



FACULTE : Sciences de l'Ingénierat  
DEPARTEMENT : Électrotechnique

## MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Commande Electrique

### Thème

Étude d'un système de pompage photovoltaïque  
(modélisation et simulation)

**Présenté par:**

Berramdane lies  
Younes bouassida mohamed reda

**Dirigé par:**

Mr.bouchikha hocine

**Jury de soutenance:**

- Bouazaa salah edine	Président	MCA	Université d'Annaba
- Bouchikha hocine	Rapporteur	MCB	Université d'Annaba
- Kelaiai mounia samira	Examineur	MCA	Université d'Annaba
- Mohammedi mofid	Examineur	MCB	Université d'Annaba

## Résumé

---

### Résumé:

L'objectif de ce mémoire est d'assurer un pompage alimenté par une énergie photovoltaïque qui est une énergie verte et renouvelable est dépendante des s'infrastructure gigantesque. Et on assure surtout une commande vectoriel d'une machine a synchrone associe à une électropompe énérgée.

La configuration de ce système comporte un gérateur photovoltaïque, un bus PV, un filtre PV connecté à un hacheur survolteur, un bus DC et un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée a une pompe centrifuge. L'objectif de ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques. L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC.

ملخص:

الهدف من هذه الرسالة هو ضمان ضخ عن طريق توليد الكهرباء بواسطة الطاقة الشمسية وهي تعتبر طاقة خضراء متجددة و مستقلة عن التهيئة العملاقة و تضمن توفير مكافحة ناقلات لمحرك كهربائي غير متزامن جنباً إلى جنب مع مضخة مركزية و يشمل تكوين هذا النظام مولد الفولطاضوئية، و حافلا بف، مرشح بف متصله بمحول دفعة، حافلة دس و جهاز تحريض تغذية العاكس الجهد إلى جانب مضخة الطرد المركزي. و الهدف من هذا النظام ضمان التشغيل في أقصى قدر من الطاقة من النظام الكهروضوئية لمختلف الظروف المناخية. تم تحديد المطابقة بين المولدات الضوئية و الحمولة بواسطة محول دس/دس.

### Abstract:

The objective of this thesis is to ensure pumping powered by photovoltaic energy that is green and renewable energy is dependent on gigantic infrastructure.

And above all, a vector control of a synchronous machine associated with an emergent electric pump is provided. The configuration of this system includes a photovoltaic generator, a PV bus, a PV filter connected to a booster chopper, a DC bus and a voltage inverter. Feeding an asynchronous machine coupled to a centrifugal pump. The objective of this system is to ensure maximum power operation of the photovoltaic system for various climatic conditions. The adaptation between the photovoltaic generator and the load was carried out by means of the DC / DC

Nomenclature :

GPV : générateur photovoltaïque

PV : photovoltaïque

PPM :point de puissance maximale

MPPT :maximum power point tracking

DC:direct current

AC:alternating current

P&O:perturb and observe

IncCond:increment of conductance

Voc:tension de circuit ouvert[V]

Icc :courant de court-circuit

E :niveau d'éclairement (ou d'irradiation)[w/m<sup>2</sup>]

I<sub>o</sub> :courant de saturation de la diode[A]

N :le facteur de non idéale de la ioction de la diode

K :la constante de boltzmann

T :la temperature effective de la cellule[  k]

Q :la charge de l' lectrom

N<sub>s</sub> :nombre de cellules en série

N<sub>p</sub> :nombre de cellules en parallèle

G :conductance du GPV

D :rapport cyclique

MLI/modulation de largeur d'impulsion

I<sub>opt</sub> :courant optimal

V<sub>opt</sub> :tension optimale

V<sub>in</sub> :tension a l'entrée du convertisseur statique

V<sub>o</sub> :tension a la sortie du convertisseur statique

PID :proportionnel intégrale dérivée :erreur

$C_e$  : couple électromagnétique du moteur

$C_r$  : couple de charge (ou couple résistant)

$\omega$  : vitesse de l'arbre du moteur

### Introduction générale :

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>an au nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup>an au sud du pays. L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante, et son utilisation offre un approvisionnement en énergie inépuisable. Étant donné que l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques et d'irrigation reste le souci quotidien des habitants des zones enclavées et sahariennes, les systèmes de pompage photovoltaïque sont particulièrement bien adaptés pour l'alimentation en eau à partir des puits ou des forages. Le pompage photovoltaïque est l'une des applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les sites isolés. Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. La première génération des systèmes de pompage solaires utilise des moteurs à courant continu à aimant permanent, surtout pour les applications à des basses et moyennes hauteurs. Ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompes solaires à cause de sa simplicité, sa robustesse et son faible prix. La chaîne de pompage étudiée dans notre cas, dotée d'une commande MPPT utilise un moteur asynchrone, entraînant une pompe centrifuge. [5] Dans ce manuscrit, nous avons tout d'abord présenté dans le 1<sup>er</sup> chapitre un état de l'art en commençant par la répartition du potentiel d'énergie solaire en Algérie, ainsi que l'histoire de l'effet photovoltaïque au fil des années. Ensuite nous rappellerons le principe de la conversion photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule et la constitution d'un GPV on a terminé par donner une identification du pompage photovoltaïque. Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre on a développé la cellule photovoltaïque et les convertisseurs statiques à savoir les hacheurs (DC-DC), les onduleurs (DC-AC). Nous avons montré dans le 3<sup>ème</sup> chapitre qu'il est nécessaire d'intégrer un dispositif annexe à une chaîne alimentée par des générateurs photovoltaïques, pour mieux gérer la puissance délivrée par ces derniers. L'algorithme de recherche du point de puissance maximale rentré dans la littérature. « Perturbe and Observe » (P&O) vu sa simplicité et ces résultats qui peuvent être parfois très précis. Ensuite le chapitre 4 est consacré à montrer la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette dernière est la machine la plus utilisée pour obtenir de la puissance mécanique à partir du réseau alternatif et la modélisation de la pompe centrifuge. Le 5<sup>ème</sup> chapitre est consacré à la commande vectorielle de la machine asynchrone. Le 6<sup>ème</sup> chapitre est consacré à la simulation du système de pompage photovoltaïque.

## Introduction

La commande de consommation en énergie ne cesse d'augmenter à travers le monde et ce en raison de la croissance démographique, l'urbanisation et le développement économique [1]. En parallèle, on prévoit que les ressources combustibles fossiles (non renouvelables) sont en voie d'épuisement. Alors, plusieurs travaux de recherche visent à trouver des solutions alternatives, basées sur les énergies renouvelables inépuisables permettant de garantir la satisfaction de la demande en énergie électrique. La situation géographique de l'Algérie et la relance des politiques pour le soutien de projets photovoltaïques, nous encourage à utiliser l'énergie solaire pour satisfaire nos besoins énergétiques particulièrement pour les sites isolés ou raccordés aux réseaux électriques de distribution. En effet, les énergies renouvelables consistent une solution incontestable pour la sûreté de l'approvisionnement en énergies et les protections de l'environnement. Parmi, les utilisations intéressantes de l'énergie photovoltaïque dans les sites isolés sont leurs utilisations dans les systèmes de pompage. De nos jours, l'utilisation de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique pour le fonctionnement des pompes installées dans des sites isolés est une technologie en développement et d'actualité. Ces installations de pompage sont nécessaires pour l'approvisionnement domestique, bétail et irrigation en eau dans les régions isolées. C'est dans ce cadre, que s'inscrit le travail réalisé dans cette thèse.

### I.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution. [2]

Energie électrique fournie à partir du soleil. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques s'appelle l'effet photoélectrique. Ces cellules produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire. Ensuite l'utilisation de ce courant continu diffère d'une installation à l'autre, selon le but de celle-ci. On distingue principalement deux types d'utilisation, celui où l'installation photovoltaïque est connectée à un réseau de distribution d'électricité et celui où elle ne l'est pas.

## I.2 Potentiel d'énergie solaire en Algérie

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

### I.1. Tableau d'énergie solaire en Algérie

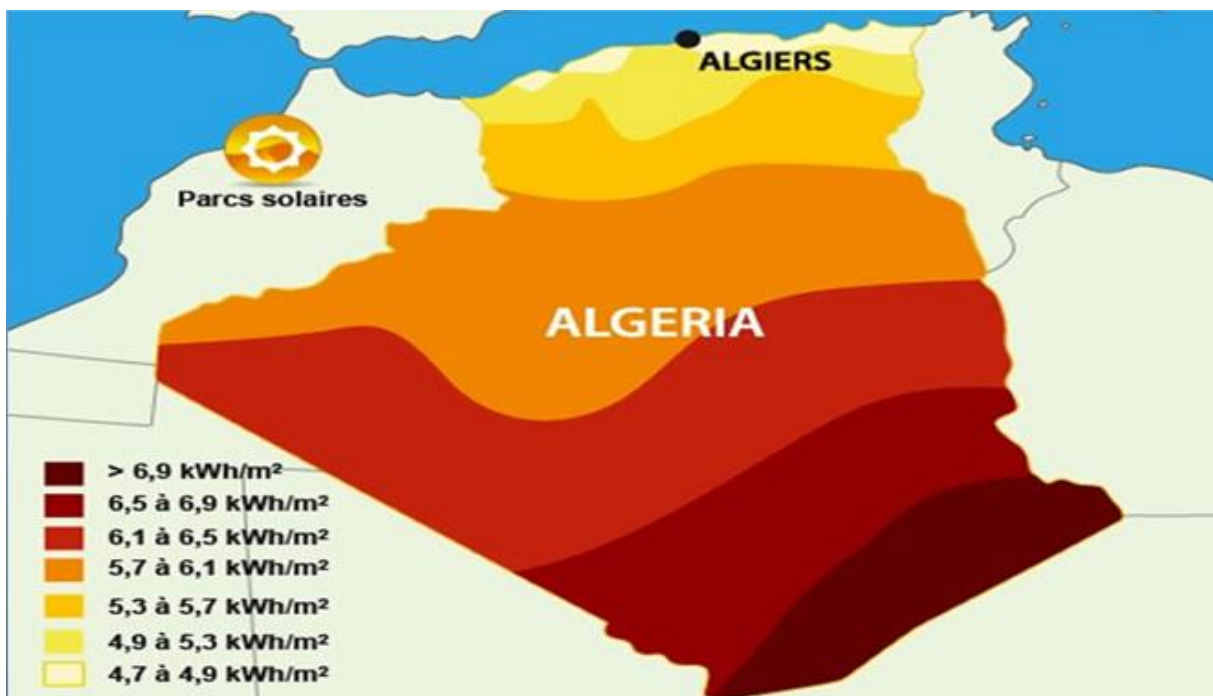


Fig.I.1 : Carte solaires mensuelles d'énergie solaire en Algérie

### I.3 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.

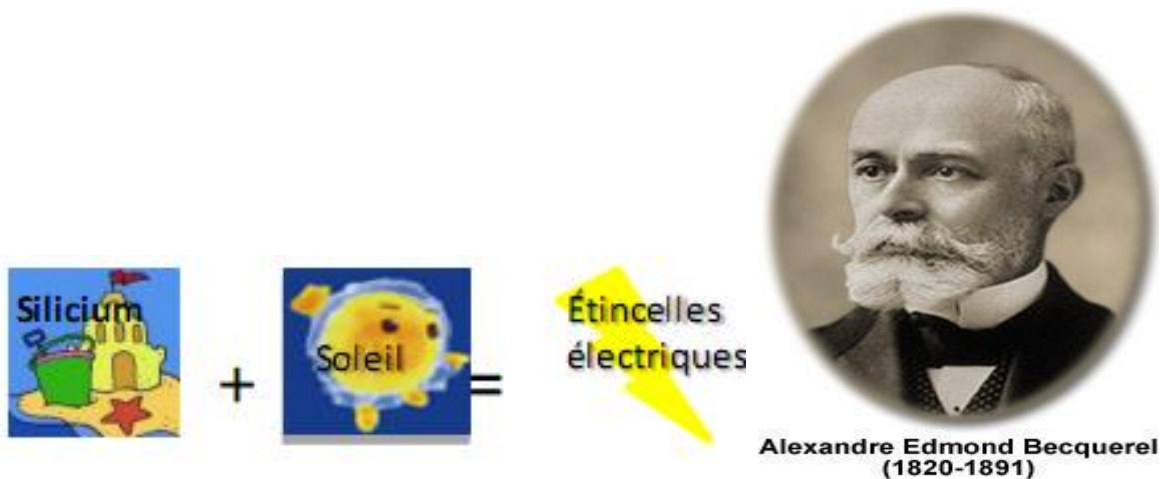
1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

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. [2]

**1839** : Découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre Edmond Becquerel.

Il avait observé que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. Il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité



**Fig.I.2 : Découverte de l'effet photovoltaïque par Edmond**



**1873** : Découverte de la photoconductivité du sélénium par Willoughby Smith



**Fig.I.3** : Découverte de la photoconductivité du sélénium par Willoughby Smith

**1954** : Trois chercheurs américains, Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.



**Fig.I.4** : mise au point d'une cellule photovoltaïque à haut rendement

**1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.



**Fig.I.5** : les premiers satellites alimentés par des cellules solaires

**1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

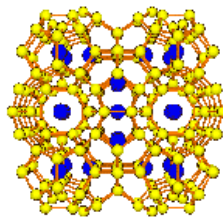


**Fig.I.6** : premières voiture alimentée par énergie photovoltaïque

### I.3.1 Fabrication

#### I.3.1.1 La matière première : la silice

La pierre de silice est à la base de la production de cellules photovoltaïques.



**Fig.I.7** : la pierre de silice

La silice est un composé chimique ( $\text{SiO}_2$ ). Le silicium (Si) est un élément de la famille des cristallogènes.



**Fig.I.8** : les montagnes de la matière première la silice

C'est l'élément le plus abondant sur la Terre après l'oxygène (27,6%). Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de dioxyde :

- la silice (dans le sable, le quartz, la cristobalite, ...)
- les silicates (dans les feldspaths, la kaolinite, ...)

## I.3.1.2 Processus de fabrication d'une cellule :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

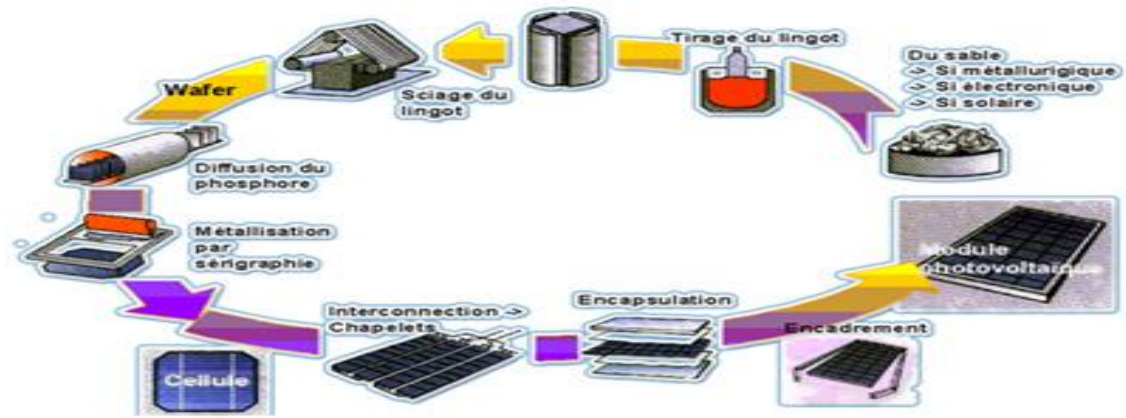


Fig.I.9 : Processus de fabrication d'une cellule

## I.4 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.

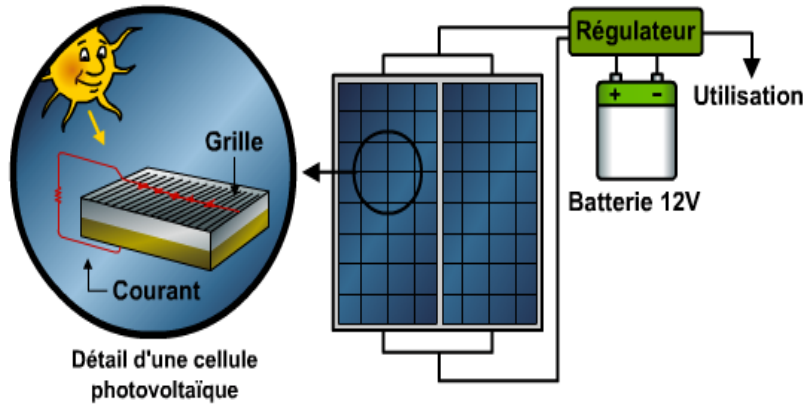


Fig.a

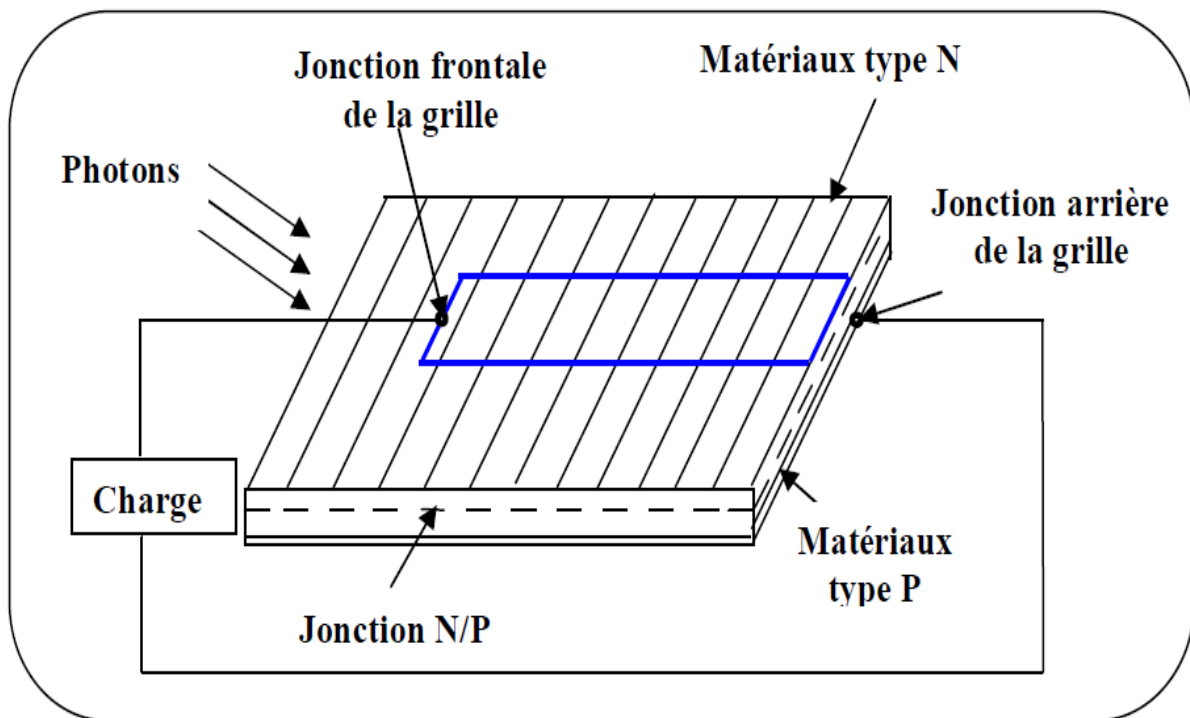


Fig. b

**Fig.I.10 (a-b) : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque**

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.

## Chapitre I : Etat de l'art

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit  $I_{cc}$  et dépend fortement du niveau d'éclairement.

### Procédé d'extraction :

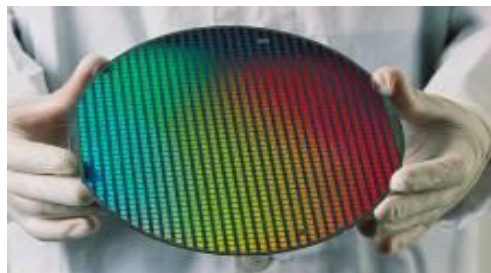
Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium qui est alors chauffé et réduit dans un four. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement.

Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique (pur à 99.999999% exactement) qui se présente sous forme liquide.



**Fig.I.11 : Echauffement du silicium**

Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en phosphore (qui deviendra la « partie N ») ou en bore (qui deviendra la « partie P »), afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur



**Fig.I.12 : Enrichissement en phosphore**

### **I.5 DÉCLINAISON DU SOLEIL :**

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

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[ 2\pi \times \frac{284+j}{365} \right] \quad (\text{I.1})$$

Où  $j$  : est le numéro d'ordre du jour de l'année ( $n=1$  pour le 1er 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.

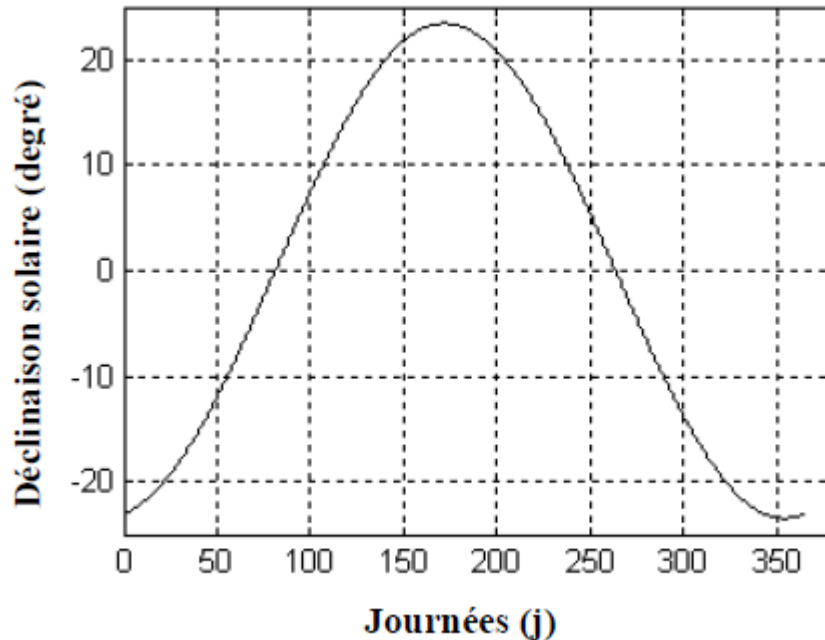


Fig.I.13 Courbe de déclinaison du soleil

### I.6 les différents types de cellules photovoltaïques :

#### I.6.1 Silicium monocristallin :

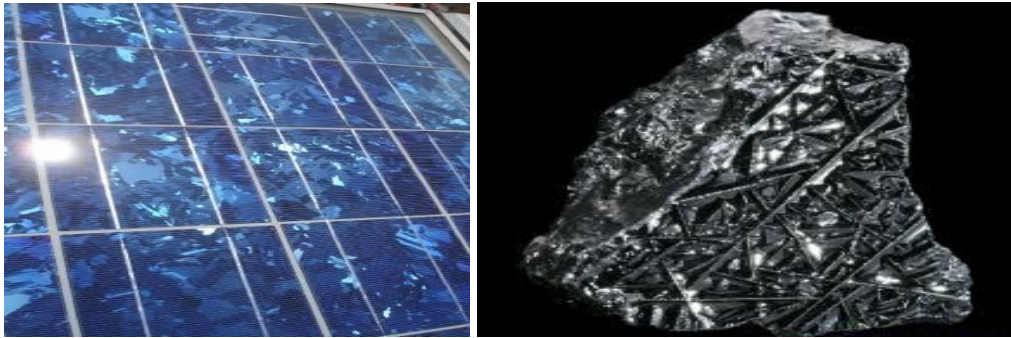
Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.



Fig.I.14: Silicium monocristallin

### I.6.2 Silicium poly cristallin :

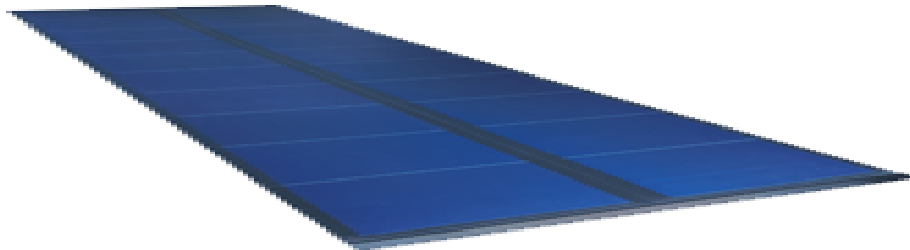
Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.



**Fig.I.15: Silicium poly cristallin**

### I.6.3 Silicium amorphe (a-si):

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière.



**Fig.I.16 : Silicium amorphe (a-si)**

### I.6.4 Nouvelles technologies :

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light-Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

Le tableau (I.2) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque.

<b>TYPE</b>	<b>Silicium mono Cristallin</b>	<b>Silicium poly cristallin</b>	<b>Silicium amorphe</b>
Durée de vie (ans)	35	35	<10
Avantages	Bon rendement en soleil Direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvénients	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

**Tableau I.2 Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques**



## I.7 Regroupement des cellules :

### I.7.1 Regroupement en série :

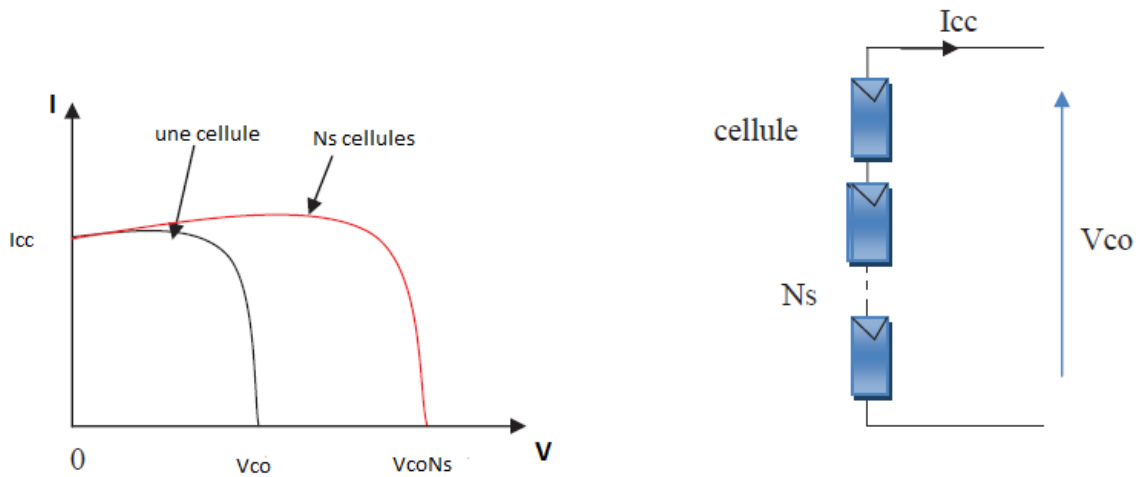
Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (I.18) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (I.2)$$

$$I_{ccNs} = I_{cc} \quad (I.3)$$

$V_{coNs}$  : La somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{ccNs}$  : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.



**Fig. I.17 :** Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série

## I.7.2 Regroupement en parallèle :

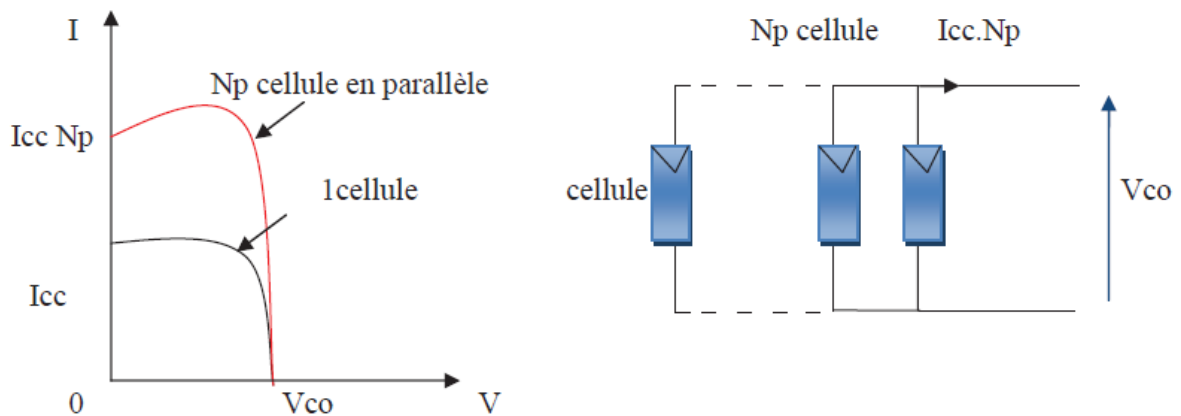
Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule figure (I.19) est possible et permet d'augmenter le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de cellules identiques connectés en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc} \tag{I.4}$$

$$V_{coNp} = V_{co} \tag{I.5}$$

$I_{ccNp}$  : La somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

$V_{coNp}$  : Tension de circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.



**Fig.I.18** : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellules en parallèles

## 1.7.3 Regroupement Mixte (série & parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (1.19). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $N_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $N_p$

parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure (1.20),  $N_s$  et  $N_p$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

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

$V_{gco} = N_s \cdot V_{co}$  : tension du circuit ouvert du module résultant.

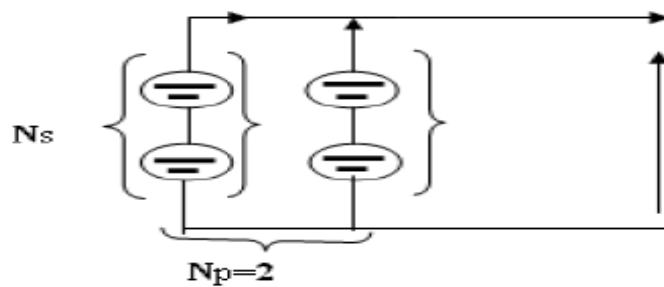


Fig. I.19 : association mixte des modules

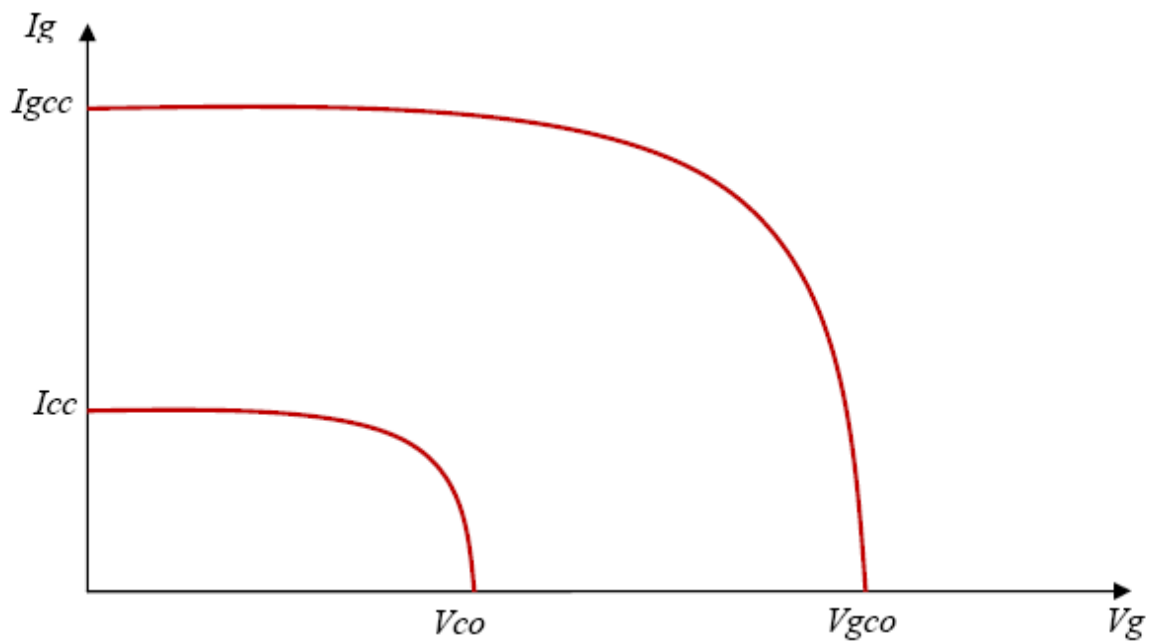


Fig. I.20 : caractéristique résultante du regroupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Regroupement en série) ou augmenter le courant (Regroupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de

caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

### I.8 Caractéristiques d'un module :

- **La puissance crête  $P_{c\_}$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25 °C et un éclairement de 1000W/m<sup>2</sup>). [11][9].
- **La caractéristique  $I=f(v)_-$**  : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide  $V_{co\_}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement "plein soleil".
- **Courant de court-circuit  $I_{cc\_}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement "plein soleil".
- **Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ ) \_** : lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m=U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal \_** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme \_** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$

### I.9 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients

#### I.9.1 avantages du photovoltaïque :

- ✓ Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchets toxique par son utilisation.
- ✓ Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance.
- ✓ Ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.
- ✓ Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.

- ✓ Ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- ✓ Il n'exige aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

### I.9.2 Inconvénient des photovoltaïques :

- × La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- × Le rendement réel d'un module photovoltaïques 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 ( $< 30V$ ), donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- × L'intensité d'irradiance du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et fluctue.

### I.10 Description d'un système de pompage :

Aujourd'hui, l'industrie mondiale du photovoltaïque qui ne cesse de croître constamment, repose essentiellement sur les besoins des régions isolées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Dans un grand nombre d'applications, la solution est apportée par le

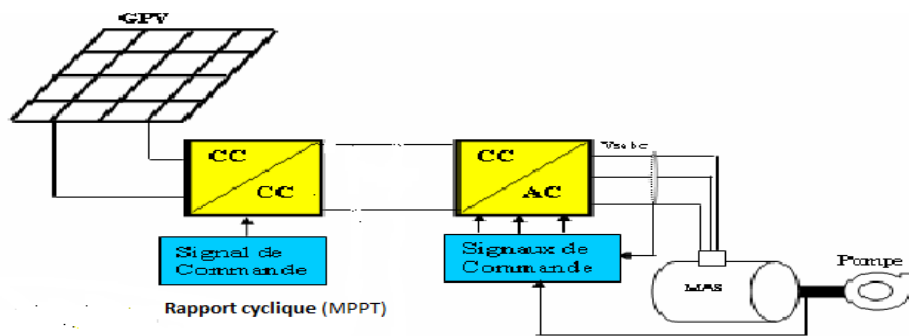
Photovoltaïque. [12]

Pour les régions éloignées, le pompage manuel qui est une solution satisfaisante malgré l'effort que représente le levage d'eau doit faire appel à une source d'énergie électrique pour l'amélioration du rendement. De plus, le pompage photovoltaïque permet d'obtenir des débits nettement importants, apparaît comme une solution raisonnable adéquate.

Le schéma général d'un système de pompage peut être représenté par la figure I-21.

Il est constitué principalement par :

1. Un générateur photovoltaïque
2. Convertisseurs statiques, l'un permettant la transformation CC-CC et l'autre CC-AC
3. Une motopompe qui comprend un moteur asynchrone et une pompe centrifuge.



**Fig.I.21 :Schéma synoptique du système globale de pompage**

### **Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque (Ensoleillement, effet photovoltaïque, ...etc.), ainsi que les différentes technologies d'une cellule PV, et à travers une étude sur les types de regroupement des cellules nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension.

### Introduction :

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du pompage photovoltaïque. (Générateur photovoltaïque, hacheur onduleur, moteur, pompe)

Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants.

Ce chapitre tient compte de la modélisation du panneau solaire et les convertisseurs statique.

### II.1 Modélisation de la cellule PV

#### II.1.1 Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple Figure(II.1). Comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier débite d'une part de courant  $I_{pv}$  et le reste, le courant  $I_d$ , dans la diode.

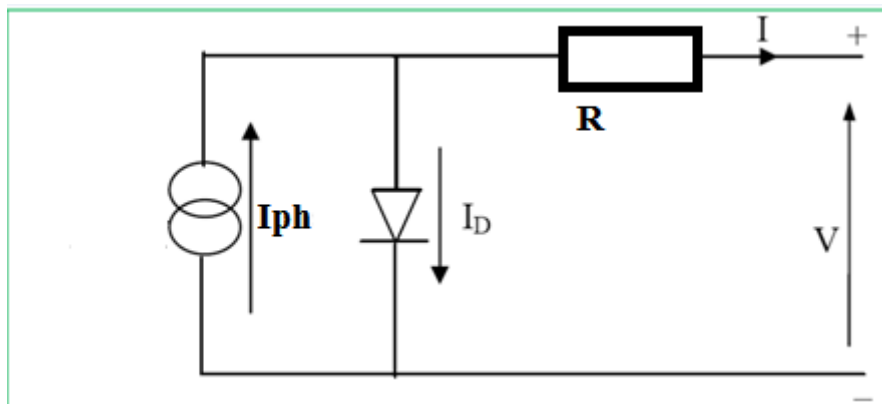


Fig II.1 : schéma d'une cellule photovoltaïque idéale

D'après les lois des nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (II.2)$$

## Chapitre II : Modélisation panneau solaire et convertisseurs statique

---

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

$$I_d = I_0 \times e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$I_0$  : Courant de saturation de la diode

$V_d$  : Tension aux bornes de la diode

$V_t = \frac{kT}{q}$  Potentiel thermique

$k$  : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  Joule/Kelvin)

$q$  : charge d'électron =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C

$T$  : température de la cellule en Kelvin

$I_{ph}$  : courant photonique

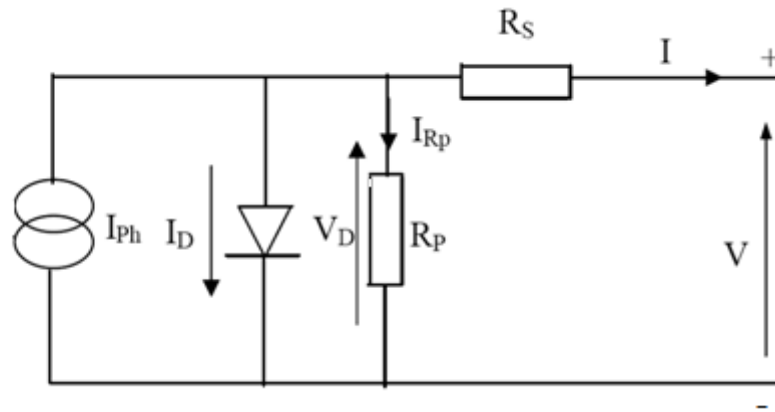
Donc la relation (II.1) sera :

$$I = I_{ph} - [I_0 \times e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1] \quad (\text{II.4})$$

### II.1.2 Cellule photovoltaïque réelle :

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$ .





**Fig II.2 : schéma d'une cellule photovoltaïque réelle**

On a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (II.5)$$

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (II.6)$$

$$I_d = I_0 \times e^{\frac{V + R_s I}{v_t}} - I \quad (II.7)$$

De (II.5) et (II.6) ; (II.7) devient :

$$I = I_{ph} - \left[ I_0 \times e^{\frac{V + R_s I}{v_t}} - I \right] - \left[ \frac{V + R_s I}{R_p} \right] \quad (II.8)$$

### II-1-3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque :

Le générateur PV est une matrice formée de NS modules en série et NP rangés en parallèle, dont la caractéristique I-V peut être par une équation non linéaire de forme implicite :

$$I_g = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{v + R_s I}{A \cdot V_{th}}} - I \right] - \left[ \frac{V + R_s I}{R_p} \right] \quad (II-9)$$

OU :

$V_{th}$  : la tension thermique est donnée par :

$$V_{th} = \frac{nKt_c}{q} \quad (II-10)$$

$T_c$  : la température de jonction de la cellule.

## Chapitre II : Modélisation panneau solaire et convertisseurs statique

Avec  $R_s$  et  $R_p$  résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_p = n \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot R_p$$

$$R_s = n \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s$$

### II-1-4-Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire :

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV [8]

#### II-1-4-1-Courant de court-circuit ICC :

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (II-9)

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qR_s I_{cc}}{kT}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_p} \quad (II-11)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_s \rightarrow 0$  et  $R_p \rightarrow \infty$ )

$$I_{cc} = I_{ph} = qg(L_n + L_p) \quad (II-12)$$

Tenant compte de l'effet des résistances  $R_s$  et  $R_p$  ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

$$0 = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qR_s I_{cc}}{A k T}} - 1 \right) - \frac{V_{CO}}{R_p} \quad (II-13)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_s \rightarrow 0$ ,  $R_p \rightarrow \infty$ ,  $I_{ph} = I_{cc}$  et  $A = 1$ )

$$V_{CO} = \frac{n k T}{q} \ln \left[ 1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right] \quad (II-14)$$

$V_{CO}$  augmente quand  $I_0$  diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de la jonction.

#### II-1-4-2-Facteur de forme FF :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m V_M}{I_{cc} V_{CC}} \quad (II-15)$$

il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique  $I = f(V)$

### II-1-4-3 RENDEMENT ENERGETIQUE MAXIMUM $\eta_m$ :

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie ( $p_{max}$ ) sur la puissance du rayonnement solaire incident ( $p_i$ )

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{p_i} = \frac{I_m V_m}{\phi \cdot S} \quad (\text{II-16})$$

S: surface de la cellule solaire.

$\Phi$  : flux incident.

( $I_m, V_m$ ) : coordonnées du point de fonctionnement

## II.2 Modélisation des convertisseurs statique :

### II.2.1 Introduction :

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nous besoin il y a deux sorte de convertisseur (les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC)

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude des deux types de convertisseurs DC/DC et DC/AC.

### II.2.2 Les convertisseur DC-DC(les hacheurs) :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue (onduleur).

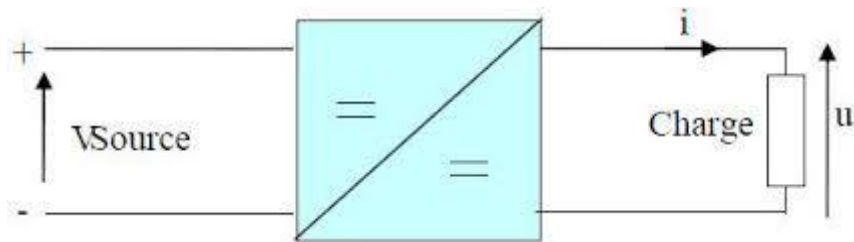


Fig. II.3 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

Les hacheurs permettent donc d'obtenir une tension continue réglable à partir d'une tension continue.

### II.2.2.1 Convertisseur Buck :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Le hacheur série est un convertisseur direct DC-DC, La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur  $S$  peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

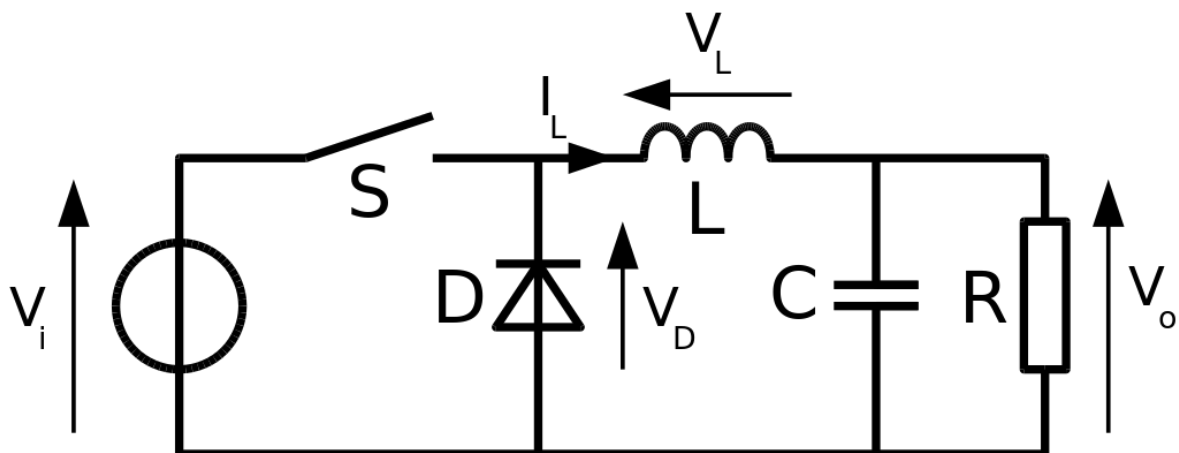


Fig. II.4 : schéma de bas d'un Convertisseur Buck

#### Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur  $S$ .

## Chapitre II : Modélisation panneau solaire et convertisseurs statique

- Dans l'état passant, l'interrupteur S (**fig.II.5**) est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_i - V_o$ . Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

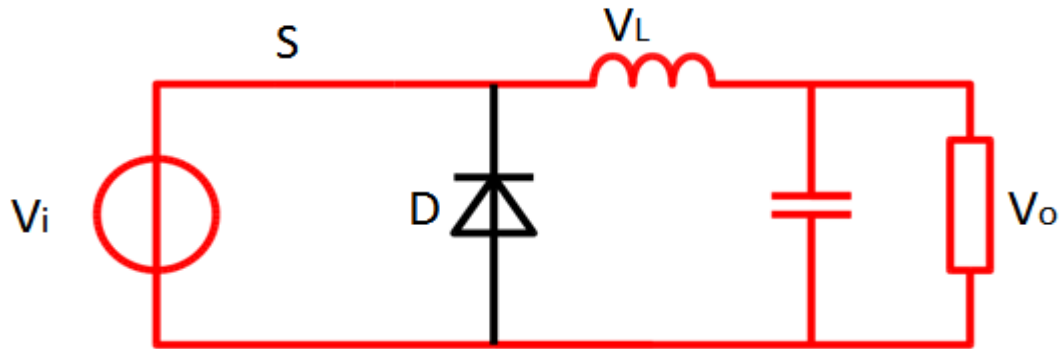


Fig. II.5 : Schéma lorsque l'interrupteur est passant

- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = -V_o$ . Le courant traversant l'inductance décroît.

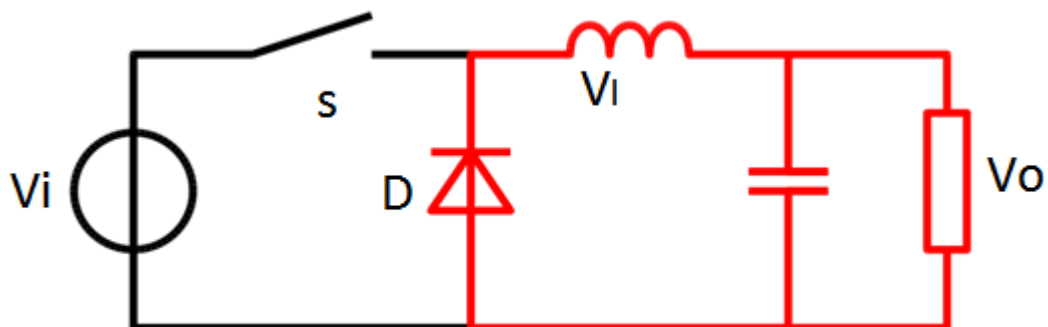


Fig. II.6 : Schéma lorsque l'interrupteur est bloqué

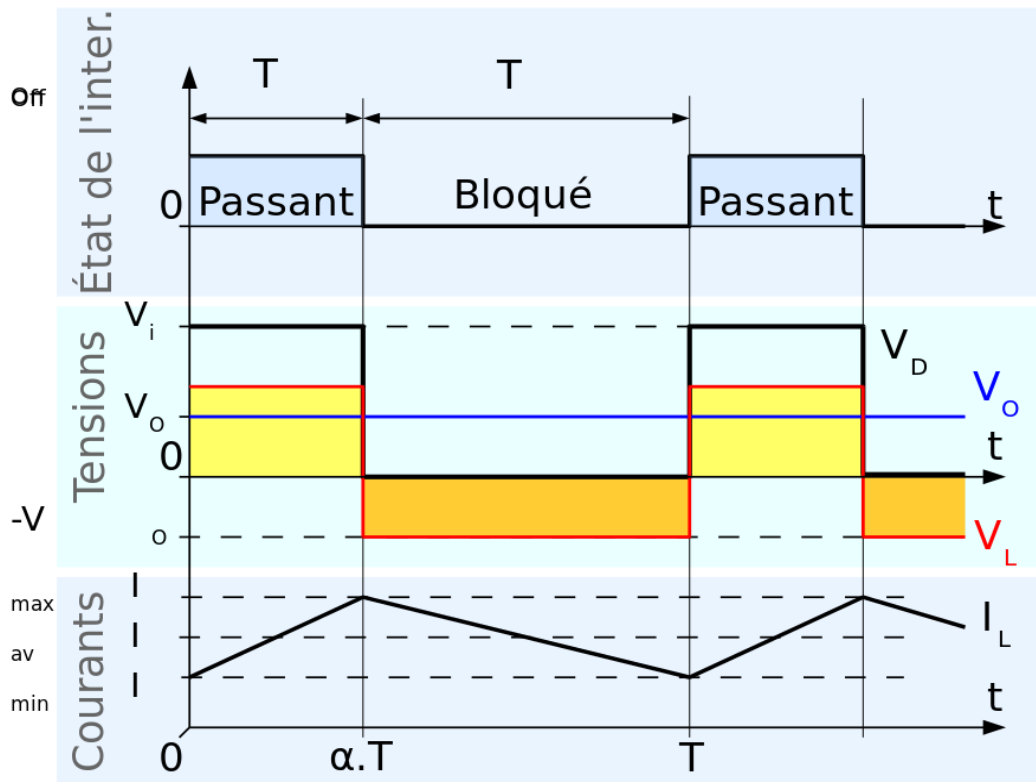


Fig. II.7 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck

### II.2.2.2 Convertisseur BOOST :

Un convertisseur BOOST, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus forte.

La figure (II.8) représente le schéma de base d'un convertisseur BOOST.

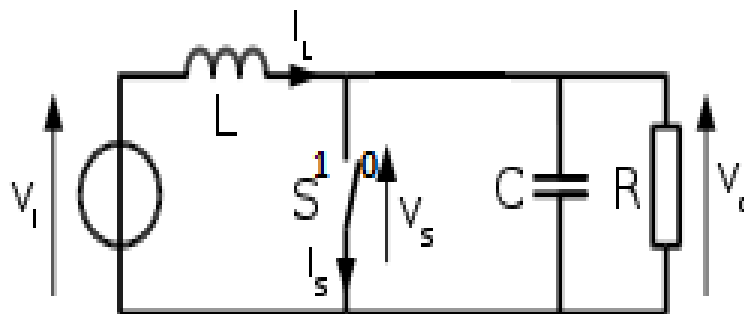


Fig II.8 : Schéma de base d'un convertisseur Boost

### Principe de fonctionnement :

Dans le cas d'un convertisseur « BOOST » la tension de sortie  $V_{out}$  est supérieure à la tension d'entrée  $V_{in}$ .

Le fonctionnement d'un convertisseur BOOST peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation

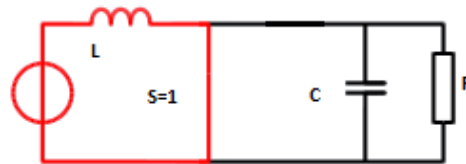


Fig. II.9 : schéma lorsque l'interrupteur est fermé

Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m. s'ajoute à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité

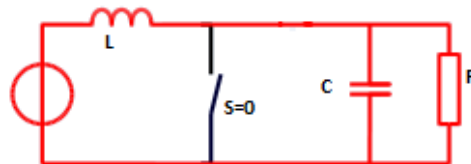


Fig II.10 : schéma lorsque l'interrupteur est ouvert

### II.2.3 Modélisation du hacheur BOOST :

Dans les conditions idéales, c'est à dire : interrupteur idéal, capacité idéale et inductance idéale, le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes :

$$C \frac{dV_c}{dt} = (1 - u) i_l - \frac{V_c}{R} - i_0 \quad (\text{II.17})$$

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{in} - (1 - u) V_c \quad (\text{II.18})$$

## Chapitre II : Modélisation panneau solaire et convertisseurs statique

---

$$V_0 = Ri \quad (II.19)$$

Dans le cas réel, une résistance interne à l'inductance RL, et une résistance interne à la capacité RC, peuvent être ajoutés au modèle précédent

Les équations (II.8) et (II.9) deviennent respectivement :

$$C \frac{dV_c}{dt} = (1 - u) \frac{V_0}{R} - i_0 \quad (II.20)$$

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{in} - (1 - u)V_0 - R_l i_l \quad (II.21)$$

$$V_0 = V_c + R_c C \frac{dV_c}{dt} \quad (II.22)$$

En insérant (II.13) dans (II.8) :

$$C \frac{dV_c}{dt} = (1 - u)i_l - \frac{V_c}{R} - \frac{R_c}{R} - \frac{R_c}{R} C \frac{dV_c}{dt} - i_0 \quad (II.23)$$

Ce qui donne :

$$\left(1 + \frac{R_c}{R}\right) C \frac{dV_c}{dt} = (1 - u)i_l - \frac{V_c}{R} - i_0 \quad (II.24)$$

Et :

$$\left(\frac{R+R_c}{R}\right) C \frac{dV_c}{dt} = (1 - u)i_l - \frac{V_c}{R} - i_0 \quad (II.25)$$

D'où :

$$C \frac{dV_c}{dt} = \frac{R}{R+R_c} (1 - u)i_l - \frac{V_c}{R+R_c} - \frac{Ri_0}{R+R_c} \quad (II.26)$$

L'expression (II.13) devient :

$$V_0 = V_c + \frac{RR_c}{R+R_c} (1 - u)i_l - \frac{R_c}{R+R_c} - \frac{RR_c}{R+R_c} i_0 \quad (II.27)$$

En développant cette expression de  $V_0$  on obtient :

$$V_0 = \frac{RV_c + R_c V_c - R_c V_c}{R+R_c} + \left(\frac{RR_c}{R+R_c}\right) [(1 - u)i_l - i_0] \quad (II.28)$$

Et donc :



$$V_0 = \frac{RV_c}{R+R_c} + \left(\frac{RR_c}{R+R_c}\right) [(1-u)i_l - i_0] \quad (\text{II.29})$$

L'expression (II.12) devient :

$$i_l = \frac{1}{l} \int (V_{in} - (1-u)V_0 - R_l i_l) dt \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$u$  : position de l'interrupteur (0 ou 1).

### II.2.4 Les convertisseur DC-AC (Onduleurs) :

L'onduleur est un des convertisseurs d'énergie électrique qui a comme fonction la conversion de l'énergie à courant continu (c.c.) en énergie à courant alternatif (c.a.). Il convertit une tension continue d'entrée en une tension alternative de sortie avec une amplitude et une fréquence convenable. Ces deux paramètres peuvent être fixes ou variables; si la tension d'entrée est variable et le gain de l'onduleur est constant, on obtient une tension variable à la sortie; cependant, si la tension d'entrée est constante et non commandée, la tension de sortie peut varier en changeant le gain de l'onduleur. Il y a plusieurs techniques pour obtenir cette variation, la technique de modulation de largeur d'impulsions (en anglais "pulse-width modulation", PWM) est très répandue. Elle consiste à changer la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs semi-conducteurs de l'onduleur.

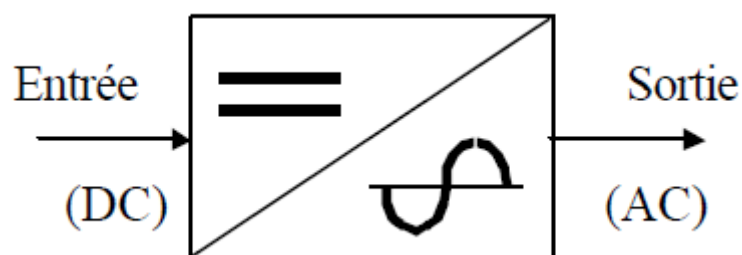


Fig II.11 : Schéma de principe de l'onduleur.

#### II.2.4.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion.

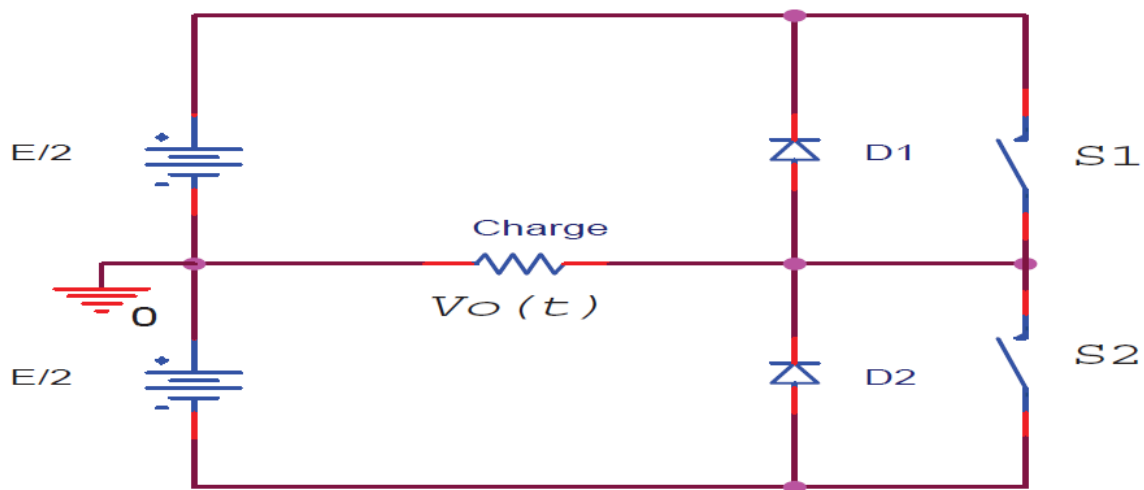
- Onduleur Monophasé
- Onduleur Triphasé

### II.2.4.2 Onduleur Monophasé :

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

#### II.2.4.2.1 Onduleur monophasé en demi-point

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure (II.12)



**Fig II.12 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé en demi-point.**

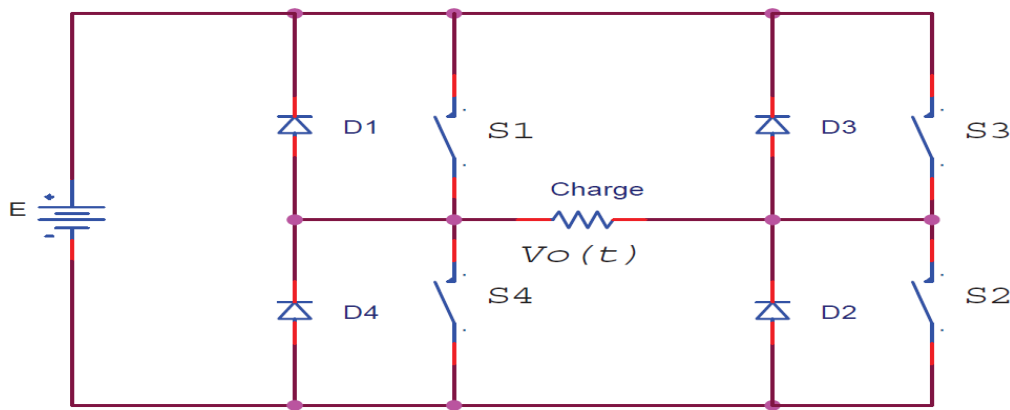
Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés  $S1$  et  $S2$  à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi cycle ( $180^\circ$ ) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur  $S1$ , la tension aux bornes de la charge serait donc de  $+E/2$ , et prend la valeur  $-E/2$  quand le second interrupteur,  $S2$  est fermé.

Les diodes  $D1$ ,  $D2$ , dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge.

#### II.2.4.2.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H) :

La structure de base de l'onduleur de tension en pont se présente à la figure (II.13). Il se compose de quatre interrupteurs semi-conducteurs avec des diodes en antiparallèle. La charge est branchée entre les deux bras de l'onduleur.



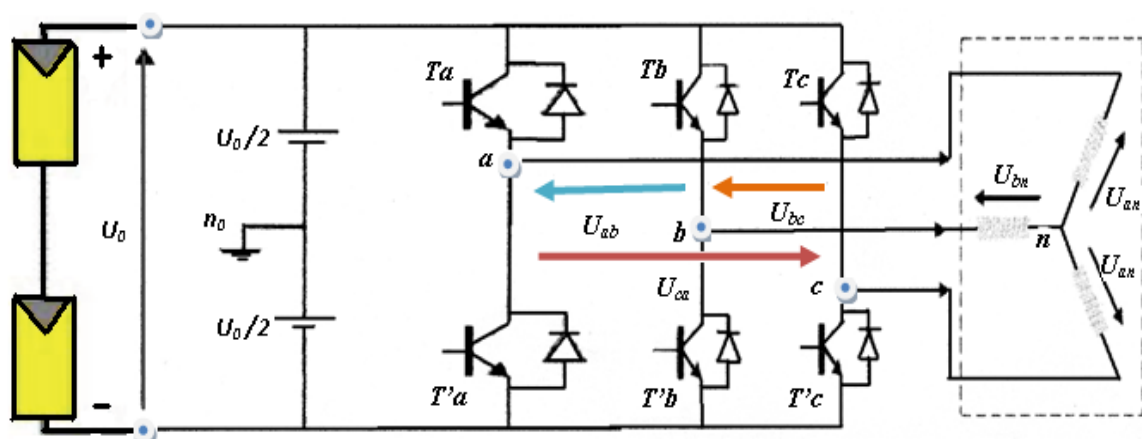
**Fig II.13 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé en pont. [6]**

### II.2.4.3 Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de  $120^\circ$  degrés, l'une par rapport à l'autre.

#### II.2.4.3.1 Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue  $U_o$ . Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant. et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle.



**Fig II.14 : Structure d'un onduleur triphasé.**

### II.2.4.3.2 Les avantages et les inconvénients de l'onduleur de tension

Pour alimenter un moteur triphasé, l'onduleur de tension est d'ordinaire un pont à six interrupteurs. Il est précédé d'un filtre qui corrige l'imperfection de la source qui l'alimente et qui réduit l'ondulation du courant pris à cette source.

L'inductance du moteur est donc son comportement en récepteur de courant ne pose pas de problème, au contraire, puisqu'un onduleur de tension est destiné à alimenter un récepteur de courant.

Si on utilise des semi-conducteurs rapides, on peut fonctionner à une fréquence de commutation élevée.

L'onduleur de tension est réversible, c'est-à-dire permet le freinage par récupération du moteur. Mais cela suppose la réversibilité en courant de la source qui l'alimente. Or, un redresseur est réversible en tension et non en courant. La réversibilité amène à compliquer l'alimentation de l'onduleur dans les équipements alimentés par le réseau industriel.

L'inconvénient majeur de l'onduleur est l'obtention de la tension non sinusoïdale à sa sortie, cela provoque un échauffement excessif aux niveaux des enroulements des moteurs.

### II.2.4.3.3 Modélisation de l'onduleur de tension :

La modélisation de l'onduleur de tension permet de donner une vue mathématique de leur principe de fonctionnement, c'est-à-dire grâce à cette vue on peut comprendre bien leur fonctionnement.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc

$$\begin{cases} U_{an} = \frac{1}{3} [V_{ab} - V_{ca}] \\ U_{bn} = \frac{1}{3} [V_{bc} - V_{ab}] \\ U_{cn} = \frac{1}{3} [V_{ca} - V_{bc}] \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

## Chapitre II : Modélisation panneau solaire et convertisseurs statique

---

Elles peuvent être écrites à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_o$

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \left(\frac{1}{3}\right)[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.34})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow$  Si (i = a, b, c) on a

$$V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (\text{II.35})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Donc on obtient :

$$\begin{pmatrix} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{2}{3}V_{an0} + \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{1}{3}V_{cn0} \end{pmatrix} \quad (\text{II.37})$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

### II.2.4.3.4 Technique de commande de l'onduleur

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques représentent les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence et tension fixes (en général une tension continue par l'intermédiaire d'un convertisseur). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs du convertisseur et par les séquences de fonctionnement.

La méthode de contrôle des courants par MLI, à partir d'une source de tension continue constante, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche possible de la référence de la tension sinusoïdale.

La manipulation du nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importants à savoir :

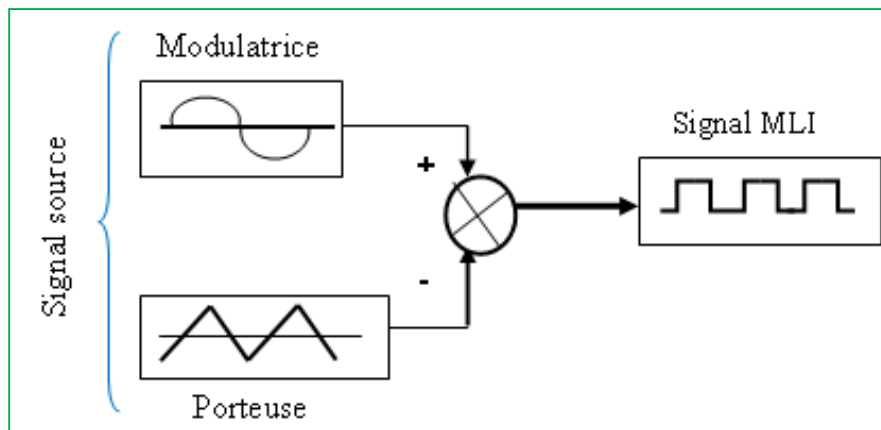
- repousser vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension ; ce qui facilite le filtrage,
- elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension désirée.

Dans cette mémoire on utilise la MLI naturelle de type sinus- triangle.

#### II.2.4.3.4.1 Stratégie de la MLI naturelle (sinus-triangle) :

La technique de la MLI naturelle (sinus-triangle) est réalisée par une comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

La largeur d'impulsion est proportionnelle aux valeurs de la tension modulante aux instants d'échantillonnage. Ces instants étant définis de manière naturelle par la comparaison de ces deux ondes. Il n'existe pas de période d'échantillonnage bien définie, d'où le qualificatif d'échantillonnage naturel.



**Fig II.15 : Sch éma synoptique d'un MLI**

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux :

Un signal triangulaire de haute fréquence ( $F_p$ ) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence  $F_m \ll F_p$ . Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Ces deux signaux sont définis comme étant :

- **L'onde porteuse** : qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).
- **L'onde modulatrice** : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres caractérisant la MLI, sont.

- **L'indice de modulation  $M_L$** : appelé aussi (taux d'harmonique) qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse :

$$M_L = \frac{V_m}{V_p} < 1 \quad (\text{II.39})$$

- **Le rapport de modulation  $M_r$** : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice :

$$M_r = \frac{F_p}{F_m} \quad (\text{II.40})$$

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons décrit le modèle empirique à une diode pour simuler le fonctionnement des modules PV pour différentes conditions d'ensoleillement et de température. Ainsi que la modélisation des différents types de convertisseurs statiques qu'on peut trouver dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque (hacheur / onduleur), ainsi que la commande employer pour contrôler la tension de sortie de l'onduleur.

Nous avons montré aussi l'importance de placer un hacheur BOOST lorsque on désire augmenter la tension fourni par le panneau et l'utilisation d'un onduleur pour la transformation DC/AC afin d'alimenter les charges alternatives.



### III.1 Modélisation du groupe moto-pompe

#### III.1.1 Introduction :

La machine asynchrone a fait l'objet de nombreuses études les trois dernières décennies. Elle présente l'avantage d'être robuste, peu coûteuse, de construction simple et de maintenance réduite, en particulier lorsqu'il s'agit de la machine asynchrone à cage d'écurie. Cette dernière est la machine la plus utilisée pour obtenir de la puissance mécanique à partir du réseau alternatif ; mais elle présente un système d'équation très complexe à étudier qui exige un recours aux calculs matriciels. Par suite de cette complexité on doit développer un modèle dont le comportement dynamique soit aussi proche que possible de celui de la réalité. Par conséquent, la théorie générale a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée, en les ramenant à un modèle unique dit machine primitive ». Ce modèle est caractérisé par un système d'axes en quadratures indicé  $(d, q)$  dans la mesure où l'on admet comme première approximation les hypothèses simplificatrices suivantes :

Par chacune des phases est à éparation sinusoïdale, ce qui revient à ne considérer que la fondamentale. Ce qui signifie que le flux d'enroulement à travers chaque phase et inductance mutuelle entre un enroulement rotorique et statorique suivent une loi sinusoïdale en fonction de l'angle rotorique. De même, la machine est considérée comme symétrique et équilibrée. La saturation dans le circuit magnétique est négligée, cela permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants. Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté afin de négliger les courants de Foucault. [13]

Les pertes par hystérésis et effet de peau sont négligées.

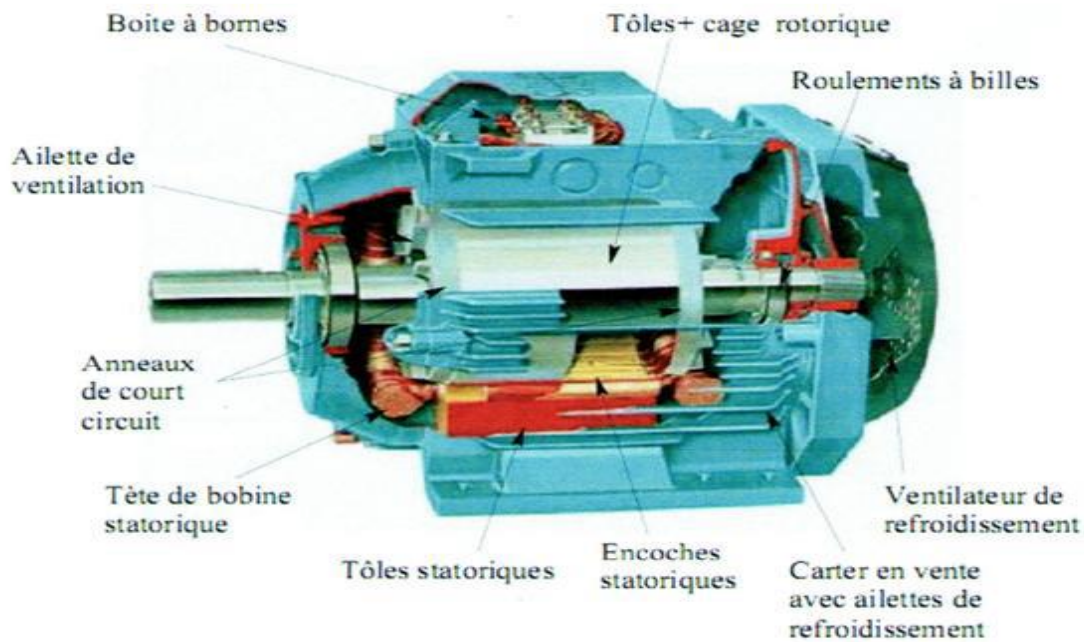
L'épaisseur de l'entrefer est considérée constante sur toute la périphérie de la machine, en négligeant l'effet des encoches. La force magnétomotrice créée.

#### III.1.2 Constitution de la machine asynchrone :

On se propose, dans cette partie, de donner quelques précisions sur les éléments de constitutions des machines synchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en deux parties distinctes Figure (II-4) :

- ❖ Le stator, partie fixe de la machine ou est connectée l'alimentation électrique.

Le rotor et les roulements, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

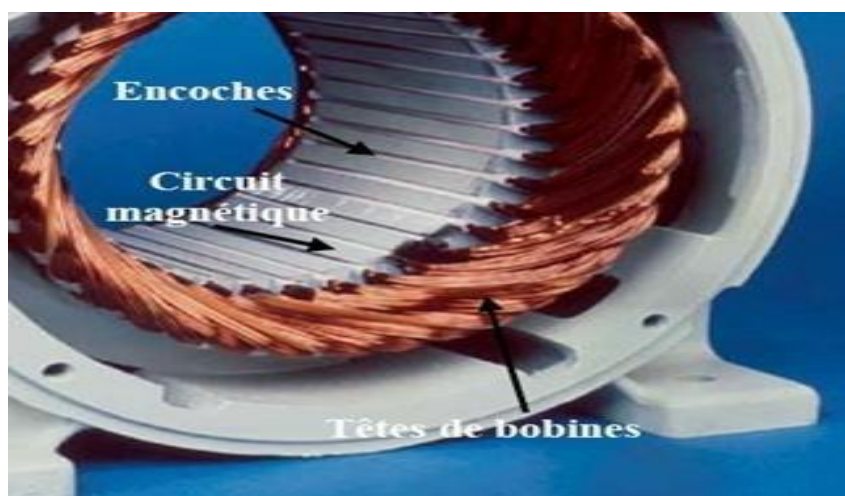


**Fig.III.1 : Élément de constitution d'une machine asynchrone a cage d'écureuil**

### III.1.2.1 Le stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpés des encoches parallèles à l'axe de la machine figure (II-5). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre 'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.



**Fig.III.2: Stator d'une machine asynchrone**

### III.1.2.2 Le rotor :

C'est l'élément mobile du moteur, se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court.

### III.1.2.3 Le rotor a cage:

Dans le rotor a cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor Figure (II-6), cette cage est insérée à l'intérieur de circuit magnétique. Dans le cas de rotor a cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur a cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur a rotor bobiné, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus il dispose d'une plus grande robustesse.

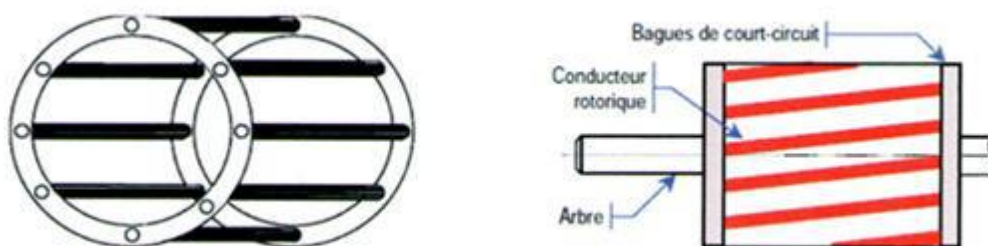


Fig.III.3 : Rotor à cage et rotor a bagues

### III.1.3.Principe de fonctionnement du moteur a cage :

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant (loi de Lenz). Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor. De cette façon, le fonctionnement du moteur

## Chapitre III : Modélisation du groupe Motopompe

---

asynchrone est comparable à celui d'un transformateur dont l'enroulement secondaire est tournant. Dans le moteur asynchrone, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer du moteur avec la vitesse angulaire synchrone liée à la fréquence d'alimentation FS par l'expression :

$$\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p} \quad (\text{III-1})$$

L'induction du courant rotorique est conditionnée par le glissement  $g$  qui est une caractéristique particulière de MAS sous l'effet des charges du couple résistant. Il est défini comme étant l'écart de vitesse entre la vitesse synchrone  $\Omega_s$  et la vitesse du rotor  $\Omega$  rapporté à la vitesse synchrone le glissement  $g$  est donné par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{III-2})$$

### III.1.4 Modélisation du moteur asynchrone à cage :

#### III.1.4.1 Mise en équations de la machine asynchrone triphasée :

En tenant compte des hypothèses simplificatrices et en adoptant la convention de signe moteur, les expressions générales de la machine exprimées en fonction des flux et des courants sont définies comme suit : [14]

#### ❖ Equations électriques

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dt} \quad (\text{III-3})$$

On a trois phases statoriques et rotorique, donc on peut représenter l'équation précédente par une écriture matricielle comme suit :

$$[\mathbf{V}_{abc}] = \mathbf{R} \cdot [\mathbf{I}_{abc}] + \frac{d}{dt} [\boldsymbol{\varphi}_{abc}] \quad (\text{III-4})$$

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{Sa} \\ \varphi_{Sb} \\ \varphi_{Sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-5})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

### ❖ Equation magnétiques :

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux/inductance propre).

Exemple de la phase a statorique :

$$\varphi_{Sa} = L_S I_{Sa} + m_S (I_{Sb} + I_{Sc}) + m_1 \cdot I_{ra} + m_3 \cdot I_{rb} + m_2 \cdot I_{rc} \quad (\text{III-7})$$

Par une représentation matricielle on obtient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{Sa} \\ \varphi_{Sb} \\ \varphi_{Sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & m_S & m_S & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_S & L_S & m_S & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_S & m_S & L_S & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & L_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_r & L_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_r & m_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

Cette matrice des inductances fait apparaître quatre sous matrice :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{Sabc} \\ \varphi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_S] & [Msr] \\ [Mrs] & [Lr] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{Sabc} \\ I_{rabc} \end{bmatrix}; \text{ Avec : } [Msr] = [Mrs]^T \quad (\text{III-9})$$

Ou :

$L_S$  : est l'inductance propre d'une phase statorique.

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

$M_S$  : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques

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

$M_{rs}$  : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Avec :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III-10})$$

$$m_1 = m_{sr} \cos(\theta)$$

$$m_2 = m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$m_3 = m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

[Mrs] : Matrice des inductances mutuelles du couplage stator-rotor.

$\theta$  : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes rotorique et les axes statoriques qui sont choisis comme axes de références.

On obtient finalement :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \times [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [l_s] \times [I_{sabc}] + [M_{sr}] \times [I_{rabc}] \} \quad (\text{III-11})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \times [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [l_r] \times [I_{rabc}] + [M_{sr}] \times [I_{sabc}] \} \quad (\text{III-12})$$

### ❖ Equation mécanique :

$$C_{em} - C_r - f_r \Omega = J \frac{d}{dt} \Omega \quad (\text{III-13})$$

Avec  $C_{em}$ ,  $C_r$ ,  $f_r$ ,  $J$  : le couple électromagnétique, le couple résistant, le coefficient de frottement et le moment d'inertie, respectivement.

### III.1.4.2 Transformation de PARK :

Pour les besoins de la simulation, on est amené à utiliser la transformation de PARK. La transformation de PARK consiste à remplacer les trois phases statorique et rotorique par un système diphasé d'axe d et q. Une matrice T ( $\theta$ ) de PARK permet le passage des composantes  $X_{abc}$  du système triphasé aux composantes  $X_{dq}$ , tournant à une vitesse qui dépend des grandeurs statorique ou rotoriques.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

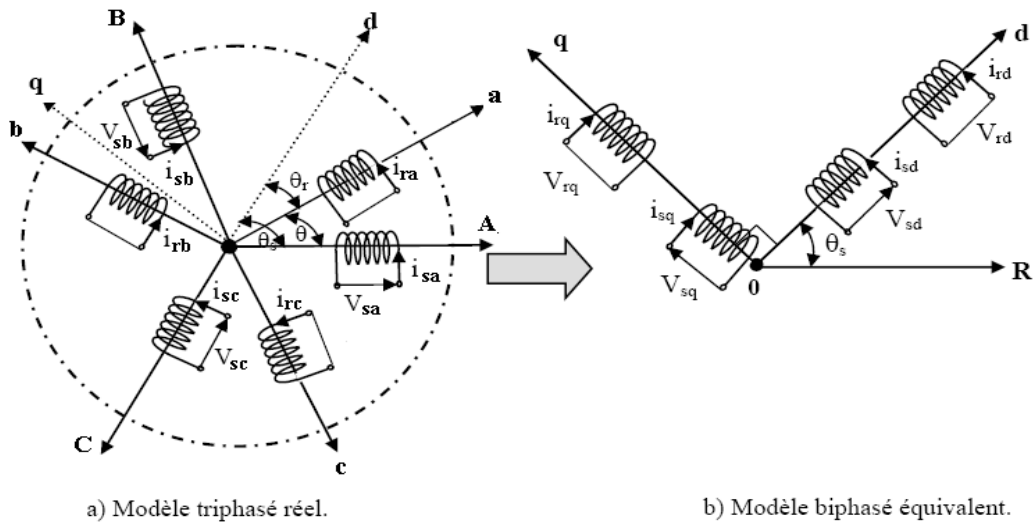


Fig.III.4 Représentation de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente.

La matrice de transformation de PARK est la suivante :

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

Sa matrice inverse est :

$$[T(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

$$[V_{dq0}] = [R][I_{dq0}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dq0}] + [P](\frac{d}{dt}[P]^{-1})[\Phi_{dq0}] \quad (III.15)$$

On obtient finalement le modèle de la machine selon PARK :

$$V_d = RI_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \left(\frac{d\theta}{dt}\right)\Phi_q$$

$$V_q = RI_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \phi_d \quad (\text{III.16})$$

$$V_o = RI_o + \frac{d\phi_o}{dt}$$

Pour la réduction de la matrice des inductances les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axes d,q,o et les d'axes a,b,c :

$$[\phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][\phi_{sabc}]$$

$$[\phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][\phi_{rabc}]$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{os} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \\ \phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & I_s + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & I_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & I_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

$L_s = I_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = I_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2}M_{sr}$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Le mode habituel d'alimentation du stator et la structure des enroulements rotoriques confèrent la nullité aux sommes des courants statoriques et de courants rotorique, les composantes d'indice(0) sont nulles

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par les trois paramètres constants  $L_s, L_r, M$ , et reliés aux courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$



### ❖ Equation électriques :

Les équations de PARK des tensions, statorique et rotorique s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.19})$$

### ❖ Equations magnétiques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{ds} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{III.20})$$

### ❖ Equations mécaniques :

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{3}{2} p (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \\ C_e &= \frac{3}{2} p (\phi_{qr} i_{dr} - \phi_{dr} i_{qr}) \\ C_e &= \frac{3}{2} M (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ C_e &= p \frac{3M}{2L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \end{aligned} \quad (\text{III.21})$$

### III.1.4.3 le choix de référentiel :

Pour simplifier les équations de la machine, il faut faire un choix de référentiel, les trois types possibles sont :

#### III.1.4.3.1 Référentiel lié au stator :

Dans ce type de référentiels axes (d,q) par rapport aux axes statorique et rotorique sont définies par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (\text{III.22})$$

#### III.1.4.3.2 Référentiel lié au rotor :

Dans ce cas, la position des axes (d,q) par rapport aux axes statorique et rotorique est donnée par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad (\text{III.23})$$

Ce type de référentiel est utilisé lorsque la vitesse de rotation de la machine est constante et lors de l'étude des régimes transitoires.

#### III.1.4.3.2 Référentiel au champ tournant :

Ce référentiel est définie par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = (\omega_s - \omega_r) \quad (\text{III.24})$$

Ce type de référentiel est choisi lorsque la fréquence d'alimentation est constante

### III.2 Modèle de la machine asynchrone à cage :

Les équations du modèle de la machine dépendent des variables d'entrée et de sortie de cette machine, dans notre cas, les grandeurs composantes le vecteur d'état sont

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} + J\omega_s \bar{\phi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\bar{\phi}_r}{dt} + J\omega_s \bar{\phi}_r \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

$$\bar{\phi}_s = L_s \bar{I}_s + M \bar{I}_r \quad (\text{III.26})$$

## Chapitre III : Modélisation du groupe Motopompe

---

$$\bar{\phi}_r = L_r \bar{I}_r + M \bar{I}_s \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$\omega_r = \omega_s - \omega$  : pulsation de glissement

Par la suite, la modélisation de la machine dépend des variables d'états ; pour notre part le choix est basé sur les composantes du courant statorique et du flux du rotor sur les axes (d,q).

En manipulant les équations des flux le système d'équation (III.47) peut être décrit par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{ds} = - \left( \frac{1}{T_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{ds} + \omega_s I_{qs} + \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \phi_{dr} + \omega \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = -\omega_s I_{ds} \left( \frac{1}{T_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{qs} - \omega_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{dr} + \omega \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{qr} + \frac{1M}{L_s L_r T_r} \phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \phi_{dr} = \frac{M}{T_r} I_{ds} - \frac{1}{T_r} \phi_{rd} + \omega_r \phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \phi_{qr} = \frac{M}{T_r} I_{qs} - \omega_r \phi_{dr} - \frac{1}{T_r} \phi_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{III.29})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \qquad T_r = \frac{L_r}{R_r} \qquad T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

D'une manière générale la machine peut être représentée par les relations d'états suivants :

$$\dot{X} = A.X + B.U$$

$$Y=C.X$$

$$X = [I_{ds} \ I_{qs} \ \phi_{ds} \ \phi_{qr}]^T \qquad \text{et} \qquad U = [V_{ds} \ V_{qs}] \quad (\text{III.30})$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma T_r} + \frac{1}{\sigma T_r}\right) & \omega_s & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & w \frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ -\omega_s & -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1 - \sigma}{\sigma T_r}\right) & -\omega_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & \frac{1}{-T_r} & \omega_s \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_s & \frac{1}{-T_r} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A , B et C sont les formules (III.31), (III.32) et (III.33) respectives

Enfin pour les équations mécaniques, le couple électromagnétique obtenu à l'aide d'un bilan de puissance est donné par

$$C_e = p \frac{M}{L_R} (\Phi_{rd} \cdot L_{qs} \cdot \Phi_{rq} \cdot I_{ds}) \quad (III.34)$$

L'équation du mouvement s'écrit alors comme suite

$$C_e - C_r = J_m \frac{d\Omega}{dt} + F \quad (III.35)$$

## Chapitre III : Modélisation du groupe Motopompe

- $F$  : coefficient de frottement visqueux
- $J_m$  : moment d'inertie de la partie tournante
- $C_r$  : couple résistant
- $P$  : le nombre de paires de pôles

### III.3 La pompe centrifuge :

#### III.3.1 Présentation de 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) [pompe]

#### III.3.2 Constitution de la pompe centrifuge :

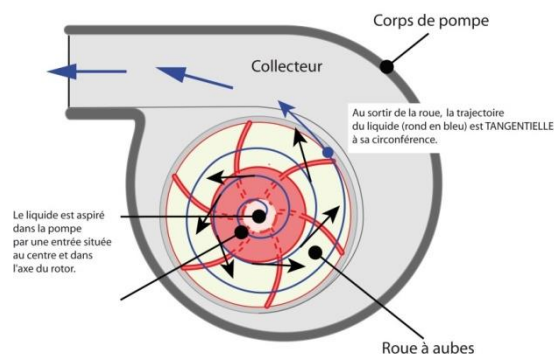


Figure III.4 vue en face d'une pompe centrifuge

La pompe se compose 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 entraînée par un moteur.

Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'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.

### III.3.3 Fonctionnement de la 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 augmentée, 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 placée à l'intérieur de la roue appelée limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent.

### III.4 Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse.

#### Équations caractéristiques :

D'une façon générale, les constructeurs de pompes ne donnent pas les paramètres physiques de la pompe. Seule la caractéristique de performance  $H = f(Q)$  est donnée par le constructeur. Ainsi, connaissant les valeurs de la vitesse, hauteur de charge et débit de référence [modélisation pompe], il est possible de déterminer celles du système à l'aide des formules empiriques suivantes :

$$N_{sq} = \frac{1000 \left( \frac{N}{60} \right) \sqrt{Q}}{\left( \frac{gH}{N_{ep}} \right)^{3/4}} \quad (\text{III.36})$$

$$Q = K_{sp} N (D_f)^3 \quad (\text{III.37})$$

$$C_r = K_{sp} \cdot \omega^2 \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$$K_{sp} = \frac{P_m}{\omega^3}$$

$N_{sq}$  : Vitesse spécifique du rotor

$N_{ep}$  : Nombre d'étages de la pompe

$H$  : hauteur de charge effective en m

$g$  : L'accélération de la pesanteur = 9.81 N/s<sup>2</sup>

$\omega$  : vitesse de l'arbre en rad/s

## Chapitre III : Modélisation du groupe Motopompe

---

**Q** : débit de la pompe en l/s

**D<sub>f</sub>** : diamètre du forage (ou du puits) en dm

**K<sub>sp</sub>** : constante

**N** : vitesse de l'arbre du rotor en tr/min

**C<sub>r</sub>** : Couple résistant

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé le système Moto-Pompe, on a commencé par la modélisation de la MAS en se basant sur les équations électriques, magnétiques et mécaniques qui régissent le comportement de la machine, Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons étudié la pompe centrifuge qui est le type le plus utilisé dans le pompage photovoltaïque.

### IV.1 Introduction :

La production de l'énergie solaire photovoltaïque est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque (PV) ne coïncide pas toujours avec le point à maximum de puissance. On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point à maximum de puissance appelé «Maximum power point tracking» (MPPT) afin que la puissance maximale soit gérée en permanence.

Le but de ce chapitre est d'étudier les différentes méthodes de suivi du point de maximum de puissance.

### IV.2 Commande MPPT :

La commande MPPT, (Maximum Power Point Tracking), est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [commande mppt]. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

### IV.2 Principe de la commande MPPT :

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant  $V_{pv}$ , lorsque  $\frac{dp_{pv}}{V_{pv}}$  est positif ou en diminuant  $V_{pv}$ , lorsque  $\frac{dp_{pv}}{V_{pv}}$  est négatif. Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changement brutal d'ensoleillement ou de charge.



## IV.3 Différentes commandes MPPT :

### IV.3.1 Commande peturb & observe (P&O) :

Cette commande est un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k-1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

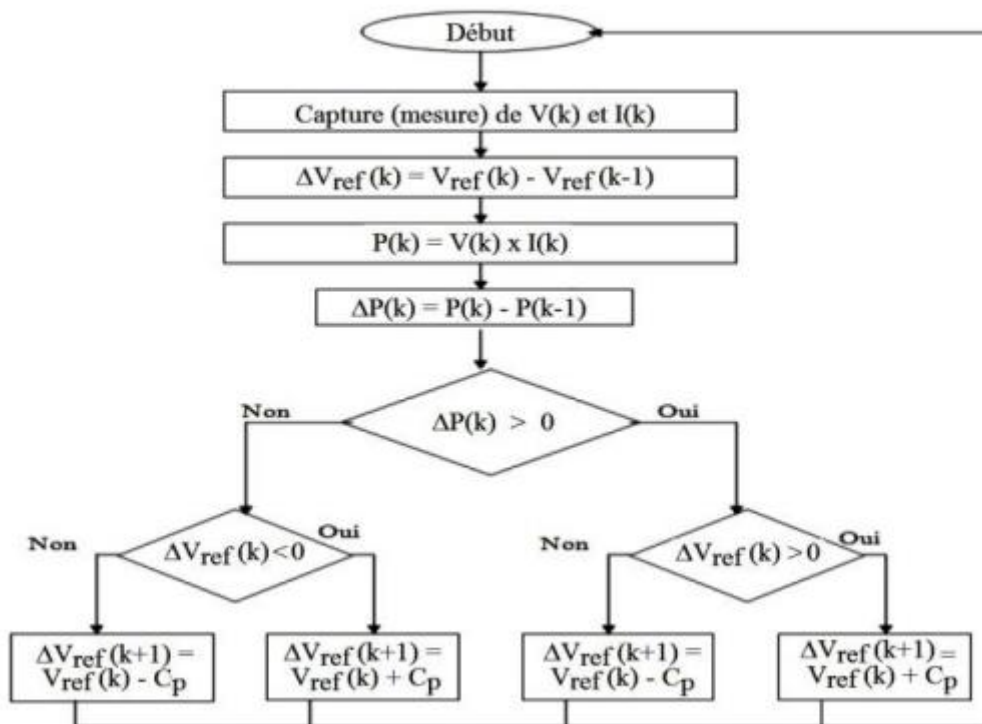


Fig.IV.1 : Organigramme de l'algorithme MPPT (P&O)

Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. La figure (IV.1) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure (IV.1), la tension

## Chapitre IV : la commande (MPPT) Maximum Power Point Tracking

et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la rangée. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle. Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint,  $V$  oscillera autour de la tension idéale  $V_{mp}$  de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple  $C_p$ .

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression suivante :

$$V_k = V_{(k-1)} + \Delta_v \times \text{signe}\left(\frac{d_p}{d_v}\right) \quad (\text{IV.1})$$

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

### IV.3.2 Commande par incrémentation de la conductance :

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance  $G = I/V$  et sur l'incrément de la conductance ( $dG$ ) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, (PMP). Si l'incrément de conductance ( $dG$ ) est supérieur à l'opposé de la conductance ( $-G$ ), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, (PMP).

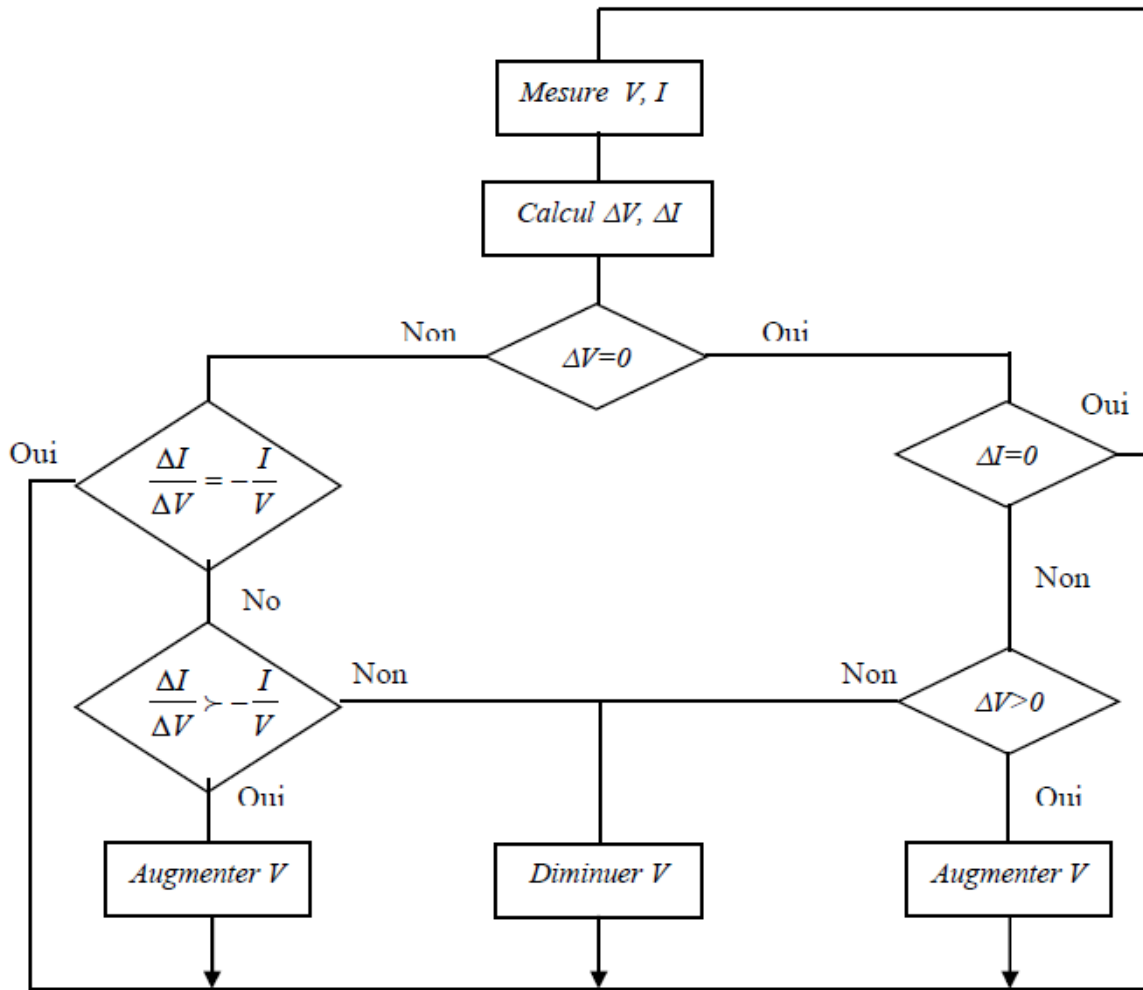


Fig.IV.2 : Organigramme de l'algorithme MPPT (INC-CONDUCTANCE)

$$\frac{d_p}{d_v} = \frac{d(IV)}{d_v} = (I + v) \frac{d_I}{d_v} = 0 \quad (IV.2)$$

$$\frac{d_I}{d_v} = -\frac{I}{v} \quad (IV.3)$$

Au MPP ces 2 membres doivent être égaux, ceci nous conduit aux équations suivantes :

$$(I + v) \frac{d_I}{d_v} > 0 \leftrightarrow \frac{d_I}{d_v} > -\frac{I}{v} \quad (IV.4)$$

$$(I + v) \frac{d_I}{d_v} < 0 \leftrightarrow \frac{d_I}{d_v} < -\frac{I}{v} \quad (IV.5)$$

De (IV.4) le point de fonctionnement est à gauche du MPP donc il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP.

## Chapitre IV : la commande (MPPT) Maximum Power Point Tracking

De (IV.5) le point de fonctionnement est à droite du MPP donc il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP.

### IV.3.3 Commande en circuit ouvert :

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{MPP} = K \times V_{oc} \quad (IV.6)$$

K : Facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

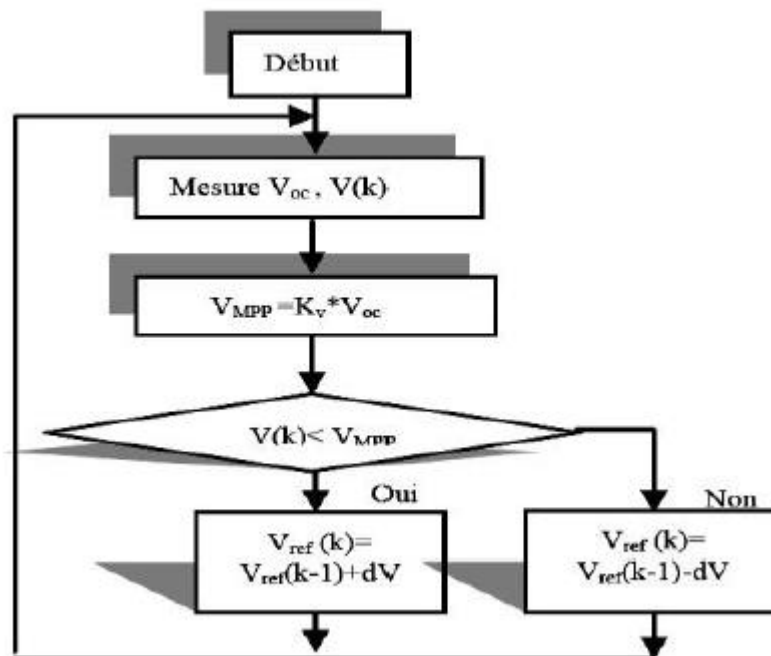


Fig. IV.3 Organigramme de l'algorithme MPPT (commande en circuit ouvert)

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension d'anneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale.

### IV.3.4 Commande en court-circuit :

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{MPP} = K \times I_{CC} \quad (IV.7)$$

## Chapitre IV : la commande (MPPT) Maximum Power Point Tracking

$K$  : Facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

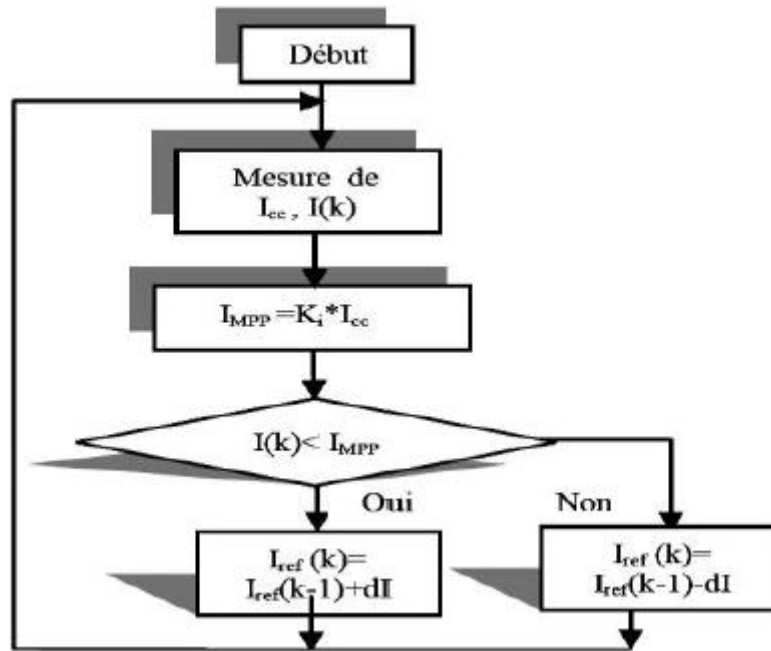


Fig. IV.4 Organigramme de l'algorithme MPPT (commande en court-circuit)

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale.

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montré qu'il est nécessaire d'intégrer un dispositif annexe à une chaîne alimentée par des générateurs photovoltaïques, pour mieux gérer la puissance délivrée par ces derniers.

Nous avons traité quatre types d'algorithme de suivi du point de maximum de puissance les plus populaires

## V.1 Introduction :

De multiples applications industrielles qui sollicitent un contrôle délicat du couple, vitesse et/ou position, où la commande scalaire avec ses performances modeste ne peut satisfaire. La commande de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, et du flux. Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. C'est pourquoi, la commande vectorielle n'a été introduite qu'au début des années 70, grâce aux avancées technologiques de l'électronique de puissance et de signal, car elle nécessite des calculs de transformée *Park*, évaluation de fonction trigonométrique, des intégrations, des régulations, ce qui demande une technologie assez puissante.

## V.2 Principe de la commande vectorielle :

Le principe dont repose la FOC est que le couple et le flux de la machine sont commandés séparément, où les courants statoriques sont transformés dans un référentiel tournant aligné avec le vecteur de flux rotorique, statorique ou ce de l'entrefer, pour produire des composantes selon l'axe  $d$  (control du flux) et selon l'axe  $q$  (control du couple).

La commande FOC est initialement proposé en Allemagne dans la fin des années 60 et début des années 70 par deux méthodes distinctes, l'une qui, en imposant une vitesse de glissement tiré de l'équation dynamique du flux rotorique afin d'assurer l'orientation du flux (Hasse) connu par **IRFOC**, et l'autre qui utilise l'estimation ou la mesure du flux pour obtenir l'amplitude et l'angle indispensable pour l'orientation du flux (Blaschke) connu par **DFOC**. La technique IRFOC a été également préférée à la DFOC car elle a une configuration relativement simple comparée à la DFOC qui demande des estimateurs, ou des sondes à effet Hall pour la mesure du flux qui sont contrainctes aux conditions de travail excessives (température, vibration...etc.), et encore que la mesure soit entachée de bruits dépendant de la vitesse. Mais sans omettre que la IRFOC dépend des paramètres de la machine et notamment la constante de temps rotorique  $T_r$  et surtout la résistance rotorique  $R_r$ . Ces deux méthodes citées s'appuient sur l'orientation du flux rotorique (en fait c'est le repère  $dq$  qui est orienté), d'autres techniques ont été introduites telle que l'orientation du flux statorique SFOC avec les deux formes directe et indirecte, et l'orientation du flux d'entrefer, mais leurs performances sont moindres par rapport aux premières, d'autant qu'elles exigent des algorithmes plus compliqués et surtout la compensation au découplage qui est très sensible aux erreurs.

### V.2.1 La Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté

#### V.2.1.1 Introduction

Dans le cas de la commande indirecte, le flux n'est pas régulé (donc ni mesuré, ni estimé). Celui-ci est donné par la consigne et orienté à partir de l'angle  $\theta_s$  qui est obtenu à partir de la pulsation statorique  $\omega_s$ . Cette dernière est la somme de la pulsation rotorique  $\omega_{sl}$  estimée et la pulsation mécanique  $P.\Omega$  mesurée. Donc cette méthode élimine le besoin d'utiliser un capteur ou un observateur du d'entrefer.

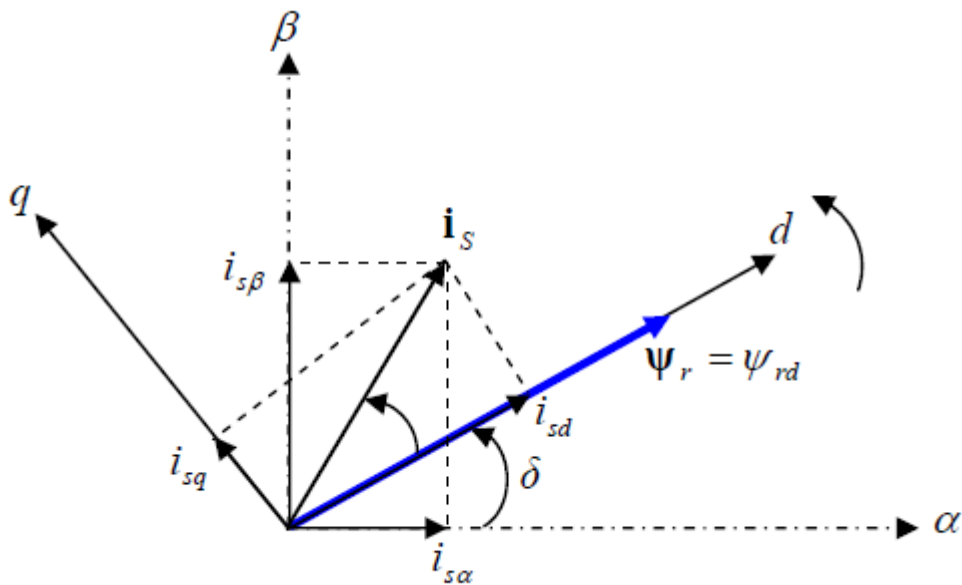
## V.2.1.2 Mise en équation de la commande

Rappelons que dans un repère lié au champ tournant, les équations des tensions statoriques et rotoriques de la MAS sont les suivantes :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad \text{V-1}$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_{sl} \psi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \psi_{rd} \end{cases} \quad \text{V-2}$$

La mise en œuvre de la commande vectorielle à flux rotorique orienté est basée sur l'orientation du repère tournant d'axes dq, tel que l'axe d soit confondu avec la direction de  $\Psi_r$  (figure V.1).



**Fig.V.1 : Représentation de l'orientation du repère dq**

L'orientation du flux magnétique selon l'axe direct conduit à l'annulation de sa composante en quadrature, on a alors :

V-3

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \Psi_r \\ \psi_{rq} = 0 \end{cases}$$

Les équations des tensions rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_{sl} \psi_{rd} \end{cases} \quad \text{V-4}$$

Celles des flux:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s \sigma \cdot i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s \sigma \cdot i_{sq} \end{cases} \quad \text{V-5}$$

Nous obtenons donc les composantes des tensions statoriques :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} \end{cases} \quad \text{V-6}$$

### V.2.1.3 Estimation de $\omega_s$ et de $\theta_s$

Dans la commande *IRFOC* la pulsation statorique est déterminée indirectement depuis, la mesure de la vitesse mécanique et la relation suivante :

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T} \frac{i_{sq}}{\psi} \quad \text{V-7}$$



À partir des équations (IV-5) et (IV-6) nous aurons :

$$\omega_s = p\Omega + \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} \quad \text{V-8}$$

Nous remarquons l'apparition de la constante de temps rotorique, qui est un paramètre influent sur les performances de cette commande.

La position  $\theta_s$ , est déterminée ensuite par l'intégration de  $\omega_s$  :

$$\theta_s = \int \omega_s .dt \quad \text{V-9}$$

### V.2.1.4 Expression du couple électromagnétique

Il découle de l'expression du couple électromagnétique (II-21) la nouvelle relation suivante:

$$T_e = K_t \psi_{rd} i_{sq} \quad \text{V-10}$$

Notons que la vitesse donnée par l'expression dans (I-22) reste inchangée. Il devient tout à fait claire qu'en fixant la valeur de  $\psi_{rd}$  à une valeur de référence  $i_{sq}$  le couple ne dépendra que du courant statorique (comme dans le cas d'une MCC à excitation séparée), qui est le but de la commande vectorielle.

Les équations de la machine sont résumées dans (V-11) :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = \left( R_s + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} \right) i_{sd} + L_s \sigma \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s L_s \sigma i_{sq} - \frac{R_r L_m}{L_r^2} \psi_{rd} \\ v_{sq} = \left( R_s + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} \right) i_{sq} + L_s \sigma \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s L_s \sigma i_{sd} + \omega \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} \\ \omega_s = p\Omega + \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} \\ T_r \frac{d\psi_{rd}}{dt} + \psi_{rd} = L_m i_{sd} \\ T_e = K_t \psi_{rd} i_{sq} \\ J \frac{d\Omega}{dt} = T_e - T_L - f_v \Omega \end{array} \right. \quad \text{V-11}$$

Finalement l'écriture en équation d'état déduite, (en reconnaissant  $\varnothing_{rq}=0$ ), conduit au système suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_s} \left( R_s + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} \right) i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{1}{\sigma L_s} \left( \frac{R_r L_m}{L_r^2} \right) \psi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\omega_s i_{sd} - \frac{1}{\sigma L_s} \left( R_s + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} \right) i_{sq} - \frac{1}{\sigma L_s} \left( \frac{L_m}{L_r} \right) \omega \psi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{sq} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rd} \\ J \frac{d\Omega}{dt} = T_e - T_L - f_v \Omega \end{cases} \quad \text{V-12}$$

On remarque dans ces équations, que  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  dépendent à la fois des courants des deux axes choisis comme variables d'états  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  donc ils influent sur le flux et le couple. Il est donc indispensable de procéder au découplage des termes couplés.

### V.2.1.5 D découplage

Différentes techniques de découplage existent : découplage par retour d'état, découplage statique ou découplage par compensation, que nous allons présenter maintenant.

#### V.2.1-5.1 D découplage par compensation

La compensation a pour but de découpler les axes  $d$  et  $q$ . Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine, et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs. En considérant une dynamique longue du flux en basse vitesse.  $\left( \frac{d\psi_{rd}}{dt} \right) = 0$  par rapport aux courants], alors les équations de tensions (V-6) sont réécrites en introduisant l'opérateur de Laplace  $s$  de la manière suivante:

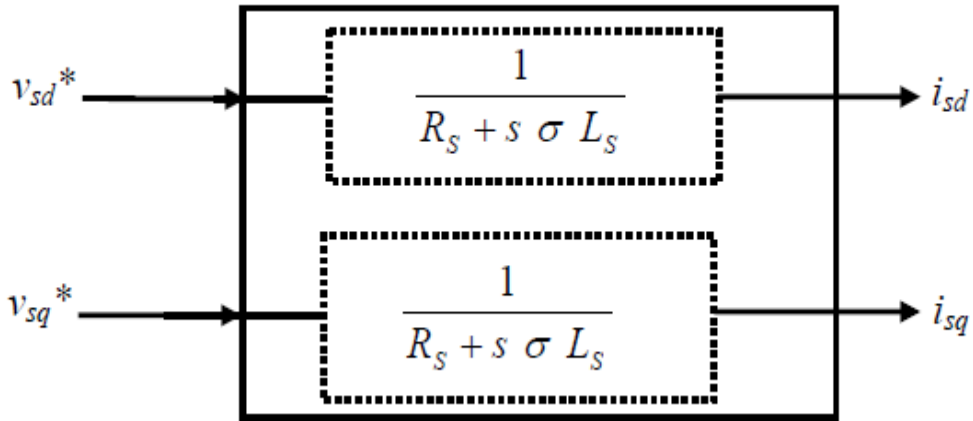
$$\begin{cases} v_{sd} = (R_s + s \sigma L_s) i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} \\ v_{sq} = (R_s + s \sigma L_s) i_{sq} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r + \omega_s \sigma L_s i_{sd} \end{cases} \quad \text{V-13}$$

## Chapitre V Commande vectorielle

Les nouvelles variables de commande  $V_{sq}^*$   $V_{sd}^*$  s'écrivent alors comme suit :

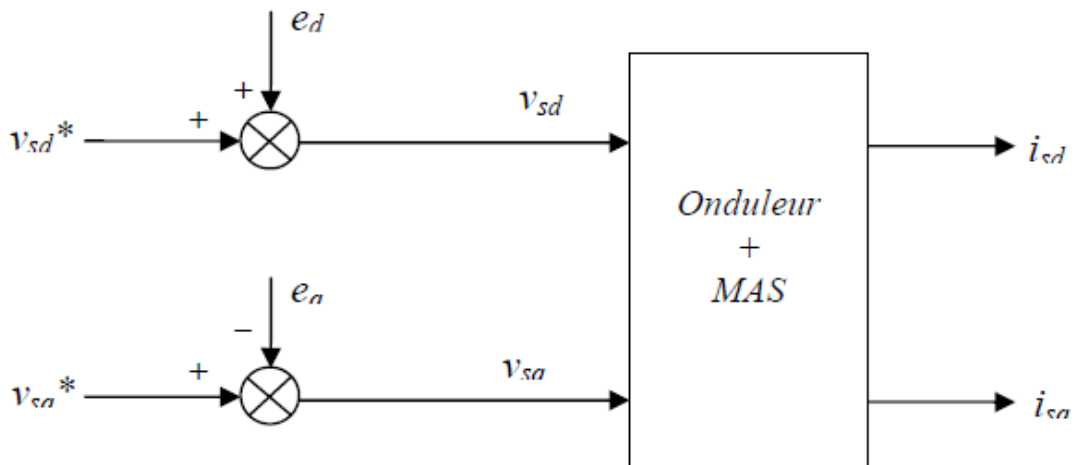
$$\begin{cases} v_{sd}^* = (R_s + s\sigma L_s) i_{sd} = v_{sd} + \omega_s \sigma L_s i_{sq} = v_{sd} + e_{sd} \\ v_{sq}^* = (R_s + s\sigma L_s) i_{sq} = v_{sq} - \left( \omega_s \frac{L_m \psi_r}{L_r} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} \right) = v_{sq} - e_{sq} \end{cases} \quad \text{V-14}$$

Avec : \* désignant la variable de commande ou de référence Ainsi donc les actions sur les axes  $d$  et  $q$  sont donc découplées comme représentés dans le schéma de la figure IV-2.



**Fig.V-2: Les nouvelles commandes obtenues**

Les tensions  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  sont alors reconstituées à partir des tensions  $V_{sq}^*$   $V_{sd}^*$  figure V.3



**Fig.V.3 : Reconstitution des tensions  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$**

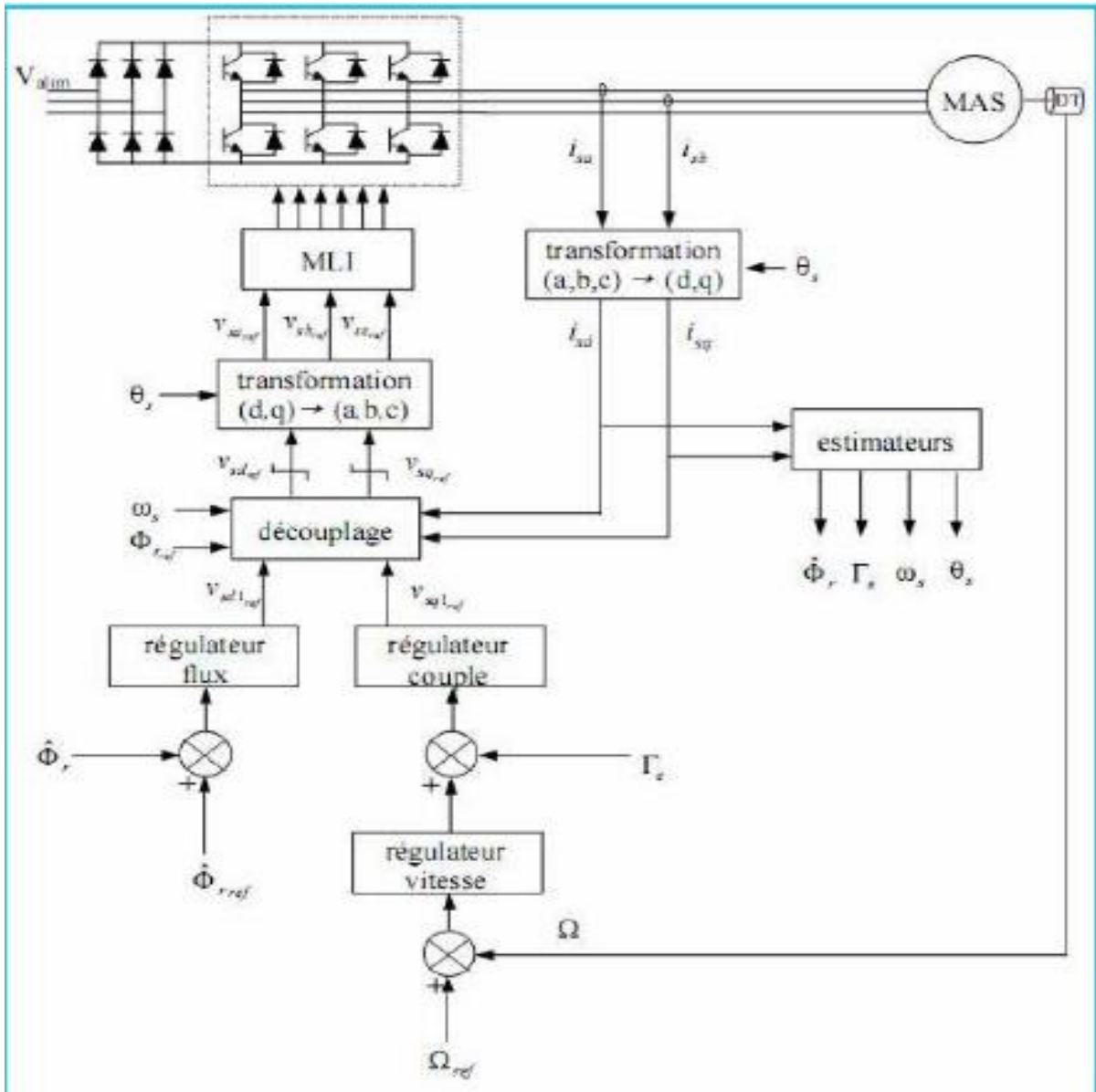


Fig.V.4 : La commande vectorielle du moteur asynchrone

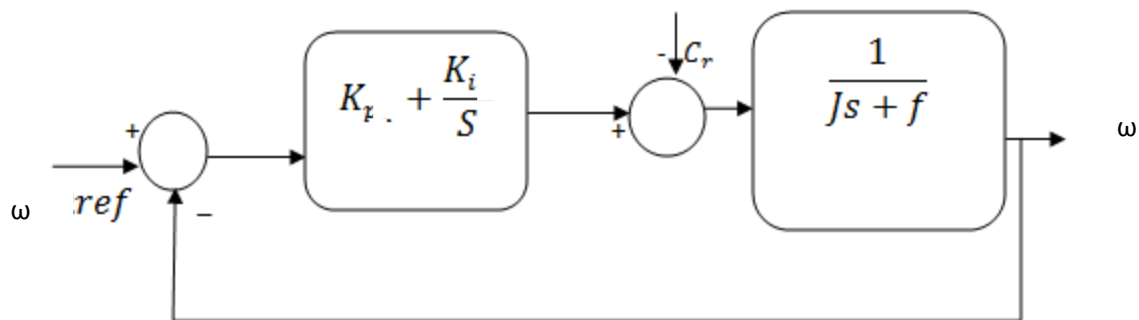
## V.3 Synthèse des boucles de régulation :

Les régulateurs utilisés sont du type PI dont la fonction de transfert est :

$$W(p) = \frac{k}{\tau s} (1 + \tau s) \quad \text{V-15}$$

### V.3.1 Boucle de vitesse :

Le schéma de régulation de vitesse est donné sur la figure V.5



**Fig. V.5. Schéma de régulation de vitesse**

La fonction de transfert en boucle fermée avec  $C_r=0$  est :

$$\frac{\omega_{ref}(s)}{\omega(s)} = \frac{Kp s + Ki}{Js^2 + (Kp + f)s + Ki} \quad \text{V-16}$$

Dont la forme est du 2<sup>ème</sup> ordre :

$$\frac{1}{\omega n^2 s^2 + \frac{2\xi}{\omega n} s + 1}$$

Si  $\xi = 1$  et  $\omega_n$  donné on obtient :

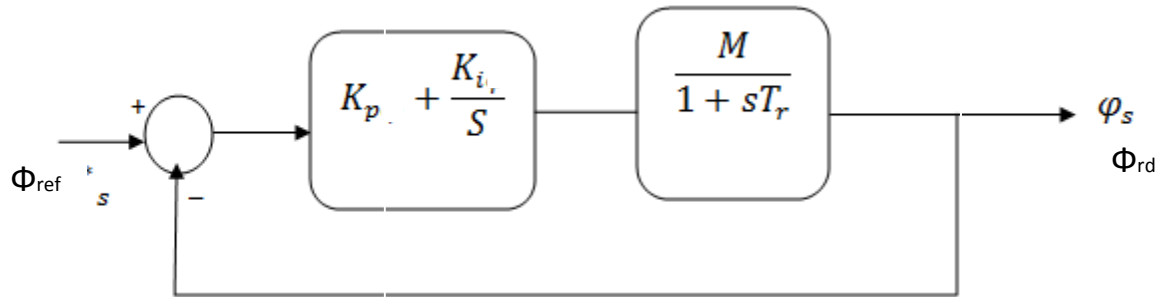
$$ki = J \omega_n^2$$

$$kp = \frac{2\xi \omega_n - f}{s}$$

### V.3.2 Boucle de flux :

Pour réguler le flux il convient d'agir sur la composante du courant statorique  $i_{sd}$

Le schéma bloc de cette régulation est donné sur la figure V.6



**Fig. V.6 : Schéma bloc de régulation de flux**

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul ne s'écrit :

$$\frac{\phi_{rd}}{\phi_r^*} = \frac{(k_p s + k_i) R_r \cdot M}{L_r s^2 + (k_p + k_r) s + k_i} \quad \text{V-17}$$

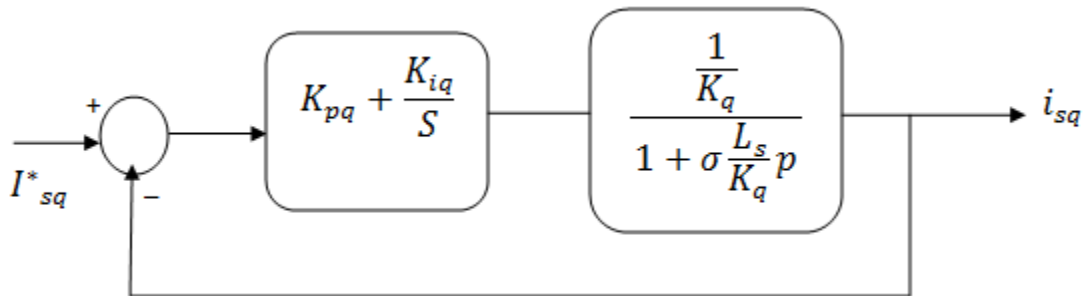
D'où l'on a :

$$k_i = \frac{l_r \omega_n^2}{R_r M} \quad \text{V-18}$$

$$k_p = 2L_r \omega_n - R_r M$$

### V.3.3 Boucle du courant :isd

Le schéma bloc de cette régulation est donné sur la figure V.7



la fig.V.7 : Schéma bloc de régulation du courant :isd

La fonction de transfert est :

$$\frac{i_{sd}}{V_{sd}} = \frac{1}{\sigma L_s + \left[ R_s + R_r \left( \frac{M}{L_r} \right)^2 \right]} \quad \text{V-19}$$

Nous obtenons alors :

$$k_i = \sigma L_s \omega_n^2$$

$$k_p = 2\sigma L_s \omega_n - \left[ R_s + R_r \left( \frac{M}{L_r} \right)^2 \right] \quad \text{V-20}$$

### Conclusion :

La commande vectorielle, par son application aux moteurs asynchrones, permet l'obtention de performances dynamique et statique comparables à celles des machines à courant continu. Elle est aussi caractérisée par le couplage qu'elle réalise entre les commandes du flux et du couple.

La commande vectorielle consiste en l'utilisation de régulateurs classiques (PI) pour le réglage du moteur.

Les régulateurs classiques montrent leurs efficacités et leurs performances mais ils présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations des paramètres du système à réguler qui est dans notre cas le moteur asynchrone.

### Introduction :

La simulation est basée sur l'élaboration des modèles mathématiques qui nous permet d'avoir une approche globale des performances du système.

Dans ce chapitre on présente les différents modèles utilisés pour la simulation et les résultats obtenus et cela en utilisant le logiciel (MATLAB/SIMULINK) 2015.

### VI.1 Caractéristique d'un module solaire :

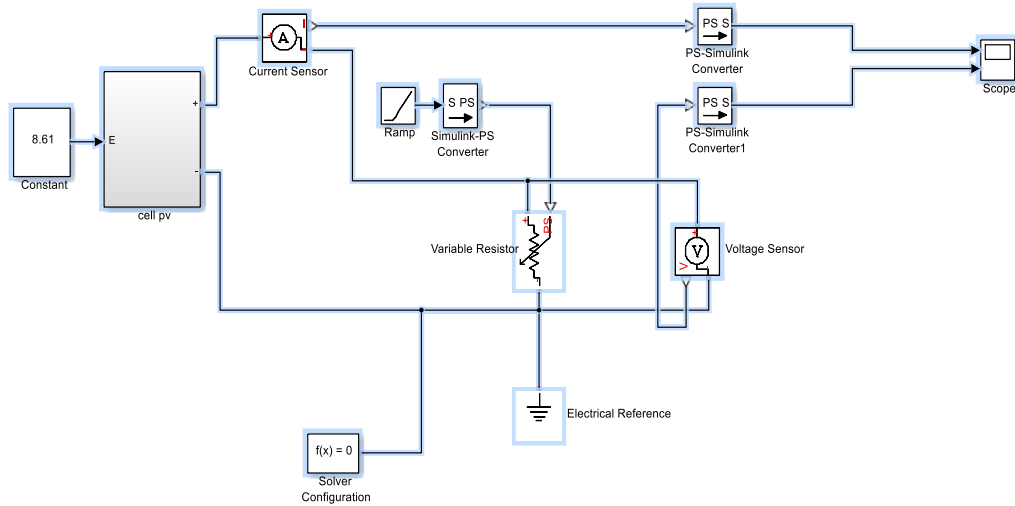
A partir du système d'équations non linéaires a une caractéristique fondamentale du module solaire type **ALFASOLAR M6L60- 240** d'un nombre de cellules ( $N_{cs} = 60$ ) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

Puissance (wc)	240
Courant de court-circuit (A)	8.61
Courant de puissance maximale (A)	7.9
Tension à circuit ouvert (V)	37.41
Tension de puissance maximale (V)	30.43
Température de la cellule (C°)	44.5
Nombre de cellule	60

**Tableau VI.1 Caractéristiques électriques du module PV**

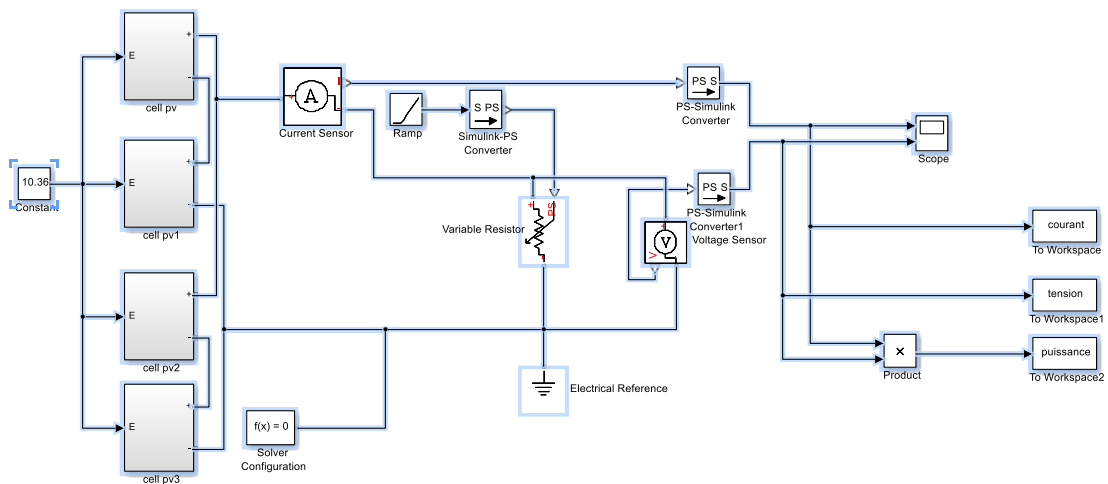
La figure (VI-1) représente le schéma Simulink d'un panneau photovoltaïque qui contient soixante cellules PV à base d'une seule diode sous Matlab Simulink 2013-2015





**Fig .VI-1 sch éma Simulink d'un panneau photovoltaïque**

La figure (VI-2) représente le schéma Simulink d'association de quatre panneaux en s érie

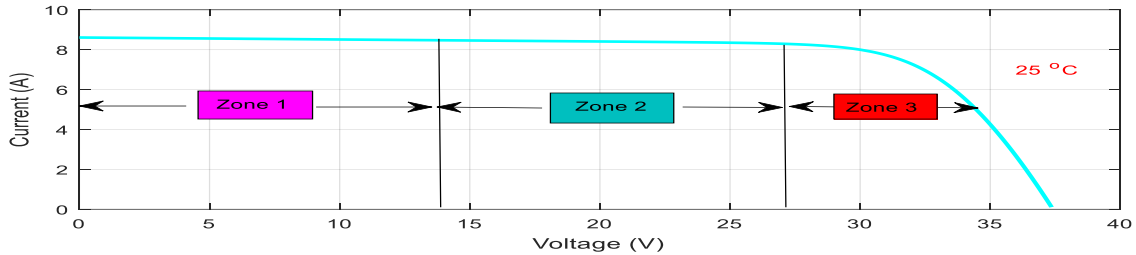


**Fig .VI-2 sch éma Simulink de panneau photovolta ïque en s érie**

### VI.2 Caract éristique Courant-Tension $I=f(V)$ :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire, définissant cet élément

comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué mais décalée le long de l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.



**Fig. VI.3 : Caractéristique  $I=f(V)$  du module solaire.**

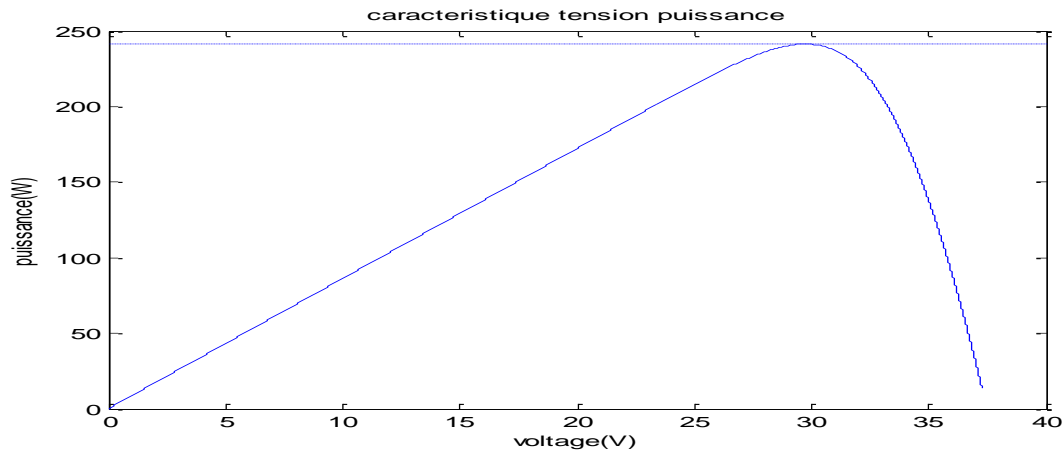
La figure (VI-3), présente le fonctionnement du module. Il est caractérisé essentiellement par trois zones :

- Zone 1 : le module fonctionne comme générateur de tension.
- Zone 2 : zone privilégiée pour le fonctionnement optimal défini par le courant  $I_{op}$  et la tension  $V_{op}$ , où le module délivre sa puissance maximale (point M).
- Zone 3 : le module fonctionne comme générateur de courant.

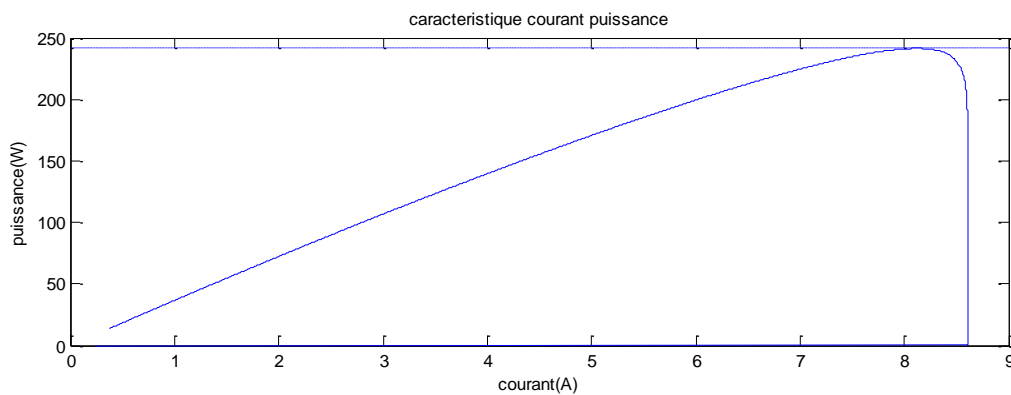
### VI-3-Caractéristique Puissance(courant,Tension)( $P=f(V)$ $p=(I)$ :

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement.

Puissance délivrée par le module dépend de point fonctionnement. Le point M représente la puissance maximale par le module qui est donné par :  $P_{max}=I_{op}.V_{op}$



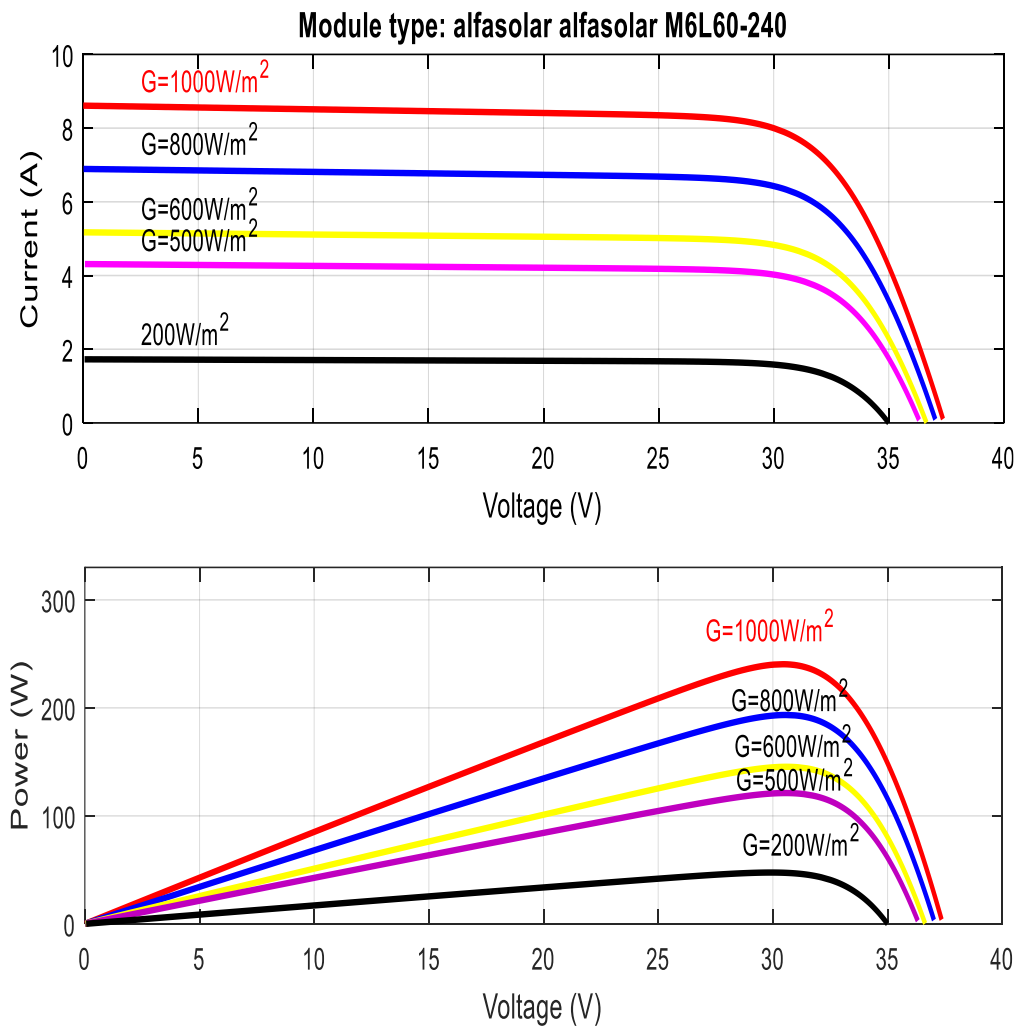
**Fi g. (VI-4) : caractéristique puissance – tension**



**FigVI-5-caractéristique puissance- courant**

### **VI-4-Influence de l'éclairement :**

La figure (VI-3) présente la caractéristique  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque pour différents ensoleillements à la température fixe. Comme on peut voir sur la figure (VI-3), le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement.



**Fig. (IV-6) : effet de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$  du  $G$  àérateur PV à  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ .**

#### **IV-4-Influence de la température et de la résistance série :**

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne d'une part, une augmentation du courant photonique, en raison, principalement, de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau et d'autre part, une diminution de la tension du -circuit ouvert  $V_{oc}$ . L'augmentation de la température entraînerait

- Une diminution de la puissance maximale disponible et de la tension (0.06 % par  $^\circ\text{C}$ ).
- Une augmentation du courant (0.4 % par  $^\circ\text{C}$ ).
- Une diminution du rendement et de facteur de forme FF.

## Chapitre VI : simulation du pompage photovoltaïque

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit figure (IV-7).

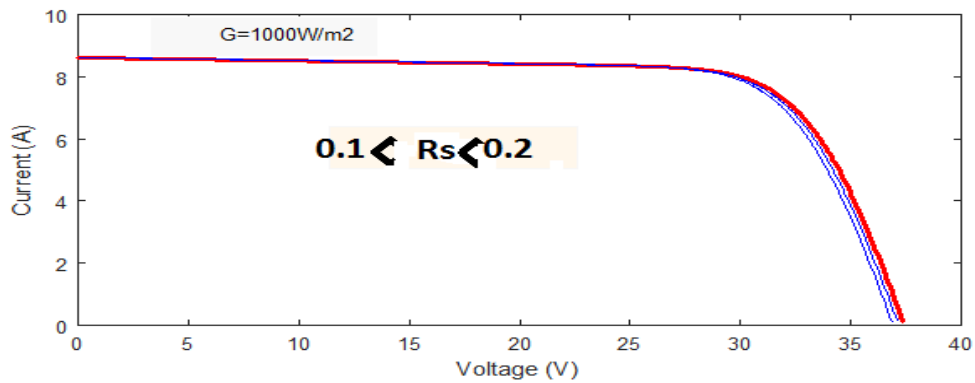
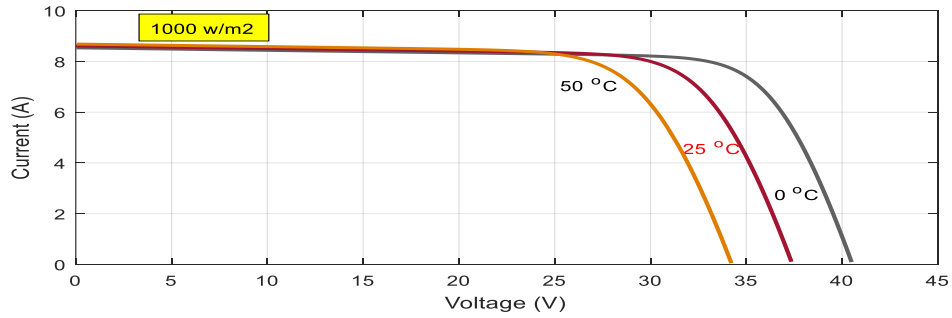


Fig VI-7 Influence de la température et de la résistance série

## Chapitre VI : simulation du pompage photovoltaïque

Dans les conditions d'éclairement  $G=1000\text{W/m}^2$  et de température  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$  la simulation du pompage photovoltaïque à réaliser comme suit :

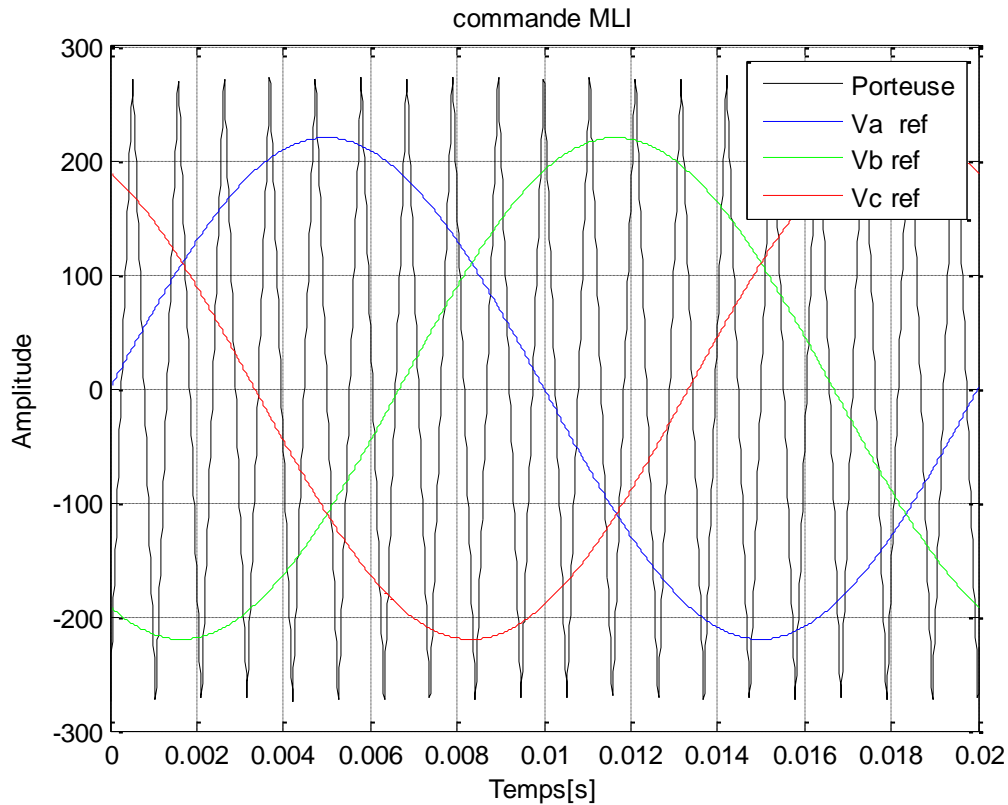


Fig –VI-8 Courbes d'interaction du signal de la porteuse triangulaire avec les tensions de référence (Va,Vb,Vc)

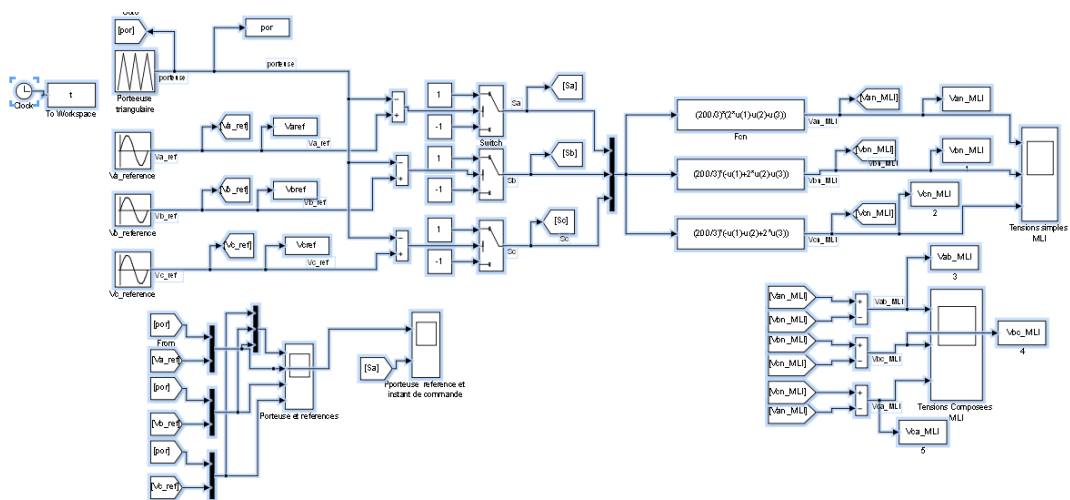
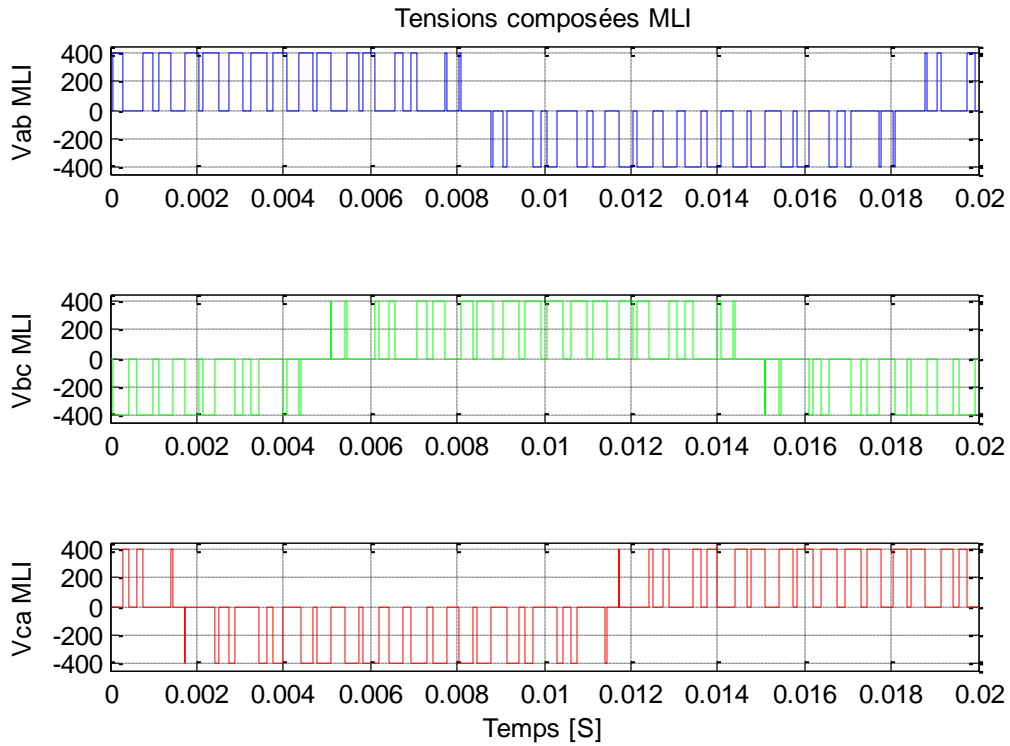
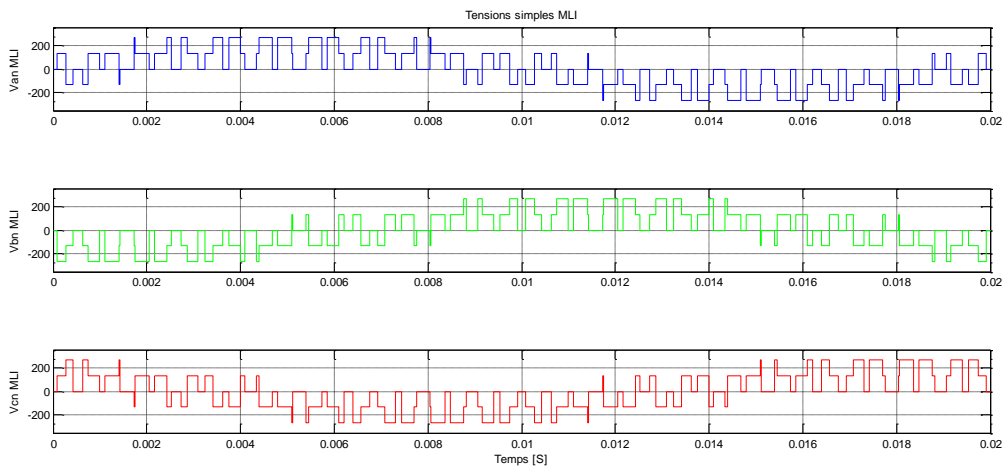


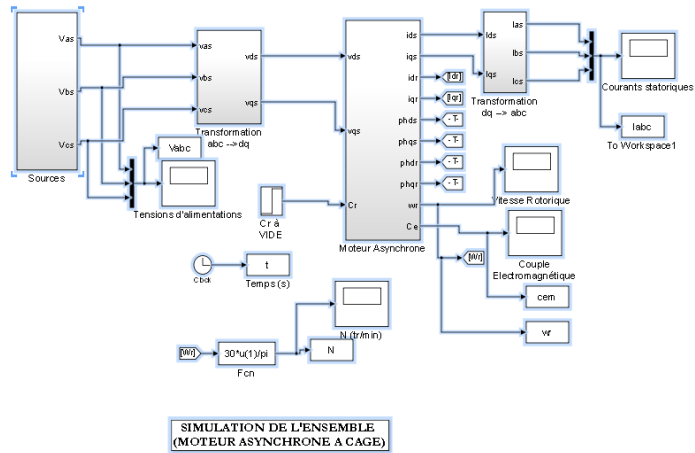
Fig-VI-9 Schéma simulink d'un onduleur MLI



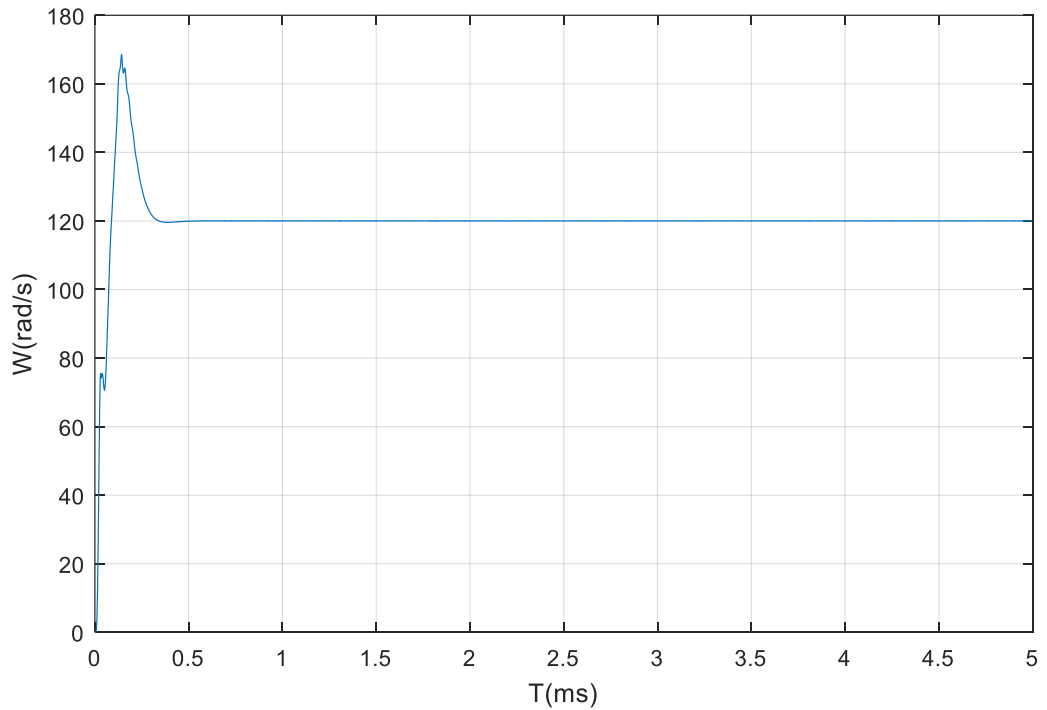
**Fig VI-10 courbes des tensions comp sées MLI**



**Fig VI-11 courbes des tensions simple MLI**

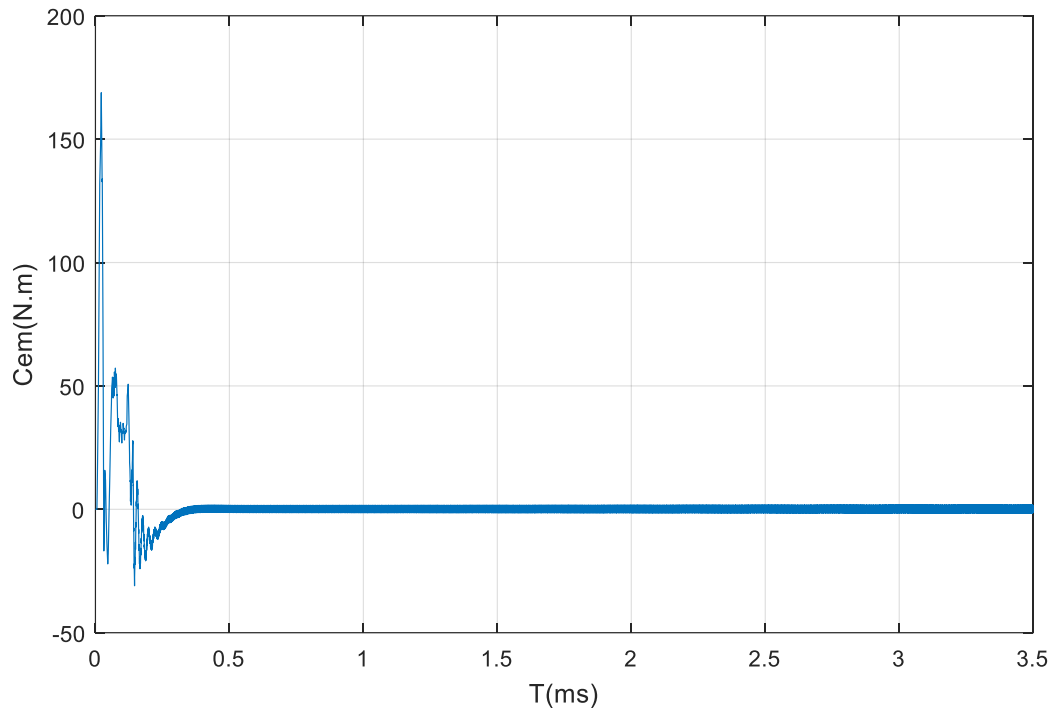


**Fig VI-12 Schema sumilink d'un moteur a synchrone**



**Fig VI-13 Courbe de la variation de vitesse W (rad/s) en charge en fonction de temps**





FigVI-14- Courbe de la variation du couple moteur( $C_{em}$ ) en fonction de temps

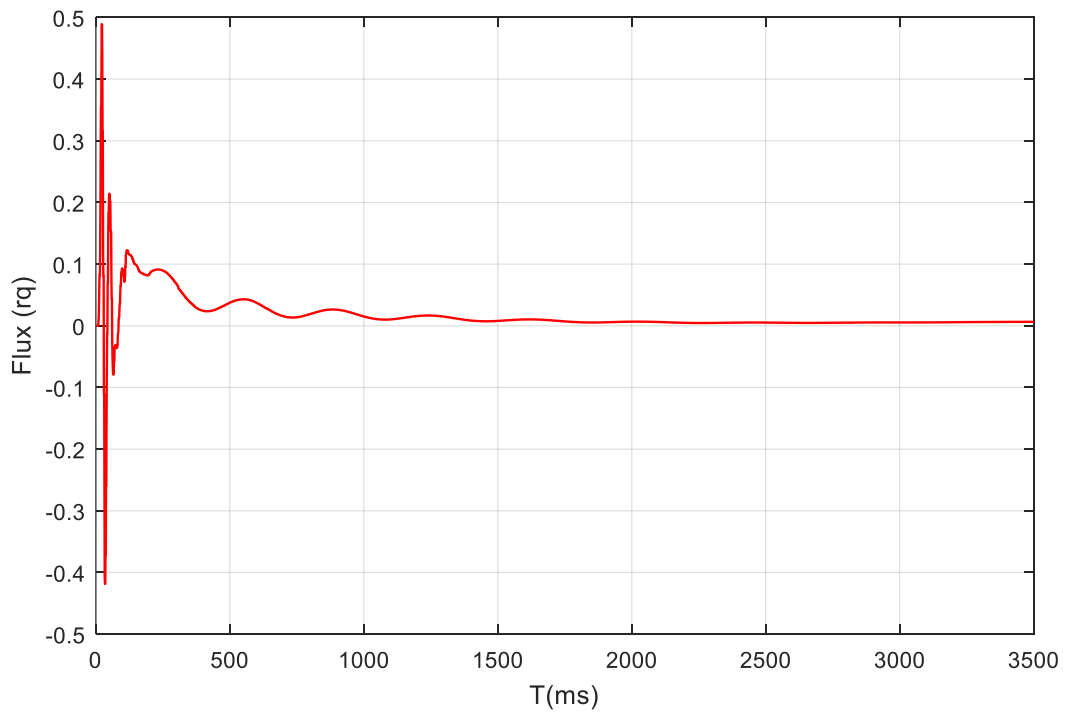


Fig. VI-15 – Courbe la variation du flux ( $\Phi_{rq}$ ) en fonction de temps

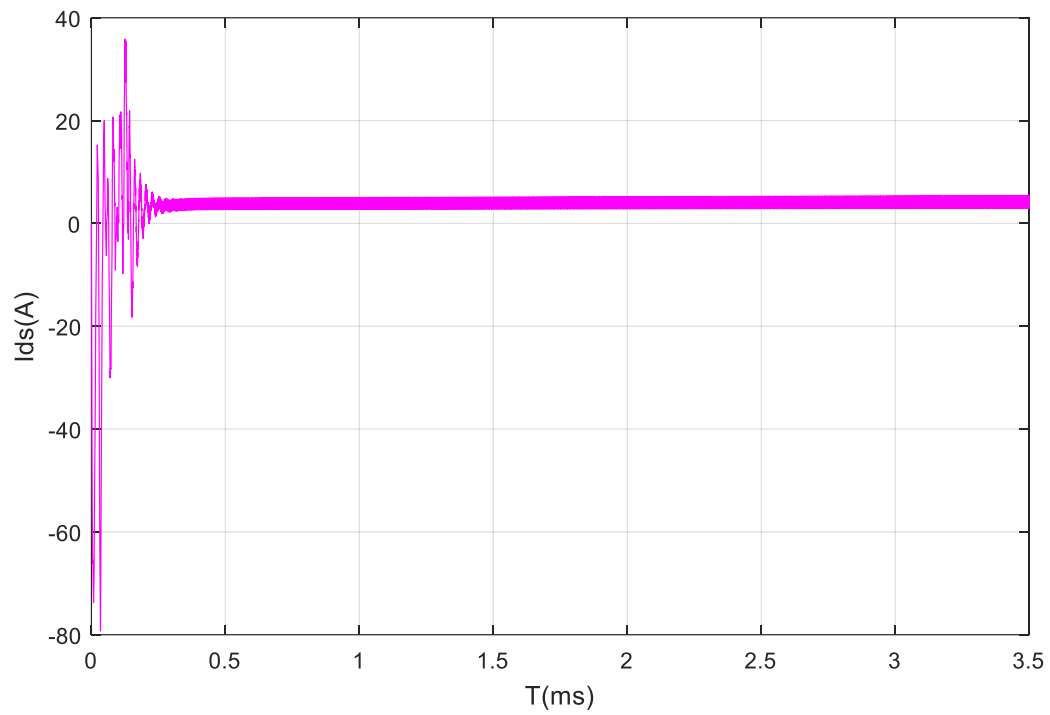


Fig. VI-1-16- Courbe de variation du courant statorique ( $I_{ds}$ ) en fonction de temps

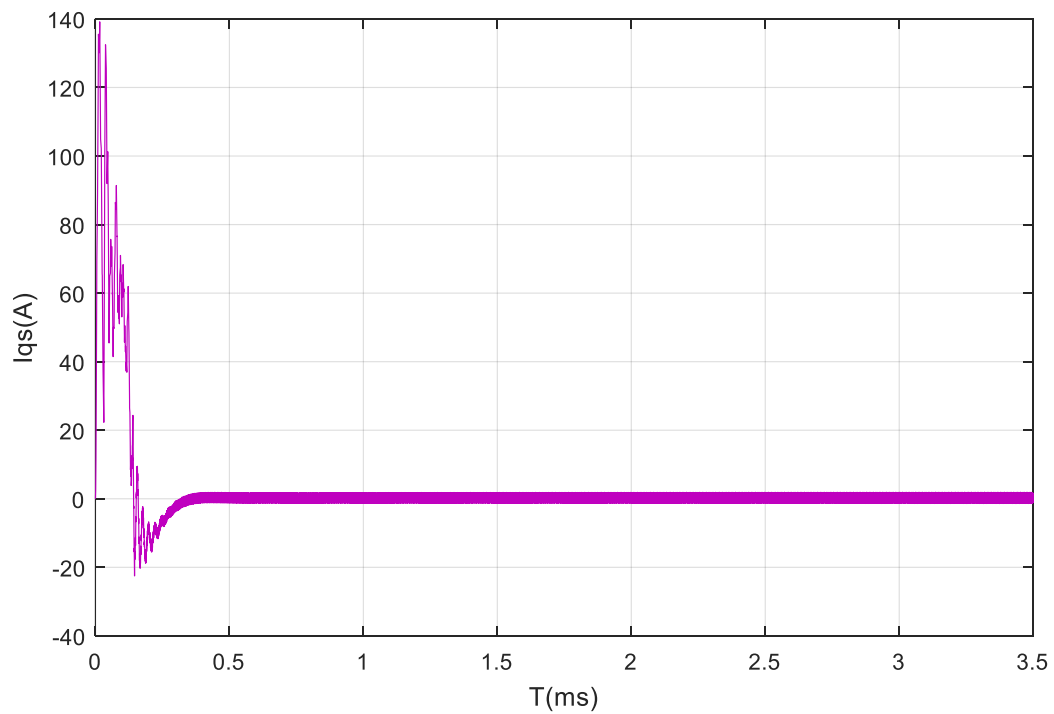


Fig. VI-1-17- Courbe de variation du courant statorique ( $I_{qs}$ ) en fonction de temps

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons élaborés sous Matlab2015 la simulation des différents blocs du pompage photovoltaïque.

On a commencé par le module solaire de notre système de type :ALFASOLARM6L60-240 ;dont nous avons obtenu les différentes courbes de simulation [ $I=f(v)$  ; $p=f(v)$ ...ex]

Après cela nous avons simulé l'étage de l'onduleur triphasé dont on a réalisées les courbes des tensions composées et simple. A la fin, nous avons terminé par faire sortir les différentes courbes concernant le moteur asynchrone a cage et la pompe centrifuge.

### Conclusion générale :

Dans ce travail, il s'agit de modéliser, de simuler et de diagnostiquer un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT, destiné à entraîner une machine asynchrone à travers d'un convertisseur DC-AC.

Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV en se basant sur un circuit équivalent à une diode. L'objectif était la simulation du fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension. A l'issue des simulations effectuées, nous avons constaté une forte dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale. La solution fréquemment adoptée est l'incorporation d'un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge commandé directement par la technique PWM. Le choix de la structure de conversion est fonction de la charge à alimenter. La deuxième partie de ce mémoire était l'objet de dimensionnement des convertisseurs DC-DC communément utilisés dans les chaînes de conversion photovoltaïque. L'étude par simulation effectuée a montré la validation du calcul théorique des éléments passifs constituant ces convertisseurs.

Pour fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. A cet effet, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation et l'algorithme de contre réaction de tension dans le contrôle des convertisseurs DC-DC. Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque. Ensuite, on a effectué la modélisation de l'ensemble moteur-convertisseur statique et leur commande afin de vérifier le comportement de la machine vis-à-vis des différentes défaillances qui peuvent surgir sur cet ensemble.

## **Bibliographie :**

[1] :Performance et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie A.Hamidat, A.Hadj Arab et M.T.Boukadoum Rev.Energ.Ren.Vol.8(2005) 157-166

[2] :Fête de la science L'histoire des sciences :L'effet photovoltaïque 2007.Document PPT [www.fete de la sciences.fr](http://www.fete.de.la.sciences.fr)

[3] :Tarek Bouguerra<<Optimisation d'un système photovoltaïque :Application en continu et en alternatif>>mémoire de magister université Mentouri de Constantine 1 2014 page 17.

[4] :A.Bouden et M.Marir benabbas<<Modélisation de système de pompage photovoltaïque optimisé>>Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13)-2013

[5] :M.Capderou,'Atlas Solaire de l'Algérie, Modèles Théoriques et Expérimentaux 2011 Synthèse bibliographique par Pr.A/MALEK Roula.

[6] :M.Djeroui Salim<<Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone>>université Abbes Farhat des étés 2011 chapitre 1.page(5,6)

[7] :BTS TC Le solaire photovoltaïque lycée Argo-Perpignan page (1,2,3). Document PPT.[www.francois-argo.org/btstc](http://www.francois-argo.org/btstc).

[8] :L.Baghli,'modélisation et commande de la machine asynchrone', Institut Universitaire de Formation des Maîtres de Lorraine, Université Henri Poincaré, Nancy, 2005

[9] : Le pompage photovoltaïque manuel de cours université d'Ottawa .Canada chapitre 2

[10] :[WWW.Mthworks.com](http://WWW.Mthworks.com) ; [www.youtube.com/simulation d'un panneau solaire](http://www.youtube.com/simulation_d'un_panneau_solaire).

[11] :<http://www.abcclim.net/moteur-asynchrone-triphas.html>

[12] :D.R. Chouiter <<Conception et réalisation d'une commande robuste de machine

[13] : A.Saadi <<Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque >>,Thèse de magister, Université de Biskra 2001

[14] : B.GABRIEL<<Commande vectorielle de machine asynchrone environnement temps réel Matlab simulink >>thèse ingénieur C.N.A.M (France 2001)

## Annexes

### Programme de l'onduleur sous Matlab Simulink

```
plot(t,Vcn_MLI,'-r')
grid on
ylabel('Vcn MLI')
xlabel('Temps [S]')
grid on
axis([0 0.02 -350 350])
%-----
figure(3)
subplot(311)
plot(t,Vab_MLI,'-b')
grid on
ylabel('Vab MLI')
axis([0 0.02 -450 450])
title('Tensions composées MLI')
%
subplot(312)
plot(t,Vbc_MLI,'-g')
grid on
ylabel('Vbc MLI')
axis([0 0.02 -450 450])
%
subplot(313)
plot(t,Vca_MLI,'-r')
grid on
ylabel('Vca MLI')
xlabel('Temps [S]')
grid on
axis([0 0.02 -450 450])
```

### Programme du paramètre Moteur sous Matlab Simulink

%parametre de la machine asynchrone

```
Lm=0.091;
fr=0.001;n=2;
J=0.03;Rs=0.63;Rr=0.4;
Ls=0.097;Lr=0.097;

Tr=Lr/Rr;Ts=Ls/Rs;
neta=1/Tr;
sigma=1-(Lm^2/(Lr*Ls));
k2=(Lm*Rr)/Lr^2;
k3=1/(sigma*Ls);
k1=k3*Lm/Lr;
k4=Rs+Lm^2/(Lr*Tr);
gamma=k3*k4;
Cr=5;
Phi_ref=0.5;
```

## Annexes

% les régulateurs

% de courants

$K_p = \sigma * L_s$ ;  $K_i = R_s$ ;

% de vitesse

$\% tr = 2$ ;  $\omega_n = 5/tr$ ;  $\xi = 1$ ;

$\omega_n = 30$ ;  $\xi = 0.95$ ;

$K_{iw} = J * \omega_n^2$ ;  $K_{pw} = 2 * \xi * J * \omega_n - fr$ ;

% régulateur de flux

$K_{p\phi} = Tr/L_m$  ;  $K_{i\phi} = 1/L_m$  ;

Tension triphas é

$U = 380 \text{ V}$

Courant nominal

$I = 3 \text{ A}$

Puissance

$P = 1.5 \text{ KW}$

R é sistance satorique du moteur

$R_s = 0.63 \Omega$

R é sistance rotorique du moteur

$R_r = 0.4 \Omega$

Inductance cyclique satorique

$L_s = 0.09 \Omega$

Inductance cyclique rotorique

$L_r = 0.08 \Omega$

Inductance cyclique metuelle

$M = 0.41 \Omega$

Vitesse de rotation

$n_n = 1500 \text{ tr/min}$

### **Param ère de la pompe centrifuge :**

$C_r : 2.3 \text{ N.m}$

Vitesse sp é cifique :

$N_{sq} = 22.5 \text{ trt/mn}$

D é bit nominale :

$Q_n = 2.61/\text{s}$

Hauteur manom étrique nominale :

$H_n = 15.1 \text{ m}$

Puissance absorb é e nominale :

$P_{ab} = 625 \text{ W}$

Rendement nominal :

$\eta = 75\%$

Nombre d' aubage :

$Z = 7$

Epaisseur de l' aube :

$S = 3 \text{ mm}$

Largeur d' entr é e de l' aube :

$b_1 = 10 \text{ mm}$

Largeur de sortie de l' aube :

$b_2 = 10 \text{ mm}$

Angel d' entr é e de l' aube :

$\beta_1 = 26^\circ$

Angle dde sortie de l' aube :

$\beta_2 = 30^\circ$

## Annexes

Diametre d'entrée de la roue :

$d_1=42\text{mm}$

Diametre de sortie de la roue :

$d_2=82\text{mm}$