



N° d'ordre : .....

Série : .....

# MEMOIRE

Pour l'obtention du Diplôme de

## MAGISTER EN ÉLECTROTECHNIQUE

**Option : Modélisation Et Commande  
Des Machines Electriques**

Présenté par :

**BOUKHERS Djamil**

**OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE  
PHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU  
POMPAGE**

Soutenu publiquement le 28 / 11 / 2007

**Président : BENTOUNSI. A.**

**M.C (U. Mentouri Constantine)**

**Rapporteur : BOUZID. A.**

**Professeur (U. Mentouri Constantine)**

**Examineurs : LATRECHE. M. E.H**

**Professeur (U. Mentouri Constantine)**

**BOUCHERMA. M.**

**HDR, CC (U. Mentouri Constantine)**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قُلْ إِنْ صَلَاتِي وَنَسْكَي وَمَحْيَايَ وَمَمَاتِي لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ لَا  
شَرِيكَ لَهُ وَبِذَلِكَ أُمِرْتُ وَأَنَا أَوَّلُ الْمُسْلِمِينَ  
صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمَ

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire d'électrotechnique, du département d'électrotechnique, faculté des sciences de l'ingénieur de l'université Mentouri de Constantine.

Je remercie monsieur A. BOUZID professeur au département d'électrotechnique de l'université de Constantine, pour avoir encadré cette mémoire pour tout le soutien qu'il à bien voulu m'accorder tout au long de ce travail.

Pour leur participation à l'évaluation scientifique de ce travail, je tiens également à remercier :

- A. BENTOUNSI maître de conférence au département d'électrotechnique de l'université de Constantine, pour l'honneur qu'il ma fait en acceptant la présidence du jury de ce mémoire.

- M.E.H.LATRECHE, professeur au département d'électrotechnique de l'université de Constantine pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

- M. BOUCHERMA, HDR, chargé de cours au département d'électrotechnique de l'université de Constantine pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de siéger dans ce jury.

Je remercie également R.CHENNI, chargé de cours au département d'électrotechnique de l'université de Constantine, soit vivement remercié pour l'intérêt qu'il manifeste à ce travail.

- A toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, à l'aboutissement à ce travail, je les remercie tous, particulièrement ma famille et tous mes amis.

Enfin, je ne pourrais terminer, ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **CHAITRE I GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES**

<b>I-1- Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>I-2- Rayonnement solaire</b> .....	<b>5</b>
<b>I-3- Déclinaison du soleil</b> .....	<b>6</b>
<b>I-4- Modèle simplifié de l'éclairement</b> .....	<b>7</b>
<b>I-5- Historique de l'énergie photovoltaïque</b> .....	<b>8</b>
<b>I-6- Principe de la conversion photovoltaïque</b> .....	<b>8</b>
<b>I-7- Technologie des cellules photovoltaïques</b> .....	<b>9</b>
<b>I-8- Étude bibliographique</b> .....	<b>10</b>
<b>I-9- Différents configurations des systèmes photovoltaïques</b> .....	<b>11</b>
<i>I- 6 -1-Système autonome sans batterie</i> .....	<b>12</b>
<i>I- 6 -2-Système autonome avec batterie</i> .....	<b>12</b>
<i>I 6 -3-Système fonctionnant au fil du soleil</i> .....	<b>12</b>
<i>I 6 -4-Système avec appoint électrique</i> .....	<b>12</b>
<b>I-10- Constitution d'un système de pompage photovoltaïque</b> .....	<b>12</b>
<i>I-7-1-Générateur photovoltaïque</i> .....	<b>13</b>
<i>I-7-2-Moteur d'entraînement</i> .....	<b>13</b>
<i>I-7-3-Pompe de refoulement</i> .....	<b>14</b>
<i>I-7-4-Circuit Hydraulique</i> .....	<b>14</b>
<b>I-11-Avantages et inconvénients des systèmes solaires</b> .....	<b>14</b>
<i>I 8 1-Avantages</i> .....	<b>14</b>
<i>I 8 -2-Inconvénients</i> .....	<b>15</b>
<b>I-8 – conclusion</b> .....	<b>15</b>

## **CHAITRE II GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES**

<b>II- 1- Introduction</b> .....	<b>17</b>
<b>II- 2- Modèle d'une cellule solaire idéale</b> .....	<b>17</b>
<b>II- 3- Modèle d'une cellule solaire réelle</b> .....	<b>18</b>
<i>II- 3- 1- Modèle à une diode (à une seule exponentielle)</i> .....	<b>18</b>
<i>II-3-2- Modèle à une diode sans résistance shunt</i> .....	<b>19</b>
<i>II- 3- 3- Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)</i> .....	<b>20</b>

II- 3 -4- <i>Modèle à deux diodes sans résistance shunt</i> .....	20
<b>II- 4- Caractéristique I-V</b> .....	22
<b>II- 5- Constitution d'un module photovoltaïque</b> .....	22
<b>II- 6- Caractéristique d'un GPV élémentaire</b> .....	24
<b>II- 7- protection d'un GPV élémentaire</b> .....	25
<b>II- 8- Modélisation du module photovoltaïque</b> .....	25
II- 8- 1- <i>Influence de l'éclairement et la température</i> .....	28
II- 8- 2- <i>Recherche du point optimal de fonctionnement</i> .....	30
II- 8- 3- <i>Influence de la résistance série</i> .....	31
II- 8- 4- <i>Influence du facteur de qualité</i> .....	32
<b>II- 9- Conclusion</b> .....	32

### **CHAITRE III MODELISATION DU GROUPE MOTO-POMPE**

<b>III-1-Introduction</b> .....	34
<b>III-2-Machines synchrones</b> .....	34
III-2-1- <i>Les différents types des machines synchrones</i> .....	35
III-2-2- <i>Modèle mathématique de la MSAP</i> .....	37
III-2-3- <i>Rendement de la MSAP</i> .....	41
<b>III-3-Convertisseur statique</b> .....	42
<b>III-4-Pompe photovoltaïque</b> .....	44
III-4-1- <i>Différentes types des pompes</i> .....	45
III-4-1-1- <i>La pompe volumétrique</i> .....	45
III-4-1-2- <i>La pompe centrifuge</i> .....	46
III-4-2- <i>Constitution d'une pompe centrifuge</i> .....	46
III-4-3- <i>Fonctionnement d'une pompe centrifuge</i> .....	47
<b>III-5-Modélisation de la pompe centrifuge</b> .....	47
III-5-1- <i>Pertes de charges linéaires</i> .....	47
III-5-2- <i>Pertes de charges singulières (locale)</i> .....	48
III-5-3- <i>La caractéristique <math>Q(H)</math> de la pompe</i> .....	48
III-5-3- <i>La caractéristique <math>C(\omega)</math> de la pompe</i> .....	50
III-5-5- <i>Calcul de puissance</i> .....	50
III-5-6- <i>Calcul du rendement</i> .....	50
<b>III-6-conclusion</b> .....	50

**CHAITRE IV COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE  
SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT**

<b>IV- 1- Introduction</b> .....	<b>52</b>
<b>IV- 2- Pourquoi la commande vectorielle</b> .....	<b>52</b>
<b>IV- 3- Principe de base de la commande vectorielle</b> .....	<b>53</b>
<b>IV- 4- Calcul des paramètres du régulateur PI</b> .....	<b>55</b>
<i>IV- 4 -1- Régulateur de courant</i> .....	<b>55</b>
<i>IV-4 -2- Régulateur de vitesse</i> .....	<b>56</b>
<b>IV- 5- Description du système globale</b> .....	<b>57</b>
<b>IV- 6- Résultats de la simulation</b> .....	<b>58</b>
<b>IV- 7- Conclusion</b> .....	<b>63</b>

**CHAITRE IV OPTIMISATION DU SYSTEME DE POMPAGE  
PHOTOVOLTAIQUE**

<b>V-1- Introduction</b> .....	<b>65</b>
<b>V-2- Dimensionnement du système photovoltaïque</b> .....	<b>65</b>
<i>V-2-1-Dimensionnement de Moto-Pompe</i> .....	<b>65</b>
<i>V-2-1-Dimensionnement du générateur photovoltaïque</i> .....	<b>66</b>
<b>V-3- Couplage direct</b> .....	<b>67</b>
<b>V-4- Philosophie du MPPT</b> .....	<b>68</b>
<b>V-5- Quelques types d'algorithmes de tracking</b> .....	<b>70</b>
<i>V-5-1- Algorithme de perturbation et observation (P&amp;O-MPPT)</i> .....	<b>70</b>
<i>V-5-2- Algorithme tension constante (CV-MPPT)</i> .....	<b>72</b>
<i>V-5-3- Algorithme courant constant (CC-MPPT)</i> .....	<b>73</b>
<i>V-5-4- Algorithme de l'accroissement de la conductance (INC-MPPT)</i> .....	<b>74</b>
<i>V-5-5- Algorithme de capacité parasite (PC-MPPT)</i> .....	<b>76</b>
<b>V- 6- Optimisation du système de pompage photovoltaïque</b> .....	<b>77</b>
<b>V- 7- Résultats de simulation</b> .....	<b>78</b>
<b>V- 8- Conclusion</b> .....	<b>82</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>84</b>
<b>Références Bibliographiques</b> .....	<b>89</b>
<b>Annexe</b> .....	<b>92</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>94</b>

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire). L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre [1].

La moitié de la population des pays en voie de développement n'ont pas d'accès sûr à l'eau potable. Cette dernière est à l'origine de 80 % des maladies et de la pauvreté dans ces pays. Les efforts pour surmonter ce problème ont donné à des programmes tels que le pompage de l'eau une priorité importante. Dans beaucoup de régions, ce but peut être réalisé seulement par l'utilisation des nappes souterraines. Dans les régions éloignées des réseaux électriques, il y a des diverses possibilités pour se servir de ces nappes : pompes à main, pompes diesel, pompes solaires, etc.

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage solaire ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie solaire et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique.

L'exploitation de l'énergie photovoltaïque offre un approvisionnement en énergie inépuisable mais surtout une énergie propre et non polluante, ce qui constitue un avantage certain. L'utilisation de l'énergie solaire pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations des régions rurales et sahariennes. Ces derniers reçoivent un fort ensoleillement où l'eau, faisant défaut, se trouve naturellement stockée sous forme de nappes d'eau souterraines ; l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une solution bien adaptée pour ces régions [2], ce système est justifiée économiquement où l'énergie fournie par le générateur est stockée sous forme d'eau pompée durant la journée au lieu d'être emmagasinée sous forme d'énergie électrique.

Trois configurations de système de pompage sont actuellement en service :

- Le premier est le système directement couplé.
- Le deuxième est le système de pompage utilisant des batteries permettant le stockage et l'appoint de l'énergie.
- Le troisième système utilise un traqueur du point de puissance maximum (MPPT) afin d'améliorer l'efficacité du système.

En effet, les moteurs à courant continu ont été les premiers à être utilisés dans les systèmes de pompage parce qu'il offre un principal avantage d'être facilement commandables grâce au découplage naturel du flux et du couple ; cependant la présence du collecteur et des balais à toujours été un inconvénient. Face à cette limitation et avec l'évolution de l'électronique de puissance et des aimants permanents, de nouvelles machines ont vu le jour, telles que la Machine Synchrone à Aimant Permanent qui a l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique. Par ailleurs, le couplage existant entre le couple et le flux rend la MSAP difficilement commandables [3], mais avec la commande vectorielle (qui assure le découplage entre le flux et le couple), la MSAP peut être prise similaire à la machine à courant continu.

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore, c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires .L'optimisation des systèmes solaires est basés sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

Sachant que le but essentiel de toutes les recherches est l'amélioration globale des performances des systèmes de conversion photovoltaïque (PV), lorsqu'un générateur photovoltaïque alimente une charge, quelle que soit sa nature, ceci n'implique pas forcément une



mauvaise rentabilité du système global, mais l'équivalence entre le rendement admissible et le coût moyen d'exploitation détermine le degré d'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire.

Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité de systèmes photovoltaïques ainsi que des techniques ont été appliquées afin d'avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques, on trouve la technique de "Poursuite de Point de Puissance Maximale" ou "Maximum Power Point Tracker (MPPT)".

Ce travail comporte cinq chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique pour donner l'état de l'art dans le domaine envisagée, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant notre système de pompage et qui sont le générateur PV et le groupe motopompe.

Le deuxième chapitre est consacré l'étude des cellules photovoltaïques, à la mise au point d'un modèle mathématique du panneau photovoltaïque permettant de déterminer la caractéristique tension-courant et l'influence des paramètres (température, ensoleillement, résistance série, facteur de qualité,...) sur cette caractéristique.

Le troisième chapitre fera l'objet de l'étude théorique et mathématique de l'ensemble motopompe. On présentera d'une manière brève l'actionneur électrique (le moteur représenté dans un repère à deux axes), la pompe ainsi que leur alimentation à travers un onduleur de tension.

Dans le quatrième chapitre, on présentera la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent.

Dans le cinquième chapitre on présentera quelques méthodes de "tracking" de la puissance maximale des panneaux solaires telles que les algorithmes "Perturb & Observe", "Constant Voltage", "Incrémental Conductance", et "Parasitic Capacitance" et l'application de la méthode « P & O » à notre système.

Finalement une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent mémoire.

## *Généralités sur les systèmes photovoltaïques*

### I-1- 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, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

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 » [1].

### I-2- RAYONNEMENT SOLAIRE :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre  $150.10^6$  Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante  $180.10^6$  GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autre sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de  $0.22$  à  $10 \mu\text{m}$  [4], l'énergie associe à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4 \mu\text{m}$ ).
- 47 % dans la bande visibles ( $0.4$  à  $0.8 \mu\text{m}$ ).
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $> 0.8 \mu\text{m}$ ).

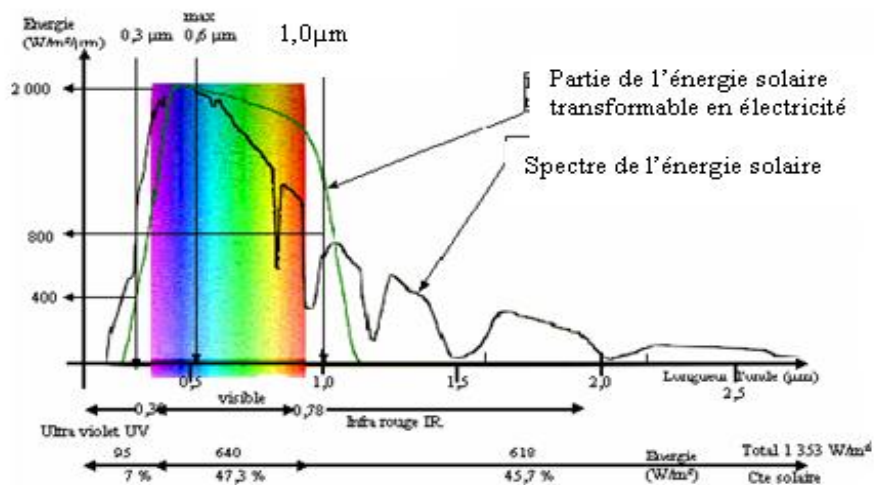


Fig (1-1) : Réponse spectrale d'une cellule (PV), [4]

Au cours de ces dix dernières années ce spectre à été homologués par l'organisation international de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.).

### I-3 – DÉCLINAISON DU SOLEIL :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre [5], sa valeur en degré est donné par la relation de Cooper suivante :

$$d = 23.45 \cdot \sin \left[ 2p \cdot \left( \frac{284 + j}{365} \right) \right] \quad (1-1)$$

Où  $j$  : est le numéro d'ordre du jour de l'année (  $n=1$  pour le 1<sup>er</sup> Janvier,  $n=32$  pour le 1<sup>er</sup> Février,...etc.)

La déclinaison varie entre  $-23,45^\circ$  le 21 décembre et  $+23,45^\circ$  le 21 juin.

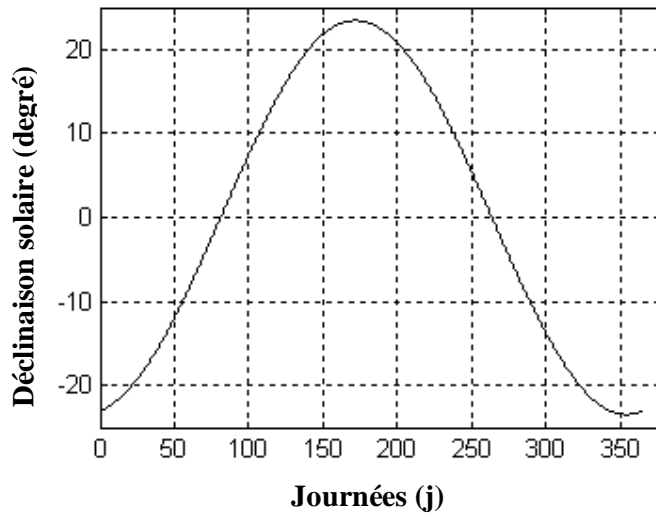


Fig (1-2) : Courbe de déclinaison du soleil

### I- 4 - MODÈLE SIMPLIFIÉ DE L'ÉCLAIREMENT :

Selon [6], [7] la quantification de l'éclairement incident pour une journée est donnée par une expression mathématique qui s'écrit comme suit :

$$E = E_m \sin \left[ \frac{p(t-t_0)}{12} \right] \quad (1-2)$$

$E_m$  : L'éclairement maximale du site ( $W/m^2$ ).

$t$  : Temps solaire en heure.

$t_0$  : temps de la levée du soleil ( $6^h$ ).

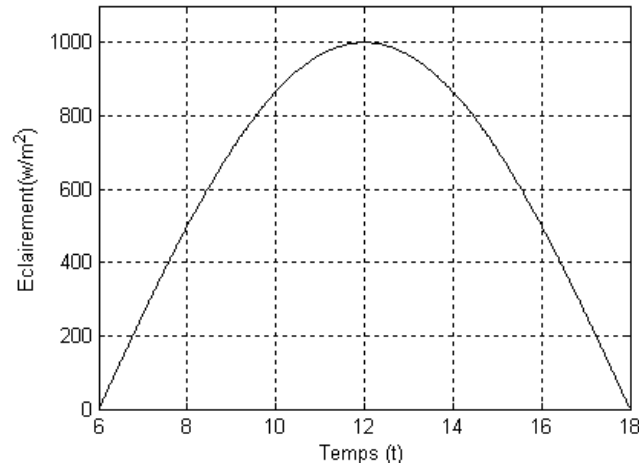


Fig (1-3) : Évaluation de rayonnement solaire en fonction de temps

### I - 5 - HISTORIQUE DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE:

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

### I - 6 -PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

La figure 2.1 illustre une cellule PV typique.

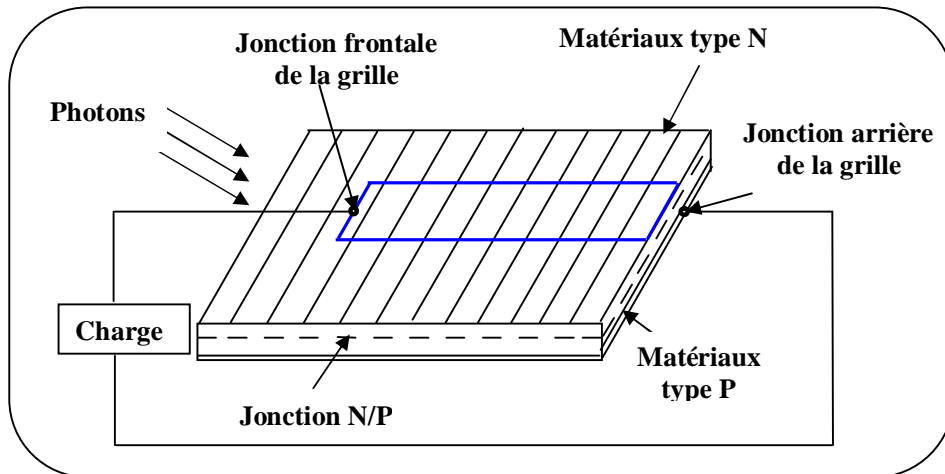


Fig (1-4) : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque [06]

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert  $V_{OC}$ . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit  $I_{SC}$  et dépend fortement du niveau d'éclairement.

### I - 7 - TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur

- durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.
- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologies des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant (d'après Total énergie<sup>1</sup> revue du 9 Juillet 2006)

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	théorique	en labo.	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Cadmium CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

**Tableau 1 - Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques**

---

<sup>1</sup> [www.total-energie.fr](http://www.total-energie.fr)

## **I - 8 -ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUES :**

Les générateurs photovoltaïques sont par leur nature des systèmes non linéaires. Ils font l'objet des grandes variations environnementales qui influent sur leur fonctionnement qui sont spécialement l'éclairement (l'insolation) et la température de la cellule.

La première génération des systèmes photovoltaïques utilisée pour le pompage constitué d'un générateur et une charge seulement correspond à un couplage direct, c'est le couplage le plus simple à réaliser et le moins coûteux. [8]

**Appelbaum** [9] a analysé le comportement dynamique d'un moteur à courant continu alimenté par un générateur photovoltaïque : le moteur à commencer à tourner seulement pour un niveau élevée d'insolation.

**Roger** [10] a montré qu'un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge représente un choix acceptable et qu'un moteur à aimant permanent est considéré comme le meilleur actionneur électrique pour le pompage photovoltaïque.

**Anis** [11] a reporté qu'un moteur à courant continu entraînant une pompe volumétrique représente un mauvais choix pour le pompage photovoltaïque, parce que le moteur conduisant la pompe volumétrique demande un courant presque constant.

La puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) pour différents niveaux d'éclairement correspond aux valeurs optimales du courant et la tension ; le moteur à un niveau donné absorbe une puissance qui ne correspond pas à la puissance maximale du GPV, généralement cette puissance peut même être très inférieure à la puissance maximale du GPV, alors une optimisation est nécessaire pour une bonne exploitation de l'énergie photovoltaïque pour différents niveaux d'éclairement.

**Benlarbi et al** [12] ont effectuée une optimisation du rendement globale du système par l'intégration entre l'onduleur et le panneau solaire d'un hacheur dévolteur survolteur qui garanti l'alimentation de l'onduleur avec les valeurs optimales du courant et de la tension obtenue en agissant sur le rapport cyclique du hacheur sur une machine DC ; MSAP ; MAS ont montrées que la quantité d'eau pompée avec l'utilisation d'une MSAP est meilleures par rapport aux autres machines.

L'application des systèmes photovoltaïques n'est pas limité au système isolé, mais peut être utilisée localement au niveau domestique. Dans ce cas une optimisation d'utilisation d'énergie est indispensable car il est nécessaire de faire un choix optimal sur la source à utiliser : réseau, batterie ou panneau solaire. De plus, dans le cas d'excès d'énergie produite à travers la conversion photovoltaïque, cette dernière peut être injecté au réseau dans le but d'optimiser de

tels systèmes pour assurer un fonctionnement optimal de l'ensemble.

De plus, de nouvelles techniques sont utilisées actuellement, basées sur l'intelligence artificielle telle que les réseaux neurones et la logique floue. Elles ont été appliquées pour optimiser les systèmes de pompage photovoltaïque.

Généralement, le générateur solaire est fixe, mais il peut être orientable pour les régions où le flux lumineux est faible. L'orientation des panneaux est assurée soit manuellement, soit commandé par un circuit électronique ; le principe réside dans la poursuite du mouvement du soleil. Cette idée a donné naissance à une nouvelle procédure d'optimisation.

### I – 9 - DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES PV :

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :[4], [13]

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.
- une source auxiliaire d'appoints.

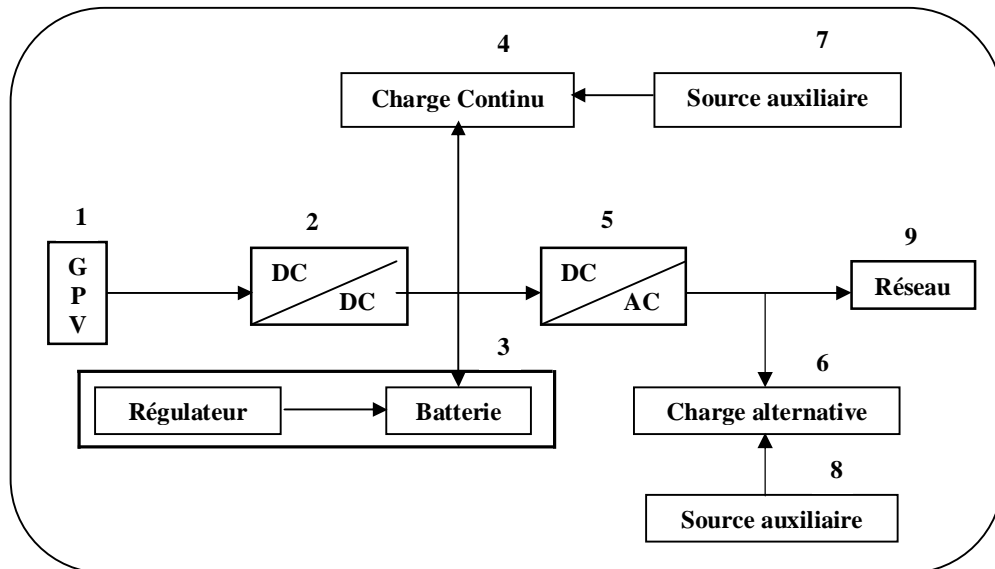


Fig (1.5) : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque

#### I – 9 -1- Système autonome sans batterie :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.



**I – 9 - 2- Système autonome avec batterie :**

Ces systèmes sont représentés par les blocs [(1), (3), (4)] dans le cas où la charge est de type continu et les blocs [(1), (3), (5), (6)] si la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

**I – 9 - 3 - Système fonctionnant au fil du soleil :**

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue [(1), (2), (4)]. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit [(1), (5), (6)].

**I – 9 - 4 - Système avec appoint électrique :**

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électrique (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7)] et [(1),(2),(3),(4),(7),(9)] ; ou de type alternatif [(1),(2),(3),(5),(6),(8)] et [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)]. Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie.

**I - 10 - CONSTITUTION D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE :**

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable ; ses performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements (onduleur, moteur, pompe,...)

Le schéma général d'un système de pompage photovoltaïque étudié dans cette mémoire est le suivant

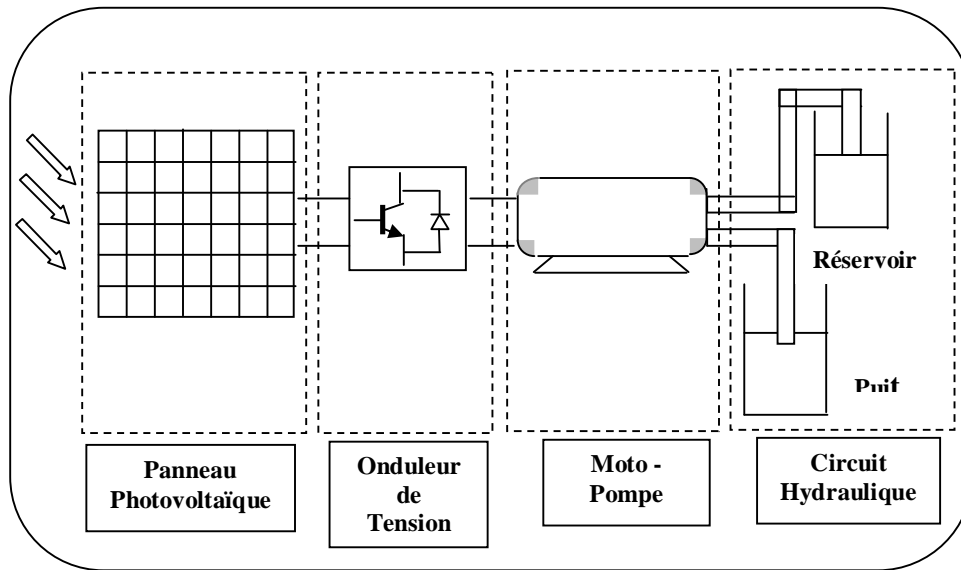


Fig (1-6) Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque

### I - 10 -1 - Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque représente la source de l'énergie électrique actionnant le moteur pompe. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux, les modules utilisés sont de type poly cristallin (*BP 83*), dont les caractéristiques sont données dans l'annexe A. La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules séries  $N_s$  et d'un nombre de modules parallèles  $N_p$ .

En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes peuvent être assemblés pour constituer le champ (générateur) photovoltaïque. Le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque est caractérisé par :

$$I_{G_{PV}} = N_p \times I \quad (1-3)$$

$$V_{G_{PV}} = N_s \times V \quad (1-4)$$

$I_{G_{PV}}$ ,  $V_{G_{PV}}$  est le courant et la tension du générateur photovoltaïque et  $N_p$ ,  $N_s$  sont les nombres des modules en parallèle et en série.

### I - 10 -2 - Moteur d'entraînement :

Le choix du type du moteur dépend de plusieurs facteurs tels que fiabilité, support technique, prix,...etc.

- un moteur à courant continu est généralement plus efficace est plus facile à utiliser avec un système photovoltaïque (pas besoin d'onduleurs), par contre il est plus cher et plus difficile à trouver sur le marché.

- Un moteur à courant alternatif est moins cher et plus facile à le trouver sur le marché, mais Il exige l'utilisation d'un onduleur pour fonctionner avec une alimentation photovoltaïque.

Dans ce mémoire on a utilisé un moteur synchrone à aimant permanent qui est de plus en plus utilisé dans diverses applications telles que les machines outils, la robotique, les ventilateurs et le pompage photovoltaïque, grâce au développement de l'électronique de puissance et des matériaux magnétiques et aussi à l'avantage des aimants permanent qui ont remplacés le rotor bobiné. Ce qui a permis à la machine synchrone à aimant permanent d'avoir un bon rendement par rapport à la machine asynchrone où à courant continu, [14].

La machine synchrone à aimant permanent est constituée de deux parties, l'une est la partie fixe qui est le stator et l'autre partie mobile qui est l'aimant permanent

#### **I - 10 -3 - Pompe de refoulement :**

Le MSAP (Moteur Synchrone à Aimant Permanent) est couplé avec une pompe centrifuge car ce type de pompe offre une adaptation convenable aux systèmes PV. et qui sont actuellement les plus utilisées pour les problèmes d'élévation d'eau.

#### **I - 10 - 4 - Circuit hydraulique :**

Dans un système de pompage le niveau d'eau à l'intérieur du puit ne reste pas constant, il change selon la quantité d'eau pompée. La différence entre le niveau d'eau statique est le niveau d'eau instantanée affecté par le pompage (niveau dynamique ) s'appelle la hauteur dynamique.

le système hydraulique est constitué d'un puit, de canalisations et d'un réservoir.

#### **I - 11 - AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE SOLAIRE :**

Les systèmes photovoltaïques présentent un grands nombres d'avantages et d'inconvénients qui sont : [15]

##### **I – 11 -1- Avantage :**

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

**I - 11 -2- Inconvénients :**

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

**I – 12 - CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons présenté : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque, ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques. Et enfin on a présenté le système de pompage photovoltaïque étudié dans cette mémoire qui est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur synchrone à aimant permanent, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

## *Générateur Photovoltaïque*

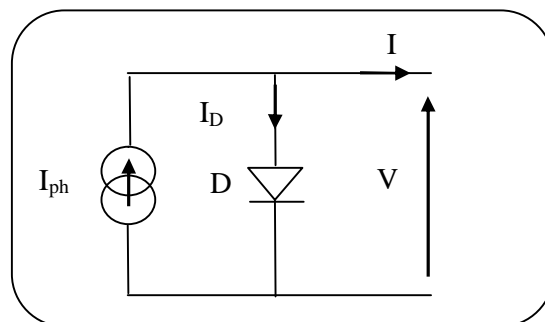
### II-1 - INTRODUCTION :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée cellule PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui à une caractéristique statique courant tension  $I-V$  non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la tension de la cellule. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit  $I_{SC}$  et la tension en circuit ouvert  $V_{OC}$ . La détermination du point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté, il est plus ou moins éloigné du PPM caractérisé par le courant et la tension optimaux, notées  $(I_{mp}; V_{mp})$ .

Dans ce chapitre, nous allons tenter de définir un modèle s'appliquant aux cellules photovoltaïques, la détermination de ses paramètres se fera sur bases de données fournies par le constructeur de panneaux

### II - 2 - MODÈLE D'UNE CELLULE SOLAIRE IDÉALE :

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n).



**Fig (2-2) : schéma idéale d'une cellule photovoltaïque**

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2-1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (2-2)$$

### II- 3 - MODÈLE D'UNE CELLULE SOLAIRE RÉELLE :

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

Rauschenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvés que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant les significations liées aux phénomènes physiques de la cellule.

Rauschenbach (1980) et Green (1981) ont passé en revue plusieurs circuits équivalents et ils ont recommandé l'utilisation de circuit d'une seule diode à quatre paramètres.

Roger (1984), Appelbaum (1987), Ekstein (1990), Duffie et Beckmann (1991) et Alghuwainem (1992) ont employés le modèle à quatre paramètres.

Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques rencontrées dans la littérature.

#### II- 3 -1 - Modèle à une diode (à une seule exponentielle) :

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

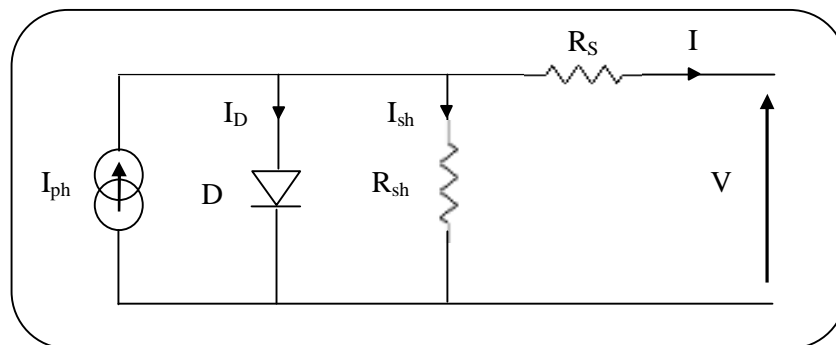


Fig ( 2-3) schéma équivalent d'une cellule solaire

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I-V$  de la photopile:

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (2-3)$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2-4)$$

$$= I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - \left( \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (2-5)$$

### II- 3 -2 - Modèle à une diode sans résistance shunt :

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. La figure (2-4) illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode.

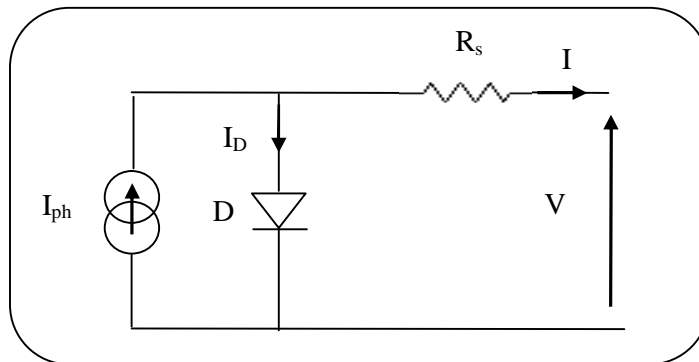


Fig (2-4) : schéma équivalent à une diode sans résistance shunt

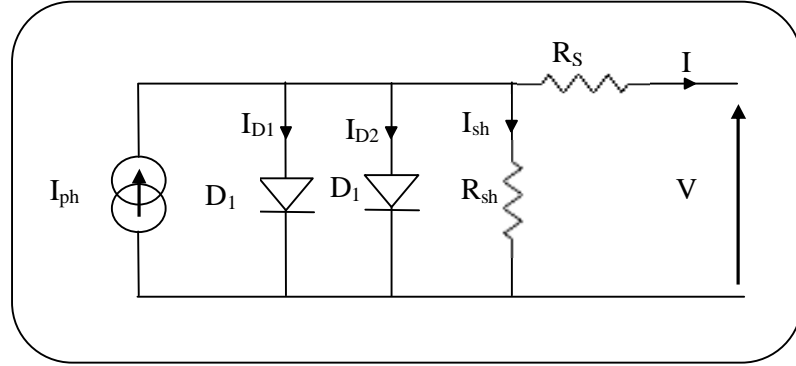
Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2-6)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (2-7)$$

**II - 3 -3 - Modèle à deux diodes (à deux exponentielles):**

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (fig. 2-5), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.



**Fig(2-5) : schéma équivalent à deux diodes**

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (2-8)$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (2-9)$$

$$I_{D2} = I_{02} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (2-10)$$

Avec :  $I_{01}, I_{02}$  courant de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2-11)$$

**II - 3 - 4 - Modèle à deux diodes sans résistance shunt :**

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (fig. 2-6), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.



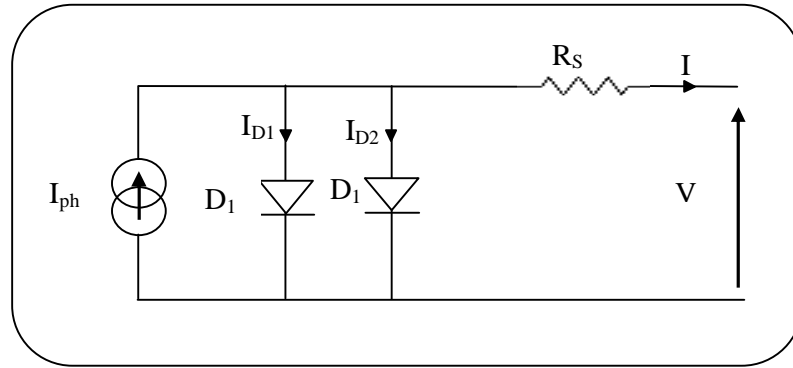


Fig : (2-6) schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \quad (2-12)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} \right] \quad (2-13)$$

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres (fig2-7).

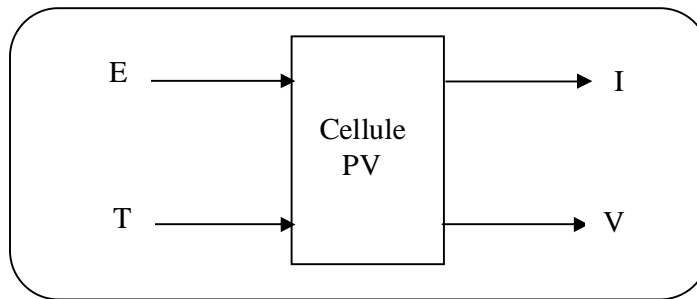


Fig (2-7) : schéma bloc d'une cellule PV

avec deux variables d'entrée :

$E$  : ensoleillement dans le plan de la cellule ( $W/m^2$ ).

$T$  : température de la cellule ( $^{\circ}C$ ).

et deux variables de sortie :

$I$  : intensité de courant fournie par la cellule (A).

$V$  : tension aux bornes de la cellule.

#### II – 4 - CARACTÉRISTIQUE I-V :

Des nombreux constructeurs offrent une gamme importante des modules solaires, on prend l'exemple d'un panneau MSX 83 avec une puissance de 83 W. La figure (2-8) représente la caractéristique tension – courant tracée pour un éclairement  $E=1000 \text{ W} / \text{m}^2$  et une température ambiante  $T = 25^{\circ}\text{C}$ .

On constate que la caractéristique de la cellule se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension constant dans la partie verticale, on note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale.

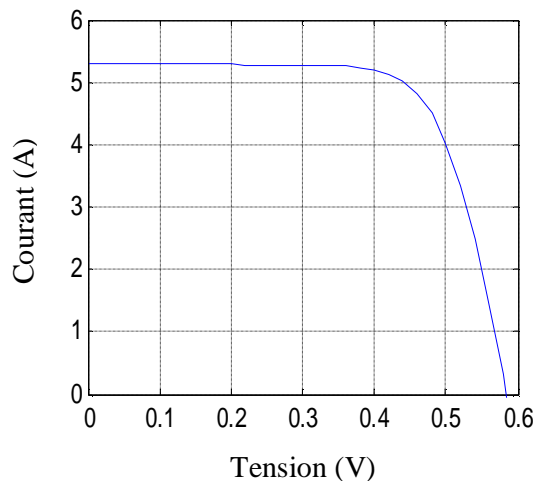


Fig (2-8) : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque

#### II - 5 - CONSTITUTION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :

Une cellule photovoltaïque seule est souvent peu utilisable ; son faible épaisseur la rend très fragile et elle produit une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W, avec une tension de moins de 1V. Ainsi pour accroître la puissance, on assemble ces cellules soit en série, soit en parallèle.

Les cellules sont assemblées pour former un GPV élémentaire (module photovoltaïque). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant (fig.2-9)

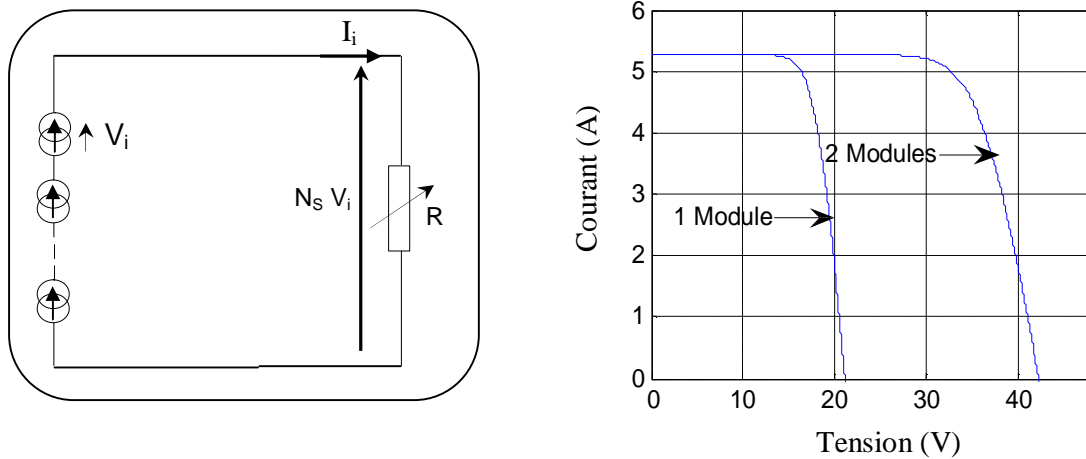


Fig (2.9) : Groupement des cellules PV en série

Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension (fig.2-10).

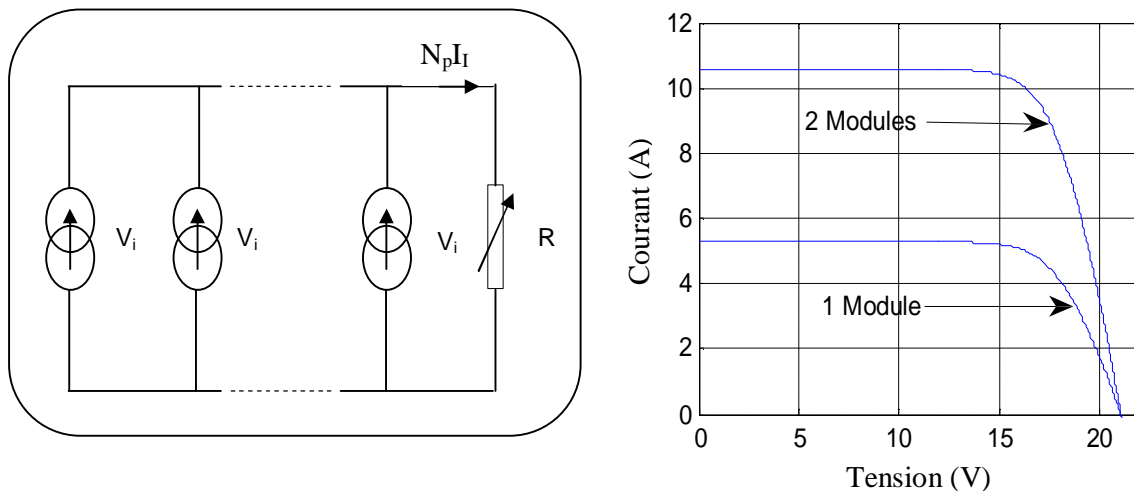


Fig (2.10) : Groupement des cellules en série- parallèle

La plupart des panneaux PV commercialisés sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ses sous réseaux est lui même constitué d'un groupe de cellules PV connectées en série. Le nombre de cellules par sous réseaux est un compromis économiques entre protection et pertes d'une partie importantes du GPV en cas de défaut partiel. La figure (2-11) montre le schématique classique adopté pour un GPV élémentaire ; le fonctionnement traditionnel comprend la connexion d'une diode by-pass et une diode anti-retour.

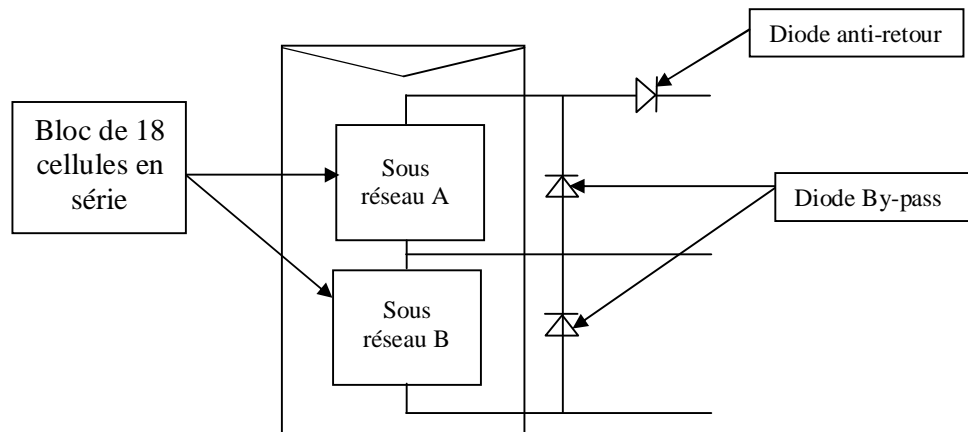


Fig (2-11) : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour

La diode anti-retour est utilisée pour éviter les courants inverses et la diode By-pass n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble.

L'ensemble des cellules doit être encapsulé sous verre ou sous composé plastique. L'ensemble est appelé module photovoltaïque. Un module est souvent constitué de 36 ou 72 cellules, et l'ensemble des modules photovoltaïques est appelé champ photovoltaïque.

## II – 6 - CARACTÉRISTIQUE D'UN GPV ÉLÉMENTAIRE :

On décrit un GPV élémentaire par les paramètres suivants:

- **La puissance de crête  $P_c$**  : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000\text{ W/m}^2$ ),
- **la tension à vide  $V_{OC}$**  : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ",
- **le courant de court-circuit  $I_{SC}$**  : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ",
- **le point de fonctionnement optimum,  $(V_{mp}, I_{mp})$**  : lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_{mp} \times I_{mp}$
- **le rendement** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente,
- **le facteur de forme** : rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

## II- 7 – PROTECTION D’UN GPV :

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

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

## II - 8 - MODÉLISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l’énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable. Le générateur photovoltaïque est un ensemble de modules connectés série/parallèle afin d’obtenir une puissance et une tension désirées. L’élément de base est la cellule solaire (rappelons que le modèle en une seule exponentielle est non linéaire et implicite), donc une solution itérative sera déterminée par la méthode de Newton-Raphson., ainsi la connaissance des données fournies par le constructeur sont nécessaire. [10], [11].

Le circuit est composé d’un courant photodiode, une résistance série  $R_s$  plus faible et une diode (Fig. 2- 4).

Les caractéristiques d’une cellule photovoltaïque sont données par les relations suivantes :  
La relation entre la tension  $V$  et le courant  $I$  est donnée par la relation suivante :

Appliquons la première loi de Kirschhoff :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2-14)$$

Avec  $I_{ph}$ ,  $I_D$ ,  $I$  le courant photonique, le courant de la diode et le courant de fonctionnement, qui dépendent du rayonnement solaire et de la température des cellules.

$$I_D = I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{nKT}} - 1 \right] \quad (2-15)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (2-16)$$

avec :

$q$ : charge de l’électron  $e=1.6 \times 10^{-19}$  coulomb.

$T$  : température de la cellule (Kelvin).

$R_s$  : résistance série de la cellule ( $\Omega$ ).

$K$  : constante de Boltzmann ( $K=1.3854 * 10^{-23}$  J/K).

$A$  : facteur de qualité de la diode.

$I_{ph}$  : courant photonique de la diode qui est donnée par la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{ph(T_1)} [1 + K_0 \times (T - T_1)] \quad (2-17)$$

avec :

$$I_{ph(T_1)} = \frac{E}{E_{ref}} \times I_{sc}(T_1) \quad (2-18)$$

et :

$$K_0 = \frac{I_{sc(T_2)} - I_{sc(T_1)}}{T_2 - T_1} \quad (2-19)$$

$I_0$  : courant de saturation de la diode (A), donné par la relation suivante :

$$I_0 = I_{0(T_1)} \times \left( \frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} \times e^{\frac{-qV_g}{A \cdot K \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)}} \quad (2-20)$$

$$I_{0(T_1)} = \frac{I_{cc}(T_1)}{e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{A \cdot K \cdot T_1} - 1}} \quad (2-21)$$

$V_{oc}$  est la tension du circuit ouvert de la cellule et  $V_g$  et la tension de seuil de la diode (1.12 eV).

La résistance série se calcule de la façon suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{A K T}} - 1 \right]$$

$$dI = 0 - I_0 \cdot q \cdot \left( \frac{dV + R_s \cdot dI}{A \cdot K \cdot T} \right) \cdot e^{q \left( \frac{V + R_s \cdot I}{A \cdot K \cdot T} \right)} \quad (2-22)$$

$$R_s = - \frac{dI}{dV} - \frac{A \cdot K \cdot T / q}{I_0 \cdot e^{q \left( \frac{V + R_s \cdot I}{A \cdot K \cdot T} \right)}}$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} - \frac{A \cdot K \cdot T / q}{I_0 \cdot e^{\frac{qV_{oc}}{A \cdot K \cdot T}}} \quad (2-23)$$

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées en utilisant les données de fabricants de panneaux photovoltaïques.

La méthode choisie pour la simulation de ce modèle est la méthode de Newton Raphson qui est décrit comme suit :

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

$f'(x)$  est la dérivée de la fonction  $f(x) = 0$ .

D'après l'équation (2-16) :

$$f(I) = I - I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right] = 0$$

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} \right)}{-1 - I_0 \left( \frac{q \cdot R_S}{AKT} \right) \cdot e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}}}$$

Le module BP MSX83 de BP Solar (Annexe 1) sera utilisé pour illustrer et vérifier le modèle. La photo courant est directement proportionnelle à l'éclairement.

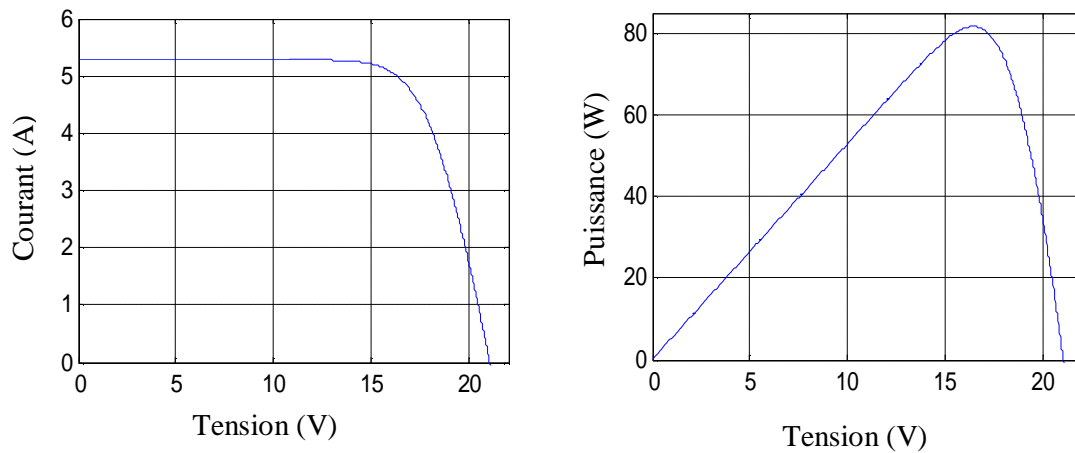
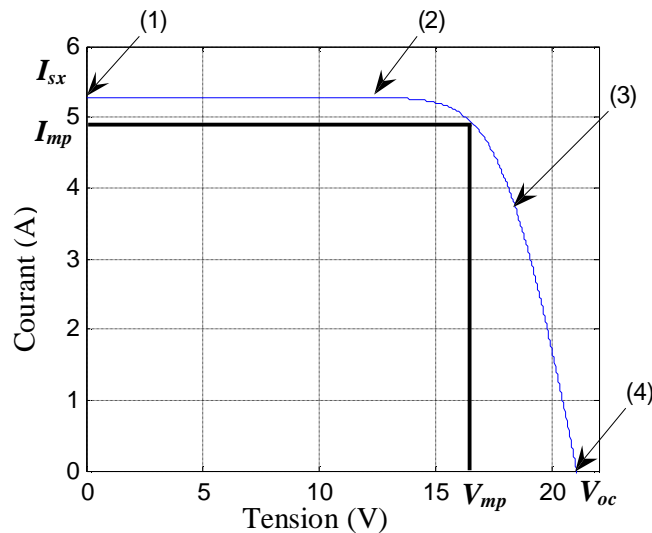


Fig (2-12) : caractéristique I (V) et P (V) à T=25°C et E=1000W/m<sup>2</sup>

Dont les points de fonctionnement caractéristiques sont



Fig(2-13)- Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque

- $V_{oc}$  : Tension à circuit,
- $I_{sc}$  : courant de court-circuit.
- $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$  : le point de fonctionnement optimal.

Et les différentes zones de fonctionnement sont les suivantes :

- Zone 1 – 2 : fonctionnement en générateur de tension.
- Zone 2 – 3 : zone préféré pour le fonctionnement du module, le point de fonctionnement optimal défini par le courant  $I_{mp}$  et la tension  $V_{mp}$  est celui où le module délivre sa puissance maximale.
- zone 3- 4 : fonctionnement en générateur de courant constant proportionnel à l'éclairement.

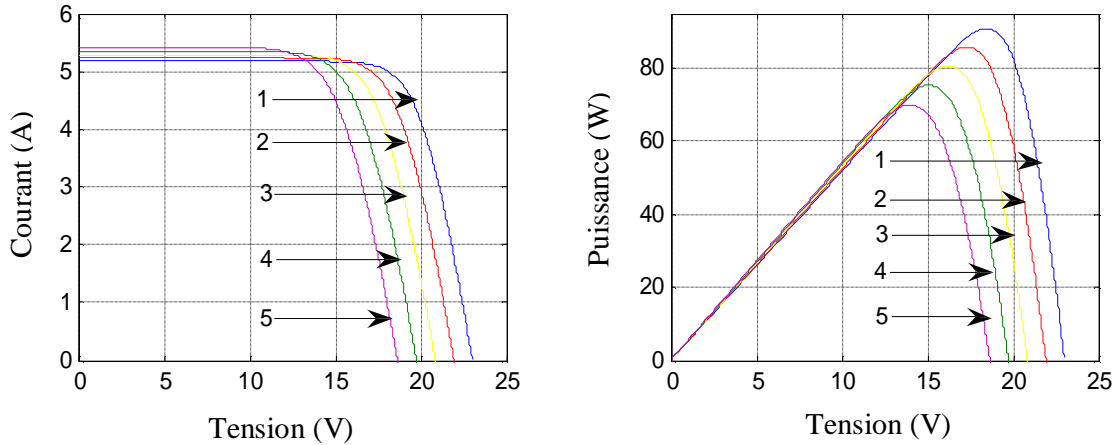
Pour confronter un peu plus notre modèle à la réalité, il est nécessaire d'étudier comment certains paramètres, tels que le rayonnement reçu, ou la température de jonction vont influencer la caractéristique courant tension.

### II - 8 - 1 - Influence de l'éclairement et la température :

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant pour différentes températures (fig 2-14). La courbe caractéristique va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du

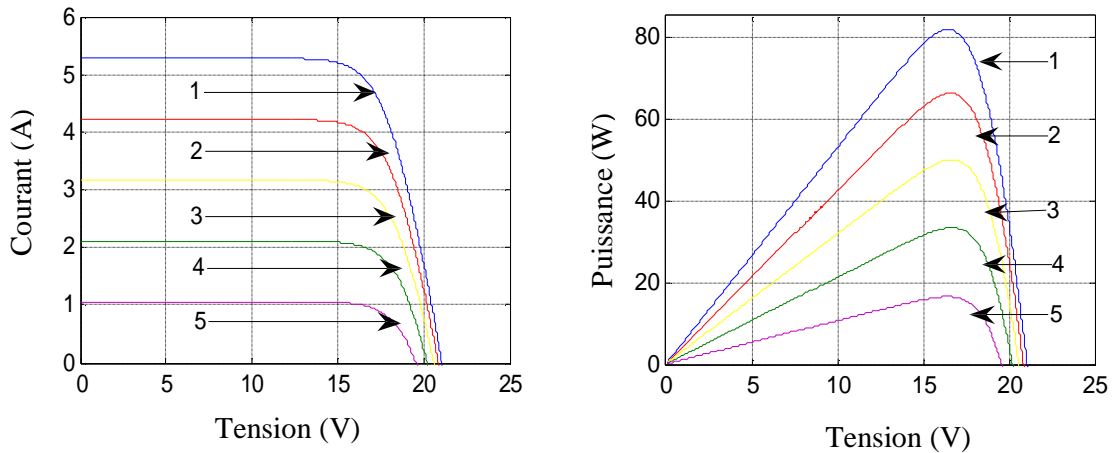


courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par une cellule va donc varier très légèrement avec la température de jonction.



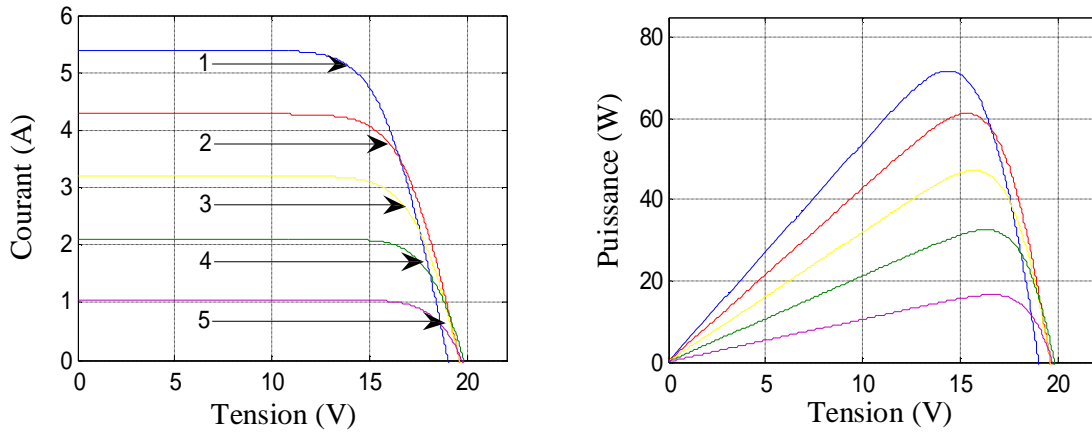
**fig(2-14) : Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à  $E=1000W/m^2$**   
 (1):  $0^\circ C$  ; (2):  $15^\circ C$  ; (3):  $30^\circ C$  ; (4):  $45^\circ C$  ; (5):  $60^\circ C$ .

Par contre, lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclairements (fig. 2-15), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) est une fonction logarithmique.



**Fig. (2-15) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à  $T=25^\circ C$**   
 (1) :  $1000W/m^2$  ; (2) :  $800W/m^2$  ; (3) :  $600W/m^2$  ; (4) :  $400W/m^2$  ; (5) :  $200W/m^2$ .

La variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert  $V_{OC}$  qui n'est pas remarquable, par contre il y a une grande variation du courant  $I_{SC}$  comme le montre la figure (2-16).



fig(2-16) Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique I(V)

(1) :1000W/m<sup>2</sup>, 55°C ; (2) :800W/m<sup>2</sup>, 44°C ; (3) :600W/m<sup>2</sup>, 40°C ; (4) :400W/m<sup>2</sup>, 32°C ; (5) :200W/m<sup>2</sup>, 25°C .

### II - 8 - 2 - Recherche du point optimal de fonctionnement

Cette caractéristique permet d'obtenir le point optimal de fonctionnement du modèle et de calculer la puissance maximale du module photovoltaïque.

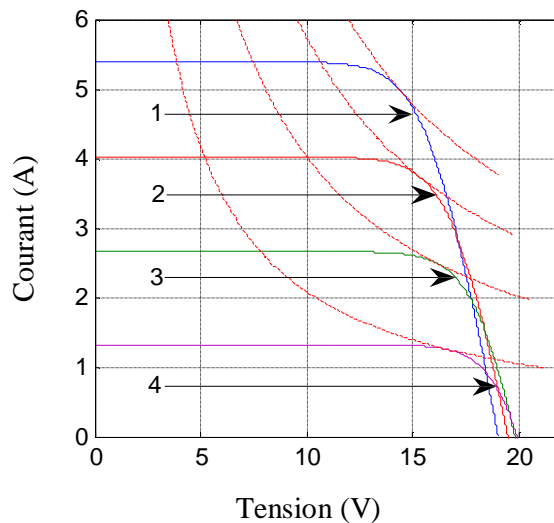


Figure 2-26 : Caractéristiques courant-tension et puissances optimales.

(1) :1000W/m<sup>2</sup>, 55°C ; (2) :750W/m<sup>2</sup>, 45°C ; (3) :500W/m<sup>2</sup>, 35 °C ; (4) :250W/m<sup>2</sup>, 25°C .

Le rendement est le rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente [12].

$$h_{PV} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{E \cdot S_m} \quad (2-24)$$

$S_m$  et la surface du panneau photovoltaïque.

Le rendement du module photovoltaïque dans les conditions standard ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$ ), et de 14.22 %

Le tableau suivant donne la valeur de la puissance nominale calculée en fonction du rayonnement ainsi que la rendement :

Rayonnement [ $\text{W/m}^2$ ]	Température [ $^\circ\text{C}$ ]	Puissance optimale [W]	Rendement
1000	55	71.7672	12.04
750	45	57.3079	12.82
500	35	40.2689	13.51
250	25	20.8519	13.99

Tableau 2-2 : Rendement du module photovoltaïque MSX60.

Nous obtenons un rendement un peu supérieur à 10%, qui diminue avec l'intensité du rayonnement mais augmente avec la diminution de la température.

### II - 8 - 3 - Influence de la résistance série :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsque elle augmente elle diminue la valeur de courant de court circuit  $I_{sc}$  (Fig. 2-17)

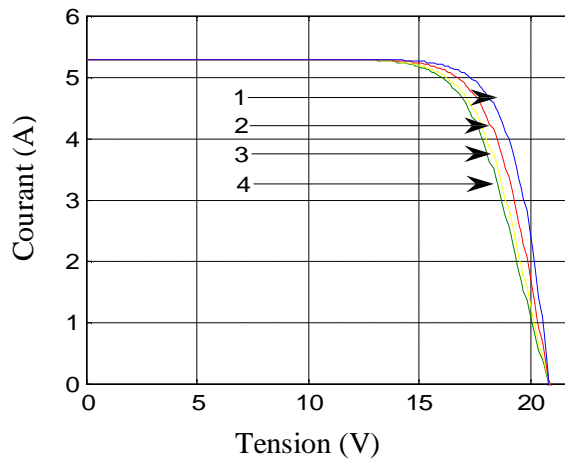
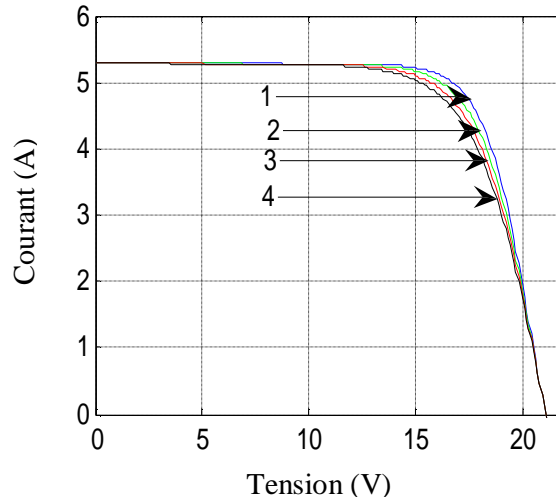


Fig. (2-17) Influence de  $R_s$  sur la caractéristique  $I(V)$  à  $T=25^\circ\text{C}$  et  $E=1000\text{W/m}^2$   
 (1) :  $0.002\Omega$  ; (2) :  $0.008\Omega$  ; (3) :  $0.015\Omega$ ; (4) :  $0.02\Omega$ .

**II - 8 - 4 - Influence du facteur de qualité :**

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur la point de puissance maximale et conduit à une perte de puissance au niveau de la zone de fonctionnement (Fig. 2-18).



**Fig. (2-18) Influence de facteur de qualité sur la caractéristique I (V)**  
 (1) : 1.2 ; (2) : 1.4 ; (3) : 1.6 ; (4) : 1.8.

**II – 9 – CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons présente des différents modèles (à une seule exponentielle et celui en double exponentielle) caractérisant les cellules photovoltaïques, ce qui nous à permis de modéliser et simuler le modèle en une seule exponentielle (sans la résistance shunt) en fonction de l'éclairement et la température. Ceci va nous permettre d'estimer la puissance fournie par une installation photovoltaïque.

## *Modélisation du système moto-pompe*

### **III-1-INTRODUCTION :**

Pour qu'une pompe fonctionne il faut un entraînement qui produit sa rotation, le choix de l'entraînement de la pompe de plusieurs facteurs tels que le type de la pompe, la puissance et son application. Principalement on rencontre deux familles des moteurs qui sont actuellement les plus utilisées pour l'application de pompage photovoltaïque.

- Les moteurs à courant continu.
- Les moteurs asynchrones à cage d'écureuils.

Les moteurs à courant continu présentent un choix attirant à cause de leur simplicité, les modules photovoltaïques produisent directement du courant continu donc on a pas besoin d'un onduleur, cependant la présence du collecteur et des balais a toujours été le point faible de la MCC, ce commutateur mécanique limite la puissance et la vitesse et ils demandent beaucoup d'entretien et les balais se détériorent avec le temps, sachant que la durée de vie des balais est approximativement 1000 h pour un fonctionnement nominale.

Pour le pompage photovoltaïque, il faut un onduleur pour commander la vitesse ceci apporte un coût supplémentaires, mais l'utilisation d'un onduleur avec le moteur asynchrone conduit pratiquement aux mêmes prix qu'avec l'utilisation d'un moteur à courant continu.

### **III-2-MACHINES SYNCHRONES :**

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

On appelle machine synchrone une machine dont la vitesse de rotation est liée à la fréquence du réseau  $f$  et par le nombre de paire de pôles par la relation suivante:

$$n = \frac{60.f}{p}$$

$n$ ,  $f$  et  $p$  représentent respectivement la Vitesse de rotation (tr/mn), la fréquence du réseau (Hz) et le Nombre de paire de pôles de la MSAP.

### **III-2-1- Les différents types de machines synchrones :**

Il existe trois catégories de machines synchrones [19] :

#### **III-2-1-1- Les machines synchrones à rotor bobiné :**

Elle font appel le plus souvent à une excitatrice associée à un redresseur tournant pour éliminer tout contact glissant, le rotor peut être à pôles lisses ou à pôles saillants et généralement équipé de circuits amortisseurs, pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse, on utilise un rotor cylindrique massif.

#### **III-2-1-2- Les machines synchrones à réluctance :**

Elles sont employées dans un certain nombre d'applications particulières où la simplicité de constitution est un avantage. Leur inconvénient est la faiblesse inhérente de leur facteur de puissance qui implique un surdimensionnement systématique des convertisseurs statiques.

#### **III-2-1-3- Les machines synchrones à aimants permanents :**

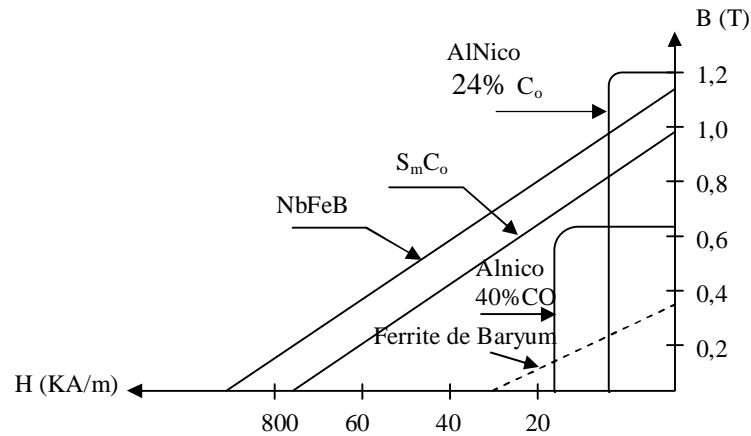
La machine synchrone est devenue attractive est concurrentes de la machines asynchrone dans les domaines des systèmes d'entraînement électrique à cause de son avantage qui est l'élimination des pertes par glissement, la machine synchrone à aimant permanent est utilisés dans plusieurs application comme la robotique, les machines outils et les véhicules électrique, cette large utilisation est devenue possible avec les hautes performances des aimants permanent.

Dans les machines synchrones à aimant permanent, l'inducteur est remplacé par des aimants, le champ d'excitation est crée par les aimants, ceci représente aussi l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique, ce qui donne un rendement élevé, et n'exige aucun entretien pendant toute la durée de vie.

Les performances élevée et les avantages qui présentent les aimants permanent (induction de saturation et champ coercitif plus élevée, faible désaimantation) font que ces derniers soit l'élément de base de la machine synchrone à aimant permanent

Il y a fondamentalement quatre types différents d'aimants permanents, qui sont utilisés [20] :

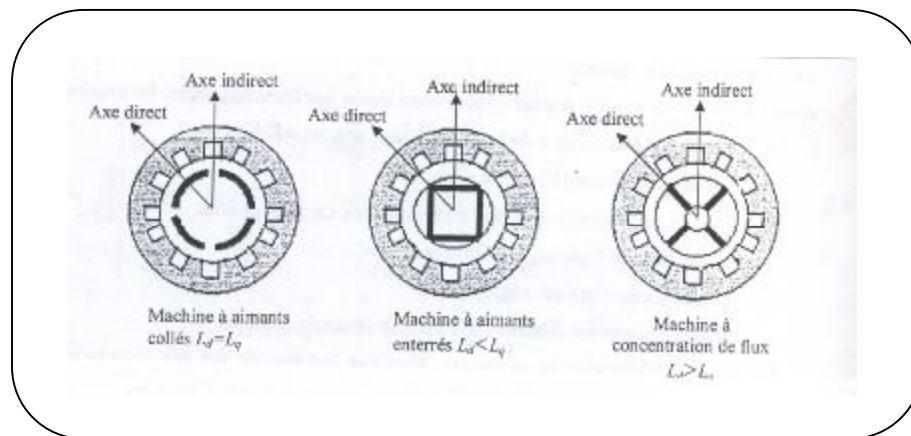
- les ferrites
- Les ALNiCo, qui sont des alliages d'Aluminium, Fer, Cobalt.
- Les aimants de type Samarium/Cobalt.(SmCo) ;
- Les aimants Néodyme/Fer/Bore (NdFeb).



fig(3-1) : Courbe B(H) des différents types des aimants permanents [20]

L'évolution des aimants de terre rare sous forme de samarium/cobalt vers la fin des années 60 et de néodyme/fer/bore au début des années 80 a révolutionné la taille et l'exécution des moteurs électriques.

Les aimants peuvent être directement collés sur le rotor (machines à aimant collés) ou enterrés (machines à aimant enterrés) et les machines à concentration de flux [21]



fig(3-2) : Différents types de la machine synchrone à aimant permanent [21]

Dans les machines à aimant collés l'inductance de l'axe directe est égale à l'inductance de l'axe indirecte à cause de l'isotropie existant dans la machine, par contre dans les machines à aimant enterrés et les machines à concentration de flux et à cause de l'épaisseur des aimants de l'entrefer sur l'axe direct est plus grand que celle sur l'axe indirect l'inductance de l'axe directe est inférieure à l'inductance de l'axe indirecte.

### III-2-2-Modèle mathématique de la MSAP :

#### III-2-2-1- Hypothèses simplificatrices :

Compte tenu de la complexité des équations du modèle complet dont les paramètres sont difficiles à déterminer du fait de la précision limitée des mesures et pour que nous puissions étudier la machine facilement, nous considérons les hypothèses qui suivent que nous allons les respecter durant toute notre étude [22] ; [23] :

- . L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- . La distribution sinusoïdale de le FMM crée par les enroulements du stator.
- . L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- . L'effet d'encoche est négligeable.
- . La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

Le moteur synchrone à aimant permanent est représenté par la figure suivante ou a, b, c sont les axes des enroulements statorique et d est l'axe de l'enroulement rotorique. Dans cette configuration, l'axe direct "d" est dirigé selon l'axe magnétique de l'enroulement d'excitation ; l'autre axe "q" qui est en quadrature est en avance de  $p/2$  par rapport à l'axe "d".

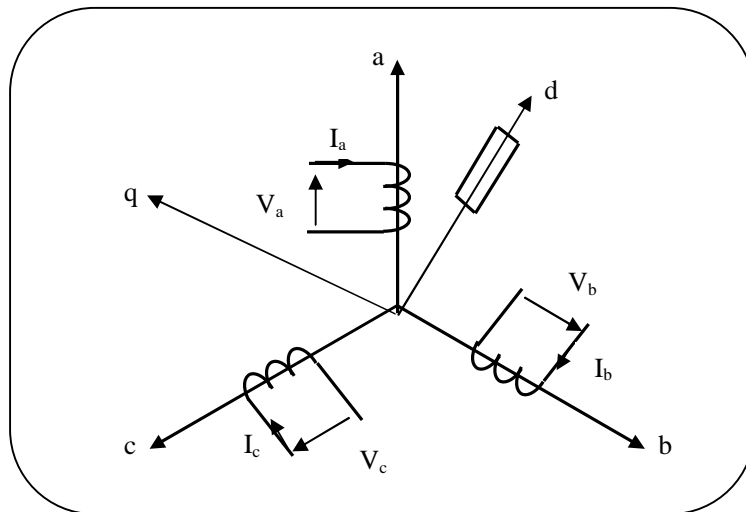


Fig : (3 -3) : schéma de la MSAP

#### III-2-2-2- Équations électriques :

D'après la figure (2-3), on donne les équations de la MSAP relative au stator

$$[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + \frac{d[\Psi_{abc}]}{dt} \quad (3-1)$$

$$[\Psi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [\Psi_{eabc}] \quad (3-2)$$



$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad [I_{abc}] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}; \quad [\Psi_{abc}] = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}; \quad [R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$V_{abc}$  ;  $I_{abc}$  et  $\Psi_{abc}$  représentent respectivement les tensions statorique, les courants statorique et les flux totaux produit par les courants statorique.

Pour simplifier le système d'équations on applique un changement de repère. Cette manipulation mathématique, transforme les trois bobines statorique fixes déphasées de  $2 \times p/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $p/2$  et situées sur le rotor la transformée de Park qui fait correspondre aux vecteurs réels (a, b, c) des vecteurs diphasé (d, q, 0), [24].

### III-2-2-3- Transformation de Park :

Lors de la description mathématique de la machine synchrone, nous avons vu qu'elle présente un système d'équations différentielles à coefficients variables, Pour cela plusieurs travaux de recherche ont eu lieu. Tous ces travaux de recherche essayent de découpler certaines grandeurs et d'éliminer la variation des coefficients des équations différentielles qui régissent le comportement de la machine.

La transformation de Park conduit à un système d'équations différentielles à coefficients constants et elle fait correspondre aux variables réelles leurs composantes relatives par rapport aux axes direct d'indice "d", en quadrature d'indice "q" et homopolaire d'indice "o".

La transformé de park modifiée est définie par :

$$[P(q)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos q & \cos\left(q - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q + \frac{2p}{3}\right) \\ -\sin q & -\sin\left(q - \frac{2p}{3}\right) & -\sin\left(q + \frac{2p}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

La transformé de park inverse est :

$$[P(q)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos q & -\sin q & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(q - \frac{2p}{3}\right) & -\sin\left(q - \frac{2p}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(q + \frac{2p}{3}\right) & -\sin\left(q + \frac{2p}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$[X_{abc}] = [P(q)][X_{dq0}] \quad (3-5)$$

$$[X_{dq0}] = [P(q)]^{-1} \cdot [X_{abc}] \quad (3-6)$$

En utilisant les équations (2-11), (2-13), (2-14) dans (2-9) on aura :

$$[P(q)][V_{dq0}] = [P(q)][R][I_{dq0}] + \frac{d\{[P(q)][\Psi_{dq0}]\}}{dt} \quad (3-7)$$

En multipliant par  $[P(q)]^{-1}$  on aura :

$$[V_{dq0}] = [R][I_{dq0}] + [P(q)] \frac{d[\Psi_{dq0}]}{dt} + \frac{d[P(q)]^{-1}}{dt} [\Psi_{dq0}] \quad (3-8)$$

Après développement et simplification on trouve :

Équations électriques :

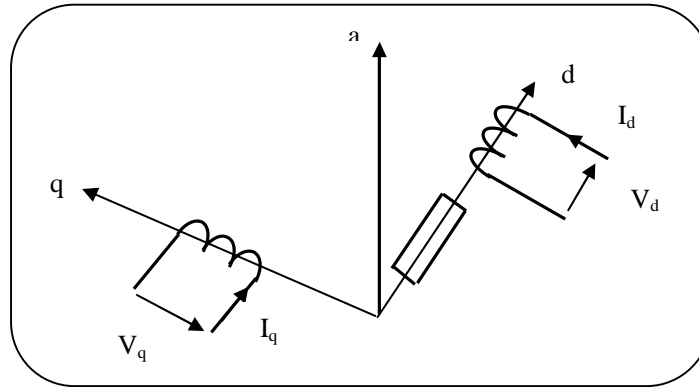
$$V_d = R.I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \frac{dq}{dt} \Psi_q \quad (3-9)$$

$$V_q = R.I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \frac{dq}{dt} \Psi_d \quad (3-10)$$

$$V_0 = R.I_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} \quad (3-11)$$

Dans le cas où le système est couplée en étoile est équilibrée  $I_a + I_b + I_c = 0$ .

La MSAP est étudiée dans le repère  $(dq)$  lié au rotor, sa représentation est comme suit :



fig(3 -4) schéma de la MSAP dans le repère (dq)

$$V_d = R.I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - w.\Psi_q \quad (3-12)$$

$$V_q = R.I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + w.\Psi_d \quad (3-13)$$

### III-2-2-4- Équations magnétiques :

Les équations des flux statorique s'écrivent dans le repère de Park comme suit :

$$\Psi_d = L_d \cdot I_d + \Psi_e \quad (3-14)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q \quad (3-15)$$

Donc le modèle de la MSAP peut s'écrire :

$$V_d = R \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q \cdot I_q \quad (3-16)$$

$$V_q = R \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega (L_d \cdot I_d + \Psi_e) \quad (3-17)$$

Sous forme matricielle on a :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q + j_e \cdot \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -L_q \cdot \omega \\ L_d \cdot \omega & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

Donc le modèle différentiel de la MSAP est :

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} [V_d - R \cdot I_d + \omega L_q \cdot I_q] \quad (3-19)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [V_q - R \cdot I_q - \omega (L_d \cdot I_d + \Psi_e)] \quad (3-20)$$

### III-2-2-5- Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique  $C_e$  est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor

$$C_e = \frac{dW_e}{dq_{geo}} = P \frac{dW_e}{dq_e} \quad (3-21)$$

$W_e$ : Énergie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$  : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)

$P$  : nombre de paire de pôle

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (3-22)$$

En remplaçant  $V_d, V_q$  par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[ R(I_d^2 + I_q^2) + \frac{dq}{dt} (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d) + \left( I_d \frac{d\Psi_d}{dt} + I_q \frac{d\Psi_q}{dt} \right) \right] \quad (3-23)$$

$\frac{3}{2} [R(I_d^2 + I_q^2)]$  : représente les pertes Joules dans les enroulements du stator

$\frac{3}{2} \left[ \frac{dq}{dt} (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d) \right]$  : représente la puissance électromagnétique

$\frac{3}{2} \left[ \left( I_d \frac{d\Psi_d}{dt} + I_q \frac{d\Psi_q}{dt} \right) \right]$  : représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$P_e = C_e \cdot \Omega$  ;  $w = p \cdot \Omega$  On aura :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d) \quad (3-24)$$

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d \cdot I_d + \Psi_e) \cdot I_q - L_q \cdot I_q \cdot I_d] \quad (3-25)$$

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) I_d \cdot I_q + \Psi_e \cdot I_q] \quad (3-26)$$

### III-2-2-6- Équations mécaniques :

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones est donnée par la relation suivante : [25]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (3-27)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_e - C_r - f_r \cdot \Omega) \quad (3-28)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left\{ \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + \Psi_f \cdot I_q] - C_r - f_r \cdot \Omega \right\} \quad (3-29)$$

### III-2-3-Rendement de la MSAP :

Le rendement ( $h_m$ ) d'un moteur électrique est défini par le rapport entre la puissance mécanique fournie et la puissance électrique absorbée.

$$h_m = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a} = 1 - \frac{\sum \text{pertes}}{P_a} \quad (3-30)$$

-  $P_a$  : puissance absorbée (électrique).

-  $P_u$  : puissance utile (mécanique).

-  $\sum \text{pertes}$  : représente la somme des pertes électriques, magnétiques, mécaniques et supplémentaires.

$$\sum pertes = P_j + P_{fer} + P_{mec} + P_{sup} \quad (3-31)$$

.les trois premiers types de pertes représentent environ 95% des pertes dans le moteur, les pertes supplémentaires peuvent être négligées [26].

### III-3-CONVERTISSEUR STATIQUE :

La forte évolution de l'onduleur de tension s'est appuyée d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, robustes et rapides, et, d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de "Modulation de Largeur d'Impulsions" (MLI). Ces dernières s'appuient sur les performances en terme de fréquence de découpage des Pour les applications de pompage solaire, un moteur électrique à courant alternatif est souvent utilisé. Ainsi, il faut utiliser un onduleur de tension pour alimenter ce moteur à partir des panneaux photovoltaïques.

Cet onduleur transforme la tension continue issue des panneaux en une tension alternative triphasée avec une fréquence variable. [27]

D'une façon générale le convertisseur statique (onduleur) joue le rôle d'interface entre source d'énergie électrique et le moteur.

Le convertisseur statique utilisé dans notre travail est un onduleur de tension triphasé. Celui-ci est composé de six (06) interrupteurs.

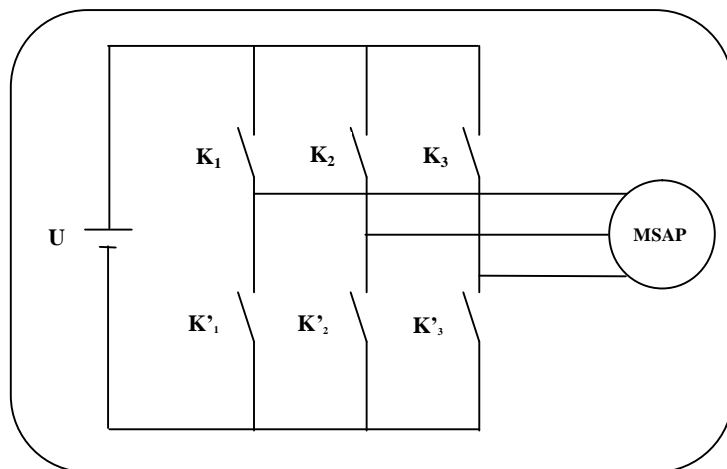


Fig (3-5) : Onduleurs triphasé

Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et une diode en inverse comme le montre la figure suivante :

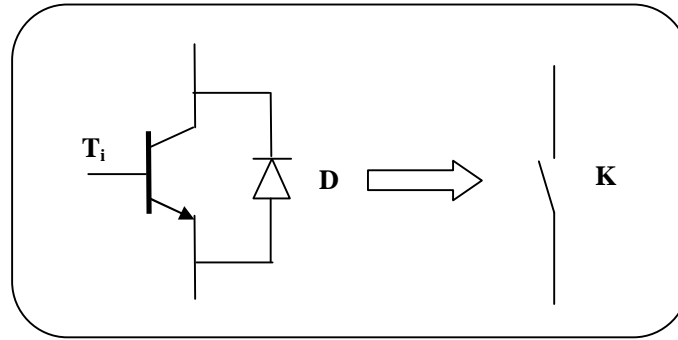


Fig (3-6) :

Les interrupteurs des bras de l'onduleur sont commandés de manières complémentaires, si  $K_i$  est fermé alors est  $K'_i$  ouvert à partir des grandeurs logiques  $F_i$  et  $F_i'$  avec  $F_i = F_i'$  avec  $i=1, 2, 3$

Donc nous pouvons écrire :

- $F_i = 1$  ( $F_i' = 0$ ) : alors  $K_i$  est passant ( $K'_i$  est ouvert)
- $F_i = 0$  ( $F_i' = 1$ ) : alors  $K_i$  est bloqué ( $K'_i$  est fermée)

Les tensions simples aux bornes du moteur s'exprime comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

### III-3-1-Modulation sinus- triangle :

La technique de MLI triangulo-sinusoidale est réalisée par comparaison d'une onde modulante (tension de référence) ayant une basse fréquence en triphasé les trois références sinusoïdales sont déphasées de  $\frac{2 \times p}{3}$  à la même fréquence à une onde porteuse triangle d'amplitude fixe et une fréquence, supérieure aux trois tensions de référence [27].

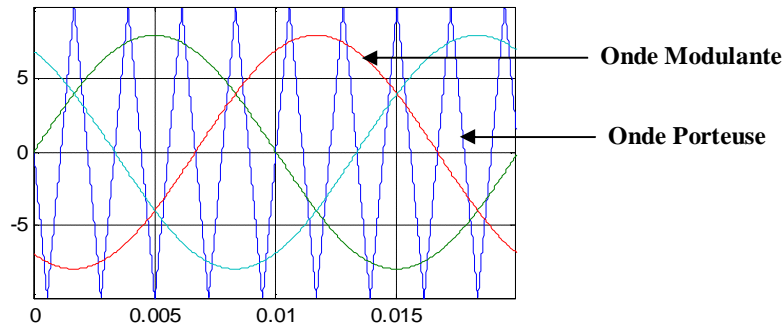


Fig (3-7) : tensions porteuse et modulante

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de modulation des interrupteurs est fixée par la porteuse,

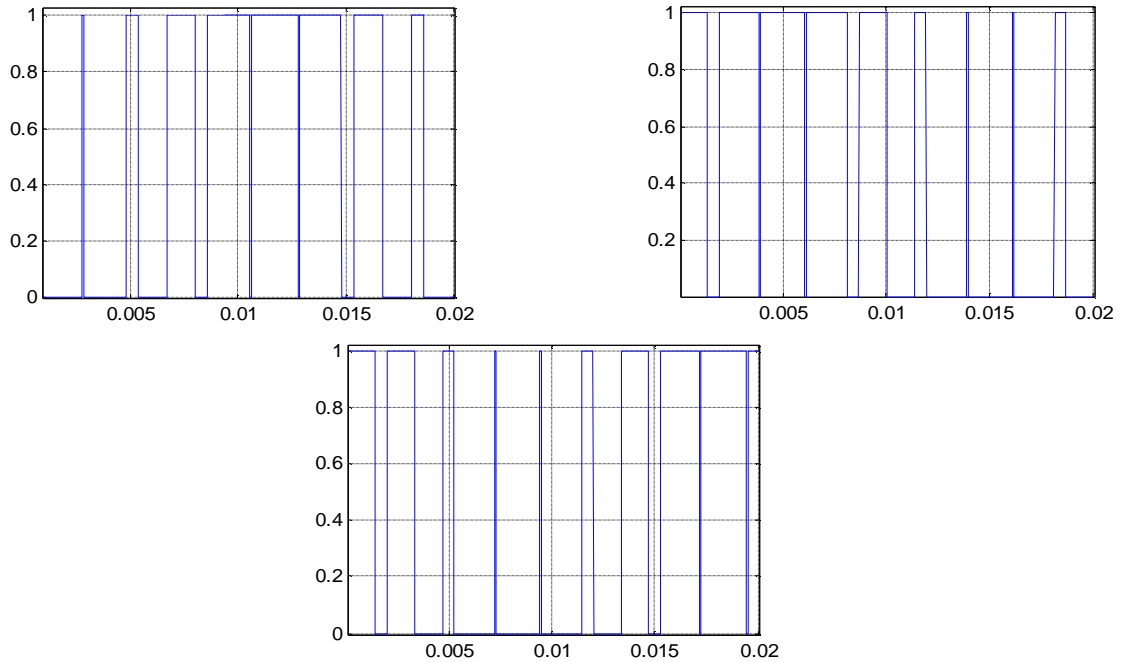


Fig (3-8) : commande F1, F2 et F3 de l'onduleur

La tension de sortie est formée d'un créneau de largeur variable et d'amplitude égale à la tension continu d'alimentation (+U et -U).

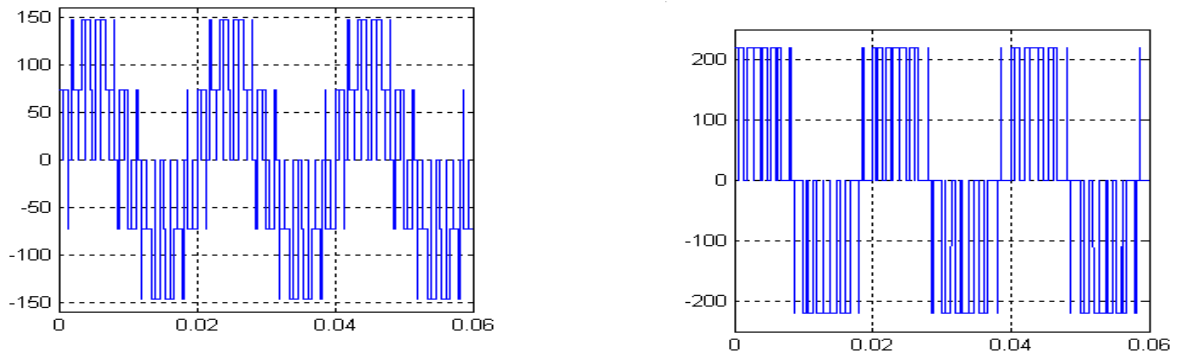


Fig (3-9) : tension simple et composé a la sortie de l'onduleur

### III-4-POMPE PHOTOVOLTAIQUE :

Une pompe est une machine pour convertir la puissance d'entrée mécanique en puissance liquide de rendement. Elle est couplée directement au moteur et elle est caractérisée par un couple, vitesse, débit. Une bonne adaptation entre la pompe et le moteur mène à de bons résultats

On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi, d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide. L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a eu lieu suite à la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

Le volume de l'eau pompée dépend de cinq facteurs essentiels :

- Le niveau de rayonnement qui est une mesure de l'énergie disponible du soleil.
- Le générateur photovoltaïque.
- L'efficacité de conversion de la rangée photovoltaïque.
- La température ambiante.

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée «pompe au fil du soleil», utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

#### **III-4-1-Différentes types des pompes :**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. A part ces deux classifications on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. [4], [28].

##### **III-4-1-1- La pompe volumétrique :**

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise



parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes.

#### III-4-1-2- La pompe centrifuge :

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à  $Q \cdot HMT$ , variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres), [4], [28].

#### III-4-2-Constitution d'une pompe centrifuge :

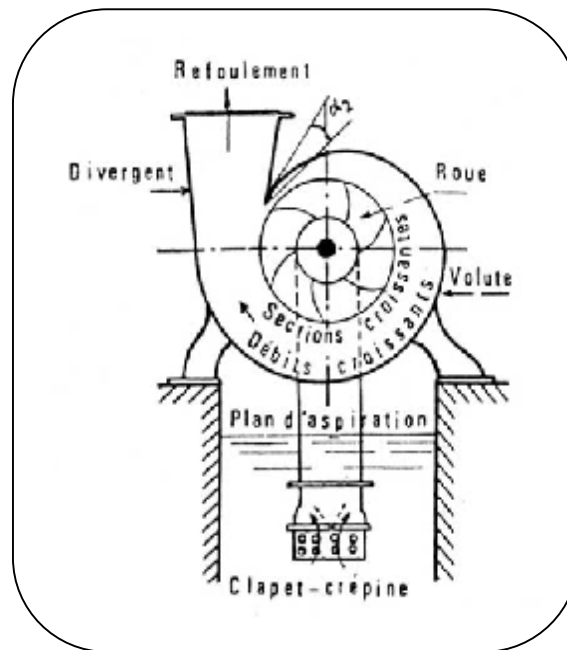


Fig (3-6) : Constitution d'une pompe centrifuge

Les pompes se composent de deux éléments essentiels :

- Une roue qui impose au liquide un mouvement de rotation. Celle-ci est montée sur un arbre porté par des paliers et entraîné par un moteur.
- Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous plus haute pression. Le corps de pompe comprend une tubulure d'aspiration et une tubulure de refoulement, supporte les paliers et l'ensemble du rotor. [29], [30].

### III-4-3-Fonctionnement d'une pompe centrifuge :

La théorie des fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmenté, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique, cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenue dans une pièce placés à l'intérieur de la roue appelées limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent .

### III-5 -MODELISATION DE LA POMPE CENTRIFUGE :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [8] :

$$f(H, Q, w) = 0$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante

La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d$$

H : Hauteur totale du pompage.

H<sub>s</sub> : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puit jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

H<sub>d</sub> : est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

#### III-5-1-Pertes de charges linéaires :

Se sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante [31] :

$$\Delta H_1 = I \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3-32)$$

I : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s) qui est donnée par :

$$v = \frac{4.Q}{\Pi.D^2} \quad (3-33)$$

$Q$  : débit ( $m^3/s$ ).

$$\Delta H_1 = l \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\Pi^2 D^4 g} \right) \quad (3-34)$$

On remarque que les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

### III-5-2-Pertes de charges singulières (locale) :

Sont dues essentiellement aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante : [30]

$$\Delta H_2 = e \frac{v^2}{2g} = e \frac{8Q^2}{\Pi^2 D^4 G} \quad (3-35)$$

$e$  : Coefficient de pertes de charges locales

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$H_d = \left( l \frac{L}{D} + e \right) \left( \frac{8Q^2}{\Pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} \times Q^2 \quad (3-36)$$

$K_{fr}$  : Constante de la canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + K_{fr} \cdot Q^2 \quad (3-37)$$

### III-5-3-La caractéristique Q (H) de la pompe :

La relation liant la hauteur d'eau H avec le débit de la pompe Q est donnée par le modèle de « PELEIDER-PETERMANN »

$$H = a_0 \times w^2 - a_1 \times w \times Q - a_2 \times Q^2 \quad (3-38)$$

Avec :  $a_0; a_1; a_2$  sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

La courbe H (Q) est donnée par la figure suivante :

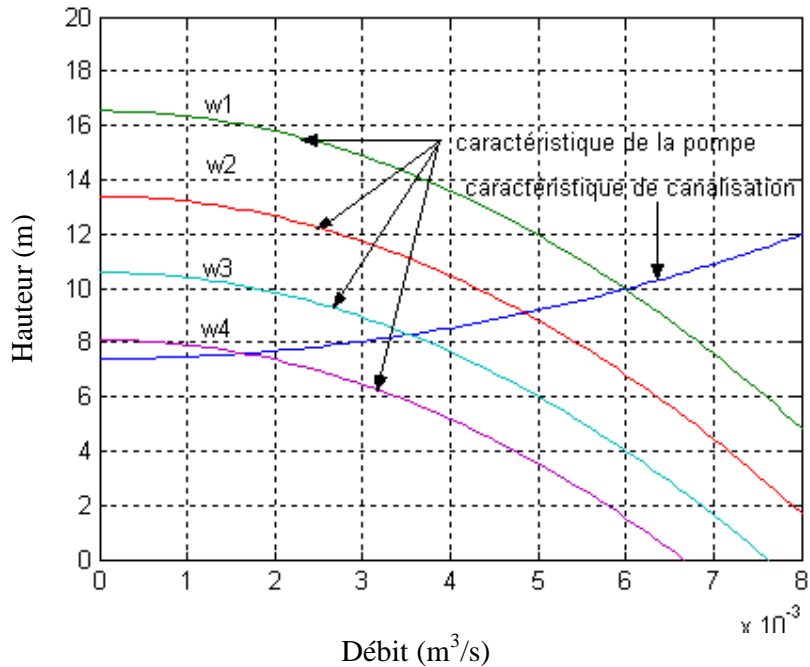


Fig (3-6) : Courbe H (Q) de la pompe centrifuge et la caractéristique de canalisation

Le point de fonctionnement est l'intersection de ces deux caractéristiques. Alors pour une vitesse donnée, il y a seulement un point de fonctionnement qui dépend fortement des caractéristiques de tuyauterie d'une pompe indiquée. Par conséquent une bonne conception et une tuyauterie de bon choix donnent de bons résultats dans le système de pompage.

#### III-5-4-La caractéristique couple vitesse C ( $\omega$ ) de la pompe :

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple résistant qui est de la forme suivante :

$$C_r = K_p \cdot \omega^2 \quad (3-39)$$

avec :

$$K_p = \frac{P_m}{\omega^3} \quad (3-40)$$

#### III-5-5-Calcul de puissance

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_H = r g Q H (\omega) \quad (3-41)$$

L'autre expression à considérer est celle de la puissance absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimé par la relation suivante :

$$P_m = 9.81 \cdot r \cdot Q \cdot H / h_p \text{ (W)} \quad (3-42)$$

Où  $\eta_p$  : Le rendement de la pompe.

$P_m$  : Puissance mécanique du moteur.

$r$  : La masse volumique de l'eau (=1000Kg au m<sup>3</sup>).

### III-5-6-Calcul du rendement

Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement globale.

$$h_{mp} = \frac{P_H}{P_a} \quad (3-43)$$

### III-6-CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons abordée le système Moto-Pompe, à commencer par la modélisation de la MSAP en se basant sur les équations électriques et mécaniques qui régissent le comportement de la machine, ensuite on a abordée brièvement la modélisation de la partie d'alimentation ( onduleur de tension a deux niveaux) et sa commande, sachant que le démarrage direct de la MSAP par un réseau industriel fixe est une opération impossible, c'est pour ça que la simulation relative à ce démarrage n'est pas réalisée.

Pour la deuxième partie de ce chapitre nous avons reportée le principe et les différents types des pompes, ainsi qu'une modélisation et simulation de la pompe centrifuge en tenant comptes des pertes de charges linéaires et singulières.

## Commande vectorielle de la MSAP

### IV-1- INTRODUCTION :

L'asservissement des machines à courant alternatifs alimentés par des convertisseurs statiques pour faire fonctionner des actionneurs à des vitesses variables devient de plus en plus courants, parmi les machines électriques utilisés, les machines synchrones à aimant permanent qui ont une inertie très faibles et des inductances relativement faibles ce qui entraîne des réponses rapides des courants et donc du couple [32].

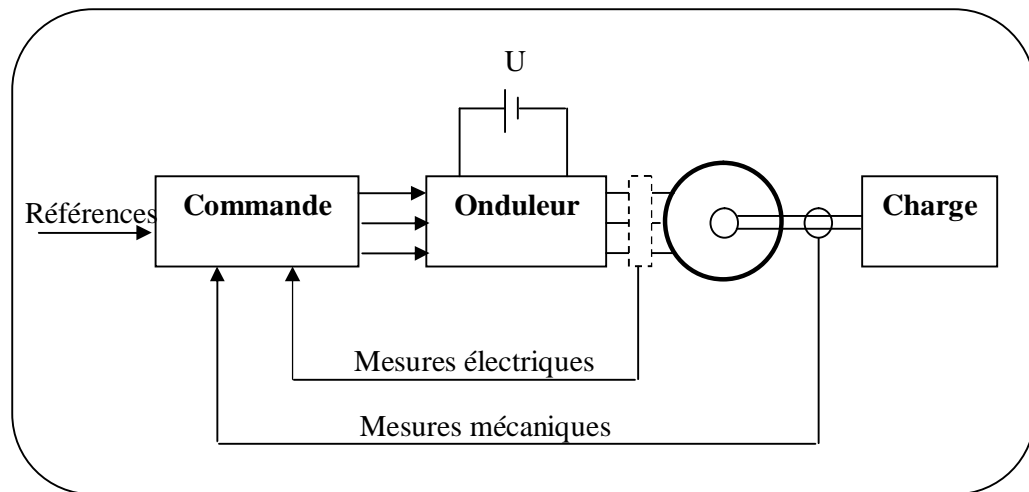


Fig (4-1) : ensemble Commande – Onduleur - Machine

### IV-2- POURQUOI LA COMMANDE VECTORIELLE :

La machine à courant continu a un avantage primordial d'être facilement commander, le flux et le couple sont découplées et sont contrôlées indépendamment.

- le flux produit le courant d'excitation (inducteur)  $I_f$ .
- le couple est produit par le courant induit  $I_a$ .

$$C_e = K \cdot I_a \cdot I_f$$

Le couple est proportionnelle au produit du flux inducteur et le courant induit, pour une machine à excitation sépare si on maintient le flux inducteur constant le couple est directement proportionnel au courant d'induit.

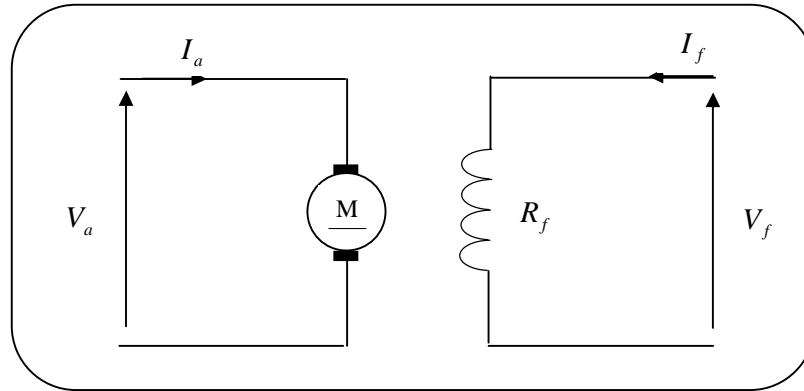


Fig (4-2) représentation d'une MCC

Cependant la présence du collecteur et des balais a toujours été le point faible de la machine à courant continu, ce commutateur mécanique limite la puissance et la vitesse, et son entretien devient plus exigeant.

Pour la MSAP le découplage naturel de la MCC n'existe plus, ce qui rend la machine difficile à commander, cette difficulté réside dans le fait qu'il existe un couplage entre les variables d'entrées (tension, fréquence) et les variables de sortie (couple, vitesse).

Pour qu'on arrive à un contrôle semblables à la MCC, une nouvelle théorie de commandes des machines à courant alternatif dite « commande vectorielle » ou « commande par flux orienté » qui à été découverte dans les années soixante dix.

#### IV-3- PRINCIPE DE BASE DE LA COMMANDE VECTORIELLE :

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à assimiler la MSAP à une MCC à excitation séparée.

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d + j_e] \cdot i_q \quad (4-1)$$

à partir de cette équation, on constate que pour contrôler le couple il faut contrôler les composantes directes et en quadrature du courant.

Dans le cas d'une MSAP à pôles lisses ( $L_d = L_q$ ) l'expression du couple sera :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot j_e \cdot i_q \quad (4-2)$$

Et pour une MSAP à pôles saillants, il faut assurer l'orthogonalité entre le flux rotorique  $j_e$  et la composante en quadrature du courant statorique, ceci revient à imposer le courant direct  $i_d = 0$ .

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot j_e \cdot i_q \quad (4-3)$$

Et comme le flux des aimants est constant, on voit que le couple électromagnétique obtenu est proportionnel au courant  $i_q$ .

On constate que l'équation du couple de la MSAP est (analogue à celle du couple de la MCC à excitation séparée).

Les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont les composantes du courant statoriques portées par les axes direct et en quadrature et qui sont analogues respectivement au courant d'excitation  $I_f$  et au courant induit  $I_a$  dans une MCC.

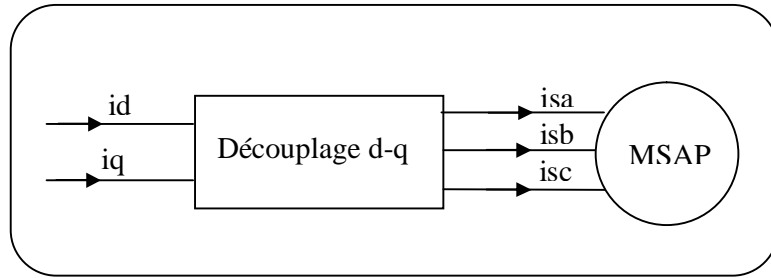


Fig : (4-3) : bloc de découplage

D'après les équations obtenues au chapitre précédent (3-16 ; 3-17 et 3-26)

$$V_d = R \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L_q \cdot i_q \quad (4-4)$$

$$V_q = R \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d \cdot i_d + j_e) \quad (4-5)$$

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p [(L_d - L_q) \cdot i_d i_q + j_e i_q] \quad (4-6)$$

Ces équations montrent que  $V_d$  et  $V_q$  dépendent à la fois des courants statoriques sur les axes d, q ce qui nous amène à implanter un découplage.

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation [22], cette dernière consiste à faire une régulation des courants en négligeant les termes de couplage qui seront rajoutés aux sorties des régulateurs des courants afin d'obtenir des tensions de références pour alimenter l'onduleur.

Les termes de couplage sont définis de telle sorte que les tensions restantes soient en relation du premier ordre avec les composantes des courants.

$$V_d^c = -\omega \cdot L_q \cdot i_q \quad (4-7)$$

$$V_q^c = \omega(L_d \cdot i_d + j_e) \quad (4-8)$$

Les sorties des régulateurs des courants sont :



$$V_d^* = R \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} \quad (4-9)$$

$$V_q^* = R \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} \quad (4-10)$$

Les termes de références sont alors :

$$V_{dr} = V_d^* + V_d^c \quad (4-11)$$

$$V_{qr} = V_q^* + V_q^c \quad (4-12)$$

#### IV-4- CALCUL DES PARAMÈTRES DU RÉGULATEUR PI :

##### IV-4-1- Régulateur de courant :

$$V_d^* = R \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} = (R + s \cdot L_d) \cdot i_d \quad (4-13)$$

$$i_d = \frac{1}{R + s \cdot L_d} \cdot V_d^* \quad (4-14)$$

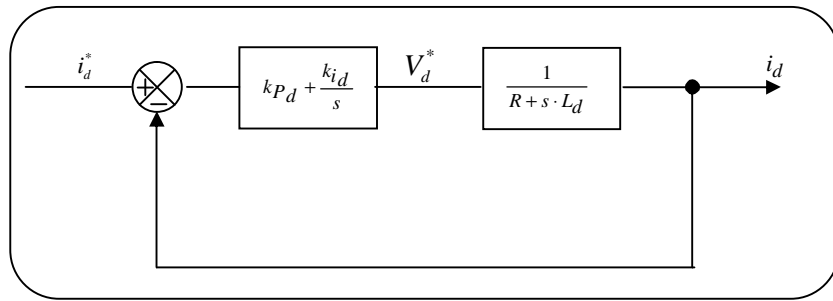


Fig (4-4) : Schéma fonctionnel du régulateur de courant

La fonction de transfert du système en boucle ouverte  $F_{BO}$  est :

$$F_{BO} = \left( K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \cdot \left( \frac{1}{R + s \cdot L_d} \right) = \frac{s \cdot K_{pd} + K_{id}}{s(R + s \cdot L_d)} \quad (4-15)$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée  $F_{BF}$  est :

$$F_{BF} = \frac{F_{BO}}{1 + F_{BO}} = \frac{(s \cdot K_{pd} + K_{id}) \frac{1}{L_d}}{s^2 + s \left( \frac{K_{pd} + R}{L_d} \right) + \frac{K_{id}}{L_d}} \quad (4-16)$$

Le polynôme caractéristique du système en boucle fermée est :

$$P(s) = s^2 + \left( \frac{R + K_{pd}}{L_d} \right) \cdot s + \frac{K_{id}}{L_d} \quad (4-17)$$

En imposant au polynôme caractéristique en B-F deux pôles complexes conjugués :

$$s_1 = r \cdot (-1 + j)$$

$$s_2 = r \cdot (-1 - j)$$

$$P(s) = (s - s_1) \cdot (s - s_2) = s^2 + 2 \cdot r \cdot s + 2 \cdot r^2 \quad (4-18)$$

L'identification terme à terme des deux équations (4-17) et (4-18) nous donne :

$$\left( \frac{R + K_{pd}}{L_d} \right) = 2r \Rightarrow K_{pd} = 2 \cdot r \cdot L_d - R \quad (4-19)$$

$$\frac{K_{id}}{L_d} = 2 \cdot r^2 \Rightarrow K_{id} = 2 \cdot L_d \cdot r^2 \quad (4-20)$$

De la même façon on trouve :

$$K_{pq} = 2 \cdot r \cdot L_q - R \quad (4-21)$$

$$K_{iq} = 2 \cdot L_q \cdot r^2 \quad (4-22)$$

#### IV-4-2- Régulateur de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple électromagnétique, l'équation mécanique donne :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - f_v \cdot \Omega \quad (4-23)$$

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{dw}{dt} = C_e - \frac{f_v}{p} \cdot w \Rightarrow \frac{dw}{dt} = \frac{p}{J} \cdot \left( C_e - \frac{f_v}{p} \cdot w \right) \quad (4-24)$$

$$s \cdot w = \frac{p}{J} \left( C_e - \frac{f_v}{p} \cdot w \right) \Rightarrow w = \frac{p}{s \cdot J + f_v} \cdot C_e \quad (4-25)$$

La chaîne de régulation de vitesse est donnée par le schéma suivant :

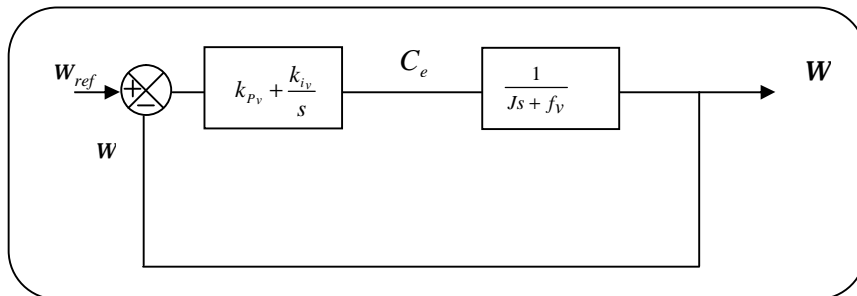


Fig (4-5) : Schéma fonctionnel du régulateur de vitesse

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$T_{BO}(s) = \left( K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) \cdot \left( \frac{p}{J \cdot s + f_v} \right) = \frac{(K_{iv} + s \cdot K_{pv}) \cdot p}{s \cdot (s \cdot J + f_v)} \quad (4-26)$$

La fonction du transfert du système en boucle fermée est :

$$T_{BF}(s) = \frac{T_{BO}(s)}{1 + T_{BO}(s)} \quad (4-27)$$

Le polynôme caractéristique est :

$$P(s) = s^2 + \left( \frac{f_v + p \cdot K_{pv}}{L_q} \right) \cdot s + \frac{p}{J} \cdot K_{iv} \quad (4-28)$$

En imposant au polynôme caractéristique en B-F deux pôles complexes conjugués :

$$P(s) = s^2 + 2 \cdot r \cdot s + 2 \cdot r^2 \quad (4-29)$$

L'identification terme à terme des deux équations (4-28) et (4-29) nous donne :

$$K_{iv} = 2 \cdot r^2 \cdot \frac{J}{p} \quad (4-30)$$

$$K_{pv} = \frac{1}{p} \cdot (2 \cdot r \cdot J - f_v) \quad (4-31)$$

#### IV-5 –DESCRIPTION DU SYSTÈME GLOBAL :

La structure de la commande est constituée de l'association d'une machine synchrone à aimant permanent dans le repère (d,q) alimenté par un onduleur de tension., la référence du courant direct  $id^*$  est fixé à zéro et la sortie du régulateur de vitesse constitue la consigne du couple.

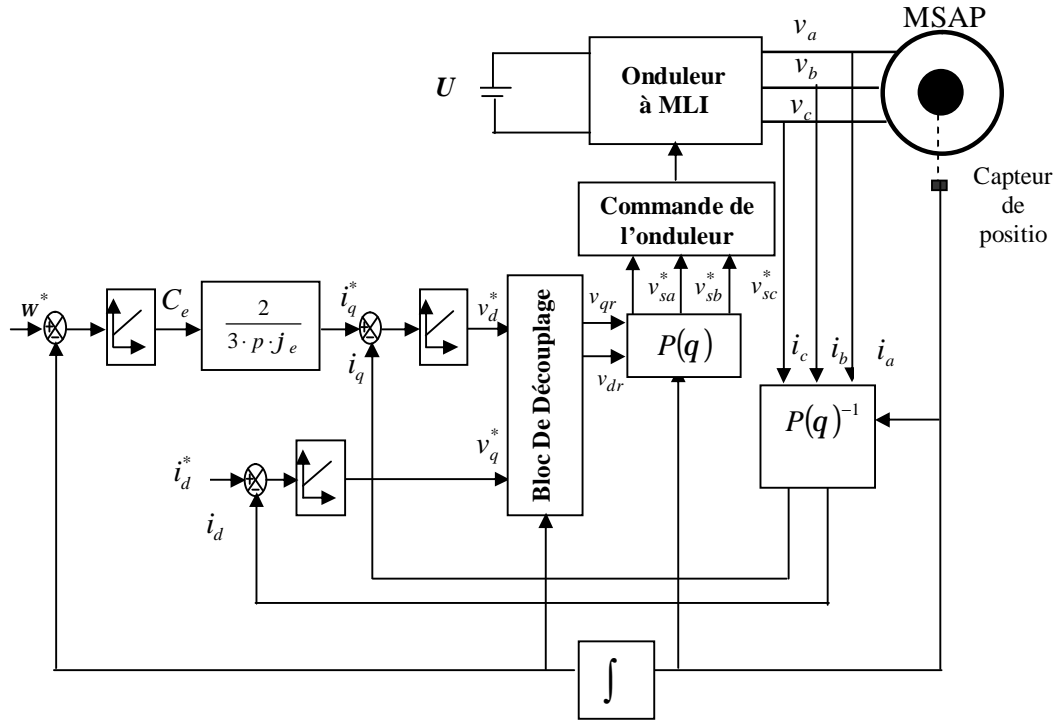


Fig (4-6) : Schéma de bloc de la commande de la MSAP

Les références des courants direct  $i_d^*$  et  $i_q^*$  sont comparées séparément aux courants réelles de la machine  $i_d$  et  $i_q$ , les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs, un bloc de découplage génère les tensions de références  $v_{dr}$  et  $v_{qr}$ , ces tensions après passage par la transformation de PARK servent de référence des tensions ( $V_{sa}^*$ ,  $V_{sb}^*$ ,  $V_{sc}^*$ ) pour la commande de l'onduleur. [33]

Les tensions de sortie de l'onduleur qui alimente la MSAP sont contrôlées par une technique de modulation de largeur d'impulsion MLI qui permet un réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie.

#### IV-6 – RESULTATS DE LA SIMULATION :

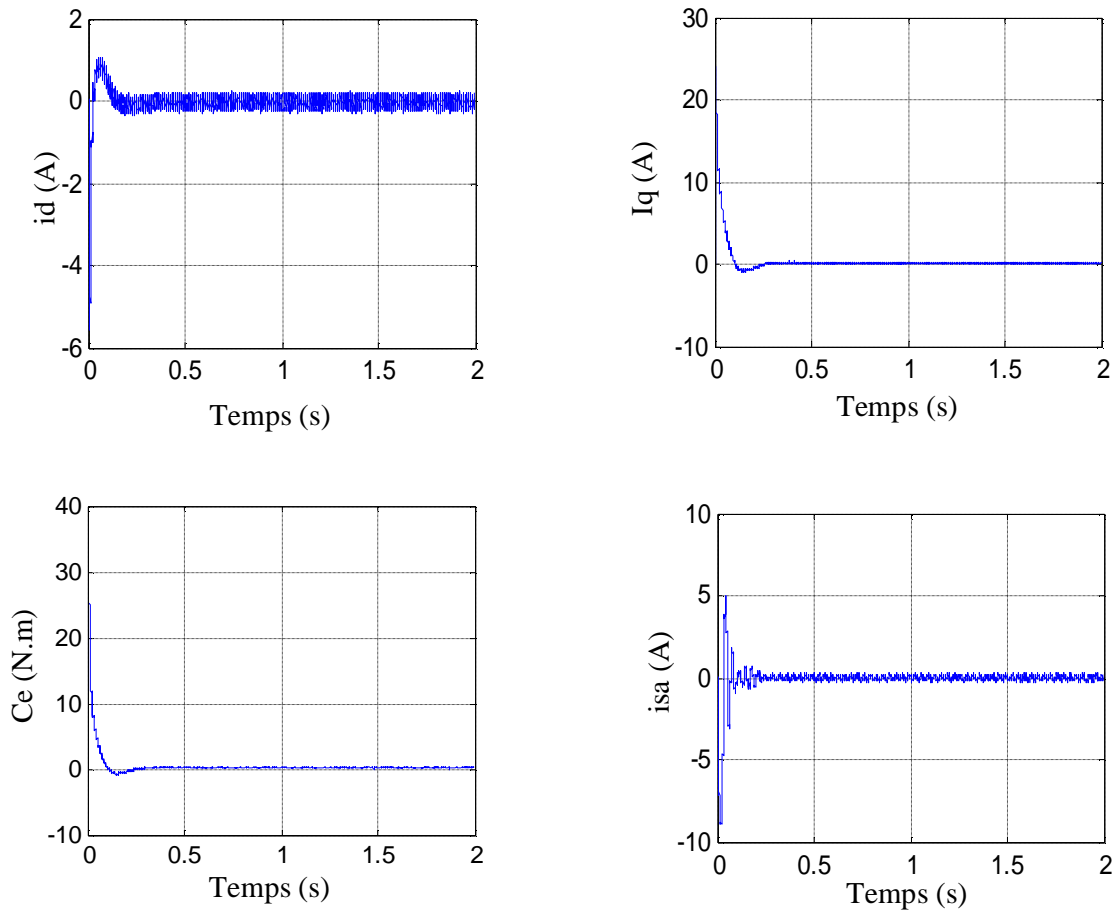
Toutes les simulations présentées dans cette mémoire sont réalisées sur une MSAP associée à un onduleur de tension, dont les paramètres sont mentionnés dans l'annexe A.

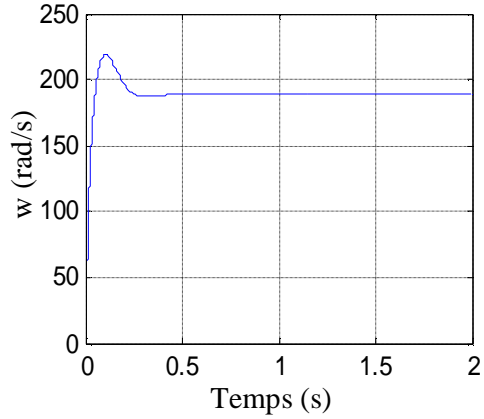
Les coefficients des régulateurs utilisés dans le réglage discret sont donnés par le tableau suivant :

Boucles De Régulations	pôles	$K_i$	$K_p$
Courant $i_d$	$200 \pm 200$	3392	15.03
Courant $i_q$	$200 \pm 200$	5792	27.03
Vitesse	$15 \pm 15$	0.675	0.0418

Afin de tester les performances du programme de simulation nous l'avons exécuté sous différentes conditions, les figures (IV-5) , (IV-6) , (IV-7) et (IV-8) présentent les résultats de simulations obtenues, ces courbes ont été tracées à l'aide du logiciel Matlab 6p5.

La figure (IV-5) montrent les composantes des courants direct  $i_d$  et en quadrature  $i_q$  lors d'un démarrage à vide, le courant  $i_d$  est maintenue égale à zéro par le régulateur de courant, la composante  $i_q$  présente un pic très important au démarrage (22A) puis s'annule (pas de couple de charge)

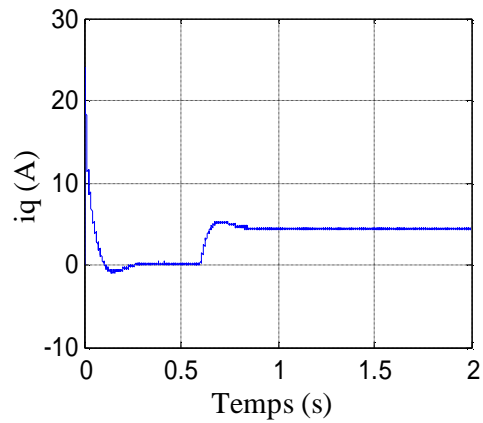
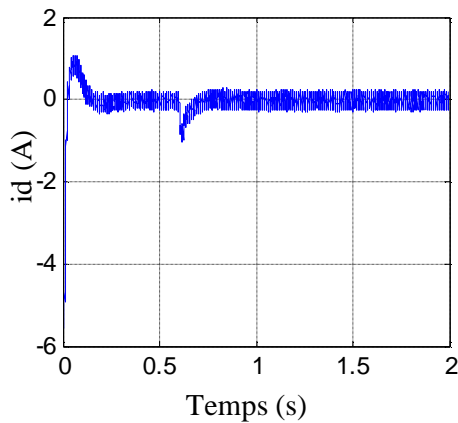


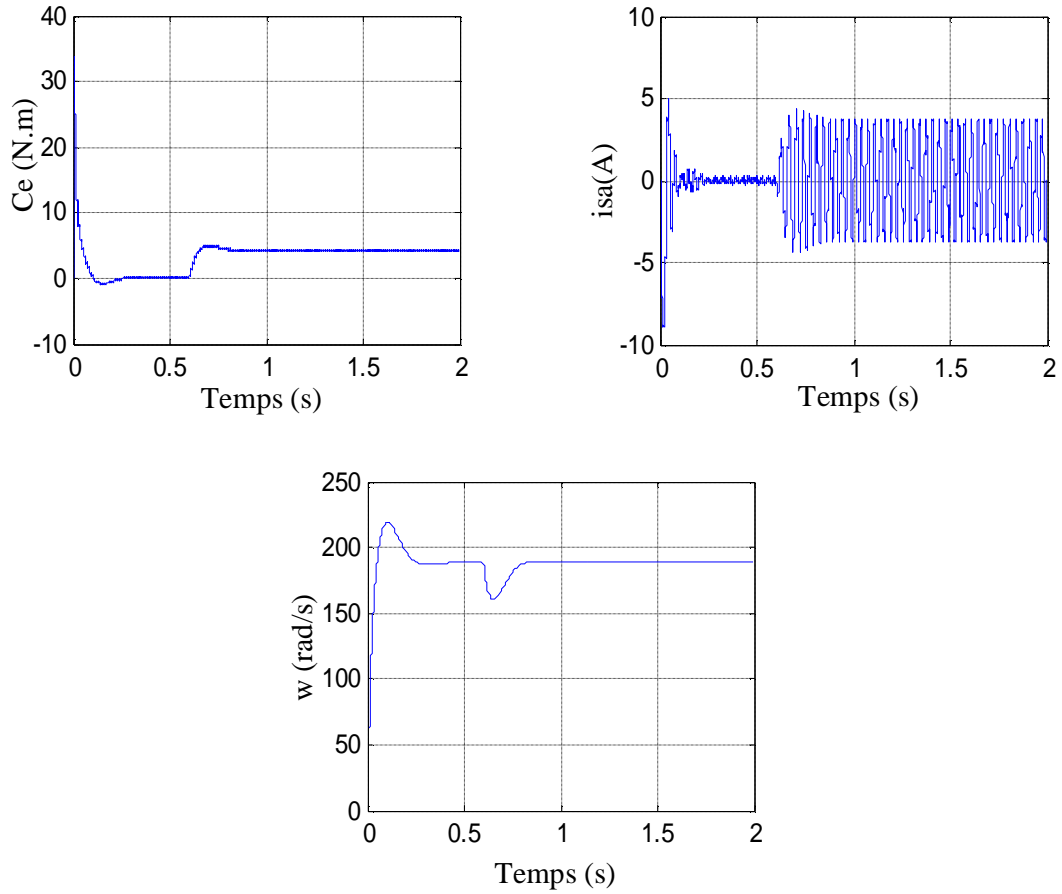


**Fig (4-7) : Démarrage à vide**

La figure (IV-6) montrent les résultats du démarrage à vide suivies par une perturbation du couple de charge à  $t=0,6$  s est la référence de vitesse est fixé à  $188.5 \text{ rad/s}$ .

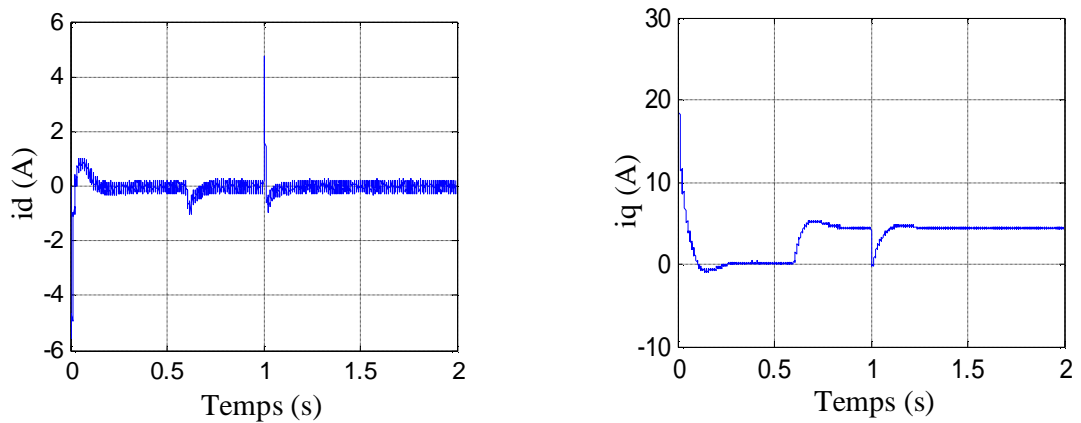
Comme on peut le constater la perturbation du couple de charge a été rapidement rejetée par le régulateur de vitesse, cette figure montre également que le courant  $i_d$  est toujours égal à zéro et le courant  $i_q$  atteint une valeur de  $3.5 \text{ A}$ , et le couple est l'image du courant  $i_q$ , cette figure montre également le courant de phase  $i_{sa}$ .

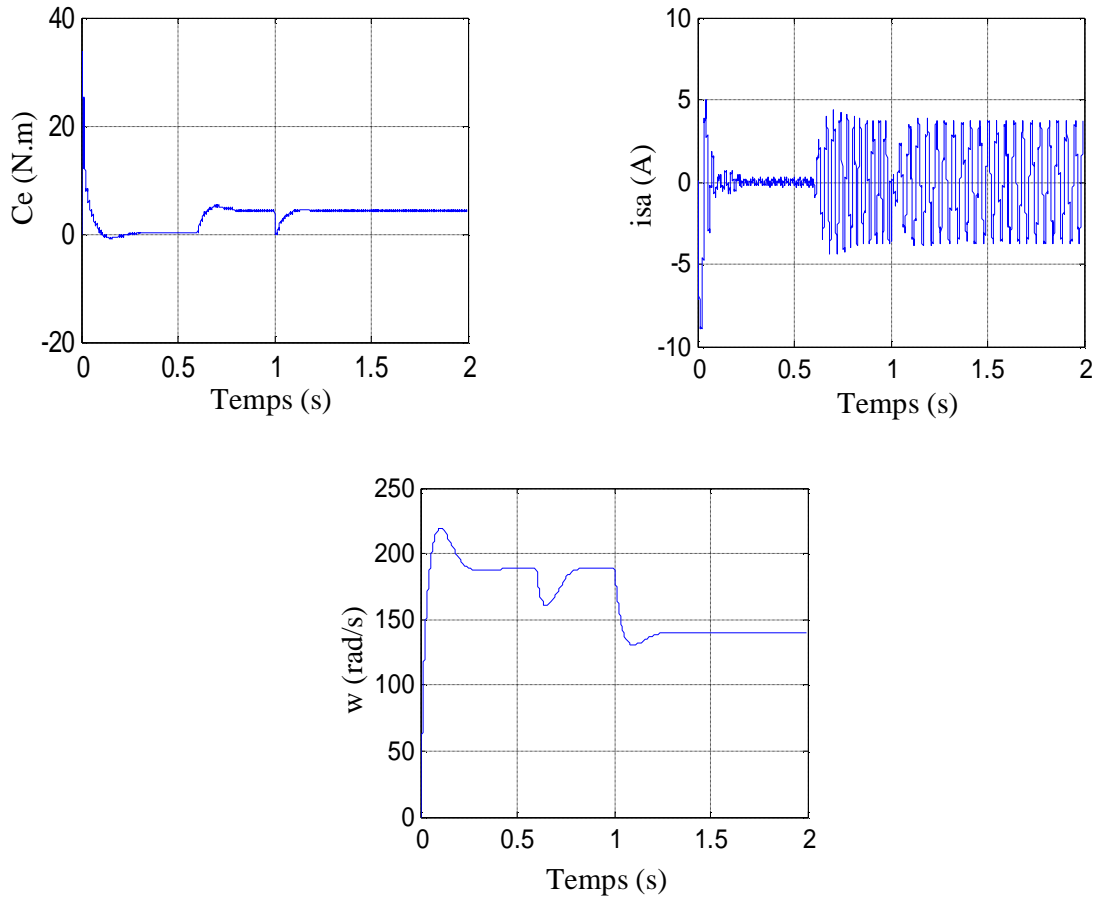




**Fig (4-8) : Démarrage à vide suivies d'une perturbation du couple de charge**

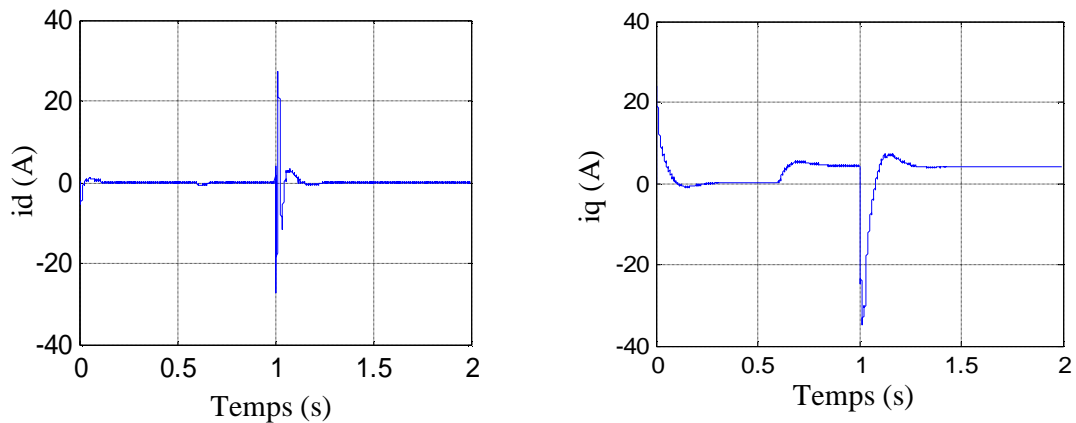
Nous allons étudier ce système sous les mêmes conditions que précédemment sauf avec une vitesse de rotation à échelon positive à  $t=1$ s.



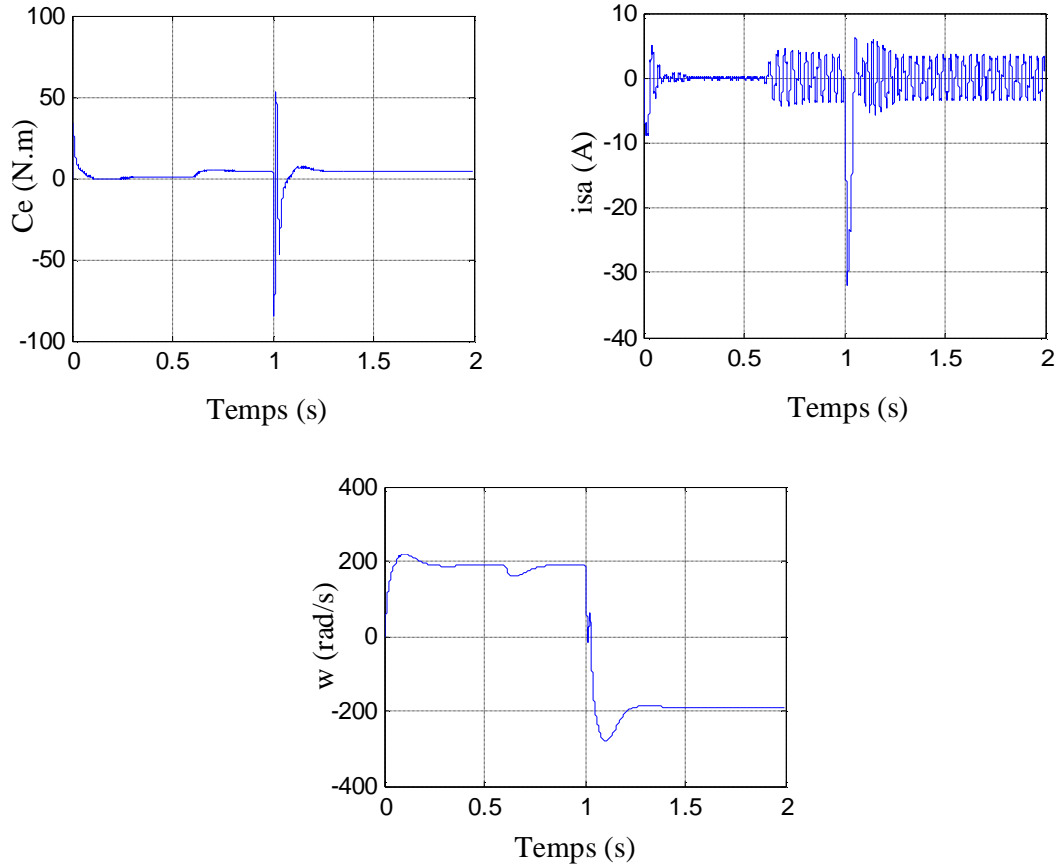


**Fig (4-9) : Démarrage à vide suivies d'une perturbation du couple de charge et échelon de vitesse positive**

Pour illustrer les performances et la robustesse de la MSAP en commande vectoriel on à fait un démarrage à vide suivie d'une perturbation de couple de charge à  $t=0.6$ s et une vitesse de rotation à échelon négative à  $t=1$ s, on remarque que la vitesse suit toujours la référence soit pour la vitesse positive ou négative.







**Fig (4-10) : Démarrage à vide suivies d'une perturbation du couple de charge et inversion de vitesse**

#### **IV -7- CONCLUSION :**

Dans ce chapitre on a présenté le principe de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), ainsi que la méthode de calcul des différents régulateurs, Enfin nous avons présenté quelques résultats de simulations.

## *Optimisation du système de pompage photovoltaïque*

### **V-1-INTRODUCTION :**

Le coût élevé du générateur PV nous impose une utilisation optimale et rationnelle de ce dernier afin d'aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous devons utiliser le générateur PV dans la zone où il délivre sa puissance maximale, donc il est indispensable de connaître ses points de puissance optimale pour différents éclairagements et températures.

Le but de ce chapitre est l'optimisation de fonctionnement de système de pompage solaire. A cet effet, l'alimentation du groupe motopompe par un générateur photovoltaïque via un onduleur est complétée par l'intégration d'un dispositif de suivie de la puissance maximale.

Pour les systèmes de pompage photovoltaïque, on a deux choix de couplage :

- soit le couplage directe (sans optimisation) dans lequel le MSAP est couplée directement au générateur photovoltaïque via un onduleur, ce système est simple et moins coûteux parce qu'il n'inclue pas les systèmes de stockages (batteries),
- soit le couplage avec optimisation.

### **V-2-DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE :**

Selon le choix de la puissance de la pompe et pour avoir la quantité d'eau pompée pour un éclairage et une température donnée, on peut dimensionner le générateur photovoltaïque par le choix de la meilleure combinaison entre les types et les nombres des modules.

#### **V-2-1-Dimensionnement de la Moto-Pompe :**

Comme a été mentionné au paragraphe (III-5-4), le moteur qui entraîne la pompe peut être dimensionné selon la quantité d'eau demandée. Le débit d'eau lié à la puissance mécanique absorbée par la pompe est donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{P_p \cdot h_p}{r \cdot g \cdot H} \quad (5-1)$$

Si on suppose que le rendement de l'accouplement est égal à 1, alors la puissance mécanique du moteur (utile) est égale à la puissance absorbée par la pompe.

Connaissant le rendement du moteur, la puissance électrique absorbée par le moteur est :

$$P_a = \frac{P_u}{h_m} \quad (5-2)$$

Pour prévoir certains imprévus d'exploitation, il serait prudent de majorer la puissance absorbée par la pompe des quantités suivantes [34] :

- 30 % pour une puissance absorbée inférieure à 4 kW.
- 20 % pour une puissance absorbée comprise entre 4 et 20 kW.
- 10 % pour une puissance absorbée supérieure à 20 kW.

Dans notre étude la puissance mécanique de la pompe est 559.5 W, on applique alors une marge de sécurité de 30 %. Ce qui veut dire que la puissance mécanique du moteur doit être supérieure ou égale à 728 W.

Dans notre cas on a choisie un moteur synchrone à aimant permanent dont la puissance mécanique est 746 W.

Le rendement du moteur est estimé à 0.94

$$P_a = \frac{p_u}{h_m} = \frac{746}{0.94} = 793.61W$$

Le rendement du convertisseur est de l'ordre de 0.95 [35]

$$P_{GPV} = \frac{P_a}{h_c} = 835.38W$$

### **V-2-1-Dimensionnement du générateur photovoltaïque :**

La puissance que doit fournir le générateur photovoltaïque sera déterminée par la puissance nominale demandée par l'ensemble motopompe.

La puissance nominale demandée par le moteur est de 835.38 W

On doit dimensionner le générateur PV, c'est-à-dire déterminer le nombre de modules qui le constituent pour alimenter le moteur.

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} = 83.56W$$

$$P_{GPV} = 83.56 \cdot 10 = 835.6W$$

Donc le nombre de module en série est  $N_s=10$  et le nombre de modules en parallèle est  $N_p=1$ .

Donc la puissance maximale est  $172.3 \cdot 4.85 = 835.655W$ .

### V-3-COUPLAGÉ DIRECT :

Ce couplage est illustré dans la figure (5-1) où la pompe est alimentée directement par l'intermédiaire de l'onduleur et de la MSAP.

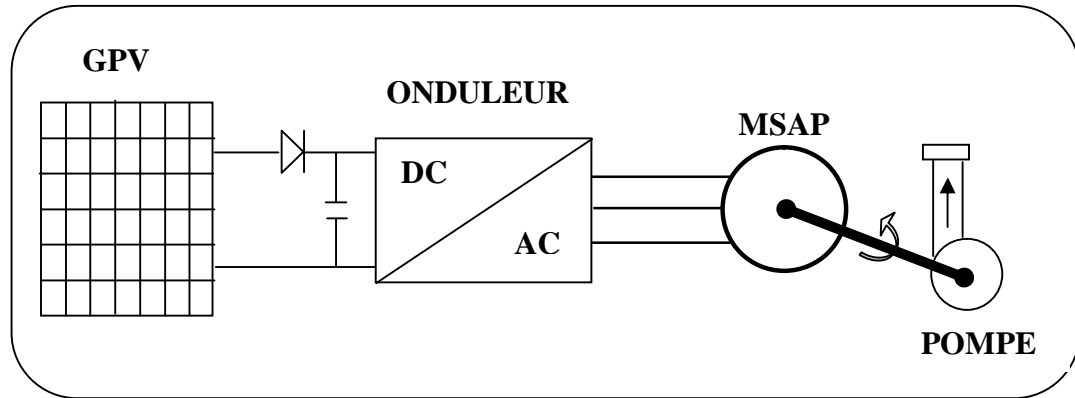


Fig : (5 -1) : Couplage direct d'un système de pompage PV

La MSAP est alimenté par un générateur photovoltaïque, la puissance de sortie du GPV n'est pas constante, elle varie en fonction de l'éclairement ( $E$ ) et de la température ( $T$ ), alors le moteur tourne à une vitesse pour chaque valeur de  $E$  et  $T$ . Le point de fonctionnement du système sera obtenu par l'intersection de la caractéristique du GPV,  $I_{GPV}(V_{GPV})$  et la caractéristique  $I_{ch}(V)$

Quand le groupe moteur-pompe est alimenté par le GPV on a les égalités suivantes :

$$\begin{cases} V_m = V_{GPV} \\ I_m = I_{GPV} \\ C_e = C_r \end{cases}$$

$$C_r = K_p \cdot \omega^2$$

Le point de fonctionnement du système sera obtenu par l'intersection de la caractéristique  $I(V)$  du générateur et la caractéristique mécanique du moteur

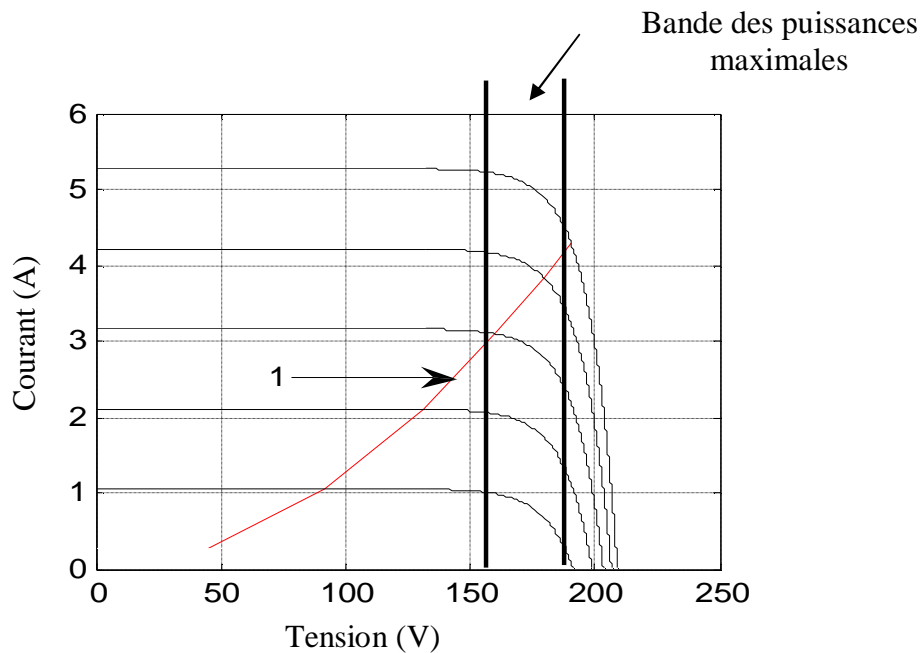


Fig (5. 2.a) : Caractéristiques I (V) pour différents éclairnements et  $T=25^{\circ}\text{C}$  ; (1)  $I_{ch}$  (V).

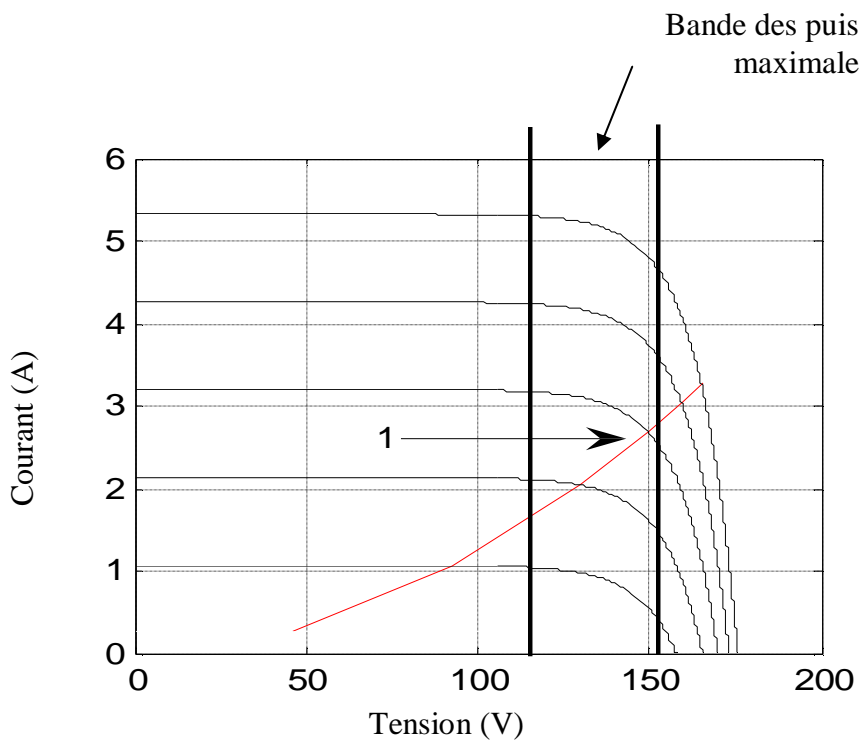


Fig (5. 2.b) : Caractéristiques I (V) pour différents éclairnements et  $T=50^{\circ}\text{C}$  ; (1)  $I_{ch}$  (V).

Les figures (5.2.a), (5.2.b) montrent les allures de la caractéristique  $I_{GPV}(V_{GPV})$  et  $I_{ch}(V)$  du système photovoltaïque en couplage direct pour deux températures différentes  $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $T=50^{\circ}\text{C}$  ou on remarque que pour la première température le moteur fonctionne difficilement pour les bas éclairage, tandis que pour la deuxième température le moteur fonctionne difficilement pour les éclairage élevés. Comme il a été mentionné au paragraphe (II – 8) le système photovoltaïque doit fonctionner dans la zone (2 – 3) seulement.

Le but de l'optimisation est d'améliorer le rendement du moteur qui va travailler à la périphérie (autour) des points optimaux du fonctionnement du générateur photovoltaïque, donc la caractéristique  $I_{ch}(V)$  doit glisser vers la bande des puissances maximales du GPV qui se situe entre [163V, 183V] pour une température  $T=25^{\circ}\text{C}$  et un éclairage variant entre  $200\text{W}/\text{m}^2$  et  $1000\text{W}/\text{m}^2$  tandis que pour une température  $T=50^{\circ}\text{C}$  et un éclairage variant entre  $200\text{W}/\text{m}^2$  et  $1000\text{W}/\text{m}^2$  la caractéristique  $I_{ch}(V)$  doit glisser vers la bande des puissances maximales du GPV qui se situe entre [132V, 152V].

D'après les deux caractéristiques précédentes on trouve le point de fonctionnement optimale correspond à un éclairage de  $730\text{W}/\text{m}^2$  pour une température  $T=25^{\circ}\text{C}$ , et un éclairage  $480\text{W}/\text{m}^2$  pour une température  $T=50^{\circ}\text{C}$ .

#### **V-4-PHILOSOPHIE DU MPPT :**

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracker) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant tension des cellules. Nous avons vu dans la présentation des cellules la caractéristique d'une cellule, et l'évolution de cette caractéristique en fonction de l'éclairage ou de la température

Le terme MPPT ou Maximum Power Point Tracking ou Poursuite du Point de Puissance Maximale. Il s'agit, par un moyen (à trouver), de venir se placer sur le point maximum de la caractéristique en puissance et de pouvoir y rester quelles que soient les variations de température, ensoleillement ou autre.

Pour avoir la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge et produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été développé depuis 1968, ces genres de contrôleurs forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP) induisant une amélioration du rendement du système.

### V-5-QUELQUES TYPES D'ALGORITHMES DEV TRACKING :

Dans la littérature plusieurs méthodes de Tracking ont été proposées, mais on cite les plus utilisées et qui coûtent moins chères [36]:

- algorithmes Perturber et Observer (P & O).
- algorithmes Accroissement de la Conductibilité (INC : Incremental Conductance).
- algorithmes Tension constante (CV : constant Voltage).
- algorithmes Capacité Parasite (PC : Parasit Capacitance).

Le rendement d'un module MPPT est défini par [36] ; [37]:

$$h_{MPPT} = \frac{\int_0^t P_m(t) \cdot dt}{\int_0^t P_{\max}(t) \cdot dt} \quad (5-3)$$

Avec :

$P_m$  : Puissance mesurée produite par le panneau PV sous le contrôle MPPT.

$P_{\max}$  : Puissance maximale qu'ils pouvaient produire sous la même température et le même ensoleillement

Le tableau qui suit donne les rendements des différents algorithmes :

Références Bibliographiques	P & O	INC	CV	PC
[36]	85	88	73	-
[38]	81.5	89.9	-	-
[39]	-	-	-	99.8

Fig (5-3) : Rendement du MPPT en (%).

#### V-5-1-Méthode de perturbation et observation :

L'algorithme P&O est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP.

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau  $V_{PV}$  avec un  $\Delta V$  et en observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

- Si  $\Delta P \neq 0$  alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.
- Si  $\Delta P = 0$  le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

sur la figure (5-4) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP du point  $A_2$  vers le point  $A$  puis vers le point  $A_1$  et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe  $P(V)$  du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point  $A$  vers le point  $B_1$  ce si nous emmène à  $\Delta P \neq 0$  avec  $[\Delta P = P(K) - P(K - 1)]$  et le MPPT continue à perturber les tensions dans la même direction c à d vers le point  $B_2$ .

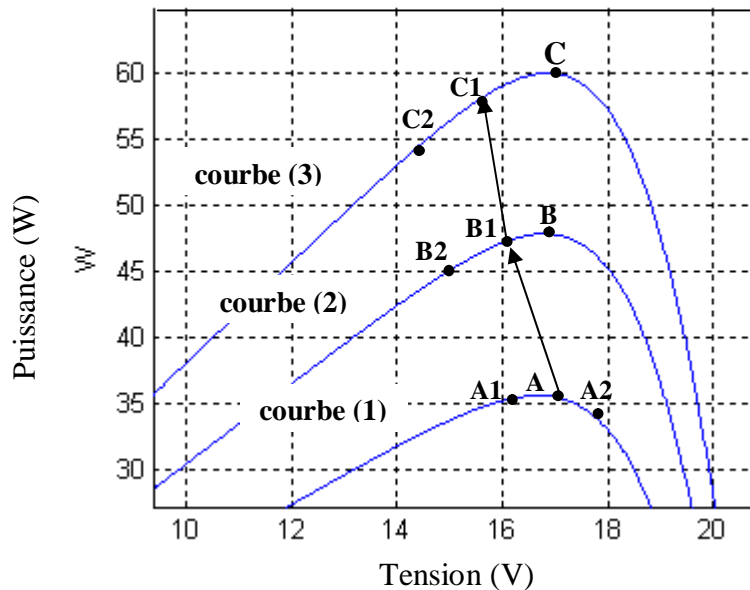


Fig (5-4) : comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement

Si l'éclairement augmente toujours le point de fonctionnement se déplace vers le point  $C_1$  de la courbe (3) au lieu du point  $B_2$  sur la courbe (2) alors le MPPT à toujours  $\Delta P \neq 0$  et il déplace le point de fonctionnement vers le point  $C_2$ .

A partir des points  $A \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$  l'algorithme P&O continue à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminué.



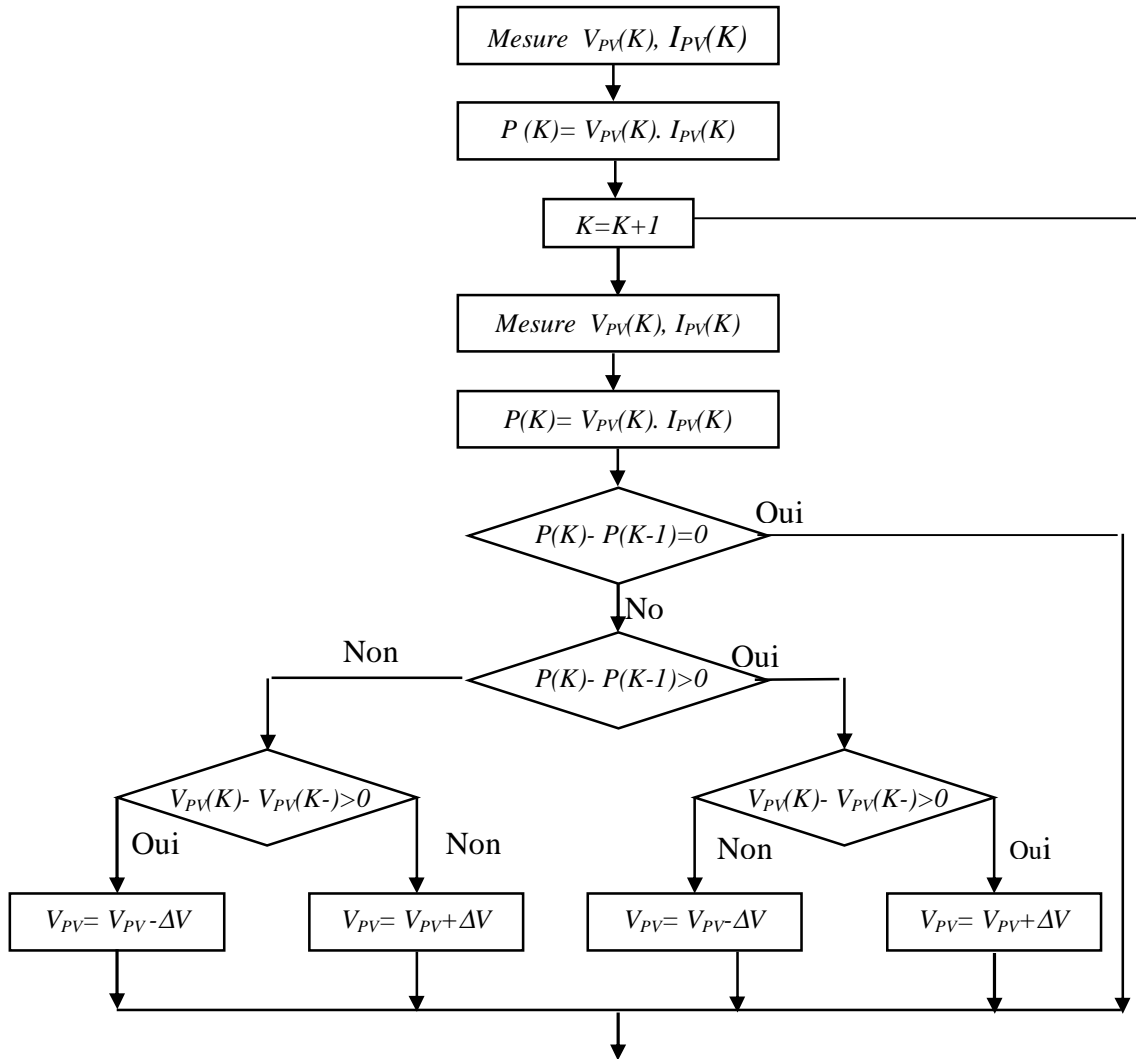


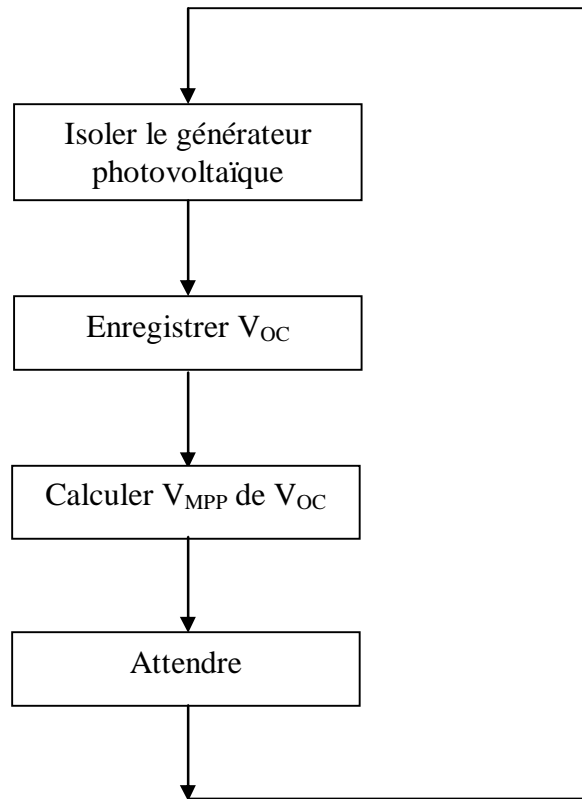
Fig (5- 5) : Organigramme de la méthode P&O

### V-5-2-Algorithm tension constante (CV-MPPT) :

Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale et celle en circuit ouvert est approximativement constante, cela est la base de l'algorithme à tension constante qui peut se traduire par :

$$\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \approx K_{cv} < 1 \quad (5-4)$$

L'algorithme CV-MPPT est simple pour la mettre en œuvre, on isole le panneau solaire temporairement pour mesurer  $V_{oc}$  et le MPPT corrige le point de fonctionnement en utilisant l'équation (5-4).



**Fig (5- 6) : Algorithme de la méthode CV-MPPT**

[40] et [41] ont donnée un intervalle de 0.7 à 0.85 comme plage de valeurs de la constante  $K_{cv}$ . dans les algorithmes CV-MPPT on utilise des petites cellules pilotes qui ont les mêmes caractéristiques que les cellules du panneau photovoltaïque, les mesures de tensions  $V_{oc}$  sont faites sur ces cellules, cette méthodes a un inconvénient sur le coût du système.

**V-5-3- Algorithme courant constant (CC-MPPT) :**

Il est également possible d'utiliser l'algorithme CC-MPPT qui permet d'obtenir un rapport constant du courant de MPP sur le courant de court-circuit.

$$\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \approx K_{CI} < 1 \quad (5-5)$$

Pour mettre en application cet algorithme on utilise un commutateur qui est relié aux bornes de l'entrer du convertisseur, quand ce commutateur est activé on mesure le courant de court-circuit et on calcule le courant optimale et la MPPT corrige le point de fonctionnement on utilisant l'équation (5-5).

L'algorithme CV-MPPT est très utilisé par rapport à l'algorithme CC-MPPT [42] parce qu'il est plus simple de mesurer des tensions et mettre des modules photovoltaïques en circuit ouvert, que de mettre un module photovoltaïque en court-circuit.

#### V-5-4-Algorithmme de l'accroissement de la conductance (INC-MPPT) :

Afin d'éviter les inconvénients de l'algorithme P&O, une autre méthode à été proposé dans la littérature qui se base sur la dérivé de la puissance de sortie du PV par rapport à la tension V du PV est égale à 0 au point de puissance maximale (MPP).

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (5-6)$$

au MPP ces 2 membre doivent être égale, si le point de fonctionnement n'est pas sur le MPP alors une inégalité apparaisse sur l'équation (5-5) qui indique que la tension de fonctionnement et au dessus ou au dessous de la tension optimale comme le montre la figure ci-dessous :

Ceci nous conduit aux équations suivantes : [43], [44].

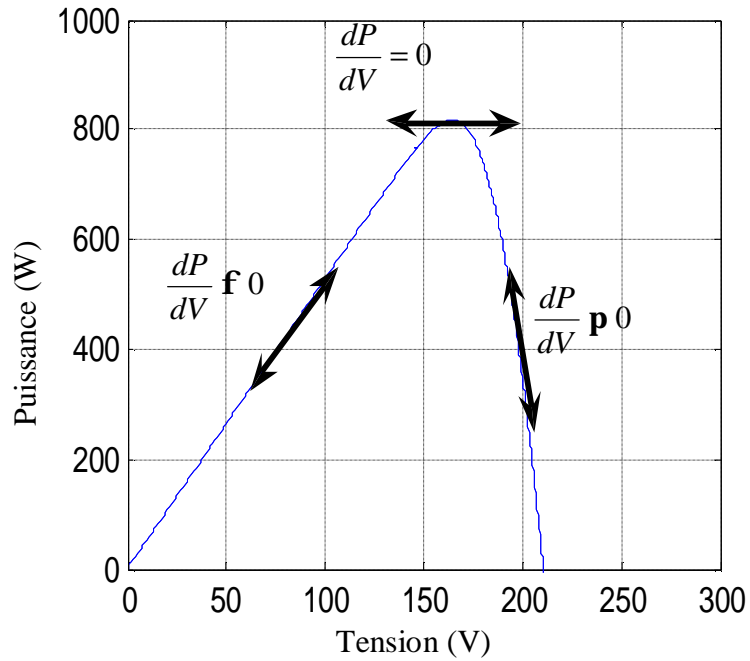
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{À gauche du MPP} \quad (5-7)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{À droite du MPP} \quad (5-8)$$

On emploie les équations (5-7), (5-8) pour déterminer la direction pour laquelle une perturbation est produite pour déplacer le point de fonctionnement au MPP, cette perturbation se répète jusqu'on arrive au fonctionnement MPP, et le MPPT continu à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce que un changement sera détecté.

Si le changement de la tension n'est pas nulle les équations peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changés afin d'atteindre le MPP.

- Si  $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$  le point de fonctionnement est à gauche de MPP, donc il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP.
- Si  $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$  le point de fonctionnement est à droite de MPP, donc il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP.



**Fig (5- 7) : Caractéristique de puissance**

Si  $\Delta V = 0$  et  $\Delta I = 0$  on à les conditions atmosphériques qui n'ont pas changées et le MPPT fonctionne toujours au MPP.

- Si  $\Delta V = 0$  et  $\Delta I > 0$  c'est l'ensoleillement qui à augmenté ceci exige au INC-MPPT d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP.
- Si  $\Delta V = 0$  et  $\Delta I < 0$  c'est l'ensoleillement qui à diminuer ceci exige au INC-MPPT diminuer la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP.

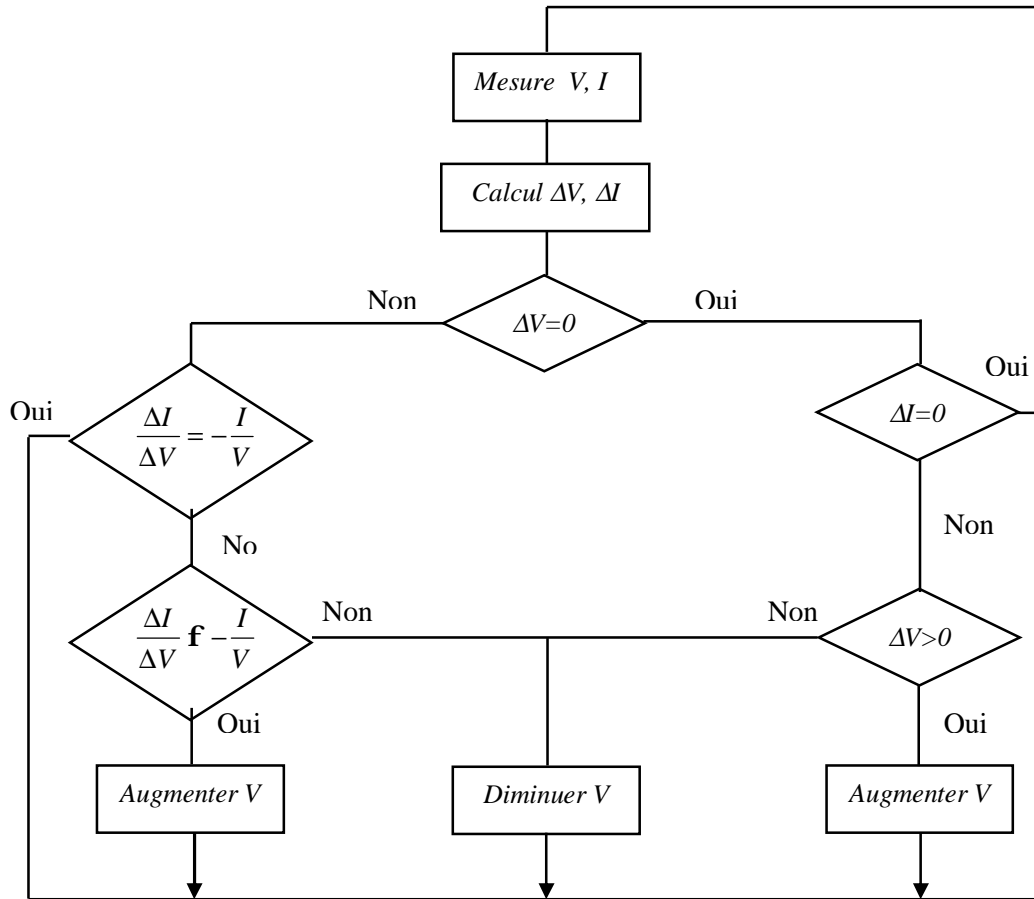


fig (5- 8) Algorithme de la méthode incrémentation de conductance

**V-5-5-Algorithm de capacité parasite (P.C-MPPT) :**

Cette méthode à été développée par Branbrilla et autres [45], elle est similaire à celle de l'incrément de conductance (INC-MPPT), la seule différence est que la capacité parasite soit incluse, en ajustant cette capacité à notre modèle on aura :

$$I = I_{PH} - I_L \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{a \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] + C_p \frac{dV}{dt} \tag{5-9}$$

$$I = F(V) + C_p \frac{dV}{dt} \tag{5-10}$$

L'équation (5-10) montre les deux composantes de  $I$  la première est une fonction de la tension  $F(V)$  et la seconde est due au courant dans la tension parasite  $C_p$ .

En multipliant l'équation (5-10) par la tension  $V$  du panneau on obtient la puissance électrique

$$V \cdot I = V \cdot F(V) + V \cdot C_p \cdot \frac{dV}{dt} \quad (5-11)$$

Le dérivé de la puissance de sortie du PV par rapport à la tension V du PV au point de puissance maximale (MPP) sera obtenue et exprimé par [30].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = \frac{dF(V)}{dV} + \frac{F(V)}{V} + C_p \cdot \left( \frac{dV}{V} + \frac{d^2V}{V} \right) \quad (5-12)$$

Si ( $C_p$ ) est égale à zéro, l'équation (5-12) se simplifie et devient celle utilisée pour l'algorithme d'accroissement de la conductibilité.

### V-6-OPTIMISATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE :

Pour trouver le point de puissance maximale il faut que la dérivée de la puissance par rapport à la tension  $\frac{dP_{GPV}}{dV_{GPV}}$  soit égale à zéro.

$$P_{GPV} = V_{GPV} \cdot I_{GPV} \quad (5-13)$$

$$\frac{dP_{GPV}}{dV_{GPV}} = \frac{dI_{GPV}}{dV_{GPV}} \cdot V_{GPV} + I_{GPV} = 0 \quad (5-14)$$

L'optimisation du système de pompage photovoltaïque consiste à maximiser la quantité d'eau pompée, ce qui revient à maximiser la vitesse d'entraînement pour chaque éclairage, ou le rendement générateur photovoltaïque-moteur.

Le rendement générateur photovoltaïque - machine synchrone à aimant permanent est le rapport entre la puissance mécanique et puissance de la radiation incidente captée par le GPV, il est définie par l'expression suivante : [6].

$$h_{gm} = \frac{P_m}{N \cdot E \cdot S_g} \quad (5-8)$$

$h_{gm}$ ,  $S_g$  et  $N$  représentent respectivement le rendement du GPV – MSAP ; la surface du PV et le nombre totale des modules qui constituent le générateur PV.

$$N = N_s \cdot N_p$$

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple qui est nécessaire pour son entraînement et qui est proportionnelle au carré de sa vitesse  $w$ .

$$C_r = K_p \cdot w^2 \quad (5-9)$$

Si on suppose que le rendement de l'accouplement entre la MSAP et la pompe est égale à 1, alors la puissance mécanique de la MSAP est égale à la puissance absorbée par la pompe

La puissance mécanique de la MSAP est définie par :

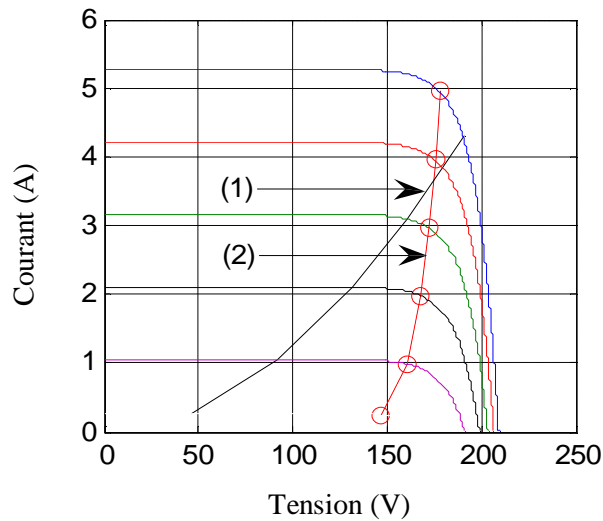
$$P_m = K_p \cdot w^3 \quad (5-10)$$

$$h_{gm} = \frac{K_p \cdot w^3}{N \cdot E \cdot S_g} \quad (5-11)$$

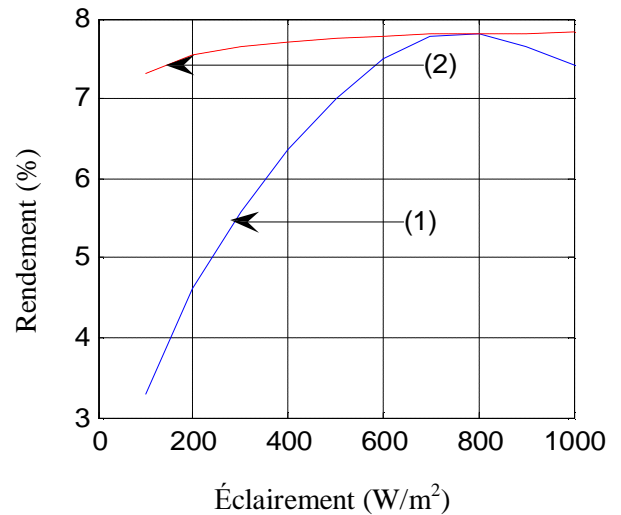
$K_p$  : Coefficient de la pompe centrifuge.

### V- 7 – RESULTATS DE SIMULATIONS :

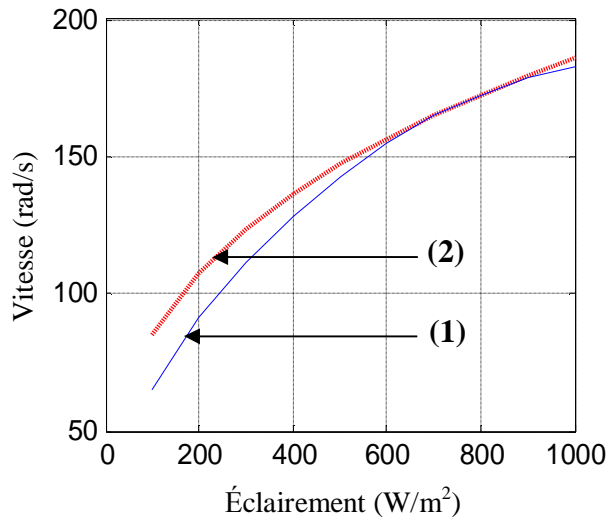
Le modèle d'optimisation est appliqué au système à la température de la cellule  $T=25^\circ\text{C}$ , les résultats obtenus montre que la quantité d'eau pompée a augmenté comparée au système non optimisé, la caractéristique du fonctionnement du système sera donné par la figure (5-8-b)



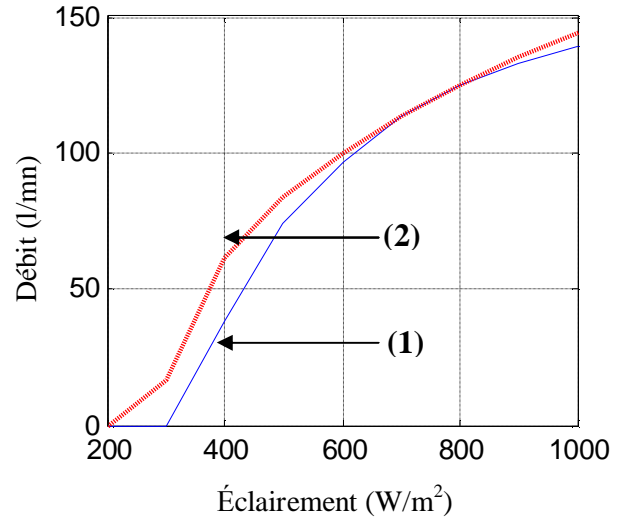
(a)



(b)



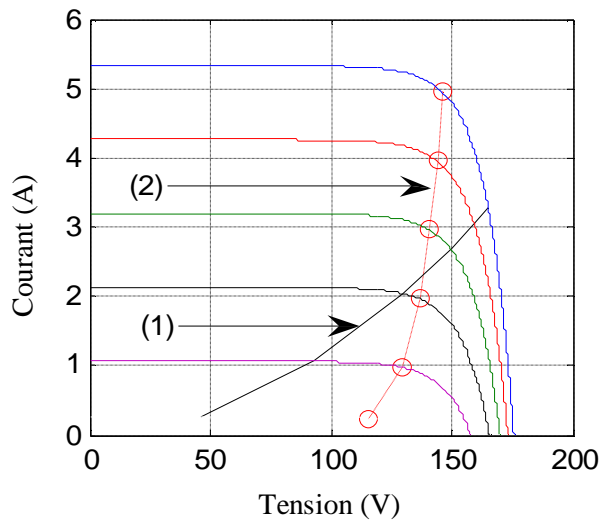
(c)



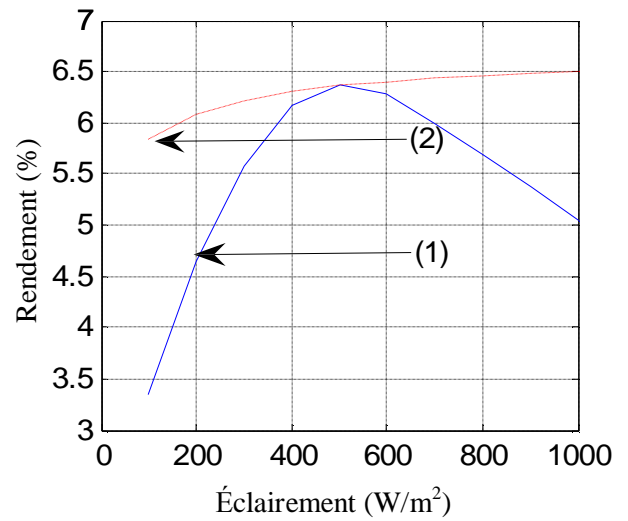
(d)

Fig (5- 8) : Résultats de simulation d'un système de pompage photovoltaïque  
(1) – avant optimisation ; (2) – après optimisation

**T=50°C**

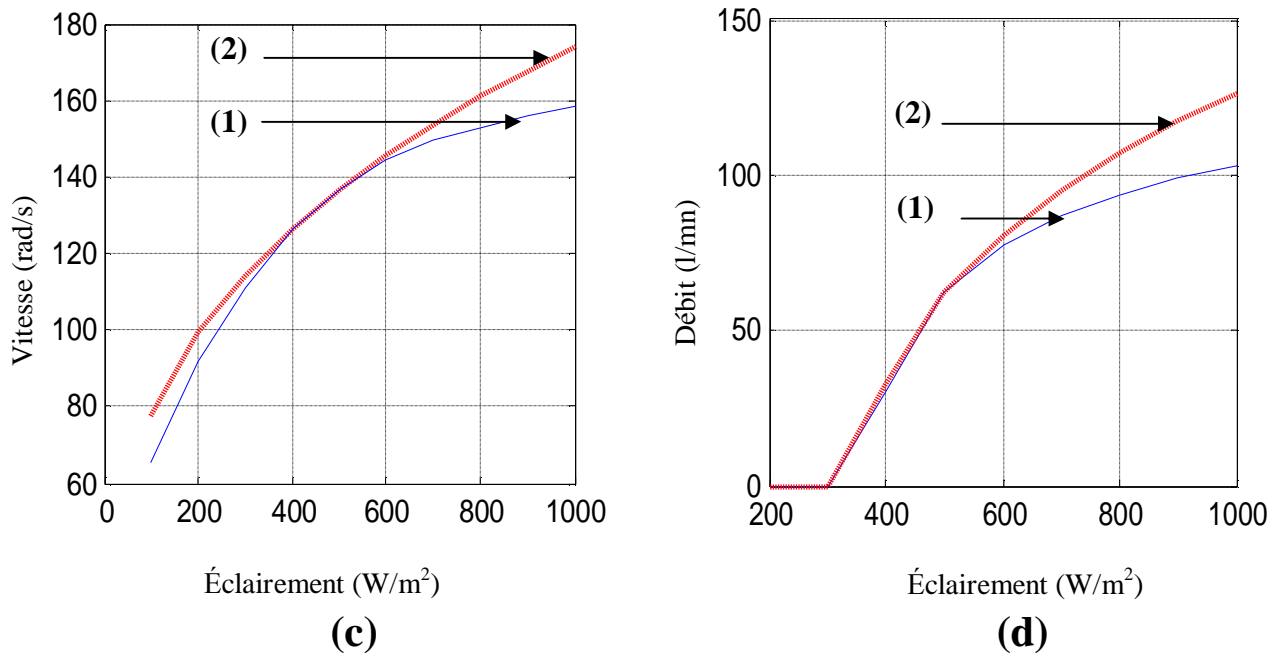


(a)



(b)





**Fig (5- 9) : Résultats de simulation d'un système de pompage photovoltaïque**  
**(1) – avant optimisation ; (2) – après optimisation**

Les figures (5-8-a) et (5-9-a) représentent la caractéristique de charge à  $T=25^{\circ}C$  et  $T=50^{\circ}C$ , le fonctionnement du système est amélioré par l'utilisation de la technique d'optimisation, où la MSAP est alimenté par des tensions plus proches aux valeurs nominales, l'effet de la technique d'optimisation par rapport au couplage direct est très clair pour les valeurs faibles de l'éclairement inférieur à  $600 W/m^2$  pour  $T=25^{\circ}C$ .

La tension d'alimentation est augmentée de 92V à 132V pour un éclairement de  $200W/m^2$  pour une température de  $25^{\circ}C$  et de 92V à 192V pour un éclairement de  $200W/m^2$  pour une température de  $50^{\circ}C$

Les figures (5-8-b) et (5-9-b) représentent les allures des caractéristiques du rendement GPV-MSAP pour deux températures différentes, on note l'amélioration du rendement du système optimisé qui devient presque constant pour les éclairements allant de  $200W/m^2$  à  $10000W/m^2$  atteignant ainsi un maximum de 7.83% à  $T=25^{\circ}C$  et 6.5% à  $T=50^{\circ}C$  par rapport au couplage direct. Ce faible rendement générateur photovoltaïque - machine synchrone à aimant permanent est faible, à cause du faible taux de conversion de puissance du générateur photovoltaïque.

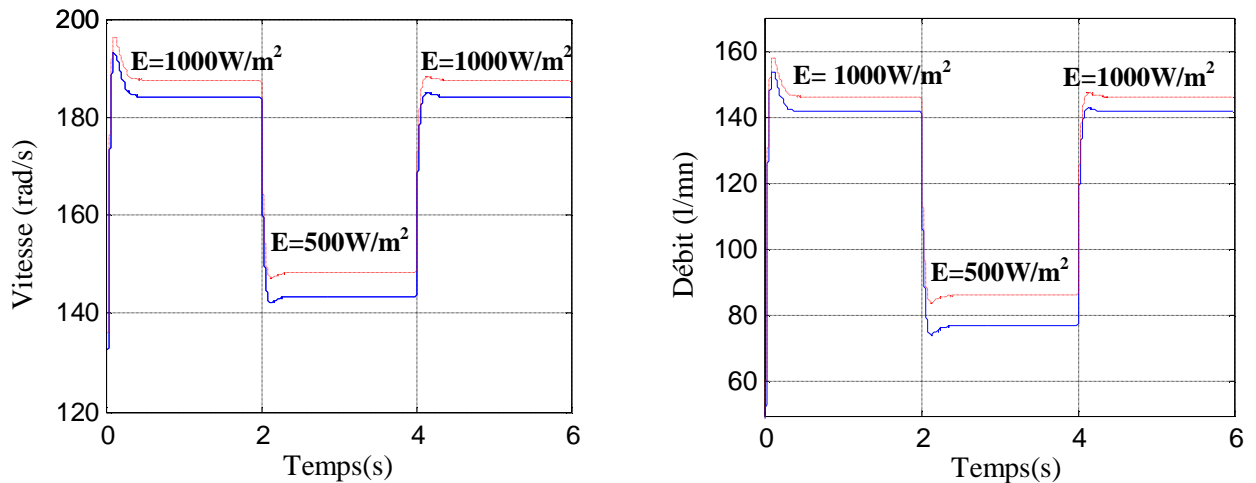
Les caractéristiques (5-8-c) et (5-9-c) représentent les allures des courbes des débits en fonction de l'éclairement, Dans le cas du couplage direct le système ne commence à délivrer de l'eau à partir d'un éclairement de  $300\text{W/m}^2$ , par conséquent la maximisation de puissance force la pompe à fournir de l'eau à partir de  $200\text{W/m}^2$ .

Pour  $T=25^\circ\text{C}$  on remarque une augmentation intéressante de la vitesse et du débit pour les faibles éclairements comparativement aux éclairements élevés.

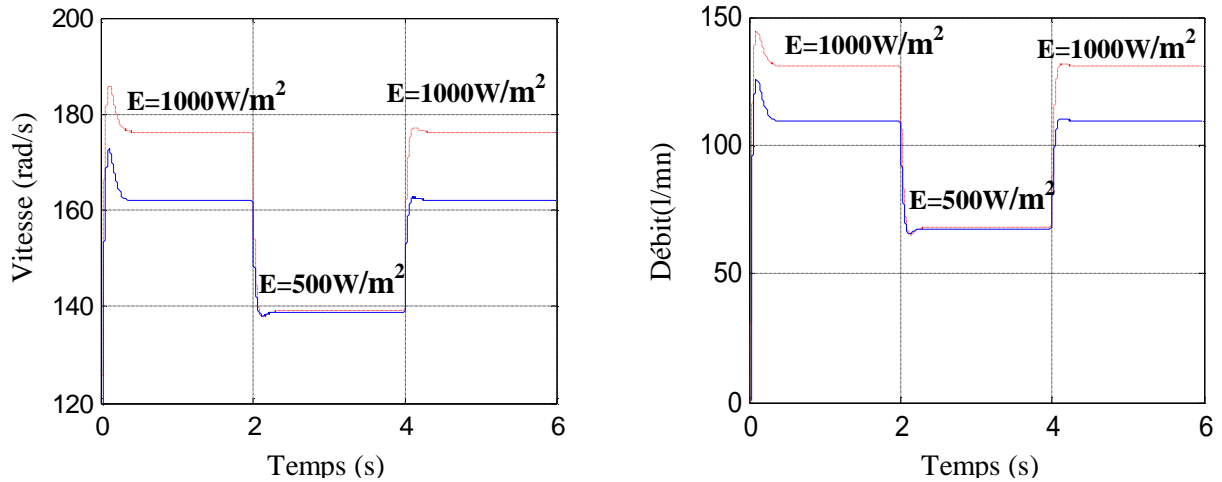
Pour  $T=50^\circ\text{C}$  on remarque une augmentation remarquable pour les éclairements élevés de la vitesse et du débit comparativement aux éclairements faibles qui est presque nulle.

Lors d'une variation brusque de l'éclairement (pendant le passage des nuages), pour cela on admet que le système fonctionne sous un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  et brusquement l'éclairement passe à  $500\text{W/m}^2$  et il revient à sa valeur initiale. on représente les allures des caractéristiques de la vitesse et du débit de la pompe sans et avec optimisation pour les deux températures.

Pour  $T=25^\circ\text{C}$  on remarque une augmentation légère de la vitesse et du débit pour les faibles éclairements comparativement aux éclairements élevés.



**Fig (5- 10) : comportement du système de pompage photovoltaïque  
Lors d'une variation brusque de l'éclairement à  $T=25^\circ\text{C}$**



**Fig (5- 10) : comportement du système de pompage photovoltaïque  
Lors d’une variation brusque de l’éclairement à T=50°C**

Le système d’optimisation améliore le rendement du moteur qui va travailler autour du point optimal de fonctionnement du générateur.

	<b>T=25°C Gain (%)</b>		<b>T=50°C Gain (%)</b>	
	E=1000W/m <sup>2</sup>	E=500W/m <sup>2</sup>	E=1000W/m <sup>2</sup>	E=500W/m <sup>2</sup>
Vitesse	1.80	3.28	8.06	0.096
Débit	0.011	0.04	5.97	0.46

**CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques méthodes de Tracking de la puissance maximale MPPT ou nous avons opté pour l’algorithme d’accroissement de la conductibilité « INC-MPPT qui se caractérise par un rendement supérieur par rapport aux algorithmes « P&O», et « CV-MPPT » mais l’algorithme de Tracking offre un meilleur rendement mais exige la connaissance de la capacité parasite, ainsi qu’une étude comparative entre le système direct est optimisé.

Les travaux présentés dans cette mémoire concernent la problématique du couplage entre un générateur photovoltaïque et une charge de type alternatif. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du GPV à la charge qui est souvent très loin des possibilités du générateur.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications tel que le pompage d'eau présente un intérêt très important ; cependant les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coup élevé, cela se vérifie sur la caractéristique  $I-V$  sous l'influence de différentes températures. L'étude nous a montré que le meilleur rendement du panneau photovoltaïque est obtenu pendant les journées froides avec ciel dégagé.

Les machines synchrones à aimant permanent apportent une solution intéressante pour la réalisation des systèmes de pompage photovoltaïques. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines asynchrones ou à courant continu, à savoir une durée de vie élevée, un rendement élevé, une maintenance réduite, ...etc. De plus l'évolution de l'électronique de puissance et la technologie des matériaux magnétiques permet d'élargir l'application de ces moteurs, mais pour des raisons économiques, le coup des aimants est encore élevé.

Avant d'aborder la problématique d'optimisation, nous avons tout d'abord étudié d'une façon générale l'énergie photovoltaïque ; ceci s'est avéré nécessaire pour acquérir une connaissance du comportement du GPV.

Notre étude à commencer par une présentation du modèle pour chaque élément constituant la chaîne photovoltaïque, ainsi qu'un dimensionnement du générateur (nombre de modules) afin d'avoir un modèle complet de l'ensemble et de donner une optimisation de l'énergie disponible.

Une fois les différents étages d'adaptations validées, nous avons confronté les modèles de ces éléments avec la connexion directe entre un GPV et le moto-pompe qui représente le choix le plus simple et le moins coûteux.

Dans ce contexte, l'optimisation du rendement générateur photovoltaïque-moteur synchrone à aimant permanent est une nécessité pour maximiser la quantité d'eau pompée d'une part et réduire le coût du système photovoltaïque d'autre part. Pour parvenir à cet objectif, il existe différentes techniques d'optimisation.

Dans ce mémoire, une étude comparative entre la technique d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque est présentée, en se basant sur le système le plus simple qui consiste en un couplage direct de l'ensemble Moto-Pompe au générateur photovoltaïque, ainsi que pour une

## Conclusion générale

---

optimisation de l'énergie délivrée par le générateur. La technique de maximisation ou poursuite de puissance maximale « MPPT » est utilisée.

- [1] - **Encarta** 2005.
- [2] - **A. Hammidat, A. Hadj Arab et M.T. Boukadoum** « Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 157 - 166).
- [3] - **R. Abdessemed, M.Kadjoudj** « Modélisation des machines électriques », presse de l'universite de Batna 1997
- [4] - **B.Equer** « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993
- [5] - **Ch.P.De, Brichabaut, Ch.Yauge** « le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique», Technique et documentation Lavoisier 1982.
- [6] - **B.Azoui** «Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application », Thesis of doctorat of science, University of Batna 2002.
- [7] - **A. Saadi and A. Moussi** « Neural Network Use in the MPPT of Photovoltaic Pumping System », Rev. Energ. Ren. ICPWE (2003) 39-45
- [8] - **K. Benlarbi** « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thèse de Magister, Université de Batna 2003.
- [9] - **J. Appelbaum and M.S. Sharma** « The Operation of Permanent Magnet DC Motors Powered by a Common Source of Solar Cells », IEEE Trans. Energ. Convers., 4, pp. 635 – 642, 1989.
- [10] - **J.A. Roger** « Theory of the Direct Coupling between DC Motors and Photovoltaic Solar Arrays », Solar Energy, 23, p. 193, 1979.
- [11] - **W. Anis and H.M.B. Metwally** « Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System », Solar Energy, 53, 3, 1994.
- [12] - **K. Benlarbi, L. Mokrani, M.S. Nait-Said** «A fuzzy global efficiency optimization of a Photovoltaic water pumping system », Solar Energy 77 (2004) 203–21
- [13] - **Y. Bakelli** « Étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque » mémoire de magister , Universite de Boumerdes 2005
- [14] - **J.Y. LE Chenadec**, « Les machines synchrones : Technologies et différents modes d'alimentations des machines synchrones », Cours photocopiés, Lycée Louis ARMAND, Nogent sur Marne, 1997
- [15] - **M.F.Shraif**« Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique ». Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier de Toulouse 2002

- [16] - **G-Walker** « Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model », university of Queensland, Australia 2000.
- [17] - **Y.Yusof, S.H.Sayuti**, « Modelling and Simulation of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System », national Power & Energy Conference (PECon) 2004 Kuala Lumpur Malaysia.
- [18] - **R. Chenni** « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire », Thèse de Doctorat Université de Constantine 2007.
- [19] - **Y.Amara** « contribution a la conception et à la commande des machines synchrones a double excitation, application au véhicule hybride », Thèse de doctorat de l'université Paris décembre 2001
- [20] - **B. Multon** « application des aimants aux machines électriques », ENS de Cachan antenne de Bretagne note de cours 2005.
- [21] - **M. Hadeff** « contrôle directe du couple des machines synchrones avec et sans capteur mécanique » Thèse de magister, Université Abderrahmane Mira Bejaia 2002.
- [22] - **G. Grellet, G.Clerc** « actionneurs électriques principe/commande/modèle », Editions Eyrolles 1997
- [23] - **G.Sturtzer** « Modélisation et commande des moteurs triphasés », Editions Ellipses, Markty .S.A 2000
- [24] - **J. P .Caron et J. P. Hautier** « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Editions Technip Paris 1995.
- [25] - **P. Barret** « Régimes transitoires des machines tournantes électriques », Editions Eyrolles 1982.
- [26] - **Z. Rouabah** « Modélisation et commande vectorielle d'une machine à induction avec prise en compte et minimisation des pertes » Thèse de magister, Université de Batna 2001.
- [27] - **F.Labrique , G.Seguir, R.Baussiere** « Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec.Doc.Paris 1995
- [28] - **J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy** « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens Bibliothèque nationale du Canada, 1998,
- [29] - **A. Saadi** « Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque », Thèse de magister, Université de Biskra 2001.
- [30] - **J. M. Hirtz** « Les stations de Pompage D'eau », Lavoisier TEC & DOC 1991

- [31] - **A. Betka** « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil », Thèse de Magistère, Université de Biskra.1997
- [32] - **B. N. Mobarakeh** « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants », Thèse de doctorat de L'INPL 2001
- [33] - **N. BESSOUS** « Commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent », mémoire de PFE, Université de Constantine 2005.
- [34] - **A. Dupont** « Hydraulique urbaine », Tome 2 Edition Eyrolles 1988.
- [35] - **R. Chenni , L. Zarour , A. Bouzid and T. Kerbache** « Comparative study of photovoltaic pumping systems using a permanent magnet synchronous motor and an asynchronous motor », Rev. Energ. Ren. Vol. 9 (2006) 17 – 28
- [36] - **D. P. Hohm, M. E. Ropp** « Comparative study of maximum power point tracking algorithms », Progress in photovoltaic: research and applications, 11: 47-62, 2003.
- [37] - **L. Van der Merwe, G. J. Van der Merwe** « Maximum power point tracking Implementation Strategies », Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1(1): 214-217, 1998.
- [38] - **R. E. Katan, V. G. Agelidis, C. V. Nayar** « Performance analysis of a solar water pumping system », Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers, and Energy Systems for Industrial Growth (PEDES), 81-87, 1996.
- [39] - **M. S. Taha, K. Suresh** « Maximum power point tracking inverter for photovoltaic source pumping applications », Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers, and Energy Systems for Industrial Growth (PEDES), 883-886, 1996.
- [40] - **M. Anderson, B. Alvesten** « 200 W low cost module integrated utility interface for modular photovoltaic energy systems », IECON Proceedings of the 1995 IEEE 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1(1): 572-577, 1995.
- [41] - **L. Van der Merwe, G.J. Van der Merwe** : « Maximum power point tracking – Implementation Strategies », Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1(1): 214-217, 1998.
- [42] - **V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lázaro** « Review Of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems », Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1555-1578.



- [43] - **E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris** « Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system », *IEEE Transaction on Power Electronics*, 16(1): 46-54, 2001.
- [44] - **C. Hua, J. Lin, C. Shen** « Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(1): 99-107, 1998.
- [45] - **A. Brambilla, M. Gambarara, A. Garutti, F. Ronchi** « New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking », *Proceedings of the 30th IEEE Power Electronics Conference*, 632-637, 1998.
- [46] - [www.BP.solar.fr](http://www.BP.solar.fr).

**Tableau 1 : Caractéristique du module photovoltaïque à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $E=1000\text{W/m}^2$  [46]**

Température	$T$	25	$^{\circ}\text{C}$
Tension de circuit ouvert	$V_{oc}$	21.2	V
Courant de court circuit	$I_{sc}$	5.27	A
Tension optimale	$V_{mp}$	17.23	V
Courant optimale	$I_{mp}$	4.85	A
Puissance de crête	$P_c$	83	W
Surface	$S_m$	0.588	$\text{m}^2$

**Tableau 2 : Caractéristique de la machine synchrone à aimant permanent [35].**

fréquence	$f$	60	HZ
Puissance nominale	$P$	746	W
Vitesse nominale	$n$	1800	tr /mn
Tension nominale	$U_{sn}$	208	V
Courant nominale	$I_{sn}$	5	A
Résistance d'une phase statorique	$R_s$	1.93	$\Omega$
le moment d'inertie	$J$	0.003	$\text{Kg/m}^2$
flux des aimants	$j_e$	0.314	Wb
Coefficient de frottement visqueux	$f_v$	0.0008	$\text{Nm} / (\text{rad} / \text{s})$
Nombre de pôles	$p$	4	.....
Inductance directe	$L_d$	0.0424	H
Inductances en quadrature	$L_q$	0.0795	H

**Tableau 3 : Caractéristique de la pompe centrifuge [12]**

Puissance nominale	$P_n$	559.5	W
Vitesse nominale	$n$	1750	tr/mn
Hauteur totale du pompage	$H$	10	m
Hauteur statique	$H_s$	7.4	m
Longueur de la tuyauterie	$L$	7.4	m
Accélération de la pesanteur	$g$	9.81	$m/s^2$
La masse volumique de l'eau	$\rho$	1000	$Kg/m^2$

**Paramètre de la pompe centrifuge :**

$$a_0 = 4.2934 \cdot 10^{-4} \text{ m / (rad /s)}^2 ; a_1 = 1.5825 \cdot 10^{-5} \cdot \text{heure / (m}^2 \cdot \text{(rad /h))};$$

$$a_2 = - 0.0410 \text{ (heure)}^2 / (\text{m / (m}^3 \text{ /h)}^2$$

## ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم لطاقت المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية، المعزولة أو البعيدة عن شبكة توزيع الطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة. من بين المجالات التي تستعمل فيه نجد مجال ضخ المياه، لكن هناك عدة مشاكل تعرقل استعماله ا نذكر من بينها غلاء تكلفتها ومردود ضعيف،

إن تطور المغناط الدائمة و إلكترونيك الاستطاعة أعطت دفع ملحوظ في تطوير الآلات الكهربائية الدوارة بسرعات متغيرة

في هذا المنوال تم إنجاز هذه المذكرة التي من خلالها قمنا بنمذجة، محاكات، تحكم في نظام ضخ المياه، هذا النظام يتكون من عدة أجزاء تشارك فيما بينها، وهي مولد الطاقة الشمسية، موج التوتر، المحرك التزامني بمغناطيس دائم و المضخة.

الدراسة تتضمن أيضا تقنية متابعة نقاط الاستطاعات الأعظمية الذي يضمن رفع مردود المحرك – المضخة، هذه التقنية تضمن أيضا التكيف بين المولد الشمسي و الحمولة لتخفيض ثمن تحويل الطاقة و همك عدة تقنيات و خوارزميات لفعل هذا العمل.

## RESUME

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible est un coup élevée.

Le développement des aimants permanent, surtout ceux de types de terres rares, et l'évolution de l'électronique de puissance ont permis des progrès importants dans le développement des machines à vitesse variable.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, la commande et l'optimisation d'un système de pompage solaire.

Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur synchrone à aimant permanent, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

**Mots-clés :**

**Energie solaire, Photovoltaïque, Modélisation et Simulation, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Optimisation, Pompe centrifuge.**

## **Abstract**

The use of solar in isolated sites for different applications, such as water pumping presents many interests for third world countries which are in real need for drinking water. However photovoltaic generators do have two main disadvantages namely:

High cost, bad efficiency.

The developments of permanent magnet and power electronics have helped in variable speed machine development.

The work presented in this memory is related to modelisation, simulation, control and optimisation of pumping solar systems.

The chain of this system is composed of photovoltaic panels, voltage inverter, permanent magnet synchronous motor, centrifugal pump and a hydraulic circuit.