

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En :** « Electrotechnique »

**Spécialité :** « Commande électriques »

**Par :** BOUKHALFA NAWAL et MIMOUN SALIMA

**Sujet**

**Introduction à la commande par mode glissant d'un système  
générateur photovoltaïque-pompe**

Soutenu publiquement, le 23/06 / 2022, devant le jury composé de :

Mr Merzoug SM	Pr	Université de Tlemcen	Président
Mme Choukchou Brahma	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. Yacoubi. B	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2021/2022



## Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant pour nous avoir donnés la force et le courage pour faire aboutir ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements à nos encadreurs Monsieur **YACOUBI Boumediene** pour avoir dirigé ce mémoire, pour son temps qu'il a accordé, ses conseils, ses encouragements et les précieuses orientations qui ont contribué à baliser le parcours de cette recherche. Nous remercions les **membres de jury** qui ont accepté d'examiner notre modeste travail, pour leur disponibilité et leur confiance.

Nous remercions aussi nos enseignants de département d'électrotechnique de l'université de Tlemcen qui nous guident pendant les 5 années d'étude. Un tel travail est également le résultat des efforts de beaucoup de personnes qui nous ont aidés énormément, à ceux qui nous ont facilités l'accès à l'information pour l'élaboration de ce mémoire.



# Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les Protège

A mes chères mes très chères frères et sœurs

Mes fidèles amis

Pour leurs soutien moral et financier, pour

Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A tous ceux-qui me sont très chers.

Pour toute personne que j'ai connue lors de mon

Bref passage à l'université.



Boukhalfa

# Dédicaces 2

Je dédie ce travail :

À mon père, qui peut trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie et aussi pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent;

À ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie;

À mon grand-père qui m'a soutenu par des prières

A l'âme de ma grande mère

À ma seule sœur HANANE

À mon petit frère samado, et tous mes frères (Mohammed, khikho et kimo) que Dieu les protège;

Sans oublier la femme de mon frère (siham)

À mon binôme NAWAL

À tous mes amis(es) et spécialement pour **BENHAMMOU HABIBA** et **BECHRIF BOUTHAYNA** qui mon beaucoup soutenu

En fin á tout ce ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.



Mimoun

### Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer une commande vectorielle associée à une électropompe asynchrone immergée. La configuration de ce système comporte un générateur 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 à 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.

Mots clés : Photovoltaïque, Contrôle MPPT, Machine asynchrone, Hacheur, Onduleur.

### Abstract

The objective of this thesis is to provide a vector control combined with an electric asynchronous motor.

The configuration of this system includes a photovoltaic generator, a PV bus, a PV filter connected to a boost converter, a DC bus and a voltage inverter fed induction machine coupled to a centrifugal pump.

The objective of this system is to ensure operation at maximum power of PV system for various climatic conditions. The matching between the photovoltaic generator and the load was determined by the DC / DC converter. Vector control technology is developed and presented, with the environment of simulation MATLAB on the proposed structure.

Keywords: Photovoltaic, MPPT control, asynchronous machine, chopper, Inverter.

ملخص

الهدف من هذه الرسالة هو توفير آلية تحكم شعاعية لمحرك مع مضخة مغمورة. تكوين هذا النظام يحتوي على مولد للطاقة الشمسية, فلتر ضوئي موصول بمحول للتوتر الكهربائي وعاكس كهربائي للتوتر يغذي محرك تيار متردد حتي موصول بمضخة مركزية.

الهدف من هذا النظام هو ضمان التشغيل في حدود الاستطاعة القصوى للنظام الكهروضوئي لمختلف الظروف المناخية. التأقلم بين المولد الكهروضوئي والشحنة تم بواسطة المحول الكهربائي DC-DC.

تقنية آلية التحكم الشعاعية تم تطويرها وتقديمها في رسالة الماجستير هذه. المحاكاة تمت بواسطة برنامج المحاكات « MATLAB » وفق الهيكل المقترح.

**الكلمات الدلالية:** كهروضوئي, آلية تحكم MPPT, محرك تيار متردد, محول التوتر, عاكس كهربائي للتوتر.

# Table des matières

## Table des matières

<i>Remerciements</i> .....	2
<i>Dédicace 1</i> .....	3
<i>Dédicaces 2</i> .....	4
<i>Table des matières</i> .....	8
<i>Liste des figures :</i> .....	<i>i</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>iv</i>
<i>Abréviations</i> .....	<i>v</i>
<i>Nomenclature</i> .....	<i>vi</i>
<i>Introduction générale</i> .....	<i>1</i>
<i>Chapitre I</i> .....	<i>4</i>
<i>Chapitre I. Généralités sur l'Énergie Photovoltaïque</i> .....	<i>1</i>
1.1. Introduction.....	1
1.2. Énergie solaire.....	1
1.3. Rayonnement Solaire .....	1
1.4. Différents types de rayonnement .....	2
1.5. Principe de la conversion photovoltaïque.....	2
1.6. Principe de fonctionnement .....	3
1.7. Technologie photovoltaïque .....	4
1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	5
1.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	6
1.10. Module photovoltaïque.....	8
1.11. La Protection des cellules PV.....	9
1.12. Résultats de simulation .....	10
<i>Conclusion</i> .....	<i>19</i>
<i>Chapitre II</i> .....	<i>15</i>
<i>Chapitre II. Modélisation et Commande d'un Système Photovoltaïque débitant sur une charge..</i>	<i>15</i>

# Table des matières

---

---

<b>II.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>15</b>
<b>II.2.</b>	<b>Différents topologies .....</b>	<b>16</b>
<b>II.3.</b>	<b>Système de stockage .....</b>	<b>18</b>
<b>II.4.</b>	<b>Conversion de puissance.....</b>	<b>18</b>
<b>II.5.</b>	<b>Equations de fonctionnement du hacheur BOOST .....</b>	<b>19</b>
<b>II.6.</b>	<b>Détermination des paramètres du hacheur Boost.....</b>	<b>22</b>
<b>II.7.</b>	<b>Avantage de convertisseur BOOST .....</b>	<b>25</b>
<b>II.8.</b>	<b>Simulation du hacheur boost .....</b>	<b>25</b>
<b>II.9.</b>	<b>Principe de la recherche du point de puissance maximal .....</b>	<b>28</b>
II-1.1	Généralités .....	28
II-2.1	Couplage avec technique MPPT.....	28
II-3.1	La commande MPPT .....	28
II-4.1	Principe de la commande MPPT .....	28
II-5.1	Différents types de MPPT .....	29
II.9.5.1	Les méthodes directes.....	29
II.9.5.2	Les méthodes indirectes.....	29
II.9.5.2.1	Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O).....	29
II.9.5.2.2	Principe des commandes « Incrément des conductances » (IncCond) .....	31
<b>II.10.</b>	<b>Le convertisseur continu- alternatif.....</b>	<b>34</b>
II-1.1	Simulation de MLI et convertisseur DC-DC .....	35
<b>Conclusion .....</b>		<b>37</b>
<b>Chapitre III.....</b>		<b>1</b>
<b>Chapitre III. Modélisation du système Moto-pompe.....</b>		<b>26</b>
<b>III.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>26</b>
<b>III.2.</b>	<b>Moteur d'entraînement.....</b>	<b>26</b>
<b>III.3.</b>	<b>Modèle mathématique de la MAS et Rendement .....</b>	<b>27</b>
<b>III.4.</b>	<b>Modèle abc de la machine asynchrone à cage .....</b>	<b>28</b>
<b>III.5.</b>	<b>Transformation de PARK.....</b>	<b>30</b>
<b>III.6.</b>	<b>Modèle dq de la machine asynchrone à cage.....</b>	<b>31</b>
III-1.1	Equations des tensions dans les axes d et q .....	32
<b>III.7.</b>	<b>Bilan des puissances et rendement .....</b>	<b>33</b>
<b>Commande vectorielle de la machine asynchrone.....</b>		<b>34</b>

# Table des matières

---

---

<b>III.8.</b>	<b>Introduction :</b> .....	<b>34</b>
<b>III.9.</b>	<b>Principe du contrôle vectoriel de la MAS :</b> .....	<b>35</b>
<b>III.10.</b>	<b>Description de la commande vectorielle indirecte et directe</b> .....	<b>37</b>
III-1.1	La commande vectorielle indirecte [38].....	37
III-2.1	Synthèse et Calcul du réglage .....	38
III.10.2.1	Régulateur de courant : .....	38
III.10.2.2	Régulateur de vitesse : .....	40
III-3.1	Convertisseur statique .....	41
III.10.3.1.1	la simulation (d'un onduleur de tension triphasé avec MLI alimentée a un source CC et la charge est MAS) 42	
<b>III.11.</b>	<b>Pompage hydraulique</b> .....	<b>44</b>
<b>III.12.</b>	<b>Les 4 principaux types de pompes hydrauliques :</b> .....	<b>45</b>
<b>III.13.</b>	<b>Différentes types des pompes</b> .....	<b>45</b>
III-1.1	Pompe volumétrique .....	45
III.13.1.1	Le rendement volumétrique.....	46
III-2.1	Pompe centrifuge.....	46
III.13.2.1	Constitution d'une pompe centrifuge .....	47
III.13.2.2	Fonctionnement d'une pompe centrifuge .....	48
<b>III.14.</b>	<b>Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges</b> .....	<b>48</b>
<b>III.15.</b>	<b>La différence entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique</b> .....	<b>49</b>
<b>III.16.</b>	<b>Rendement du groupe Moteur-pompe</b> .....	<b>52</b>
<b>III.17.</b>	<b>Simulation d'une pompe centrifuge</b> .....	<b>54</b>
<b>Conclusion</b> .....		<b>55</b>
<b>Chapitre IV</b> .....		<b>25</b>
<b>Chapitre IV. Commande par mode glissant</b> .....		<b>40</b>
<b>IV.1.</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>40</b>
<b>IV.2.</b>	<b>Systèmes à structures variables [49]</b> .....	<b>40</b>
<b>IV.3.</b>	<b>Théorie des modes glissants</b> .....	<b>40</b>
IV-1.1	Principe de la commande par mode glissant .....	41
IV-2.1	La Théorème .....	41
IV-3.1	Conception de la commande par mode de glissement.....	42
IV-4.1	Choix de la surface de glissement .....	42
IV-5.1	Condition d'existence du glissement .....	43

# Table des matières

---

---

<b>IV.4. Calcul de la loi de commande.....</b>	<b>43</b>
IV-1.1 Commande équivalente <i>ueq</i> .....	43
IV-2.1 Commande discontinue <i>un</i> : .....	44
IV-3.1 Phénomène de broutement.....	45
IV.4.3.1 Réduction du phénomène de broutement.....	45
IV.4.3.2 Fonction saturation (Sat).....	46
<b>IV.5. Commande MPPT par mode glissant du système photovoltaïque .....</b>	<b>47</b>
IV-1.1 Détermination de la commande équivalente .....	47
IV-2.1 Détermination de la commande discontinue .....	47
<b>IV.6. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant .....</b>	<b>47</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion général .....</b>	<b>a</b>

## Liste des figures

---

---

### Liste des figures :

Figure 1:Principe de conversion d'énergie d'une cellule photovoltaïque [7].	3
Figure 2 :Structure basique d'une cellule solaire.	4
Figure 3 :Les différentes générations des cellules solaires.	4
Figure 4:Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale.	6
Figure 5:Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge.	8
Figure 6:Module photovoltaïque.	9
Figure 7:schéma simulink du photo-courant $I_{ph}$ .	10
Figure 8:schéma Simulink du courant de saturation.	10
Figure 9:schéma simulink du courant de saturation inverse.	11
Figure 10:schéma simulink du courant à travers la résistance shunt.	11
Figure 11:schéma simulink du courant de sortie $I$ .	11
Figure 12:schéma simulink globale de la cellule photovoltaïque.	12
Figure 13:Caractéristique (courant-tension) d'un module photovoltaïque .	13
Figure 15:Caractéristique (puissance-tension) d'un module photovoltaïque. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure 16:Bloc du modèle réel implémenté sous Matlab Simulink.	15
Figure 17:Caractéristique courant-tension pour différents éclairagements.	15
Figure 18: Caractéristique puissance-tension pour différents éclairagements.	15
Figure 19:Caractéristique courant-tension pour différents niveaux de températures.	16
Figure 20:Caractéristique puissance-tension pour différents niveaux de températures.	17
Figure 21:Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.	17
Figure 22:influence la résistance série pour voire le courant.	18
Figure 23:influence la résistance série pour voire la puissance.	19
Figure 24:Caractéristique d'un groupement en parallèle de np cellules identiques.	19
Figure 25:Installation photovoltaïque avec alimentation directe.	16

## Liste des figures

---

---

Figure 26: Système photovoltaïque avec stockage [22].	17
Figure 27: Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque groupe électrogène.	17
Figure 28: schéma de principe du convertisseur BOOST.	19
Figure 29: Diagramme BOOST en position 1 et (b) diagramme BOOST en position 2.	20
Figure 30: Signaux typiques de convertisseur BOOST.	21
Figure 31: Ondulation du courant.	22
Figure 32: ondulation de tension.	23
Figure 33: schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST	25
Figure 34: les caractéristiques (tension-courant) d'un convertisseur (g, UL, IL et Uch).	26
Figure 35: simulation d'un boost alimentée par une source de GPV.	27
Figure 36: les caractéristiques (tension-courant) d'un panneaux photovoltaïque (G, $VP_v$ , $IP_{vet}$ et $P_{pv}$ ).	27
Figure 37: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	29
Figure 38: Schéma du système photovoltaïque avec la commande MPPT.	29
Figure 39: Caractéristique puissance tension d'un panneau photovoltaïque.	30
Figure 40: Algorithme de la méthode P&O.	31
Figure 41: Algorithme de la méthode Incrément de conductance.	32
Figure 42: Structure d'un convertisseur boost.	33
Figure 43: schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).	34
Figure 44: Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque. [33].	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 45: schémas bloc de MLI et convertisseur DC-DC.	35
Figure 46: les Tension et Courant de charge RCL.	36
Figure 47: les graphes du MLI.	36
Figure 48: schéma électrique d'une machine asynchrone triphasée à cage.	29
Figure 49: Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q.	31
Figure 50: principe de contrôle vectoriel.	36
Figure 51: Régulation de la vitesse par la commande vectorielle indirecte.	38

## Liste des figures

---

---

Figure 52:régulation de courant par la commande vectorielle indirecte. ....	40
Figure 53:régulation de vitesse par commande vectorielle. ....	41
Figure 54: Convertisseur statique (onduleur). ....	42
Figure 55:onduleur de tension triphasé avec MLI alimentée a un source CC et la charge est MAS .....	42
Figure 56:les caractéristique du courent de stator isq et du courent de stator isa. ....	43
Figure 57:les caractéristiques du flux de stator. ....	43
Figure 58:les caractéristique du courent de stator isd .....	43
Figure 59:les caractéristiques de vitesse du moteur asynchrone .....	44
Figure 60:principaux types de pompes hydrauliques. ....	45
Figure 61:Schéma d'une pompe volumétrique. ....	45
Figure 62:Schéma d'une pompe centrifuge.....	47
Figure 63:Constitution d'une pompe centrifuge [42].....	47
Figure 64:Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation. ....	51
Figure 65:Caractéristiques de rendement de la pompe centrifuge. ....	52
Figure 66:Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.....	53
Figure 67:Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.....	54
Figure 68:la simulation d'une pompe centrifuge. ....	54
Figure 69:Principe de la commande par mode glissant.....	41
Figure 70:Représentation de la fonction " Signe ". ....	44
Figure 71:Phénomène de broutement.....	45
Figure 72:Fonction saturation. ....	46
Figure 73:Fonction Smooth.....	46

## Liste des Tableaux

### Liste des tableaux

Tableau I: définition de chaque génération de la cellule solaire. ....	5
Tableau II: le paramètre de la cellule. ....	12

### Abréviations

<b>IFS</b>	Interaction Fluide-Structure
<b>ALE</b>	Arbitraire Lagrangien Eulérien
<b>MEF</b>	Méthode des Eléments Finis
<b>PFD</b>	Principe Fondamental de la Dynamique
<b>1D</b>	Unidirectionnel (une seule direction)
<b>EDP</b>	Equation Différentielle Partielle
<b>CFD</b>	Computationnelle Fluide Dynamique

### Nomenclature

#### Notation

$\{.\}$  : Vecteur colonne

$_{\cdot}$  : Vecteur ligne

$[.]$  matrice

$.(x, t)$  :  $x$  et  $t$  dépendante

# Introduction générale

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

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

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire).

Les avantages principaux de ces énergies sont :

- ☞ La source principale est gratuite.
- ☞ elles sont renouvelables.
- ☞ elles sont propre et leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère en effet elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre [1].

La moitié de la population des pays en voie de développement n'ont pas d'accès sûr à l'eau potable cependant. Par ailleurs ce manque est à l'origine de 80 % des maladies et de la pauvreté, ainsi il reste le besoin vital en même temps un souci majeur des populations des régions rurales et sahariennes.

L'utilisation de l'énergie solaire pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation est donc une priorité importante malgré un fort ensoleillement sachant que cette pénurie d'eau peut avoir une solution adaptée par pompage d'eau souterraine naturellement stockée dans des nappes [2]. ce système est justifiée économiquement où l'énergie fournie par le générateur est stockée sous forme d'eau pompée durant la journée au lieu d'être emmagasinée sous forme d'énergie électrique.

## Introduction générale

---

---

Dans les régions éloignées des réseaux électriques, il y a des diverses possibilités pour se servir de ces nappes : pompes à main, pompes diesel, pompes solaires.

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage solaire ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie solaire et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement recommandé de relier un point d'utilisation éloignés par rapport au site du réseau électrique. L'exploitation de l'énergie photovoltaïque offre un approvisionnement local en énergie ce qui constitue un avantage certain.

Plusieurs configurations de système de pompage solaire sont actuellement en service :

☞ couplage direct entre le GPV et la pompe.

☞ Couplage indirect :

Le Couplage de la pompe avec le générateur photovoltaïque peut être directe indirecte par insertion d'un convertisseur statique commandé par MPPT afin d'assurer au Maximum de puissance il faut noter qu'une alimentation continue en énergie électriques nécessite la présence de batteries de stockage

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore, c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires .L'optimisation des systèmes solaires est basés sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement. Sachant que le but essentiel de toutes les recherches est l'amélioration globale des performances des systèmes de conversion photovoltaïque (PV) , quelle que soit la nature de la charge, ceci n'implique pas forcément une mauvaise rentabilité du système global, mais l'équivalence entre le rendement admissible et le coût moyen d'exploitation détermine le degré d'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire. Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité de systèmes photovoltaïques ainsi que des techniques ont été appliquées afin d'avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques, on trouve la technique de "Poursuite de Point de Puissance Maximale" ou "**Maximum Power Point Tracker (MPPT)**".

## Introduction générale

---

---

Ce travail est scindé en cinq chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion générales.

**Le premier chapitre** est consacré à l'étude bibliographique pour donner l'état de l'art dans le domaine envisagée, puis introduction des notions des systèmes photovoltaïques basé sur la modélisation mathématique de la cellule, du module et générateur photovoltaïque.

Tracer les caractéristiques statiques courant- tension et puissance- tension sous l'influence de la température, de l'ensoleillement, de la résistance série et de facteur de qualité etc ...

**Le deuxième chapitre** introduit le convertisseur de liaison entre le gpv et la pompe. Ce dernier est composé deux étage :

- le premier est convertisseurs DC-DC muni d'une commande MLI DC-DC basé sur la technique d'optimisation de la puissance fourni par le GPV.
- le deuxième convertisseur DC-AC muni d'une commande MLI sinus-triangle permutant la commande vectorielle de la machine asynchrone.

**Le troisième chapitre** fera l'objet de l'étude mathématique du système motopompe. Ainsi un modèle simplifié dq (orthogonal) du moteur asynchrone dédiée a l'entraînement de la turbine hydraulique la commande du moteur par l'intermédiaire d'un onduleur permet d'assurer la découplage du flux et du couple par une technique d'orientation flux dite vectorielle

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

# Chapitre I

**Chapitre I. Généralités sur l'Énergie Photovoltaïque****I.1. Introduction**

L'énergie électrique résultant de la conversion direct du rayonnement solaire a travers des cellules photovoltaïques dont le modèle est donné par les lois physique des phénomènes photovoltaïque en effet si la surface de cette cellule est exposée à la lumière, une force électromotrice apparaît entre ses bornes et peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu `à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Dans ce chapitre, nous commencerons par-là définition de l'`énergie solaire puis établir un modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque (modèle a une diode, modèle a deux diodes) et définir ainsi le modèle globale d'un GPV. Enfin des résultats de simulation sous MATLAB seront présentés.

**I.2. Énergie solaire**

Le soleil est une source d'énergie quasi inépuisable Le rayonnement de la surface de la terre, représentant environ 8400 multiples de consommation. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW c/m2), répartie sur spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète acceptent Plus d'énergie du soleil en 6 heures que les humains n'en consomment en une heure an. L'énergie solaire est produite et utilisée de plusieurs façons :

- ✓ Solaire thermique : la production de l'énergie électrique, est assurée par réception de la température solaire via des concentrateurs, permet d'alimenter une chaudière à vapeur dont la turbine constitue l'entraînement d'un générateur électrique qui a son tour fourni de l'énergie électrique.
- ✓ Solaire photovoltaïque : la production de l'énergie électrique est directe, elle est assurée par des panneaux solaires recevant de la lumière. Cette forme d'énergie est déjà utilisée dans de nombreux pays, notamment dans des régions sans ressources énergétiques mis à part des combustibles traditionnels tels que les hydrocarbures ou le charbon[3].

**I.3. Rayonnement Solaire**

Malgré la distance considérable de 150,10 km entre le soleil et la terre, le rez-de-chaussée reçoit beaucoup d'énergie 180,10 GW, oui pourquoi l'énergie solaire se présente comme une alternative aux autres sources d'énergie source d'énergie.

Cette énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique contenue dans des longueurs allant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ [4], l'énergie associée La décomposition du rayonnement solaire est à peu près la suivante[5]

- 9% dans le domaine UV ( $< 0,4\mu\text{m}$ ).
- 47% dans le visible ( $0,4$  à  $0,8\mu\text{m}$ ).
- 44% dans la bande infrarouge ( $> 0,8\mu\text{m}$ ).

Rayonnement Globale = rayonnement diffus + rayonnement réfléchi + rayonnement direct.

#### **I.4. Différents types de rayonnement**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

##### **Rayonnement direct**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

##### **Rayonnement diffus**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

##### **Rayonnement réfléchi**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo.

##### **Rayonnement global**

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

#### **I.5. Principe de la conversion photovoltaïque**

Une cellule solaire typique est constituée d'un matériau, entre deux électrodes, semi-conducteur de nature organique ou inorganique. Il peut être monocristallin, poly cristallin, nanocristallin ou amorphe. L'absorbeur ayant une énergie de séparation de bande ( $E_g$ ) correspondante au spectre solaire, collecte la lumière solaire et fournit une énergie électrique. Les électrodes sont fabriquées à partir de matériaux conducteurs avec différentes fonctions dont l'une d'elles doit être transparente à la lumière incidente. Le processus de conversion photovoltaïque peut être divisé en quatre étapes séquentielles [6] :

1. L'absorption de lumière provoque une transition d'électrons dans le matériau absorbant de la cellule de l'état fondamental à l'état excité ;
2. L'état excité est converti en une paire de porteurs de charge distincts (charges négatives et positives)

3. Sous un mécanisme de transport approprié, les porteurs de charge se déplacent séparément vers les contacts électriques de la cellule; le porteur négatif à la cathode et le porteur positif à l'anode ;
4. Les électrons parcourent le circuit externe à la cellule, où ils perdent de l'énergie et effectuent un travail utile (c'est-à-dire pour alimenter une charge).

Ensuite, ils atteignent la cathode, où ils se recombinent avec les porteurs de charge positifs et ramènent le matériau absorbant à l'état fondamental.

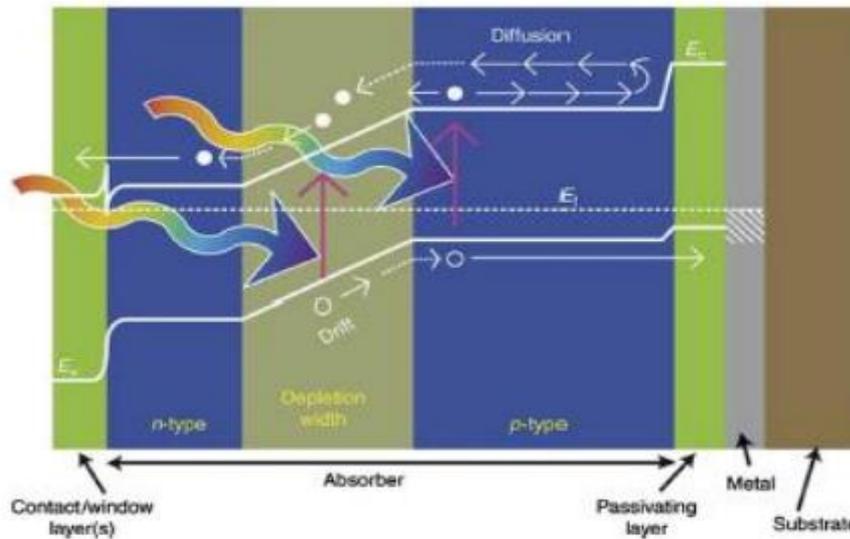


Figure 1: Principe de conversion d'énergie d'une cellule photovoltaïque [7].

## I.6. Principe de fonctionnement

Les **cellules photovoltaïques** (photovoltaïques) constituent les éléments de base des générateurs photovoltaïques. Il est constitué d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Il convertit l'énergie des photons en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Le principe de ce phénomène est le suivant : lorsqu'un photon est absorbé par un matériau, il transfère une partie de son énergie à un électron par collision, l'arrachant au matériau. Ce dernier était auparavant à un niveau d'énergie inférieur dans un état stable, puis transféré à un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein du matériau, entraînant des paires électron-trou avec la même énergie électrique (également appelée jonction PN). Cette réaction se traduit par une différence de distribution de charge, résultant en une différence de potentiel. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- ✓ Absorption des photons solaires par le matériau constituant le dispositif.
- ✓ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur.
- ✓ Collecte des particules générées dans le dispositif

En générale la structure d'une cellule solaire est composée de 6 couches à savoir :

- Couche de verre (A)
- Revêtement antireflet (B)
- Grille conductrice (C)
- Couche semi-conducteur dopée N (D)
- Couche semi-conducteur dopée P (E)
- Liaison conductrice (F).

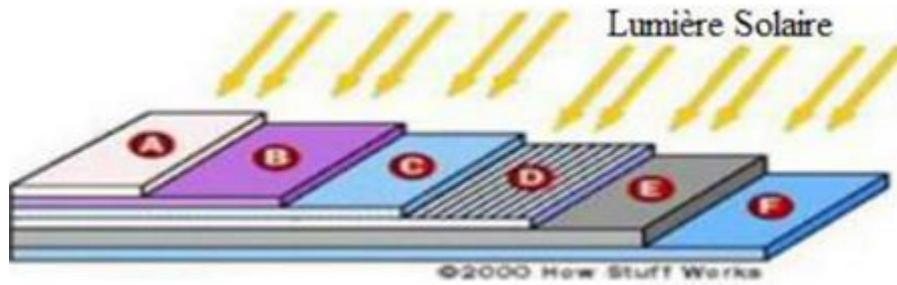


Figure 2 : Structure basique d'une cellule solaire.

**I.7. Technologie photovoltaïque**

Le matériau qui compose une cellule solaire s'est développé avec l'innovation technologique, par conséquent différentes générations de cellule solaire ont été introduite dans le marché ceci est présenté dans l'organigramme de la figure ci-dessous:

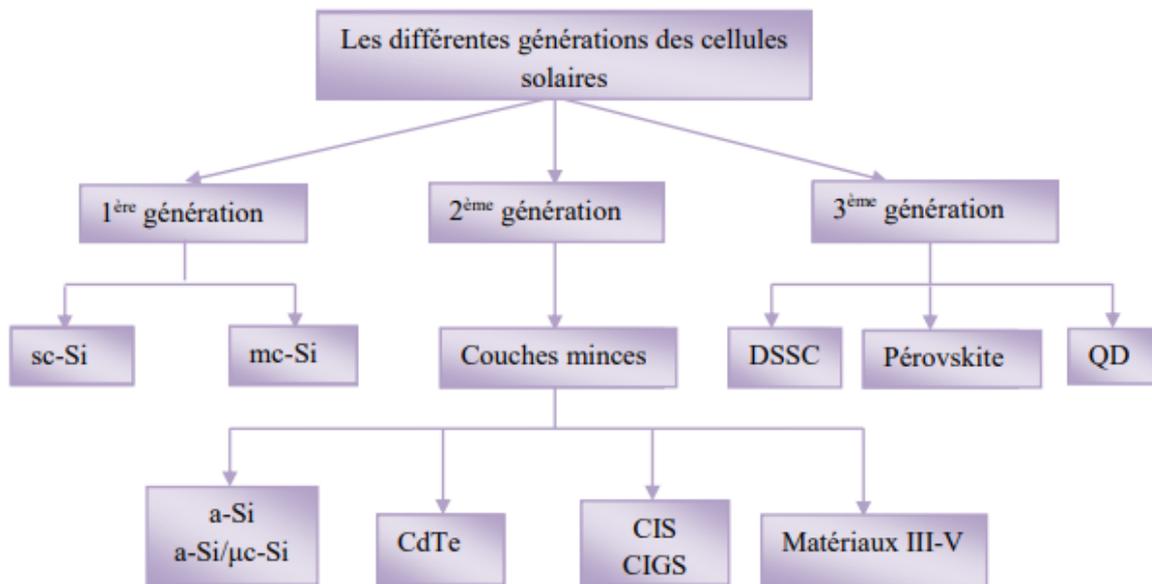


Figure 3 : Les différentes générations des cellules solaires.

Tableau I: définition de chaque génération de la cellule solaire.

Les générations	Les matières	Définition
1 <sup>ère</sup> génération	mc-si	Cellules solaires au silicium amorphe et au silicium microcristallin
1 <sup>ère</sup> génération	Sc-si	Cellules solaires au silicium
2 <sup>ème</sup> génération	CdTe	Les cellules au tellure de cadmium
2 <sup>ème</sup> génération	CIGS	les éléments chimiques cuivre, indium, gallium et sélénium)
2 <sup>ème</sup> génération	III-V matériaux	Les cellules solaires multi-jonctions à base de semi-conducteurs
3 <sup>ème</sup> génération	DSSC	cellules solaires à colorant
3 <sup>ème</sup> génération	<u>pérovskite</u>	sont issues de cellules solaires sensibles aux colorants

## I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### A. Avantage

- ✓ Convertir l'énergie solaire gratuite inépuisable directement en électricité
- ✓ sans bruit, pollution et émissions.
- ✓ Maintenance réduite (pas de pièces mobiles ; durée de vie du module = 20 ans).
- ✓ Rentabilité garantie pour les applications de faible puissance (moins de 3-5 kWh/jour).
- ✓ L'installation peut être dimensionnée en fonction des besoins existants et peut être étendue à la demande en fonction de l'augmentation de la demande énergétique.
- ✓ 12 ou 24  $V_{ac}$  réduit le risque de choc électrique et le risque d'incendie est inférieur à l'utilisation de générateurs au kérosène.

### B. Inconvénients

- ✓ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- ✓ La production d'énergie dépend de l'ensoleillement et est toujours variable.
- ✓ L'efficacité de conversion des composants est faible.
- ✓ Lorsque l'électricité doit être stockée par des batteries, le coût des systèmes photovoltaïques augmente.
- ✓ Pollution de fabrication

## I.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

### Cellule idéale - Modèle simple

Comme il a déjà été mentionné, dans une cellule solaire illuminée, il se crée des porteurs de charge libres. Le nombre de ces porteurs de charge est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident. Il en est de même pour le photo courant à l'intérieur de la cellule. Par conséquent, une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la (figure 4). Ce circuit est mis en évidence par l'association en parallèle d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement [19].

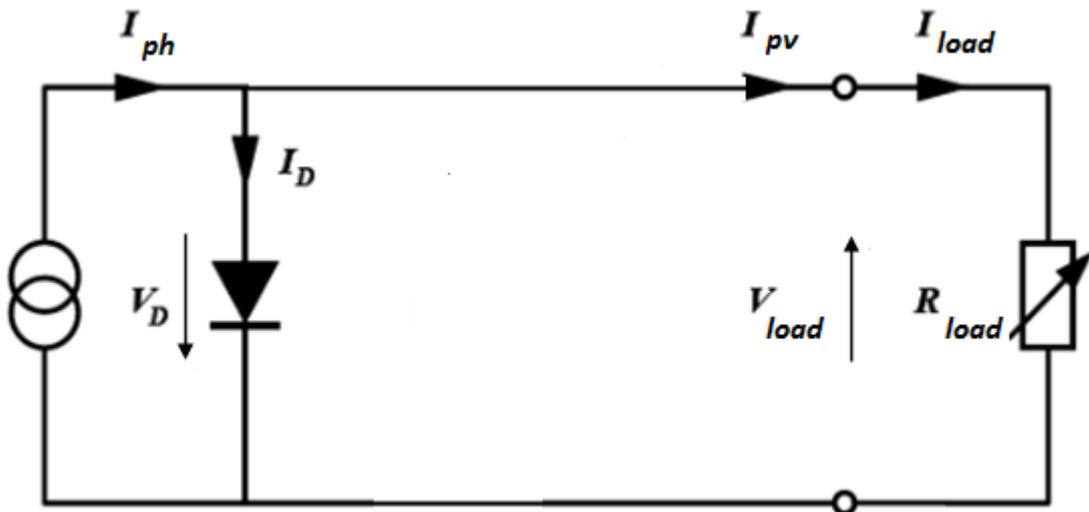


Figure 4: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale.

Le modèle mathématique d'une cellule idéale illuminée est donné par (Loi de Kirchhoff) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q \cdot V_{pv}}{nkT}} - 1 \right)$$

Avec:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} (I_{cc} - K_i (T - T_n))$$

$I_{ph}$ : Photo-courant.

$I_D$ : Courant à travers la diode [A]

**$I_{cell}$** : Courant délivré par la cellule (Courant à travers la charge) [A].

**$V_{cell}$** : Tension aux bornes de la cellule (Tension aux bornes de la charge) [V]

**$q$** : Charge électrique élémentaire [ $1,6 \cdot 10^{-19}$  As].

**$k$** : Constante de Boltzmann [ $1,38 \cdot 10^{-23}$  JK].

**$T$** : Température absolue de la cellule [K]

**$I_s$** : Courant de saturation de la jonction [A]

**$n$** : Facteur d'idéalité de la jonction  $1 < n < 2$

Le courant de saturation  $I_s$  caractérise le phénomène de diffusion des porteurs minoritaires dans la zone de déplétion.

Lorsque les bornes du circuit sont court-circuit ( $R_{load} = 0$ ), la tension de sortie est nulle et, d'après l'équation

$$I_{pv} \Big|_{V_{cell}=0} = I_{cc} = I_{ph}$$

Le courant fourni par la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé courant de court-circuit  $I_{sc}$  (short-circuit)

Pour une charge de résistance infini (circuit ouvert), le courant de sortie est nul et la tension aux bornes de la cellule est maximale. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (open-circuit).

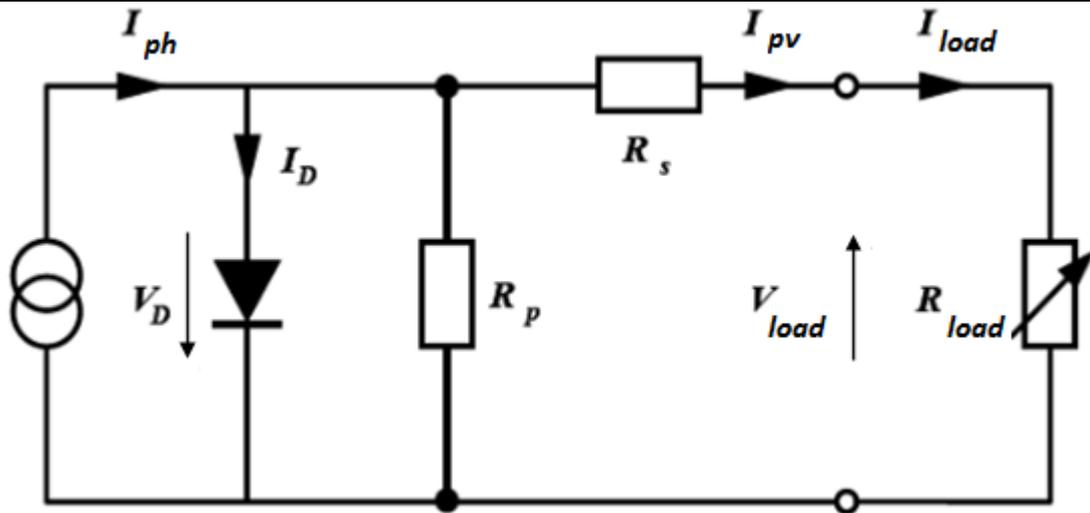
$$V_{pv} \Big|_{I_{cell}=0} = V_{oc} = \frac{nkT}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = V_{th} \cdot \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

$$V_{th} = \frac{nkT}{q}, \text{ est appelée tension thermique.}$$

$V_{oc}$  Est déterminé par les propriétés du semi-conducteur, car il dépend de  $I_s$  qui lui-même dépend de la densité de courant de saturation du matériau utilisé.

### Cellule réelle - Modèle à une diode

En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte [20].



**Figure 5:** Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge.

Avec :

**R<sub>p</sub>** : Résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû au non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

**R<sub>s</sub>** : Résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur.

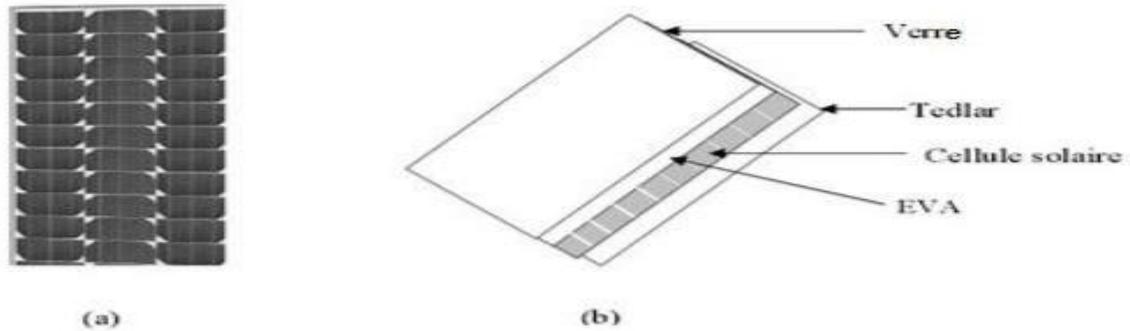
En pratique, la résistance parallèle R<sub>p</sub> est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série R<sub>s</sub> est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms).

Avec un tel circuit électrique équivalent, la loi de Kirchhoff permet d'écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p}$$

## I.10. Module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module Figure (6). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension, la puissance désirée doit être suffisante pour le fonctionnement du système à alimenter. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Vynil-Acétate) Figure (6-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface **arrière d'une ou de polyéthylène**.



**Figure 6:Module photovoltaïque.**

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation assurent les fonctions suivantes :

- ✓ Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- ✓ Protection mécanique et support.
- ✓ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

### I.11. La Protection des cellules PV

Dans ce cadre trois problèmes peuvent être posés à savoir :

- La continuité de la puissance fournie est assurée par des batteries de stockage
- La chute d'énergie peut être compensée par ajout de cellules adjacent avec diode en parallèle ainsi

$$\begin{cases} V_{pv} \geq U_o \Rightarrow \text{diode passante} \Rightarrow \text{cellule est hors service} \\ V_{pv} < U_o \Rightarrow \text{diode bloquée} \Rightarrow \text{cellule est en service} \end{cases}$$

Avec  $U_o$  la tension de seuil de la diode

- Mise en série avec le panneau une diode d'anti-retour afin d'empêcher le l'inversion du courant d'autres panneaux installés en parallèle n'ayant pas reçu un ensoleillement suffisamment [21].

I.12. Résultats de simulation

-Simulation:

Les différentes parties du modèle de la cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink sont établies ci-dessous

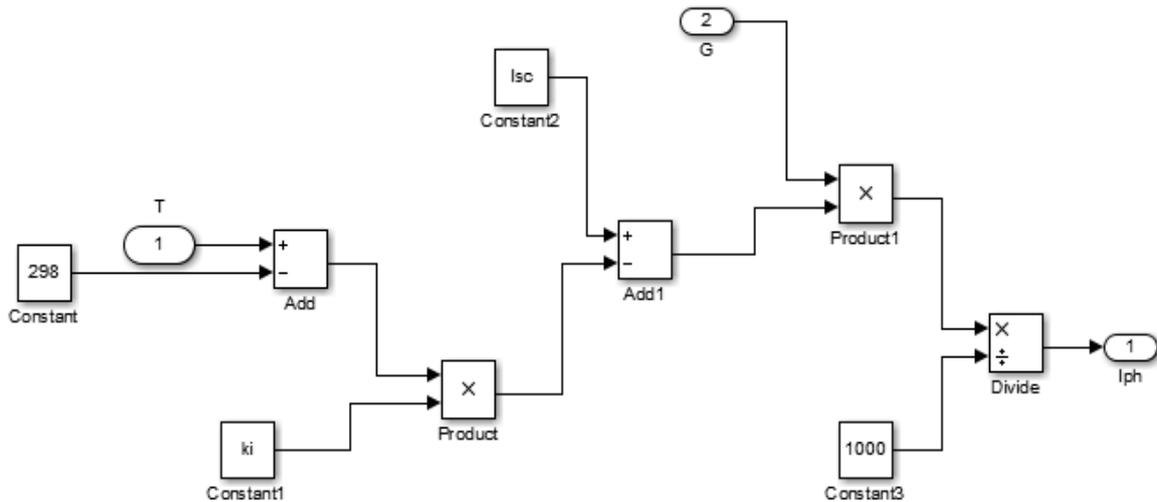


Figure 7:schéma simulink du photo-courant Iph.

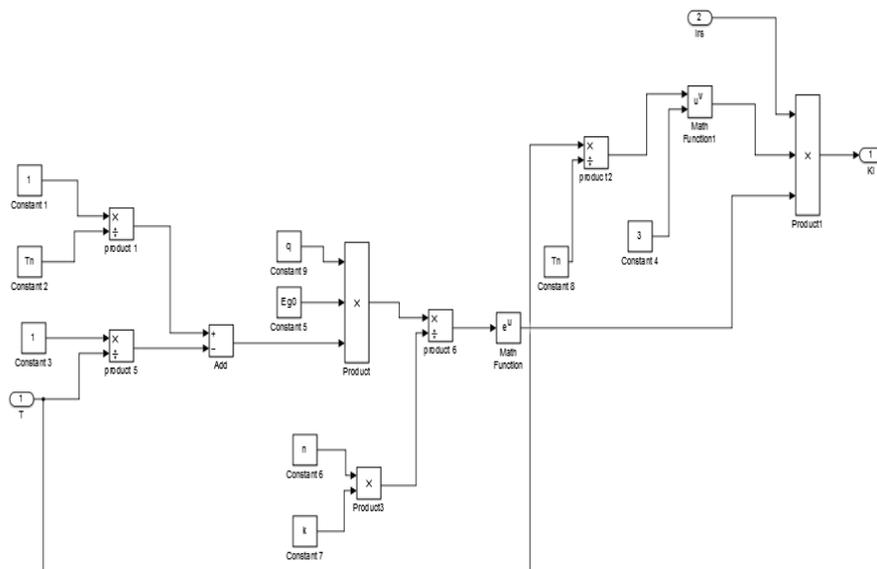


Figure 8:schéma Simulink du courant de saturation.

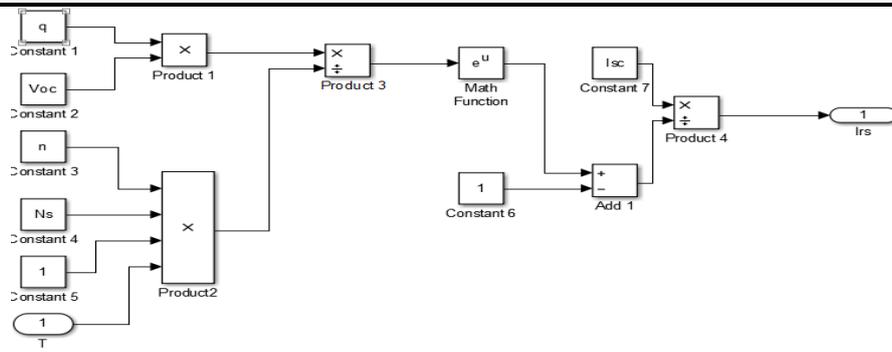


Figure 9:schéma simulink du courant de saturation inverse.

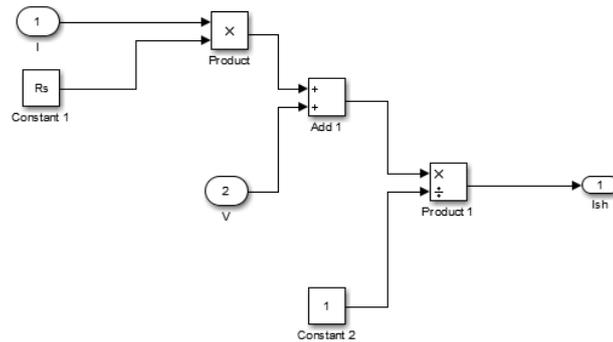


Figure 10:schéma simulink du courant à travers la résistance shunt.

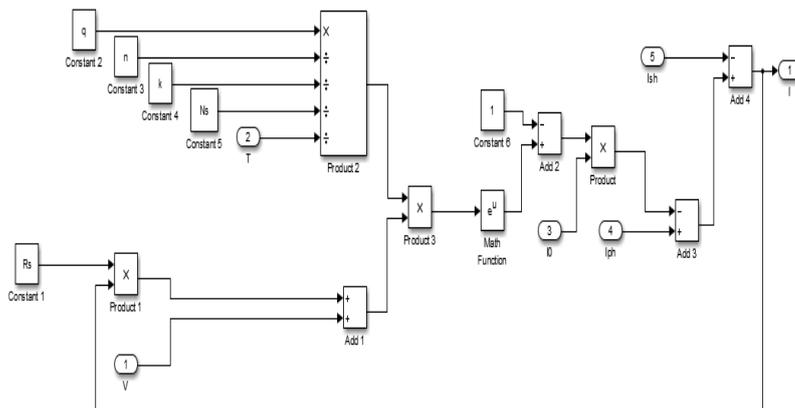


Figure 11:schéma simulink du courant de sortie I.

Enfin le schéma simulink globale est illustré par la figure ci-joint :

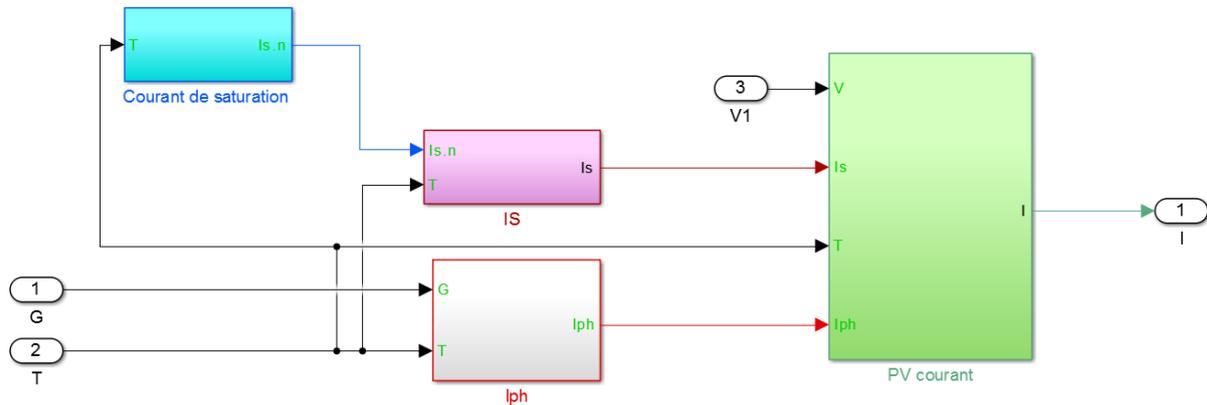


Figure 12:schéma simulink globale de la cellule photovoltaïque.

- **Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque**
  - ✓ **Caractéristiques (courant / tension)**

Les paramètres de la cellule sont introduits dans le tableau ci-dessous, les caractéristiques statiques de la tension et de la puissance en fonction du courant sont présentées pour un fonctionnement nominal STC (Standard Test Condition)  $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $G=1000\text{W.m}^{-2}$ .

Tableau II: le paramètre de la cellule.

Grandeurs	Valeurs
<b>Puissance nominale (Pmp)</b>	190W
<b>Tension a puissance maximale (Vmp)</b>	36.14 V
<b>Courant a puissance maximale (Imp)</b>	5.26 A
<b>Tension en circuit-ouvert Voc(V)</b>	43.66 V
<b>Courant de court-circuit Isc(A)</b>	5.7 A
<b>Nombre de cellule en série (Ns)</b>	72

Nombre de cellule en parallèle (Np)	1
Eclairement	1000 W/m2
Température de la cellule	25C°

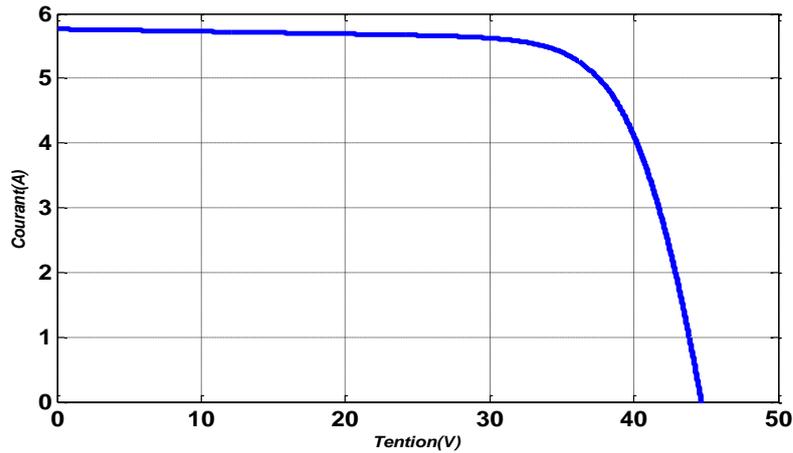


Figure 13:Caractéristique (courant-tension) d'un module photovoltaïque .

✓ Caractéristiques (puissance / tension)

La puissance délivrée par la cellule a pour expression :

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$$

Pour chaque point. On peut calculer la puissance  $P_{pv}$  et tracer la courbe  $P_{pv} = f(V_{pv})$  qui est représentée sur la figure 14 :

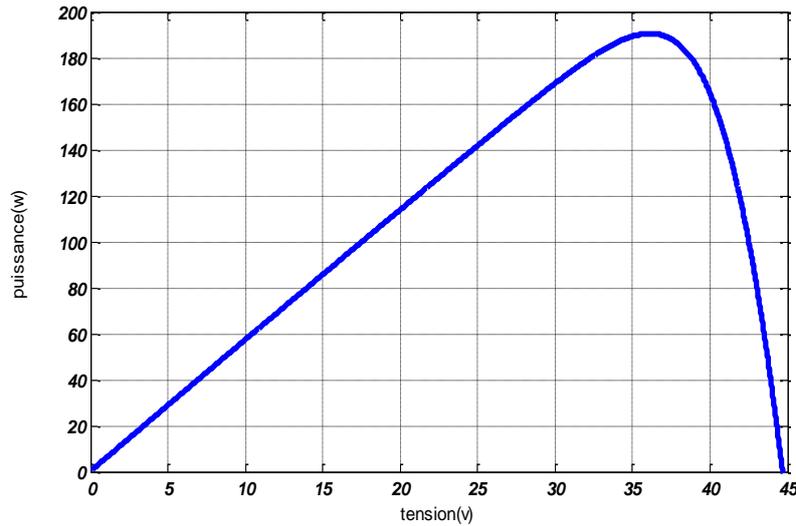


Figure 14:Caractéristique (puissance-tension) d'un module photovoltaïque.

D'après ces caractéristiques en confirme les résultats suivants :

$$V_{\text{cell}}|_{I_{\text{cell}}=0} = V_{\text{oc}} = 43.66\text{V}$$

$$I_{\text{cell}}|_{V_{\text{cell}}=0} = I_{\text{sc}} = 5.7\text{A}$$

**Le point de fonctionnement MPP est :**

$$V_{\text{MPP}} = 36.14\text{ V}$$

$$I_{\text{MPP}} = 5.26\text{ A}$$

$$P_{\text{MPP}} = V_{\text{MPP}} \cdot I_{\text{MPP}} = 36.14 \times 5.26 \approx 190\text{W}$$

#### ✓ Simulation de panneaux à température et éclairement variable

A fin de constater l'influence des conditions extrêmes notamment l'éclairement  $G$  et la température  $T$  sur les caractéristique (I-V) et(P-V), nous avons adoptera méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'clairement, on fixe la température à  $25^{\circ}\text{C}$  et on fait varier l'éclairement.
- Pour un éclairement constant  $G = 1000[\text{W}/\text{m}^2]$  nous ferons varier la température fin de voir l'influence de celle-ci par rapport aux caractéristiques du générateur photovoltaïque.

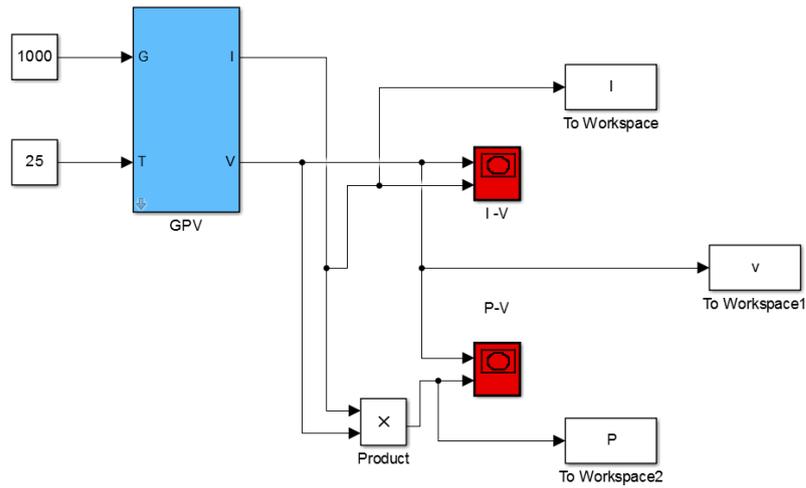


Figure 15: Bloc du modèle réel implémenté sous Matlab Simulink.

**Influence de l'éclairement G**

En changeant la valeur de l'éclairement G de 400 à 1000 pour une température constante 25°C, nous avons obtenu les caractéristiques  $I_{PV} = f(V_{PV})$  et  $P_{PV} = f(V_{PV})$  suivantes :

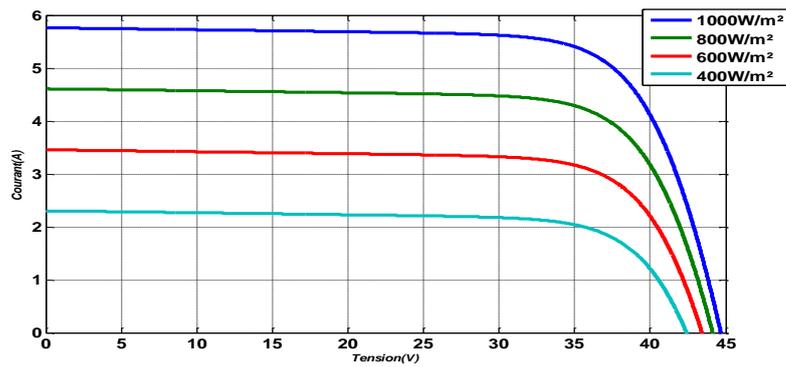


Figure 16: Caractéristique courant-tension pour différents éclairements.

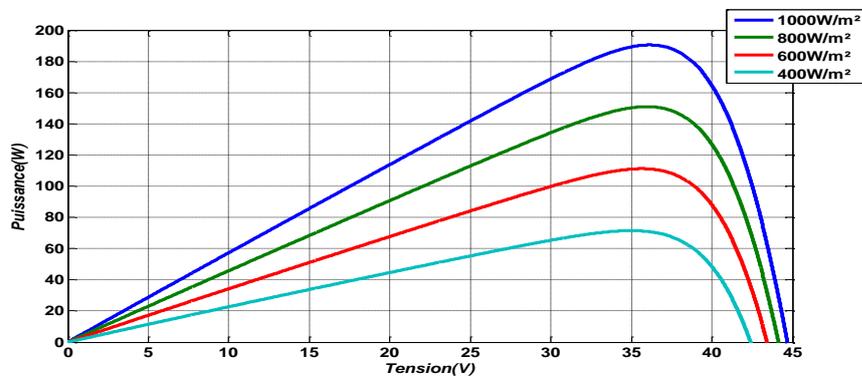
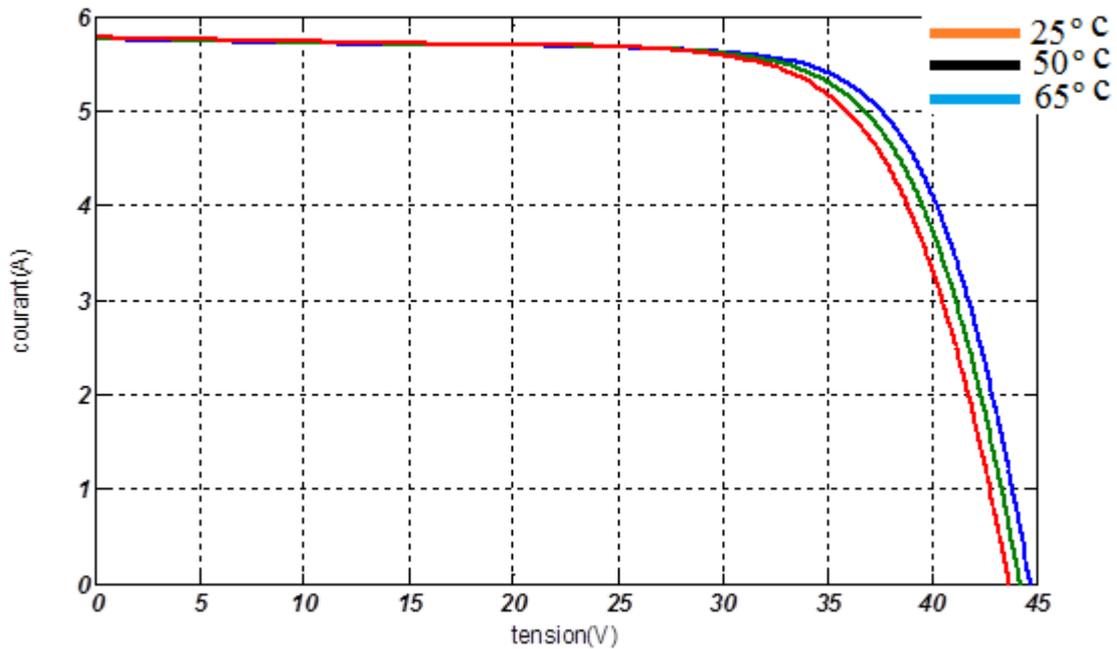


Figure 17: Caractéristique puissance-tension pour différents éclairements.

Par rapport à la caractéristique de tension on voit que La tension à vide  $V_{oc}$  ne change pas beaucoup avec l'ensoleillement Le courant en court-circuit  $I_{sc}$  varie proportionnellement avec l'ensoleillement Par rapport à la caractéristique de puissance on constate que le point MPP varie proportionnellement avec l'ensoleillement

✓ **Influence de la température température  $T_j$**

En changeant la valeur de la température  $T$  de 25 à 65 et avec un éclairement constant  $1000W.m^{-2}$ , nous avons obtenu les caractéristiques  $I_{PV} = f(V_{PV})$  et  $P_{PV} = f(V_{PV})$  suivantes :



**Figure 18:Caractéristique courant-tension pour différents niveaux de températures.**

La température est un paramètre plus important dans le fonctionnement des panneaux photovoltaïques parce que les propriétés électriques sont très sensibles à la température. Les figures 17 et 18 représente la caractéristique courant tension et puissance-tension d'un module photovoltaïque solaire en fonction de la température, à un éclairement constant égale à  $1000[W/m^2]$ .

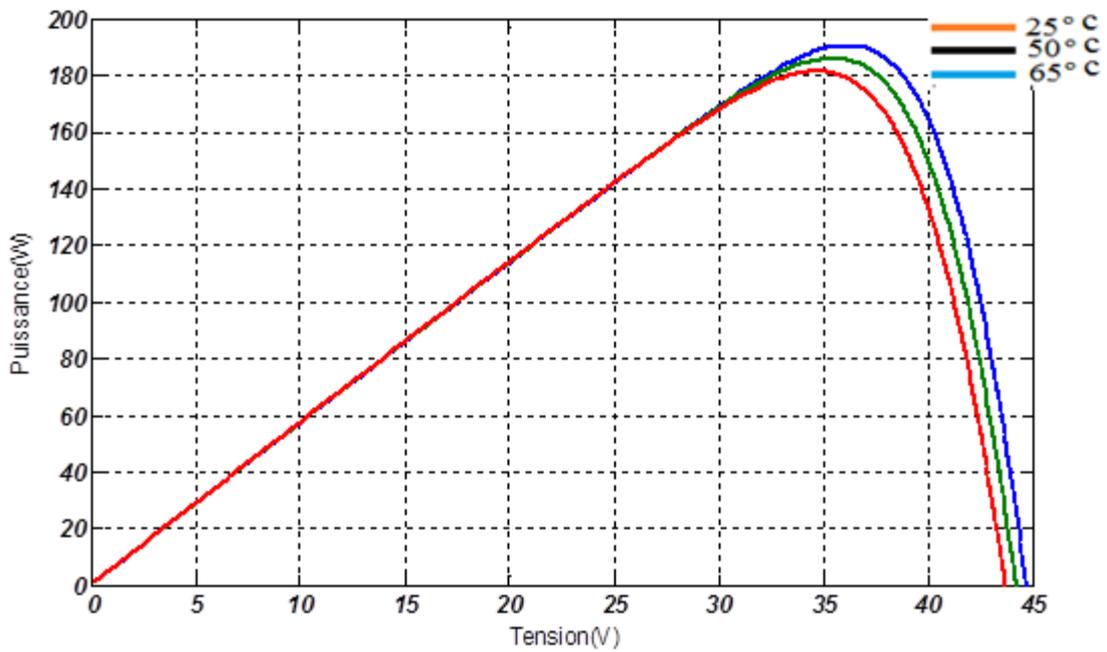


Figure 19:Caractéristique puissance-tension pour différents niveaux de températures.

D'après ces deux caractéristiques la tension à vide ainsi que le point MPPT varient proportionnelement avec la temperature par contre le courant de court circuit est undépendant de la température .

Il faut noter que ces effets sont plus faibles que ceux du à l'éclairement.

**- Influence des résistances série et parallèle**

✓ **Association en série**

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule :

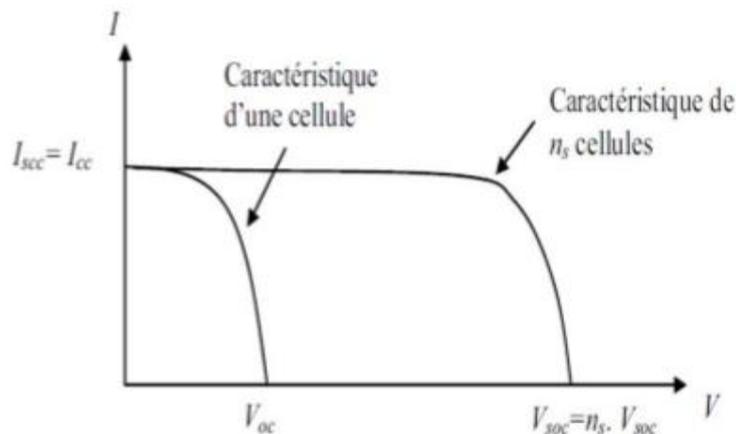


Figure 20:Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.

Lorsque la résistance série est élevée ou que la résistance shunt est faible, Les performances d'une cellule photovoltaïque diminuent davantage. La figure 21 montrée l'influence de  $R_s$  sur la caractéristique I(V). Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la  $R_{sh}$  est liée directement au processus de fabrication, son influence pour de très faibles valeurs de courant. La graphique montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspond à un fonctionnement comme source de courant.

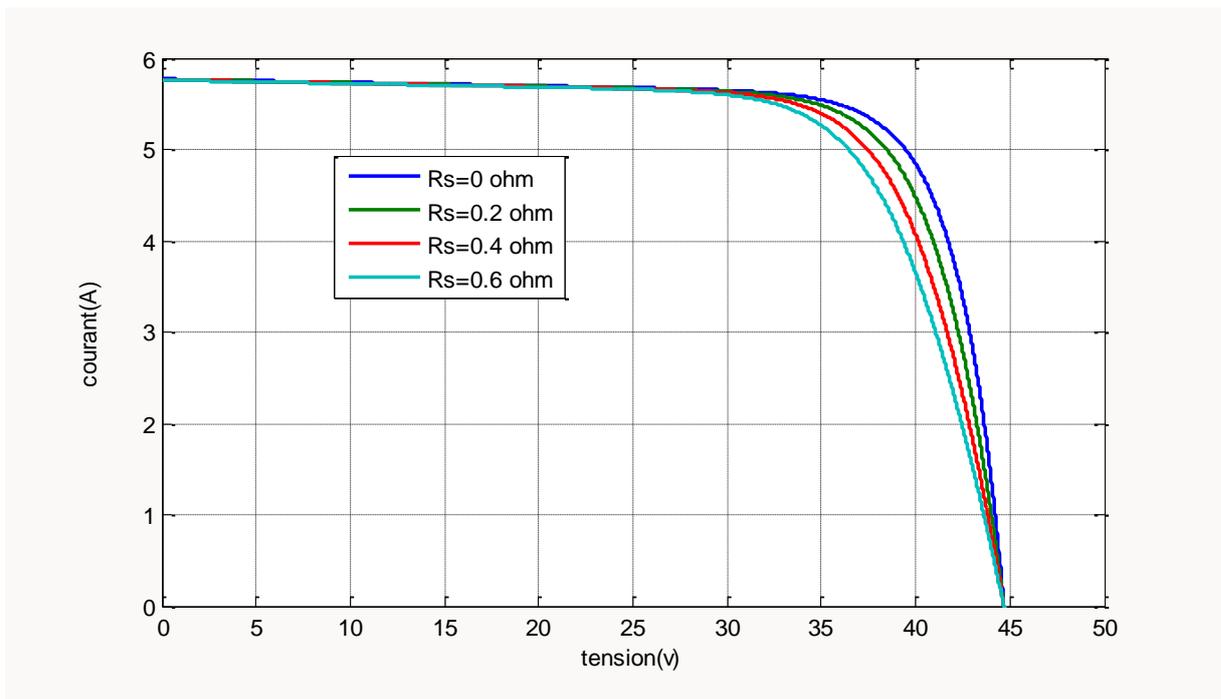


Figure 21: influence la résistance série pour voir le courant.

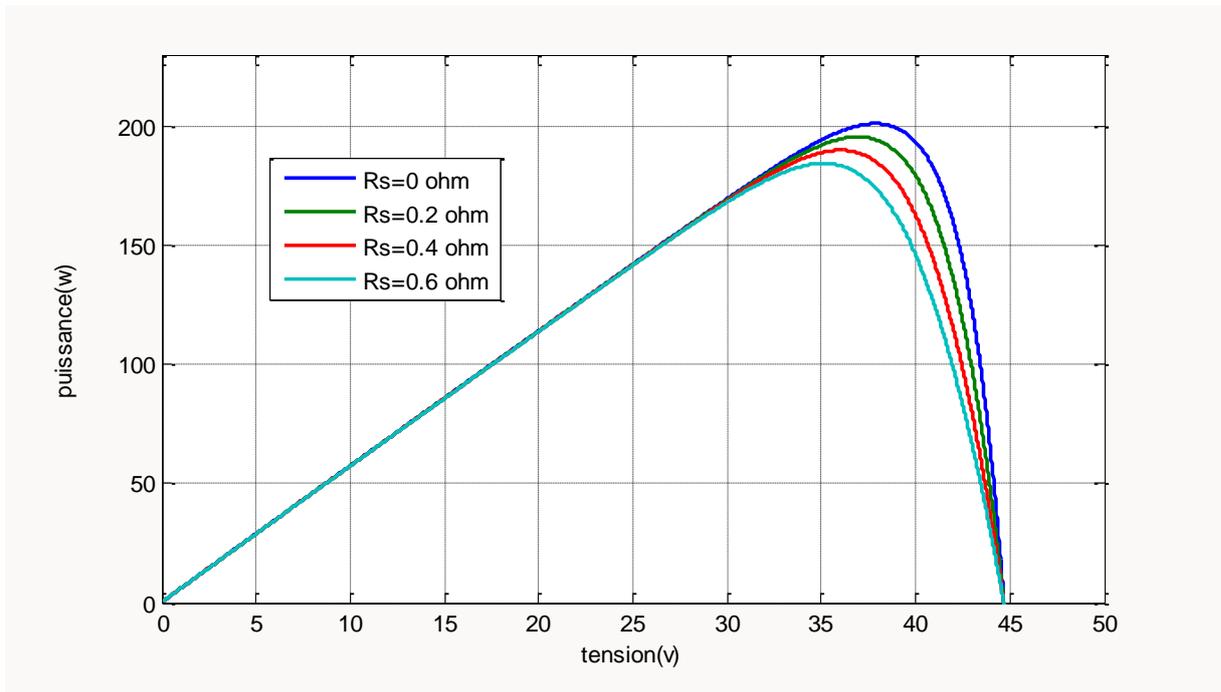
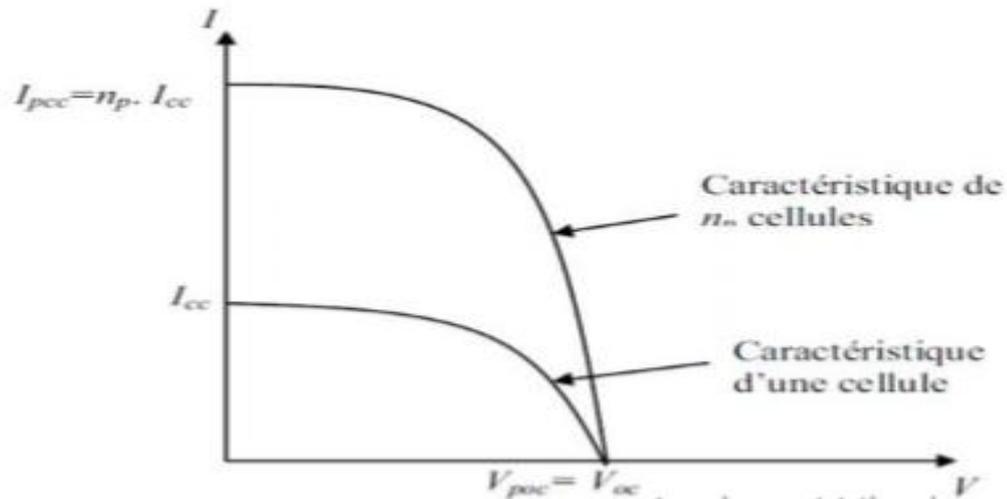


Figure 22: influence la résistance série pour voire la puissance.

## - Association des cellules en parallèle

L'association en parallèle des cellules délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule :

Figure 23: Caractéristique d'un groupement en parallèle de  $n_p$  cellules identiques.

## Conclusion

Nous avons présenté la constitution d'un GPV en passant par le principe de la conversion photovoltaïque et la modélisation d'une cellule solaire. Ensuite, une modélisation du panneau photovoltaïque est faite sous l'environnement Matlab-Simulink. Ce modèle est simple à utiliser surtout lorsqu'on ajoute d'autres étages au système photovoltaïque

Nous avons, par la suite, présenté le comportement électrique du générateur photovoltaïque. En effet, les simulations des caractéristiques principales de ce générateur, à savoir les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, ont bien montré l'influence de la température et de l'ensoleillement sur son comportement électrique.

# Chapitre II

## **Chapitre II. Modélisation et Commande d'un Système Photovoltaïque débitant sur une charge**

### **II.1. Introduction**

Pour développer un circuit équivalent de cellule photovoltaïque précis, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments cellulaires et les caractéristiques électriques de chaque composant. Selon cette idée, plusieurs modèles Il a été proposé de représenter des cellules photovoltaïques. Dans cette section, nous allons essayer de définir un modèle qui fonctionne sur les cellules Photovoltaïque. Le modèle doit rester générique et ses paramètres seront déterminés en bases de données fournies par les fabricants de panneaux. Par conséquent, l'objectif est d'éviter les recours, souvent requis dans le cas d'installations photovoltaïques, dans de nombreuses expériences sont longues et compliquées. Étant donné le peu d'informations fournies, la haute précision est inimaginable pour le constructeur, mais n'importe qui. Ceux qui souhaitent estimer l'intérêt des installations photovoltaïques peuvent utiliser ce modèle, ne nécessitent pas beaucoup de connaissances scientifiques.

Dans ce chapitre nous allons donner tous les éléments d'information concernant la composition d'un système photovoltaïque et son fonctionnement que l'utilisation soit en autonome ou en connexion sur le réseau électrique.

## II.2. Différents topologies

Il existe deux types de systèmes PV, les systèmes autonomes et les systèmes reliés au réseau :

### - Systèmes autonomes

Ce sont des appareils qui fournissent de l'énergie à l'utilisateur sans être connectés à une source d'alimentation. Grille (Figure 24). Dans la plupart des cas, les systèmes autonomes disposent de batterie pour stocker l'énergie. Ils sont généralement utilisés pour alimenter les maisons sur site isolé, îles, montagnes et surveillance à distance et Pompage. Généralement, les systèmes photovoltaïques autonomes sont installés là où ils sont la source La puissance la plus économique.

### - Alimentation directe sans stockage

Dans les systèmes sans stockage, les panneaux photovoltaïques peuvent être couplés directement à la charge via une alimentation directe sans conversion. une fonction Par conséquent, le système est limité à la production et à la consommation [22], c'est-à-dire GPV dépend de l'impédance de la charge connectée (Figure 24). Il y a autant d'avantages que d'inconvénients à cette situation. En effet, le système a des avantages simples et relativement peu nécessaires, très intéressants pour les applications Le besoin énergétique est cohérent avec la présence de lumière [23] (ex. ventilateur). D'autre part, le fait que le panneau soit directement couplé à la charge conduit au surdimensionnement car il faut produire le plus d'énergie possible à faible Lumière du soleil. [22]



**Figure 24: Installation photovoltaïque avec alimentation directe.**

### - Systèmes autonomes avec stockage

Cette configuration (Figure 24) est la plus couramment utilisée dans les systèmes PV autonomes (système autonome) [24], dans laquelle la batterie est utilisée comme stockage d'énergie, de sorte que les appareils alimentés sont connectés à la batterie via un Régulateur.

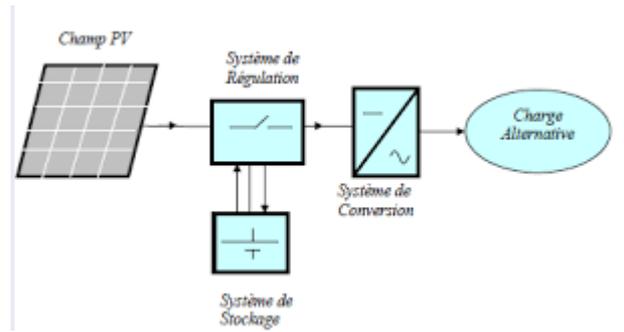


Figure 25: Système photovoltaïque avec stockage [22].

- Systèmes autonomes hybrides

Un système hybride est disposé d'une autre source d'électricité autonome qui vient compléter l'apport photovoltaïque, le plus souvent utilisé est le groupe électrogène (figure 26) [22]. Il peut servir à recharger la batterie en cas de période de manque d'ensoleillement trop prolongée ou de surconsommation. Le mieux est de prévoir un démarrage automatique du groupe en cas de baisse de tension des batteries (préférable à une alarme visuelle ou sonore), car il est impératif d'éviter une décharge profonde des accumulateurs [25].

Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

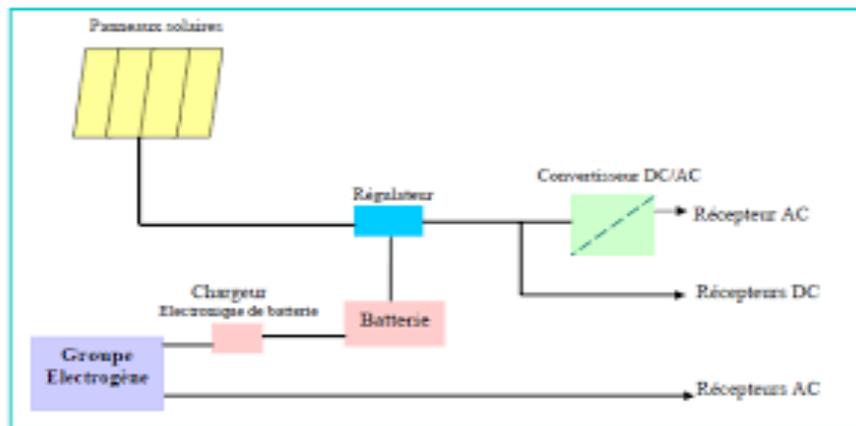


Figure 26: Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque groupe électrogène.

Quelle que soit sa nature autonome ou non, les systèmes photovoltaïques sont un ensemble de composants requis pour alimenter de manière fiable une charge. L'énergie fournie par les modules photovoltaïques est très variable, il faut donc une conversion, un stockage et un contrôle. Ce dernier

---

---

est indispensable pour l'alimentation convenable de la charge et nécessite de convertisseur de puissance intermédiaire.

D'autre part il permet de palier aux fluctuations de puissance solaire fournie qui peuvent endommager les composants ou causer un mauvais fonctionnement de la charge.

### **II.3. Système de stockage**

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques dépend énormément des conditions météorologiques. En général, les composants utilisés pour le stockage dans les systèmes photovoltaïques autonomes sont les batteries [22].

Il existe plusieurs types d'accumulateurs de stockage.

1. Les accumulateurs au plomb (très utilisés).
2. Les accumulateurs au cadmium-nickel (accumulateurs à électrolyte alcalin).

### **II.4. Conversion de puissance**

Un convertisseur d'énergie est un équipement intermédiaire entre le générateur solaire et la charge dans notre cas il s'agit d'une pompe entraîné par un moteur asynchrone d'où la nécessité d'un onduleur dont la commande vectorielle permettant le découplage du flux et du couple. Par ailleurs profiter de point de fonctionnement maximal du panneau solaire nécessite un hacheur dont la commande est assurée par la stratégie MPPT. Il existe différents types d'étage d'adaptation de conversion DC/DC nous citons:

- ✗ Convertisseur BUCK (hacheur série).
- ✗ Convertisseur BOOST (hacheur parallèle).
- ✗ Convertisseur BUCK-BOOST (hacheur série- parallèle).

La topologie BOOST est employée pour les faibles tensions dans les applications PV, en effet elle est utilisée pour augmenter la tension, il est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit donne par la (Figure 27). Il faut noter que :

- La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension).
- la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge).

L'interrupteur K1 on peut être un Thyristor, un IGBT ou un Mosfet.

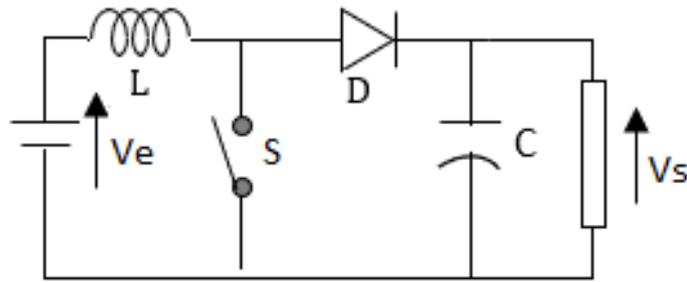


Figure 27:schéma de principe du convertisseur BOOST.

### II.5. Equations de fonctionnement du hacheur BOOST

Déterminer le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/ sortie. La (figure 27) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur survolteur dans les deux cas l'interrupteur fermé pendant  $\alpha T$  et l'interrupteur ouvert pendant  $(1 - \alpha) T$ .

- ✓ Si  $0 \leq t < \alpha T$  l'interrupteur S est ouvert, la diode est passante (figure 28 (b)) : l'inductance est en série avec le générateur, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension qui s'ajoute à celle du condensateur c'est l'effet survolteur.

L'expression de  $V_L$  est alors:

$$V_L = V_e - V_s = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Et le courant a travers la capacité s'écrit :

$$I_c = I_L - I_s = I_L - \frac{V_s}{R}$$

La variation de  $I_L$  durant l'état bloqué sera donc égale à:

$$\Delta I_{Loff} = \int_{\alpha T}^T dI_L = \int_{\alpha T}^T \frac{(V_e - V_s)}{L} dt = \frac{(V_e - V_s)}{L} (1 - \alpha) \cdot T$$

La quantité d'énergie emmagasinée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. Par conséquent, le courant  $I_L$  est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui permet d'écrire:

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_e}{L} \alpha \cdot T + \frac{(V_e - V_s)}{L} (1 - \alpha) \cdot T = 0$$

D'où le rapport entre  $V_e$  et  $V_s$ :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - \alpha}$$

- ✓ Si  $\alpha T \leq t < T$  l'interrupteur S est passant la diode D est bloquée (figure 28 (a)), l'inductance stocke le courant provenant de la source et la capacité maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la (figure 28) L'expression de  $V_e$  est donc :

$$V_e = V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Et le courant a travers la capacité s'écrit :

$$I_c = \frac{V_s}{R}$$

A la fin de l'état passant, le courant  $I_L$  a augmenté de la valeur  $\Delta I_{L\text{on}}$  exprimée par :

$$\Delta I_{L\text{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e}{L} dt = \frac{V_e}{L} \alpha \cdot T$$

$\alpha$  est le rapport cyclique qui représente la fraction de la période T

$$0 < \alpha < 1.$$

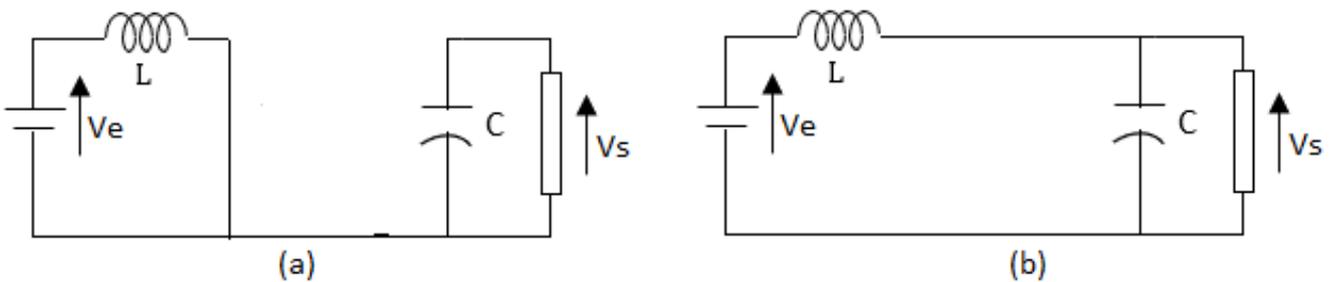
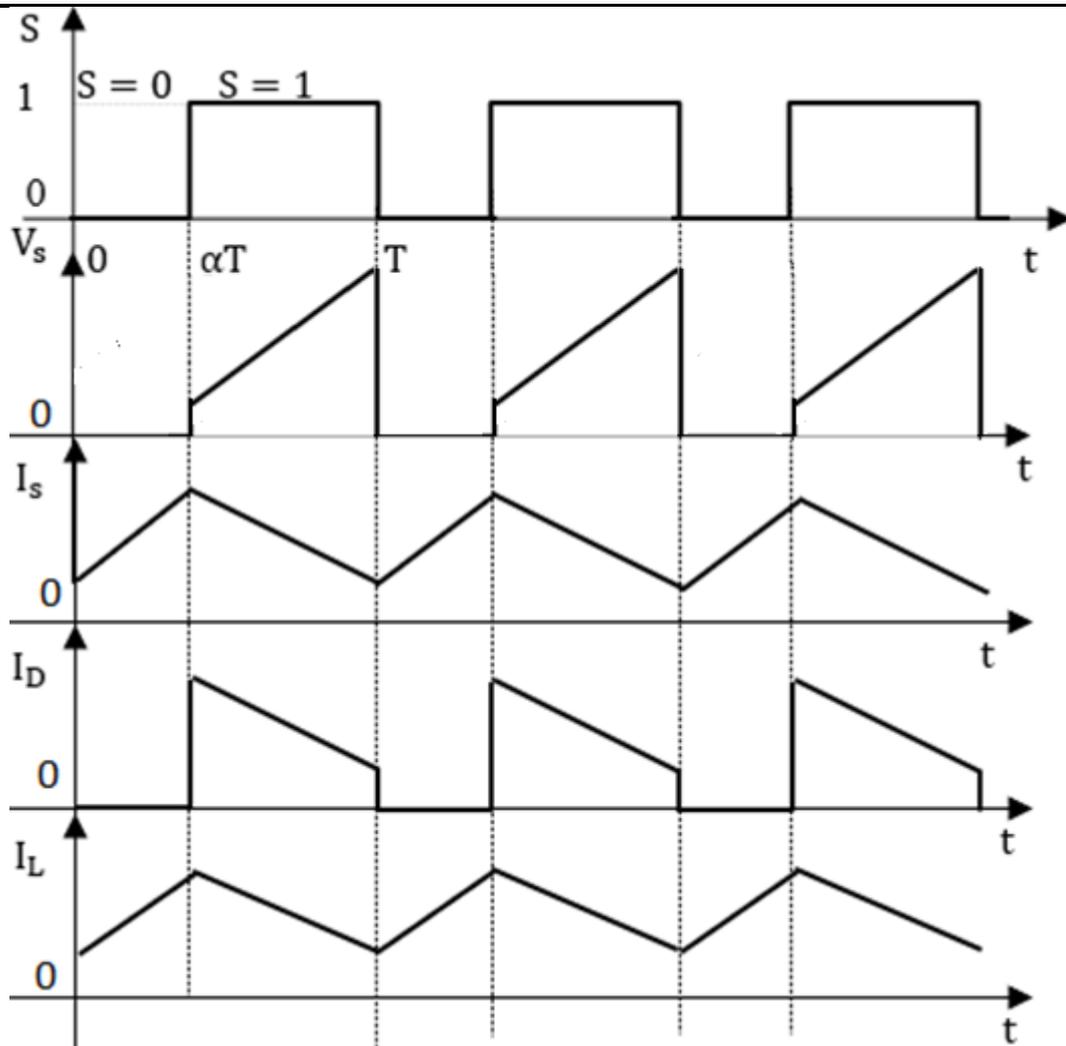


Figure 28: Diagramme BOOST en position 1 et (b) diagramme BOOST en position 2.



**Figure 29: Signaux typiques de convertisseur BOOST.**

Dans un convertisseur bien conçu dans l'état d'équilibre il devrait n'y avoir aucun entraînement significatif sur l'intensité et la tension pendant une période de commutation. Par conséquent, il est supposé que l'ondulation de commutation est beaucoup plus petite que le DC composantes du courant et de la tension. Cela signifie que le courant et la tension sont les mêmes au début et à la fin d'une période de commutation. C'est la petite approximation d'entraînement et il mène aux suivantes expressions de la tension de l'inducteur et le courant condensateur pendant une période de commutation T.

$$\begin{cases} \int_0^T V_L dt = 0 \\ \int_0^T I_c dt = 0 \end{cases}$$

Par conséquent, les expressions de la tension d'inductance et le courant du condensateur dans les deux cas de commutation sont évaluées et considéré sur une période de commutation.

$$I_L = \frac{V_s}{R} = \frac{1}{1 - \alpha}$$

$$V_s = V_e \frac{1}{1 - \alpha}$$

Cependant il est important de dimensionner l'inductance et la capacité pour obtenir les performances données par la figure suivante afin de calculer la valeur de l'inductance.

### II.6. Détermination des paramètres du hacheur Boost

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source  $V_e$ . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

✓ **Calcul de l'inductance L**

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne.

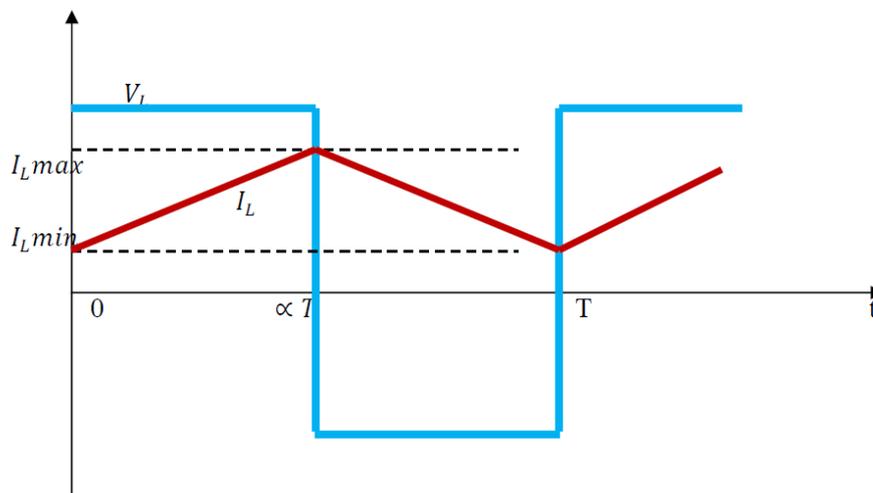


Figure 30: Ondulation du courant.

**Calculons l'ondulation du courant**

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_L = \frac{V_e}{L} + I_L \min$$

En  $t = \alpha T$

$$I_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_L \min = I_L \max$$

D'où

$$\Delta I_L = I_L \max - I_L \min = \frac{V_e}{L f_p} \alpha$$

Or

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha}$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha (1 - \alpha)}{L f_p} V_s$$

Où :

V: tension aux bornes du générateur(V).

$V_s$  : Tension de sortie du convertisseur(V).

T : Période de découpage du signal de l'interrupteur  $T = \frac{1}{f_p}$  en secondes (s).

$I_{L\min}$ : Courant minimum dans l'inductance(A).

$I_{L\max}$  : Courant maximum dans l'inductance(A).

$\Delta I_L$  : Ondulation de courant dans l'inductance(A)

L: Valeur de l'inductance de lissage (H).

$\alpha$  : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur  $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$ .

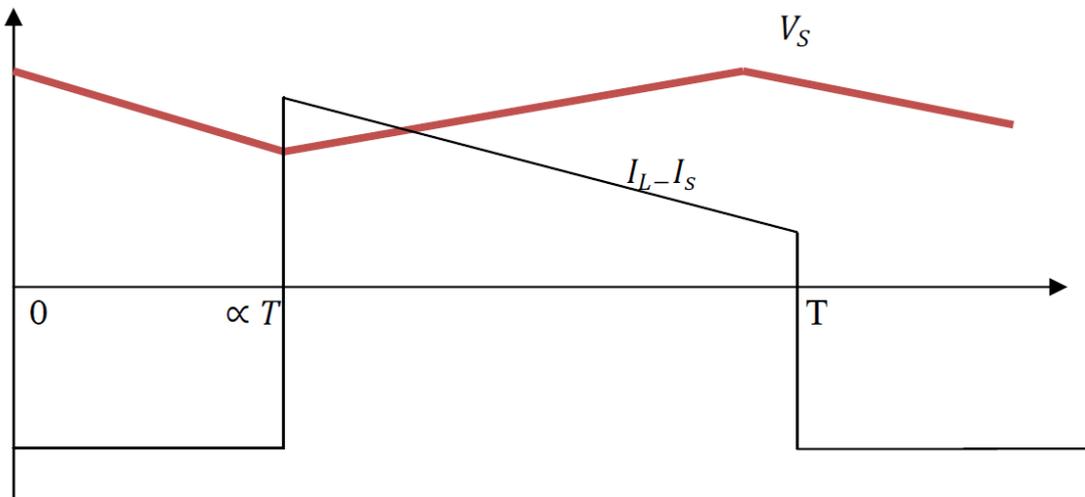
L'ondulation est calculée en fonction de l'ondulation maximale de courant souhaitée L'ondulation maximale de courant est donc donnée par :

$$\Delta I_{L\max} = \frac{V_s}{4L f_p}$$

$$L = \frac{V_s}{4f_p \Delta I_{L\max}}$$

✓ **Calcul du condensateur C**

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance. L'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur.



**Figure 31:ondulation de tension.**

---

**Calculons l'ondulation de la tension**

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_s(t) = V_{s\max} - \frac{I_s}{C} t$$

En  $t = \alpha T$

$$V_s(\alpha T) = V_{s\max} - \frac{I_s}{C} t = V_{s\min}$$

D'où

$$\Delta V_s = V_{s\max} - V_{s\min} = \frac{I_e}{C f_p} \alpha$$

Or

$$I_s = \frac{I_s}{1 - \alpha}$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha(1 - \alpha)}{C f_p}$$

Où :

C: Valeur du condensateur de filtrage (F).

$V_{s\min}$ : Tension minimum aux bornes de condensateur(V).

$V_{s\max}$ : Tension maximum aux bornes de condensateur(V).

$\Delta V_s$ : Ondulation de tension aux bornes de condensateur(V).

La capacité du condensateur est calculée en fonction de l'ondulation maximale de la tension souhaitée.

L'ondulation maximale de tension est obtenue pour un rapport cyclique de  $\frac{1}{2}$  (car  $\frac{d\Delta V_s}{d\alpha} = 0$  pour  $\alpha = \frac{1}{2}$ )

L'ondulation maximale de la tension est donnée par

$$\Delta V_s = \frac{I_L}{4C f_p}$$

Ainsi la capacité minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$C = \frac{I_L}{4f_p \Delta V_s}$$

## II.7. Avantage de convertisseur BOOST

Malgré le rendement élevé du convertisseur BUCK dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur BOOST peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que le convertisseur BUCK. Le convertisseur BOOST est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur BUCK est employé pour abaisser la tension de sortie [26].

## II.8. Simulation du hacheur boost

Pour montrer le rôle des convertisseurs (BOOST) nous avons utilisé logiciel Matlab

Pour la simulation (**Figure 32**) simulation alimentée par une source courant continu .

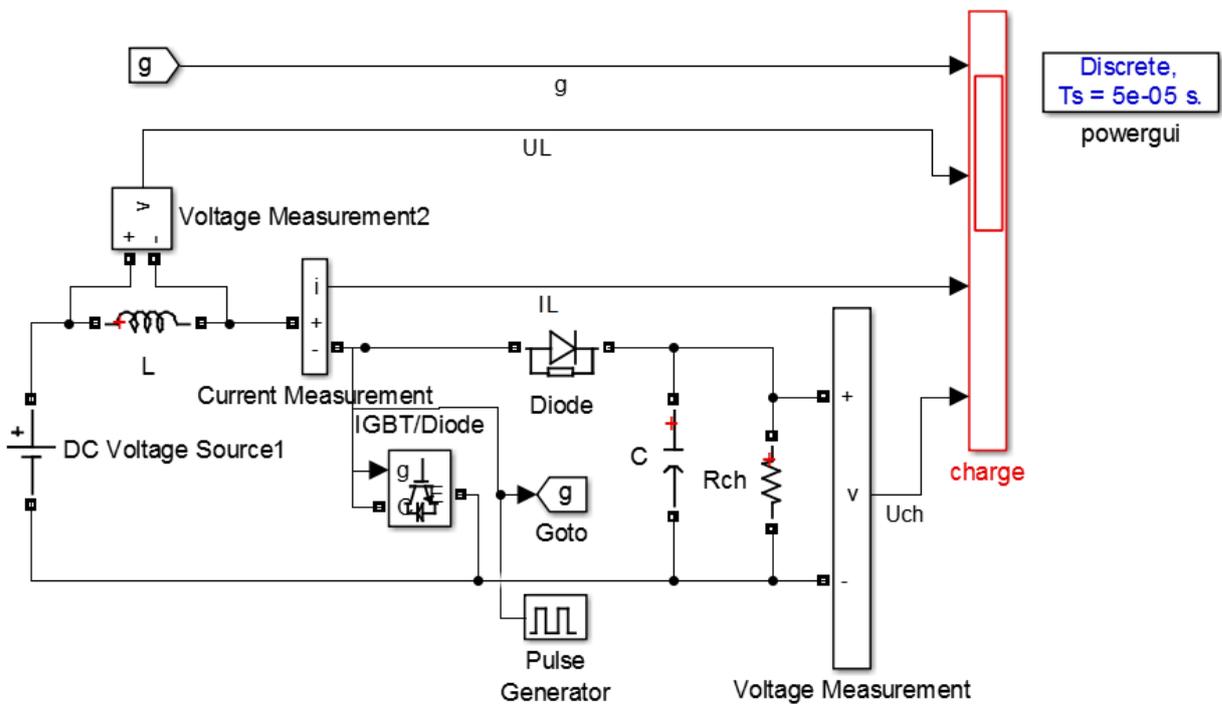
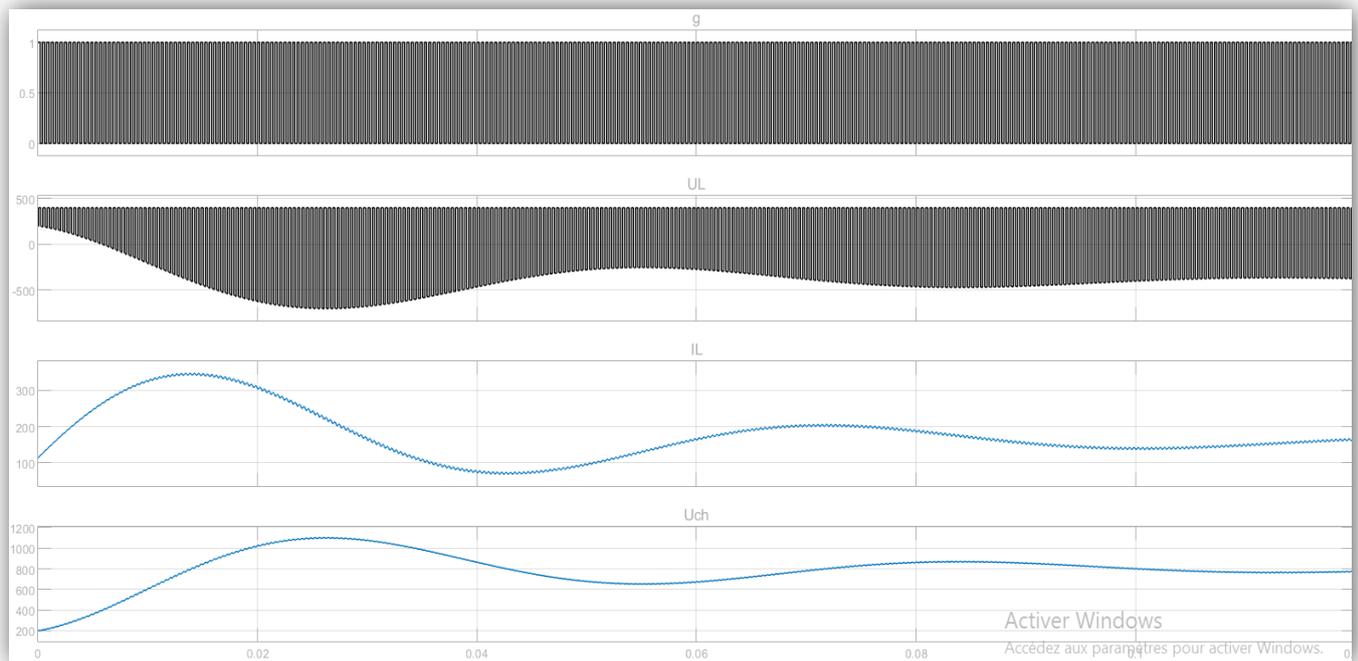


Figure 32:schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur de la (Figure 33).



**Figure 33: les caractéristiques (tension-courant) d'un convertisseur (g, UL, IL et Uch).**

On remarque que la tension de sortie ne pas le même que l'entrée ce qui exprime le rôle de Convertisseur élévateur (BOOST).

On a le dépassement D :

Pour montrer le rôle des convertisseurs (BOOST) nous avons utilisé logiciel Matlab Pour la simulation (Figure 34) simulation d'un boost alimentée par un source de GPV.

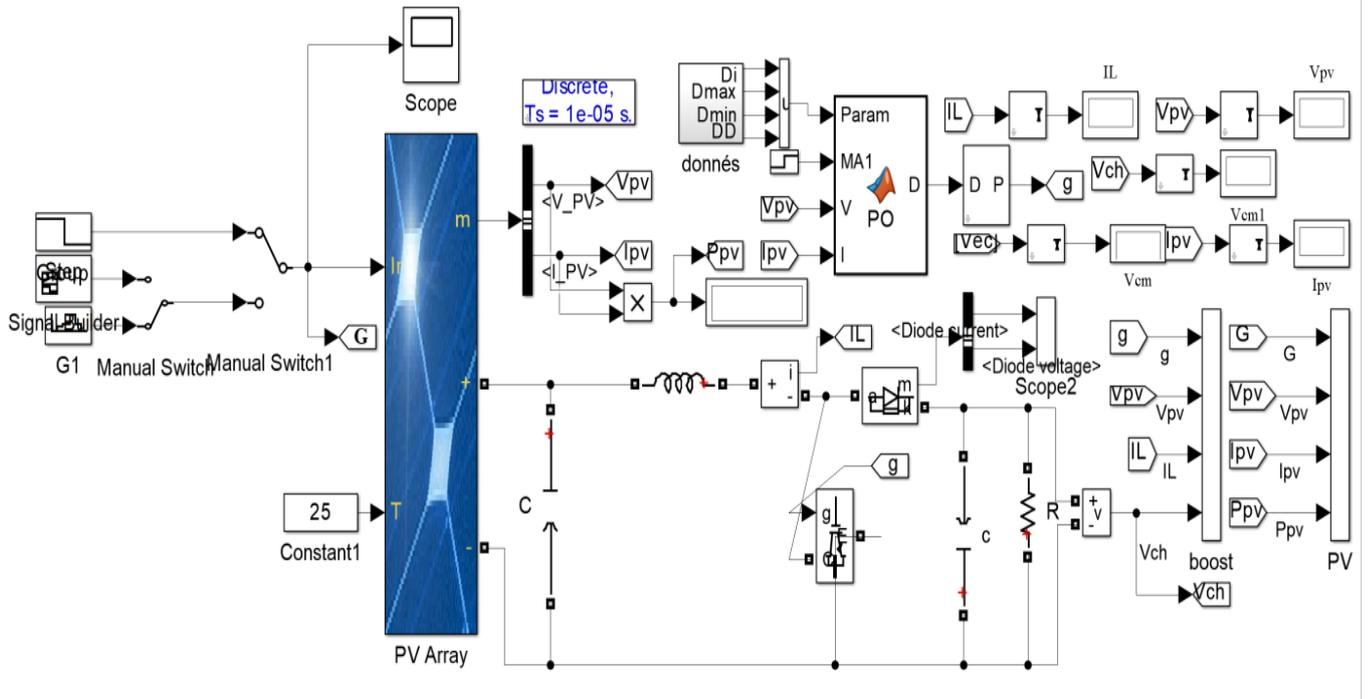


Figure 34: simulation d'un boost alimentée par une source de GPV.

Le résultat de simulation du convertisseur alimenté par panneaux photovoltaïque.

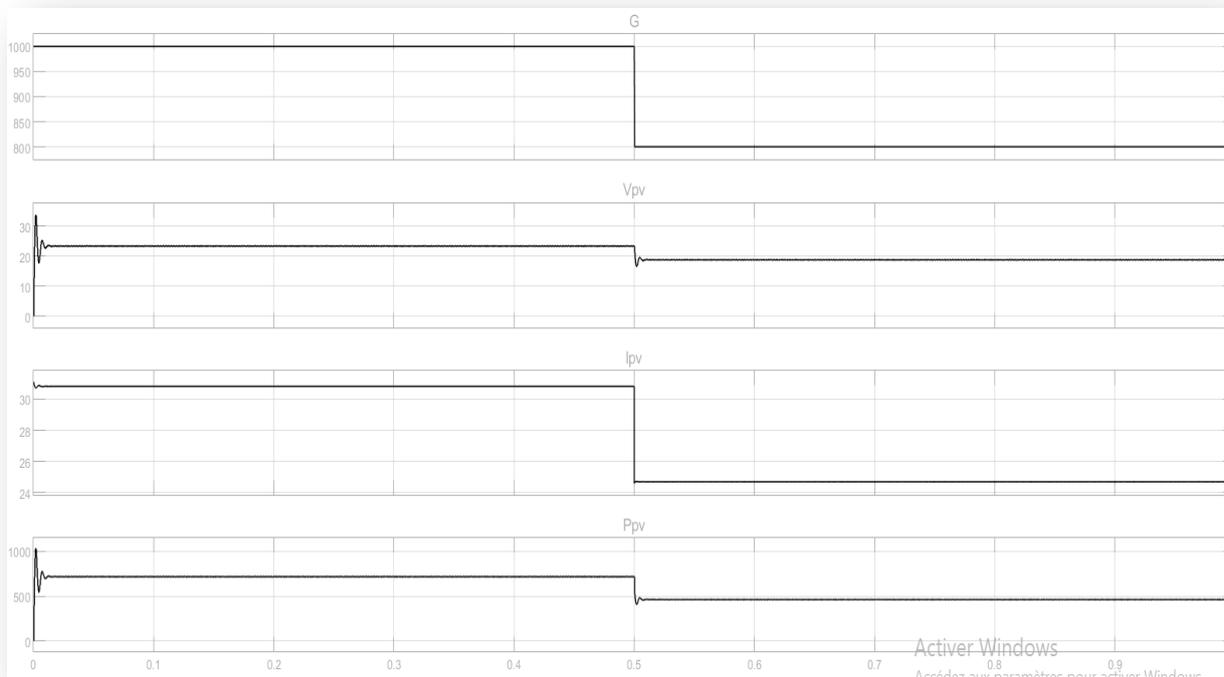


Figure 35: les caractéristiques (tension-courant) d'un panneaux photovoltaïque ( $G$ ,  $V_{pv}$ ,  $I_{pv}$  et  $P_{pv}$ ).

## II.9. Principe de la recherche du point de puissance maximal

### II-1.1 Généralités

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique dépendant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge à chaque instant.

### II-2.1 Couplage avec technique MPPT

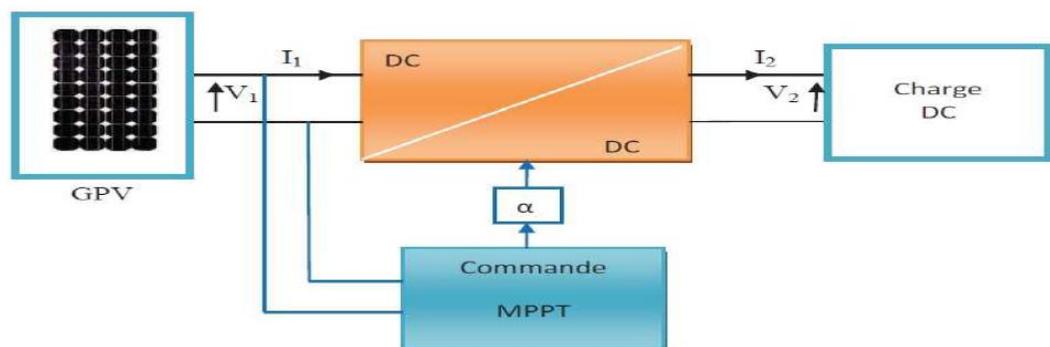
Lors du couplage direct d'une charge à un générateur PV, le point de fonctionnement situé à l'intersection de la caractéristique de la charge et du générateur, n'est pas en général le point de fonctionnement optimal. Ce qui nécessite l'utilisation d'une technique MPPT lorsque la charge présente une mauvaise adaptation. Cette solution consiste à insérer une technique MPPT entre la charge et la source PV de façon à ce que l'impédance d'entrée du technique MPPT coïncide au mieux avec la caractéristique optimale du générateur PV ou demeure dans son voisinage quelles que soient les perturbations. [27]

### II-3.1 La commande MPPT

MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens. [28]

### II-4.1 Principe de la commande MPPT

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ). L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la **Figure 36** [29].



**Figure 36: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque**

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont utilisés ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction conditions climatiques basées sur des méthodes optimales [30].

### II-5.1 Différents types de MPPT

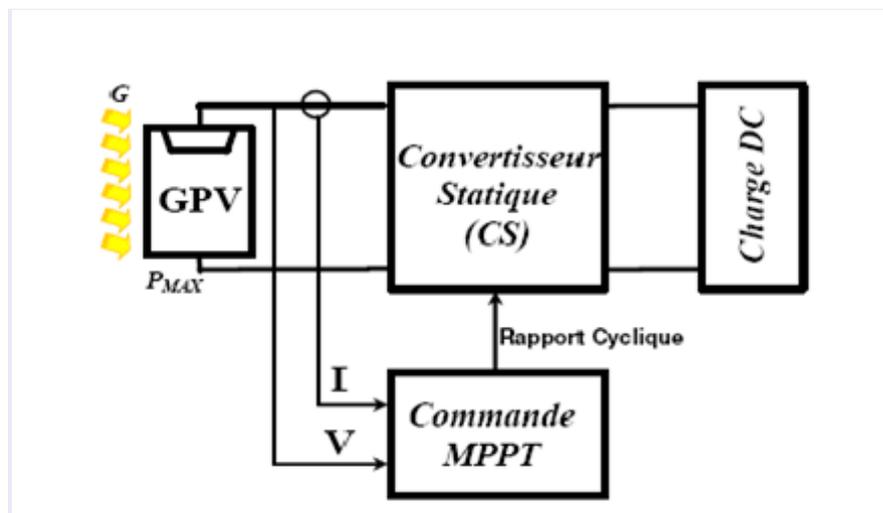
Plusieurs algorithmes pour la poursuite du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking) ont été proposés par les chercheurs et peuvent être présentés en deux catégories [31] :

#### II.9.5.1 Les méthodes directes

La méthode d'ajustement de la courbe, la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur et la méthode de court-circuit.

#### II.9.5.2 Les méthodes indirectes

On retrouve la méthode de l'incrémentation de la conductance, la méthode contre réaction de courant, la méthode contre réaction de tension et la méthode de perturbation et observation (P&O) qui est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cette méthode est basée sur la courbe P-V (la dérivée) en agissant sur le rapport cyclique.



**Figure 37: Schéma du système photovoltaïque avec la commande MPPT.**

#### II.9.5.2.1 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance. (La figure 38) montre que si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du

PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite. De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM.

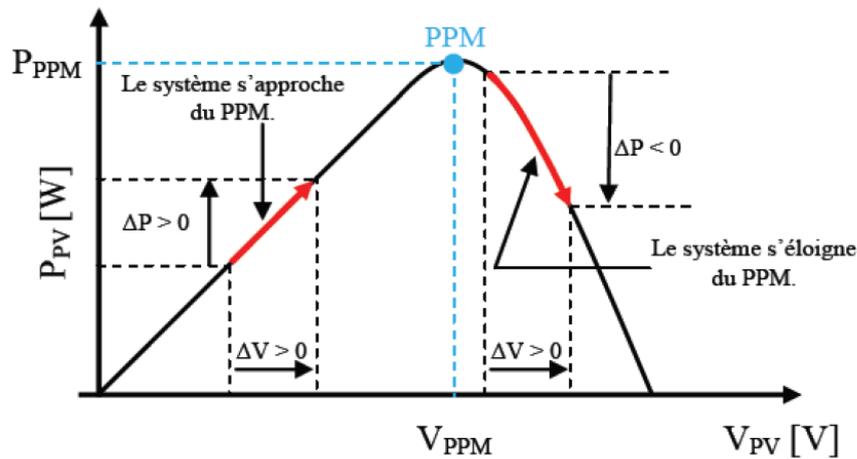


Figure 38:Caractéristique puissance tension d'un panneau photovoltaïque.

La figure 34 illustre l'organigramme de la commande MPPT de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant.

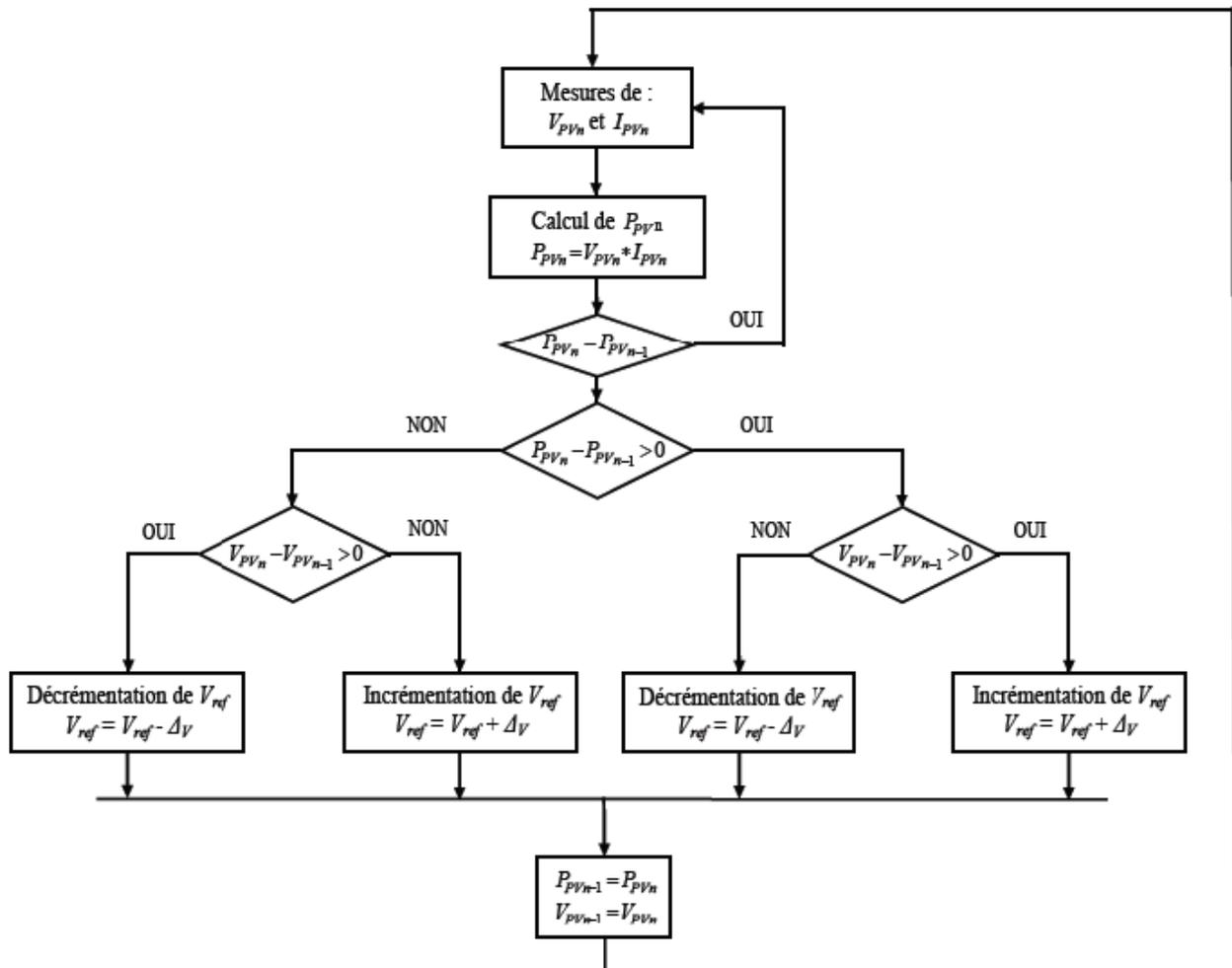


Figure 39:Algorithme de la méthode P&O.

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM.

**II.9.5.2.2 Principe des commandes « Incrément des conductances » (IncCond)**

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$$

La caractéristique puissance tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si  $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si  $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si  $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ , le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

En utilisant la relation, la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme

$$\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} - I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$$

On peut donc avoir d'autres conditions sur la variation de la conductance :

- Si  $I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ , le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si  $I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ , le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si  $I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ , le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de la conductance  $\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  avec celle de l'incrément de conductance  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$  (La figure 40) montre l'algorithme de cette méthode, où Vr représente la tension de référence.

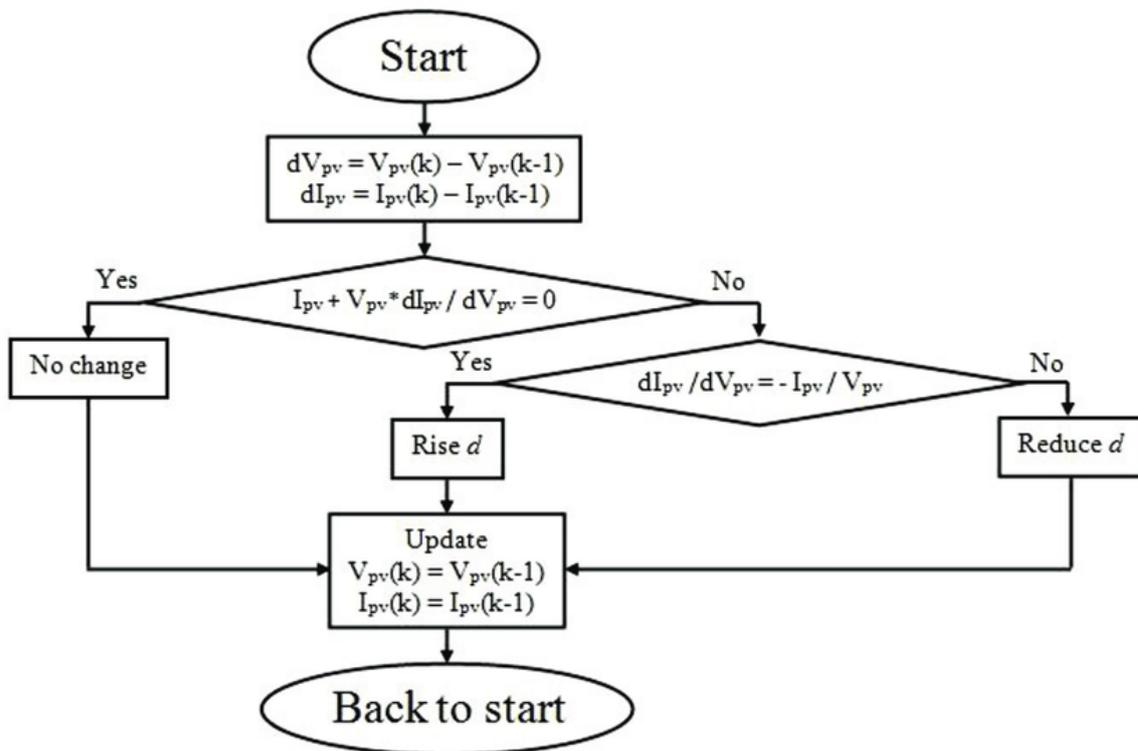
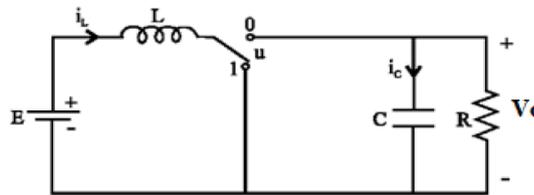


Figure 40: Algorithme de la méthode Incrément de conductance.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition  $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

La topologie de base d'un convertisseur DC-DC boost est donnée par (la figure 41)



**Figure 41: Structure d'un convertisseur boost.**

Le modèle mathématique du convertisseur boost peut être déduit en appliquant la loi de Kirschhoff dans le cas où l'interrupteur est passant ou bloqué. Le modèle de ce type de convertisseur en mode de conduction continu est :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} - (1 - u) \frac{V_o}{L} & (1) \\ \frac{dV_o}{dt} = (1 - u) \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} & (2) \end{cases}$$

Où  $u$  est l'état de commutation ou le rapport cyclique de commutation,  $V_o$  et  $i_L$  sont respectivement la tension de sortie et le courant dans l'inductance du convertisseur. Dans la méthode de contrôle par mode de glissement, généralement  $u$  est déterminée de la façon suivante :

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } S < 0 \\ 0 & \text{si } S > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Où  $S$  est la surface de glissement.

Prenant  $X_1 = i_L$  et  $X_2 = V_o$  comme états des systèmes et en utilisant les équations d'état indiquées dans les équations (1) et (2). L'objectif ici est d'atteindre la valeur de la tension de sortie désirée  $V_{o\text{ref}}$ . Ainsi :

$$X_2 = V_{o\text{ref}}$$

A partir de la théorie de la commande par mode de glissement générale, l'erreur de la variable d'état, définie par la différence de la valeur de référence, forme la fonction de glissement :

$$S = X_1 - X_{1\text{ref}} = 0$$

Cela signifie que le contrôle oblige le système à évoluer sur la surface de glissement. pour remplir cette condition, le signal de commande du commutateur est :

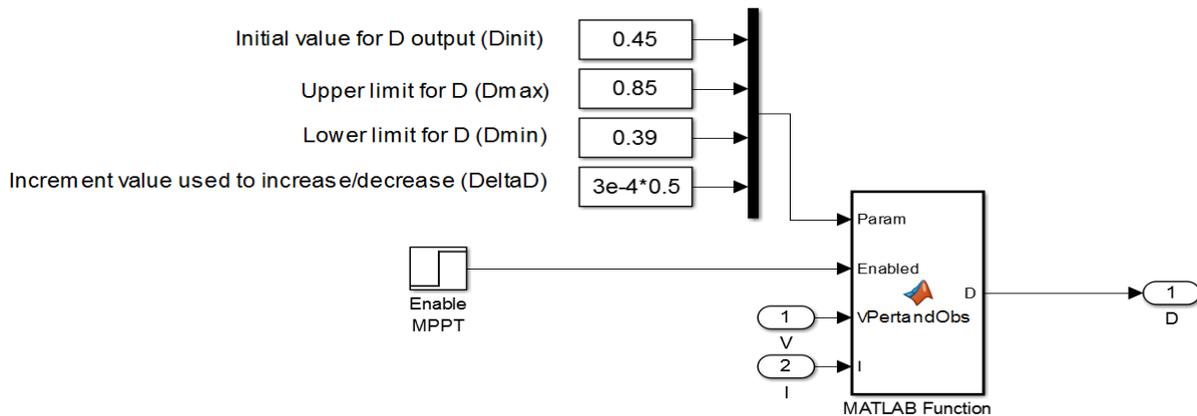
$$u = \frac{1}{2}(1 - \text{sing}(S))$$

---

**Le bloc de Simulation de l'algorithme perturbation et observation**

**(P&O) :**

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O (**Figure 39**) :



**Figure 42:schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).**

## II.10. Le convertisseur continu- alternatif

. C'est un appareil qui convertit le courant continu en courant alternatif. Cette formation de l'onde de sortie peut être garantie par un convertisseur statique (onduleur). Appareils utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présentée, dans le cas le plus simple, est un carré, avec des pertes à vide considérables dû aux harmoniques surtout pour les faibles puissances

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). [33]

II-1.1 Simulation de MLI et convertisseur DC-DC

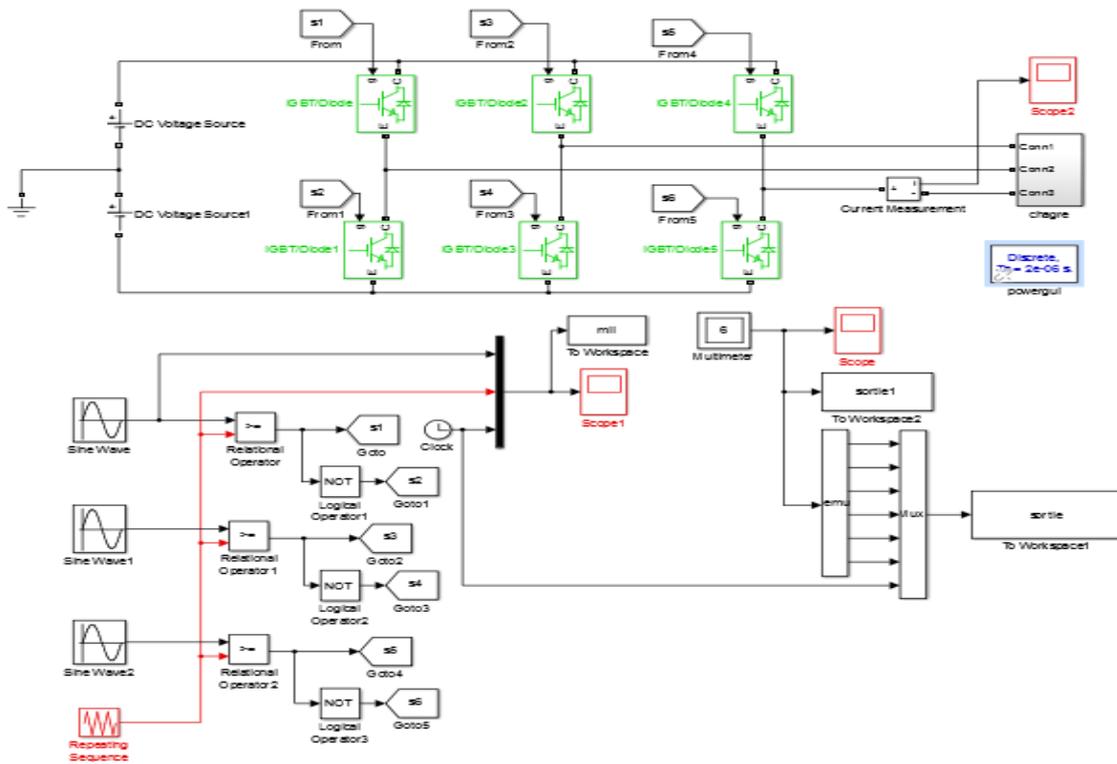


Figure 43:schémas bloc de MLI et convertisseur DC-DC.

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur est obtenu à L'aide du modèle mathématique sous Matlab/Simulink, **Figure 39**.

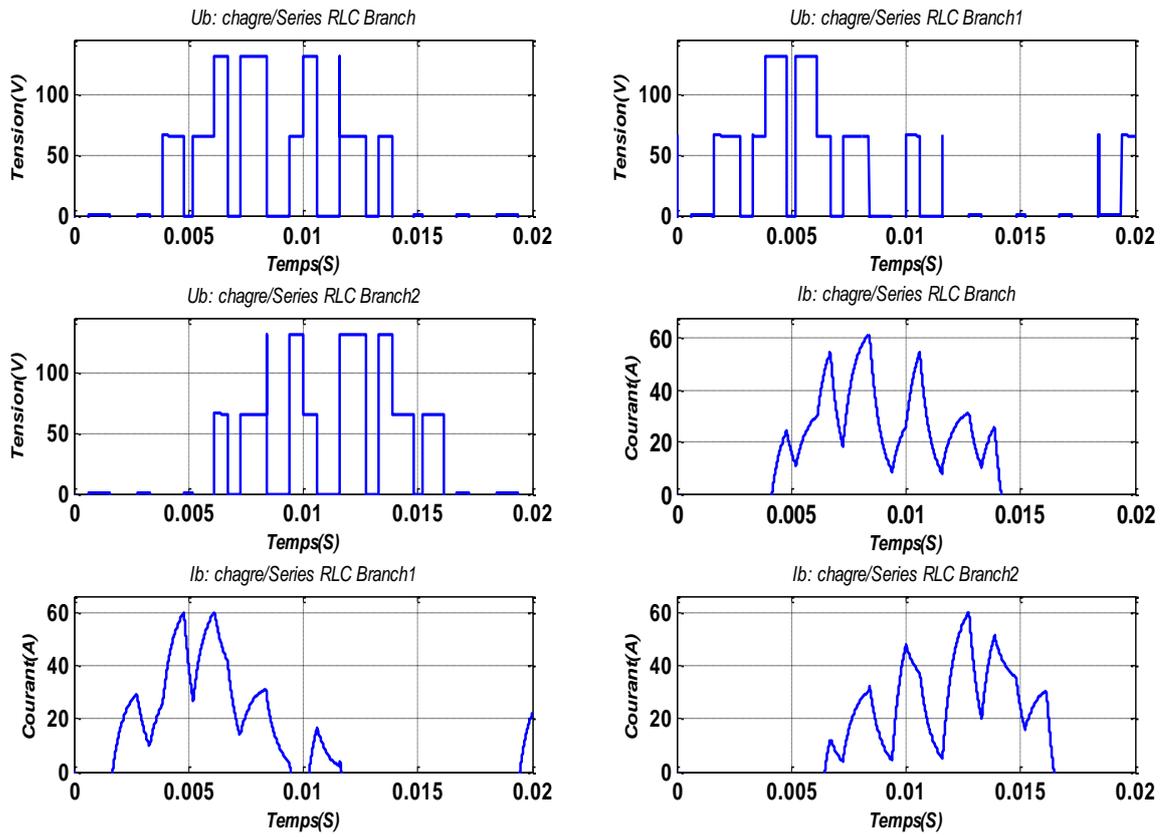


Figure 44:les Tension et Courant de charge RCL.

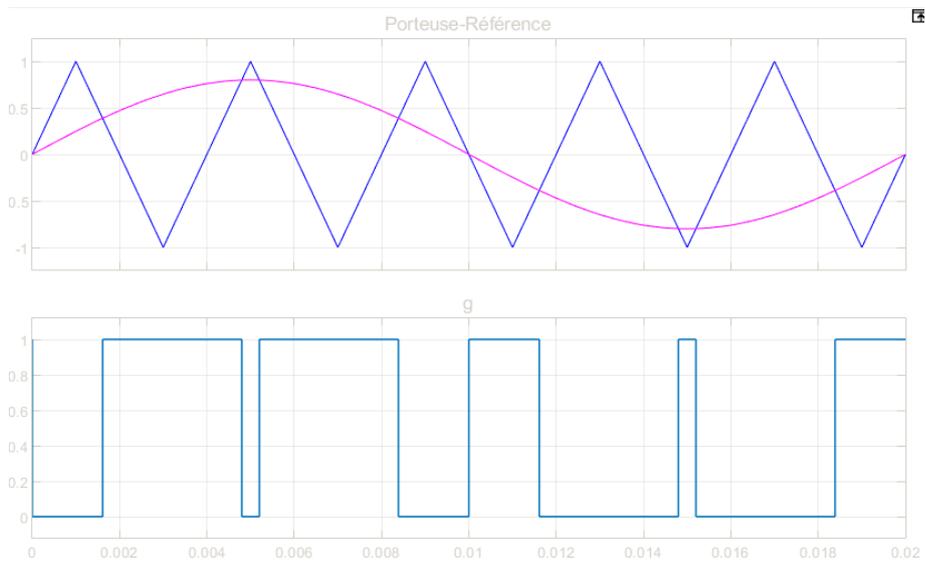


Figure 45:les graphes du MLI.

---

---

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents composants d'un système photovoltaïque : système de régulation (régulateur, charge solaire), de stockage et d'un système de conversion, et la charge. On présentera une étude sur le convertisseur DC-DC (Hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance maximale. La caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque n'est pas linéaire. Il existe un MPP (Maximum power point) où la puissance est maximale. On utilise des convertisseurs DC-DC qui font la poursuite de ce point (MPP) afin de délivrer le plus de puissance possible.

A l'aide de deux méthodes (Méthode d'incrémentatation de la conductance et Méthode de perturbation et d'observation) et Dans une boucle, l'algorithme mesure la tension et le courant du générateur pour calculer la puissance fournie.

Et on a fait l'étude d'un convertisseur DC-DC de type BOOST et aussi on a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation. Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Et nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC). Nous avons montré par simulation que la valeur de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique. Et nous avons montrés le principe des commandes MPPT de type *P&O*. Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost) et la commande MPPT de type *P&O* pour le but d'utiliser dans le chapitre suivante...

# Chapitre III

## Chapitre III. Modélisation du système Moto-pompe

### III.1. Introduction

Un système de pompage photovoltaïque est composé :

- ✓ D'un générateur photovoltaïque GPV produisant la puissance électrique en courant continu.
- ✓ D'un groupe moto – pompe composé d'un moteur d'entraînement à courant continu ou à courant alternatifs (synchrone ou asynchrone), fournissant une puissance mécanique  $C_m \Omega$  ( $C_m$  le couple moteur en N.m et  $\Omega$  la vitesse de rotation en  $\text{tr.mn}^{-1}$ ) et d'une turbine hydraulique fournissant une puissance hydraulique en  $\text{l.mn}^{-1}$
- ✓ D'un convertisseur statique placé entre le GPV et le groupe moto – pompe permettant l'adaptation et le contrôle de puissance électrique.

La topologie du convertisseur statique diffère d'une part selon le moteur d'entraînement du groupe et d'autre part selon le type de contrôle choisi à savoir un convertisseur DC-DC à la sortie du GPV s'impose pour l'optimisation de la puissance du générateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) Aussi le pompage utilisant un moteur à courant alternatif nécessite un onduleur pour la commande du couple et de la vitesse afin d'atteindre les performances électromécaniques d'un moteur à courant continu sachant que ce dernier est une option attrayante en raison de sa performance et sa simplicité, mais la présence de collecteur - balais a toujours été le point faible du à la commutation en effet ceci limite le courant absorbé et donc sa puissance fournie de plus son entretien régulier (1000 heures pour un fonctionnement nominal) s'impose [34].

### III.2. Moteur d'entraînement

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des machines électriques fonctionnent grâce au magnétisme, il existe deux types de moteurs : à courants continu et alternatif.

- Le moteur à courant continu utilisé dans le pompage solaire est un moteur à excitation série, il présente un couple de démarrage élevé suffisant pour vaincre la résistance de démarrage de il s'adapte bien aux variations du courant dû à la variation de l'ensoleillement. Le couplage avec le générateur solaire est assuré par un hacheur intermédiaire qui adapte sa puissance absorbée par la commande du rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique

relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais, il est utilisé particulièrement pour le pompage dans les puits ouverts.

- Le moteur alternatif synchrone à aimant permanent ou asynchrone à cage sont les plus couramment employés soit pour le pompage immergé dans les forages ou les puits ouverts.

Le couplage avec le générateur solaire est assuré par un convertisseur à deux étages composé d'un hacheur suivi d'un onduleur. L'utilisation d'un tels moteur nécessite un faible entretien et un coût également plus faible par contre l'ajout d'un onduleur augmente son coût et exige une commande du convertisseur statique plus complexe [35]. Dans notre cas nous avons choisi un pompage basé sur un moteur asynchrone à cage.

### III.3. Modèle mathématique de la MAS et Rendement

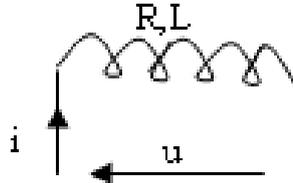
Les moteurs asynchrones associés à des convertisseurs statiques constituent un variateur de vitesse de plus en plus important pour une utilisation industrielle. Cet intérêt est suscité d'une part par les propriétés des moteurs à induction : faible coût d'achat, puissance élevée, maintenance simplifiée et robustesse mécanique, d'autre part le développement de l'électronique de puissance qui repose à fois sur l'avancé technologique des convertisseurs statiques et au système de commande en temps réel associé la synthèse de la commande exige une modélisation du processus moteur-convertisseur ainsi l'étude du comportement dynamique du moteur serait très compliquée si on voulait prendre en compte tous les phénomènes physiques qui interviennent dans son fonctionnement pour cela on adopte des hypothèses simplificatrices tels que:

- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme et l'effet d'entaille est négligeable
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis, les courants de Foucault et les effets de peau sont négligeables
- les relations entre les grandeurs d'entrées et de sortie du moteur sont linéaires ou peuvent être linéarités
- Les résistances des bobinages statorique et rotorique sont constantes et indépendantes de la température
- Les grandeurs électromagnétiques (courant, tension, flux) ont une répartition sinusoïdale dans l'entrefer, il y a une symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements

- L'effet d'encochage est négligé

Par ailleurs deux lois fondamentales permettent de décrire le fonctionnement dynamique des moteurs électriques :

- **Loi de Faraday** permettant de la modélisation de la partie électrique du moteur, Rappels Soit une bobine soumise à une tension  $u$  et traversée par le courant  $i$ , la tension à ses bornes s'écrit :



$$\begin{cases} U = RI + \frac{d\Phi_t}{dt} \\ \Phi_t = \Phi_p + \Phi_c = LI + \Phi_c \end{cases}$$

Avec

$\Phi_p, \Phi_c$  : Sont respectivement les flux propres et de couplage

- **Loi des masses tournantes** permettant de la modélisation de la partie mécanique du moteur :

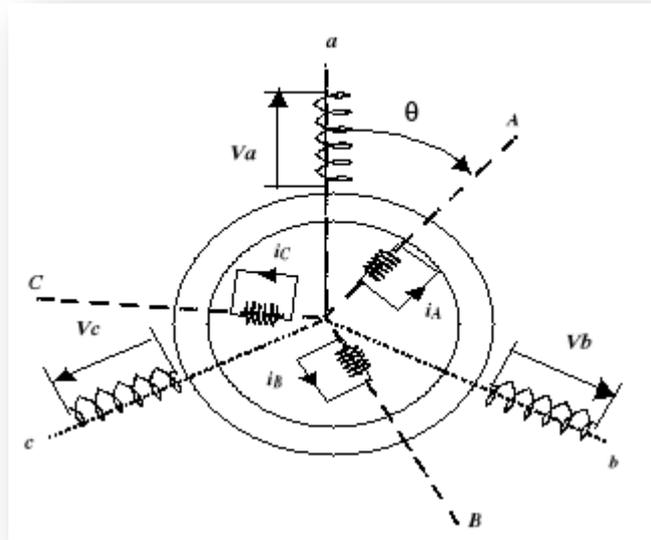
$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega = C_m - C_r$$

$C_m, C_r$ : Sont respectivement le couple moteur et le couple résistant.

Etant donné que le modèle triphasé abc de la partie électriques conduit à six équations différentielles couplées (rotor et stator) il est convenu de déterminer un modèle équivalent orthogonal dqo (directe quadrature et homopolaire) simplifié obtenu par la transformation de PARK et dans le d'un fonctionnement normal la composante homopolaire est nulle ceci réduit les nombres d'équations de plus la propriété orthogonalité conduit à des équations différentielles linéaires.

### III.4. Modèle abc de la machine asynchrone à cage

Soit un moteur asynchrone triphasé dont le stator de la machine est sous forme de trois enroulements identiques fixes décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et traversés par trois courants triphasés. Le rotor à cage est équivalent trois enroulements identiques en court-circuit (la tension aux bornes de chaque enroulement est nulle). Ceci est illustré par la figure ci-joint :



**Figure 46:**schéma électrique d'une machine asynchrone triphasée à cage.

L'application de la loi de Faraday au système triphasé permet d'écrire les équations des tensions suivantes :

$$\begin{cases} U_{abc} = R_s I_{abc} + \frac{d\Phi_{abc}}{dt} \\ 0 = R_r I_{ABC} + \frac{d\Phi_{ABC}}{dt} \end{cases}$$

Les flux sont exprimés comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{abc} = L_{ss} I_{abc} + M_{sr}(\theta) I_{ABC} \\ \Phi_{ABC} = L_{rr} I_{ABC} + M_{rs}(\theta) I_{abc} \end{cases}$$

Avec

$$\begin{aligned} U_{ABC} &= [u_A \quad u_B \quad u_C]^T & U_{abc} &= [u_a \quad u_b \quad u_c]^T \\ I_{ABC} &= [i_A \quad i_B \quad i_C]^T & I_{abc} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \\ \Phi_{ABC} &= [\Phi_A \quad \Phi_B \quad \Phi_C]^T & \Phi_{abc} &= [\Phi_a \quad \Phi_b \quad \Phi_c]^T \end{aligned}$$

Les matrices des résistances s'écrivent :

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

$R_s$  ,  $R_r$  sont respectivement les résistances par phase statorique et rotorique Et Les matrices d'inductances s'écrivent :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$l_s, l_r$  sont respectivement les inductances propres par phase statorique et rotorique

$m_s, m_r$  sont respectivement les i mutuelles inductances entre phases statoriques et rotoriques

$$M_{sr}(\theta) = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$m_{sr}$  est le mutuelle inductance entre phases statorique et rotorique

$$M_{sr}(\theta) = M_{sr}^T(\theta)$$

La partie mécanique est définie par l'équation du mouvement :

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega = C_e - C_r \\ \omega = p\Omega = \dot{\theta} \end{cases}$$

$$C_e = \frac{dW_{mag}}{d\theta} = p \frac{dW_{mag}}{d\theta_m}$$

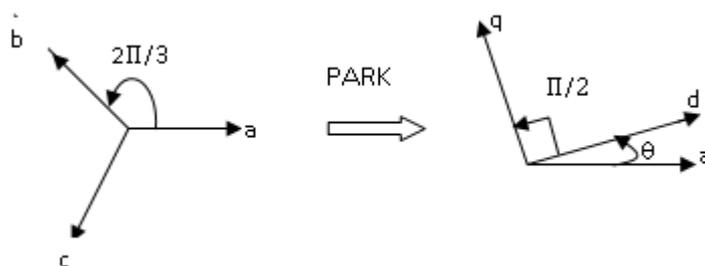
Avec

$W_{mag}$  : Énergie magnétique

$$\theta = p\theta_m \text{ et } \Omega = \frac{d\theta_m}{dt}$$

### III.5. Transformation de PARK

Soit un système triphasé abc , la transformation de Park consiste à déterminer le système horthgonale dq equivalent, La composante homopolaire est rajoutée afin d'assurer la reversibilité de la matrice de Park



La matrice de PARK s'écrit

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

La matrice inverse de PARK s'écrit

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

### III.6. Modèle dq de la machine asynchrone à cage

Afin de faciliter la synthèse de la commande une modélisation équivalente simplifiée dq est obtenue à l'aide d'une transformation mathématique dite de PARK. Ainsi les bobinages triphasés abc statorique et rotorique décalé de 120° deux bobinages orthogonales dq comme il est indiqué dans la figure ci-jointe

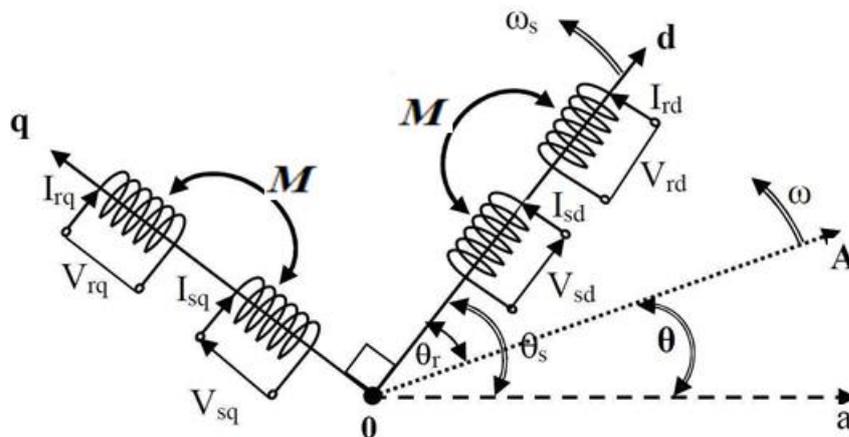


Figure 47: Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q.

#### Remarque

- La machine étant alimentée par un système de tension triphasée sans neutre, comme cela se fait en pratique, la somme des grandeurs triphasées (tension, courant ou flux) est nulle et donc la composante homopolaire est nulle.

- Selon le fonctionnement la machine et son application trois référentiels sont utilisés référentiel lié au stator, au rotor ou au champ tournant dans notre cas il s'agit d'un entraînement et par conséquent le référentiel lié au champ tournant est considéré, on a alors:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = \omega_s - \omega \end{cases}$$

### III-1.1 Equations des tensions dans les axes d et q

Suite à la transformation de PARK les équations des tensions dans le système biphasé obtenues sont données comme suit :

$$\begin{cases} U_{dq_s} = R_s I_{dq_s} + \frac{d\Phi_{dq_s}}{dt} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \Phi_{dq_s} \\ 0 = R_r I_{dq_r} + \frac{d\Phi_{dq_r}}{dt} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \Phi_{dq_s} \end{cases}$$

De même l'application de la transformation de PARK aux équations des flux conduit à :

$$\begin{cases} \Phi_{dq_s} = L_s I_{dq_s} + \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & 0 \end{bmatrix} I_{dq_r} \\ \Phi_{dq_r} = L_r I_{dq_r} + \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & 0 \end{bmatrix} I_{dq_s} \end{cases}$$

Avec

$$\begin{aligned} U_{dq_s} &= [U_{ds} \quad U_{qs}]^T & U_{dq_r} &= [U_{dr} \quad U_{qr}]^T \\ I_{dq_s} &= [I_{ds} \quad I_{qs}]^T & I_{dq_r} &= [I_{dr} \quad I_{qr}]^T \\ \Phi_{dq_s} &= [\Phi_{ds} \quad \Phi_{qs}]^T & \Phi_{dq_r} &= [\Phi_{dr} \quad \Phi_{qr}]^T \end{aligned}$$

$$\begin{cases} L_s = l_s - m_s \\ L_r = l_r - m_r \\ M = \frac{3}{2} m_{sr} \end{cases}$$

$L_s, L_r$  : Appelées respectivement inductance cyclique statorique et rotorique

$M$  : Appelée mutuelle inductance cyclique statorique rotorique

La partie mécanique n'étant pas considérée par cette transformation sa modélisation reste la même que celle décrite dans la modélisation abc c'est-à-dire :

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega = C_e - C_r \\ \omega = p\Omega = \dot{\theta} \end{cases}$$

Sachant que le couple électromagnétique est donné par

$$C_e = \frac{P_{em}}{\Omega_s}$$

$P_{em}$  : est la puissance électromagnétique transmise au rotor, elle est donnée par :

$$P_{em} = \frac{3}{2} \frac{d\theta_s}{dt} (\Phi_{ds} I_{qs} - I_{ds} \Phi_{qs})$$

On aboutit alors à l'expression du couple suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} I_{qs} - I_{ds} \Phi_{qs})$$

### III.7. Bilan des puissances et rendement

D'après le schéma équivalent par phase de la figure ci-dessous la puissance absorbée par le moteur est:

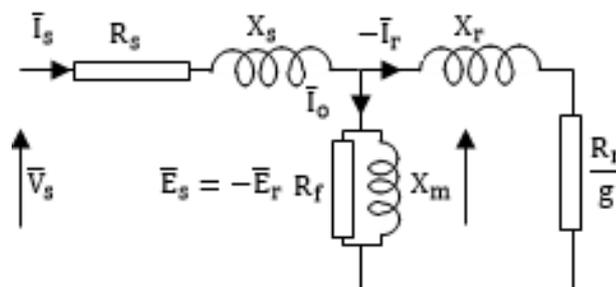
$$P_{ab} = 3V_s I_s \cos(\varphi_s) = \sqrt{3} U_s I_s \cos(\varphi_s) = P_{em} + p_{js} + p_f$$

Or la Puissance électromagnétique peut s'écrire :

$$P_{em} = C_{em} \Omega = P_m + p_{jr} = P_u + p_{mec} + p_{jr}$$

Avec

- $P_{em}, C_{em}$ : respectivement puissance et couple électromagnétique
- $P_m, P_u$ : respectivement la puissance mécanique et la puissance utile
- $p_{js}$ : les pertes joules statoriques
- $p_{jr}$ : les pertes joules rotorique
- $p_f$ : les pertes fer ramenés au stator
- $p_{mec}$ : les pertes mécaniques (friction, ventilation, vibration ...)



Le rendement est défini par le rapport entre la puissance utile fournie et la puissance électrique absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{P_{ab} - \sum \text{pertes}}{P_{ab}} = 1 - \frac{\sum \text{pertes}}{P_{ab}}$$

Remarque :

- $P_a$  : puissance absorbée (électrique).
- $P_u$  : puissance utile (mécanique).
- $\sum \text{pertes}$  : représente la somme des pertes électriques, magnétiques, mécaniques et

Supplémentaires.

$$\sum \text{pertes} = P_j + P_{\text{fer}} + P_{\text{méc}} + P_{\text{sup}} \quad (3.30)$$

- ✓ les trois premiers types de pertes représentent environ 95% des pertes dans le moteur, les pertes supplémentaires peuvent être négligées [36].

## Commande vectorielle de la machine asynchrone

### III.8. Introduction :

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancés en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations... ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique. Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, du flux, de la vitesse ou même de la position.

Une fois que l'on maîtrise la régulation du couple et du flux, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. On parle alors de régulation en cascade, la boucle de contrôle du couple est imbriquée dans la boucle de réglage de la vitesse.

Il est évident que pour augmenter la vitesse, il faut imposer un couple positif, pour la diminuer il faut un couple négatif. Il apparaît alors clairement que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit à son tour être imposé par l'application des courants ; c'est le rôle des régulateurs de courants. 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 le couple rend sa commande facile. On se retrouve confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple. la commande vectorielle vient régler ce problème de découplage des réglages du flux et du couple.

Il existe trois types de commande vectorielle :

1. Commande vectorielle directe.
2. Commande vectorielle indirecte.
3. Commande vectorielle simplifié.

### III.9. Principe du contrôle vectoriel de la MAS :

Le principe de la commande vectorielle est de pouvoir piloter un moteur asynchrone comme un moteur à excitation indépendante, où il y a un découplage naturel entre le flux et le couple. Exprimons le couple électromagnétique en fonction du courant stator et du flux rotor :

$$C_{em} = 1.5 P \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) \quad (4.1)$$

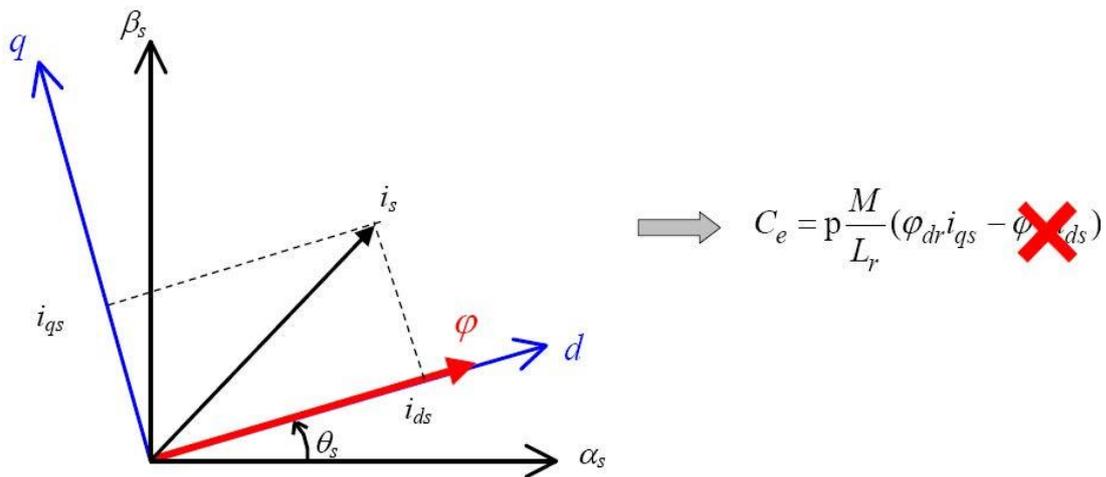
Notre objectif c'est d'orienter le flux rotorique sur l'axe (d), C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (*d*) et donc :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = 0 \end{cases}$$

à partir de ces deux conditions, on aura :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq}) = P \frac{M}{L_r} (\varphi_r I_{sq}) \quad (4.2)$$

D'après l'expression (4.1), la stratégie consiste à maintenir le flux constant de façon indépendante et contrôler le composant sur l'axe (q) du courant statorique  $I_{sq}$  pour imposer le couple. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine à courant continu.



**Figure 48: principe de contrôle vectoriel.**

Seules les grandeurs statorique sont accessibles, les grandeurs rotorique, ne le sont pas, il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statorique. Par conséquent le modèle mathématique d'un moteur à cage à flux rotorique orienté s'écrit comme suit :

Les tensions sont :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} - \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_r \\ 0 = R_r I_{rq} + \omega_r \varphi_r \end{cases} \quad (2)$$

Les flux sont :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

En appliquant la transformation de Laplace, d'après les équations ci-dessus l'équation de flux s'écrit :

$$\varphi_r = \frac{M}{1+L_r s} i_{sd}$$

En tenant compte les 2 conditions précédentes, la position du flux sera instantanément donné par  $\theta_s$  qui est la position instantanée Figure 4.1 du référentiel (d, q) par rapport au référentiel ( $\alpha, \beta$ ). Elle est déterminée par :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \quad (4.4)$$

Avec :

$$\omega_s = \omega_r + P\Omega = \frac{R_r M}{L_r \varphi_r} I_{sq} + P\Omega \quad (4.5)$$

### III.10. Description de la commande vectorielle indirecte et directe

Le contrôle vectoriel direct repose sur la mesure du flux, alors que dans le contrôle vectoriel indirect, on s'affranchit de la connaissance de ce flux en faisant quelques approximations. Le flux est alors estimé ou observé [37].

#### III-1.1 La commande vectorielle indirecte [38]

Contrairement à la commande vectorielle directe, la méthode indirecte consiste à ne pas estimer l'amplitude du flux rotorique mais à utiliser directement l'amplitude de référence. L'intérêt de cette méthode est d'utiliser uniquement des grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées.

En effet, à partir d'un couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$  et du flux rotorique de référence, la méthode de commande indirecte se caractérise donc par le fait qu'aucune estimation du flux n'est nécessaire. Le contrôle vectoriel de la MAS est donc un type de commande permettant de découpler le couple et le flux et inversement. Ceci consiste alors à choisir un système d'axes approprié. Ainsi, le repère de référence (d, q) est lié au flux rotorique de sorte que le vecteur flux rotorique soit selon l'axe d. Les deux composantes du courant statorique  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  représentent les variables d'entrée d'une commande découplée du flux et du couple. Il est à noter, par ailleurs, que la commande vectorielle basée sur l'orientation du flux rotorique est la plus utilisée du fait qu'elle permet l'élimination de l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique. Par conséquent, d'après le modèle de la MAS :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_r \quad (4.6)$$

On prend le flux constant, on aura :

$$\frac{M}{T_r} i_{sd} = \frac{1}{T_r} \varphi_r \quad (4.7)$$

Donc :

Si on impose  $\varphi_r = \varphi_r^*$  on aura  $i_{sd} = \frac{1}{M} \varphi_r$

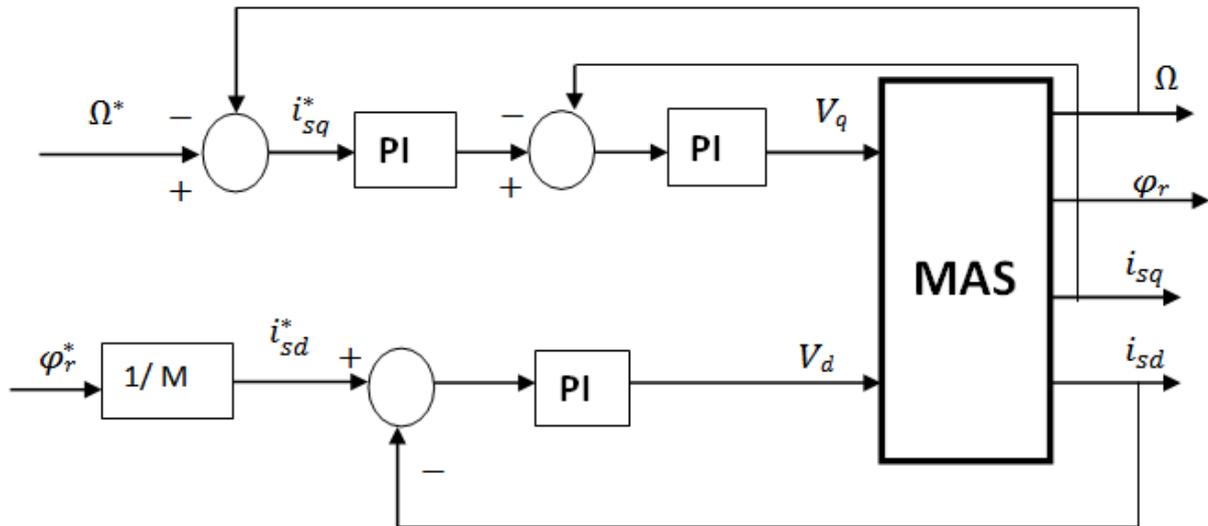


Figure 49: Régulation de la vitesse par la commande vectorielle indirecte.

Avec :

$i_{sq}^*$ ,  $i_{sd}^*$  : Courant de référence statorique sur l'axe d, q.

$\varphi_r^*$  : Flux de référence.

$\Omega^*$  : vitesse de référence.

### III-2.1 Synthèse et Calcul du réglage

#### III.10.2.1 Régulateur de courant :

Les structures des régulations sont choisies pour répondre à plusieurs nécessités. Il convient d'abord de réguler la machine de façon à imposer à la charge la vitesse, la position ou le couple.

Il est également, nécessaire d'assurer des conditions de fonctionnement fortement liées à la sécurité du système de contrôle. Pour les deux composantes du courant, un régulateur de type PI est adopté. L'action proportionnelle a pour effet le réglage de la rapidité du système de contrôle, par contre, l'action intégrale annule quasiment l'écart entre la consigne et la grandeur régulée.

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{MP}{\sigma L_r} \varphi_r i_{sd} - \frac{F_r \Omega}{J} - \frac{C_r}{J}$$

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_r$$

On aura :

$$\begin{cases} \frac{di_{sq}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{MP\Omega}{\sigma L_s L_r} \varphi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \\ \frac{di_{sd}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{sd} - \omega_s i_{sq} - \frac{MP\Omega}{\sigma L_s L_r} \varphi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \end{cases}$$

Après la transformation de Laplace on aura :

$$\begin{cases} V_{sq} - e_q = \sigma L_s (s + \gamma) i_{sq} = V_q \\ V_{sd} - e_d = \sigma L_s (s + \gamma) i_{sd} = V_d \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} e_q = \sigma L_s \left( \omega_s i_{sd} - \frac{MP\Omega}{\sigma L_s L_r} \varphi_r \right) \\ e_d = \sigma L_s \left( \omega_s i_{sq} - \frac{MP\Omega}{\sigma L_s L_r} \varphi_r \right) \end{cases}$$

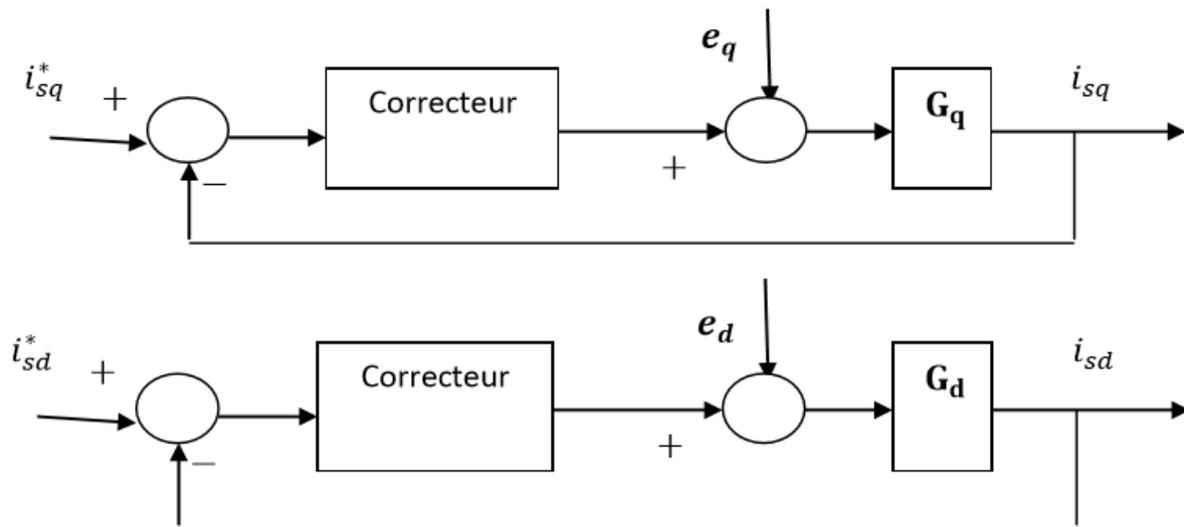
Donc :

$$\begin{cases} G_d = \frac{i_{sd}}{V_d} = \frac{1/\gamma \sigma L_s}{1 + \frac{1}{\gamma} s} = \frac{k_1}{1 + \tau_1} \\ G_q = \frac{i_{sq}}{V_d} = \frac{1/\gamma \sigma L_s}{1 + \frac{1}{\gamma} s} = \frac{k_2}{1 + \tau_2} \end{cases}$$

Avec :

$$k_1 = k_2 = \frac{1}{\gamma \sigma L_s} ; \tau_1 = \tau_2 = \frac{1}{\gamma}$$

Les boucles de régulation sont données par (la Figure 47) :



**Figure 50: régulation de courant par la commande vectorielle indirecte.**

Les correcteurs PI sont adoptés et sont donnée sous la forme :

- Pour l'axe (d) :  $C_d = K_{pd} + \frac{k_{id}}{s}$
- Pour l'axe (q) :  $C_q = K_{pq} + \frac{k_{iq}}{s}$

Avec :  $K_{pd}$ ,  $k_{id}$ ,  $K_{pq}$ ,  $k_{iq}$  et : sont les gains des correcteur PI.

### III.10.2.2 Régulateur de vitesse :

Pour une MAS, il est tout à fait clair que le couple est contrôlé par action sur le courant  $i_{sq}$ . Par conséquent, la sortie du correcteur de la boucle externe fournit la référence qui sera imposée pour la boucle interne de courant d'axe q. C'est ainsi que dans ces conditions, de commande des courants avec compensation, la situation est effectivement devenue similaire à celle de la machine à courant continu. Ceci facilite la conception du contrôle de la vitesse [39].

D'après la formule suivent :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{PM}{JL_r} \varphi_r i_{sq} - \frac{F_r \Omega}{J} - \frac{C_r}{J}$$

Par la transformation de Laplace on aura :

$$(J_S + F_v)\Omega = \frac{PM}{L_r} \varphi_r i_{sq} - C_r = C_{em} - C_r$$

Donc la boucle de régulation de vitesse est donnée par la Figure 4.4 :

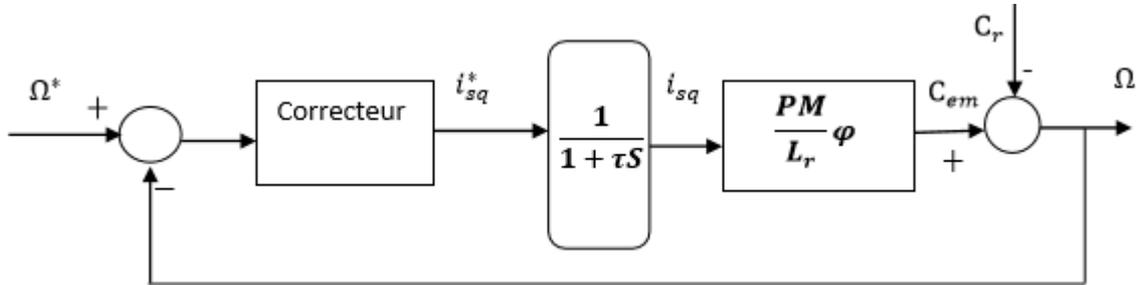


Figure 51: régulation de vitesse par commande vectorielle.

Le correcteur PI est adopté et est donnée sous la forme :

Le régulateur PI  $\Omega$  est donner par :

$$C_{\Omega}(s) = k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s}$$

Avec,  $k_{p\Omega}$   $k_{i\Omega}$  sont les des gains de correcteur PI.

Dans ce chapitre on a présenté le principe de la commande vectorielle de la machine synchrone (MAS), ainsi que la méthode de calcul des différents régulateurs. Enfin nous

Avons présenté quelques résultats de simulations.

### III-3.1 Convertisseur statique

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

Cet onduleur transforme la tension continue issue des panneaux en une tension alternative Le convertisseur continu-alternatif est nommé un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. Il est utilisé souvent avec d'autre convertisseur, pour servir d'alimentation de secours en informatique.

Triphasée avec une fréquence variable [40].

D'une façon générale le convertisseur statique (onduleur) joue le rôle d'interface entre source d'énergie électrique et le moteur. Le convertisseur statique utilisé dans notre travail est un onduleur de tension triphasé. Celui-ci est composé de six (06) interrupteurs.

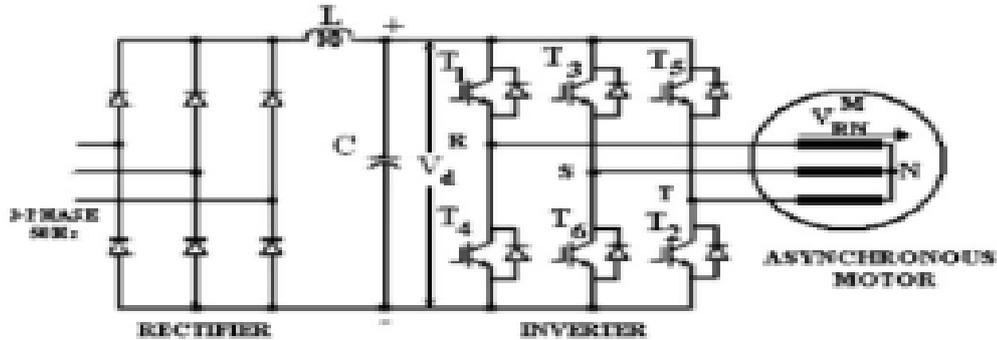


Figure 52: Convertisseur statique (onduleur).

III.10.3.1.1a la simulation (d'un onduleur de tension triphasé avec MLI alimentée a un source CC et la charge est MAS)

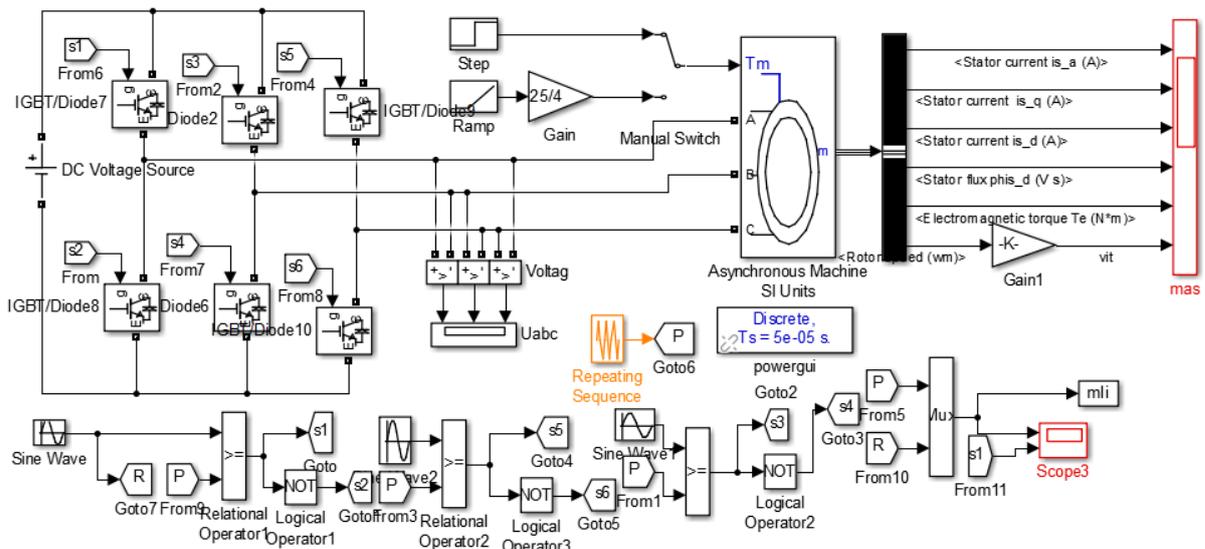


Figure 53: onduleur de tension triphasé avec MLI alimentée a un source CC et la charge est MAS

Résultat :

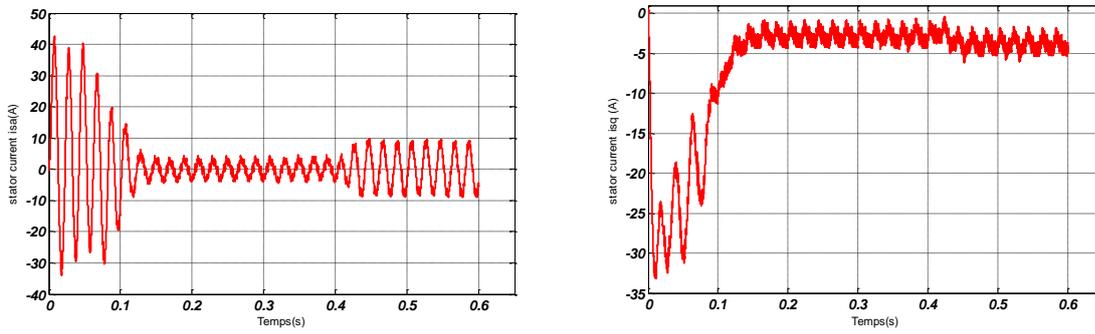
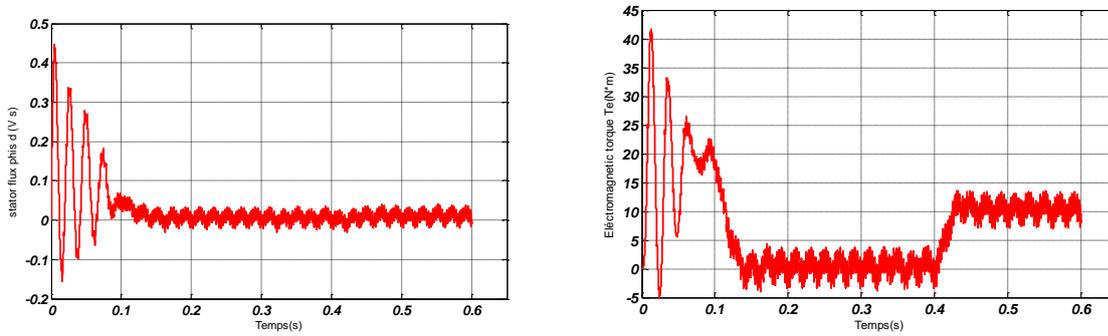


Figure 54:les caractéristique du courant de stator isq et du courent de stator isa.



X

Figure 55:les caractéristiques du flux de stator.

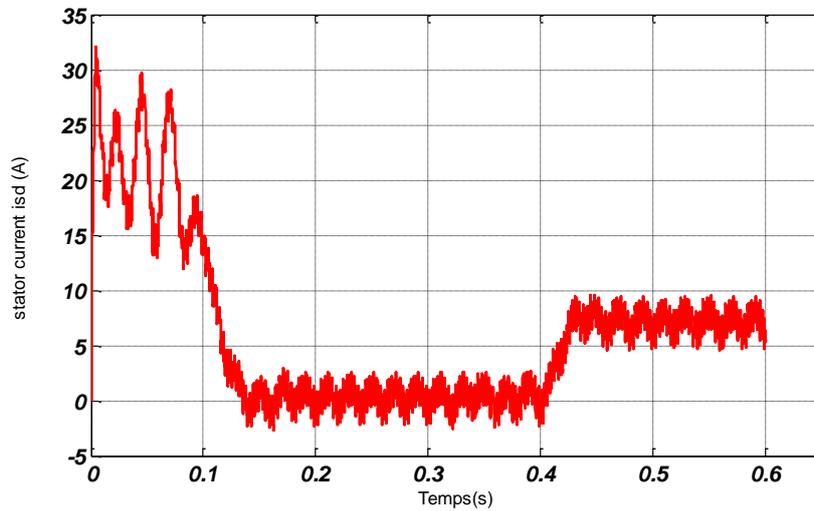


Figure 56:les caractéristique du courent de stator isd

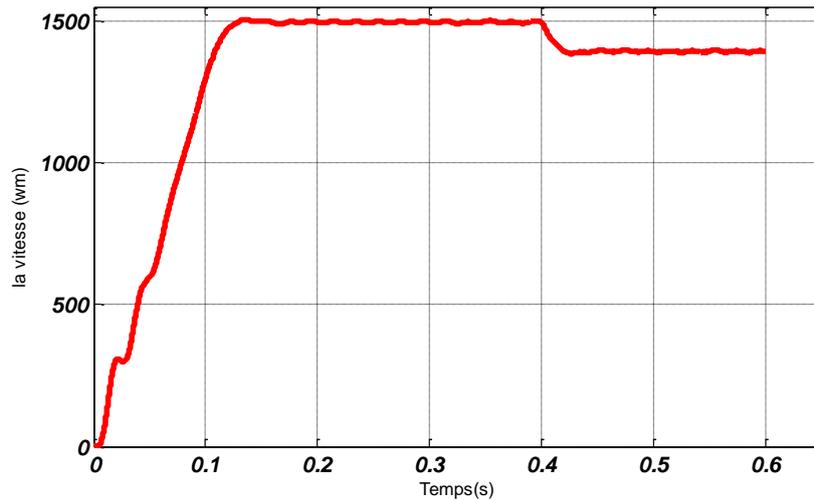


Figure 57: les caractéristiques de vitesse du moteur asynchrone

### III.11. Pompage hydraulique

Les pompes sont les générateurs de débit à la base de tous systèmes hydrauliques. Dans un circuit hydraulique, leur rôle est de faire circuler un fluide qui va permettre de déplacer des charges grâce à d'autres composants tels que des vérins ou des moteurs.

Il existe deux catégories de pompes hydrauliques : les pompes à cylindrée fixe et les pompes à cylindrée variable. Dans la catégorie des pompes à cylindrée fixe, on trouve quatre types de technologies différentes : les pompes à engrenages (externe ou interne), les pompes à palettes, les pompes à pistons et les pompes à vis.

Les pressions de service varient d'une dizaine de bar à plus de 700 bar, suivant la technologie et l'application.

Dans la catégorie des pompes à cylindrée variable, on trouve des pompes à palettes et des pompes à pistons intégrant des régulateurs de pression, de pression-débit (load-sensing) ou de puissance pour les applications en circuit ouvert et divers types de servo-commandes pour les applications de transmission en circuit fermé.

### III.12. Les 4 principaux types de pompes hydrauliques :



Figure 58: principaux types de pompes hydrauliques.

### III.13. Différentes types des pompes

#### III.1.1 Pompe volumétrique

La pompe volumétrique transfère l'énergie cinétique du moteur en mouvement avant et arrière, permettant au fluide de vaincre la gravité par un changement continu de volume alternativement connecté aux orifices d'aspiration et de refoulement. Les pompes volumétriques ont toujours une partie mobile dans la partie creuse qui déplace le liquide en modifiant le volume contenu dans la partie creuse. Le principal avantage des pompes volumétriques est la capacité de fournir des fluides à des pressions très élevées.

Volumétrique comporte toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide en variant le volume contenu dans la pièce creuse. Le principal intérêt des pompes volumétriques est de pouvoir véhiculer un fluide sous de très fortes pressions.

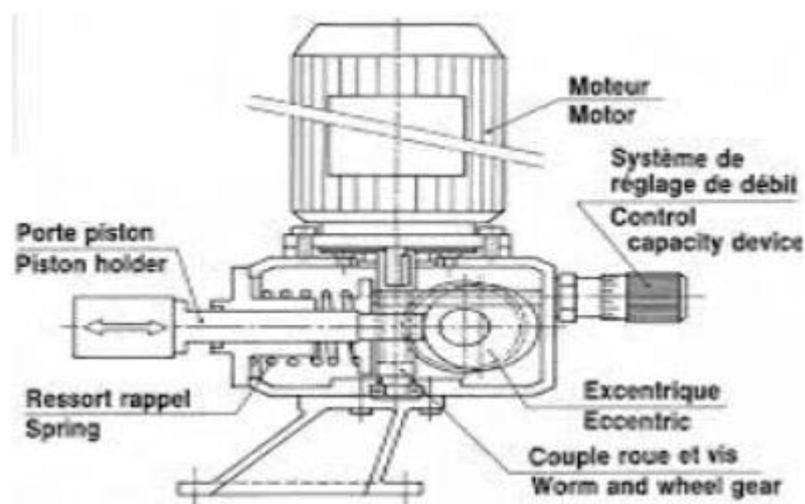


Figure 59: Schéma d'une pompe volumétrique.

### III.13.1.1 Le rendement volumétrique

Au fur et à mesure que la pression augmente, les jeux (écarts) entre les pièces dans une **pompe hydraulique** à cylindrée positive ne permettent pas de produire le même débit d'entrée à la sortie.

Une certaine quantité du liquide sera renvoyée à travers les dégagements entre la chambre de haute pression et la chambre de basse pression. Le débit résultant de la sortie, par rapport à celui d'entrée s'appelle « Rendement volumétrique. »

Le rendement volumétrique change lorsque la pression change et doit être spécifiée pour une pression donnée. Quand une **pompe hydraulique** évaluée à 100 gal/mn à 2000 t/mn à 100 psi est actionnée contre une pression de 1000 psi, son débit de sortie peut chuter à 97 gal/mn. Cette **pompe hydraulique** aura un « Rendement volumétrique » de 97% (97/100) à 1000 psi. Le « Rendement volumétrique à 1000 psi = 0,97 ou 97% efficace à 1000Psi.

Lorsque la pression augmente jusqu'à 2000 psi, le débit de sortie peut chuter à 95 gal/mn. Elle aurait alors un « Rendement volumétrique » de 0,95 ou de 95% à 2000 psi. Le nombre de tr/min doit rester constant lorsqu'on prend cette mesure.

### III-2.1 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)[41],[40].

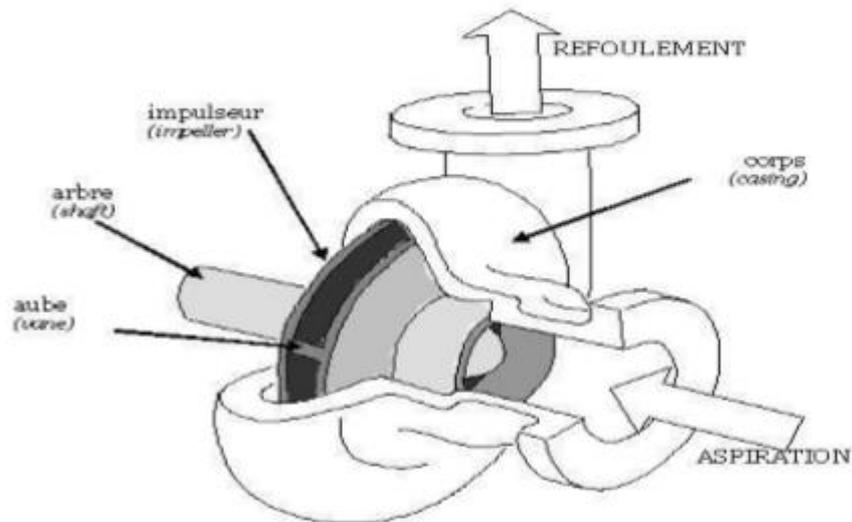


Figure 60:Schéma d'une pompe centrifuge.

### III.13.2.1 Constitution d'une pompe centrifuge

Les pompes se composent de deux éléments essentiels :

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

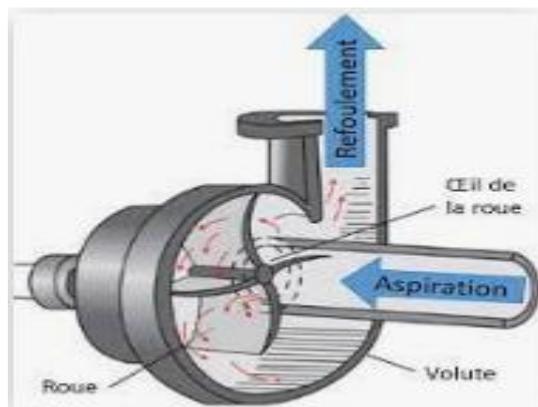


Figure 61:Constitution d'une pompe centrifuge [42].

### III.13.2.2 Fonctionnement d'une pompe centrifuge

Sous l'effet de la rotation de la roue, le liquide emmagasiné entre les aubes de la roue est projeté de la région axiale vers le diffuseur à cause de la force centrifuge ; de ce fait une dépression est créée à l'entrée de la pompe d'où l'effet d'aspiration du liquide et en même temps une compression à la sortie de la roue, cela suffit pour établir le mouvement continu de l'écoulement. A la sortie de la roue, le liquide est récupéré dans une volute reliée à l'orifice de refoulement où l'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle, on dispose ainsi à l'orifice de refoulement un débit sous une pression qui se traduit par une hauteur manométrique de refoulement[43].

### III.14. Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges

#### A Avantages

- Construction simple en général, une seule pièce en mouvement « le rotor».
- Prix peu élevé.
- Encombrement réduit.
- Jeu assez large, donc facilité de manipuler des liquides contenant des solides en suspension.
- Entretien en général peu coûteux.
- Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques.
- Très large gamme de qualités matières suivant le service requis.
- Grand flexibilité d'utilisation.
- Ajustement automatique du débit à la pression.
- Puissance absorbée limitée, donc sans danger.

#### b- Inconvénients

- Limitation de la viscosité.
- En fait, la pompe centrifuge est limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de 100cSt (centistokes) et son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler le débit.

Les pompes centrifuges présentent beaucoup d'avantages (simple, coût, faible maintenance et elle est disponible dans une large gamme de puissance).

### III.15. La différence entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

La pompe centrifuge est mécaniquement plus simple qu'une pompe volumétrique. Elle est entraînée directement par le moteur alors que la pompe volumétrique fait souvent appel à un moteur électrique dont la vitesse est adaptée à la viscosité du fluide pompé.

#### Modélisation d'une pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [44] :

$$F(H, Q, W) = 0$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante. La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

Ces pertes sont :

Hauteur totale du pompage (H) = Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puit jusqu'au

le point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau ( $H_s$ ) + est la somme de pertes linéaires et singulières ( $H_d$ )

$$HMT = a_0 \Omega^2 + a_1 \Omega Q + a_2 \Omega^2 Q^2 = H_g + \Delta p$$

#### Pertes de charges linéaires

Se sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante [28] :

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{LV^2}{D2g}$$

$\lambda$  : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

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

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

Q : débit (m<sup>3</sup>/s).

$$V = \frac{2Q}{\pi \cdot D^2}$$

$$\Delta H_1 = \lambda L \frac{1}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \right)$$

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

### Pertes de charges singulières (locales)

Sont dues essentiellement aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante [29] :

$$\Delta H_1 = \xi \frac{V^2}{2g} = \xi \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 G}$$

$\xi$ : Coefficient de pertes de charges locales

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes

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

$$H_d = \left( \lambda L \frac{1}{D} + \xi \right) \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \right) = K_{fr} * Q^2$$

K<sub>fr</sub> : Constante de la canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + K_{fr} * Q^2$$

### La caractéristique Q (H) de la pompe

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

$$HMT = a_0 \Omega^2 + a_1 \Omega Q + a_2 \Omega^2 = H_g + \Delta p$$

Avec :

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

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

$$a_0 = a_1 = a_2 = 5.794 * 10^{-4}$$

$$Q = 22$$

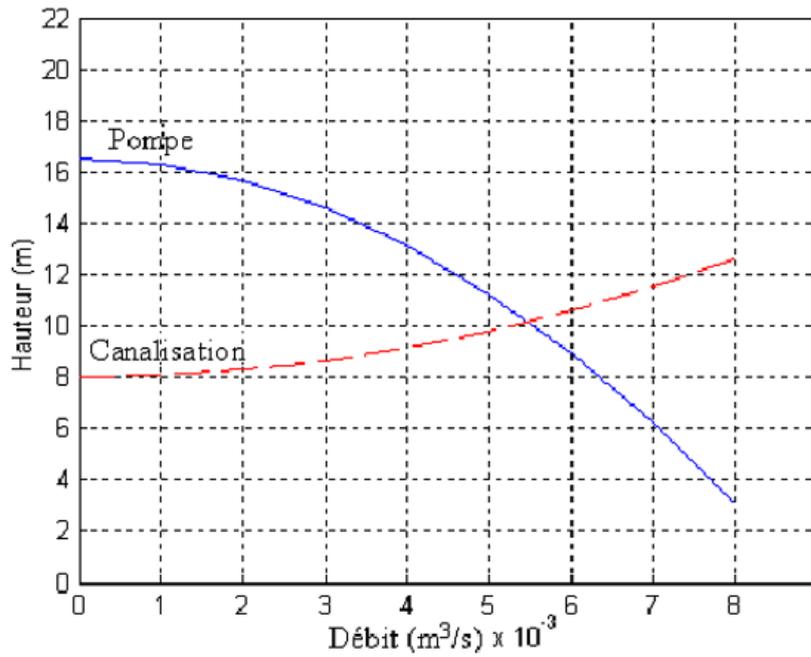


Figure 62:Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.

**La puissance hydraulique fournie par la pompe**

Est donnée par la relation :

$$p_h = \eta_{mp} * p_{elec} = \rho * g * HMT * Q$$

$$Q = HMT^2 \frac{1}{3600 * 550}$$

$$\rho * g + 2.725$$

$\eta_{mp}$ : Le rendement de la pompe.

$p_h$  : la puissance hydraulique.

$\eta$  : La masse volumique de l'eau (=1000Kg au m3).

### III.16. Rendement du groupe Moteur-pompe

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

$$\eta_{mp} = p_h * \frac{1}{p_{elec}}$$

$$p_{elec} = 15306$$

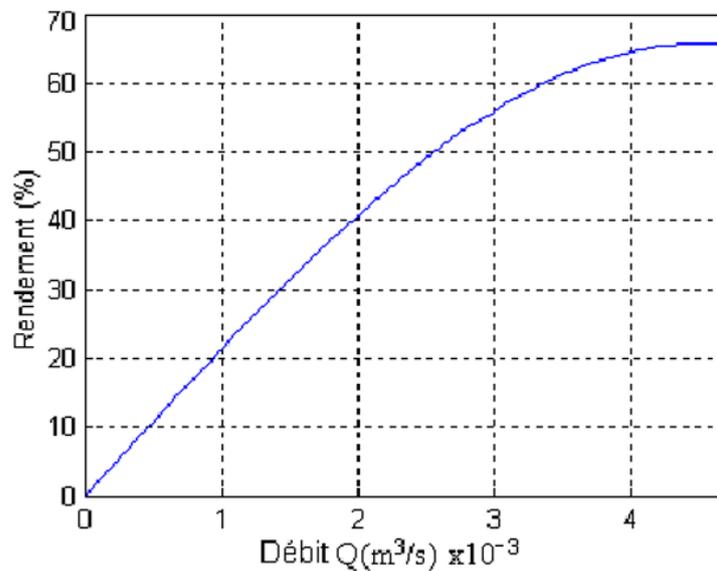
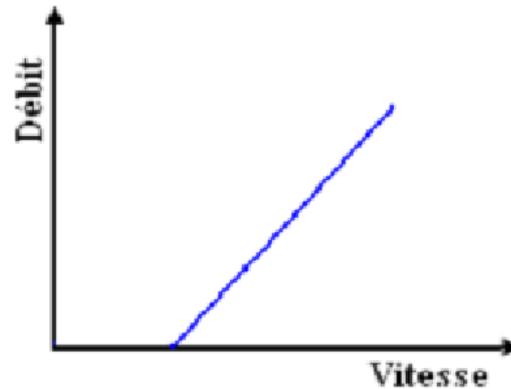


Figure 63:Caractéristiques de rendement de la pompe centrifuge.

#### Caractéristiques débit-vitesse

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit [45] :



**Figure 64:Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.**

### La caractéristique couple vitesse de la pompe

Le couple du moteur 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. Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit de départ non nul[46],[47].

$$C_r = K_r * \Omega^2$$

$$K_r = 4.056 * 10^{-4}$$

Avec :

$K_r$  : coefficients de proportionnalité [(Nm/rad.s-1)<sup>2</sup>].

$C_r$  : le couple statique, très petite.

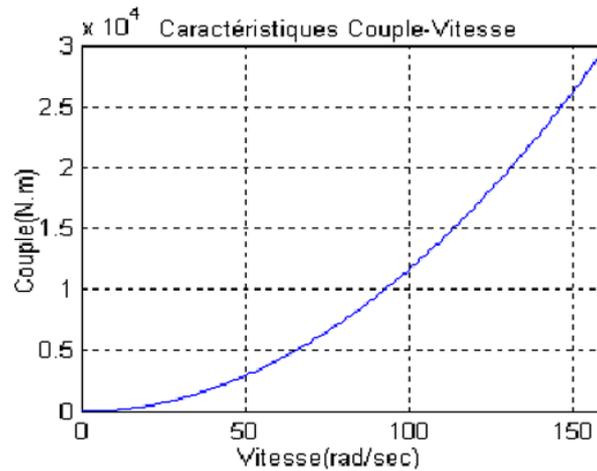


Figure 65:Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.

L'équation de puissance mécanique de la pompe

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_m = K_r * \Omega^3$$

III.17.Simulation d'une pompe centrifuge

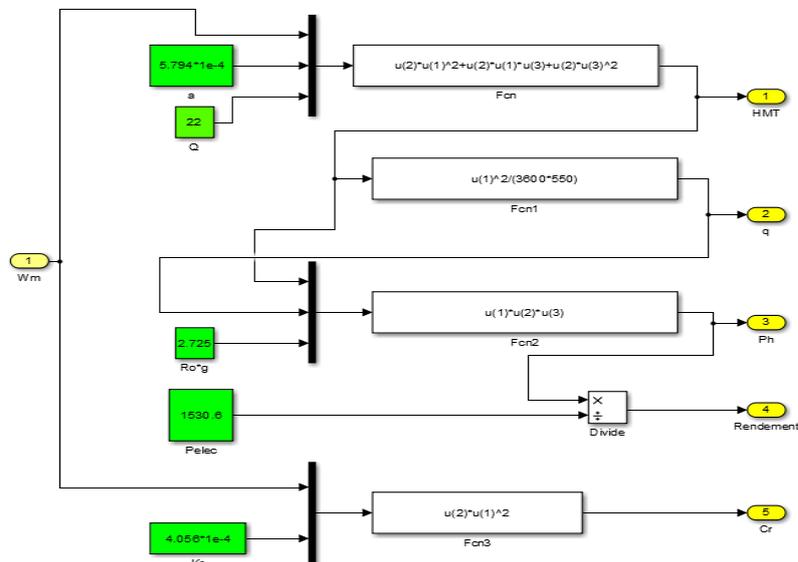


Figure 66:la simulation d'une pompe centrifuge.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants du système de pompage photovoltaïque et leurs modèles afin de faciliter l'accès à la simulation du système.

On a présenté, également, le principe de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), ainsi que la méthode de calcul des différents régulateurs.

# Chapitre IV

---

## Chapitre IV. Commande par mode glissant

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux applications basées sur les commandes MPPT. Mode glissant sur les systèmes photovoltaïques. L'intérêt pour cette commande continue en raison de sa simplicité de fabrication et de son automatisme ou électronique de puissance. Le but de cette commande est de faire Le fonctionnement du système à proximité du PPM [48].

### IV.2. Systèmes à structures variables [49]

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son Fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de Commutation. Il admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{X} = \begin{cases} f_1(x) \\ f_n(x) \end{cases} \text{ Si la condition 1 et vérifiée et la condition n et vérifiée.} \quad (4.1)$$

Où  $f_i$  sont des fonctions appartenant à un ensemble de sous-systèmes.

### IV.3. Théorie des modes glissants

Dans les systèmes à structures variables avec mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface, puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissement et le mouvement le long de laquelle il se produit, est dit mouvement de glissement. Cette commande est appliquée aux systèmes décrits par l'équation suivante (on se limite au cas de deux modes de fonctionnement  $n = 2$ )

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f = \{f^+(x, u^+)\} \quad \text{si} \quad S(x, t) > 0. \\ \dot{X} &= f = \{f^-(x, u^-)\} \quad \text{si} \quad S(x, t) < 0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Les champs de vecteurs de la loi de commande  $u^+$  et  $u^-$  sont définis par :

$$U = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x, t) > 0 \\ u^- & \text{si } S(x, t) < 0 \end{cases}$$

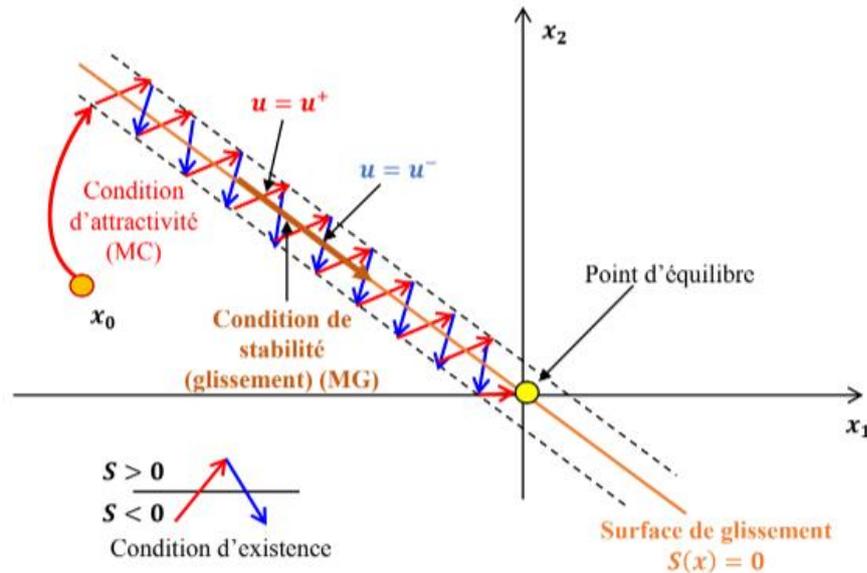
Où  $S(x, t)$  est la surface de commutation (ou de glissement).

La surface de commutation  $S_0$  est définie comme suit :

$$S_0 = \left\{ \frac{x(t)}{S(x, t)} = 0 \right\} \quad (4.3)$$

### IV-1.1 Principe de la commande par mode glissant

Les techniques de contrôle en mode glissant comprennent le déplacement de la trajectoire L'état du système est orienté vers la surface de glissement, et en utilisant Logique de commutation appropriée pour atteindre le seuil de rentabilité. La trajectoire comprend trois parties différentes (Figure 64) :



**Figure 67:Principe de la commande par mode glissant.**

- Mode Convergence (MC) :

En mode d'atteinte, la variable à ajuster commence à partir de

Vers la surface de commutation à partir de n'importe quel point initial  $x_0$  dans le plan de phase  $S(x) = 0$ . Ce modèle est caractérisé par des lois de commande et des critères de convergence.

- Mode glissement (MG) :

Pour les modes glissants, la variable d'état atteint la surface Glissement et approche de l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est Caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x)$ .

### IV-2.1 La Théorème

Soit  $V(x)$  une fonction dite fonction de Lyapunov qui vérifie les conditions suivantes :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 \\ V(x) < 0 \end{cases} \quad \forall x \neq 0 \quad , \quad \forall x \neq 0. \quad (4.4)$$

Si ces trois conditions sont satisfaites,  $x = 0$  est un point d'équilibre stable. Si de plus

---

$\dot{V}(x) < 0$  (strictement négative) pour  $\forall x \neq 0$ , le point  $x = 0$  est asymptotiquement stable.

La fonction de Lyapunov est généralement utilisée pour garantir la stabilité des Systèmes non linéaires.

Elle peut prendre la forme suivante :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x). \quad (4.5)$$

Ainsi, sa dérivée vérifie l'équation suivante :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x). \quad (4.6)$$

### IV-3.1 Conception de la commande par mode de glissement

La conception de la commande par mode glissant est passée par trois étapes principales et Remplir:

- Sélection de la surface de glissement  $S(x)$ ,
- Établir les conditions d'existence de la convergence,
- Déterminer la loi de commande  $u$ .

### IV-4.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme nécessaires. Ces deux facteurs sont en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{X}(x) = f(x, t) + g(x, t)u(x) \quad (4.7)$$

La surface  $S(x)$  représente le comportement dynamique désiré du système. Une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée est donnée par :

$$S(x) = \left[ \frac{d}{dt} + \beta \right]^{r-1} e(x). \quad (4.8)$$

Avec :

- $e(x)$ : écart de la variable à régler  $e(x) = x_{ref} - x$
- $\beta$  : constante positive,
- $r$  : degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Ainsi, on trouve :

$$\text{Pour } r = 1, S(x) = e(x). \quad (4.9)$$

$$\text{Pour } r = 2, s(x) = \beta e(x) + \dot{e}(x)$$

---

$S(x) = 0$  est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ .

#### IV-5.1 Condition d'existence du glissement

Cette condition représente un critère qui permet à la dynamique du système Convergence vers la surface de glissement, qui y reste même face aux perturbations. C'est-à-dire Garanti lorsque la fonction de Lyapunov diminue. Il suffit donc de s'assurer que sa dérivée est un nombre négatif, équivalent à :

$$s(x)\dot{s}(x) < 0$$

#### IV.4. Calcul de la loi de commande

Méthode de la commande équivalente :

Après le choix de la surface de glissement et du critère de convergence, il faut déterminer la commande nécessaire qui a pour but de ramener la variable à contrôler vers la surface de glissement et ensuite vers son point d'équilibre. Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre une valeur maximale  $u_+$  et une valeur minimale  $u_-$

– En fonction du signe de la surface de glissement. Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées 'broutement' ou 'Chattering' apparaissent dans le mode de glissement. La structure d'un contrôleur par mode glissant comporte deux parties :

- Une commande discontinue en fonction du signe de la surface de glissement  $u_n$
- Une commande dite équivalente  $u_{eq}$  caractérisant la dynamique du système sur la surface de glissement.

$$u = u_{eq} + u_n \quad (4.10)$$

##### IV-1.1 Commande équivalente $u_{eq}$

La commande équivalente  $u_{eq}$  est la composante non linéaire qui permet de garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement. Elle peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre  $u^+$  et  $u^-$  :

À partir de

$$\dot{X}(x) = f(x, t) + g(x, t)u(x)$$

Et

$$u = u_{eq} + u_n$$

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x, t) + g(x, t)u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_n \quad (4.11)$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle

( $\dot{S}(x) = 0$  car la surface est égale à zéro). Cette condition permet de déterminer la commande équivalente :

$$U_{eq} = - \left( \frac{\partial y}{\partial x} g(x, t) \right)^{-1} \left( \left( \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right) \right), \quad u_n = 0 \quad (4.12)$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme  $u_{eq}$  par sa valeur tirée de l'équation (4.11) dans l'équation (4.12). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

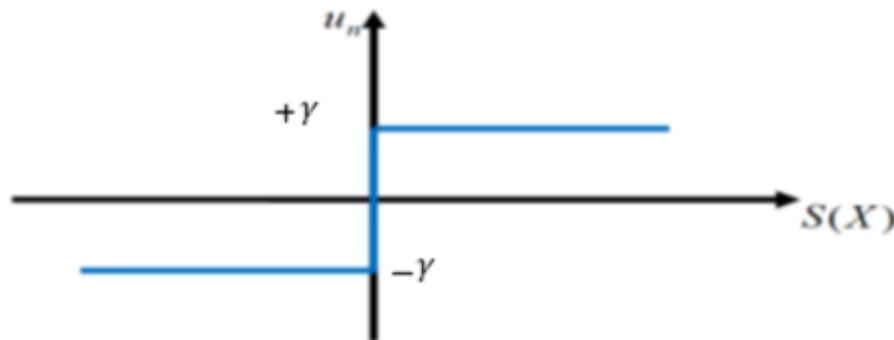
$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_n \quad (4.13)$$

#### IV-2.1 Commande discontinue $u_n$ :

La commande  $u_n$  est la composante non linéaire qui permet de garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et satisfaire la condition de convergence donnée par l'équation (4.13) et ( $S(x) \dot{S}(x) < 0$ ). le problème revient à trouver un tel que :

$$s(x)\dot{s}(x) = s(x) \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_n < 0 \quad (4.14)$$

La solution la plus simple vérifiant cette condition est donnée par la fonction signe Illustrée sur figure 4.2 :



**Figure 68:Représentation de la fonction " Signe ".**

Dans ce cas, la commande  $u_n$  s'écrit comme suit :

$$u_n = \gamma \cdot \text{sign}(s(x)). \quad (4.15)$$

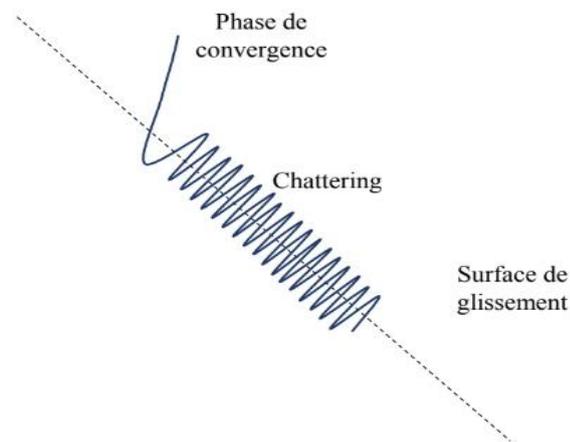
En remplaçant l'expression (4.14) dans (4.15), on obtient :

$$s(x)\dot{s}(x) = s(x) \frac{\partial S}{\partial x} s(x, t) \cdot \gamma \cdot \text{sign}(s(x)) \quad (4.16)$$

Afin de satisfaire la condition d'attractivité (4.16), le signe du gain  $\gamma$  doit être opposé au signe du facteur  $\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)$ .

### IV-3.1 Phénomène de broutement

Le phénomène de broutement (ou réticence ou en anglais chattering) est entraîné par le terme discontinu  $u_n$  de la commande par mode glissant qui excite de fortes oscillations autour de la surface et le signal de commande (voir la Figure 4.3). En effet, le terme discontinu ne s'applique effectivement au moment où le système quitte la surface à cause du retard de la mesure de la sortie. Ce retard peut être amplifié si le système présente naturellement des retards ou des dynamiques négligées. Une autre cause de chattering, notamment sur la commande, est le bruit de mesure.



**Figure 69: Phénomène de broutement.**

Ce phénomène est indésirable car, même s'il est filtré à la sortie du processus, il peut exciter des modes haute fréquence non modulés, ce qui dégrade les performances du système et peut même conduire à une instabilité [50]. Le broutement de la commande entraîne également une usure importante des actionneurs ou de certaines parties du système, et des pertes de chaleur importantes dans les circuits électriques.

#### IV.4.3.1 Réduction du phénomène de broutement

Différentes méthodes ont été développées dans la littérature pour réduire le broutement. Puisque, le problème de broutement est dû au terme discontinu ( $\text{sign}(S(x))$ ) de la commande, précisément la fonction discontinue «  $\text{sign}(S(x))$  », ces méthodes sont basées sur le remplacement de cette fonction par d'autres fonctions continues qui l'approximent comme la fonction de saturation (figure 66) et la fonction Smooth (figure 67).

## IV.4.3.2 Fonction saturation (Sat)

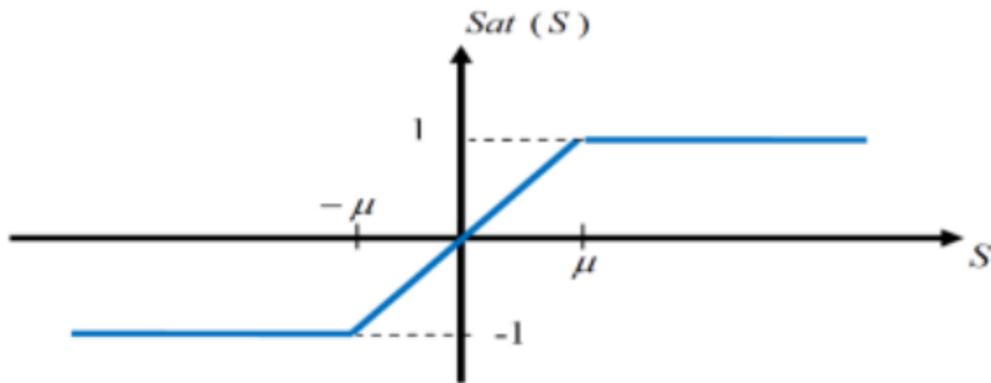


Figure 70:Fonction saturation.

La fonction saturation est donnée par :

$$\begin{cases} sat(s) = 1 \\ sat(s) = -1 \\ sat(s) = \frac{s}{\mu} \end{cases} \quad \text{si} \quad s > \mu, < -\mu, s < |\mu|. \quad (4.17)$$

Où  $\mu$  est un paramètre petit et positif.

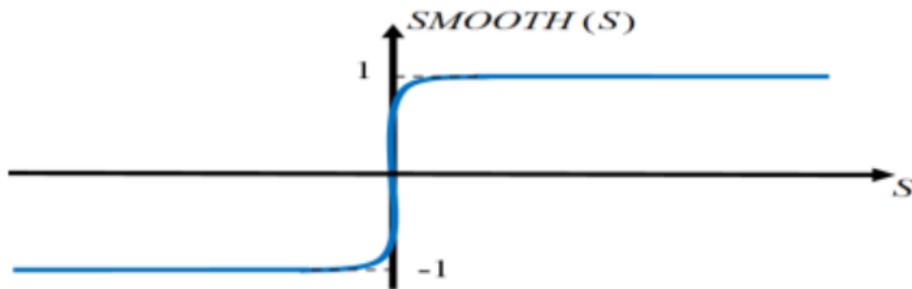
**Fonction Smooth**

Figure 71:Fonction Smooth.

La fonction smooth est donnée par :

$$\text{Smooth}(s) = \frac{s}{s+\mu} \quad (4.18)$$

---

## IV.5. Commande MPPT par mode glissant du système photovoltaïque

Pour la synthèse d'un correcteur par mode de glissement pour un hacheur Boost, la loi de commande adoptée est celle présentée par l'équation :

La synthèse d'un contrôleur par mode glissant se décompose en plusieurs étapes :

- ✓ le choix de la surface de glissement
- ✓ la vérification de l'attractivité de la surface de glissement
- ✓ Etablissement des conditions d'existence du mode de glissement
- ✓ Détermination de la loi de commande [51].

### IV-1.1 Détermination de la commande équivalente

Pour déterminer la condition de stabilité sur la surface de glissement, on se sert de la notion de la commande équivalente. En utilisant les conditions d'invariance  $S(x) = 0$  et  $\dot{S}(x) = 0$ , on calcule l'expression de la commande  $U_{eq}$  équivalente donnée par :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dS}{dx} \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial S}{\partial x_2} \dot{x}_2 + \frac{\partial S}{\partial x_3} \dot{x}_3 \quad (4.19)$$

### IV-2.1 Détermination de la commande discontinue

Une approche de commande explicite doit être formulée pour amener la trajectoire sur la surface de glissement pendant le mode de convergence. Cette approche est appelée la loi d'atteinte. La loi d'atteinte à taux constant donnée par :

$$u_n = \gamma \cdot \text{sign}(s(x))$$

Cette approche de contrôle s'appelle : la commande par mode glissant équivalente à taux constant.

## IV.6. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant

Il est reconnu que la robustesse vis-à-vis des modifications des paramètres du système et des perturbations appliquées au système. De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre avantage de ce type de commande, qui permet de simplifier la complexité du système. Cependant, ces gains de performances se font au prix de certains inconvénients :

- Les vibrations ou les broutages provoqués par des parties discontinues de la commande peuvent avoir un effet néfaste sur l'actionneur.
- Le système est toujours soumis à des commandes à haute fréquence pour s'assurer qu'il converge vers l'état souhaité, ce qui n'est pas souhaitable Synthèse de la loi de commande par mode glissant :

La synthèse de la commande par mode glissant se fait en trois étapes :

- ✓ Choix de la surface de glissement qui représente la dynamique désirée.
- ✓ Etablir la condition de convergence.

Déterminer la loi de commande qui aura pour rôle de garantir le maintien et le glissement le long des trajectoires du système sur cette surface. [52]

## **Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur le système photovoltaïque que nous étudions. Comparant avec la méthode P&O, cette commande est très robuste et permet au système de rejoindre son PPM rapidement même face aux changements rapides de l'éclairement.

# Conclusion général

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'un grand développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable telle que l'énergie solaire, qui est gratuite libre et abondante dans la plupart des régions du monde.

Son utilisation comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients.

Dans ce mémoire il s'agit d'une contribution à l'optimisation de l'ensemble composé d'un hacheur, d'un onduleur, d'un moteur et d'une pompe qui sont reliés à un générateur solaire. Cette étude couvre, en détail, les caractéristiques du générateur photovoltaïque et de ses applications dans un secteur rural tel que les systèmes autonomes ou dans la ville comme dans le cas des systèmes connectés au réseau.

L'algorithme d'optimisation du générateur solaire, qui a été étudiée, est la perturbation et l'observation (P&O), elle est généralement utilisée par les concepteurs de suiveur de point de puissance maximum (MPPT), mais elle souffre de quelques inconvénients, du point de vue de l'exécution ou dans le processus de poursuite.

Les simulations ont été développées dans l'environnement de programmation MATLAB /SIMULINK. Les résultats de simulation ont montré l'évolution des grandeurs physiques de chaque organe ainsi que le système global.

Pour le réglage du processus nous avons choisi de maintenir de réglé la tension de sortie du hacheur ou tension d'entre de l'onduleur et donc la puissance de système motopompe . Pour ce la nous avons adopté deux étape, la premier consiste a réglage classique  $\pi$  et la deuxième introduit le réglage par mode glissant

## Référence

---

---

- [1] . Alain Bilbao Ibarreta (Réalisation de commandes MPPT Numérique Rapport de stage fin d'études Université Rovira Virgili 2006.
- [2] Dossier technique( éolienne et photovoltaïque ).
- [3] . HANANOU Fatiha, ROUBAH Aïcha Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, mémoire master l'université Ourgla 2014.
- [4] . B.Equer le pompage photovoltaïque Manuel de cours, énergie solaire photovoltaïque elipses 1993.
- [5] . MECHALIKH Med Nadjib, HAMADA Charaf Eddine Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ourgla 2013.
- [6] L. G. Paterno, « 1 - Nanomaterials: Solar Energy Conversion », p. 33.
- [7] B. Viswanathan, « Introduction », in Energy Sources, Elsevier, 2017, p. 1-28.
- [8] BENHADDOUCHE Nesrine Fatima, la commande d'un système photovoltaïques d'un satellites Mémoire de master université Abou beker Belkaid Tlemcen, 2014.
- [9] V A Milichko, A S Shalin, I S Mukhin, A E Kovrov, A A Krasilin, A V Vinogradov, P A Belov, C R Simovski, « Solar photovoltaics: current state and trends », p. 47.
- [10] Z. Abdin a, M.A.Alim b , R.Saidur b , M.R.Islam b , W.Rashmi c , S.Mekhilef a , A.Wadi b , « Solar energy harvesting with the application of nanotechnology », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 26, p. 837-852, oct. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.023.
- [11] R. Corkish, « Solar Cells », in Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2013, p. B9780124095489016000.
- [12] T. Matsui, H. Sai, A. Bidiville, H.-J. Hsu, et K. Matsubara, « Progress and limitations of thin-film silicon solar cells », Solar Energy, vol. 170, p. 486-498, août 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.05.077.
- [13] <https://www.dsnsolar.com/info/cigs-solar-cell-technology-32794779.html>
- [14] E. Płaczek-Popko, « Top PV market solar cells 2016 », Opto-Electronics Review, vol. 25, no 2, p. 55-64, juin 2017, doi: 10.1016/j.opelre.2017.03.002.
- [15] Z. Abdin a,\* , M.A.Alim b , R.Saidur b , M.R.Islam b , W.Rashmi c , S.Mekhilef a , A.Wadi b , « Solar energy harvesting with the application of nanotechnology », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 26, p. 837-852, oct. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.023.
- [16] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FPre-sentation-schematique-dune-cellule-DSSC-et-son-principe-de-fonctionnement>

- [17] C. R. Kalaiselvi, N. Muthukumarasamy, D. Velauthapillai, M. Kang, et T. S. Senthil, « Importance of halide perovskites for next generation solar cells – A review », *Materials Letters*, vol. 219, p. 198-200, mai 2018, doi: 10.1016/j.matlet.2018.02.089
- [18] I. Vurgaftman et J. R. Meyer, « Band parameters for nitrogen-containing semiconductors », *Journal of Applied Physics*, vol. 94, no 6, p. 3675-3696, sept. 2003, doi: 10.1063/1.1600519.
- [19] T. DenHerder, "Design and Simulation of Photovoltaic Super System Using Simulink", California Polytechnic State University, 2006
- [20] Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", Faculty of California Polytechnic State University, 2005
- [21] A. Fortin, *Analyse numérique pour ingénieurs*, 2 édition, Presses internationales polytechnique, 1996..
- [22] - Encarta 2005.
- [23] - A. Hammidat, A. Hadj Arab et M.T. Boukadoum « Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie », *Rev. Energ. Ren.* Vol. 8 (2005) 157 - 166).  
<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>
- [24] Anne Labouret, Michel Viloz : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3ème édition 2006.
- [25] HANANOU Fatih et ROUABAH Aicha << Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque>> Thème de Master , Université Kasdi Merbah ouargla.2014 .
- [26] SAHRAOUI Mebarek. Commandes non linéaires de la machine asynchrone, mémoire master, université de M'SILA 2013.
- [27] Bendjellouli Zakaria :« Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » ,mémoire de Magister, Université de Bechar,2009.
- [28] Otmene Benseddik, Fathi Djaloud : « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », thèse de Magister, Université de Ouargla, 2011/2012.
- [29] A.L. Nemmour, « Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Magister ,soutenue à l'université de Batna en 2001..
- [30] Khettache Laid :« Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine

électrique », thèse de Magister, Université de Batna ,2007.

[31] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.

[32] Salim.ABOUDA.<< Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïques>>Thèse. Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax.2015

[33] C. CABAL 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ', Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.

[34][www.hespul.org](http://www.hespul.org)

[35] BELHADJ. Mohammed<<Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome>>Mémoire de Magister,2007 -2008.

[36] Z. Bendjellouli ' Contribution a la modélisation d'une cellule solaire', Mémoire de magister université de bachar, 2009.

[37] O. BELABBASSI, M. REZMA 'Contribution a l'étude et dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque / réseau sone gaz' mémoire d'ingénieur d'état université de Laghouat, 2011.

[38] Makhlof Messaoud : « Modélisation et optimisation de systèmes de production d'énergies renouvelables couplés au réseau », thèse de Doctorat, Université de Constantine 2012.

[39] J.Y. LE Chenadec, « Les machines synchrones : Technologies et différents modes D'alimentations des machines synchrones », Cours photocopiés, Lycée Louis ARMAND, Nogent sur Marne, 1997

[40] - B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993

[41] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy « Le pompage photovoltaïque », Manuel de

- cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens Bibliothèque nationale du Canada, 1998,
- [42] F.Labrique , G.Segulier, R.Baussiere «Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec.Doc.Paris 1995
- [43] <https://www.coursuniversel.com/convertisseurs-statiques/>
- [44] K. Benlarbi « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thèse de Magister, Université de Batna 2003.
- [45] A. Betka « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil », Thèse de Magistère, Université de Biskra.1997
- [46] J. M. Hirtz « Les stations de Pompage D'eau », Lavoisier TEC & DOC 1991
- [47] N.Nooma, SONG.Taaba « Groupe motopompe » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2004
- [48] J.Royer T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy « Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [49] N.Nooma, SONG.Taaba « Groupe motopompe » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2004
- [50] Z. Rouabah « Modélisation et commande vectorielle d'une machine à induction avec Prise en compte et minimisation des pertes »Thèse de magister, Université de Batna 2001.
- [51] « Mr MIHOUB Youcef » ; « Commande floue adaptative de la machine asynchrone » « MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTEUR EN SCIENCE à l'université de Mohamed Boudiaf D'Oran », « Année 2012 ».
- [52] A. Saibi, M. O. H. Mahmoudi, L. Nazli, "Commande par mode de glissement d'une machine synchrone double étoile alimentée par onduleurs à MLI à trois niveaux" 4th International Conference on Electrical Engineering, CEE'06, Batna University, pp. 215–220, 7–8 November 2006.