

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche scientifique**



**Université d'EL-Oued**  
**Faculté des Sciences et de Technologies**

**Mémoire de Fin d'Etude**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et de Technologies**  
**Filière: Génie Électrique**  
**Spécialité: Réseaux Électriques**

## **Thème**

**Alimentation Du Moteur Asynchrone Par  
Un Panneau Photovoltaïque**

par:  
- Chami badreddine  
- Boughazala M. M larbi

Encadreur: M. wissem slimane

**Soutenu Juin 2013**

*A cœur vaillant*

*rien d'impossible conscience tranquille*

*Tout est accessible Quand il y a la soif d'apprendre*

*Tout vient à point à qui sait attendre Quand il y a le souci de*

*Réaliser un dessein Tout devient facile pour arriver à nos fins*

*Malgré les obstacles qui s'opposent En dépit des difficultés qui s'interposent*

*Les études sont avant tout Notre unique et seul atout Ils représentent la lumière de notre existence*

*L'étoile brillante de notre réjouissance Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal*

*Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal Espérant des lendemains épiques*

*Un avenir glorieux et magique Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis*

*Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri Aujourd'hui,*

*Ici rassemblés auprès des jurys, Nous prions dieu*

*Que cette soutenance Fera signe de persévérance*

*Et que nous serions enchantés*

*Par notre*

*Travail*

*Honoré*



Liste des figures :

figures	Titre	Page
<b>Chapitre 01 : Generalites Et Semilations Des Cellules Photovoltaïque</b>		
<b>Figure 1.1</b>	<i>Cellule photovoltaïque</i>	<b>03</b>
<b>Figure 1.2</b>	<i>Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire</i>	<b>04</b>
<b>Figure 1.3</b>	<i>Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire</i>	<b>05</b>
<b>Figure 1.4</b>	<i>Caractéristique tension-puissance d'une cellule solaire</i>	<b>06</b>
<b>Figure 1.5</b>	<i>Influence de l'éclairement sur la caractéristique de la cellule</i>	<b>07</b>
<b>Figure 1.6</b>	<i>Influence de la température sur la caractéristique de la cellule</i>	<b>08</b>
<b>Figure 1.7</b>	<i>Principe d'une cellule photovoltaïque</i>	<b>09</b>
<b>Figure 1.8</b>	<i>Courbe d'une photopile débitant sur une charge R et une charge optimale</i>	<b>10</b>
<b>Figure 1.9</b>	<i>Groupement des cellules en série</i>	<b>11</b>
<b>Figure 1.10</b>	<i>Groupement des cellules en parallèle</i>	<b>12</b>
<b>Figure 1.11</b>	<i>Module photovoltaïque</i>	<b>13</b>
<b>Figure 1.12</b>	<i>Composantes d'un générateur photovoltaïque</i>	<b>14</b>
<b>Figure 1.13</b>	<i>Protection des cellules solaires par diodes (by-pass) et de (blocage)</i>	<b>15</b>
<b>Figure 1.14</b>	<i>Schéma bloc du GPV</i>	<b>19</b>
<b>Figure 1.15</b>	<i>Caractéristique résultats de simulation: (b) Caractéristique P-V pour différents éclairagements. (C) Caractéristique P-V pour différente température.</i>	<b>20</b>
<b>Chapitre 02 : Modélisation de la MAS + Onduleur MLI</b>		
<b>Figure 2.1</b>	<i>Section montre un moteur asynchrone</i>	<b>25</b>
<b>Figure 2.2</b>	<i>Règle des trois doigts de la main droite</i>	<b>26</b>
<b>Figure 2.3</b>	<i>Stator</i>	<b>27</b>
<b>Figure 2.4</b>	<i>Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant.</i>	<b>28</b>
<b>Figure 2.5</b>	<i>Rotor</i>	<b>29</b>

<b>Figure 2.6</b>	<i>Onduleur de tension triphasé</i>	<b>29</b>
<b>Figure 2.7</b>	<i>Principe de la MLI</i>	<b>31</b>
<b>Figure 2.8</b>	<i>Représentation schématique d'une machine Asynchrone</i>	<b>33</b>
<b>Figure 2.9</b>	Transformation des enroulements réels en Enroulements équivalents	<b>34</b>
<b>Figure 2.10</b>	<i>schéma bloc MAS sans onduleur</i>	<b>38</b>
<b>Figure 2.11</b>	<i>schéma bloc MAS avec onduleur</i>	<b>39</b>
<b>Figure 2-12</b>	<i>Allure du courant à vide</i>	<b>40</b>
<b>Figure 2-13</b>	<i>Allure du couple à vide</i>	<b>40</b>
<b>Figure 2-14</b>	<i>Allure de la vitesse à vide</i>	<b>41</b>
<b>Figure 2-15</b>	<i>Allure du courant en charge</i>	<b>41</b>
<b>Figure 2-16</b>	<i>Allure du couple en charge</i>	
<b>Figure 2-17</b>	<i>Allure de la vitesse en charge</i>	
<b>Chapitre 03 : Couplage du moteur asynchrone par un panneau photovoltaïque</b>		
<b>Figure 3.1</b>	<i>Schéma bloc du GPV</i>	
<b>Figure 3.2</b>	<i>schéma bloc de MAS avec onduleur</i>	
<b>Figure 3.3</b>	<i>Bloc de simulation de l'alimentation de la MAS</i>	
<b>Figure 3.4</b>	<b>(a,b,c,d,e) :Résultat de simulation de l'alimentation (GPV)-Onduleur-MAS en état sain lors d'une Application d'un couple résistant (<math>C_r = 15N.m</math>) à (<math>t=1.4 s</math>)</b>	
<b>Chapitre 04 : Methode du Maximum Power Point Tracking (MPPT)</b>		
<b>Figure 4.1</b>	<i>Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque</i>	
<b>Figure 4-2</b>	<i>Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale</i> <b>a) suite à une variation d'ensoleillement.</b> <b>b) suite à une variation de charge.</b> <b>c) suite à une variation de température.</b>	
<b>Figure 4.3</b>	<i>Caractéristique <math>P_{PV}</math> (<math>V_{PV}</math>) d'un panneau solaire.</i>	

<b>Figure 4.4</b>	<i>représentation de l'algorithme classique</i>	
<b>Figure 4.5</b>	<i>Divergence de la commande P&amp;O lors de variations d'irradiation</i>	

**Liste des tableaux:**

<b>tableaux</b>	<b>titre</b>	<b>page</b>
<b>Chapitre 01 : Generalites Et Semilations Des Cellules Photovoltaïque</b>		
<b>Tableau 1.1</b>	<i>Nomenclature des paramètres</i>	
<b>Tableau 1.2</b>	les paramètres de simulation de cellule	
<b>Chapitre 02 : Modélisation de la MAS + Onduleur MLI</b>		
<b>Tableau 2.1</b>	<i>paramètres de la machine asynchrone</i>	



---

**SOMMAIRE**

Introduction générale	01
<b>Chapitre 01 : Généralités Et Simulations Des Cellules Photovoltaïque</b>	
1.1 Introduction	02
1.2 Cellule photovoltaïque	03
1.2.1 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque $I=f(v)$	04
1.2.2 Influence de l'éclairement	06
1.2.3 Influence de la température	07
1.2.4 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	08
1.3 Association des cellules	10
1.3.1 Association de cellules photovoltaïques en série	10
1.3.2 Association de cellules photovoltaïques en parallèle	11
1.4 Module photovoltaïque	12
1.5 Générateur Photovoltaïque	13
1.6 Protection des générateurs photovoltaïques	14
1.7 Modélisation du générateur photovoltaïque	15
1.8 Simulation du générateur photovoltaïque	19
1.9 Conclusion	21
<b>Chapitre 02 : Modélisation de la MAS + Onduleur MLI</b>	
2.1 Généralité	22
2.2 Principe de fonctionnement	22
2.2.1 Stator	24
2.2.2 Rotor	25
2.3 Convertisseur statique (Onduleur)	26
2.3.1 Modélisation de l'onduleur triphasé	26
2.3.2 Modulation de l'arguer d'impulsion (MLI)	27
2.4 Moteur asynchrone	29
2.4.1 Modélisation du moteur asynchrone	29
2.4.1.1 Hypothèse simplificatrices	29

---

---

2.4.1.2 Equations des tensions et des flux en grandeurs de phase	29
2.4.1.3 Transformation de Park	31
2.4.1.4 Application de la transformation de Park	32
2.4.1.4.1 Equation de tension	32
2.4.1.4.2 Equation du flux	32
2.4.1.5 Modèle mathématique de la machine asynchrone	33
2.5 Filtre d'entrée	33
2.6 Validation du modèle par simulation	34
2.7 paramètres de la machine asynchrone	34
2.8 Schémas bloc de la MAS sans onduleur et avec onduleur	35
2.9 Simulation du système à vide	36
2.10 Simulation du système en charge	38
2.11 Interprétation des résultats	39
2.12 Conclusion	40
<b>Chapitre 03 : Couplage du moteur asynchrone par un panneau photovoltaïque</b>	
3.1 Introduction	41
3.2 Schéma de Simulation du comportement du système	42
3.3 Interprétation des courbes	46
3.4 Conclusion	47
<b>Chapitre 04 : Methode du Maximum Power Point Tracking (MPPT)</b>	
4.1 Généralités	48
4.1.1 Commandes MPPT à algorithmes performants	51
4.1.2 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)	51
4.2 Conclusion	57
Conclusion générale	58

---

---

## Introduction Générale

Le domaine des énergies renouvelables revêtira une importance capitale aussi-bien pour l'économie du pays que pour l'émancipation socio-culturelle de la population et pour leurs besoins énergétiques dans les régions les plus reculées et isolées. Elles seront appelées à jouer un rôle de premier plan dans le processus national de développement.

Une installation photovoltaïque réussie passe d'abord par une démarche d'économie d'énergie, puis par une conception et une installation rigoureuse avec des composants (panneaux solaire, batteries, régulateur et autre...) qui répondant au besoin et tiennent leur promesses. Pour aider les professionnels à atteindre ce résultat. Ce travail étudie le régime dynamique d'un système photovoltaïque basé sur le couplage d'un moteur asynchrone par un panneau photovoltaïque.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres :

- Chapitre 01 : résume la conversion photovoltaïque ou traite le principe de la conversion photovoltaïque et les caractéristiques du module solaire (schéma équivalent, caractéristique (I-V) et la protection du module. Et après, l'influence de l'éclairement et la température sont distingués.
- Chapitre 02 : Le deuxième chapitre sera consacré à un exposé détaillé de la modélisation de l'association convertisseur statique-moteur asynchrone commandé par les stratégies de la modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- Chapitre 03 : est consacré à l'étude du régime transitoire, consiste à coupler le groupe moteur directement avec le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/AC(Onduleur).
- Chapitre 04 : dans ce chapitre on présentera la méthode d'optimisation des générateurs photovoltaïques (Méthode du Maximum Power Point Tracking MPPT).

En fin nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

## 1.1 Introduction :

La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques, selon un processus appelé couramment effet photovoltaïque [1]. L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque ayant une caractéristique courant-tension non linéaire et présente un point de puissance maximal. Dans ce chapitre, nous allons présenter un bref rappel sur les semi-conducteurs, on présentera la cellule photovoltaïque ainsi que l'influence des paramètres météorologiques sur la caractéristique de la cellule, nous allons également nous intéresser au fonctionnement de la cellule, l'association des cellules en série et en parallèle pour former le générateur photovoltaïque.

## 1.2 Cellule photovoltaïque :

Appelé aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la cellule [8]. La plus répandue est à base de silicium monocristallin, un certain nombre d'autres matériaux et de structures font l'objet d'efforts de recherche considérables visant à découvrir et à mettre au point des solutions nouvelles pour obtenir des cellules à base de sulfure de cadmium, du silicium amorphe, de l'arséniure de gallium [1].

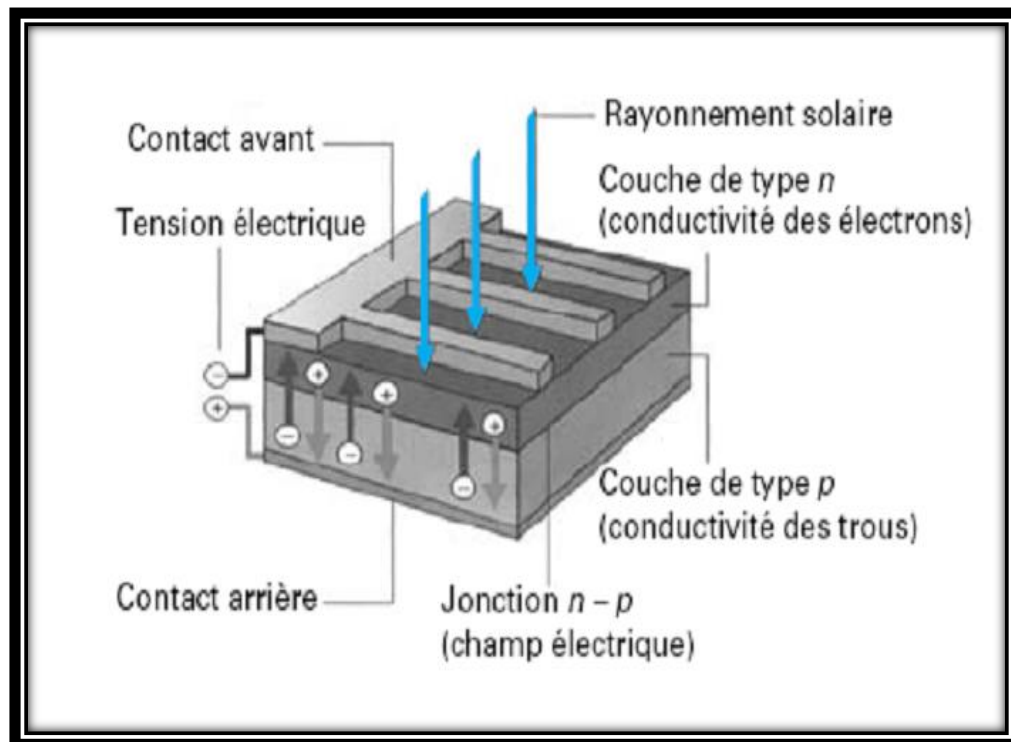


Figure 1.1 : Cellule photovoltaïque [8].

### 1.2.1 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque $I=f(v)$ :

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque est donné par l'équation suivante :

$$I(v) = I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{q(v+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

Ou :

- $I_0$  : Courant de saturation de la jonction.
- $T$  : Température de la jonction °K.
- $I_{SC}$  : Courant de court circuit ou photo courant. Il est proportionnel à l'éclairement.
- $R_s$  : Resistance série de la jonction.
- $n$  : Facteur d'idéalité.
- $k$  : Constante de Boltzmann.
- $q$  : Charge de l'électron.

La cellule est donc équivalente à un générateur de courant de valeur  $I_{SC}$  induit par le flux lumineux, shunté par une diode représentant la jonction PN du semi-conducteur figure (1.2) [2]. La caractéristique courant-tension ainsi que la caractéristique puissance-tension de la cellule sont illustrées dans la figure (1.3) et figure (1.4) respectivement.

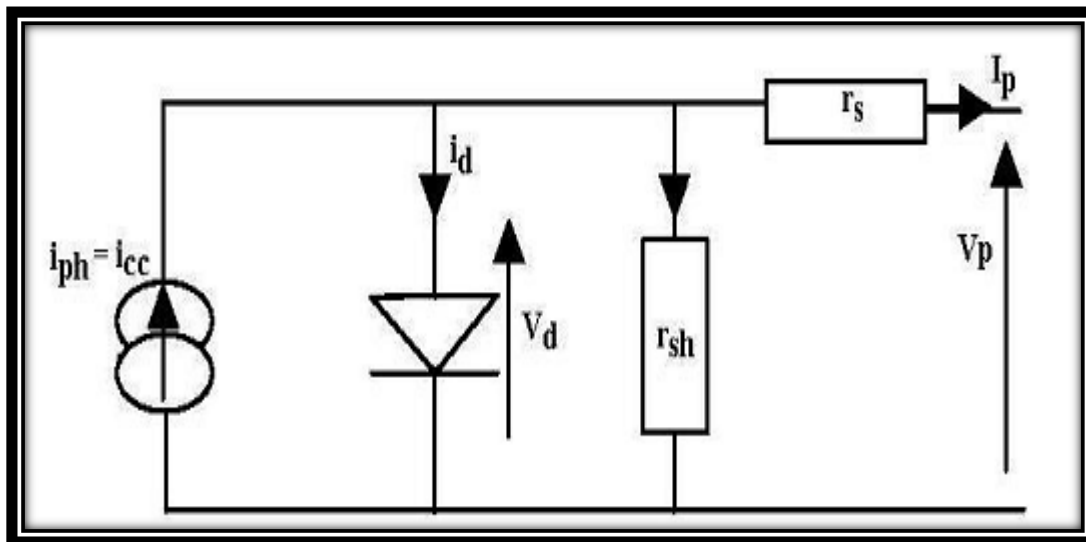


Figure 1.2: Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire [7].

$I_{PH}$  : Générateur.

$I_P$  : Courant de photopile.

$I_d$  : courant qui traverse la diode.

$V_d$  : Tension qui traverse la diode .

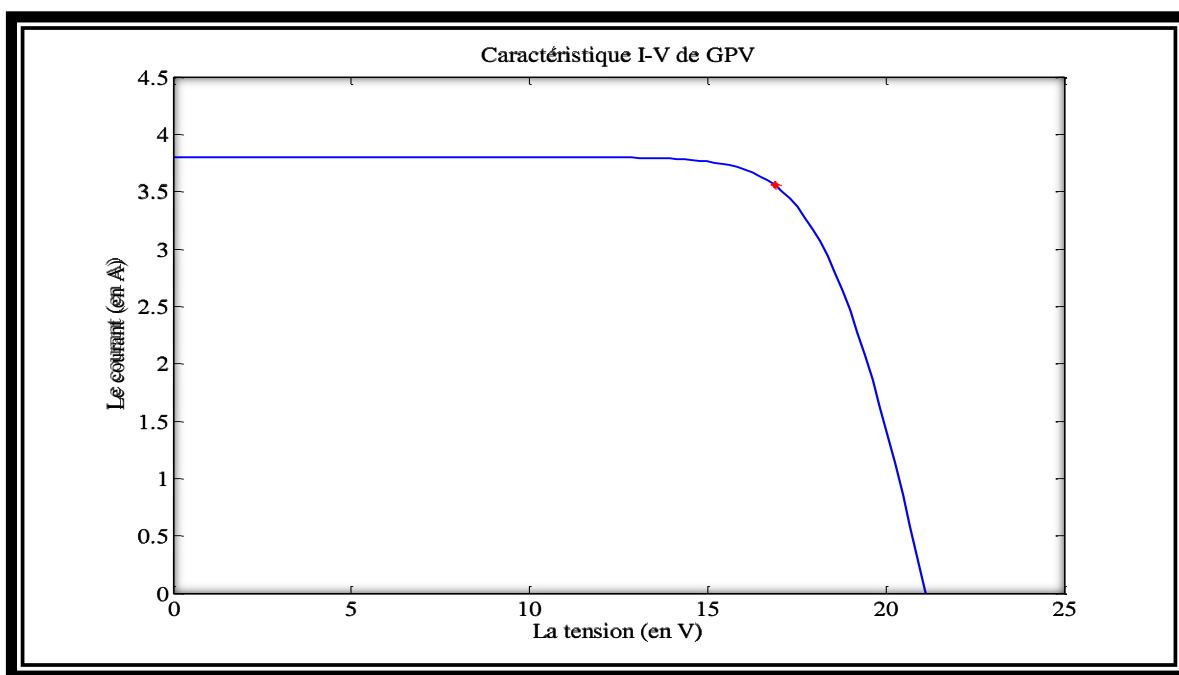
$V_{sh}$  : Résistance en série.

$V_s$  : Résistance en parallèle.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est égal à :

$$\eta = 1 \frac{p_m}{p_i} \quad (1.2)$$

Où  $p_i$  est la puissance solaire incidente,  $p_m$  puissance maximale de la cellule



**Figure 1.3 :** Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire [9].

La caractéristique courant-tension passe par trois points importants :

- Le point  $V_{OC}$ : tension de circuit ouvert.
- Le point  $I_{EC}$ : : courant de court-circuit.
- Le point MPP (maximum power point) point de puissance maximale PPM

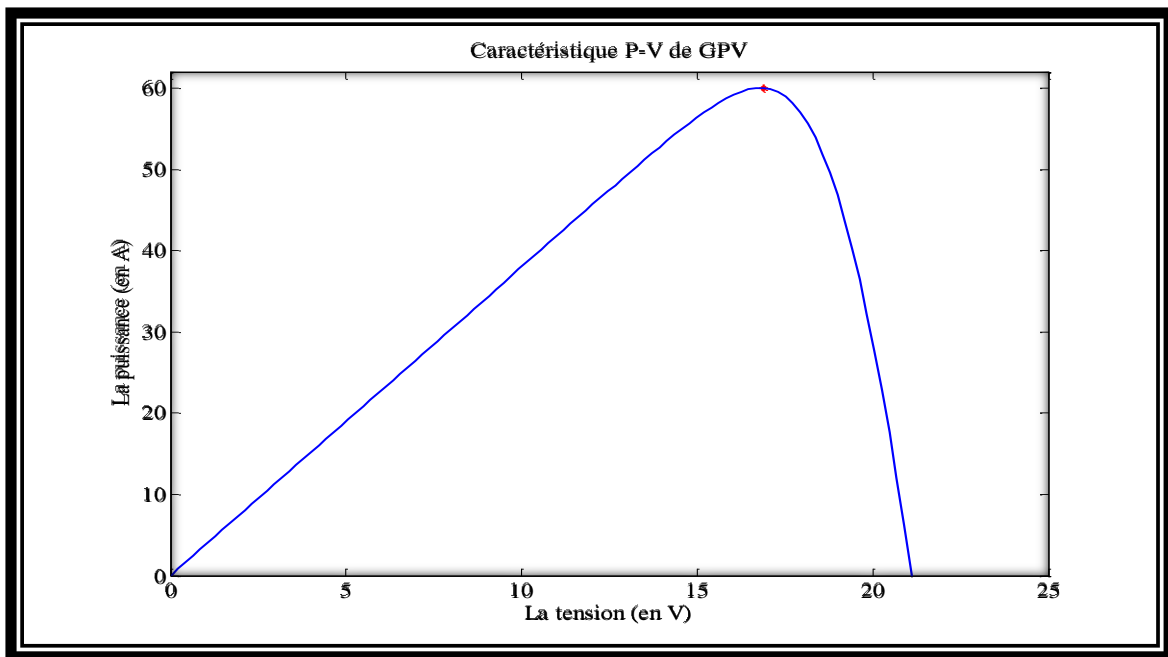
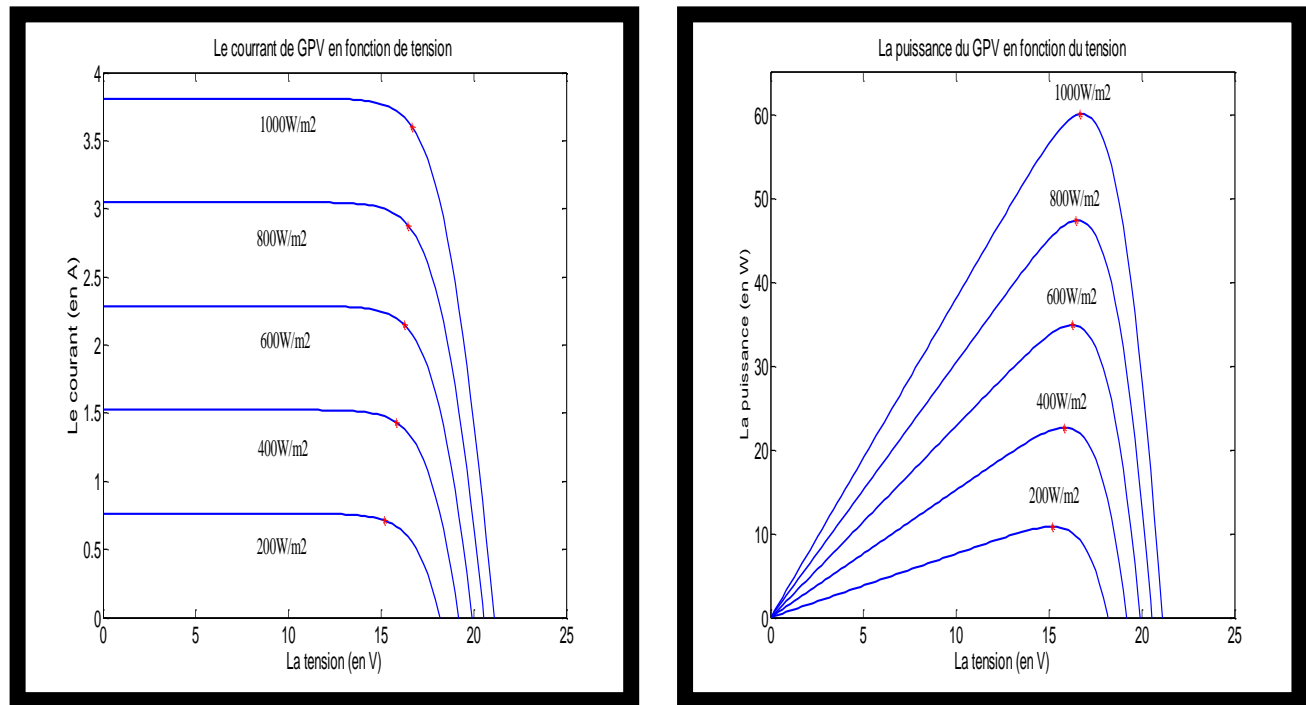


Figure 1.4: Caractéristique tension-puissance d'une cellule solaire [9].

### 1.2.2. Influence de l'éclairement :

Le courant produit par la photopile  $I_{ph}$  est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire. Par contre, la tension  $V$  aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction P-N du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux [7]. Ceci implique donc que :

- la puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension. (voir figure (1.5)).



**Figure 1.5 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique de la cellule [7].

### I.2.3. Influence de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement d'une cellule solaire, exposée à une irradiation de  $1\text{KW}/\text{m}^2$  elle n'en transforme que 12% en électricité. Si la cellule n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et ses performances électriques peuvent se dégrader. La figure (1.6) montre l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension de la cellule. Lorsque la température augmente, le courant augmente alors que la tension décroît. Cela se traduit par une baisse de la puissance [10].

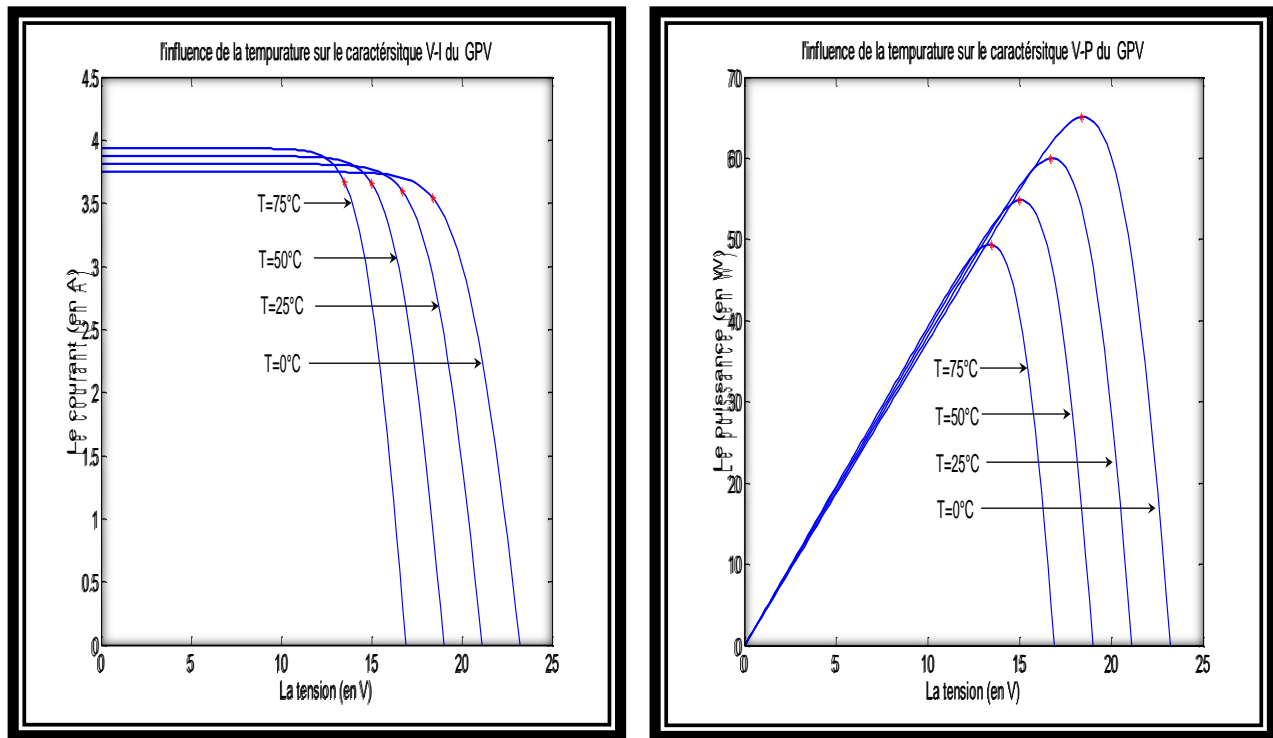


Figure 1.6 : Influence de la température sur la caractéristique de la cellule [7].

#### I.2.4. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Lorsque la cellule est éclairée par une radiation lumineuse d'énergie  $h\nu$  supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur, un couple d'électron-trou est créé, c'est l'effet photovoltaïque. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers les extrémités ce qui va créer une différence de potentiel appelé tension photovoltaïque, Si on place une charge non nulle et non infinie aux bornes de la cellule photovoltaïque (photodiode), on se trouve dans un cas intermédiaire entre la situation en court-circuit et celle du circuit ouvert. Le courant va se répartir entre la charge extérieure et la diode. Il en résultera une tension de travail inférieure à la tension de circuit ouvert, la figure 1.7 présente le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

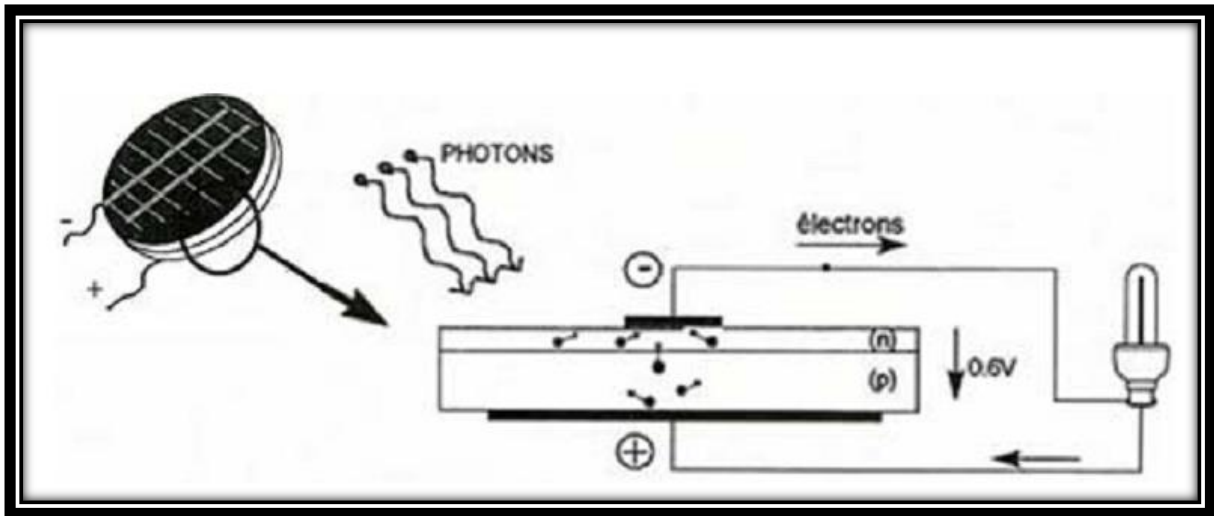


Figure 1.7 : Principe d'une cellule photovoltaïque

Une caractéristique fondamentale des photodiodes est que pour une irradiation et une température données, elles n'imposent ni le courant ni la tension de fonctionnement. Seule la courbe  $I=F(v)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes de la photodiode qui va déterminer le point de fonctionnement. La figure (1.8) montre en particulier que fermée sur une charge de résistance  $R$ , la cellule ne cèdera qu'une puissance  $P$  bien inférieure à la puissance optimale  $p_{op}$  qu'elle pourrait débiter [10].

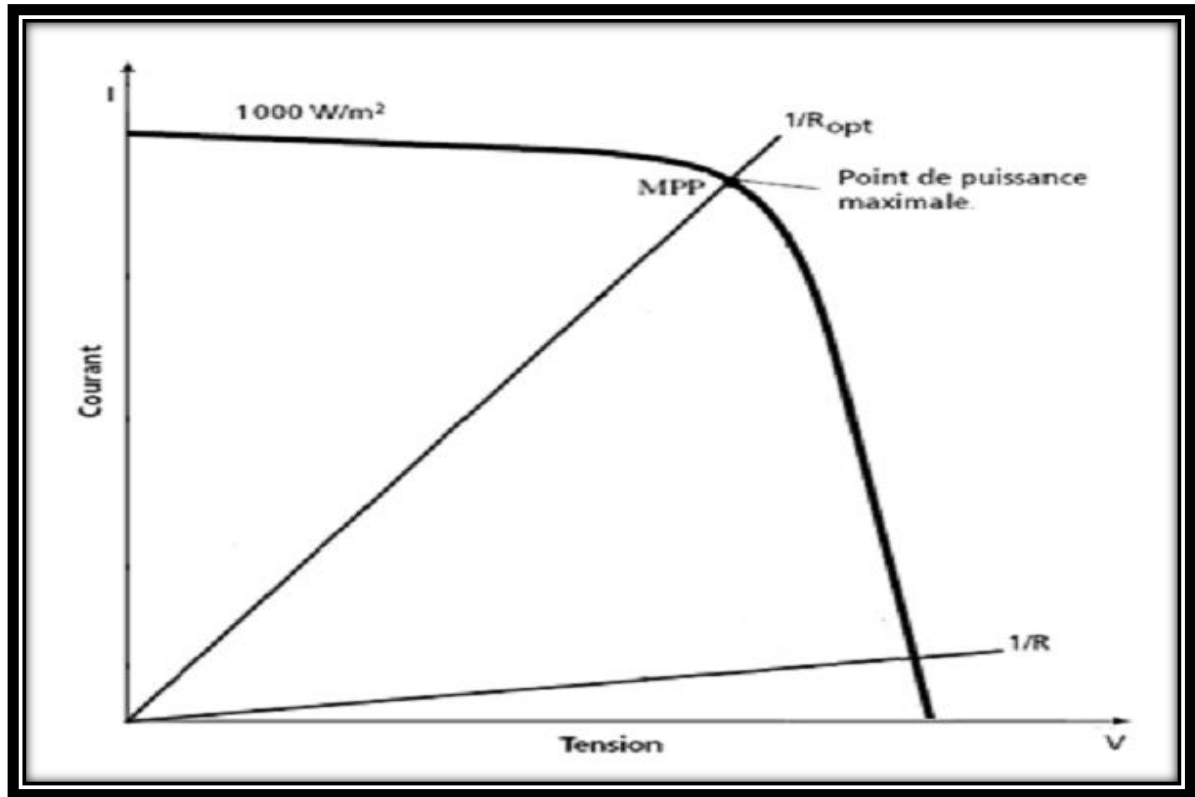


Figure 1.8 : Courbe d'une photopile débitant sur une charge  $R$  et une charge optimale  $R_{op}$  [9].

### 1.3 Association des cellules :

#### 1.3.1 Association de cellules photovoltaïques en série :

La tension générée par une photopile est limitée à la valeur du gap du matériau duquel elle est issue. Pour obtenir une tension compatible, on doit assembler les photopiles en série. Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La caractéristique  $I=f(v)$  est homothétique de celle de la cellule de base. La figure (1.9) présente la caractéristique du groupement [10].

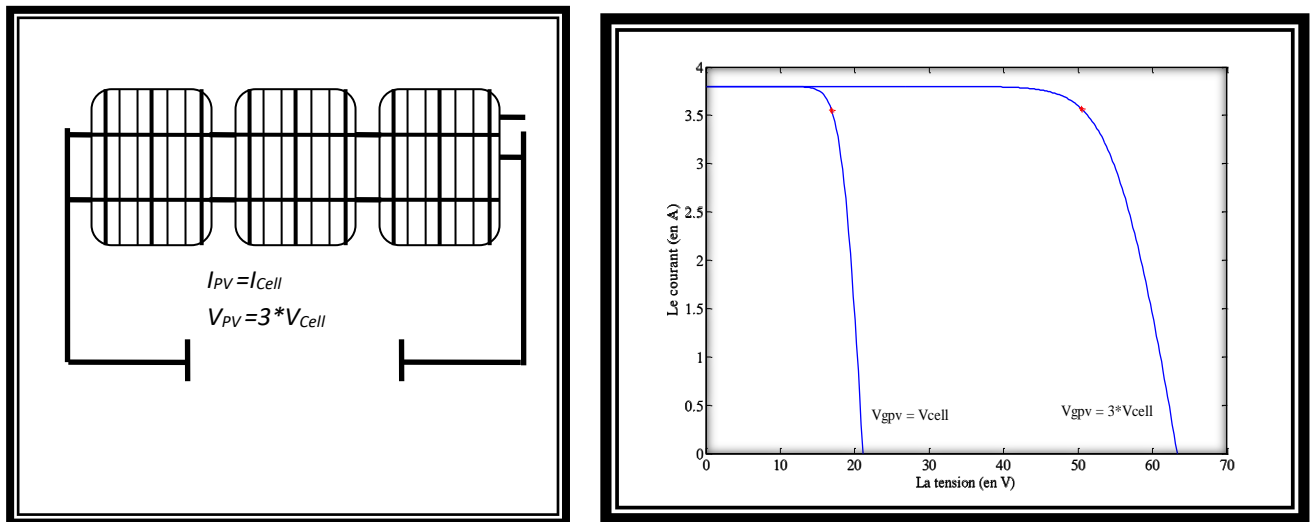


Figure 1.9 : Groupement des cellules en série [7].

### 1.3.2 Association de cellules photovoltaïques en parallèle :

Dans ce cas c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutent, la caractéristique du groupement est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de la tension, le courant de la cellule élémentaire par le nombre de cellule en parallèle. La figure (1.10) présente la caractéristique du groupement [10].

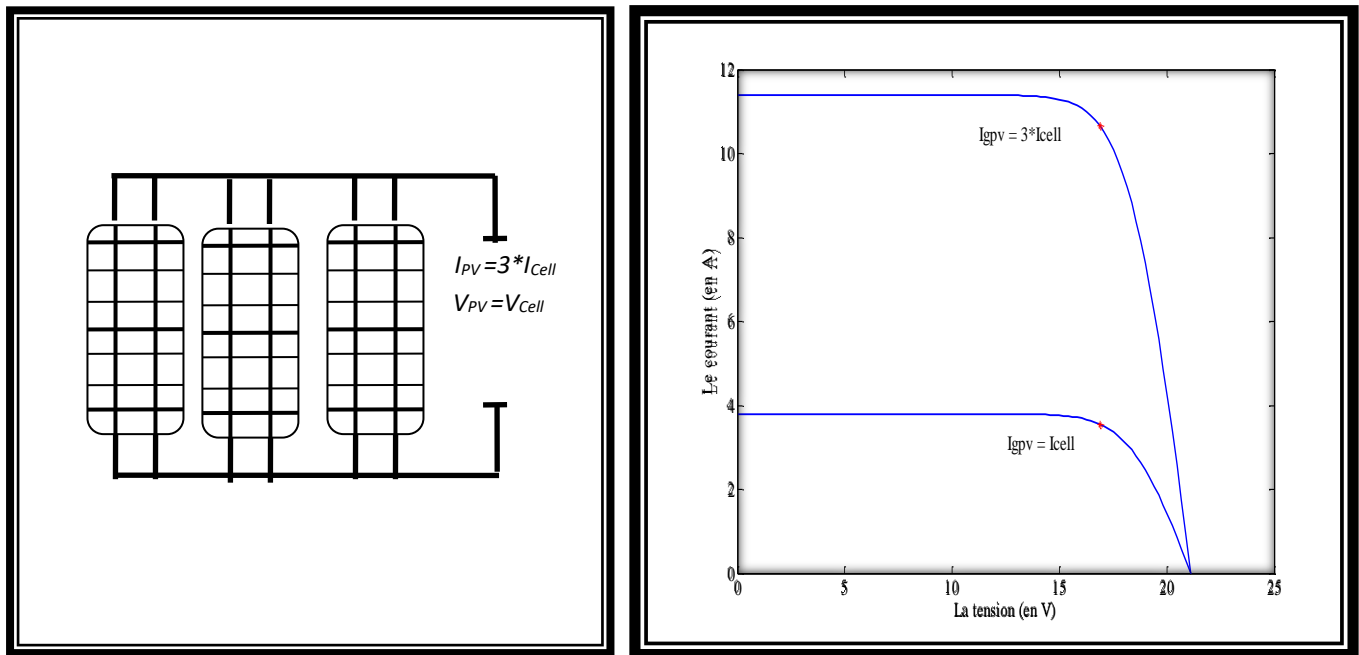
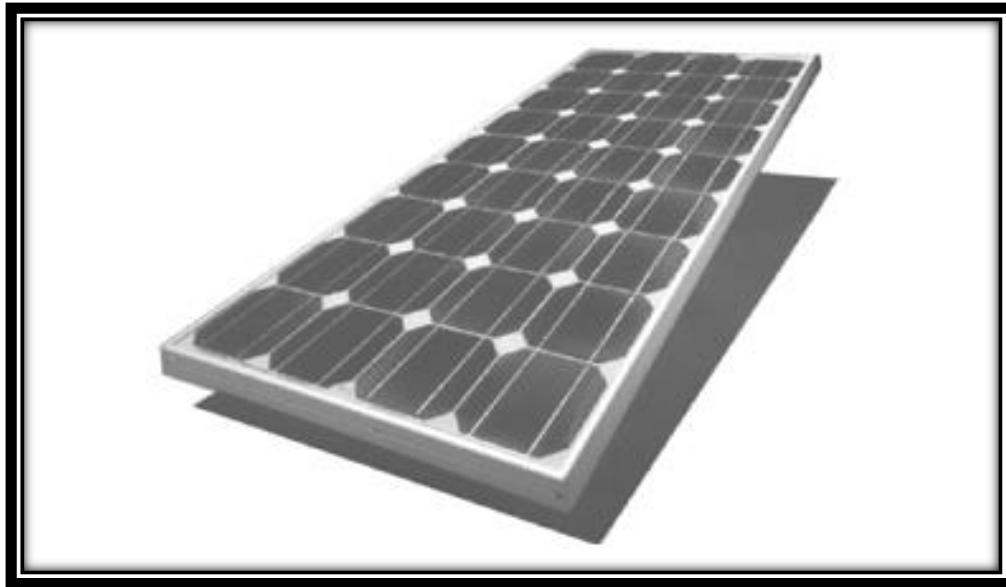


Figure 1.10 : Groupement des cellules en parallèle [7]

#### 1.4 Module photovoltaïque :

Les cellules individuelles sont assemblées en montage en série (les tensions s'additionnent, figure (1.9)) ou en parallèle (les courants s'additionnent, figure(1.10)). On réalise ainsi des modules photovoltaïques. Les cellules sont triées par le fabricant afin qu'elles aient à peu près toutes les mêmes caractéristiques et pour éviter que la plus mauvaise cellule, c'est-à-dire celle de résistance série la plus élevée, ne détermine les performances de l'ensemble [11].



**Figure 1.11 :** *Module photovoltaïque [9].*

### 1.5 Générateur Photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association en série et en parallèle de modules (ensemble de cellules élémentaires). La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier [8][2].

La figure 1.11 présente un ensemble de module constituant un générateur photovoltaïque.

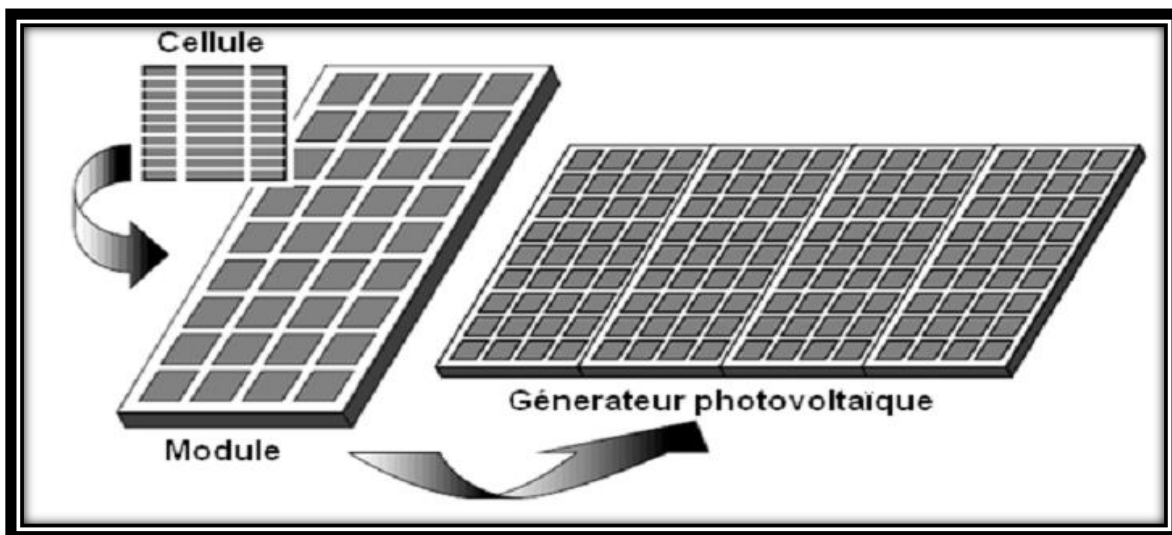


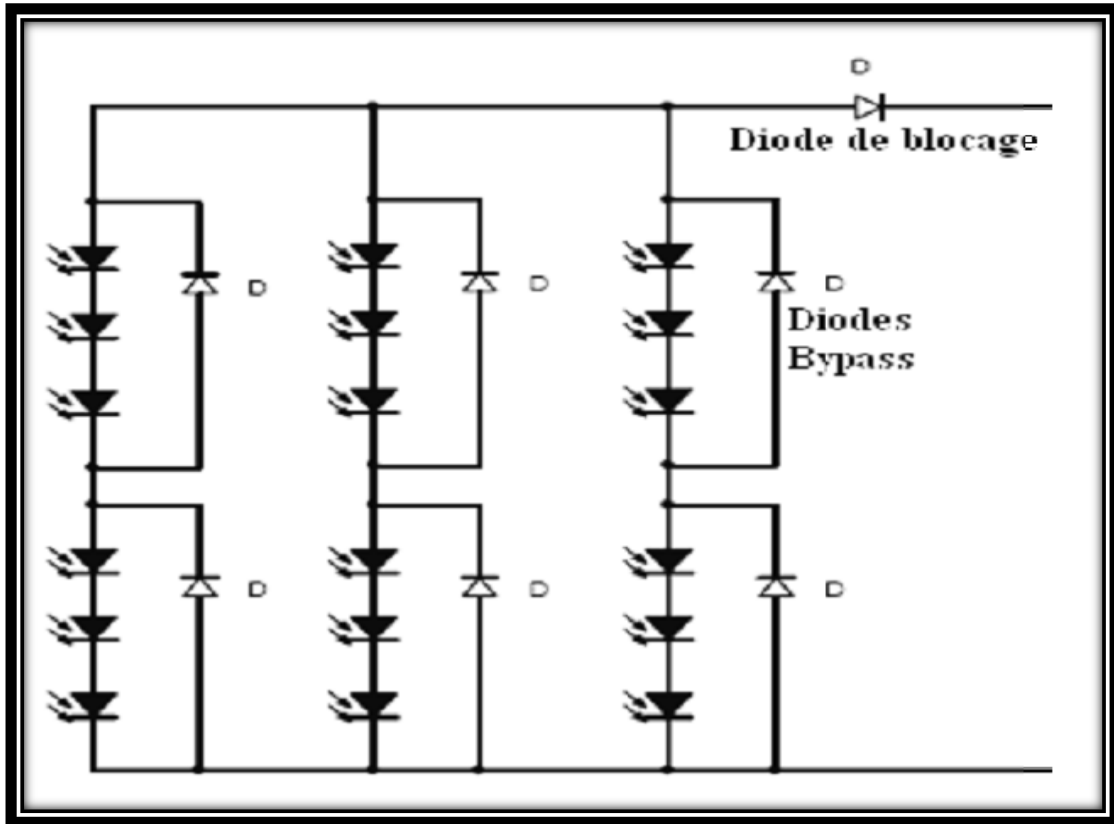
Figure 1.12 : Composantes d'un générateur photovoltaïque [7].

## 1.6 Protection des générateurs photovoltaïques :

Dans la réalité malgré un tri soigneux des cellules et des modules il arrive , d'une part que l'on trouve quelques disparités intrinsèques dans les caractéristiques électriques des modules d'autre part que les conditions de fonctionnement induisent ces disparités

Par exemple l'occultation partielle d'une cellule par une feuille morte la transforme immédiatement en un récepteur , une charge électrique résistive , qui au lieu de générer de l'énergie va en recevoir de la part des autres [10].

Pour remédier à ce problème on prend quelques cellules voisines et on les shunt par une diode en parallèle appelée "By-Pass Diode" ces diodes empêchent le courant de passer à travers les cellules dont la tension tombe au-dessous de seuil de la diode en série avec chaque module pour éviter le retour du courant des autres modules montés en parallèle lorsqu'un module est mal ensoleillé.



**Figure 1.13 :** Protection des cellules solaires par diodes (by-pass) et de blocage [10].

### 1.7 Modélisation du générateur photovoltaïque :

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles du générateur photovoltaïque. Ces modèles décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque sous différentes conditions de fonctionnement. La différence entre ces modèles se situe dans la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la caractéristique tension-courant.

Le modèle à développer dans ce chapitre nécessite la connaissance de sept données et définit trois points de la courbe  $I = f(v)$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ , et le point de puissance maxima PPM [2]. L'expression du courant est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_{sc} \left[ 1 - C_1 \left( e^{\frac{v}{c_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right] \quad (1.3)$$

Où  $C_1$  et  $C_2$  sont deux constantes données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) e^{\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}}} \\ C_2 = \frac{\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1}{\text{LOG}\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)} \end{array} \right. \quad (1.4)$$

L'équation (2.1) représente l'équation de la caractéristique  $I - V$  de la cellule à une température et à un éclairement de référence, par exemple  $25^\circ C$  et  $1 \text{ KW}/m^2$  .

Si l'éclairement et la température varient le point  $V_{ref}$  et  $I_{ref}$  de la courbe de référence se translate en un autre point ( $V_n$  et  $I_n$ ) .

tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta I = \alpha \left(\frac{L}{L_{ref}}\right) \Delta T + \left(\frac{L}{L_{ref}} - 1\right) I_{sc} \\ \Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \end{array} \right. \quad (1.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_n = V_{ref} + \Delta V \\ I_n = I_{ref} + \Delta I \end{array} \right. \quad (1.6)$$

La courbe définie par l'équation (2.1) se translate elle aussi et sera définie par l'équation :

$$I_n(V_n) = I(V_n - \Delta V) + \Delta I \quad (1.7)$$

$$I = I_{sc} \left[ 1 - c_1 \left( e^{\frac{V - \Delta V}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right] + \Delta I \quad (2.6)$$

## - Nomenclature des paramètres :

nomenclature	Paramètres	Unite
$\alpha$	Coefficient de température du courant	$A/^{\circ}C$
$\beta$	Coefficient de température de la tension	$A/^{\circ}C$
$C_1, C_2$	Constantes	/
$I$	Courant	A
$I_{pm}$	Courant à puissance maximale	A
$I_{sc}$	Courant de court-circuit	A
$L = E$	Éclairement	$KW/m^2$
$L_{ref}$	Eclairement de référence	$KW/m^2$
$R_s$	Résistance série	ohms
$T = T_j$	Température de la cellule	( $^{\circ}C$ ).
$T_{ref}$	Température de référence de la cellule	( $^{\circ}C$ ).
$\Delta T$	Variation de la température de la cellule	( $^{\circ}C$ ).
$V$	Tension	V
$V_{mp}$	Tension à puissance maximale	V
$V_{0c}$	Tension de circuit ouvert	V

**Tableau 1.1** : Nomenclature des paramètres

Les figures (2.2, 2.3, 2.4) montrent les résultats de simulation du modèle de cellule SOLAREX SX 110 (module de 40 cellules en série) dont les paramètres sont :

nomenclature	Le valeur
$V_{oc}$	22,25 V .
$I_{sc}$	2,3 A .
$V_{mp}$	17,25 A .
$I_{mp}$	2,1 A .
$\alpha$	0,0025 A/°C
$\beta$	0,096 A/°C .
$R_s$	0,75 $\Omega$ .

**Tableau 1.2** : les paramètres de simulation de cellule

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque composé de  $N_s$  modules en série dans une branche et de  $N_p$  branches en parallèle, seront  $N_s N_p P$  pour la puissance,  $N_s V$  pour la tension,  $N_p I$  pour le courant  $R_s N_s / N_p$  pour la résistance série tel que  $P, V, I, R_s$  sont relatifs au module. Ce qui donne le modèle mathématique du générateur photovoltaïque [10].

### 1.8 Simulation du générateur photovoltaïque :

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont:  $E_s$  ensoleillement dans le plan des modules ( $W/m^2$ ) et  $T_j$  température de jonction de la cellule ( $^{\circ}C$ ). Les deux variables de sortie sont:  $I_G$  courant fourni par le groupe de modules (A) et  $V_G$  la tension aux bornes du groupe de modules (V).

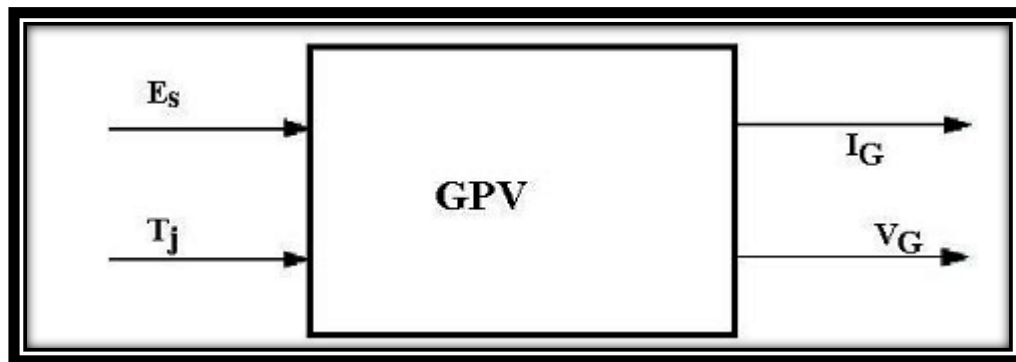


Figure 1.14 : Schéma bloc du GPV

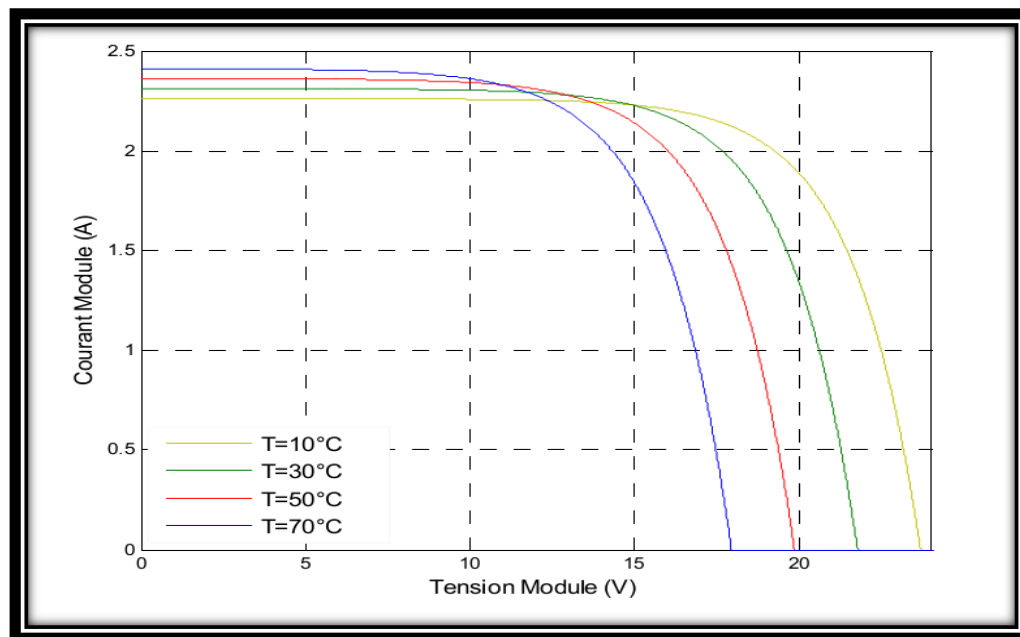
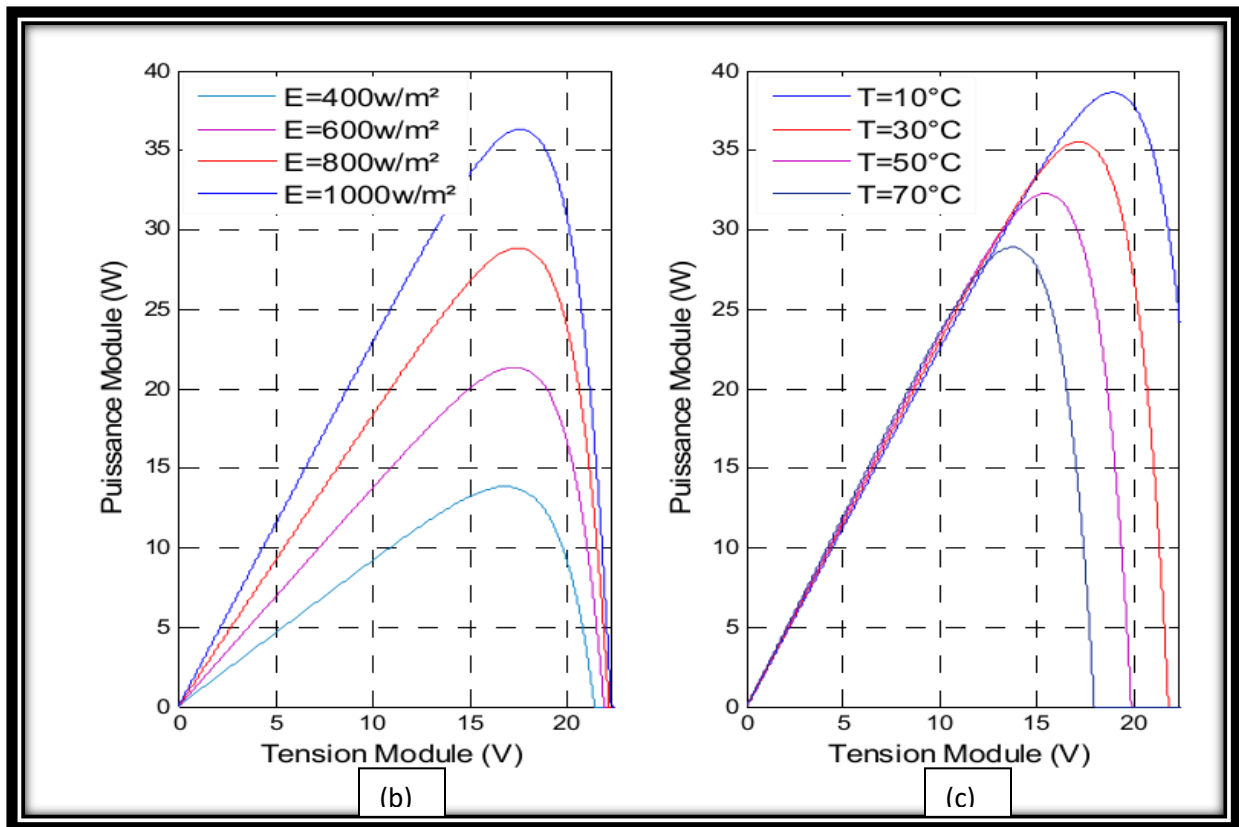


Figure a : Caractéristique I-V pour différentes température.



**Figure 1.15 :** Caractéristique résultats de simulation.

(b) Caractéristique P-V pour différents éclaircements.

(c) Caractéristique P-V pour différente température.

-Interprétation des résultats :

La figure 1.14 présente le schéma bloc du module photovoltaïque, La figure 1.15 donne les résultats de simulation : figure 1.15.a présente la caractéristique I-V pour un E fixe et différente température , figure 1.15.b présente la caractéristique P-V pour différents E, figure 1.15.c présente la caractéristique P-V pour différentes T.

On remarque que pour un fonctionnement optimal on à besoin d'un E élevé et diminuée.

### 1.9 Conclusion :

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, elle présente une caractéristique courant-tension fortement non linéaire, et son rendement dépend des conditions météorologiques (éclairage, température). L'association de cellules en série et en parallèle donne lieu aux générateurs photovoltaïques, qui sont utilisés pour l'alimentation électrique, tels les générateurs qui alimentent le système de pompage photovoltaïque qui fera l'objet du chapitre suivant.

## 2.1 Généralité :

Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge. Le système moteur-varianteur convient bien pour des applications tels que les ascenseurs car on recherche une excellente précision à fois au niveau de la vitesse (confort des utilisateurs) et de la précision de la position de la cabine par rapport aux paliers. Quant au moteur asynchrone seul, sa popularité résulte du peu d'entretien nécessaire, de sa simplicité de construction, de sa standardisation et de sa robuste.

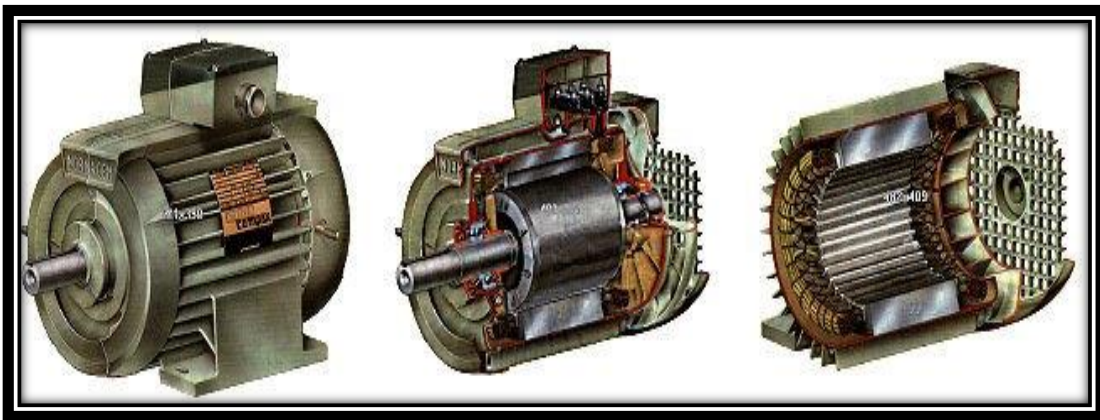
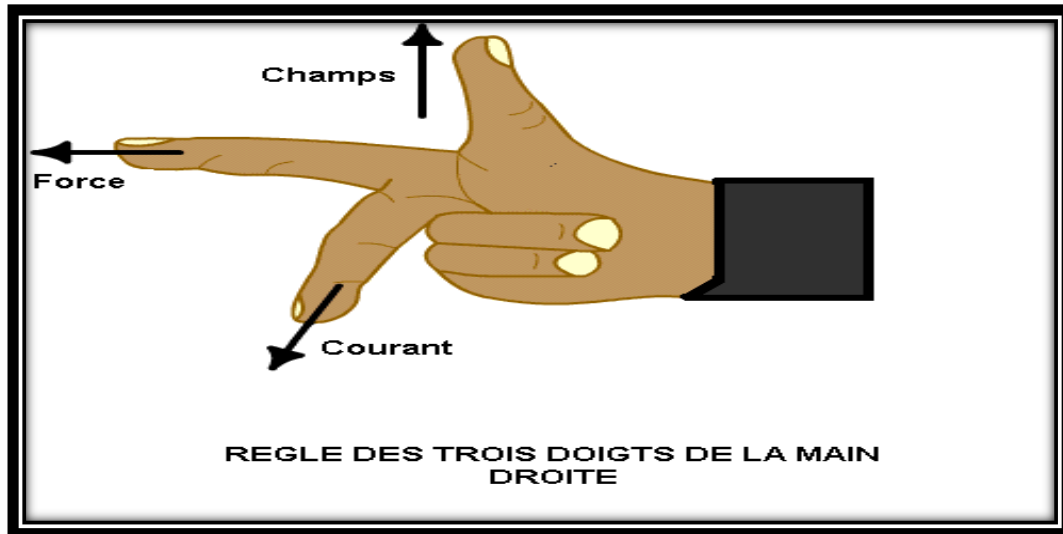


Figure 2.1 : Section montrant un moteur asynchrone

## 2.2 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose : D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux). D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.



**Figure 2.2 :** Règle des trois doigts de la main droite.

Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écurieuil : le moteur électrique est inventé.

Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator.

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît. Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple; intervient ici la notion de glissement.

### 2.2.1 Stator :

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement :

- la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- du ventilateur refroidissant le moteur,
- le capot protégeant le ventilateur.

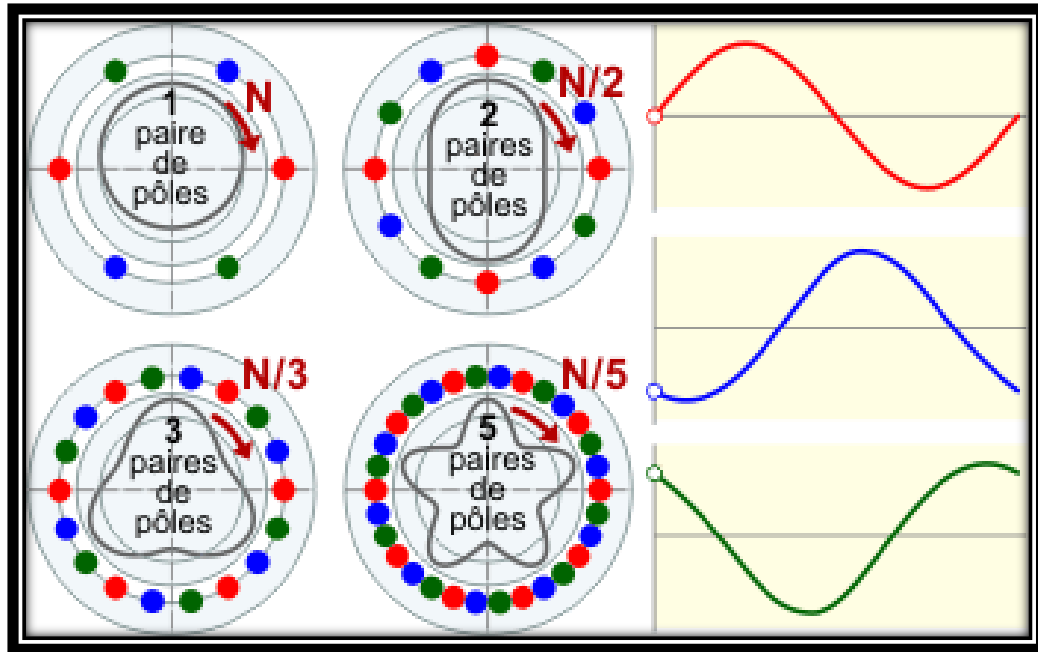


Figure 2.3 : Stator

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de  $120^\circ$  comme le montre le schéma ci-dessous.



**Figure 2.4 :** Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant.

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paires de pôles. Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles.

Paires de pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
$n_0$ [tr/min]	3000	1500	1000	750	500

### 2.2.2 Rotor:

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement:

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.
-

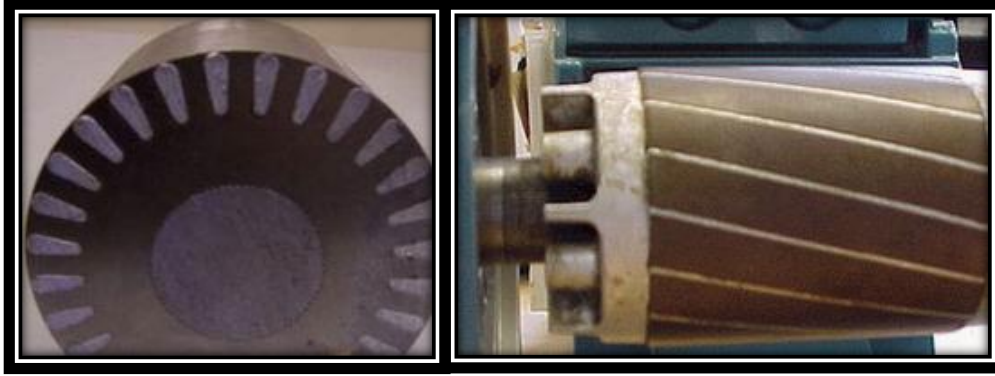


Figure 2.5 : Rotor

### 2.3 Convertisseur statique (Onduleur) :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu alternatif. Le hachage de la tension d'entrée est réalisé grâce à des semi-conducteurs (transistors ou thyristors) utilisés comme commutateurs de puissance.

On peut distinguer deux types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension
- Les onduleurs de courant.

Les premiers sont alimentés par une source de tension, alors que les seconds sont alimentés par une source de courant [14].

#### 2.3.1 Modélisation de l'onduleur triphasé :

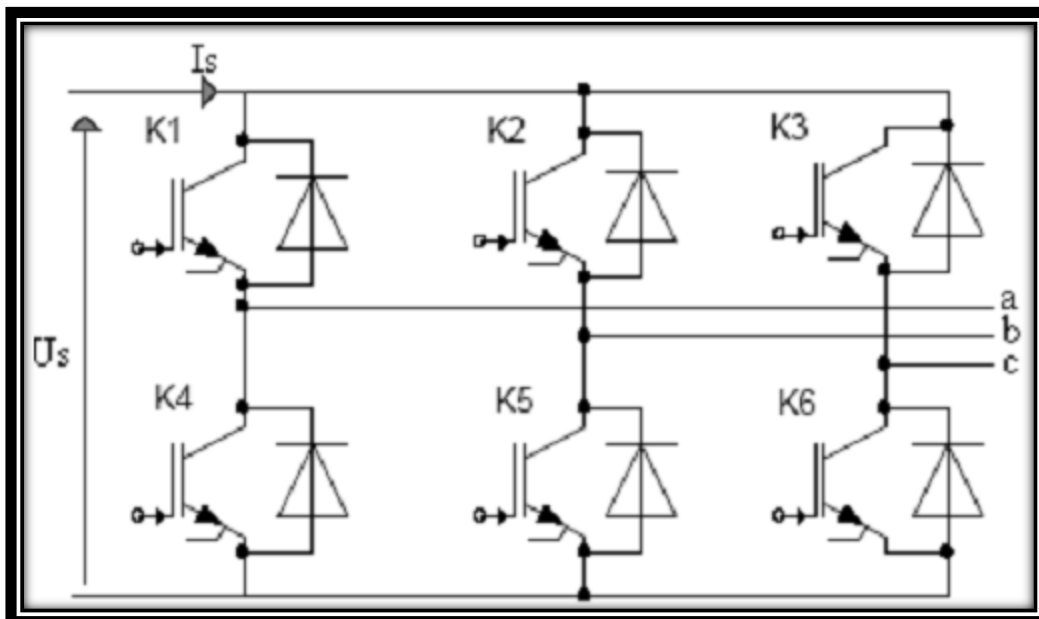


Figure 2.6 : Onduleur de tension triphasé

L'onduleur triphasé est composé de six transistors ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  et  $K_6$ ) Montés en tete beche avec des diodes de récupération.

La commande des transistors d'un bras est complémentaire. Donc on peut remplacer chaque bras de l'onduleur par deux interrupteurs à deux positions.

$$\text{soit } K_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_1 \text{ est ferme et } K_4 \text{ est ouvert .} \\ 0 & \text{si } K_1 \text{ est ouvert et } K_4 \text{ est ferme .} \end{cases} \quad (2.7)$$

Les tensions de sortie composées sont données donc par :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_s (K_1 - K_2) \\ U_{bc} = U_s (K_2 - K_3) \\ U_{ca} = U_s (K_3 - K_1) \end{cases} \quad (2.8)$$

Et les tensions simples sont données par :

$$\begin{aligned} \text{➤ } V_a &= \frac{U_s}{3} (2 K_1 - K_2 - K_3) \\ \text{➤ } V_b &= \frac{U_s}{3} (- K_1 + 2K_2 - K_3) \\ \text{➤ } V_c &= \frac{U_s}{3} (- K_1 - K_2 + 2K_3) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Le courant à l'entrée de l'onduleur est donnée par :

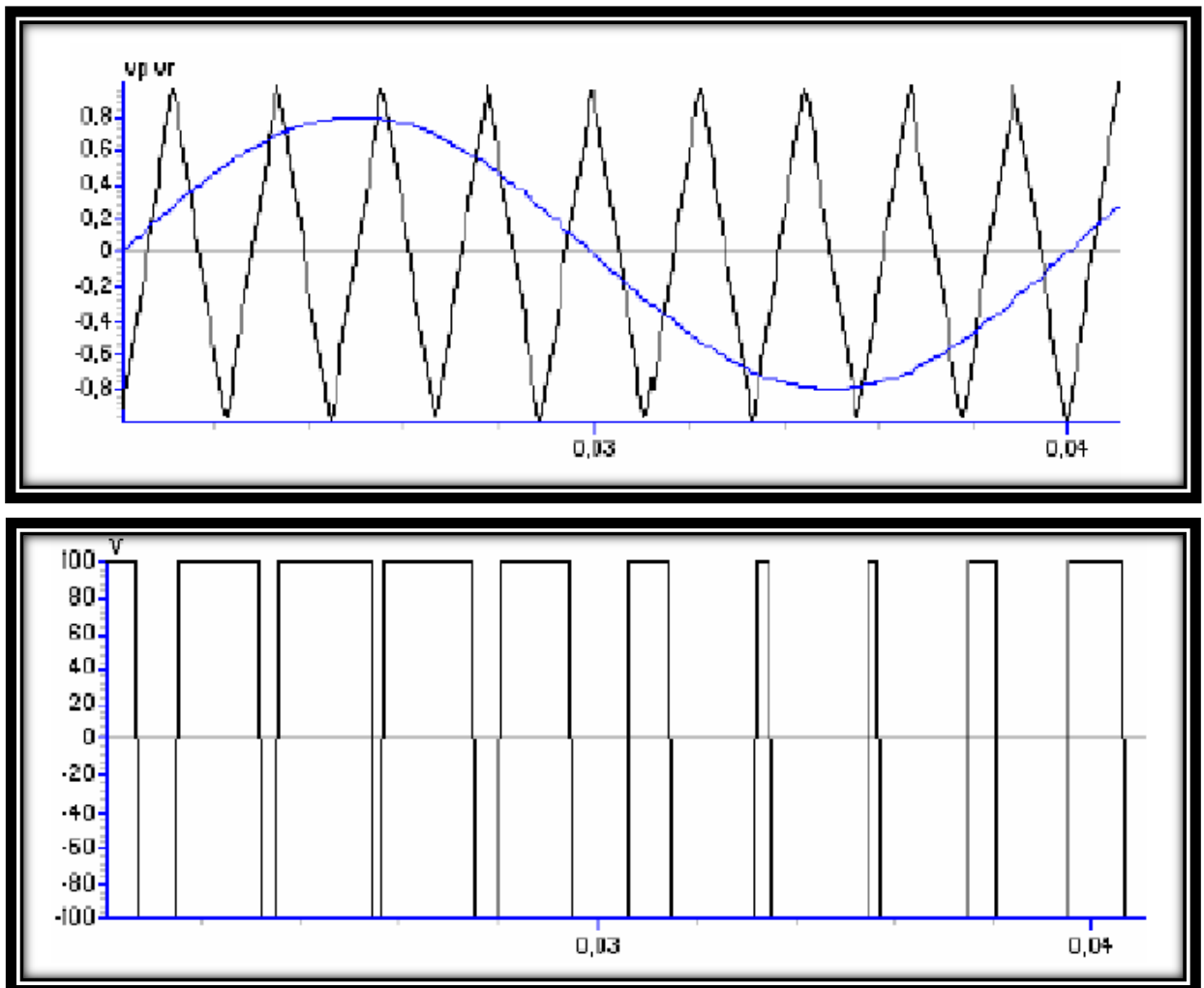
$$\text{➤ } I_s = K_1 i_a + K_2 i_b + K_3 i_c \quad (2.10)$$

### 2.3.2 Modulation de l'arguer d'impulsion (MLI) :

Le principe de la technique MLI consiste à comparer un signal de référence à une porteuse. Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de L'onduleur Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence [14].

La commande de l'onduleur par cette technique permet de générer, par alternance de la tension alternative, une tension composée de plusieurs créneaux de largeurs variables.

Elle permet ainsi, d'obtenir un fondamental de tension variable en amplitude et en fréquence.



**Figure 2.7 :** Principe de la MLI

La technique MLI est caractérisée par :

- L'indice de modulation  $m$  qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse de celle de la référence (modulante).  $m = \frac{f_p}{f_r}$
- L'indice d'amplitude  $r$  qui représente le rapport entre l'amplitude de la référence et celle de la porteuse.  $r = \frac{V_p}{V_r}$

## 2.4 Moteur asynchrone :

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans toutes les applications industrielles ou domestiques de l'électricité, du fait de sa facilité d'installation, de son bon rendement et de son excellente fiabilité [15].

L'utilisation du moteur asynchrone dans les systèmes de pompage photovoltaïque, augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Il est alimenté par un onduleur à partir du générateur photovoltaïque [2].

### 2.4.1 Modélisation du moteur asynchrone :

#### 2.4.1.1 Hypothèse simplificatrices [16] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme en négligeant l'effet de l'encochage ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault peuvent être négligés ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et que l'effet de peau est négligeable.
- La force magnétomotrice créée par chacune des phases du stator et du rotor est à répartition sinusoïdale. Cette hypothèse, jointe à celle de la constance de la perméance de l'entrefer, conduit à des expressions très simples de diverses inductances.
- On suppose la machine bipolaire pour ne pas avoir à distinguer angles géométriques et angles électriques.

#### 2.4.1.2 Equations des tensions et des flux en grandeurs de phase :

Soit une machine asynchrone triphasée représentée schématiquement par la figure (2.8), dont les phases sont repérées respectivement par  $B, C$  et  $a, b, c$ . L'angle électrique  $\theta$  variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétique des phases  $A$  et  $a$  choisi comme axes de référence [17].

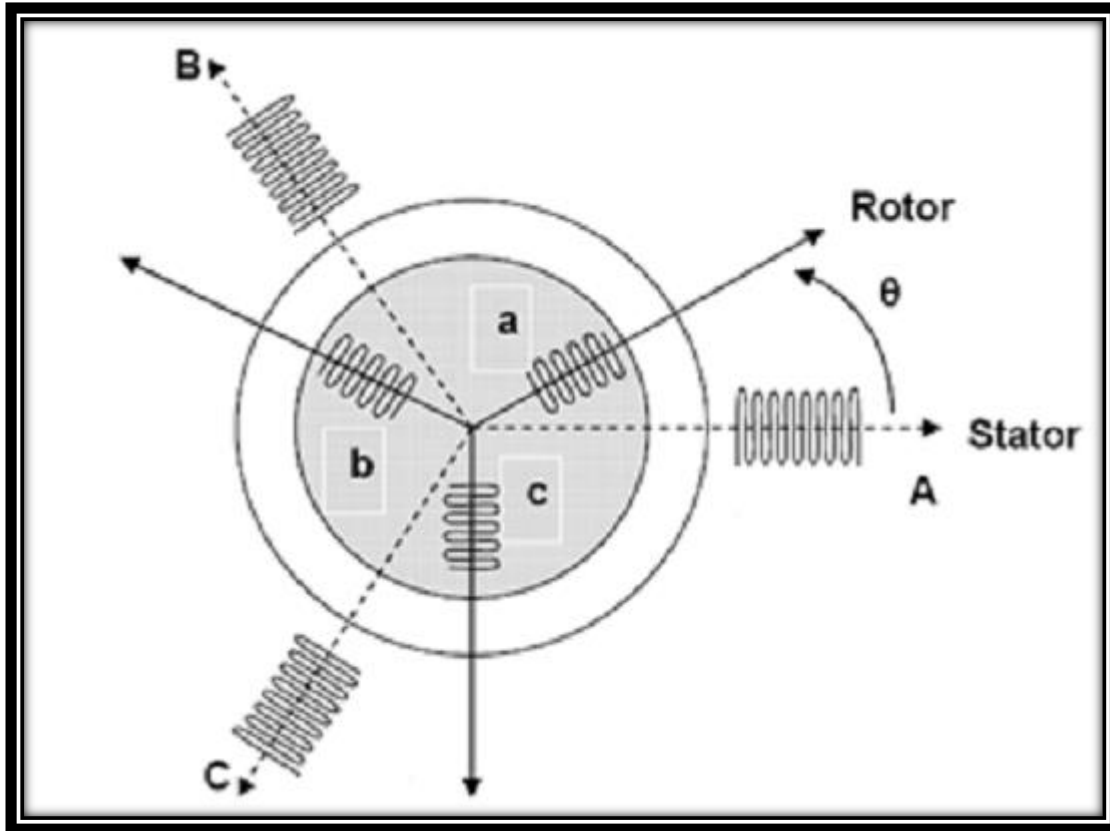


Figure 2.8 : Représentation schématique d'une machine Asynchrone

Sous forme matricielle, on a :

$$[U_{ABC}] = R_s [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{ABC}] \quad (2.11)$$

$$[U_{abc}] = R_r [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{abc}] \quad (2.12)$$

$R_s$ ,  $R_r$  Désignent les résistances par phase du stator et du rotor.

$$[U_{ABC}] = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (2.13) \quad [\Psi_{ABC}] = \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \quad (2.14) \quad [i_{ABC}] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rétorques  $[U_{ABC}]$ ,  $[\Psi_{ABC}]$ ,  $[i_{ABC}]$ .

Les flux totalisés couplés avec les phases rotorique et statoriques s'expriment sous la forme :

$$[\Psi_{ABC}] = [L_s] [i_{ABC}] + [L_{sr}] [i_{abc}] \quad (2.16)$$

$$[\Psi_{abc}] = [L_{sr}]^t [i_{ABC}] + [L_r] [i_{abc}] \quad (2.17)$$

En introduisant (2.11 et 2.12) dans (2.16 et 2.17), on obtient :

$$[\Psi_{ABC}] = R_s [i_{ABC}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [L_{sr}] [i_{abc}] \quad (2.18)$$

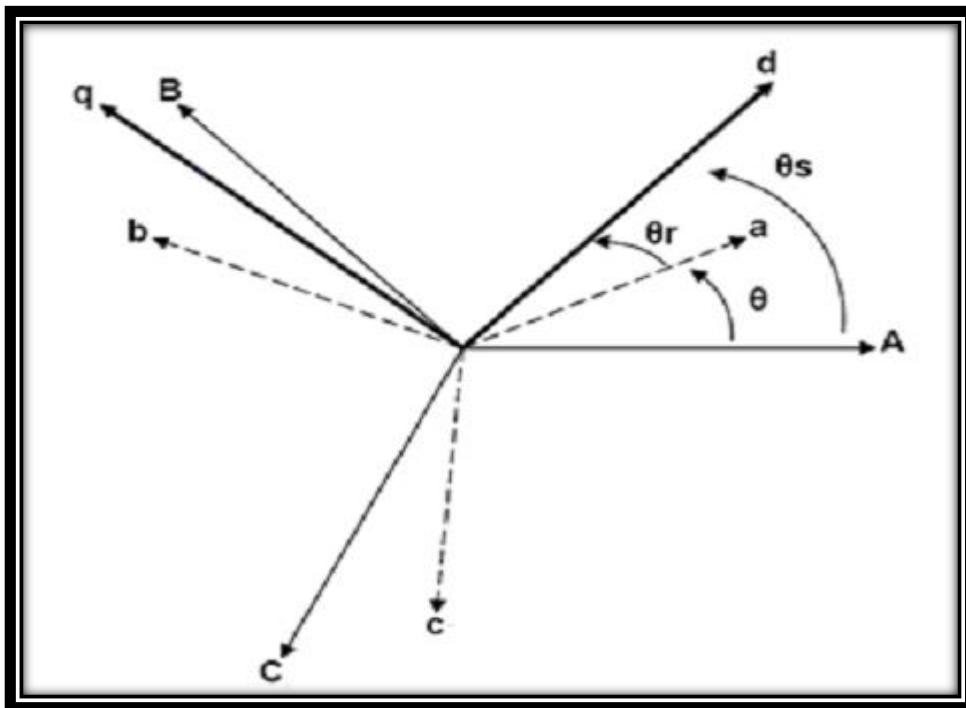
$$[U_{abc}] = R_r [i_{abc}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [L_{sr}]^t [i_{abc}] \quad (2.19)$$

$[L_s]$ ,  $[L_r]$  : Représentent les matrices d'inductances statoriques et rotoriques, tandis que  $[L_{sr}]$  correspond à la matrice des inductances mutuelles stator-rotor [17].

Du fait des termes de la matrice  $[L_{sr}]$  qui dépendent de l'angle  $\Theta$ . Les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés.

#### 2.4.1.3 Transformation de Park :

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents selon la transformation de Park. Ainsi les enroulements statoriques  $A, B, C$  sont remplacés par  $d_s, q_s, o_s$  et les enroulements rotoriques  $a, b, c$  par  $d_r, q_r, o_r$  [17].



**Figure 2.9 :** Transformation des enroulements réels en Enroulements équivalents

Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour les courants, tensions et flux, cette transformation est définie par la matrice P suivante :

$$[P] = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\tau}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\tau}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\tau}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\tau}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

#### 2.4.1.4 Application de la transformation de Park [17] :

##### 2.4.1.4.1 Equation de tension :

L'application de la transformation de Park définie par la matrice P sur l'équation (2.11 et 2.12), donne :

$$\begin{cases} U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - W_s \Psi_{qs} \\ U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + W_s \Psi_{ds} \\ U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d}{dt} \Psi_{os} \end{cases} \quad (2.21)$$

Et

$$\begin{cases} U_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - (W_s - W_r) \Psi_{qr} \\ U_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + (W_s - W_r) \Psi_{dr} \\ U_{or} = R_r i_{or} + \frac{d}{dt} \Psi_{or} \end{cases} \quad (2.22)$$

##### 2.4.1.4.2 Equation du flux :

L'application de la transformation de Park définie par la matrice P sur l'équation (2.16 Et 2.17), donne :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \\ \Psi_{os} = L_{or} i_{or} \end{cases} \quad (2.23)$$

et

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = L_r i_{ds} + L_{sr} i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qs} + L_{sr} i_{qs} \\ \Psi_{or} = L_{or} i_{or} \end{cases} \quad (2.24)$$

Les équations de Park peuvent être exprimées dans différents référentiels :

- Dans un référentiel lié au stator  $W_s = 0$ .
- Dans un référentiel lié au rotor  $W_s = W_r$ .
- Dans un référentiel lié au champ tournant.

### 2.4.1.5 Modèle mathématique de la machine asynchrone :

Le système d'équations décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone dans le référentiel de Park lié au stator  $W_s = 0$  est donné par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} U_{ds} \\ U_{qs} \\ U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & M\omega_r & R_r & L_r\omega_r \\ -M\omega_r & 0 & -L_r\omega_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Avec M inductance mutuelle.

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$\frac{d}{dt} W_r = \frac{1}{j} (C_m - C_r) \quad (2.26)$$

Avec

$$C_m = PM (i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (2.27)$$

L'équation de puissance est donnée par :

$$puissance = i_{ds}U_{ds} + i_{qs}U_{qs} \quad (2.28)$$

## 2.5 Filtre d'entrée :

Pour imposer au générateur de fonctionner dans la zone à tension constante qui offre une meilleure stabilité de fonctionnement une capacité à l'entrée de l'onduleur est nécessaire [2]. L'équation du filtre est donnée par :

$$C \frac{du_s}{dt} = I_g - i_s \quad (2.29)$$

Ou  $U_s$  tension d'entrée et tension aux bornes du générateur photovoltaïque.  $U_s = V_g$  et  $I_g$  courant délivré par le générateur photovoltaïque. Or  $I_g$  et  $V_g$  ont reliés par la relation  $I_g = f(V_g)$  l'équation du filtre devient :

$$C \frac{du_s}{dt} = f(U_s) - i_s \quad (2.30)$$

## 2.6 Validation du modèle par simulation :

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes.

Actuellement, plusieurs outils de simulations existent parmi lesquels le logiciel Matlab qui est largement utilisé dans le domaine de la commande des machines et qui sera le logiciel utilisé dans ce travail.

## 2.7 paramètres de la machine asynchrone :

Pour toute simulation dans ce mémoire, nous avons adopté une machine asynchrone de puissance 5.5Kw dont les caractéristiques suivantes :

La tension nominale :	$U=220/380V.$
Le courant nominal	$21/12A.$
Fréquence du réseau	$50 \text{ Hz.}$
Vitesse nominale	$N_n= 2930 \text{ tr/mn.}$
Nombre de paires de pôles	$p = 2.$
Résistance statorique	$R_s = 4.850 \text{ Ohm.}$
Inductance cyclique statorique :	$L_s = 0.274 \text{ H.}$
Résistance rotorique	$R_r = 3.805 \text{ Ohm.}$
Inductance cyclique rotorique	$L_r = 0.274 \text{ H}$
Inductance mutuelle cyclique	$M = 0.258 \text{ H.}$
Constante de temps rotorique	$T_r = 0.1600 \text{ s.}$
Constante de temps statorique :	$T_s = 0.0546 \text{ s.}$
Coefficient de dispersion :	$\sigma=0.1133.$
Moment d'inertie	$J =0.031 \text{ kg. m}^2.$

**Tableau 2.1 :** paramètres de la machine asynchrone

2.8 Schémas bloc de la MAS sans onduleur et avec onduleur

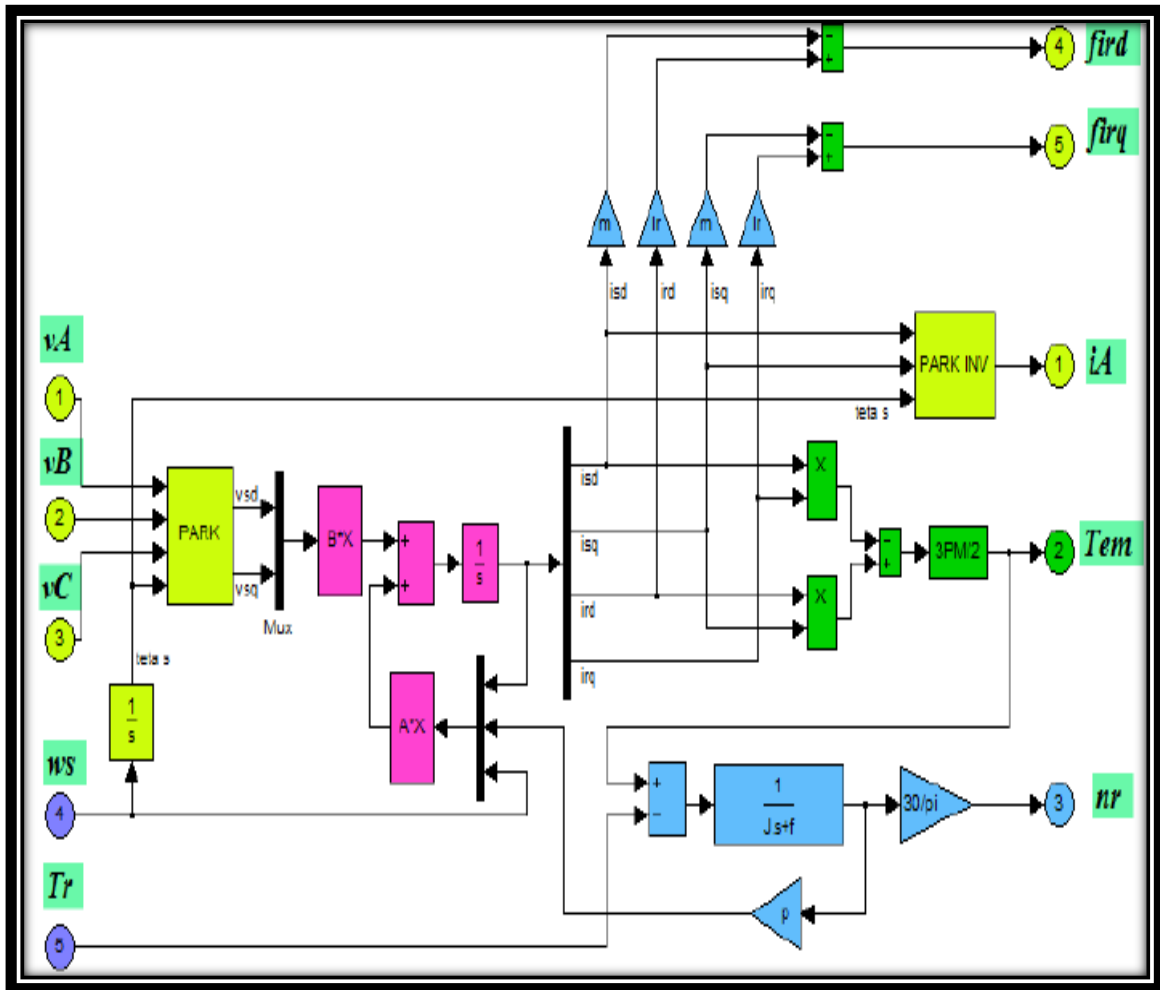


Figure 2.10 Schéma bloc MAS sans onduleur

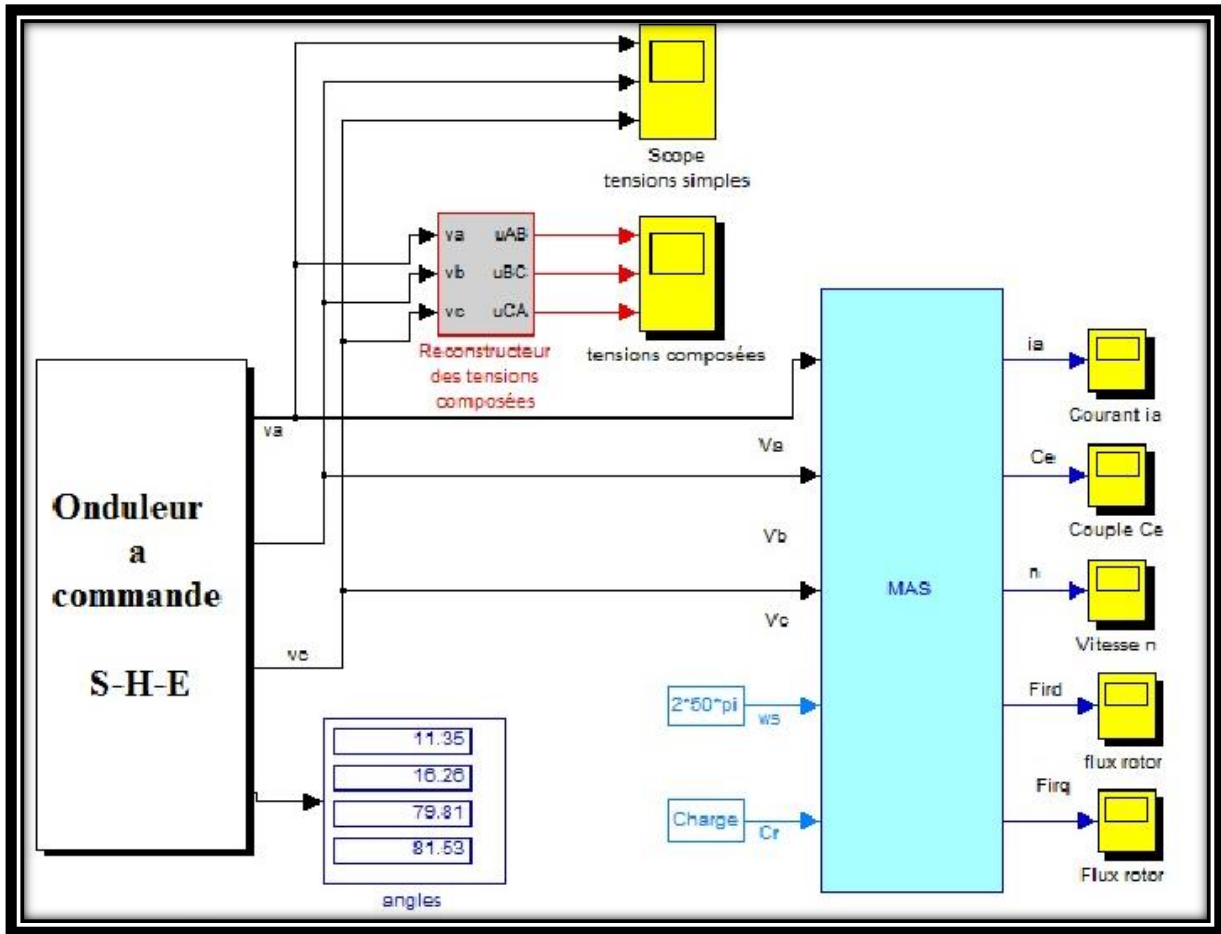


Figure 2.11 Schéma bloc MAS avec onduleur

## 2.9 Simulation du système à vide :

Les performances de la MAS à vide alimentée par l'onduleur triphasé commandé par la stratégie d'élimination d'harmonique sont présentées avec le courant sur la figure (2-12) et pour finir sur les deux figures (2-13) la vitesse de la machine asynchrone et (2-14) l'allure du couple a vide ci-dessous :

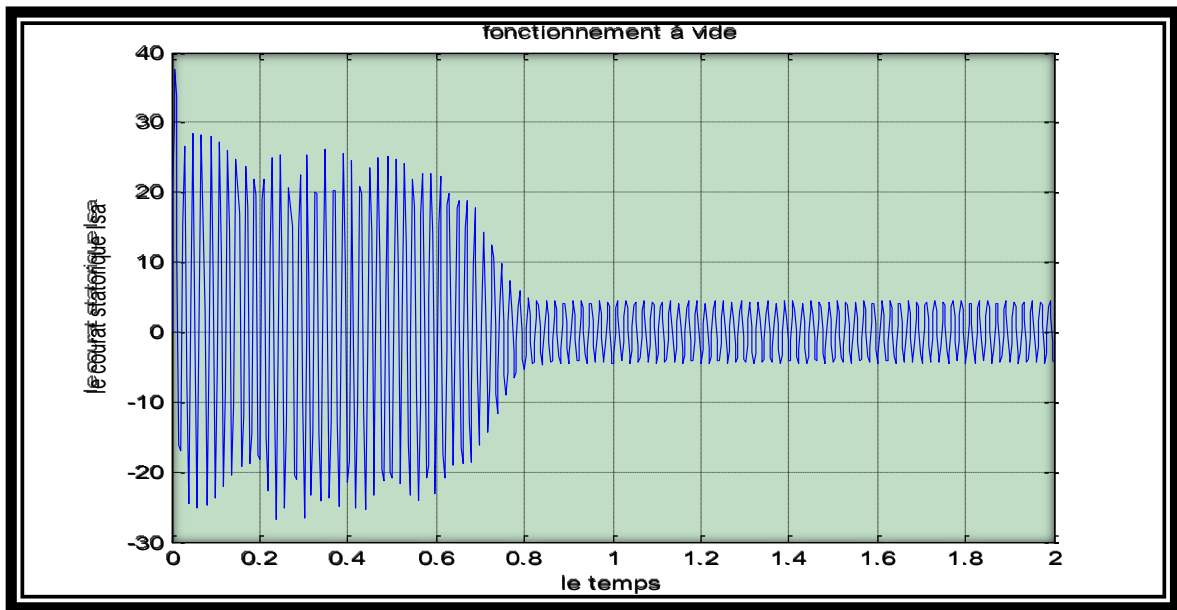


Figure 2.12 : Allure du courant à vide

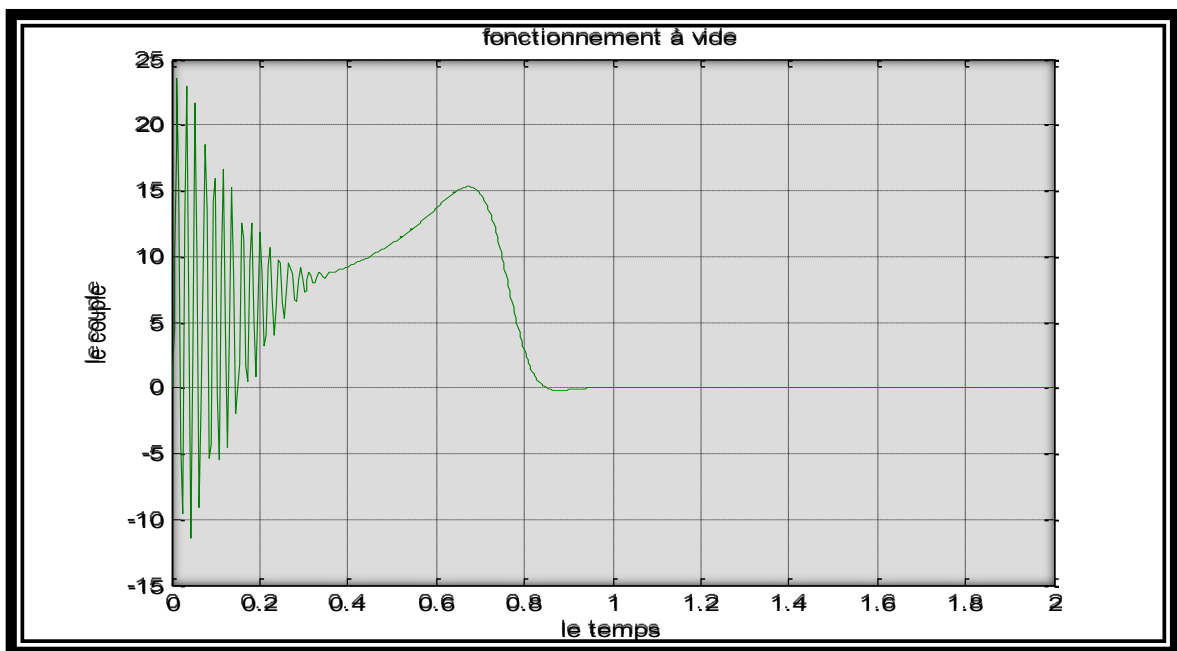


Figure 2.13 : Allure du couple à vide

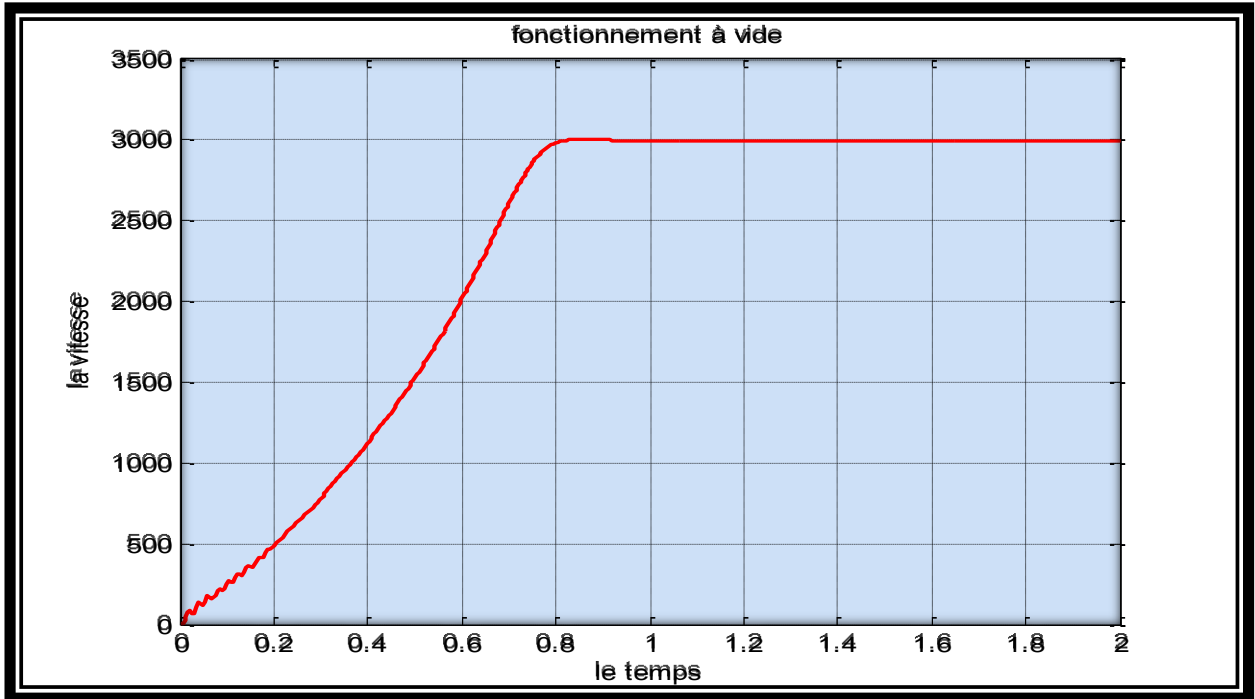


Figure 2.14 : Allure de la vitesse à vide

**2.10 Simulation du système en charge :**

Les performances de la MAS à en charge a 1s on applique un couple de 5N.m ; alimentée par l'onduleur triphasé commandé par la stratégie d'élimination d'harmonique sont présentées avec le courant sur la figure (2-15) et pour finir sur les deux figures (2-16) la vitesse de la machine asynchrone et (2-17) l'allure du couple a vide ci-dessous :

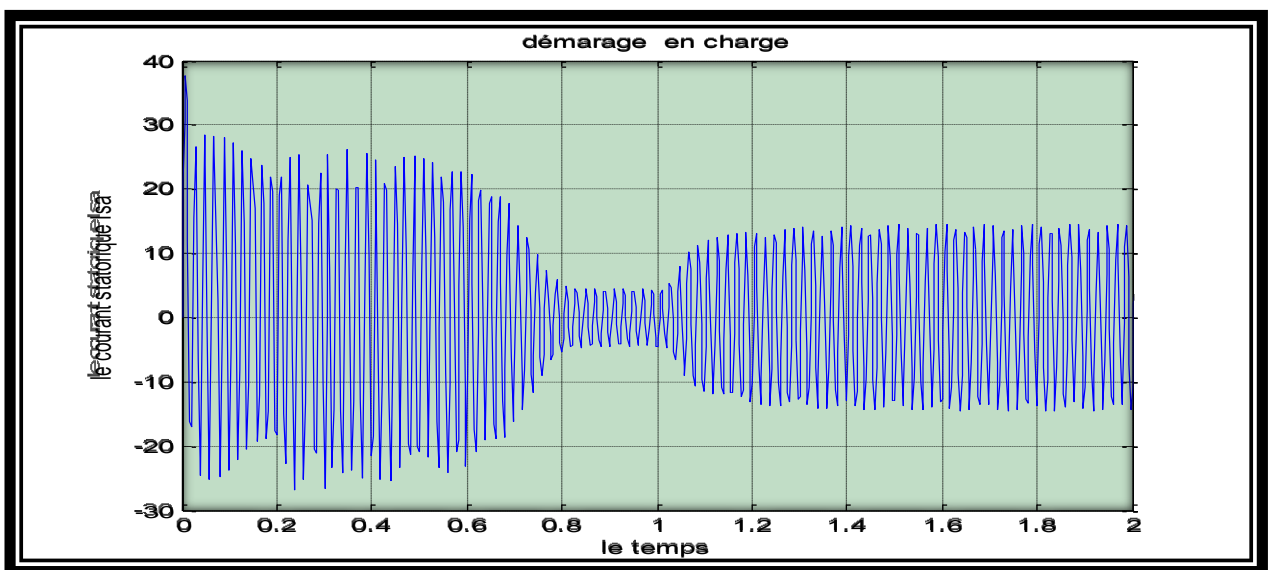


Figure 2.15 : Allure du courant en charge

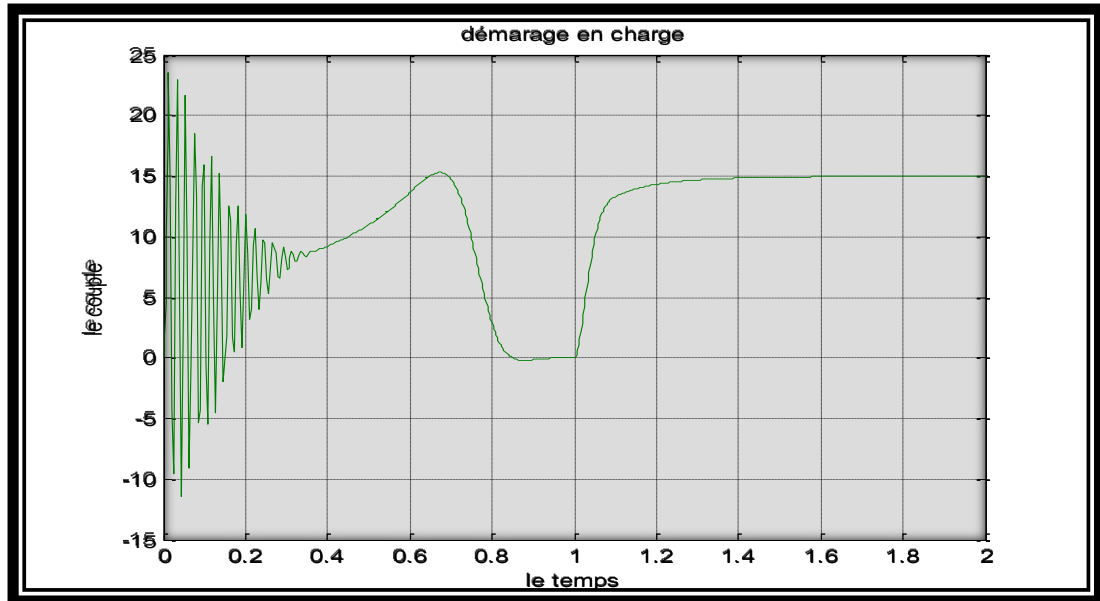


Figure 2.16 : Allure du couple en charge

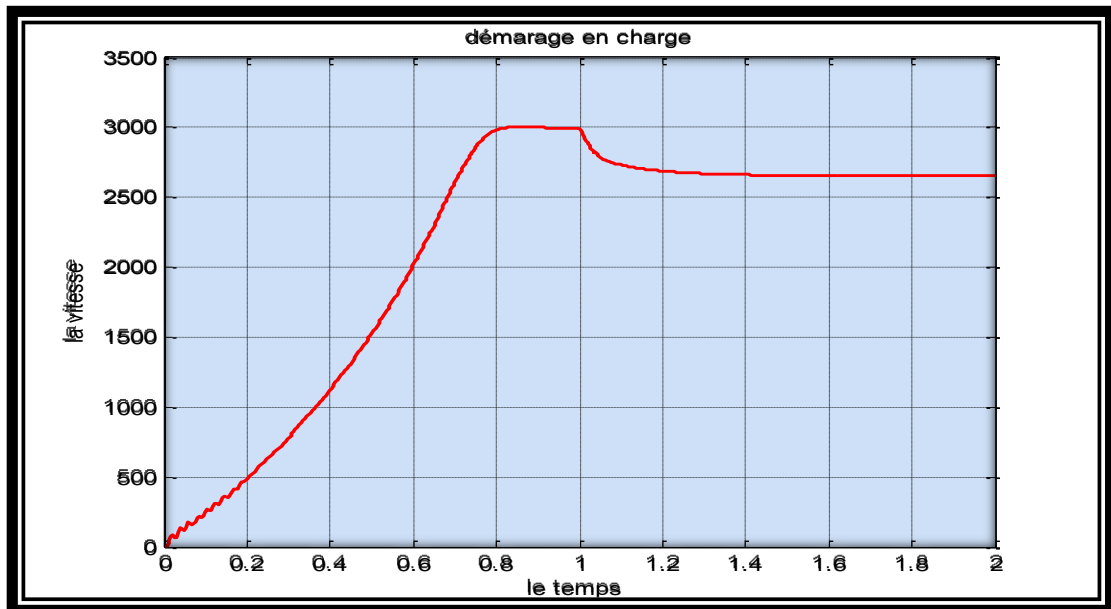


Figure 2.17 : Allure de la vitesse en charge

### 2.11 Interprétation des résultats :

➤ A vide :

- ✓ Au démarrage de la machine il y a fort appel de courant puis ce dernier atteint sa valeur nominale après quelques seconde.
- ✓ La vitesse dans le régime transitoire est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominale de 1500 tr / mn

➤ **En charge :**

- ✓ L'application d'une charge de 5 N.m à  $t=1$ sec engendre une diminution de la vitesse et une augmentation du courant statorique dès son application.

**2.12 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons pu étudier le comportement de la machine asynchrone a vide et en charge alimenté par un onduleur triphasé a stratégie d'élimination d'harmonique.

La machine nous donne de bons résultats pour le couple et la vitesse ainsi que le courant malgré la présence de quelque ondulation due aux harmoniques qui ne sont pas éliminés.

### 3.1 Introduction :

Entrainer des charges à vitesse variable, tout en contrôlant la vitesse ou le couple, est devenu incontournable dans les industries modernes. De la montre au concasseur, en passant par l'électroménager, les systèmes de traction, de levage, les applications sont innombrables et variés, de même que les solutions techniques. Toutefois, depuis une vingtaine d'années, les entraînements par moteurs électriques connaissent un essor important. Ceci est dû en grande partie aux progrès réalisés dans le domaine de la commande des machines à courant alternatif, et est grâce au développement de la technologie des composants de l'électronique de puissance, et l'apparition des processus numériques à fréquence élevée et à forte puissance de calcul [14, 15].

Dans ce chapitre, on présentera, la modélisation d'une machine asynchrone associée à un convertisseur statique (un onduleur à MLI) de chapitre II.

La simulation du couplage du moteur asynchrone par un panneau photovoltaïque.

Maintenant, on couple le schéma bloc du GPV par schéma bloc du MAS avec onduleur :

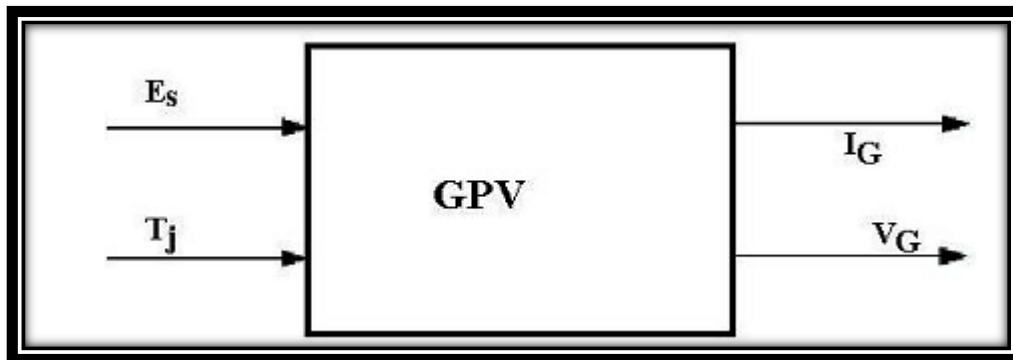


Figure 3.1 : Schéma bloc du GPV

Couplé avec un moteur asynchrone commandé par un onduleur MLI :

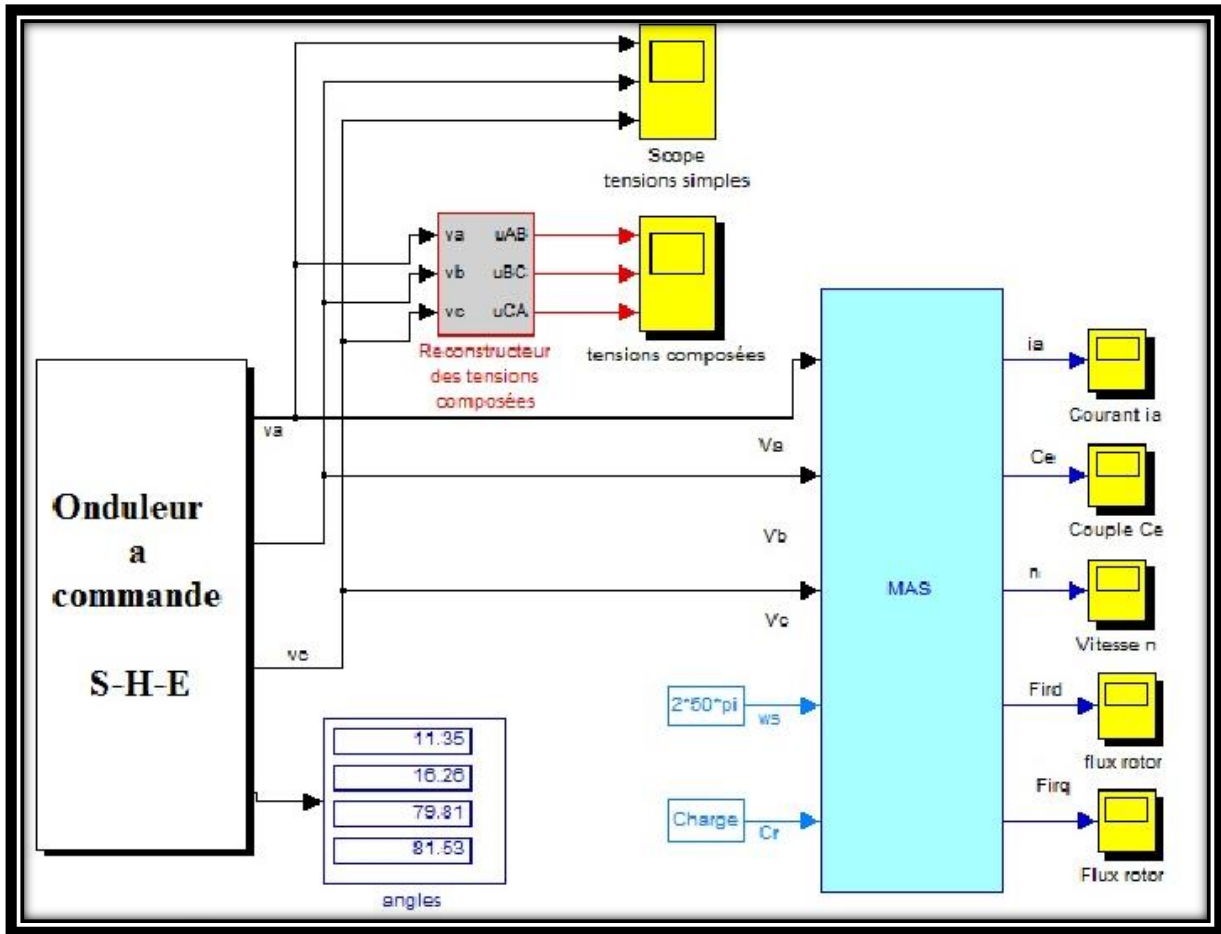


Figure 3.2 : schéma bloc de MAS avec onduleur

Enfin, nous obtenons le Bloc de simulation de l'alimentation de la MAS dans le figure 3.3

### 3.2 Schéma de Simulation du comportement du système :

La figure 3.3 illustre le schéma bloc de l'alimentation (GPV) –Onduleur- MAS fait par le logiciel Simulink sous Matlab, dans ce schéma nous avons appliqué la méthode MPPT qui sera expliquée dans le chapitre 04.

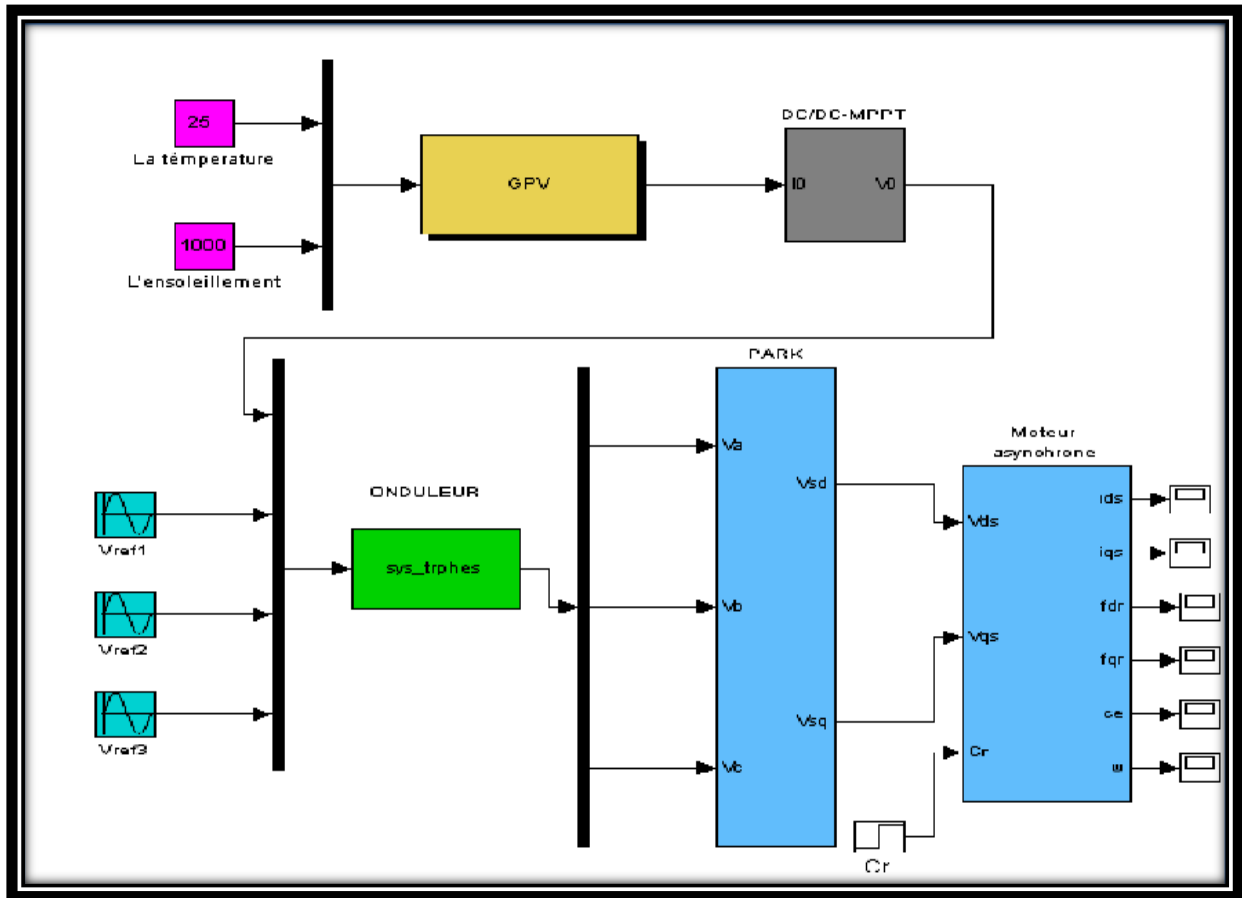
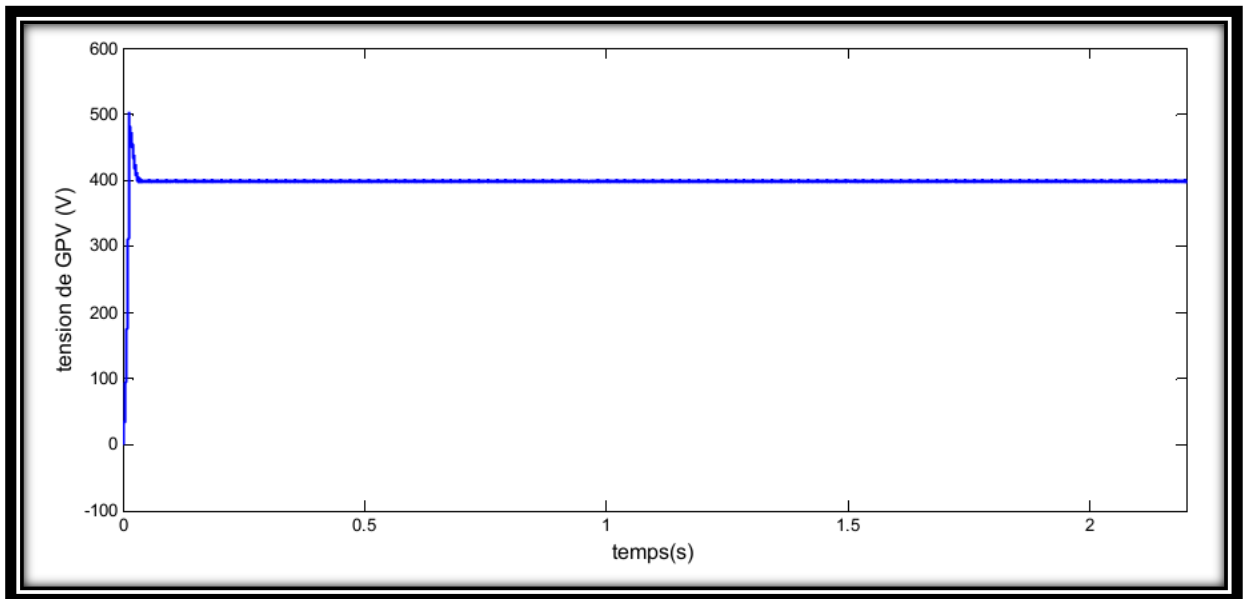
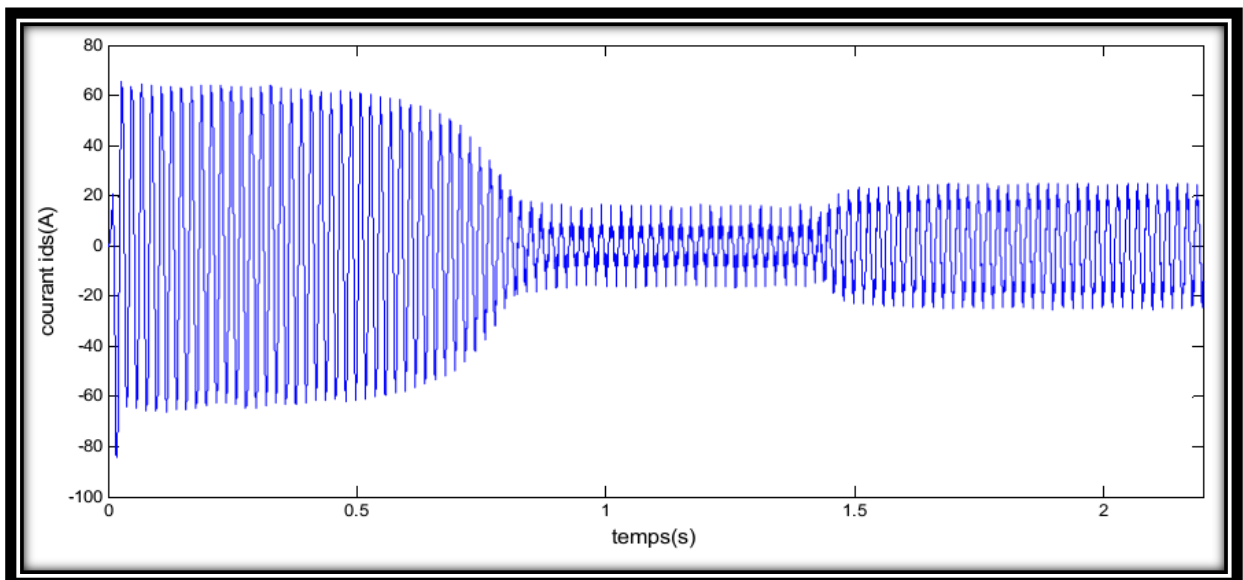


Figure 3.3 : Bloc de simulation de l'alimentation de la MAS

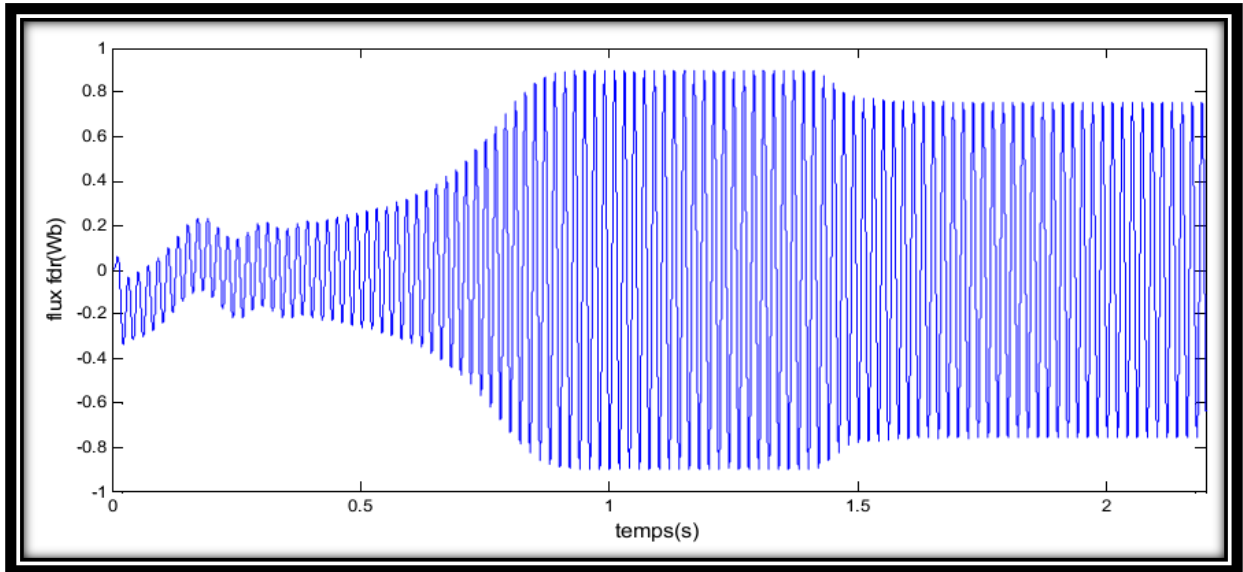
Les figures 3.4 donne les résultats de simulation du système (générateur PV-Onduleur-Mas) en état sain (régime de fonctionnement normal), tel qu'on a illustré : la tension de sortie de GPV, le courant statoriques, le flux rotoriques, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation de la MAS en présence de la charge.



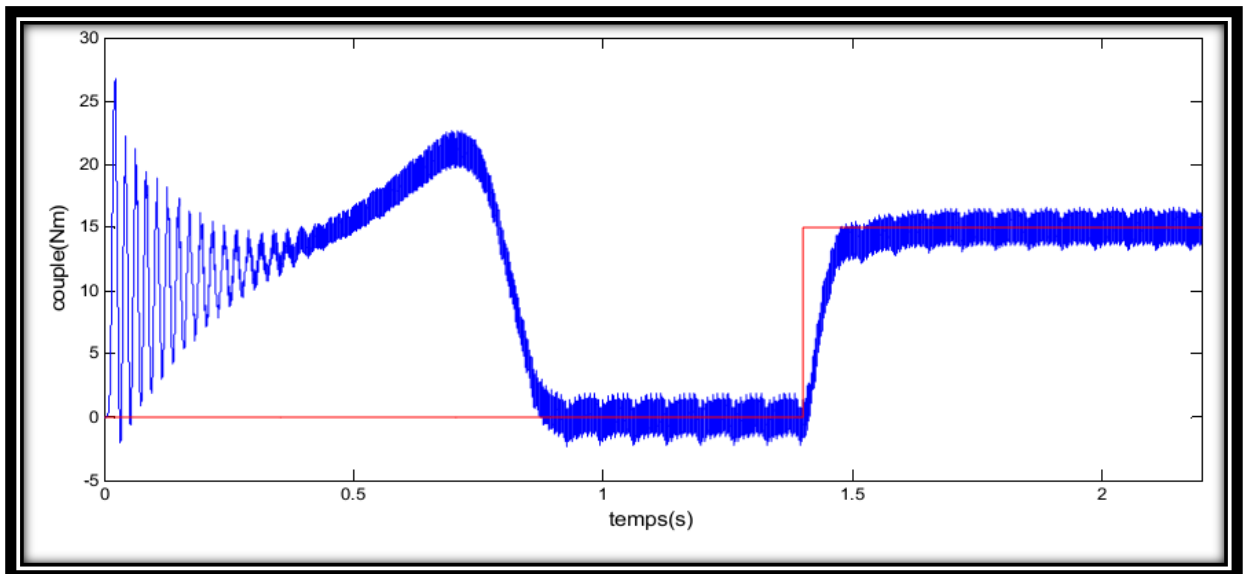
(a) Tension de sortie du GPV(V)



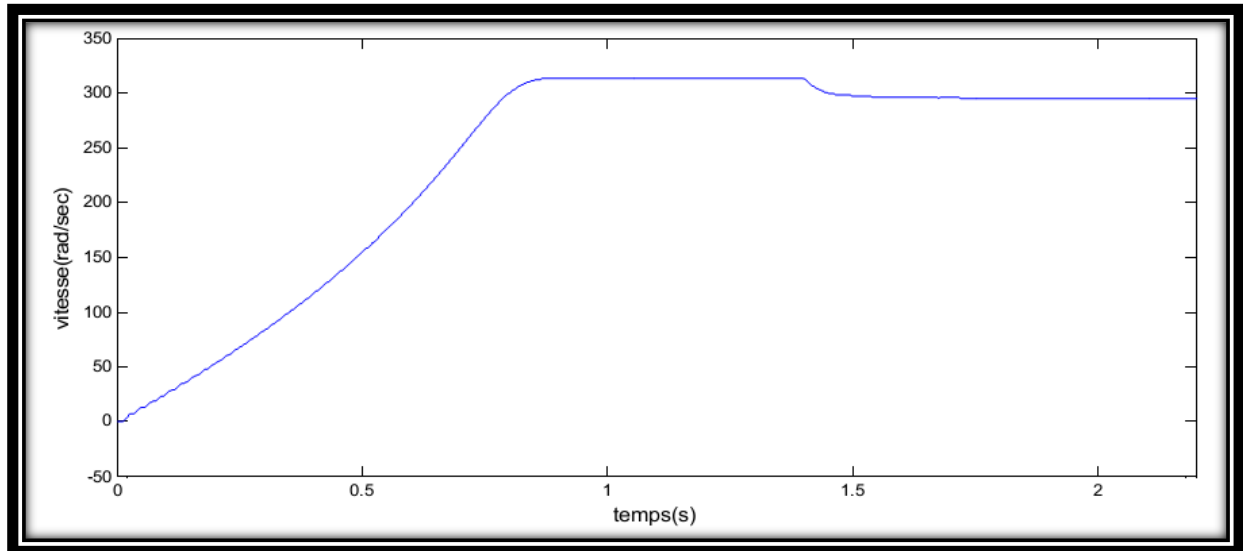
(b) Réponse du courant statoriques  $i_{ds}$ (A)



(c) Réponse du flux rotorique  $\Phi_{rd}$  (Wb)



(d) Réponse du couple électromagnétique  $C_{em}$  (N.m)



(e) Réponse de la vitesse de rotation  $w$  (rad/sec)

**Figure 3.4 (a, b, c, d, e) :** Résultat de simulation de l'alimentation

(GPV)-Onduleur-MAS en état sain lors d'une

Application d'un couple résistant ( $C_r = 15N.m$ ) à ( $t=1.4 s$ )

### 3.3 Interprétation des courbes :

On note que la vitesse de rotation atteint la vitesse nominale (300 rad/s) dans un temps lent, l'application d'une perturbation à l'instant ( $t=1.4s$ ) provoque une chute de la vitesse. Ainsi que les oscillations du couple ont apparu lors du démarrage. Ces oscillations sont dues principalement à la présence des harmoniques dans les tensions délivrées par l'onduleur.

### 3.4 Conclusion :

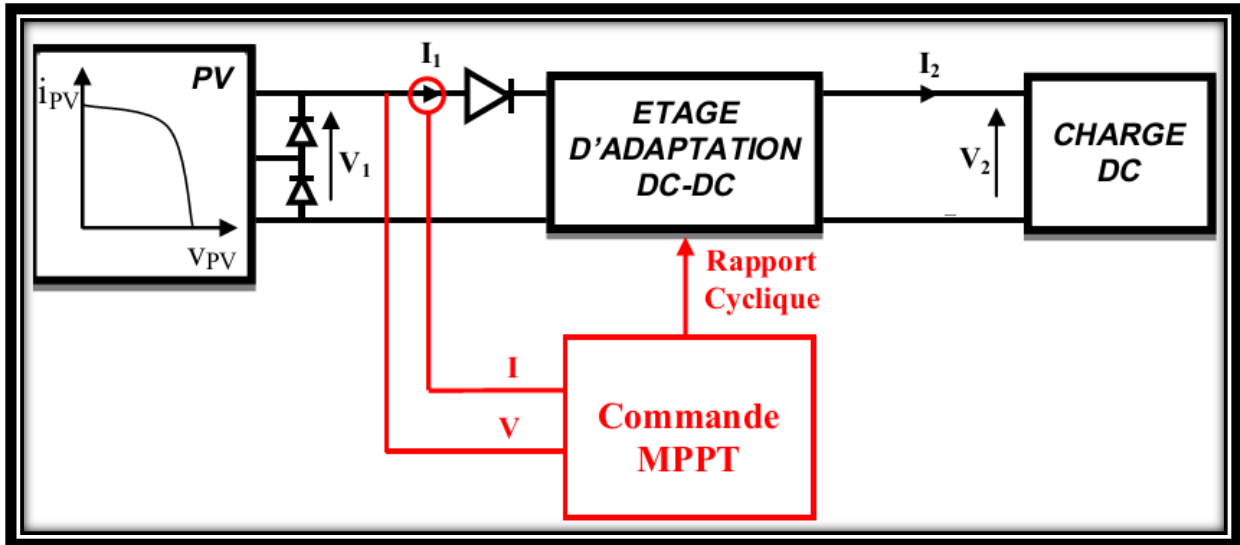
Dans ce chapitre nous avons réalisé l'alimentation du moteur asynchrone par un panneau (générateur) photovoltaïque, présenter les schémas blocs de simulation - utilisant le logiciel simulink sous matlab – donner quelques résultats de simulation tel que la tension et le courant d'alimentation du moteur, le flux rotorique, la vitesse de rotation du rotor et enfin le couple électromagnétique.

Dans le chapitre qui suit nous allons présenter une méthode de commande dite Maximum Power Point Tracking (MPPT) assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

#### 4.1 Généralités :

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori les points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature

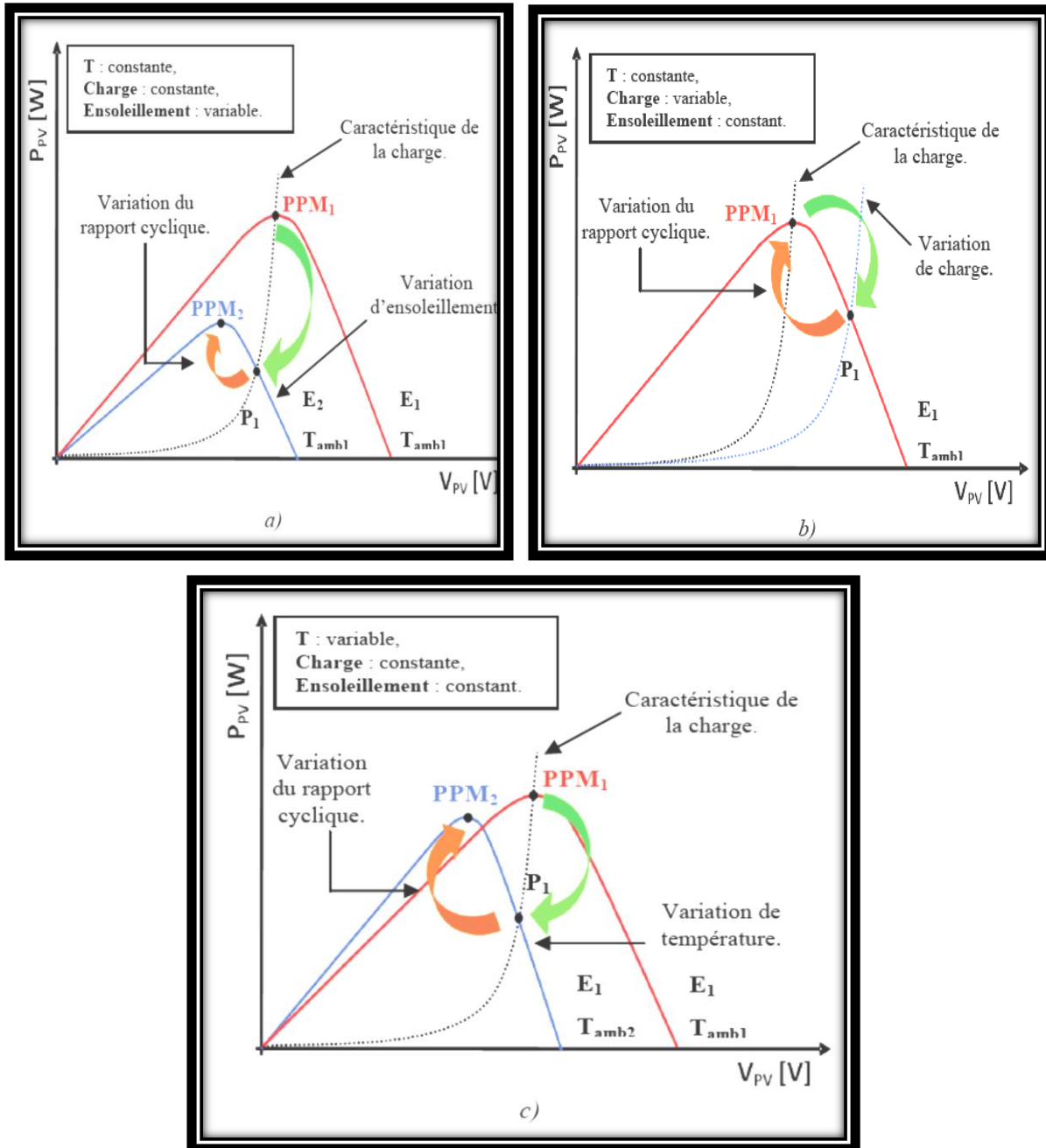
« Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. La figure 3.1 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P<sub>MAX</sub>) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.



**Figure 4.1 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure 4.2 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV.



**Figure 4.2** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

*a) suite à une variation d'ensoleillement.*

*b) suite à une variation de charge.*

*c) suite à une variation de température.*

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer.

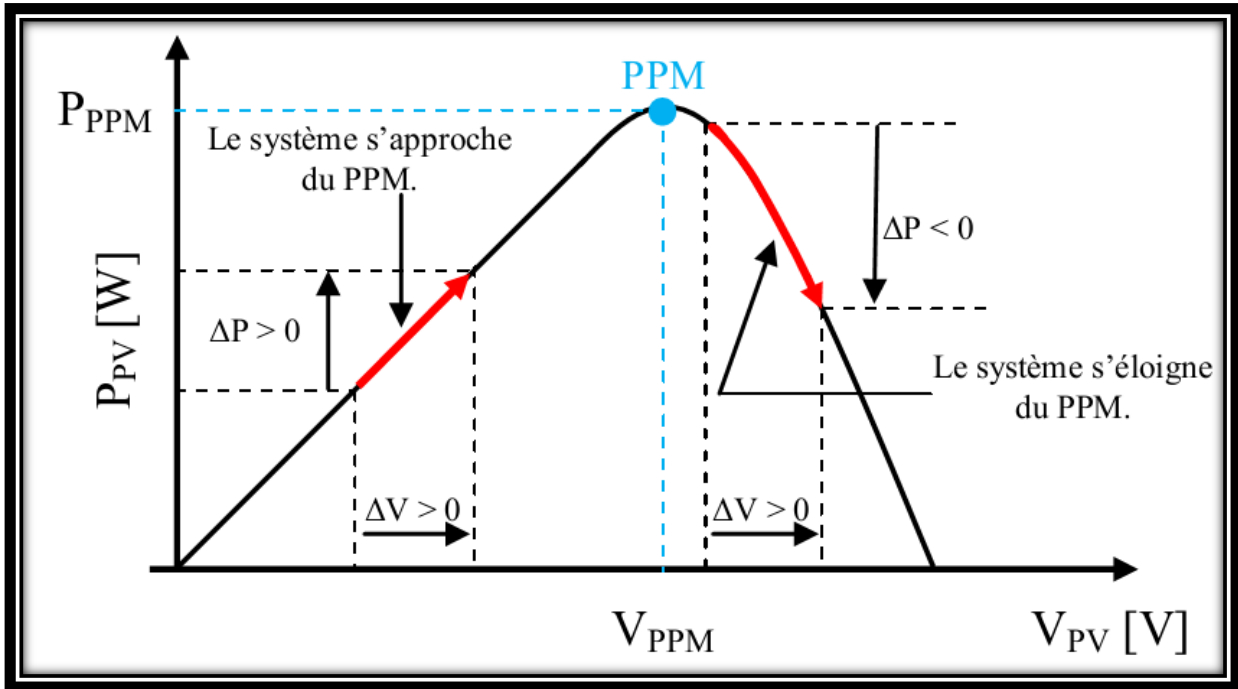
#### 4.1.1 Commandes MPPT à algorithmes performants.

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM [12, 13].

Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observe (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond). Et maintenant, je vais parler méthode "Perturb and Observe" (P&O).

#### 4.1.2 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte [14-16]. Ainsi, comme l'illustre la figure 3.2, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tensions, la puissance  $PV$  augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.



**Figure 4.3 :** Caractéristique  $P_{PV}$  ( $V_{PV}$ ) d'un panneau solaire.

La figure 4.3 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

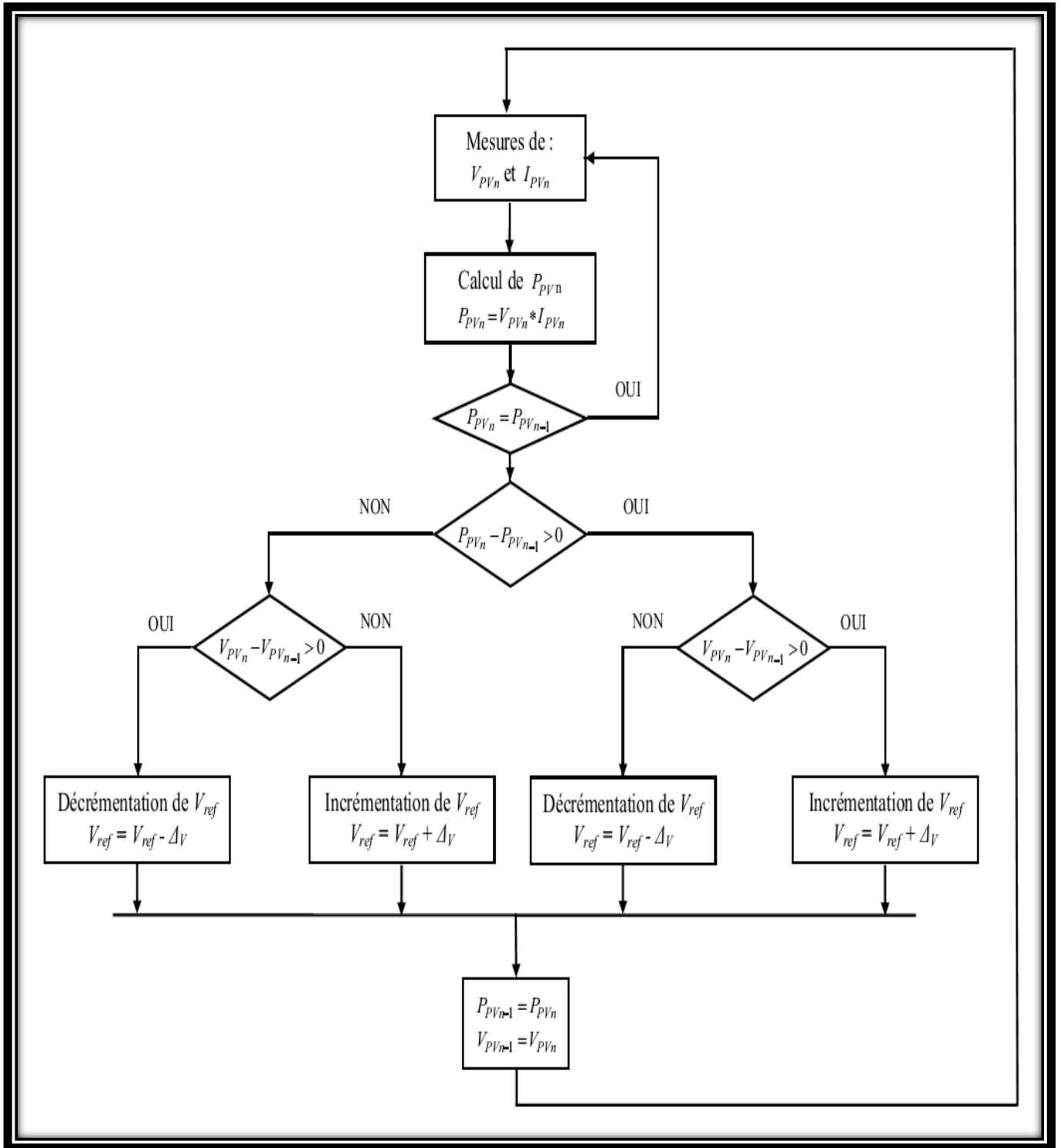


Figure 4.4: représentation de l'algorithme classique

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Ce problème est mis en évidence, par exemple par Noppadol Khaehintung, publiée en 2006 [15], où la recherche du PPM est effectuée avec deux valeurs fixes d'incrément. L'une correspondant à  $\Delta V_1 = 2/256$  V et l'autre à  $\Delta V_2 = 5/256$  V. A partir des oscillogrammes proposés, le temps mis pour atteindre le nouveau PPM, lors d'une variation de puissance de l'ordre de 8 W, est de 200 ms pour l'incrément de faible valeur, alors que celui-ci est divisé par deux pour l'incrément de forte valeur. En contrepartie, les oscillations autour du PPM sont accentuées pour ce dernier. Malheureusement, la qualité des relevés ne permet pas d'évaluer la précision statique de la MPPT (voir la notion de rendement MPPT défini en fin de chapitre), obtenue avec ces deux incréments proposés par l'auteur ni le choix d'autres incréments si le GPV change. Par contre, une étude comparative entre différents algorithmes de recherche a été effectuée par D. P. Hohm en 2000 [13]. Dans cet article, l'auteur a développé un banc de mesure et une procédure de test qui permettent d'évaluer différentes commandes MPPT sous les mêmes conditions climatiques durant une journée de fonctionnement. Les principes de recherche analysés sont, outre la méthode P&O, l'incrément de conductance et une méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert (VOC), détaillées toutes deux dans la suite du document. Il ressort de cette étude que la commande MPPT testée basée sur le principe P&O [17] affiche un rendement MPPT de l'ordre de 96,5 %, cependant aucune indication

N'est fournie par l'auteur sur la valeur de la variable d'incrément et si cette valeur est une valeur moyenne ou une valeur liée aux conditions climatiques. En effet, il est connu que ce Type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très

fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure 4.4.

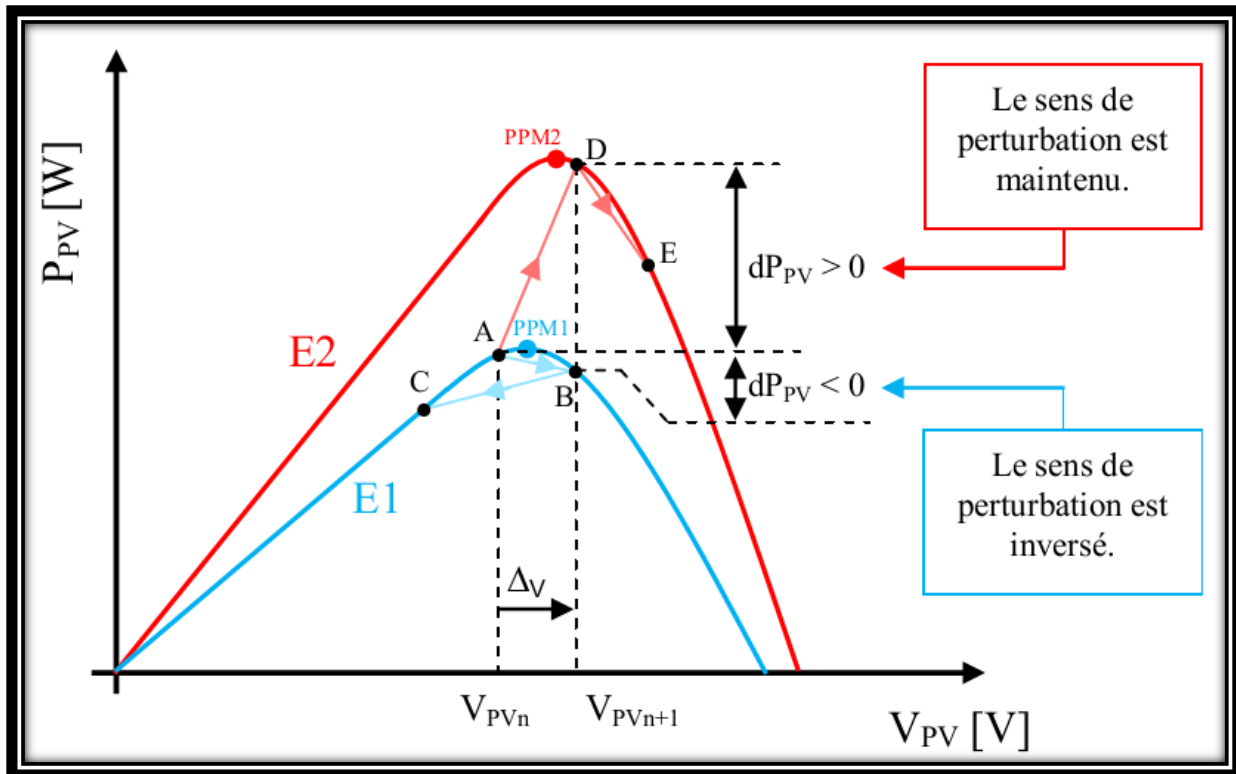


Figure 4.5 : Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairement donné, noté  $E_1$ , avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur  $\Delta_V$ , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairement, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. On peut noter que des pertes

de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques  $P(V)$  du module de  $E_1$  à  $E_2$ ), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance momentanée.

Cependant, dans le pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables de fortes lacunes au niveau de la commande.

Ce cas de figure est d'ailleurs illustré par D. Sera [16], à l'aide de simulations. Pour mettre en évidence ce désagrément, il analyse le comportement de la commande P&O lorsqu'une variation d'ensoleillement, correspondant à une évolution linéaire de l'irradiation de  $125 \text{ W/m}^2$  à  $800 \text{ W/m}^2$  se produit sur une durée de 25 secondes. Contrairement à la perturbation, la recherche du PPM ne se fait pas linéairement, la commande a tendance à s'éloigner momentanément du PPM, pour converger, par la suite, vers ce dernier. Dans cet essai, le temps de recouvrement de la commande MPPT s'effectue au bout de 40 secondes, soit 15 secondes après que l'éclairement se soit stabilisé. Durant cet essai, le rendement de la

Commande MPPT est estimé à 94,5 % pour une durée de fonctionnement de 100 secondes. Ici, comme précédemment, aucune indication n'est formulée sur la valeur de la variable d'incrément utilisée, il est donc difficile d'évaluer les performances réelles de cette commande.

#### 4.2 Conclusion :

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

## Conclusion générale

Dans ce modeste travail, on a exposé l'une des techniques utilisés dans le domaine photovoltaïque dite « simulation en régime transitoire du système de pompage photovoltaïque », l'application envisagée concerne un système de couplage du moteur asynchrone par un panneau photovoltaïque.

Les modèles nécessités pour la simulation ont été présenté à savoir ceux du générateur solaire, le moteur asynchrone, convertisseur statique. L'ensemble est simulé sous l'environnement « MATLAB ».

Du régime dynamique étudié on voit que la présence du générateur borné, rend le système stable et les point de fonctionnement obtenues en régime permanent sont tous stables. La méthode proposée d'optimisation du générateur photovoltaïque à été passée en revue et appliquée au système proposé. A fin de validé ce travail une future continuation est suggéré, par la suite une concrétisation d'un bon d'essai.

## Bibliographie

- [1] : R. Jimmy et al., Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.
- [2] : B. Flèche & D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque, juin 2007.
- [3] : S. Masoum et al., Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic application, Vol. 19, September 2004.
- [4] : A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [5] : A. Fortin, Analyse numérique pour ingénieurs, 2 eme édition, Presses internationales polytechnique, 1996.
- [6] : M. Angel et al., Conception et réalisation de modules photovoltaïques électronique, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS).
- [7] : BP Solar BP SX150-150W Multi-crystalline photovoltaic Module Data sheet.
- [8] : L. Protin et al., Convertisseurs photovoltaïques, Technique de l'ingénieur, traité génie électrique, pp 3-360, 1992.
- [9] : M. Hadjab, Développement des performances d'un système photovoltaïque, mémoire de Magister, université de Sidi Bèl Abbès, Jan 2011.
- [10] : P. Lefrank, Etude conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Novembre 2005.
- [11] : D. Hart, Introduction to power electronics, Prentice Hall Inc, 1996.
- [12] : F. Chekired, Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA, Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [13] : J. Fadat, Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, Commande MPPT, La Revue 3EI n° 43 – Décembre 2005, ESIEE-Amiens 14 Quai de la Somme – BP 100 – 80 082 Amiens.
- [14] : D. Khodja, Elaboration d'un Système Intelligent de Diagnostic Automatique en Temps Réel des Moteurs à Induction, Thèse de Doctorat, Université de Boumerdès, Avril 2007.
- [15] : G. Sturtzer, et al., Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés, commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs DSP, Edition Ellipses, Paris 2000.
- [16] : G. Grellet et al., Actionneurs Électriques, principes modèles commande, Edition Eyrolles, Paris 2000.
-

