2 Les types des cellules .....	08
1-2-1-3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	09
1-2-1-4 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....	11
1-2-1-3 Modélisation des cellules PV .....	12
1-3 Modules photovoltaïques .....	15
1-3-1 Définition .....	15
1-4 Le Générateur photovoltaïque et ses performances .....	16
1-4-1 Le générateur PV .....	16
1-4-2 Les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(v)$ d'un générateur photovoltaïque .....	17
1-4-3 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ .....	18
1-4-3-1 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ .....	18
1-4-3-2 Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ .....	19
Conclusion .....	21
<b><i>Chapitre 2 Les convertisseurs DC-DC et la commande MPPT</i></b>	
Introduction .....	23

2-1 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) .....	24
2.2 Les types des convertisseurs DC-DC .....	26
2.2.1 Hacheur survolteur (ou Boost) .....	26
2.2.2 Hacheur dévolteur (série) .....	28
2.2.3 Hacheur dévolteur - survolteur (série) .....	28
2.2.4 Adaptation de la charge.....	29
2.3 Etude de le hacheur survolteur d'un système photovoltaïque.....	30
2.3.1 Représentation d'un hacheur survolteur PV.....	30
2.3.2 Modélisation d'un hacheur survolteur .....	31
Technique de commande de l' MPPT .....	34
2.4.1 Définition.....	34
2.4.2 Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum(MPPT) .....	34
2.4.3 Le Principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV .....	36
2.4.4 Différentes techniques d'MPPT.....	37
2.4.5 La méthode Perturbation et Observation P&O.....	38
Conclusion.....	41
<b>Chapitre 3 l'onduleur et la commande MLI vectorielle</b>	
3-1 Introduction.....	43
3-2 Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs).....	44
3-2-1 Définition.. .....	44
3-2-2 Principe de fonctionnement. ....	44
3-2-3 Les types d'onduleurs .....	46
3-2-4 Les applications des onduleurs.....	47
3-3 Onduleur triphasé .....	47
3-3-1 Définition.....	47
3-3-2 Modélisation de l'onduleur triphasé.....	48
3-3-3 Les caractéristiques de l'onduleur triphasé.....	49
3-4 Les stratégies de commande en MLI .....	50
3-4-1 Définition.....	50
3-4-2 La commande MLI vectorielle .....	50
3-4-2-1 Principe de la MLI vectorielle.....	51
3-4-2-2 Les vecteurs spatiaux de tension.....	53
3-4-2-3 Modulation du vecteur spatial.....	56

3-5 Théorie de la MLI vectorielle.....	58
3-5-1 Détermination de $V_{\alpha}$ , $V_{\beta}$ , $V_{ref}$ et l'angle ( $\theta$ ).....	60
3-5-2 Détermination des durées d'utilisations des interrupteurs .....	61
Conclusion .....	66
<b>Chapitre 4 Les résultats de simulation</b>	
Introduction.....	68
4.2. Simulation du générateur PV.....	69
4.3 Simulation de l'hacheur survolteur (boost) et la commande MPPT.....	73
4.3. 1 Simulation de l' hacheur survolteur (boost).....	73
4.3.2 Simulation de la méthode MPPT.....	73
4 .4 Simulation du system GPV et le boost avec la commande MPPT.....	74
4.5 Simulation du système à éclairment variable.....	75
4.6 Simulation de la commande MLI vectorielle.....	77
4.7 Simulation du système globale.....	80
Conclusion.....	81
<b>Conclusion générale</b>	
<b>Les références</b>	
<b>Résumé</b>	

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> Exemple d'un système PV autonome sans batterie	04
<b>Figure 1.2</b> Exemple d'un système PV autonome avec batterie	05
<b>Figure 1.3</b> Exemple d'un système PV hybride	06
<b>Figure 1.4</b> Les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire	07
<b>Figure 1.5</b> Cellule au Silicium Monocristallin	08
<b>Figure 1.6</b> Cellule au Silicium Poly-cristallin	09
<b>Figure 1.7</b> Cellule au Silicium amorphe (couche mince)	09
<b>Figure 1.8</b> Constitution d'une cellule photovoltaïque (d'après source CEA)	10
<b>Figure 1.9</b> Caractéristique courant - tension de la cellule PV	12
<b>Figure 1.10</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule PV a deux diode avec 5 paramètre	13
<b>Figure 1.11</b> Représentation d'un Module photovoltaïque	16
<b>Figure 1.12</b> Caractéristique résultante d'un groupement de 2 cellules (série & parallèle).	16
<b>Figure 1.13</b> caractéristique I-V et P-V d'un GPV	17
<b>Figure 1.14</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	18
<b>Figure 1.15</b> L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .	19
<b>Figure 1.16</b> L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	20
<b>Figure 1.17</b> L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	20
<b>Figure 2.1</b> Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	24
<b>Figure 2.2</b> Schéma d'un quadripôle électrique	25
<b>Figure 2.3</b> périodes fermeture et ouverture d'un commutateur	25
<b>Figure 2.4</b> Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost)	26
<b>Figure 2.5</b> Génération d'une valeur de rapport cyclique $\alpha$	27
<b>Figure 2.6</b> Schéma de principe d'un hacheur série	28
<b>Figure 2.7</b> Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle	29
<b>Figure 2.8</b> Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé	30
<b>Figure 2.9</b> Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque	30
<b>Figure 2.10</b> Formes typiques des ondes du convertisseur boost	31
<b>Figure 2.9</b> Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT	35
<b>Figure 2.10</b> Fluctuation du PMM avec : a) Variation de l'éclairement et b) Variation de la charge	36
<b>Figure 2.11</b> Chaîne de conversion photovoltaïque	37
<b>Figure 2.12</b> Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation ( <i>P&amp;O</i> )	39
<b>Figure 3.1</b> symbole de convertisseur Continu - Alternative (DC – AC)	44
<b>Figure 3.2</b> Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	44
<b>Figure 3.3</b> Fonctionnement de l'onduleur dans le 1ère demi-cycle	45
<b>Figure 3.4</b> Fonctionnement de l'onduleur dans le 2ème demis cycle	45
<b>Figure 3.5</b> Signal complet de l'onduleur	46
<b>Figure 3.6</b> Circuit de puissance d'un onduleur triphasé	48
<b>Figure 3.7</b> La topologie d'un onduleur triphasé de tension	51
<b>Figure 3.8</b> Etats des interrupteurs pour chaque vecteur de tension	52
<b>Figure 3.9</b> représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	52
<b>Figure 3.10(a)</b> Topologie 1- $V_1(1,0,0)$ de l'onduleur triphasé	53
<b>Figure 3.11(a)</b> Représentation des vecteurs de tension différents de zéro dans le plan $(\alpha,\beta)$ .	55

<b>Figure 3.11(b)</b> Les deux topologies de l'onduleur V7 et V8	55
<b>Figure 3.12</b> Représentation des vecteurs de tension nulle dans le plan ( $\alpha, \beta$ )	56
<b>Figure 3.13(a)</b> Le vecteur de tension de sortie dans le plan ( $\alpha, \beta$ ).	56
<b>Figure 3.13(b)</b> L'amplitude de la tension de sortie	57
<b>Figure 3.14</b> Projection du vecteur de tension dans le secteur n°1	58
<b>Figure3-15</b> Projection des vecteurs de tension ( $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ ) sur le plan ( $\alpha, \beta$ )	60
<b>Figure 3.16</b> Projection du vecteur de référence (secteur 1)	62
<b>Figure3.17</b> Les temps de commutation pour chaque semi-conducteur dans chaque secteur	64
<b>Figure 4 .1</b> Le Schéma block de générateur PV en MATLAB-SIMULINK	70
<b>Figure 4.3</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	71
<b>Figure 4.4</b> Résultats de simulation des caractéristiques $P(V)$ Pour différents Eclairement et une température fixe $T=25^{\circ}C$	71
<b>Figure 4. 5</b> L'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$	72
<b>Figure 4 .6</b> L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	72
<b>Figure4 .7</b> Schéma bloc d'un convertisseur survolteur	73
<b>Figure 4 .8</b> Schéma bloc de la commande MPPT « P&O »	73
<b>Figure 4.9</b> Schéma d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).	74
<b>Figure 4.10</b> Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$	74
<b>Figure 4.11</b> Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$	75
<b>Figure 4.12</b> Caractéristique de la puissance pour différentes éclairement avec le MPPT	76
<b>Figure 4 .13</b> Caractéristique de la puissance pour différentes éclairement sans le MPPT	76
<b>Figure 4 .14</b> Schéma block de la commande MLI vectorielle	77
<b>Figure 4 .15</b> bloc schématique de SIMULINK pour détermination de $V_{\alpha}, V_{\beta}$ et l'angle alpha	78
<b>Figure 4.16</b> l'allure de $V_{\alpha}, V_{\beta}$ et l'angle alpha	78
<b>Figure 4.17</b> Bloc de secteur Matlab /SIMULINK	79
<b>Figure 4.18</b> L'allure de la variation du secteur	79
<b>Figure 4 .19</b> Schéma MATLAB SIMULINK d'un système globale	80

## Liste des tableaux

<b>Tableau 3.1</b> Calcul des vecteurs de tensions	62
<b>Tableau 3.2</b> Calcul des largeurs des impulsions pour chaque secteur.	65
<b>Tableau 4.1</b> Caractéristiques électriques du GPV photovoltaïque Dans les conditions standards « STC »	69

## LISTES DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS

### NOTATIONS

Les notations définies ci-dessous sont celles que nous utilisons le plus dans ce manuscrit :

<b><i>S</i></b>	La surface
<b><i>E</i></b>	L'éclairement
<b><i>P<sub>m</sub></i></b>	La puissance maximale
<b><math>\mu</math></b>	Rendement
<b><i>I<sub>ph,ref</sub></i></b>	Le courant photonique sous condition de référence
<b><i>V<sub>t</sub></i></b>	La potentielle thermodynamique.
<b><i>G<sub>ref</sub></i></b>	L'éclairement réels et à la condition référence
<b><i>q</i></b>	Charge de l'électron
<b><i>T<sub>c</sub></i></b>	Température de la cellule (°K).
<b><math>\mu_{cc}</math></b>	Coefficient de sensibilité de l'intensité a la température
<b><i>C</i></b>	Une capacité
<b><i>A</i></b>	Rapport cyclique
<b><i>V<sub>s</sub></i></b>	Tension de sortie
<b><i>I<sub>s</sub></i></b>	Couranat de sortie
<b><i>R<sub>pv</sub></i></b>	La résistance à la sortie du panneau
<b><i>R<sub>ch</sub></i></b>	Resestance de charge
<b><i>U</i></b>	Vecteur de commande.
<b><i>B</i></b>	Matrice d'entrée.
<b><i>C</i></b>	Matrice de sortie.
<b><i>A</i></b>	Matrice d'état.
<b><math>\eta_{MPPT}</math></b>	Rendement de mppr
<b><math>\eta_{conv}</math></b>	Rendement de convertiseur
<b><math>\eta_{tot}</math></b>	Rendement total

$(T_c, T_{c\_ref})$	La température de cellule, réels et à la condition de référence
<b>L</b>	Une inductance
<b>y</b>	Le vecteur de sortie.
<b>V<sub>ref</sub></b>	Le vecteur de référence
<b>V<math>\alpha</math> et V<math>\beta</math></b>	Les vecteurs de tension sur le plan ( $\alpha, \beta$ )

### ABREVIATIONS

<b>MPPT</b>	<b>Maximum Power Point Tracking</b>
<b>P&amp;O</b>	<b>Perturbation et Observation.</b>
<b>2M5P</b>	<b>Lumped,2 Mechanism model with 5 Parameters.</b>
<b>GPV</b>	<b>Générateur PhotoVoltaire</b>
<b>PPM</b>	<b>Point de Puissance Maximale</b>
<b>MLI</b>	<b>Modulation de L'arguer d'Impulsion</b>
<b>SVM</b>	<b>Space Victor Modulation</b>
<b>SPV</b>	<b>Systèmes PhotoVoltaïques</b>

## INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques, Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température.

L'extraction de la puissance maximale d'un ensemble de ces cellules dite Stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet d'une manière efficace de résoudre ce problème d'optimisation.

Les installations PV domestiques raccordées aux réseaux électriques de distribution (applications de quelques kilowatts), qu'appelées les systèmes PV décentralisées, peuvent utiliser les onduleurs classiques à deux niveaux. on utilise la commande MLI vectorielle pour synchronisé la puissance de sortie de l'onduleur avec celle injectée au réseau .

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique GPV en utilisant une commande vectorielle

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur les systèmes photovoltaïques On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on présente un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.
- Dans le deuxième chapitre consacré pour l'étude de quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.
- Dans la troisième chapitre on étudiera les convertisseurs DC-AC, leurs modélisations et ses principes de fonction. ainsi On présentera les stratégies de commande de l'onduleur précisément la MLI vectorielle.

- Dans le quatrième chapitre on présentera les résultats de simulation d'un système photovoltaïque Connecté au réseau électrique. Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » et un onduleur triphasé à deux niveaux avec la commande MLI vectorielle.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink

***Chapitre 1***  
***Généralité sur Les Système***  
***Photovoltaïques***

## **Introduction**

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque.

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la«lumière électricité ».

Dans ce premier chapitre, nous allons parler d'une manière générale des systèmes photovoltaïques(PV), les éléments de captage d'un système PV (source d'énergie PV) et leur modélisation et le générateur photovoltaïque(GPV) et ses performances.

## 1 –1 Le Systèmes photovoltaïque

### 1-1 Définition

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseur statique DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie.[01]

### 1-2 Types d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.

#### 1-2-1 Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans Une zone isolée du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont actuellement divisés en deux types [02]

**1-2-1-1 Système autonome sans batterie** : Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (exemple: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque:le Réservoir d'eau sert de stockage).

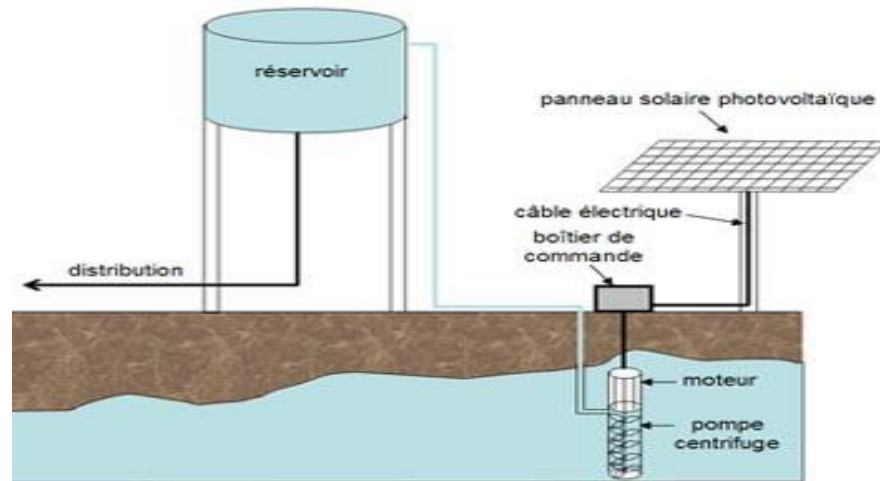


Figure 1.1 Exemple d'un système PV autonome sans batterie

**1-2-1-2 Système autonome avec batterie :** C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit).

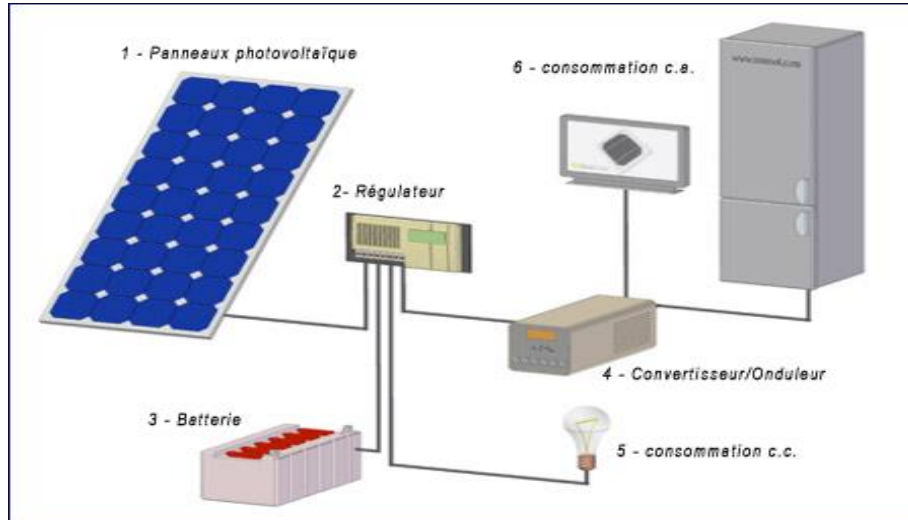


Figure 1.2 Exemple d'un système PV autonome avec batterie

### 1-2-2 Système hybride

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable.

Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport de carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [03, 04].

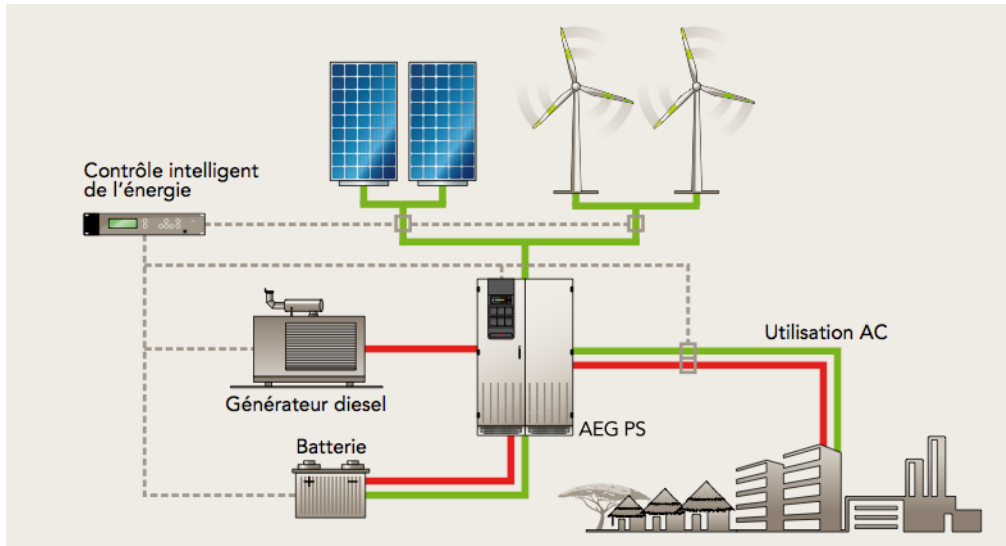


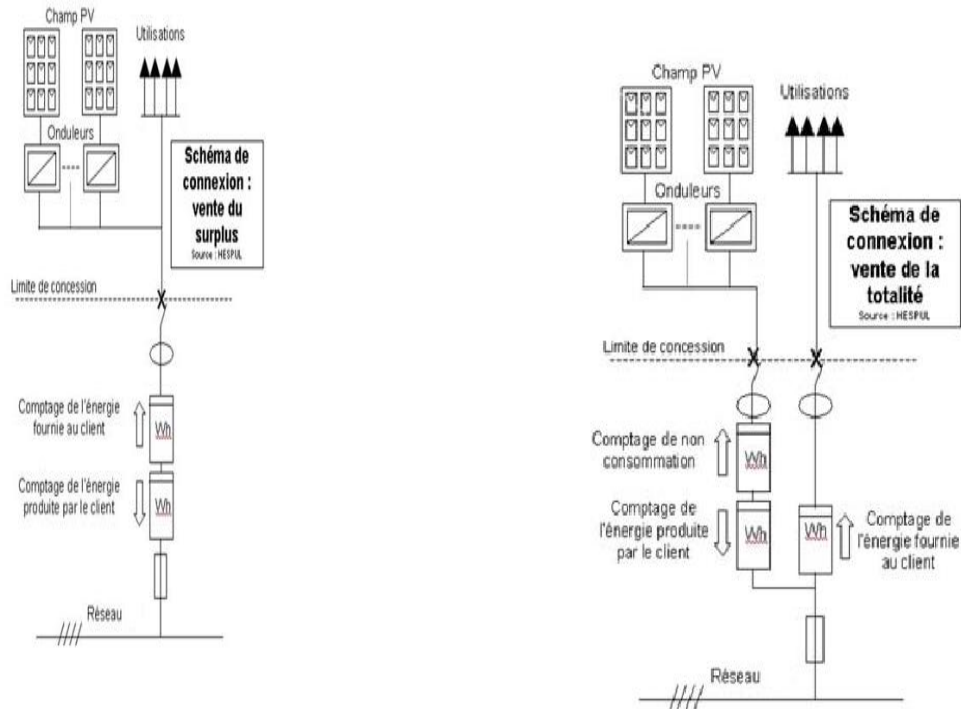
Figure 1.3 Exemple d'un système PV hybride

### 1-2-3 Système raccordé au réseau électrique

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC-AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même. La Figure 1.4 montre les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire: [05]

**1-2-3-1 Injection de la totalité de la production :** L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

**1-2-3-2 Injection du surplus de production:** L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.



**Figure 1 .4**Les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire

## 1-2 Les éléments de captages d'un système PV raccordé au réseau électrique

L'élément de base d'un système PV est la cellule PV. La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les modules sont ensuite connectés en série pour former une chaîne. Enfin, les chaînes sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque.

### 1-2-1 La cellule PV

#### 1-2-1-1 Définition

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [06]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-

conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

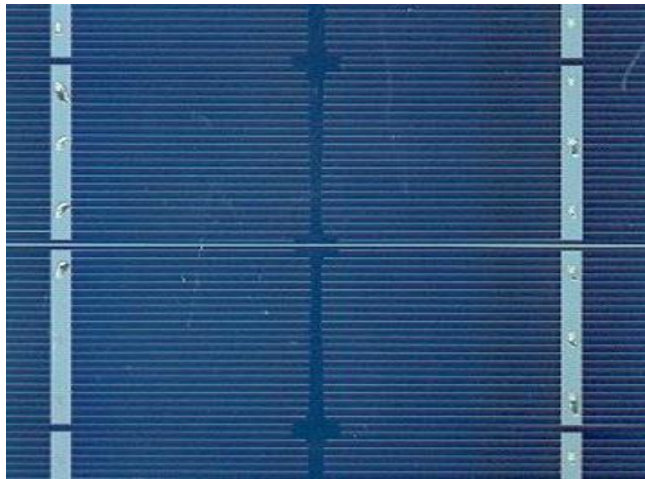
La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

### **1-2-1-2 Les types des cellules**

Il existe trois grands types des cellules en silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.[07]

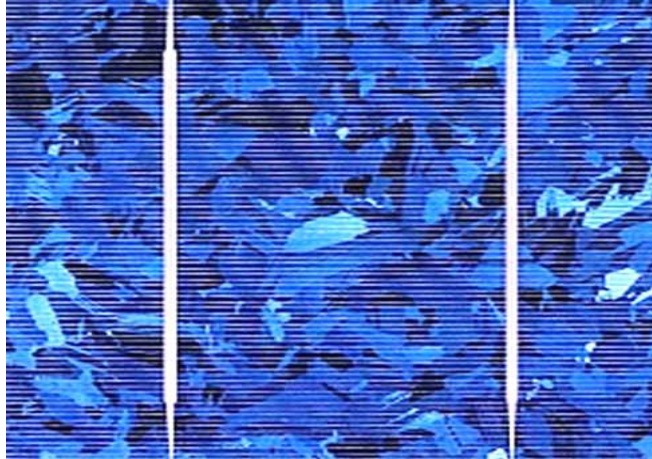
#### **a) Cellule au silicium mono-cristallin**

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.



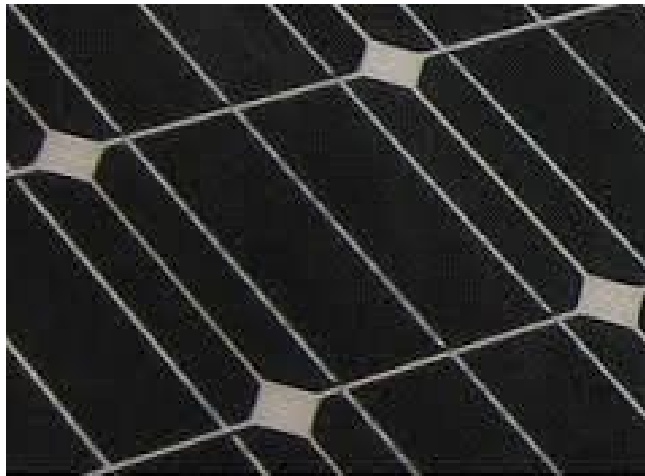
**Figure 1.5** Cellule au Silicium Monocristallin

**b) Cellule au silicium poly-cristallin :** Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le mono-cristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.



**Figure 1.6** Cellule au Silicium Poly-cristallin

**c) Cellule au silicium amorphe :** Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin; les cellules sont constituées par des couches très minces.



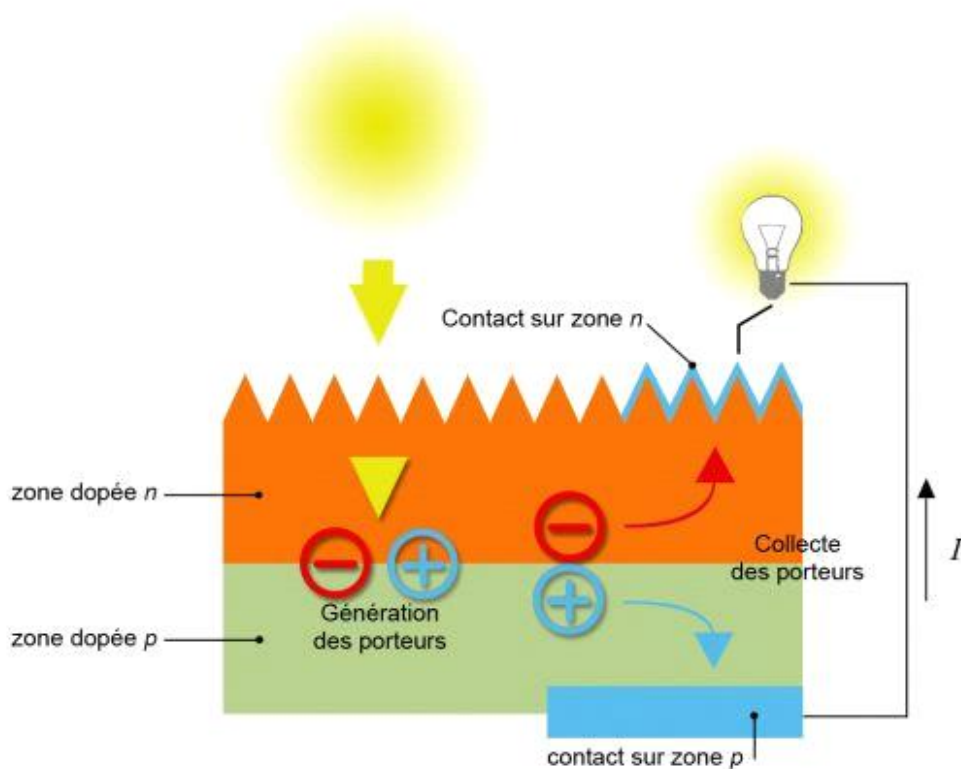
**Figure 1.7** Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

### 1-2-1-3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties

sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.



**Figure 1.8** Constitution d'une cellule photovoltaïque (d'après source CEA)

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

**1-2-1-4 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque****➤ Tension de circuit ouvert  $V_{co}$** 

Si on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $V_{co}$  (elle varie légèrement avec l'éclairement). Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait qu'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série[08]

**➤ Courant de court-circuit  $I_{cc}$** 

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une cellule en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{cc}$ . De même que pour la tension, il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module [08].

**➤ Puissance**

Le but recherché par tous les utilisateurs de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. La Figure 1.9 représente la caractéristique courant tension d'une cellule sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension  $\times$  intensité).

Pour l'éclairement considéré, le point de puissance maximale MPPT représente le point où la puissance de la cellule est maximale. Ce point, est associé à une tension maximale  $V_{pm}$  et à une intensité maximale  $I_{pm}$ . C'est cette puissance qui sera toujours recherchée par des régulateurs de charge afin d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement du générateur.

Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement, on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc) [08].

### ➤ Rendement

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite  $P_m$  et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit ( $S$ ) la surface du module et ( $E$ ) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\mu = \frac{pm}{E*S}$$

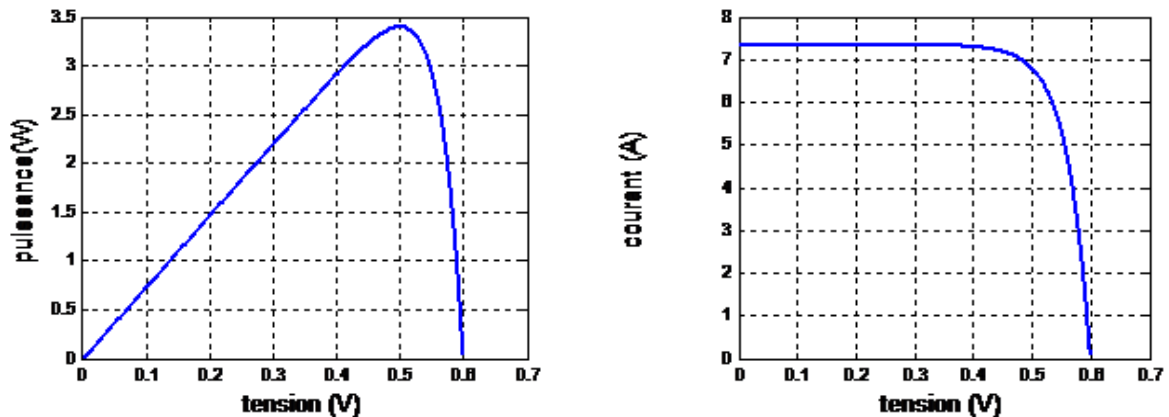


Figure 1.9 Caractéristique puissance - tension & courant- tension de la cellule PV

### 1-2-1-3 Modélisation des cellules PV

La modélisation des cellules PV passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module PV.

Parmi ces modèles on peut citer les suivants :

#### a) Modèle à une diode

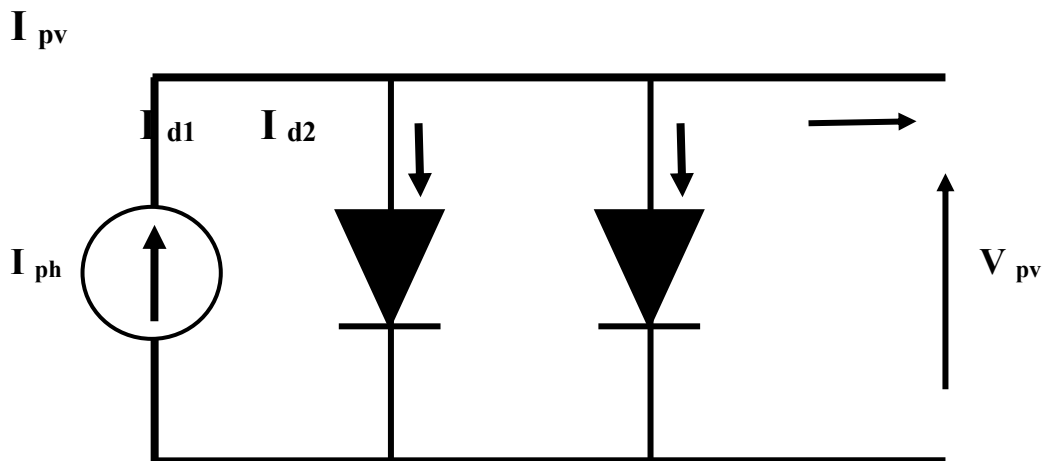
- Modèle à trois paramètres (L3P).
- Modèle à quatre paramètres (L4P).

- Modèle à cinq paramètres (L5P).

**b) Modèle à deux diode**

- Modèle à sept paramètres (2M7P).
- Modèle à six paramètres (2M6P).
- Modèle à cinq paramètres (2M5P).

Dans notre modélisation, nous intéressons par le modèle à deux diode avec cinq paramètres 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Paramètres). La Figure 1.10 représente le schéma équivalent d'une cellule PV à deux diode avec cinq paramètres. Ce modèle est composé d'un générateur de courant dont la valeur du courant est proportionnel à l'éclairement reçu à la surface de la cellule PV, deux diode, dans ce modèle en supposant que la résistance shunt est infinie, la résistance série est nulle[09].



**Figure 1.10** Schéma électrique équivalent d'une cellule PV à deux diodes avec 5 paramètres

L'équation caractéristique est déduite par d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2}$$

1- 1

Avec:

La diode étant un élément non linéaire .sa caractéristique I-V donnée par la relation :

$$I_{d1} = I_{s1} \left( \exp \left( \frac{v_d}{n_1 \cdot v_t} \right) - 1 \right) \quad 1- 2$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left( \exp \left( \frac{v_d}{n_2 \cdot v_t} \right) - 1 \right) \quad 1- 3$$

Avec:

$V_t = \frac{KTc}{q}$  : représentant le potentiel thermodynamique.

$K$ : Constante de Boltzmann ( $K= 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot J \cdot K^{-1}$ ).

$q$ : Charge de l'électron ( $q = 1.602 \cdot 10^{-19} C$ ).

$Tc$ : Température de la cellule (°K).

Le courant électrique produit par la cellule est alors donnée par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{v_d}{n_1 \cdot v_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{v_d}{n_2 \cdot v_t} \right) \right) \quad 1- 4$$

Le courant photonique lié à l'éclairement , à la température et au courant photonique mesuré aux condition de référence est donnée par

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph_{ref}} - \mu_{cc} (Tc - T_{c_{ref}})) \quad 1- 5$$

Avec :

$I_{ph_{ref}}$  : le courant photonique sous condition de référence [A]

$\mu_{cc}$  : coefficient de sensibilité de l'intensité a la température [A /k]

$G, G_{ref}$  : l'éclairement réels et à la condition référence [W /m²]

$(Tc, T_{c_{ref}})$  la température de cellule, réels et à la condition de référence

Le courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_{gap} \cdot q}{n1 \cdot T \cdot K}\right) \quad 1-6$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{gap} \cdot q}{n1 \cdot T \cdot K}\right) \quad 1-7$$

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

Une valeur du facteur d'idéalité  $n$  différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n = 1$  : La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
- $1 < n < 2$  : Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et  $n$  dépend de la polarisation.
- $2 < n < 4$  : Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface

$E_{gap}$  : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV , Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

## 1-3 Modules photovoltaïques

### 1-3-1 Définition

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. En effet pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module Figure 1.11. Les cellules sont en soudant le contact avant de chaque cellule au contact arrière de la suivante. Ces cellules sont protégées d'humidité, des chocs et des nuisances par encapsulation dans un polymère EVA (éthylènevinyl- acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Les modules actuels sont généralement composés de 36 cellules (18 V) ou 72 cellules PV en série (36 V).

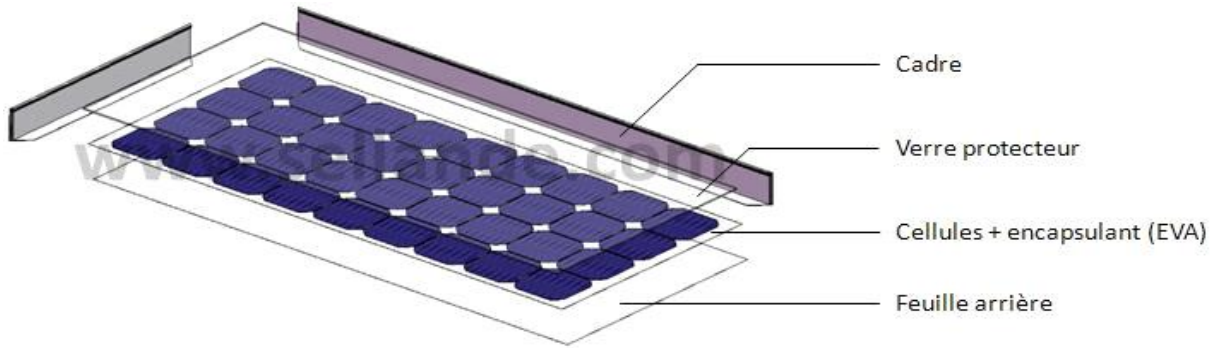


Figure 1.11 Représentation d'un Module photovoltaïque

où les connections en série de ces cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension Figure 1.12[10 ,11].

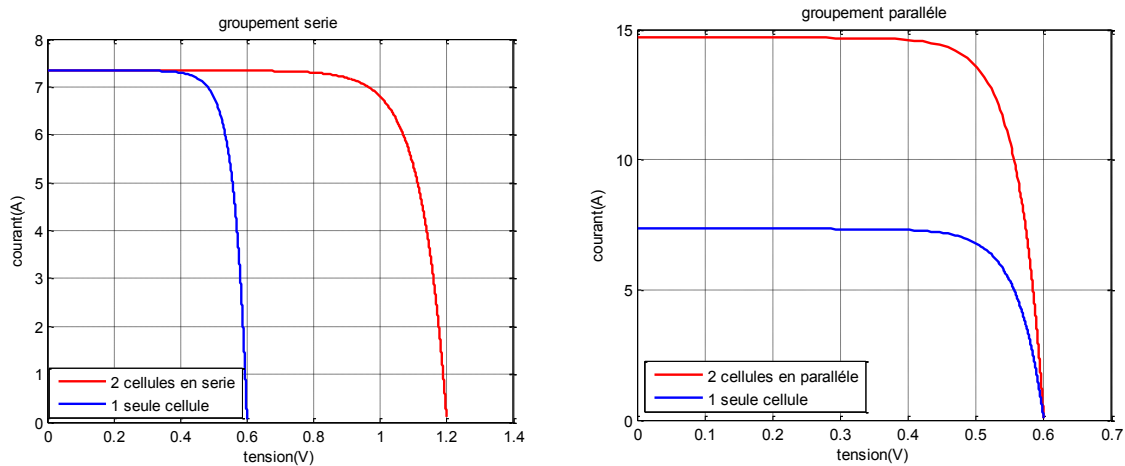


Figure 1.12 Caractéristique résultante d'un groupement de 2 cellules (série & parallèle).

## 1-4 Le Générateur photovoltaïque et ses performances

### 1-4-1 Le générateur PV

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque".

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un  $I_{cc}$  et un  $V_{co}$  désirés[12]

#### 1-4-2 Les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(v)$ d'un générateur photovoltaïque

La Figure 1.13 représente la courbe  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.

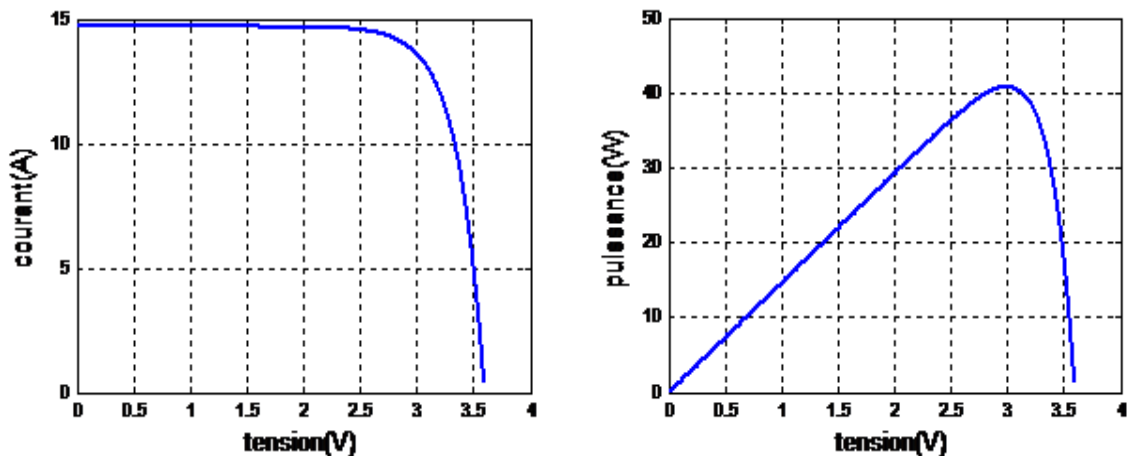


Figure 1.13 caractéristique I-V et P-V d'un GPV.

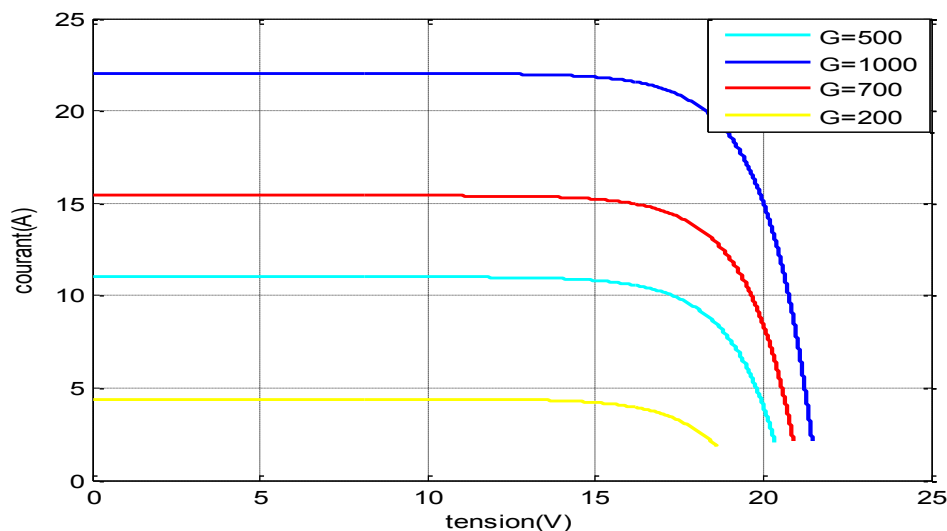
Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_m$ . Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_m$  .[13]

### 1-4-3 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

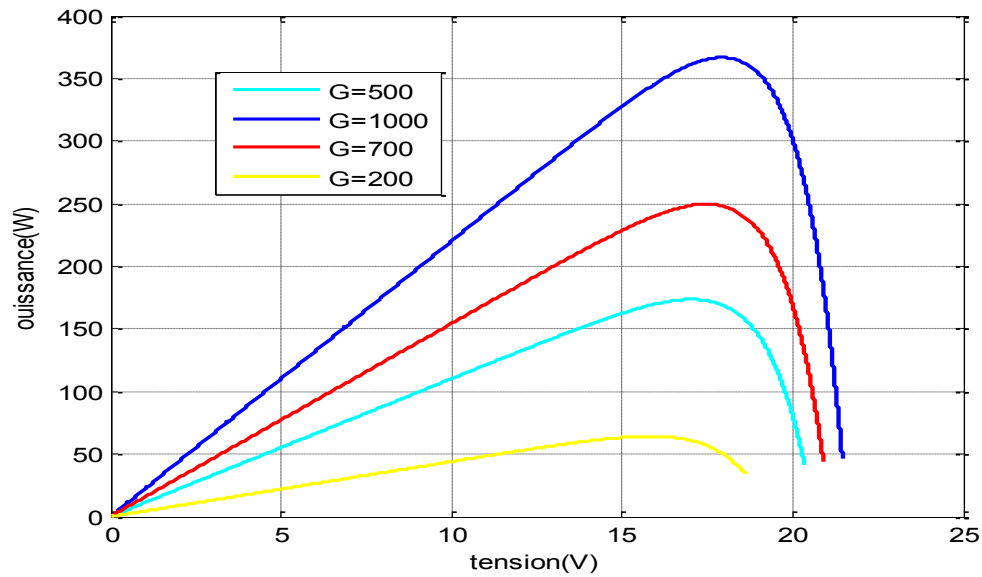
#### 1-4-3-1 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La Figure I.14 montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement ;car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [14]



**Figure 1.14** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

La Figure I.15 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ .

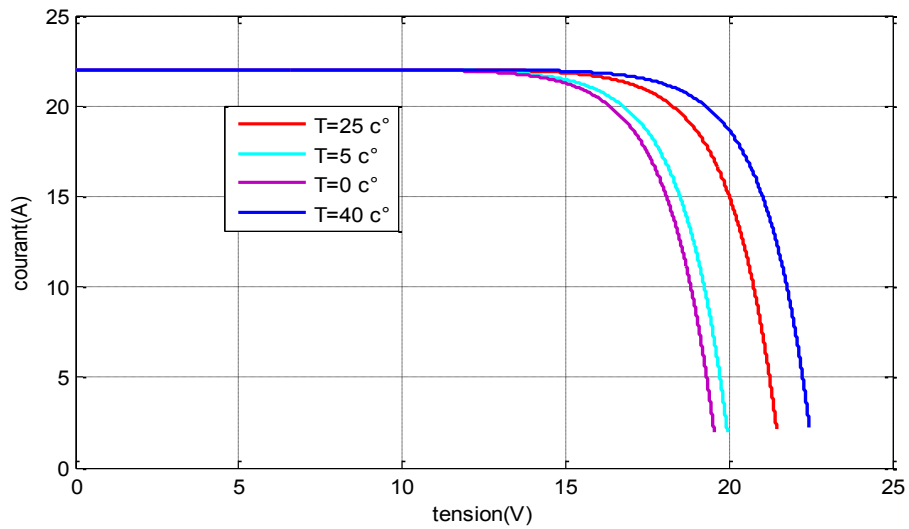


**Figure 1.15** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

#### 1-4-3-2 Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

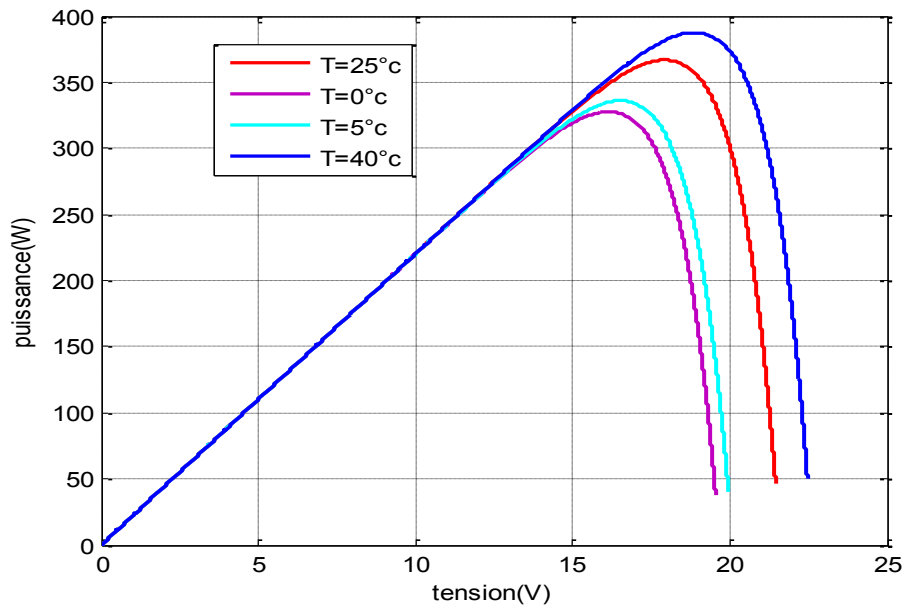
La Figure 1.16 montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [3].



**Figure 1.16** L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$

La Figure 1.17 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$  [15].



**Figure 1.17** L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$

**Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. Dans la première partie on a donné une classification des systèmes solaire photovoltaïques avec une description de la cellule PV et son modèle mathématique précisément le modèle à deux diodes avec cinq paramètres. La seconde partie du chapitre est consacrée au générateur PV et l'influence de température et l'éclairement sur leur caractéristique I-V et P-V.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

# *Chapitre 2*

*Les convertisseurs DC-DC et  
la commande MPP*

## **Introduction**

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [06].

Le but de ce chapitre est l'étude de quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentacion de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

## 2-1 Les convertisseurs DC-DC(hacheurs)

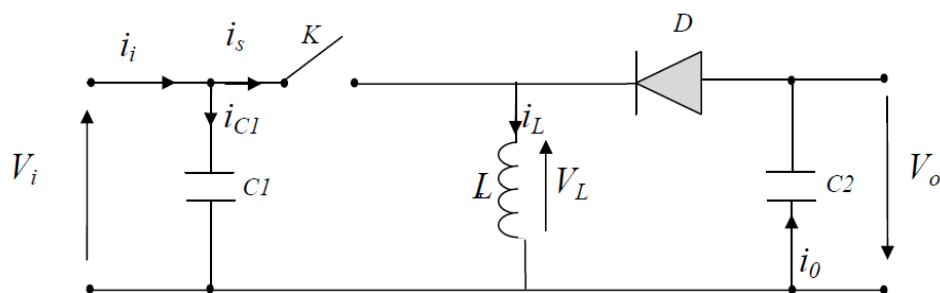
Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [07].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs[07].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure 2.1), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [07].



**Figure 2.1** Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (Figure 2.2), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [07].

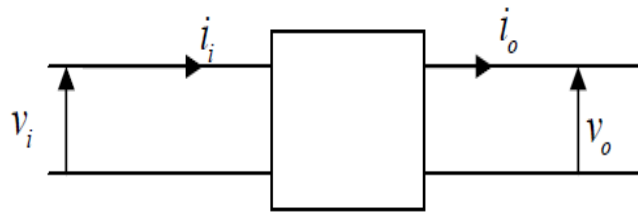


Figure 2.2 Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (Figure 2.3). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite[07].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture =  $Td_s$  et un temps d'ouverture =  $(1 - d)T_s$ . Où:

- $T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $\frac{1}{f_s}$
- $d$  le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0, 1]$ ).

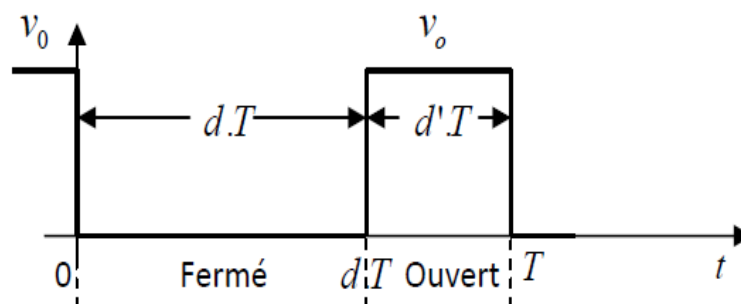


Figure 2.3 périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

## 2-2 Les types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [08]:

- ❖ convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle).
- ❖ convertisseur dévolteur (ou série).
- ❖ convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série –parallèle).

### 2.2.1 Hacheur survolteur (ou Boost)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est supérieure à celle de l'entrée  $V_i$ . Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, voir (Figure 2.4).

Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance  $R$  pendant une durée  $t = \alpha t_f$  bien déterminée; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.

Ce hacheur comporte trois composants essentiels : Une inductance  $L$ , une capacité  $C$  et un interrupteur qui peut prendre deux états,  $U=1$  et  $U=0$ .

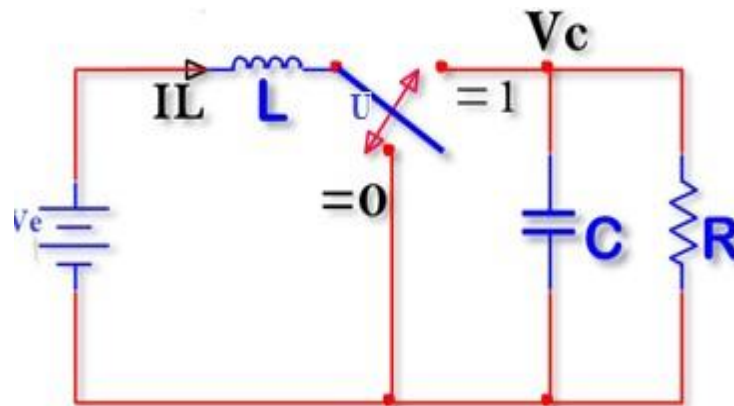


Figure 2.4 Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost)

Pour un rapport cyclique «  $\alpha$  » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [08]:

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (2.1)$$

$$I_s = (1 - \alpha) I_e \quad (2.2)$$

$\alpha$  : est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1.

Le rapport cyclique  $\alpha$  est généré par un comparateur déposé sur la technique MLI où il résulte de l'intersection de deux signaux, l'un triangulaire et l'autre prend une valeur de référence, varie d'après la tension cible de la sortie du hacheur  $V_s$  (figure 2.5).

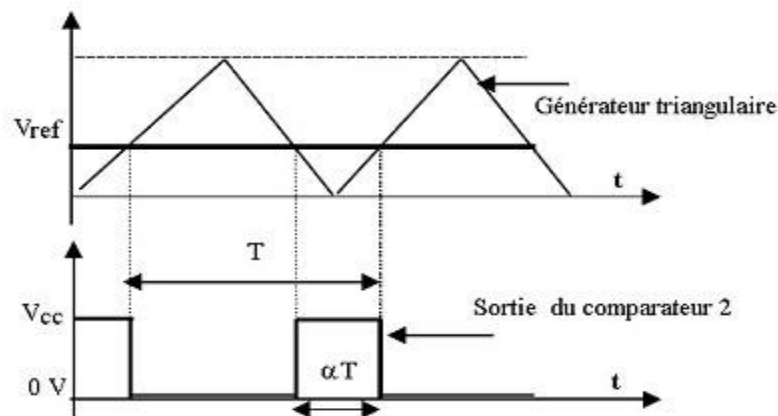


Figure 2.5 Génération d'une valeur de rapport cyclique  $\alpha$

Le calcul des composants L et C se fait grâce aux expressions suivantes:

$$\Delta I_e = \frac{V_e}{L f_p} a \quad (2.3)$$

$$\Delta V_s = \frac{V_e a}{R_c h f_p (1-a)} \quad (2.4)$$

$f_p$  représente la fréquence de porteuse utilisée.

Avec  $\Delta I_e$ ,  $\Delta V_s$ , les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension de sortie autour de leurs valeurs moyennes.

On s'aperçoit que le convertisseur Boost est le sujet de nombreuses réflexions et ressort le plus fréquemment dans la littérature pour une conversion DC/DC. En effet en prenant en compte les caractéristiques des différents convertisseurs DC/DC, le Boost, de part sa simplicité, son faible coût et son rendement élevé,

est la structure retenue pour réaliser la plupart des convertisseurs DC/DC photovoltaïques.

Dans le cas où la puissance générée du générateur photovoltaïque est plus forte il faut intéresser à cetype d'hacheur pour augmenter la tension d'entrée de l'onduleur.

**2.2.2 Hacheur dévolteur (série)**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $V_i$ . Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et en série avec la source (Figure 2.6) et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha T$ . Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha T$  à  $T$  [08].

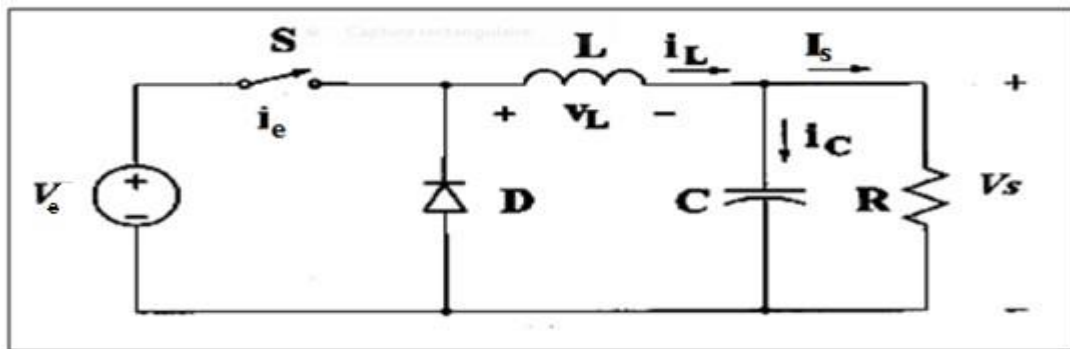


Figure 2.6 Schéma de principe d'un hacheur série

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivante :

$$\begin{cases} V_s = a \cdot V \\ I_s = \frac{1}{a} \cdot I_e \end{cases} \quad (2.5)$$

Avec :  $a = \frac{t_f}{T}$

**2.2.3 Hacheur dévolteur - survolteur (série –parallèle)**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée  $V_e$ . Pour un rapport cyclique «  $\alpha$  » donné, et en régime de conduction continu (figure 2.7), la tension moyenne à la sortie est donnée par

$$:V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (2.6)$$

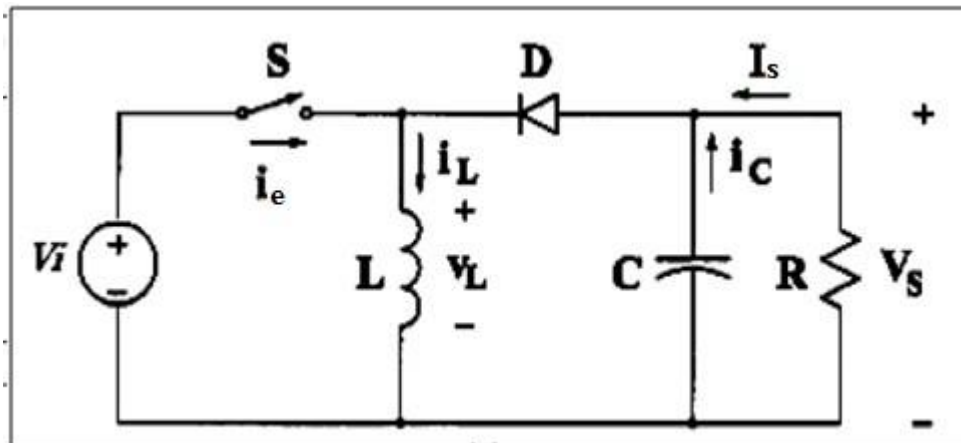


Figure 2.7 Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle

### 2.2.4 Adaptation de la charge

Le convertisseur d'énergie photovoltaïque choisi est un hacheur de type survolteur ou dévolteur ou dévolteur- survolteur selon les applications de la charge. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal (Figure 2.8). Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Dans la (Figure 2.8), la zone (1) de la caractéristique courant-tension I-V est une zone de fonctionnement dans le mode « hacheur dévolteur » et l'MPPT est assurée pour toute résistance  $R_i$  comprise entre  $[0, R_{opt}]$ . Ceci s'inverse pour la zone (2) de la caractéristique courant-tension I- V qui présente la zone de fonctionnement dans le mode « hacheur survolteur » ou le fonctionnement du MPPT est assuré pour toute résistance  $R_i$  comprise entre  $[R_{opt}, \infty]$ .

Donc, un choix de convertisseur dévolteur ou survolteur pour une charge donnée est impératif et on peut utiliser l'un des deux types de convertisseur selon la configuration du circuit. Si il' y a une possibilité de fluctuation de la tension demandée par la charge au-dessous est au-dessus de celle débité par la source, un Hacheur dévolteur/survolteur s'avère nécessaire. Dans cette partie on se limite au hacheursurvolteur

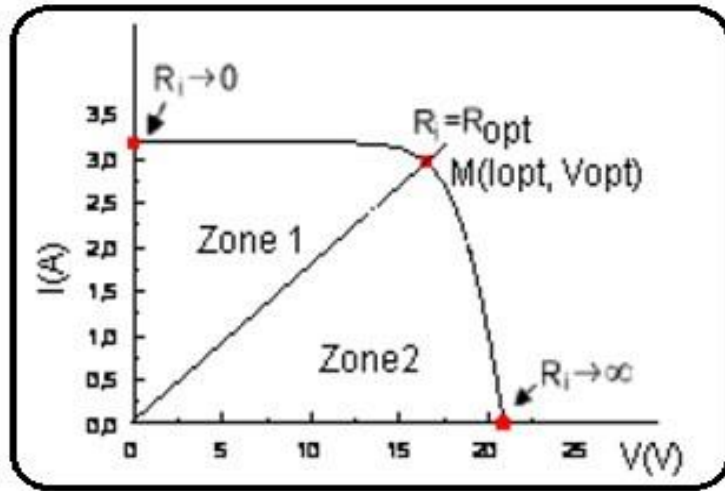


Figure 2.8 Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé

## 2.3 Etude de l'hacheur survolteur d'un système photovoltaïque

### 2.3.1 Représentation d'un hacheur survolteur PV

Dans ce cas, la tension d'entrée de l'hacheur boost représente la tension du générateur photovoltaïque PV (la Figure 2.9).

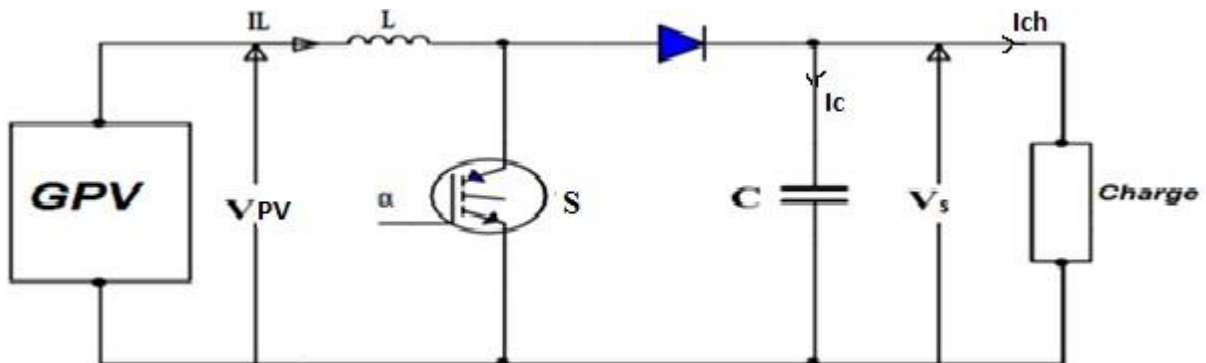


Figure 2.9 Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque

la résistance à la sortie du panneau PV ( $R_{pv}$ ) en fonction de  $\alpha$  et  $R_{ch}$  :

$$R_{ch} = \frac{R_{pv}}{(1-\alpha)^2} \quad (2.7)$$

Dans les conditions optimales et pour une charge  $R_{ch}$  égale la résistance de l'entrée  $R_{pv}$ , le rapport cyclique ( $\alpha = 0$ )

Aussi, le rapport cyclique  $\alpha$  s'écrit en fonction des résistances  $R_{pv}$  et  $R_{ch}$ :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_{ch}}} \tag{2.8}$$

Puisque le rapport  $\alpha$  est inférieur à 1 ( $\alpha < 1$ ), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge  $R_{ch}$  remplit la condition suivante:  $R_{ch} > R_{pv}$ .

Les différents signaux des grandeurs de convertisseur boost sont illustrés dans la figure (2.10)

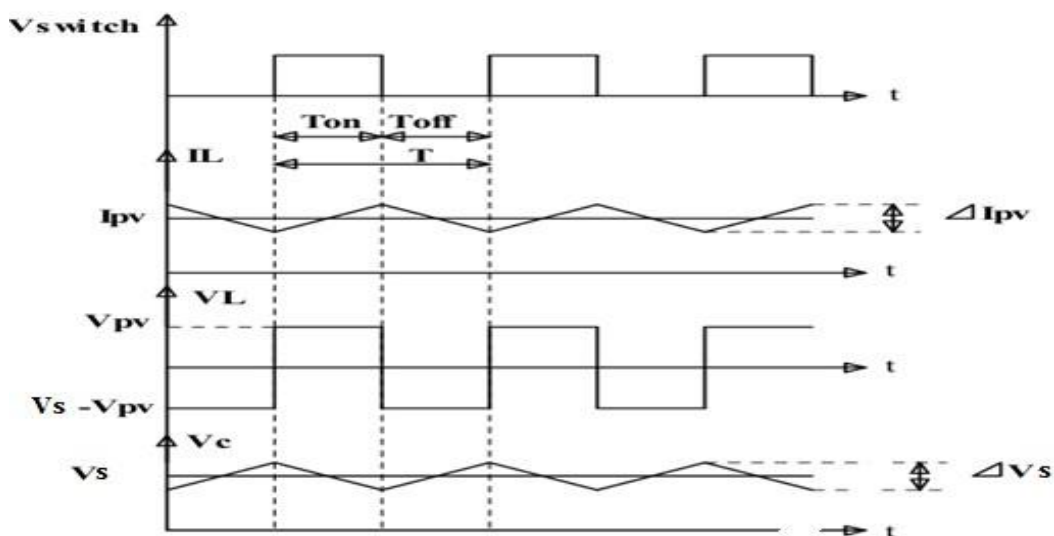


Figure 2.10 Formes typiques des ondes du convertisseur boost

### 2.3.2 Modélisation d'un hacheur survolteur

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande  $\alpha$ . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

Dans de tels systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des éléments de stockage (pour ce cas étudié l'ordre est de 2).

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

Où  $x$ : vecteur d'état :  $x=[x_1, x_2]=[i_L, v_c]$ .

$u$ : vecteur de commande.

$A$ : matrice d'état.

$B$ : matrice d'entrée.

$y$  : le vecteur de sortie.

$C$ : matrice de sortie.

➤ **Première séquence de conduction [0 à  $\alpha T$ ]:** Lorsque S est fermé. Le comportement dynamique du circuit est donné par:

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.9)$$

$$x_i = \frac{V_{pv}}{L}$$

$$v_c = \frac{1}{c} \int i_c dt \quad (2.10)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{c} i_c$$

$$0 = c \frac{dv_c}{dt} + I_{ch}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2.11)$$

qui peut être écrit sous la forme:

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 V_{pv} \quad (2.12)$$

$$V_{ch} = C_1 x$$

Avec :  $C_1 = [0,1]$

➤ **Deuxième séquence de conduction: [ $\alpha T$  à  $T$ ]** : Lorsque S est ouvert.

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_C$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = i_L - \frac{V_C}{R}$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L} V_{pv} - \frac{1}{L} x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{c} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \quad (2.13)$$

$$V_{pv} = L \frac{di_l}{dt} + V_c \quad (2.14)$$

$$I_l = c \frac{dv_c}{dt} + I_{ch} \quad (2.15)$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{c} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2.16)$$

Ce système peut être mis sous la forme :

$$\dot{x} = A_2 x + B_2 V_{pv}$$

$$V_{ch} = C_1 x \quad (2.17)$$

➤ **Model Moyen:**

A partir des équations (2.11) et (2.17), on peut déduire la forme moyenne et  $V_{ch}$  pour toute la période:

$$x_1 = (A_1 x + B_1 V_{pv})a + (A_2 x + B_2 V_{pv})(1 - a)$$

$$V_{ch} = (C_1 a + C_1(1 - a))x \quad (2.18)$$

Avec :

$$A = A_1 a + A_2(1 - a) \quad (2.19)$$

$$B = B_1 a + B_2(1 - a)$$

Où , A: matrice d'état ; B : matrice de commande

En conclusion: le modèle moyen du hacheur survolteur est :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-a}{L} x_2 + \frac{1}{L} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1-a}{c} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \end{cases} \quad (2.20)$$

Ainsi le courant de la charge égale :

$$I_{ch} = \frac{1}{R} V_c = \frac{1}{R} x_2$$

$$x_2 = R \cdot I_{ch}$$

Donc l'équation 2.20 sera comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-a}{L} x_2 + \frac{1}{L} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1-a}{c} x_1 - \frac{1}{c} I_{ch} \end{cases} \quad (2.21)$$

## **2.4 Technique de commande de l'MPPT**

### **2.4.1 Définition**

Les générateurs photovoltaïques ont une production électrique aléatoire directement dépendante des conditions météorologiques. Ainsi, le dimensionnement et l'exploitation optimale de l'énergie produite par ces générateurs exige l'utilisation de méthodes de gestion appropriées. De même, l'amélioration du rendement du système photovoltaïque nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV qui permet d'établir la commande adéquate en vue de tirer le maximum de puissance de ces générateurs.

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [12].

### **2.4.2 Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum(MPPT)**

Pour la maximisation de puissance de la source PV, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC entre la source PV et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV et un suivi continu de la puissance maximale est assuré. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [13].

La Figure 2.9 représente le schéma synoptique du ce système PV.

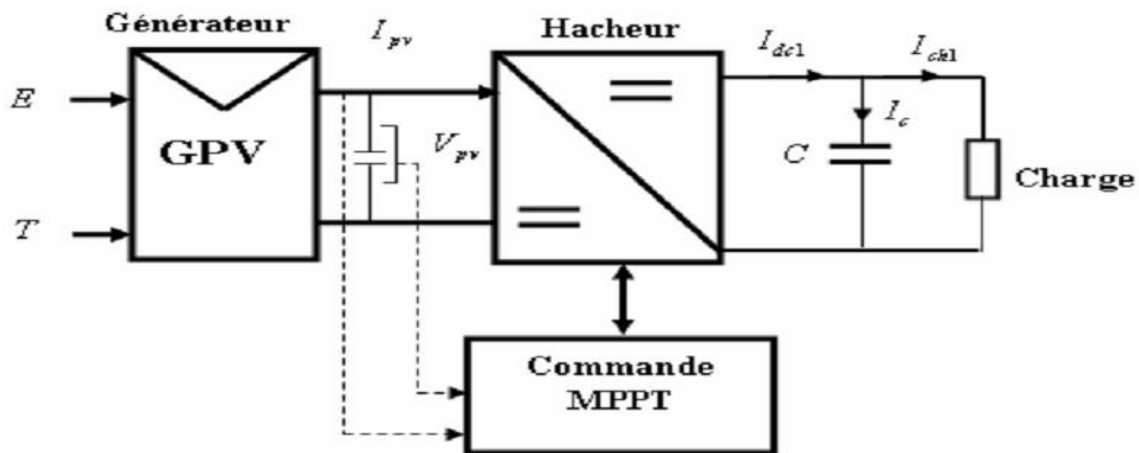


Figure 2.9 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT .

On utilise le convertisseur de type DC/DC dans la partie Contrôle du système photovoltaïque car il est facile à contrôler par leurs rapports cyclique en utilisant un signal MLI. Ici, on utilise le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge [14].

Du fait de la non linéarité de la caractéristique I-V, le circuit MPPT oblige le système à fonctionner en permanence sur le point à puissance maximale du générateur, une fois l'éclairement ou la température change. Le hacheur capte alors la puissance électrique absorbée selon une période d'échantillonnage, et commence à incrémenter ou décrémenter le rapport cyclique  $\alpha$  pour annuler le gradient de la puissance P [15].

$$\frac{\delta p}{\delta a} = 0 \quad (2.22)$$

En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur. Généralement, ces étages disposent de commandes de gestion électrique plus ou moins complexes permettant d'adapter la tension PV à la tension d'entrée de l'onduleur [16].

2.4.3 Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV

La commande MPPT permet de chercher le point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque dans les conditions météorologiques variables. Ceci est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  du signal qui commande le convertisseur d'énergie, à une valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du module [17].

Comme le montre la Figure 2.10, pour une puissance incidente  $W_1$ , la puissance optimale transférée à la charge est obtenue pour un rapport cyclique  $\alpha_{opt1}$  (point PPM1). Si la puissance incidente change ( $W_2$ ), alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur PV est le point P<sub>f</sub> (Figure . 2.10a). Pour converger vers le nouveau point PPM2, il faut ajuster le rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur  $\alpha_{opt2}$ . Il en sera de même que lorsque la charge  $R_{ch}$  change (Figure. 2.10b): Le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM1); pour converger vers ce PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique( $\alpha$ ).

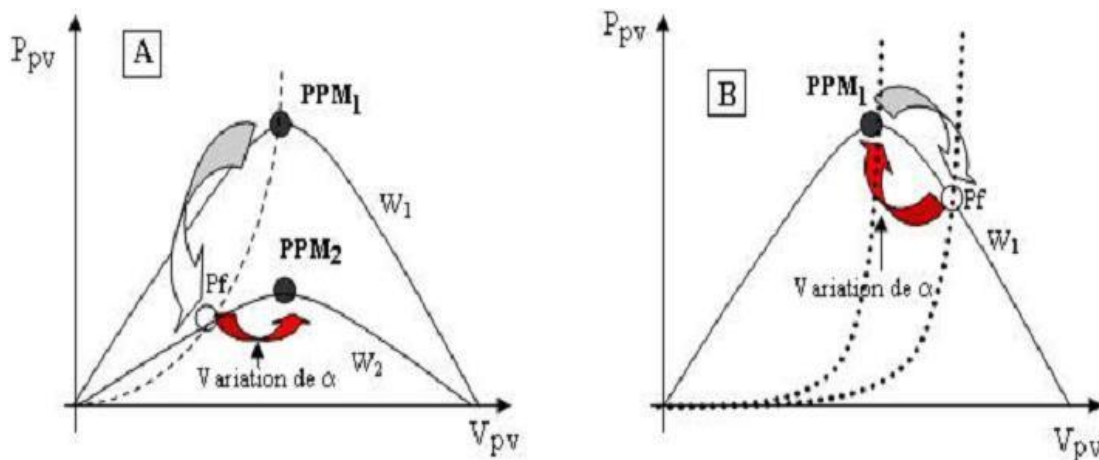


Figure 2.10 Fluctuation du PMM avec : a) Variation de l'éclairement et b) Variation de la charge

Pour savoir l'efficacité de la technique du MPPT, on définit le rendement MPPT ( $\eta_{MPPT}$ ) comme suit :

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{Max}} \tag{2.23}$$

Il donne le % de pertes de puissance d'un module PV ( $P_{IN}$ ), qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il

pourrait produire ( $P_{MAX}$ ) [18]. Pour transférer la puissance électrique produite, le mode de transfert utilisé peut présenter plus ou moins un taux de pertes lié à sa constitution. Nous définissons pour qualifier ces étages de conversion électrique-électrique et de transfert, le rendement de conversion d'un étage d'adaptation noté  $\eta_{conv}$  permettant d'évaluer les pertes liées à la conversion de puissance associée à l'étage d'adaptation.

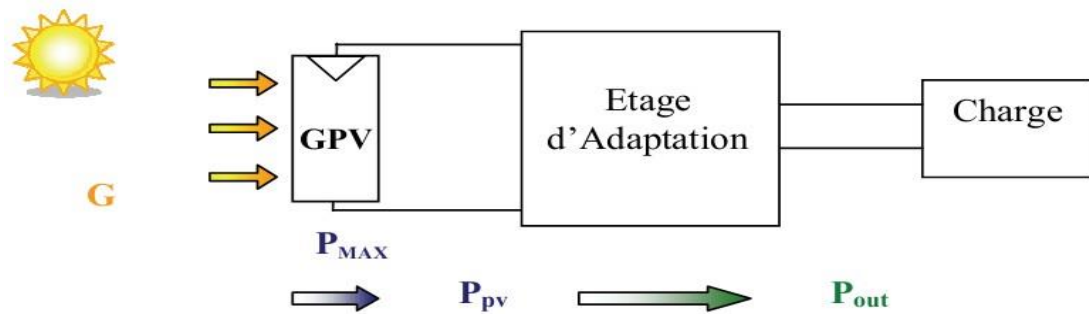


Figure 2.11 Chaîne de conversion photovoltaïque

Ce type de rendement dépend du temps et des conditions de fonctionnement. Il est nécessaire, pour obtenir une grande précision sur cette grandeur, d'effectuer les mesures de courant et de tension en entrée et en sortie de l'étage au même instant garantissant ainsi la connaissance précise du transfert de puissance effectué à un instant donné.

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{PV}} \quad (2.24)$$

Le rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque, noté  $\eta_{TOTAL}$ , peut donc être défini comme le produit des trois rendements précédemment définis sur le même intervalle de temps.

$$\eta_{tot} = \frac{P_{max}}{G.S} \cdot \frac{P_{PV}}{P_{max}} \cdot \frac{P_{out}}{P_{PV}} \quad (2.25)$$

Ce rendement traduit la capacité de la totalité d'une chaîne PV à produire plus ou moins de l'énergie électrique. Cela permet également de comprendre la différence entre un rendement effectué en laboratoire sur des matériaux et des cellules PV sous température et irradiation contrôlées et le rendement réel des GPV installés fonctionnant en conditions réelles [18].

#### 2.4.4 Différentes techniques d'MPPT

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner

surplusieurs et différentes méthodes, Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des micro- processeurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation...

Divers travaux sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes [19]:

- Perturbation et observation.(P&O).
- La méthode incrémentation de laconductance.
- Méthode de capacitéparasite.

Chacune de ces techniques à ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

### **2.4.5 La méthode Perturbation et ObservationP&O**

#### ➤ **Définition**

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  où en agissantdirectement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du Panneau est supérieure à la valeur précédente  $P(k-1)$ , alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

➤ Le fonctionnement de l’algorithme P&O

La Figure 2.12 donne l’organigramme de cet algorithme [14].

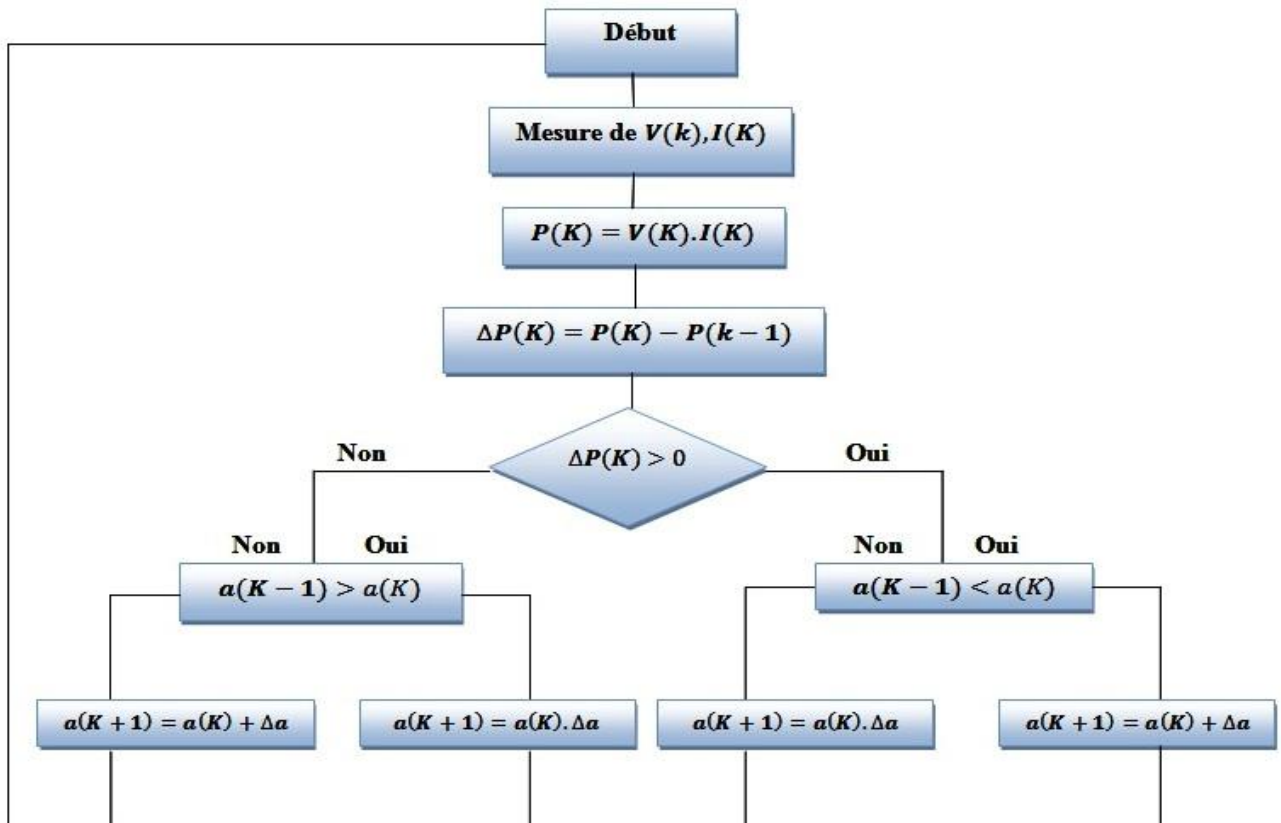


Figure 2.12 Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation (P & O)

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance P(k). Cette valeur P(k) est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure P(k - 1).

- 1- Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l’incrément ou des incréments du rapport cyclique α continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV.

- Si dV > 0 cela veut dire qu’on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire

$$\alpha(k + 1) = \alpha(k) + \Delta\alpha \tag{2.26}$$

- Si  $dV < 0$  cela veut dire qu'on a décrémente V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre:

$$\alpha(k + 1) = \alpha(k) - \Delta\alpha \quad (2.27)$$

Donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter.

Si la puissance fournie par le panneau a diminué de puis la dernière mesure, l'incrémement ou la des incréments du rapport cyclique  $\alpha$  sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur  $dv$ . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle [14].

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques topologies de base des convertisseurs

continus-continus. Comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur.

On a présenté aussi la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. On a étudié la commande MPPT basées sur l'algorithme de perturbation et observation.

# *Chapitre 3*

*l'onduleur et la commende*

*MLI vectorielle*

**3-1 Introduction**

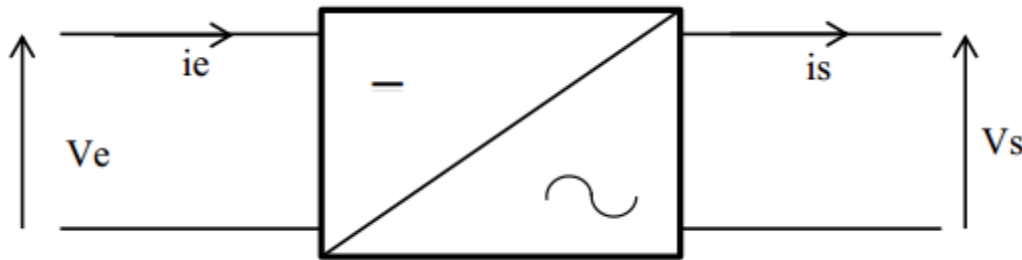
L'utilisation de convertisseurs statiques au sein des réseaux est de plus en plus répandue notamment pour connecter les sources de production décentralisées renouvelables. Dans ce cadre, les onduleurs triphasés MLI à injection de courants sinusoïdaux et en phase avec le réseau électrique sont des convertisseurs couramment employés.

Dans la première partie de ce chapitre on étudiera les convertisseurs, leurs modélisations et ses principes de fonction. Dans la deuxième partie On présentera les stratégies de commande de l'onduleur précisément la MLI vectorielle.

### 3-2 Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs)

#### 3-2-1 Définition

L'onduleur est un convertisseur continu/ alternatif ,il permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue. Son symbole est illustré dans la Figure 3.1.

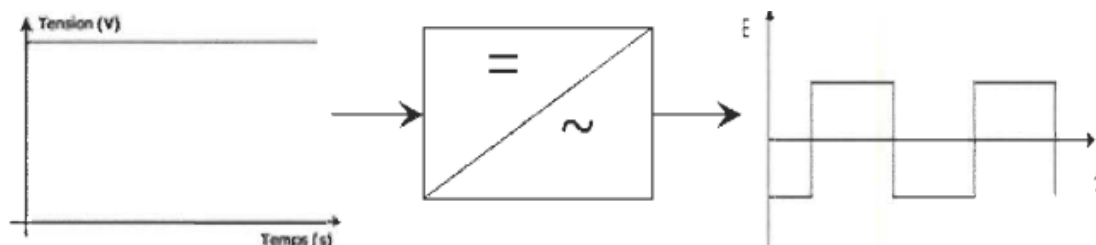


**Figure 3.1** Symbole de convertisseur Continu - Alternative (DC – AC)

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [20].

#### 3-2-2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la Figure 3.2, on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.



**Figure 3.2** Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion. Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources[20].

Quand  $S_1 - S_2$  sont fermés (On) et  $S_3-S_4$  sont ouverts (Off) pour  $0 < t < T/2$  on obtient une alternance positif  $U(t) = V_{DC}$  comme la montre la Figure 3.3 ci-dessous

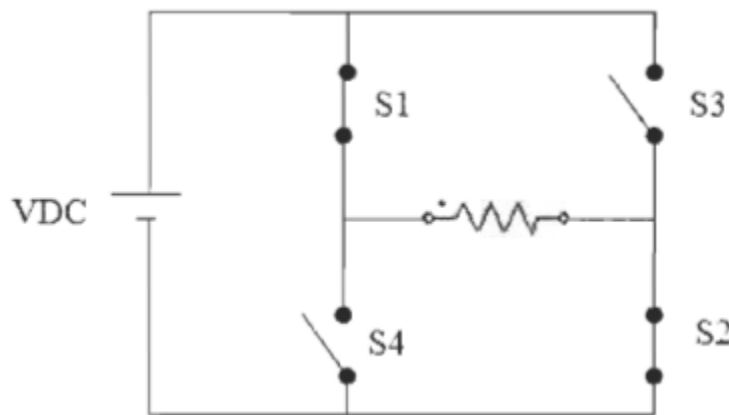


Figure 3.3 Fonctionnement de l'onduleur dans le 1<sup>er</sup> demi-cycle

Quand  $S_1 - S_2$  sont ouverts (Off) et  $S_3-S_4$  sont fermés (On) pour  $T/2 < t < T$  on obtient une alternance négative  $U(t) = -V_{DC}$  comme la montre la Figure 3.4

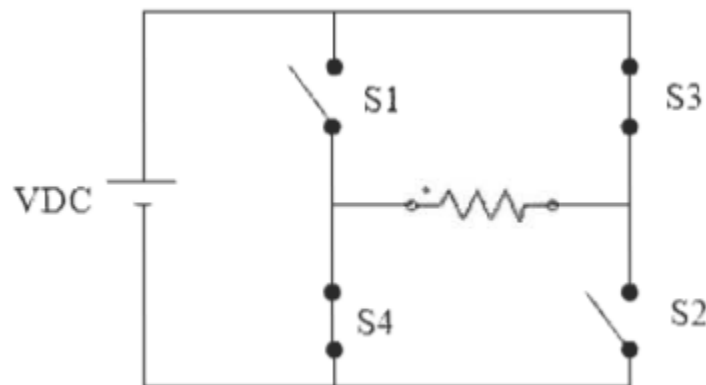


Figure 3.4 Fonctionnement de l'onduleur dans le 2<sup>ème</sup> demi cycle

Le signal résultant sur la période complète est présenté sur la Figure 3.5

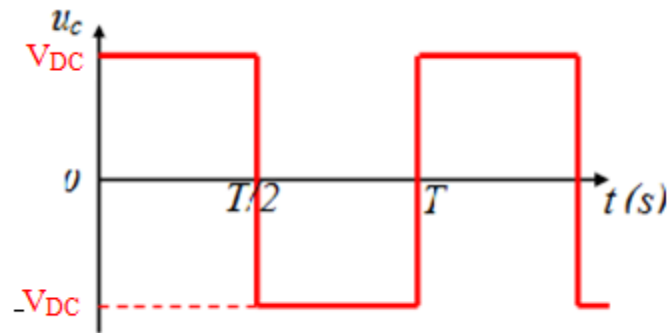


Figure 3.5 Signal complet de l'onduleur

### 3-2-3 Les types d'onduleurs

Il existe deux types d'onduleurs : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. On distingue aussi les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes[21].

#### ➤ onduleur autonome

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner ; par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz.

Les onduleurs sont notamment employés pour la réception de la TV en mode nomade (récepteur satellite dans un camping-car par exemple) dépourvu d'entrée alimentation électrique basse tension ( $\sim 12$  V).

#### ➤ onduleur non autonome

Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les motrices électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO .

**3-2-4 Les applications des onduleurs**

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonome

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif [21].

Pour des applications de faibles et moyennes puissances, les tensions de forme d'onde carrée ou quasi carrée pourront être acceptables; alors que pour les applications de fortes puissances une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion des harmoniques sont exigées. Avec la disponibilité des dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse, l'harmonique contenue dans la tension de sortie peut être minimisée ou réduite significativement par des techniques de commande[20].

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple: variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L'entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires au d'autre source continue[20].

**3-3 Onduleur triphasé****3-3-1 Définition**

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la Figure 3.6. On doit distinguer d'une part les tensions de branche  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$  mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{pv}$  des panneaux photovoltaïque, d'autre part, il y a les tension de phases  $V_{An}$ ,  $V_{Bn}$  et  $V_{Cn}$  mesurées par

rapport à un point neutre flottant n. Des tensions simples on peut tirer facilement les tension composées  $V_{AB}, V_{BC}$  et  $V_{CA}$  [22].

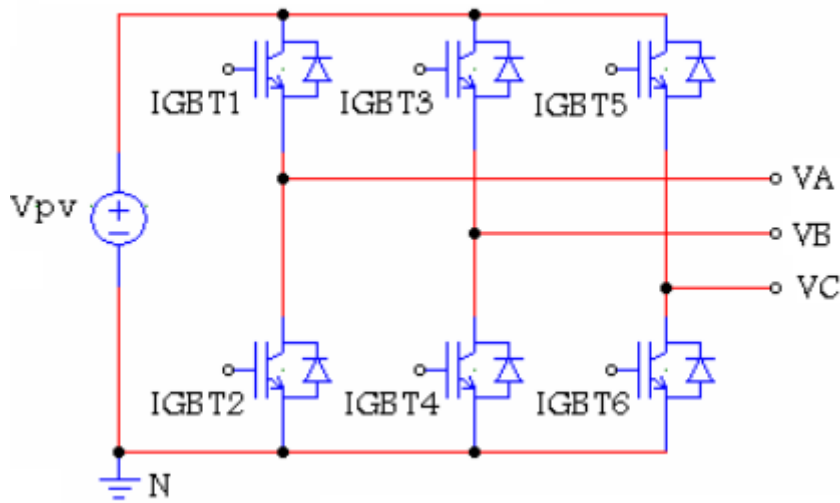


Figure 3.6 Circuit de puissance d'un onduleur triphasé

### 3-3-2 Modélisation de l'onduleur triphasé

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure 3.6, 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 mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit [22]:

$$\begin{cases} V_{AN} = S_1 V_{PV} \\ V_{BN} = S_2 V_{PV} \\ V_{CN} = S_3 V_{PV} \end{cases} \quad (3.1)$$

Où  $S_1, S_2$  et  $S_3$  désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement. Les tensions composées sont [19]:

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2) V_{PV} \\ V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3) V_{PV} \\ V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1) V_{PV} \end{aligned} \quad (3.2)$$

On peut écrire l'équation (3.2) sous la forme matricielle

$$\begin{pmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Les tensions simples sont :

$$\begin{aligned} V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{CN}) \\ V_{BN} &= \frac{2}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{CN}) \\ V_{CN} &= \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{BN}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

### 3-3-3 Les caractéristiques de l'onduleur triphasé

➤ **Tension de sortie**

Les tensions de sortie simples  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  et  $V_{CN}$  ont pour valeur efficace :

$$V_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{3} U \quad (3.6)$$

Les tensions de sortie composées  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  et  $V_{CA}$  sont pour valeur efficace :

$$V_{\text{eff(comp)}} = \sqrt{\frac{2}{3}} U \quad (3.7)$$

➤ **Courant d'entrée**

Le courant d'entrée a une fréquence égale à six fois celle des grandeurs de sortie. Lors du débit sur une charge inductive, il a comme expression :

$$\text{Pour } 0 < \omega t < \frac{\pi}{3} \quad i = -i_b = -I\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \quad (3.8)$$

Il a pour valeur instantanée maximale :

$$i_{\text{max}} = \begin{cases} I\sqrt{2} & \text{si } 0 \\ I\sqrt{2} \sin(2\pi/3 - \varphi) & \text{si } \pi/6 < \varphi < \pi \end{cases} \quad (3.9)$$

Et pour valeur instantanée minimale :

$$i_{\min} = \begin{cases} I\sqrt{2} \sin(2\pi/3 - \varphi) & \text{si } \pi/6 < \varphi < \pi \\ \text{ou} \\ -I\sqrt{2} & \text{si } \pi/6 < \varphi < \pi \end{cases} \quad (3.10)$$

Le courant d'entrée a pour valeur moyenne:

$$i_{\min} = \frac{3}{\pi} I\sqrt{2} \cos(\varphi) \quad (3.11)$$

### 3-4 Les stratégies de commande en MLI

#### 3-4-1 Définition

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivants plusieurs stratégies. A faible fréquence, ils sont pilotés en pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désiré à la sortie, et la source continu doit être réglable .A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion .Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardent la source continu constante [20].

A fine de produire de tension de sortie proche de la sinusoïde, Plusieurs techniques de contrôle à MLI ont été développées. Les plus utilisées sont les suivantes :

- Commande en pleine onde.
- MLI Sinusoïdale.
- Commande sinus triangle.
- Commande par hystérésis.
- Commande à MLI vectorielle.

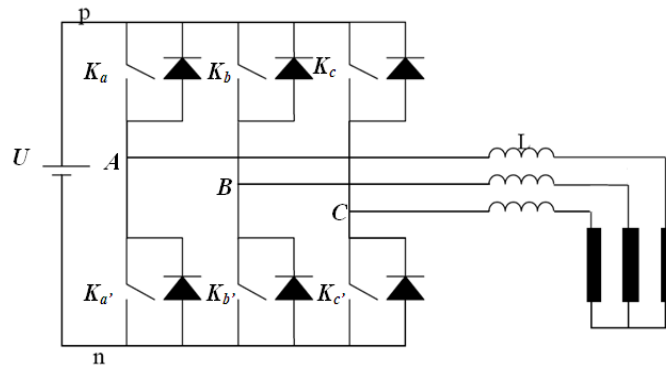
Dans notre travaille on s'intéresse sur la Commande à MLI vectorielle

#### 3-4-2 La commande MLI vectorielle

La commande vectorielle est une variante de technique du commande par modulation de largeur d'impulsion qui se base sur la représentation vectorielle des tensions dans le plan complexe a l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmonique possible.

### 3-4-2-1 Principe de la MLI vectorielle

Dans la Figure 3.7 on a le schéma représentatif de la topologie d'un onduleur triphasé de tension.



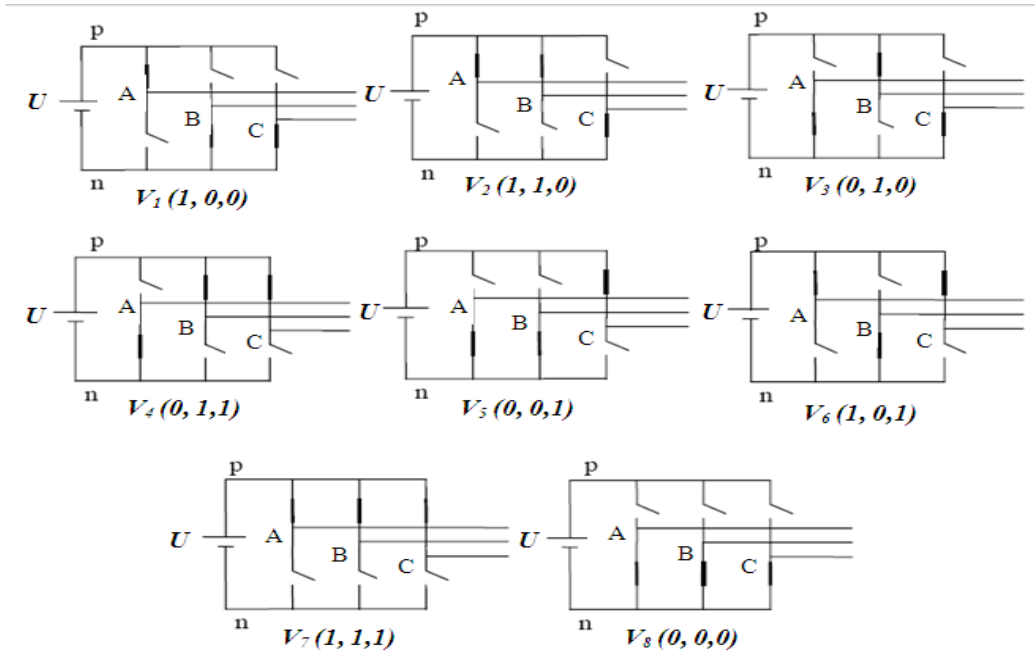
**Figure 3.7** La topologie d'un onduleur triphasé de tension

On considère que les interrupteurs sont idéaux et présentent deux états possibles : fermé (**off**) ou ouvert (**on**).

On considère que les interrupteurs de chaque bras sont commandés par deux signaux complémentaires. Ainsi, on a besoin de trois signaux logiques ( $K_a$ ,  $K_b$  et  $K_c$ ) pour commander les six interrupteurs formant l'onduleur.

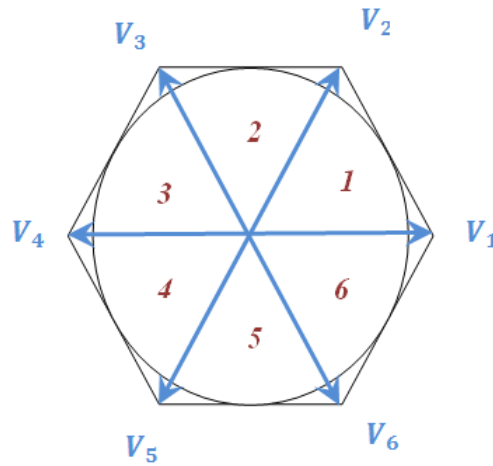
Toutefois, dans la pratique il faut prévoir un délai entre les deux signaux pour ne pas court-circuiter la source  $U$ . [23]

La Figure 3.9 fait le lien entre les différentes **séquences**, les vecteurs de tension et l'état des interrupteurs formant l'onduleur



**Figure 3.8** Etats des interrupteurs pour chaque vecteur de tension

Pour expliquer le principe de la modulation par la méthode vectorielle, on fait appel au schéma suivant Figure 3.9



**Figure 3.9** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Puisque chaque interrupteur a deux états (**ouvert** ou **fermé**), ce qui donne donc  $2^3=8$  combinaisons possibles représentées par huit vecteurs

Les six vecteurs principaux sont déphasés, l'un par rapport à l'autre, de  $(\pi/3)$  formant ainsi six sections (triangles). Chaque vecteur correspond à une séquence bien définie composée de trois variables logiques qui pilotent instantanément les trois bras de l'onduleur[23].

Par exemple, le vecteur  $V_1$  est lié à la séquence [100] ce qui correspond à la situation où les interrupteurs **K1**, **K'2** et **K'3** sont fermés

### 3-4-2-2 Les vecteurs spatiaux de tension

La modulation des vecteurs spatiaux SVM pour un onduleur de tension est basée sur la représentation vectorielle des tensions triphasées dans un plan bidimensionnelle  $(\alpha, \beta)$ . Considérant la topologie 1 de la Figure (3.10) qui est répétée dans la Figure (3.10 a) :

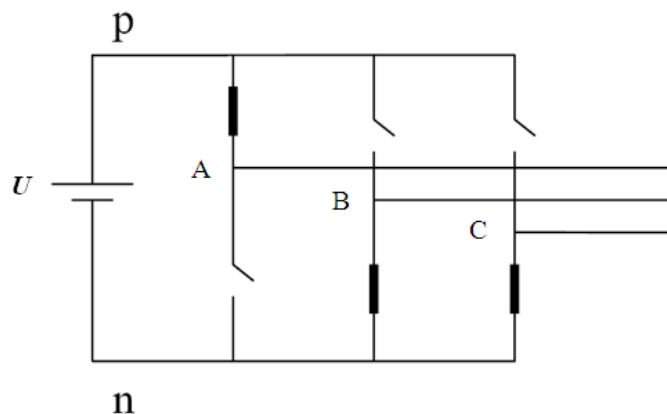


Figure 3.10 (a) Topologie 1 –  $V_1(1,0,0)$  de l'onduleur triphasé

Les tensions composées  $(U_{AB}, U_{BC}, U_{CA})$  sont données par :

$$\begin{cases} U_{AB} = U \\ U_{BC} = 0 \\ U_{CA} = -U \end{cases} \quad (3.12)$$

Ces valeurs peuvent être représentées dans le plan  $(\alpha, \beta)$  comme elles sont montrées dans la Figure 3.10(b), où les tensions  $(U_{AB}, U_{BC}, U_{CA})$  sont les vecteurs des tensions composées décalées entre eux de  $120^\circ$  dans l'espace.

Le vecteur efficace de tension produit par cette topologie est représenté comme  $V_1$  (pnn) dans la Figure 3.10(b). Ici le pnn « notation » se rapporte aux trois bras des phases ( $a, b, c$ ) étant relié à la borne positive de la source de tension continue (p) ou à la borne négative de la source de tension continue (n).

Ainsi le pnn indique que la phase ( $a$ ) étant relié à la borne positive (p) et les phases ( $b$  et  $c$ ) étant reliés à la borne négative (n).

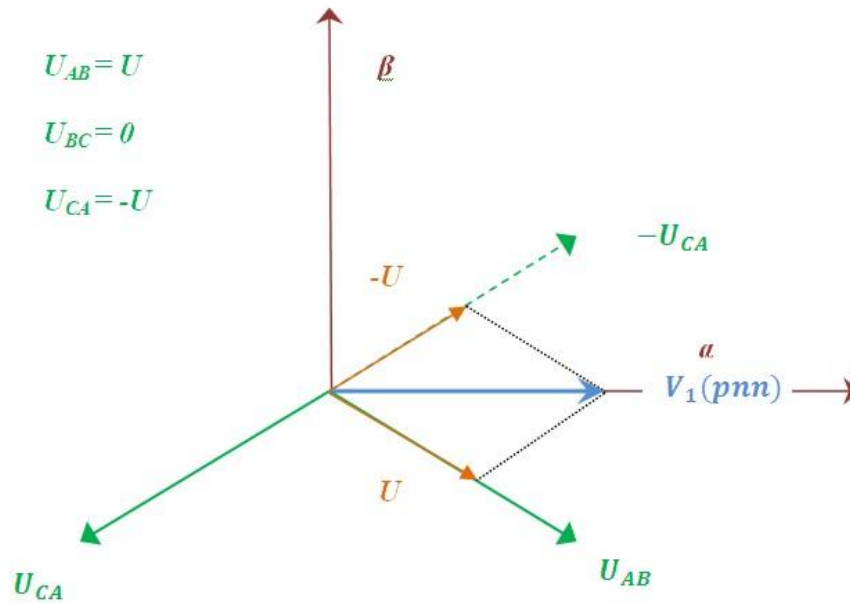
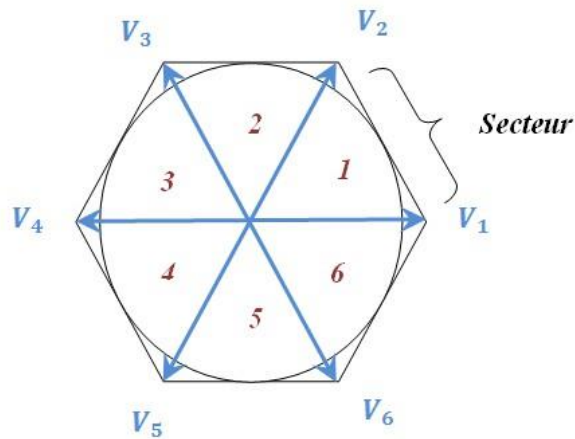


Figure 3.10(b) Représentation de la topologie 1 dans le plan ( $\alpha, \beta$ )

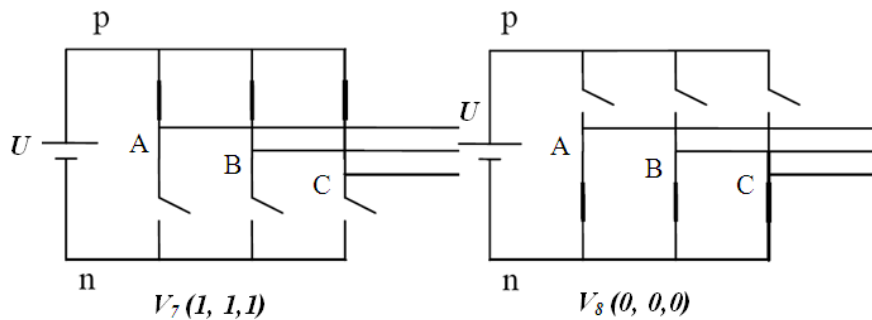
La même méthode à suivre pour les autres topologies, les six vecteurs différents de zéro de tension ( $V_1$  à  $V_6$ ) sont représentés sur les positions montrées dans la Figure 3.10(a). Les têtes de ces vecteurs forment un hexagone régulier (ligne pointillée dans la Figure 3.11(a)).

Nous définissons le secteur limité par deux vecteurs adjacents dans l'hexagone, comme secteur. Ainsi, il y a six secteurs numérotés de (1 à 6).



**Figure 3.11(a)** Représentation des vecteurs de tension différents de zéro dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .

Considérant les deux dernières topologies de la Figure 3.9 qui sont répétées dans la Figure 3.11(b).



**Figure 3.11(b)** Les deux topologies de l'onduleur V7 et V8.

Les vecteurs des tensions de sortie produits V7 et v8 par sont représentés par des vecteurs ayants des amplitudes nulles et par conséquent, ils sont désignés sous le nom des vecteurs de tension nulle ou des vecteurs à roues libres.

Ils sont positionnés à l'origine du plan  $(\alpha, \beta)$  comme les montre la Figure 3.11.

Les vecteurs (V1 à V8) sont appelés les vecteurs d'état de commutation.

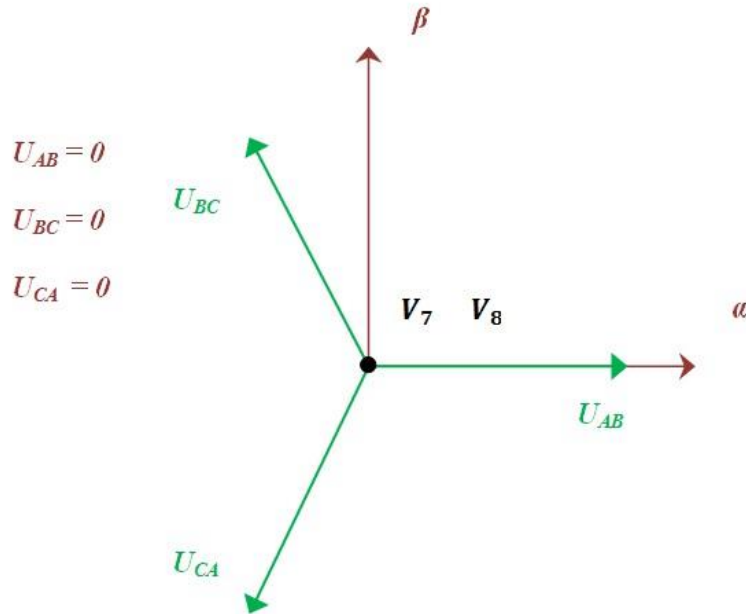


Figure 3.12 Représentation des vecteurs de tension nulle dans le plan  $(\alpha, \beta)$

### 3-4-2-3 Modulation du vecteur spatial

Les trois tensions désirées à la sortie de l'onduleur sont représentées par un vecteur équivalent  $V_{ref}$  tournant dans la direction antihoraire comme montré dans la Figure 3.13(a).

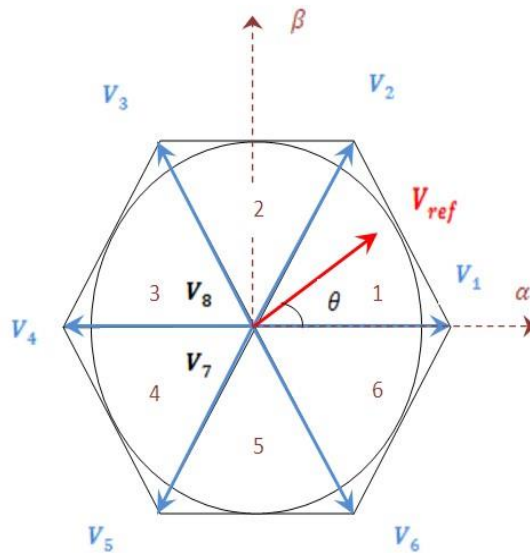


Figure 3.13(a) Le vecteur de tension de sortie dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .

L'amplitude de ce vecteur est liée à l'amplitude de la tension de sortie Figure 3.13(b) et

le temps que ce vecteur prend pour accomplir une rotation complète est identique au temps de la période de la tension fondamentale de sortie.

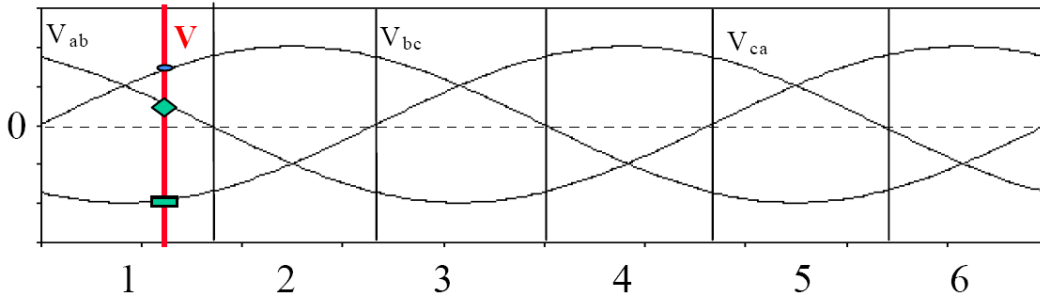


Figure 3.13(b) L'amplitude de la tension de sortie

Considérons la situation quand le vecteur de tension composé (tension entre phases)  $V_{réf}$  désiré à la sortie de l'onduleur est dans le secteur 1 comme illustré dans la Figure 3.13

Ce vecteur, peut être synthétisé par la modulation de largeur d'impulsions (PWM) des deux vecteurs adjacents  $V_1(pnn)$  et  $V_2(ppn)$ , le temps d'utilisation de chacun étant respectivement  $T_1$  et  $T_2$ , et le vecteur nul ( $V_7(nnn)$  ou  $V_8(ppp)$ ) ayant un temps d'utilisation  $T_0$ :

$$T_1 \times V_1 + T_2 \times V_2 + T_0 \times V_0 = T_m \times V_{réf} \tag{3.13}$$

Avec :

$$V_{ref} = V\alpha + jV\beta \tag{3.14}$$

Et

$$\frac{T_1}{T_m} + \frac{T_2}{T_m} + \frac{T_0}{T_m} = 1 \tag{3.15}$$

Où :

$$T_1 + T_2 + T_0 = T_m \tag{3.16}$$

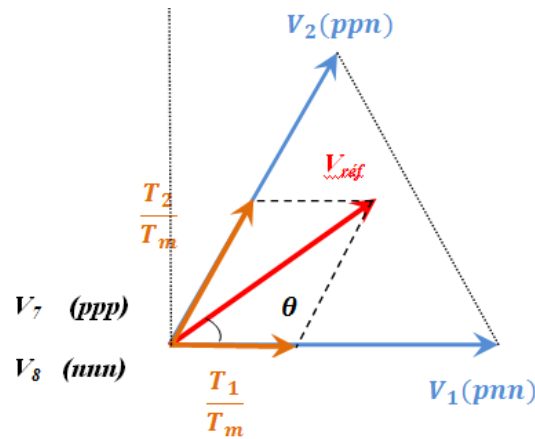


Figure 3.14 Projection du vecteur de tension dans le secteur n°1.

$\theta$ : l'angle instantané du vecteur de référence

Les degrés de libertés que nous avons pour choisir un algorithme de modulation donné sont :

- 1) -Le choix du vecteur zéro - si nous voudrions employer **V7 (ppp)** ou **V8 (nnn)** ou tous les deux en même temps.
- 2) - Séquencement des vecteurs.

### 3-5 Théorie de la MLI vectorielle

En s'appuyant sur la notion de vecteur tournant expliquée au point précédent, on peut considérer que l'onduleur délivre un vecteur de tension.

$$V_{refn0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left( V_{an0} + V_{bn0} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} + V_{cn0} \cdot e^{j \cdot \frac{4\pi}{3}} \right) \quad (3.17)$$

L'état des interrupteurs, supposés parfaits, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande

$K_j (j = 1, 2, 3)$  telles que:

$K_j = 1$  si la phase a est connectée à la borne positive de la source continue E.

$K_j = 0$  si la phase a est connectée à la borne négative de la source continue E.

La même chose pour les autres phases.

Dans ces conditions, on peut écrire les tensions des phases  $V_{ino}$  en fonction des signaux de commande  $K_j$  tel que.

$$V_{ino} = K_j \cdot E - E/2$$

On peut alors écrire:

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left( K_a + K_b \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} + K_c \cdot e^{j \cdot \frac{4\pi}{3}} \right) \quad (3.18)$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs ( $K_a, K_b, K_c$ ) permettent de générer les huit positions du vecteur  $V_{ref}$  dont deux correspondent au vecteur nul

$$V_8 \Leftrightarrow (K_a, K_b, K_c) = (0,0,0), V_7 \Leftrightarrow (K_a, K_b, K_c) = (1,1,1)$$

Les six vecteurs tensions non nuls peuvent être formulés par:

$$\bar{V}_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot e^{j \cdot (1-i) \cdot \frac{\pi}{3}} \quad (i=1,2,3,4,5,6) \quad (3.19)$$

Les tensions entre phases sont données par :

$$V_{ab}=V_{ano} - V_{bno}, V_{bc}=V_{bno} - V_{cno}, V_{ca}=V_{cno} - V_{ano}$$

Le moteur à cage constitue une charge triphasée en triangle ou en étoile avec un neutre isolé « n » d'où :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.20)$$

Cette relation permet d'écrire

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{cb}) \end{cases} \quad (3.21)$$

Donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ano} - V_{bno} - V_{cno}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ano} + 2V_{bno} - V_{cno}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ano} - V_{bno} - 2V_{cno}) \end{cases} \quad (3.22)$$

L'utilisation de l'expression (3.22) permet d'établir les équations instantanées des tensions en fonction des grandeurs de commandes.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Pour simplifier les calculs et représenter ces tensions, appliquons la transformation triphasée/biphasée en respectant le transfert de puissance (transformation de Concordia):

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

La modulation de largeur d'impulsion (SVPWM) par le vecteur spatial peut être mise en application suivant les étapes suivantes :

- 1-Détermination de  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ,  $V_{ref}$  et l'angle  $\theta$
- 2-Détermination des durées d'utilisations des interrupteurs T1, T2 et T0.
- 3- Détermination de la période de commutation de chaque interrupteur ( $K1, K2, K3$  et  $K1', K2', K3'$ ).

### 3-5-1 Détermination de $V_\alpha$ , $V_\beta$ , $V_{ref}$ et l'angle ( $\theta$ )

À partir de la Figure (3.15),  $V_\alpha, V_\beta, V_{ref}$  et l'angle ( $\theta$ ) peuvent être déterminés comme suit:

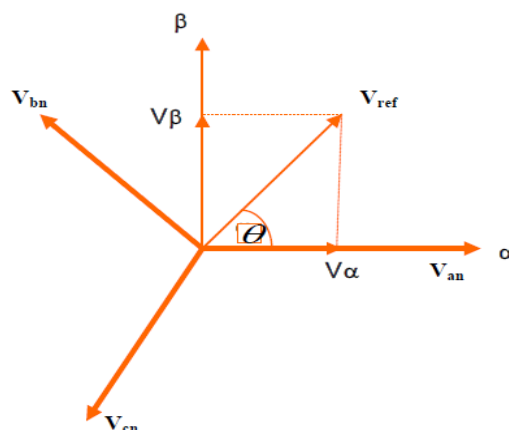


Figure3-15 Projection des vecteurs de tension ( $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ ) sur le plan ( $\alpha, \beta$ )

Avec :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= r \cdot \frac{U}{2} \cdot \cos(\theta) \\
 V_{bn} &= r \cdot \frac{U}{2} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_{cn} &= r \cdot \frac{U}{2} \cdot \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.25}$$

Où :  $r$  est le coefficient de réglage

$$\begin{aligned}
 V_{\alpha} &= V_{an} - V_{bn} \cdot \cos 60 - V_{cn} \cdot \cos 60 \\
 &= V_{an} - \frac{1}{2} \cdot V_{bn} - \frac{1}{2} \cdot V_{cn}
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

$$V_{\beta} = 0 + V_{bn} \cdot \cos 30 - V_{cn} \cdot \cos 30
 \tag{3.27}$$

$$= 0 \cdot V_{an} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{cn}
 \tag{3.28}$$

En respectant le transfert de puissance (transformation de Concordia) on aura [6]

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}
 \tag{3.29}$$

$$V_{ref} = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2}
 \tag{3.30}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{\alpha}}{V_{\beta}} \right) = \omega \cdot t = 2\pi f t \text{ où } f : \text{ est la fréquence fondamentale.}$$

### 3-5-2 Détermination des durées d'utilisations des interrupteurs

Le vecteur de référence  $V_{ref}$  est évalué sur la période de modulation  $T_m$ , par la génération d'un vecteur moyen déterminé par l'application des vecteurs de commande adjacents de l'onduleur et des vecteurs nuls. En utilisant les huit vecteurs disponibles Tableau (3.1) .[23]

K1	K2	K3	V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>	V <sub>α</sub>	V <sub>β</sub>	Vecteur V <sub>i</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	V <sub>8</sub> =0
1	0	0	2U/3	-U/3	-U/3	$\sqrt{\frac{2}{3}}U$	0	$V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}U$
1	1	0	U/3	U/3	2U/3	$\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_2 = \sqrt{\frac{2}{3}}Ue^{j\frac{\pi}{3}}$
0	1	0	U/3	2U/3	-U/3	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_3 = \sqrt{\frac{2}{3}}Ue^{j\frac{\pi}{3}}$
0	1	1	-U/3	-U/3	-U/3	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U$	0	$V_4 = -\sqrt{\frac{2}{3}}U$
0	0	1	U/3	-2U/3	-U/3	$\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_5 = \sqrt{\frac{2}{3}}Ue^{j\frac{\pi}{3}}$
1	0	1	U/3	-2U/3	-U/3	$\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_6 = \sqrt{\frac{2}{3}}Ue^{j\frac{\pi}{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0	V <sub>7</sub> =0

Tableau 3 .1 Calcul des vecteurs de tensions

La Figure(3.16) représente le cas ou le vecteur de référence se trouve dans le secteur 1.

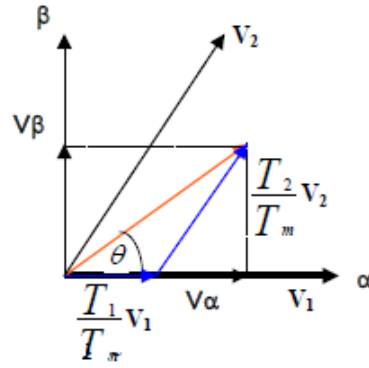


Figure 3.16 Projection du vecteur de référence (secteur 1)

Le temps d'application des vecteurs adjacents est donné comme suit:

$$T_m = T_1 + T_2 + T_0 \quad (3.31)$$

$$V_{ref} = \frac{T_1}{T_m} V_1 + \frac{T_2}{T_m} V_2 + \frac{T_0}{T_m} V_0 \quad (3.32)$$

La détermination des instants  $T_1$  et  $T_2$  est donnée par une simple projection sur les axes  $\alpha$  et  $\beta$  Figure (3.16)

$$\int_0^{T_m} V_{ref} dt = \int_0^{T_m} V_1 dt + \int_{T_1}^{T_m} V_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_m} V_0 dt \quad (3.33)$$

$$T_m \cdot V_{ref} = (T_1 \cdot V_1 + T_2 \cdot V_2) + T_0 \cdot (V_7 \text{ ou } V_8)$$

$$T_m |V_{ref}| \times \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} = T_1 \sqrt{\frac{2}{3}} U \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \sqrt{\frac{2}{3}} U \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Où ( $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ )

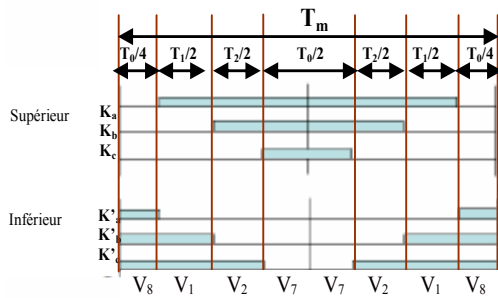
$$T_1 = T_m \times \frac{|V_{ref}|}{\sqrt{\frac{2}{3}} \times U} \times \frac{\sin(\pi/3 - \theta)}{\sin(\pi/3)} \quad (3.35)$$

$$T_2 = T_m \times \frac{|V_{ref}|}{\sqrt{\frac{2}{3}} \times U} \times \frac{\sin(\theta)}{\sin(\pi/3)} \quad (3.36)$$

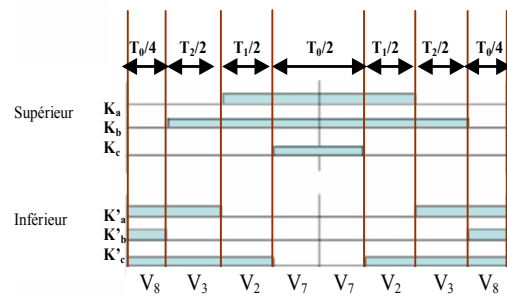
Pour le reste de la période on applique le vecteur nul :

$$T_0 = T_m - (T_1 + T_2) \quad (3.37)$$

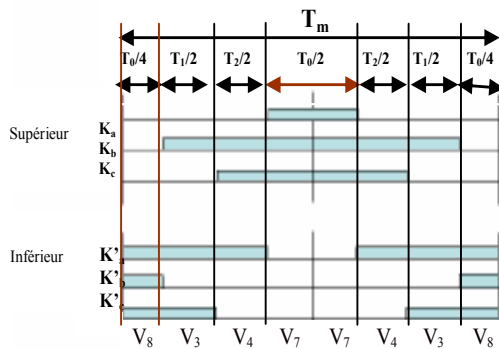
En fait le même calcul pour chaque secteur et ensuite on passe au calcul des temps de commutations.



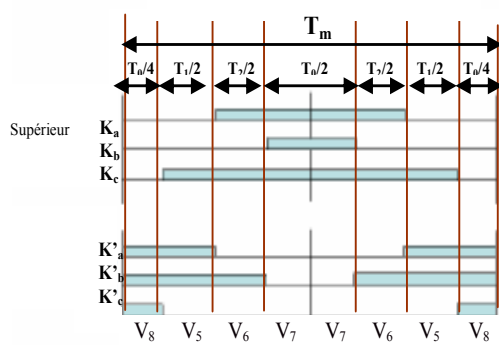
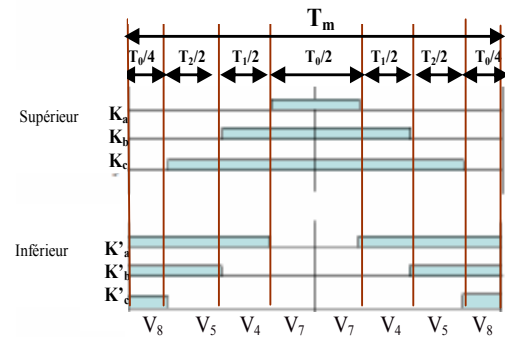
Secteur N° : 01



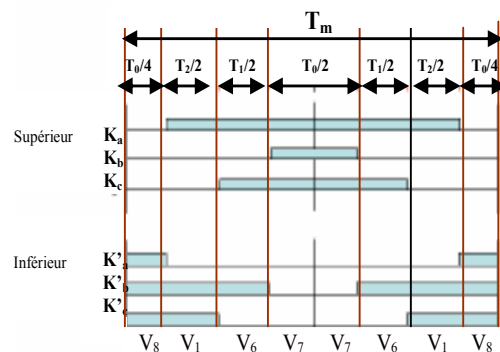
Secteur N° : 02



Secteur N° : 04



Secteur N° : 05



Secteur N° : 06

Figure 3.17 Les temps de commutation pour chaque semi-conducteur dans chaque secteur

Le calcul du temps de commutation dans chaque secteur pour les deux séquences se fait comme suit.

Secteur	Commutateur supérieur ( $T_a, T_b, T_c$ )	Commutateur inférieur ( $T_a', T_b', T_c'$ )
1	$T_a = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_b = T_2 + T_0/2$ $T_c = T_0/2$	$T_a' = T_0/2$ $T_b' = T_1 + T_0/2$ $T_c' = T_1 + T_2 + T_0/2$
2	$T_a = T_1 + T_0/2$ $T_b = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_c = T_0/2$	$T_a' = T_2 + T_0/2$ $T_b' = T_0/2$ $T_c' = T_1 + T_2 + T_0/2$
3	$T_a = T_0/2$ $T_b = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_c = T_2 + T_0/2$	$T_a' = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_b' = T_0/2$ $T_c' = T_1 + T_0/2$
4	$T_a = T_0/2$ $T_b = T_1 + T_0/2$ $T_c = T_1 + T_2 + T_0/2$	$T_a' = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_b' = T_2 + T_0/2$ $T_c' = T_0/2$
5	$T_a = T_2 + T_0/2$ $T_b = T_0/2$ $T_c = T_1 + T_2 + T_0/2$	$T_a' = T_1 + T_0/2$ $T_b' = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_c' = T_0/2$
6	$T_a = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_b = T_0/2$ $T_c = T_1 + T_0/2$	$T_a' = T_0/2$ $T_b' = T_1 + T_2 + T_0/2$ $T_c' = T_2 + T_0/2$

**Tableau 3.2** Calcul des largeurs des impulsions pour chaque secteur.

**Conclusion**

Dans ce chapitre on a fait une brève description des onduleurs triphasés et la modélisation de leur commande.

Au but de synchronisé la tension de sortie de l'onduleur avec celle injecté au réseau, la commande MLI vectorielle a été présenté.

# *Chapitre 4*

## *Les résultats de simulation*

**Introduction**

Dans ce chapitre, on présentera les résultats de simulation d'un système photovoltaïque  
Connecté au réseau électrique.

Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur  
« boost », une commande MPPT « perturbation et observation » et un onduleur triphasé  
à deux niveaux avec la commande MLI vectorielle.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués  
sous le logiciel MATLAB/Simulink

## 4.2. Simulation du générateur PV

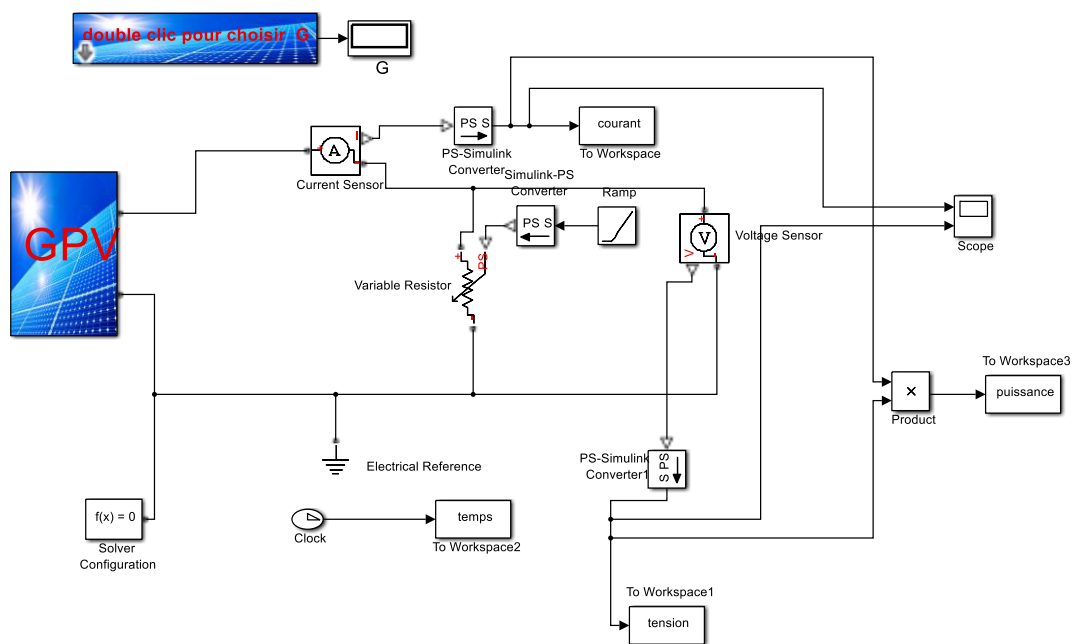
Dans ce travail nous avons simulé un GPV qui comporte 3 module monté on parallèles et chaque module comporte 36 cellules solaires de silicium monocristallin connectées en série.

Les caractéristiques électriques du générateur Photovoltaïque en conditions de test standards sont représentées dans le Tableau 4-1.

Grandeurs	Valeurs
Eclairement standard, G.	1000 W /m <sup>2</sup>
Température standard, T.	25° C
Puissance crête maximale, P <sub>m</sub> .	366 .8 W
Tension optimal, V <sub>opt</sub> .	17 .94 V
Courant optimal, I <sub>opt</sub> .	20 .44 A
Tension de circuit ouvert, V <sub>oc</sub>	21.6
Courant de court-circuit, I <sub>sc</sub> .	20.88
Nombre des cellules en séries	36
Nombre des branches parallèles	3

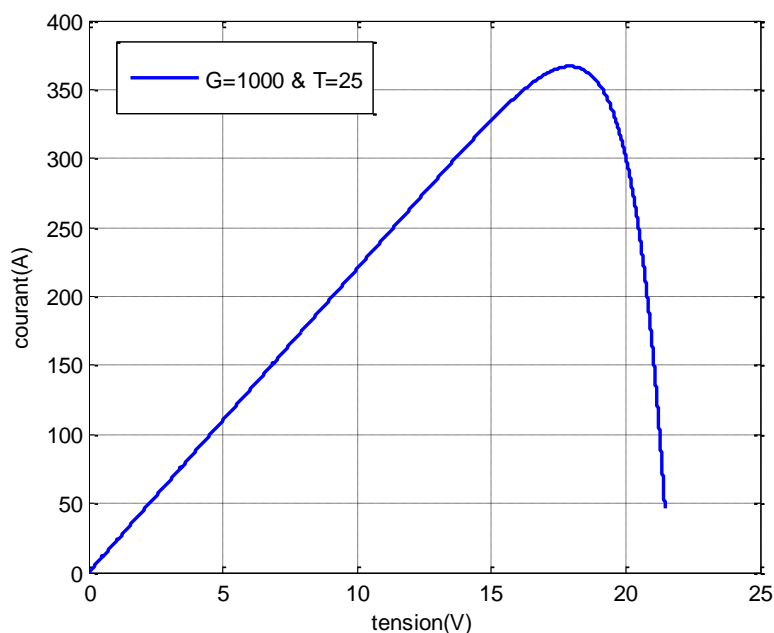
**Tableau 4.1**Caractéristiques électriques du GPV photovoltaïque Dans les conditions standards « STC »

La Figure ci-dessous présente le bloc du GPV dans l'environnement Matlab-Simulink.



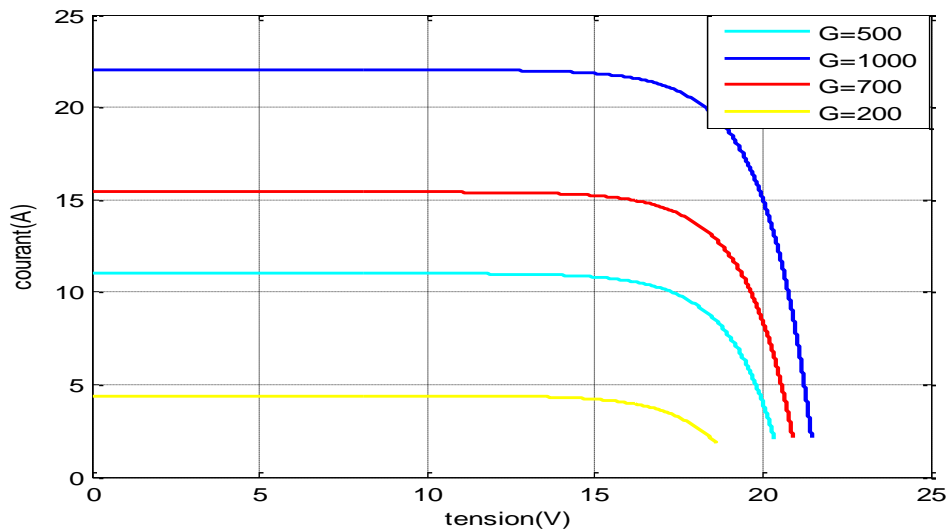
**Figure 4 .1**Le Schéma block de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

La figures (4.2) montrent les caractéristiques électriques du module après simulation avec MATLAB / SIMULINK pour  $G=1000\text{w /m}^2$ et pour une température de  $25^\circ\text{C}$ .



**Figure 4 .2** les caractéristiques électriques du module pour  $G=1000\text{w /m}^2$  et  $T =25^\circ\text{C}$

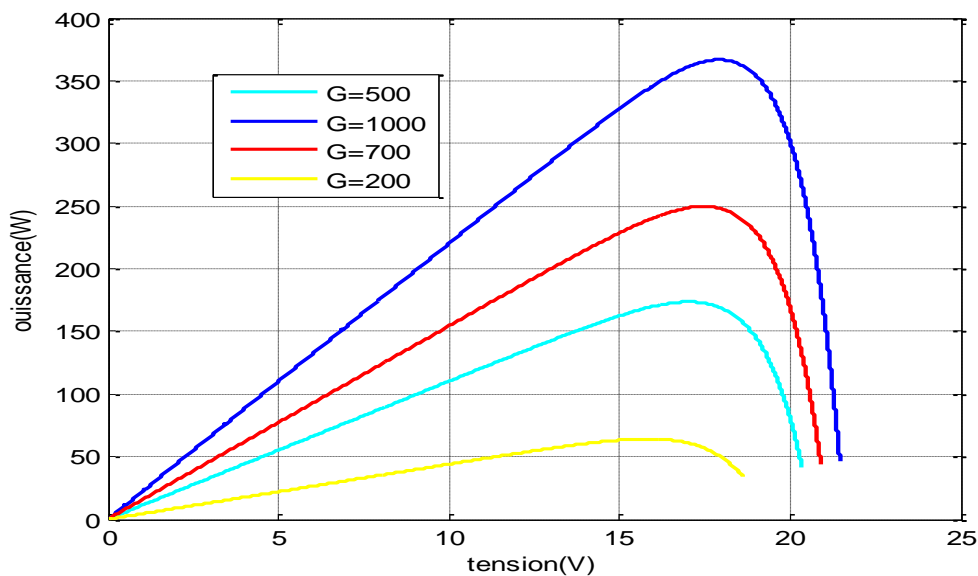
Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque pour différentes valeurs d'éclairement et pour une température de 25°C représentent par la Figure4 .3



**Figure 4.3** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

On remarque que l'intensité du courant croît avec l'éclairement, ce qui permet au GPV de produire une puissance électrique plus importante.

La Figure 4.4 présente la caractéristique  $P(V)$  et montre le croisement de la puissance avec l'éclairement.



**Figure 4.4** Résultats de simulation des caractéristiques  $P(V)$  Pour différents Eclairement et une température fixe  $T=25^{\circ}C$

L'évolution de la caractéristique I(V) en fonction de la température montre que le courant augmente très rapidement lorsque la température s'élève et engendre une décroissance moins prononcée de la tension de circuit-ouvert (Figure 4.5).

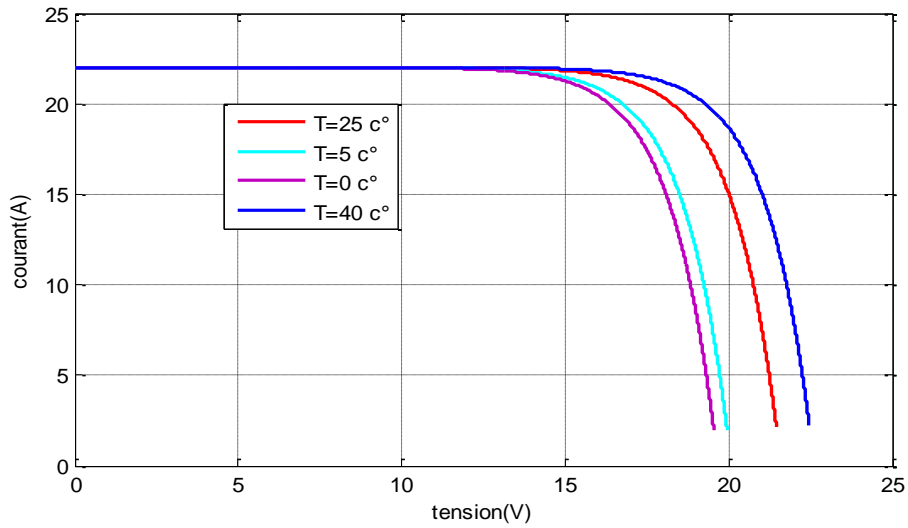


Figure 4. 5L'influence de la température sur la caractéristique I(V)

On constate dans la Figure 4 .6, la caractéristique P(V),l'augmentation de la puissance maximale avec la température .

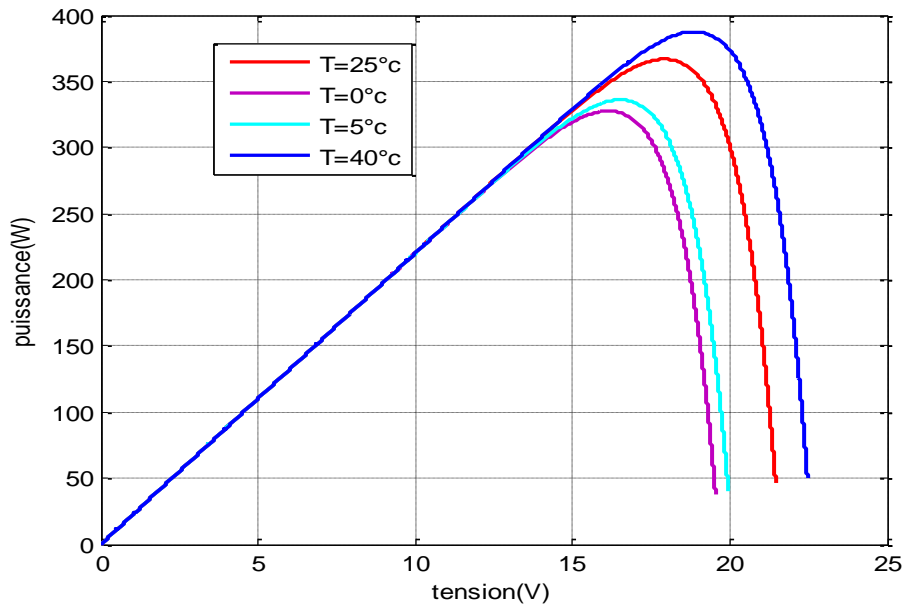


Figure 4 .6L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V)

### 4.3 Simulation del' hacheur survolteur (boost ) et la commande MPPT

#### 4.3.1 Simulation del' hacheur survolteur (boost )

La Figure 4 .7 représente le schéma bloc d'un convertisseur survolteur

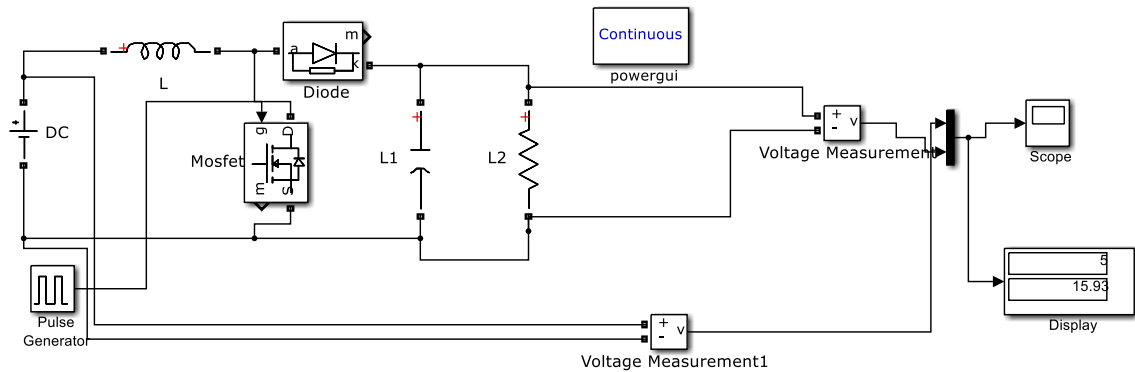


Figure4 .7 Schéma bloc d'un convertisseur survolteur

#### 4.3.2 Simulation de la méthode MPPT

La Figure 4 .8 illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT.

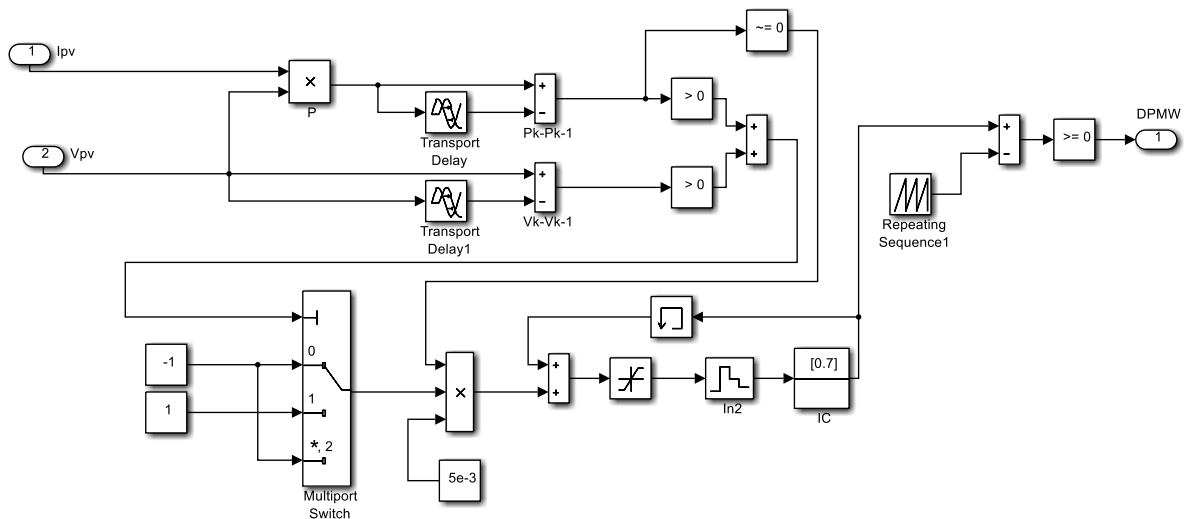


Figure 4 .8 Schéma bloc de la commande MPPT « P&O »

4.4 Simulation du systeme GPV et le boost avec la commande MPPT

La Figure 4.9 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » :

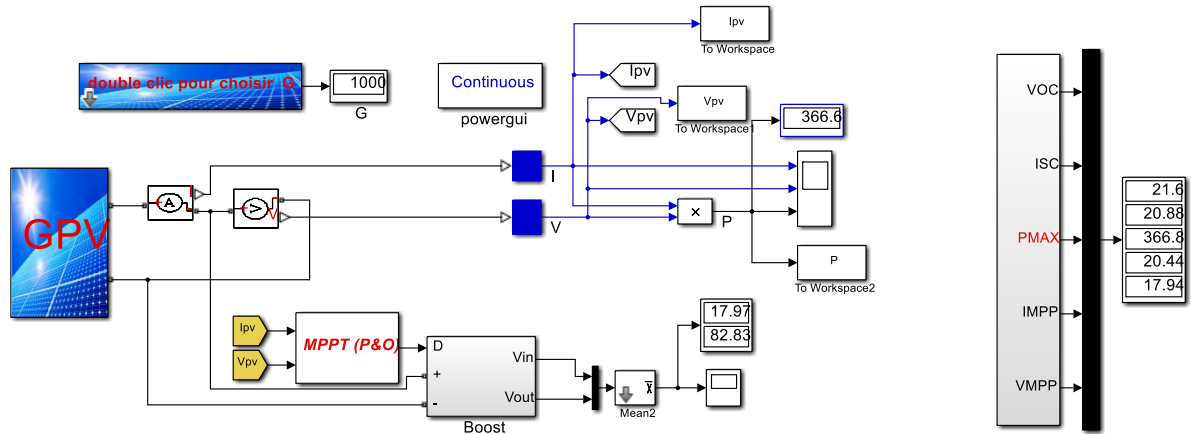


Figure 4.9 Schéma d’un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

On effectue la simulation du système dans les conditions standards ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ \text{ C}$ ) pour extraire la puissance optimale de notre systèmes. Donc la tension du générateur PV après l’utilisation de la technique de recherche de l’MPPT représente la tension optimale. La figure 4.10 donne la valeur de la tension produite «  $V_{pv}$  »

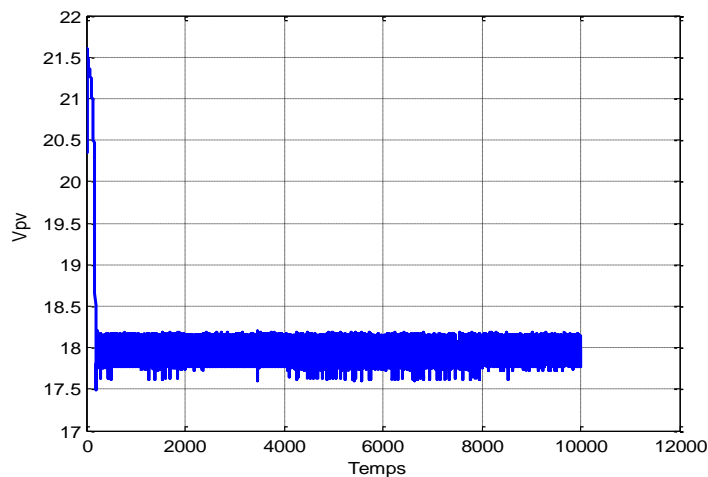
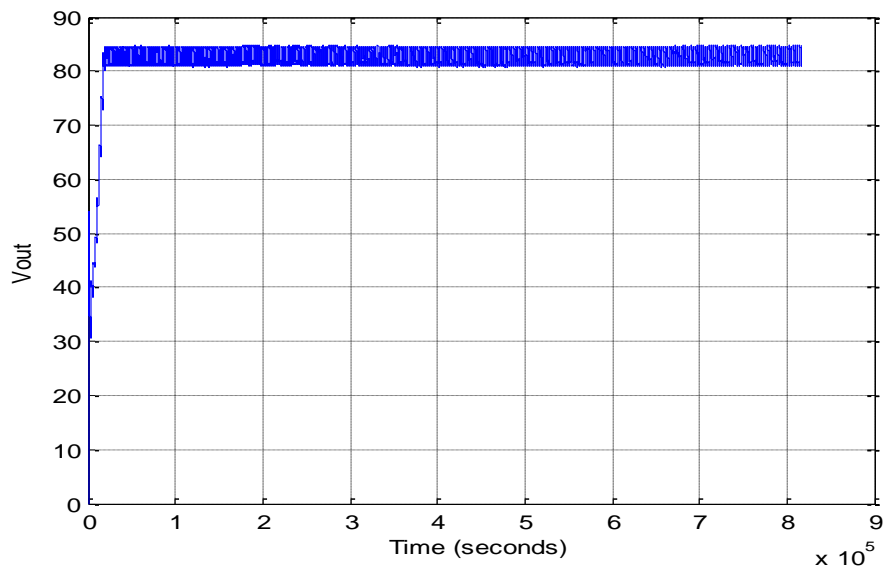


Figure 4.10 Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ \text{ C}$



**Figure 4.11** Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

On remarque que L'hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque.

#### 4.5 Simulation du système à éclairement variable

Pour avoir l'efficacité de la commande MPPT et la relation entre l'éclairement et la puissance de sortie du GPV, on a simulé notre système à  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $G=800\text{W}/\text{m}^2$  et  $G=700\text{W}/\text{m}^2$  avec une température fixe  $T=25^\circ\text{C}$  sans et avec le MPPT. Les résultats obtenus sont représentés à la Figure 4.12 et la Figure 4.13.

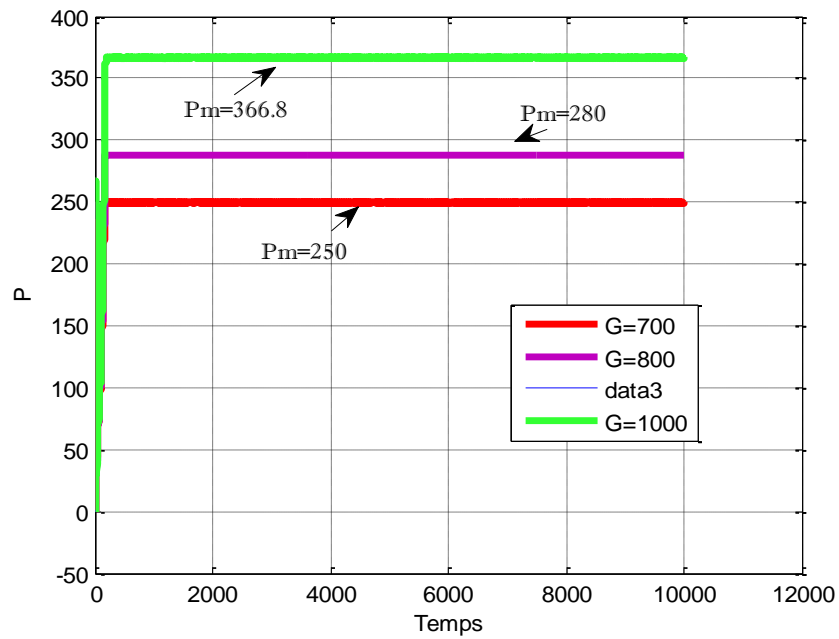


Figure 4.12. Caractéristique de la puissance pour différentes éclairément avec le MPPT

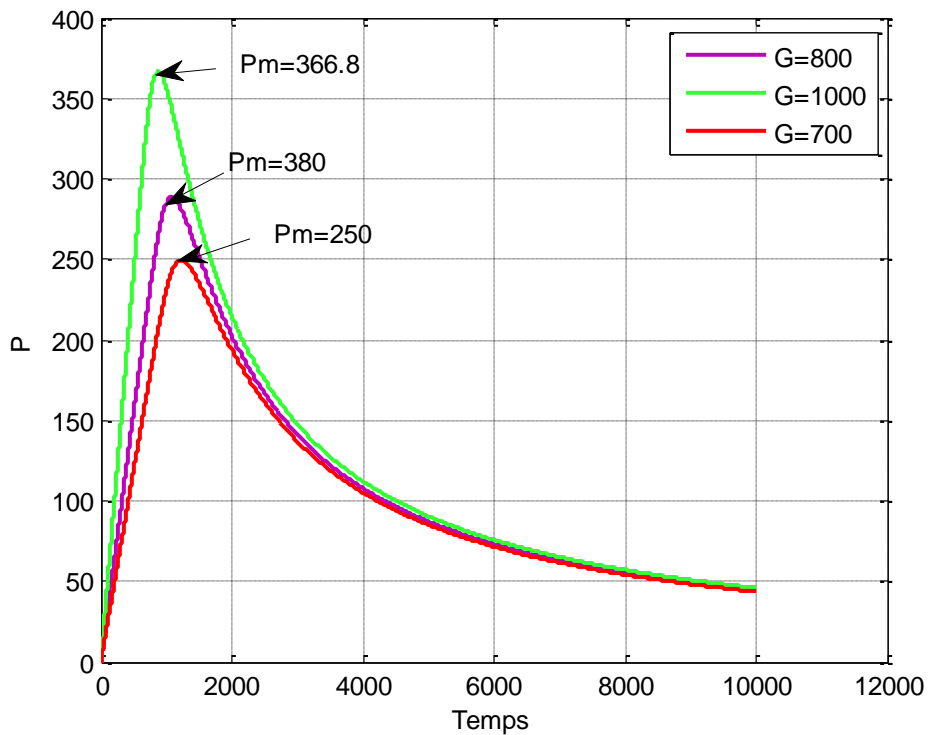


Figure 4.13. Caractéristique de la puissance pour différentes éclairément sans le MPPT

D'après ces résultats on peut conclure que notre système est efficace et l'algorithme du MPPT est bien fonctionnel.

On constate aussi que la variation de l'éclairément a un effet remarquable sur le fonctionnement du système.

### 4.6 Simulation de la commande MLI vectorielle

Dans cette modulation on représente par seul vecteur les trois tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteur complémentaires.

Cette MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés pour chaque bras de l'onduleur mais sur la détermination d'un vecteur de contrôle global approximé sur une période de modulation  $T$ .

La Figure 4.14 illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande MLI vectorielle

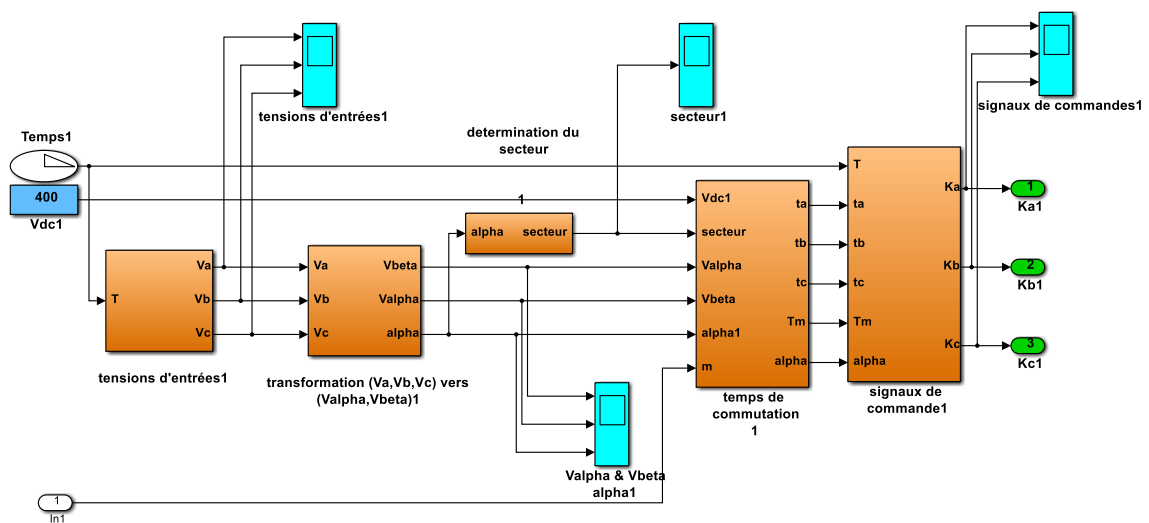


Figure 4.14 Schéma block de la commande MLI vectorielle

Les étapes qu'on a suivie pour la réalisation des blocs de SVM sont les suivantes :

**1 étape : Détermination des tensions de références  $V\alpha$ ,  $V\beta$  et l'angle  $\alpha$**

Le modèle mathématique est celui étudié dans le chapitre précédent.

La Figure 4 .15 illustre le bloc schématique de SIMULINK

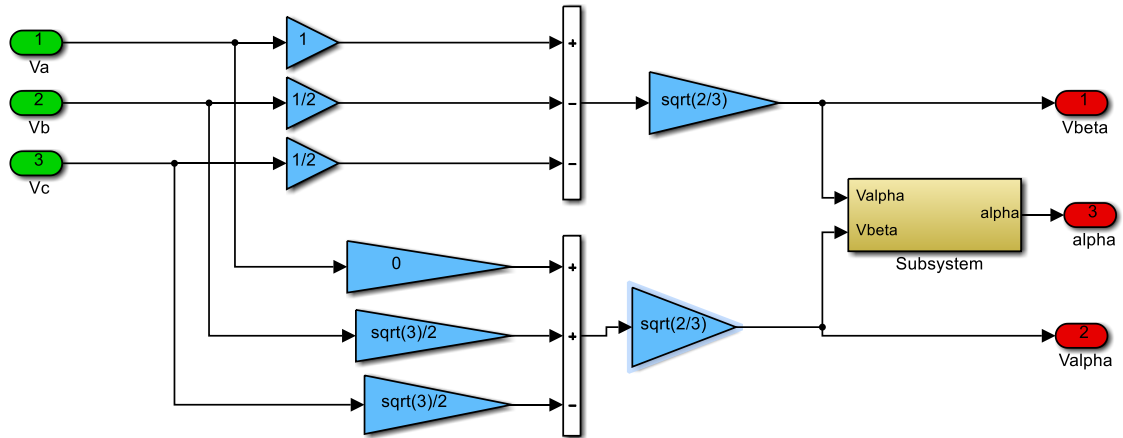


Figure 4.15 bloc schématique de SIMULINK pour détermination de  $V_{\alpha}$ ,  $V_{\beta}$  et l'angle  $\alpha$

Les résultats de simulation obtenue sont représenté au Figure 4 .16

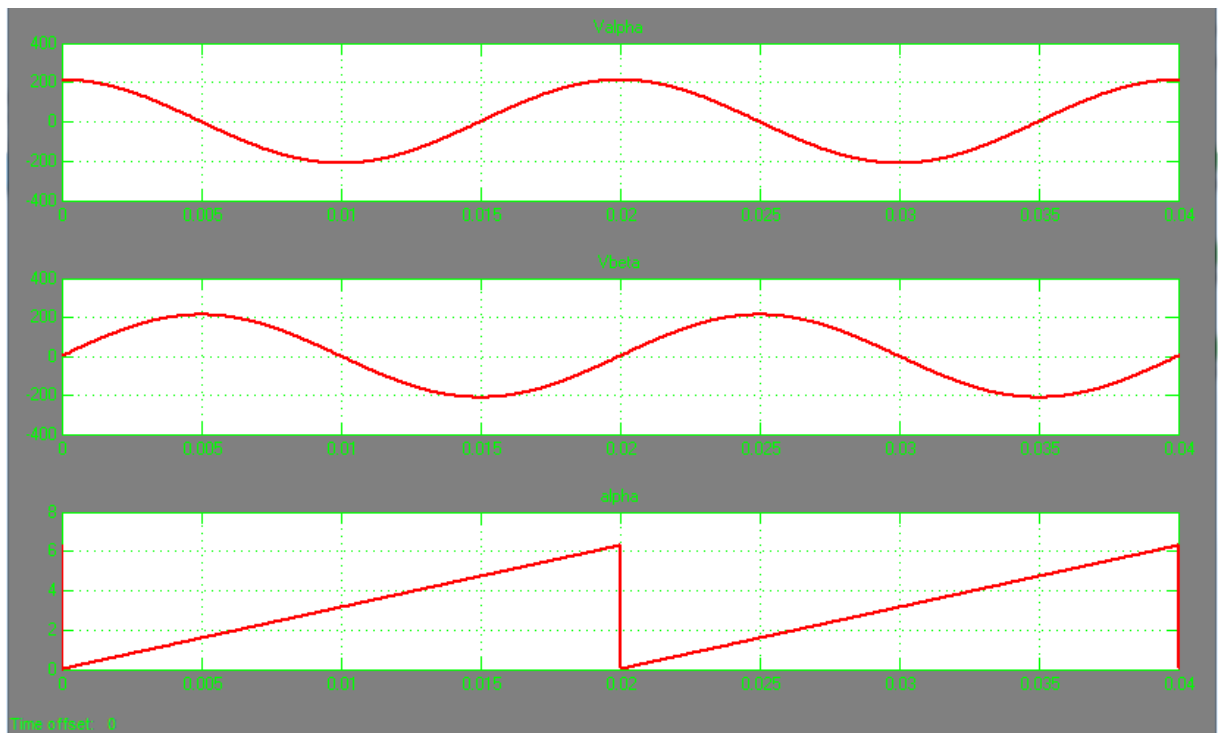


Figure 4.16 l'allure de  $V_{\alpha}$ ,  $V_{\beta}$  et l'angle  $\alpha$

Etape 2 :Détermination des secteur

La Figure 4.17 illustre le bloc schématique de SIMULINK pour déterminé le secteur

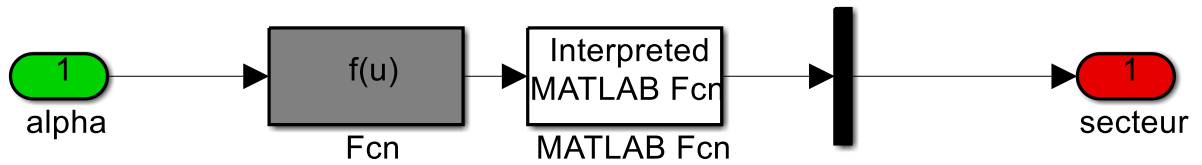


Figure 4.17 Bloc de secteur Matlab /SIMULINK

La Figure ci-dessous présente la variation du secteur

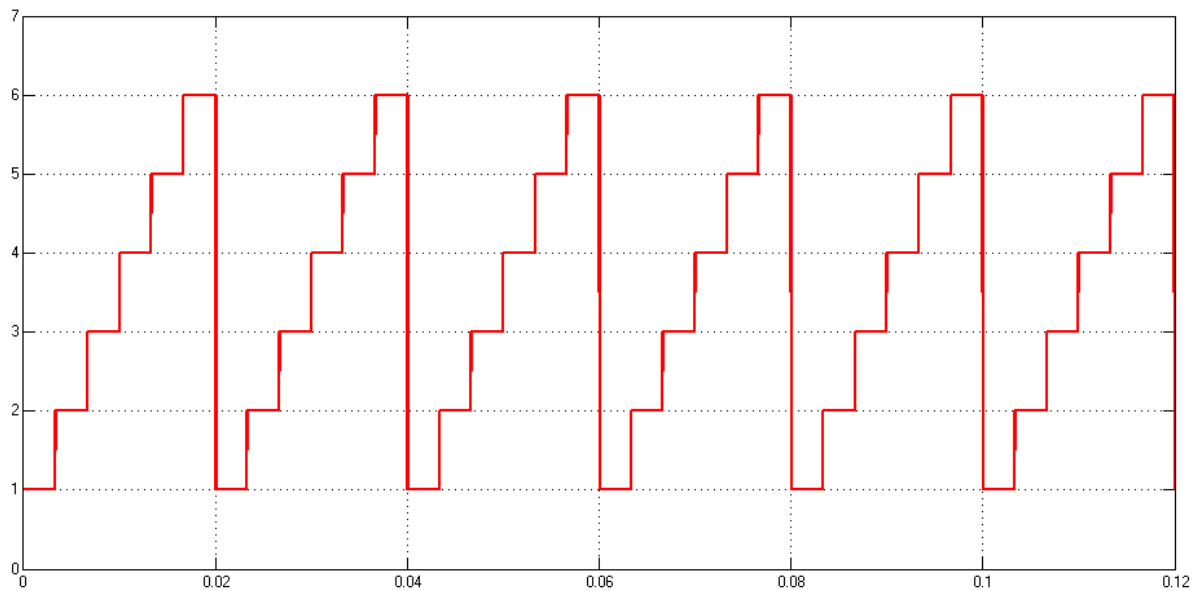


Figure 4.18 L'allure de la variation du secteur

Est une 3éme étape permet de déterminé les temps de commutation T1, T2 et T0

4.7 Simulation du systèmes globale

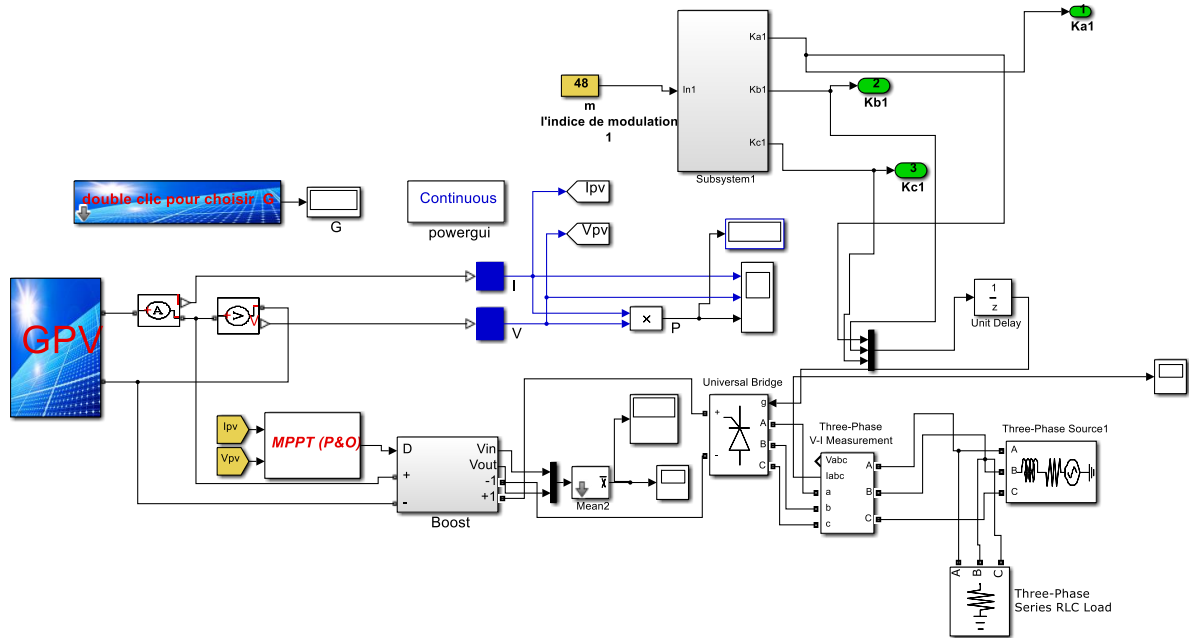


Figure 4 .19Schéma MATLAB SIMULINK d'un système globale

**Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté les différents composants du système photovoltaïque étudié, sous l'environnement Matlab/Simulink.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on a remarqué :

- L'effet de la variation de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement du système.
- La robustesse et la fiabilité du convertisseur boost et la commande MPPT.
- La commande MLI vectorielle a été réalisé mais malheureusement on a trouvé quelques anomalies qu'on devra les régler et prendra les résultats satisfaisants.

## CONCLUSION GENERALE

Le but de ce projet est l'étude, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique conventionnel pour injecter de la puissance réelle produite par le GPV en utilisant une commande MLI vectorielle .

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une activité de recherche sur les énergies renouvelables et ce mémoire est le résultat d'un ensemble de simulation en vue de l'interconnexion d'un système photovoltaïque au réseau électrique. Il m'a permis d'appliquer les connaissances acquises durant mes études antérieures et de m'initier à divers montages et outils logiciels de la spécialité du technologie des systèmes PV .

C'est assurément un cheminement de recherche très intéressant qui requiert la maîtrise et l'implication dans les domaines suivants :

La simulation sur ordinateur : Matlab/SIMULINK .

L'électronique de puissance : commande de hacheurs et d'onduleurs.

L'automatique : stabilité de la synchronisation avec le réseau électrique.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on a remarqué :

- L'effet de la variation de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement du système.
- La robustesse et la fiabilité du convertisseur boost et la commande MPPT.
- La commande MLI vectorielle a été réalisée mais malheureusement on a trouvé quelques anomalies qu'on devra les régler et prendre les résultats satisfaisants .

## LES REFERENCE :

[01] : F . Chekider ,«étude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire magister en électronique, université de Jijel, 2008.

[02]: D.Morales, «Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications», memoire master en électronique, Technology, Université de Aalto Finlande, 2010.

[03] : B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, [www.itismajo.it/fff/.../Energie\\_solaire\\_photovoltaique.pdf](http://www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf), consulté janv. 2014

[04] :F. Kandouli, « Modélisation et commande des machines électriques », Juillet 2007,

[05] :S. Bellakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010

[06] :S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[07] :N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009

[08] :M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une

installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[09] : K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 –462.

[10] :M.Tiar, «Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride », Mémoire de Magister En Electrotechnique, Université de Biskra, 2011.

[11]:S. Belakehal , « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Constantine, 2010.

[12] : W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider , Biskra, 2013.

[13] : Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, 2008.

[14]:M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.

[15] : A. Betka, A. Moussi, « Rendement maximise d'un moteur asynchrone alimente par une source photovoltaïque », LarhyssJournal, ISSN 1112-3680, pp. 151-162 Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, 2003.

[17] : K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007).

[18] : M. Dariga, «Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique», Thèse Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.

[20] : K. Merabet , «commande MU d'un onduleur triphasé basée la dispersion de la tension triphasée »,Mémoire de Magister en Génie Electrique ,Université du Québec ,2011.

[21] : A. Boukaroura, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph », Mémoire de Magister en électronique , l'université Ferhat Abbas de Sétif,2009 .

[22] :A. Bouzid et M.Mazizi ,« Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme Étude de l'onduleur triphasé lié à cette application », mémoire d'Ingénieur d'état en Electrotechnique, Mohamed Boudiaf d'Oran,2008

[23] :F. Berrabah , « Commande d'un onduleur triphasé par MLI vectorielle développé à base de la séquence aligné à droite ( right alignedsequence), Mémoire de Magister en Génier Electrique,Université badji –mokhtar annaba.2008

## ملخص

الهدف من هذا المشروع هو تصميم و نمذجة و محاكاة للنظام الكهروضوئي المتصل بشبكة الكهرباء المألوفة

لضخ الطاقة الفاعلة التي ينتجها المولد GPV باستخدام آلية التحكم الشعاعي SVMLI .

**الكلمات المفتاحية :** نظام الكهروضوئي , المحول الرفع , آلية التحكم , MPPT , المحول العاكس , آلية التحكم الشعاعي

SVMLI المحاكاة , نمذجة

### Résumé :

Le but de ce projet est l'étude, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique conventionnel pour injecter de la puissance réelle produite par le GPV en utilisant une commande vectorielle.

### Mots clés:

système photovoltaïque, onduleur, commande MLI vectorielle, hacheur (boost , commande MPPT, modélisation.

### Abstract :

Purpose of this project is the design, modeling and simulation of a photovoltaic system connected to the conventional power grid to inject the real power produced by the GPV using vector control.

### Keywords :

PV systeme, Boost converter, MPPT command, Modelisation, Simulation ,onduleur ,SVM command