



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energie Renouvelable

Par

ELAHOUEL SIDAHMED

HADDA SAMIA

Intitulé du sujet :

**Modélisation Et Commande D'une Machine Asynchrone Alimentaire
Par Une Système Photovoltaïque**

Soutenu le / / 2022 devant le jury composé de :

Président :	Chaouch Abdellah	MCB	Université de Mostaganem.
Examineur :	Omari Hamza	MAA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Boutlilis Fatima	MCA	Université de Mostaganem
Co-Rapporteur :	Bekkouche Benaissa	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENT

Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à remercier profondément le **Dieu**, le tout Puissant de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à **Mme F. BEKKOUCHE**, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux,, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.*

Nous remercions les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nous remercions profondément les étudiants du groupe Master 2 en IND ainsi que les fonctionnaires de la bibliothèque des thèses.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, mes sœurs

A ma famille

A mon fiancé

A mes sœurs sara, amina et meriem

Mes amis(es).

Mes proches.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*La mémoire de mon cher père que DIEU l'accueil en son vaste
Paradis.*

Ma très chère mère.

A ma fiancé

*Mes sœur halima et
amina.*

Mes frères : djeloul et mahdi.

Mes amis (es).

Mes proches.

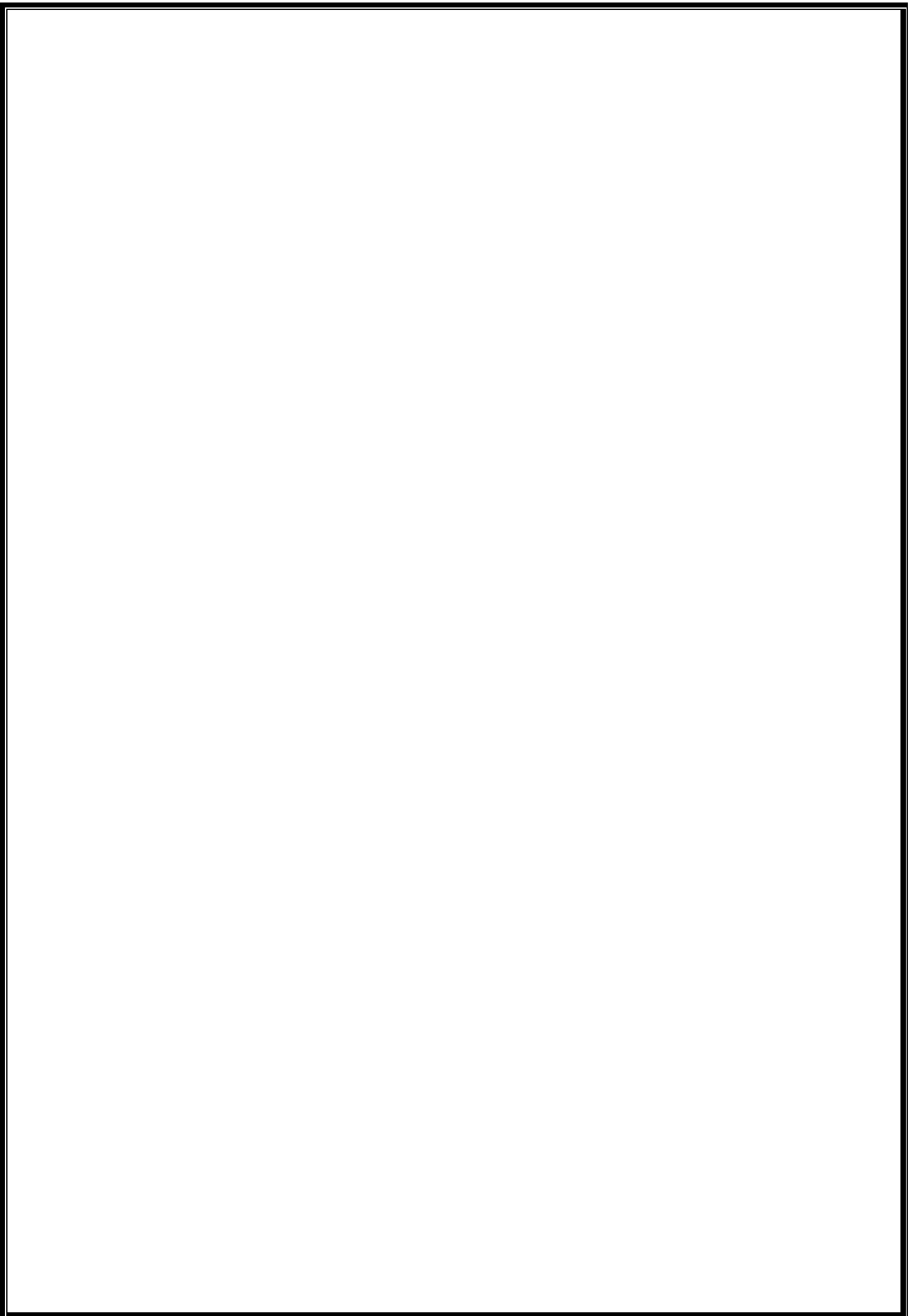
Toute la communauté de l'Electronique.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
مَنْ كَفَرَ بِاللَّهِ مِنْ بَعْدِ إِيمَانِهِ
سَاءَ مَا يَحْكُمُهُ يَوْمَ الْقِيَامَةِ
سُبْحَانَ اللَّهِ عَمَّا يُشْرِكُونَ

سنة ١٤٢٠ هـ

SOMMAIRE



CHAPITRE 01 : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction.....	03
I.2 Historique et développement du photovoltaïque.....	03
I.3 Le photovoltaïque en Algérie	03
I.4 Aperçu sur le rayonnement solaire.....	04
II.1 Générateur photovoltaïque.....	05
II.2 Principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque.....	05
II.3 Caractéristiques et modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	07
III.1 Influence des paramètres internes et externes sur la caractéristique $I_{pv}(V_p)$ d'une cellule photovoltaïque.....	09
a) Paramètres internes : influence de la résistance série et parallèle.....	09
b) Paramètres externes : influence de l'ensoleillement et de la température.....	10
c) Les différentes technologies de fabrication de cellules.....	12
IV.1 Limites pratiques et avantages du photovoltaïque.....	13
V.1 Système photovoltaïque autonome.....	13
VI.1 Système photovoltaïque hybride autonome.....	15
VI.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	16
a) Description	16
b) Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage.....	16
c) Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie de stockage.....	17
VII.1 Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque).....	17
VII.2 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque.....	18
a) Systèmes de petite puissance (50-400W).....	18
b) Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W).....	19
VII.2.1 Technologie des moteurs	20
a) Moteur à courant continu.....	20
b) Moteur à courant continu sans balais.....	21
c) Moteur a courant alternatif.....	21
VIII. Conclusion.....	22

CHAPITRE 02 : MODELISATION ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV

I.1 Introduction	24
II.1 Modélisation des différents éléments d'un système de pompage PV	24
A. Générateur photovoltaïque GPV.....	24
III.1 Association des photopiles, Module PV	27
a) Association en série.....	28
b) Association en parallèle.....	29
IV.1 Convertisseur DC/DC Boost.....	29
IV.2 Fonctionnement du convertisseur.....	30
IV.2.1 Modèle mathématique.....	31
V. Optimisation du générateur photovoltaïque.....	35
V.1 Principe du MPPT.	35
V.2 Différents types de la commande MPPT.....	36
a) Méthode de recherche analogique.....	36
b) Méthode de recherche numérique	37
V.3 Techniques de commande MPPT	37
a) Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	37
b) Méthode Open-and-Short-Circuit.	39
VI. Onduleur de tension.....	39
VI.1 Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale PWM.....	40
VI.2 Représentation générale.....	41
VII. Commande vectorielle.....	44
VII. Calcul des régulateurs.....	46
a) Régulation de flux.....	46
b) Régulation des courants.....	47
c) Régulation de vitesse.....	48
VIII. Description du système global.....	49
IX. Modélisation de la pompe centrifuge.....	50
a) Hauteur manométrique totale.	50
b) Pertes de charges linéaires.....	50
c) Pertes de charges singulières (locales)...	50
d) Caractéristique débit-hauteur.....	51
e) Caractéristique couple vitesse C (ω) de la pompe.	51
f) Calcul de puissance.....	51

X. Conclusion.....	52
--------------------	----

CHAPITRE 03 : DIMENSIONNEMENT ET SIMULATION

I. Introduction.....	54
II. Dimensionnement du générateur photovoltaïque et la pompe.....	54
A. Énergie requise pour la pompe.....	55
B. Énergie hydraulique	55
C. Énergie électrique.....	56
D. Puissance crête des panneaux photovoltaïques	56
E. Nombre total de panneaux	56
F. Nombre de panneaux en série.....	56
G. Nombre de branche en parallèle	56
III. CHOIX DE MATERIEL	57
III.1 Choix de la pompe.....	57
IV. simulation du système global.....	58
A. Description du système de pompage étudié.....	59
B. Choix de la motopompe et du générateur PV.....	59
C. Fonctionnement sous des conditions constantes	59
D. Résultats de simulation.....	60
V. CONCLUSION	66

List des figures

CHAPITRE 1

Fig.I.1 Rayonnement dans le monde (kWh/m ² .an).....	04
Fig.I.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	05
Fig.I.3 Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.....	06
Fig.I.4 Distinction de terminologie.....	07
Fig.I.5 A gauche, la caractéristique d'une photodiode et à droite la caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	07
Fig.I.6 Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.....	08
Fig.I.7 Influence de la résistance série sur la caractéristique I _{pv} (V _p)... ..	09
Fig.I.8 Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I _{pv} (V _p)	10
Fig.I.9 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I _{pv} (V _p) à température constante.....	10
Fig.II.10 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P _v (V _p)... ..	11
Fig.II.11 Influence de la température sur la caractéristique I _{pv} (V _p) à un l'ensoleillement constant.. ..	11
Fig.II.12 Influence de la température sur la caractéristique P _v (V _p) à un ensoleillement constant.. ..	11
Fig.I.13 Installation photovoltaïque autonome.....	14
Fig.I.14 Plan schématique d'un système hybride PV-diesel pour l'électrification rurale	16
Fig.I.15 Installation photovoltaïque relié au réseau.....	17
Fig.I.16 Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque.. ..	18
Fig.I.17 Systèmes de petite puissance.. ..	19
Fig.I.18 Les systèmes de moyenne puissance	20

CHAPITRE 2

Fig.II.1. Système de pompage PV étudié.. ..	24
Fig.II.2 Structure d'une cellule photovoltaïque.. ..	25
Fig.II.3 Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique I(V) d'une cellule PV.....	27
Fig.II.4 Différents types de modules PV.. ..	28
Fig.II.5 Cellule en séries.....	28
Fig.II.6 Cellules en parallèles.....	29

Fig.II.7 Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.....	29
Fig.II.8 Convertisseur Boost durant l'état on.....	30
Fig.II.9 Convertisseur Boost durant l'état off.....	30
Fig.II.10 Formes typiques d'onde du convertisseur boost.....	31
Fig.II.11 Courbe de transfert du convertisseur de type Boost.....	32
<i>Fig.II.12 Variations de P pour G constant et T variable.....</i>	<i>35</i>
Fig.II.13 Variations de P pour T constant et G variable.....	35
Fig.II.14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	36
Fig.II.15 Schéma du principe de la méthode P&O.....	38
Fig.II.16 Algorithme de la méthode Perturb & Observ.....	38
Fig.II.17 Schéma simplifié d'un onduleur triphasé utilisé pour le pompage PV.....	39
Fig.II.18 Principe de la stratégie triangulo-sinusoïdale.....	40
Fig.II.19 Représentation schématique d'une MAS.....	41
Fig.II.20 Représentation schématique de la commande vectorielle.....	46
Fig.II.21 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation du flux rotorique.....	46
Fig.II.22 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation des courants statoriques.....	47
Fig.II.23 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de la vitesse.....	48
Fig.II.24 Schéma global de la commande vectorielle d'une MAS.....	49
Fig.II.25 Caractéristiques H (Q) et caractéristique de canalisation.....	51

CHAPITRE 02

Fig.III.01 Caractéristique de la pompe utilisée.....	57
Fig.III.02 Catalogue et abaque des pompes.....	58
Fig.III.03 Bloc de simulation du système complet.....	59
Fig.III.04 L'allure de l'évolution du courant a la sortie de PV(I_{pv}) en fonction de temps.....	61
Fig.III.05 L'allure de l'évolution de puissance absorbée dans PV en fonction de temps.....	61
Fig.III.06 L'allure de l'évolution de la tension dans le PV(V_{pv}) en fonction de temps.....	61
Fig.III.07 tension du bus continu V_{dc}	62
Fig.III.08 L'allure du courant de sortie i_{sd} et i_{sq}	63
Fig.III.09 L'allure de l'évolution de Le flux magnétique en fonction de temps.....	63
Fig.III.10 L'allure d'évolution Couple Mesuré et la référence.....	64
Fig.III.11 L'allure de l'évolution de La puissance de MAS en fonction de temps.....	64

Fig.III.12 L'allure de l'évolution de courant Rotorique en fonction du temps	65
Fig.III.13 Vitesse de Rotation.....	65
Fig.III.14 Les paramètres utilisés.....	66

Liste des Tableau

Tableau I. 1 caractéristique des différentes technologies des cellules PV.....12

Tableau I.2 : résumé des avantages et les inconvénients des moteurs22

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Parmi les grands enjeux des temps modernes, l'approvisionnement en eau, soit pour la consommation domestique (de personnes), soit pour l'agriculteur (élevage et irrigation) [01]. Ce problème est lié directement à un autre enjeu qui est l'apport de l'énergie nécessaire.

En Algérie, malgré les grands efforts et travaux réalisés par la SONELGAZ, plusieurs régions restent non connectées au réseau public d'électricité. Citons par exemple les régions sahariennes qui se situent loin des villes.

Ceci constitue un inconvénient majeur pour les agriculteurs, car pour eux l'eau est suffisamment disponible. Mais l'énergie requise est soit absente, soit très chère à obtenir.

Plusieurs ressources d'énergie renouvelables ont été découvertes ces dernières années, notamment, l'énergie éolienne, hydraulique et l'énergie photovoltaïque, cette dernière est l'une des énergies les plus renouvelables dans le monde

L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire photovoltaïque(PV) est le pompage de l'eau, en particulier dans les zones rurales qui ont une quantité considérable de rayonnement solaire et n'ont pas accès aux réseaux électrique. Les systèmes PV de pompage utilisent généralement des pompes de faible puissance allant de 200-2000 W. Ils sont largement utilisés pour l'approvisionnement en eau potable pour les ménages, l'apport en eau pour les bétails et l'irrigation à petite échelle.

Un système de pompage d'eau photovoltaïque est généralement alimenté par un système comprenant un générateur photovoltaïque, un groupe moteur-pompe et un réservoir d'eau pour assurer la continuité de l'approvisionnement lorsque l'énergie solaire ne suffit pas.

Deux types de systèmes peuvent être utilisés, le premier est constitué d'un générateur PV couplé directement à un groupe motopompe, le deuxième est composé d'un générateur PV couplé à une motopompe CC ou AC à travers un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour la machine continue et toujours un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT couplé à un convertisseur continu alternatif pour la machine alternative.

Généralement, les systèmes photovoltaïques nécessitent des batteries, d'un chargeur, d'une hachure et d'un onduleur de tension. Dans cette connexion la MPPT est conçu pour contrôler le chargeur de batterie ou le convertisseur de puissance pour améliorer l'efficacité du système. On constate que le coût du système est augmenté en raison de l'utilisation de plusieurs composants.

La tension du générateur PV peut être utilisée directement sans utiliser le hacheur. En outre, la MPPT peut être réalisée en contrôlant la vitesse du moteur. Cette simple connexion présente certains avantages tels que, le hachure, la batterie et son chargeur ne sont pas requis. En désavantage, on peut dire que ce système ne fonctionne que pendant la journée. S'il est nécessaire de travailler pendant toute la journée, un système de stockage peut être facilement ajouté à ce système.

Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque dans un système de pompage solaire.

Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O) et MPPT basé sur le filtre de Kalman.

Ainsi, nous présentons dans ce projet la simulation sous MATLAB/SIMULINK d'une commande MPPT basée sur deux algorithmes MPPT qui sont P&O, et MPPT basé sur le filtre de Kalman.

Ce mémoire a été divisé en trois chapitres dont le contenu est résumé ci-dessous :

- ✓ Le premier chapitre donne une description générale des systèmes photovoltaïques, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant notre système de pompage
- ✓ Dans le deuxième chapitre en s'intéresse à la modélisation d'un système de pompage photovoltaïque à l'optimisation de ce système
- ✓ Dans le second chapitre, on passe en revue au dimensionnement des différents éléments de système de pompage photovoltaïque. Un moteur MSAP et modèle d'une pompe immergée sont proposés.

CHAPITRE 1

ÉTUDE DES

SYSTEMES

PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de dix années, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an [1].

Cette croissance galopante est due principalement aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution d'électricité. Elle se traduit notamment par d'importantes innovations technologiques et une baisse de coût des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

Ainsi, nous allons présenter dans ce chapitre les notions générales sur le photovoltaïque et sur le rayonnement solaire. Nous parlerons aussi des systèmes photovoltaïques en mettant l'accent sur celui raccordé au réseau électrique.

I.2 Historique et développement du photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. En 1839 le français Antoine Edmond Becquerel fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie. Mais il a fallu les années 1930 pour que la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique voie le jour avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954 avec la réalisation des premières cellules PV au sélénium dans les laboratoires de la compagnie BellTelephoneLaboratories, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard. Au cours des années 1980, la technologie PV terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. Les premières installations ont été conçues pour sites isolés, principalement dans les pays en voie de développement. Par la suite, la technologie est même devenue familière à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. Des événements tels que les courses de véhicules solaires offrant une image de haute technologie futuriste et écologique y ont également contribué [2].

I.3 Le photovoltaïque en Algérie

La quasi-totalité de la production électrique algérienne repose actuellement sur les combustibles fossiles (99,6%). Les sources renouvelables assurent le complément et se répartissent entre l'hydroélectricité (0,4% du total) et le solaire (0,01% du total).

Disposant de vastes étendues désertiques, d'une façade maritime de 1 200 km et d'une superficie de 2 millions et demi de km², largement ouverte aux vents, l'Algérie pourrait utiliser diverses techniques à même de produire en grande quantité de l'électricité. Les experts ainsi que les responsables des institutions concernées estiment la production d'électricité renouvelable est en devenir [3].

L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus importants au monde [4] :

- Durée d'ensoleillement + 2000 h/an, voire 3900 h/an dans hauts plateaux et Sahara,
- Energie reçue sur 1 m² = 5 KWh/j, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays.

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Pour que l'Algérie préserve les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire. Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a chargé la Sonelgaz (groupement algérien chargé de la production, le transport et de la distribution de l'électricité et du gaz dans le pays) de construire la centrale électrique mixte de Hassi R'Mel, mise en service en 2011 à Tilghemt dans la wilaya de Laghouat dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts (30 MW solaire thermodynamique + 120 MW gaz) [5].

La première usine privée algérienne de fabrication de panneaux solaires est opérationnelle à partir du mois de mars 2012 avec un taux d'intégration nationale de 90 %.

A noter que les prévisions de production à partir du solaire photovoltaïque devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité [4].

I.4 Aperçu sur le rayonnement solaire

La conception de systèmes PV nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site d'installation, dans le plan des panneaux solaires. C'est l'un des paramètres essentiels de l'étude préalable ; pour un besoin électrique donné, plus d'énergie reçue implique moins de panneaux à installer et inversement, d'où notre intérêt à en donner un aperçu tout en insistant sur cette partie dans le second chapitre consacré au dimensionnement.

Le rayonnement est l'énergie transportée par des ondes électromagnétiques. La surface du soleil qui nous envoie le rayonnement est appelée la photosphère et se trouve à une température de 5777[K]. L'énorme quantité d'énergie émise par le soleil trouve sa source dans les réactions nucléaires qui y ont lieu. Le rayonnement émis par le soleil se rapproche fort de celui d'un corps noir à la température de 5777 [K] [7].

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée et la plus abondante, sur terre. Sa répartition est donnée sur la figure (I.1) :

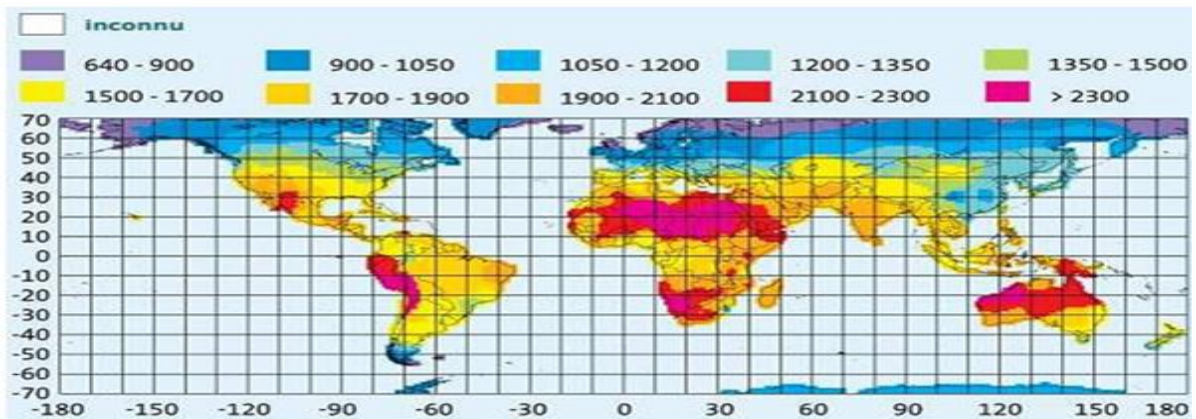


Fig.I.1 Rayonnement dans le monde (kWh/m².an)

Le rayonnement solaire émis en direction de la terre est intercepté par son atmosphère, à ces frontières une certaine quantité de rayonnement solaire ou des photons sont absorbés, une certaine quantité est reflétée de nouveau dans l'espace, et une partie la traverse. Passant par l'atmosphère, le faisceau solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes complexes d'absorption, diffusion et de dispersion par les gaz, les aérosols, poussières et les gouttelettes d'eau en suspension dans les nuages etc. De ce fait le rayonnement solaire atteint le sol sous différentes formes à savoir le rayonnement dispersé atteignant la

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

surface de la terre désignée sous le nom du rayonnement diffus, le rayonnement direct provenant directement du disque solaire sans subir des modifications et également le rayonnement reflété par la terre à différentes longueurs d'onde dues à la température de sa surface. Le rayonnement réfléchi par la surface terrestre est renvoyé dans une direction privilégiée (réflexion dite spéculaire) ou de manière diffuse. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope. La quantité d'énergie transportée par le rayonnement solaire à la surface terrestre dépend de certaines considérations géométriques dues au mouvement apparent du soleil et aux mouvements de la terre. En dehors de l'atmosphère d'autres facteurs majeurs agissent sur le rayonnement solaire reçu à la surface de la terre. En effet La rotation et l'inclinaison de la terre font que l'énergie disponible en un point donné à sa surface varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire diffus.

II.1 Générateur photovoltaïque

L'énergie solaire fait appel à la ressource la mieux partagée : le rayonnement solaire.

L'énergie solaire peut être récupérée de deux façons : le photovoltaïque pour la production d'électricité et le thermique pour la production de chaleur. Il est à noter que l'homme consomme, aujourd'hui, une énergie correspondant à 1/8000ème de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre [6]. Mais notre intérêt porte sur la première forme de conversion.

II.2 Principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque

Le phénomène de conversion photovoltaïque est dû à la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière, selon le concept décrit ci-après :

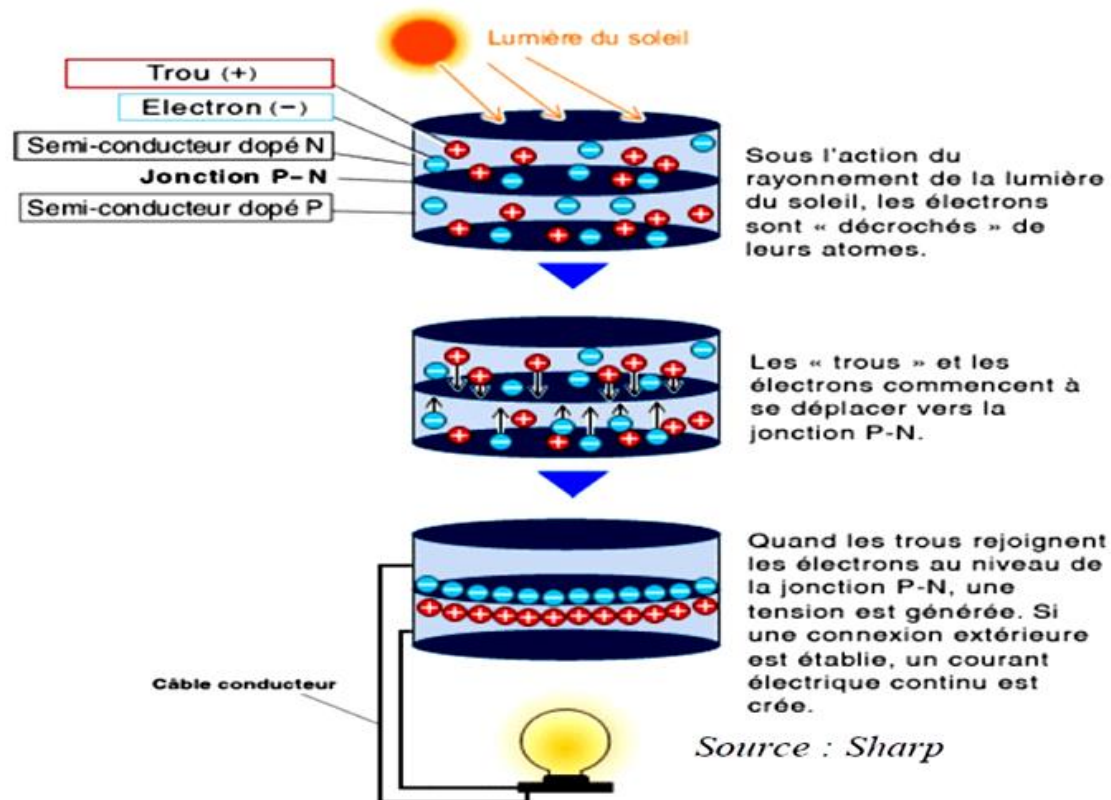


Fig.1.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique l'effet photovoltaïque soit la technologie associée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie

$$W_{ph} = h * \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec c la célérité de la lumière, λ la longueur d'onde et h la constante de Planck.

Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap $W_g = W_c - W_v$ de ce semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence W_v à la bande de conduction W_c en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction [7]. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement au passage des porteurs majoritaires. Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons de valence ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

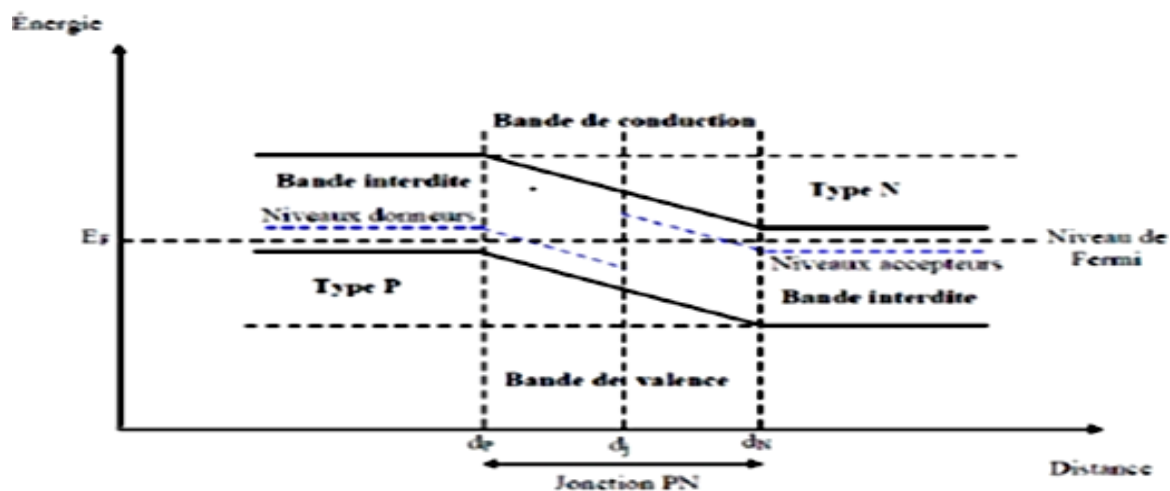


Fig.1.3 Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

La puissance des modules PV s'exprime en Watts-crête (W_c) ou en Watts-peak (W_p). Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale) sous les conditions standards (un spectre AM 1.5 sous un éclairage de $1000 [W/m^2]$ et une température de la cellule de $25 [^{\circ}C]$) de fonctionnement.

Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque. Plusieurs

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

panneaux qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque ou générateur photovoltaïque GPV.

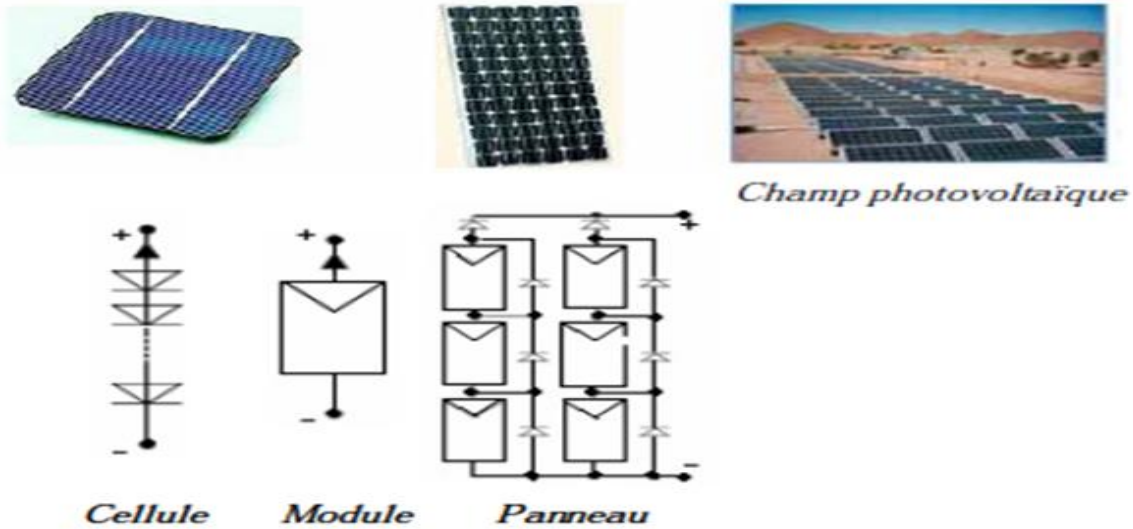


Fig.I.4 Distinction de terminologie

II.3 Caractéristiques et modélisation d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques de la simple cellule sont celles d'une photodiode, mais en convention générateur. Elles sont données par la figure suivante :

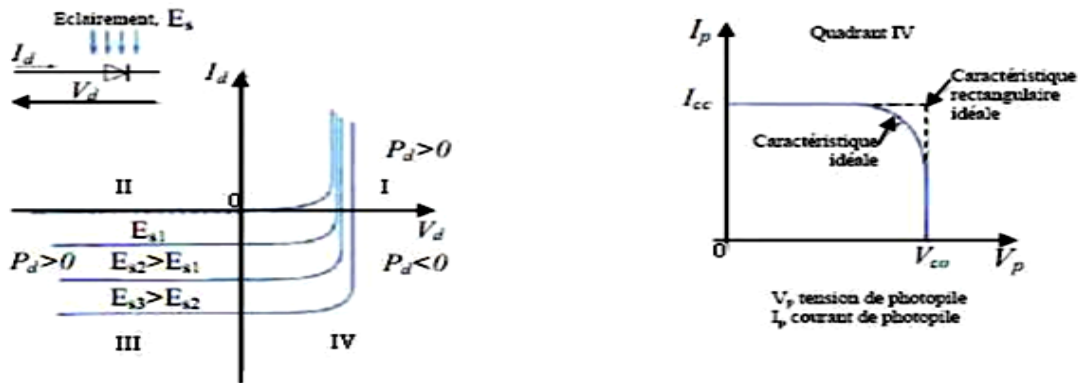


Fig.I.5 A gauche, la caractéristique d'une photodiode et à droite la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV peut donc se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série r_s et shunt r_{sh} , tel que le montre le schéma électrique équivalent de la figure (I.6). La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule, elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule .

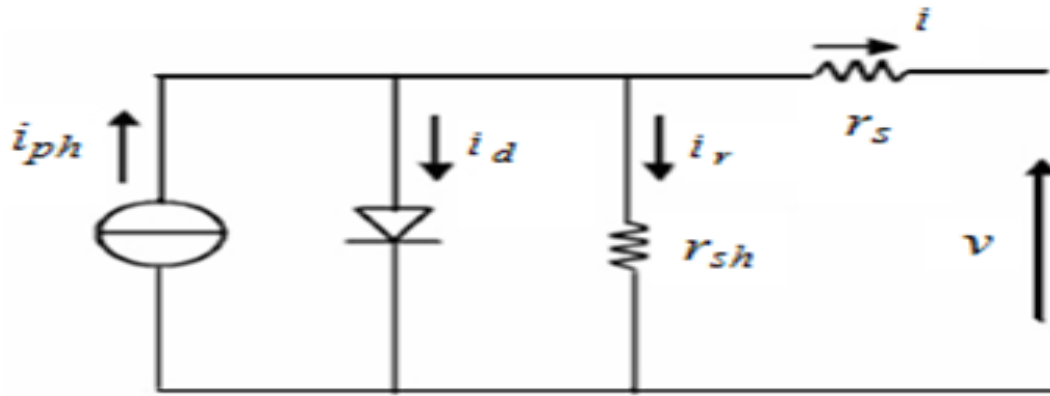


Fig.I.6 Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

Où :

r_{sh} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction ;

r_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions ;

i : le courant fourni par la cellule et v la tension à ses bornes ;

i_{ph} : le photocourant, i_d : le courant parcourant la diode et i_r celui parcourant la résistance shunt.

Donc on a :

$$i = i_{ph} - i_r - i_d \tag{I.2}$$

$$i_r = \left(\frac{V + r_s \cdot i}{R_p} \right) \tag{I.3}$$

$$i_d = I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{V + i \cdot r_s}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) \tag{I.4}$$

$$V_t = \frac{K \cdot T}{q} \tag{I.5}$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule ;

$i_{ph} = I_{sc} \cdot \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G) ;

I_0 : Le courant de saturation de la diode ;

V_t : Tension thermique à la température T

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

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

n : Le facteur de qualité de diode ;

T : La température de cellule en kelvin.

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte de l'effet de la température, un modèle plus complet sera proposé dans le chapitre III.

Une cellule réelle peut être caractérisée par les paramètres principaux présentés par la figure I.5:

Le courant de court-circuit I_{cc} : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle.

Tension du circuit ouvert : C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur PV ou la cellule est nul.

Puissance optimale : La puissance maximale ($P_m = V_m \times I_m$), que peut fournir une cellule ou un panneau photovoltaïque dans les conditions STC.

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou " fill factor ", il nous renseigne sur la performance des cellules et est défini par:

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{CO} * I_{CO}} \quad (1.6)$$

$$\text{Le rendement est donné par la formule : } \eta_{STC} = \frac{P_m}{E * S} \quad (1.7)$$

E : L'éclairement (W/m^2)

S : la surface de la cellule (m^2)

III.1 Influence des paramètres internes et externes sur la caractéristique $I_{pv}(V_p)$ d'une cellule photovoltaïque.

a) Paramètres internes : influence de la résistance série et parallèle.

Les figures (I.7 et I.8) montrent l'influence de la résistance série et parallèle sur la caractéristique $I_{pv}(V_p)$ [9].

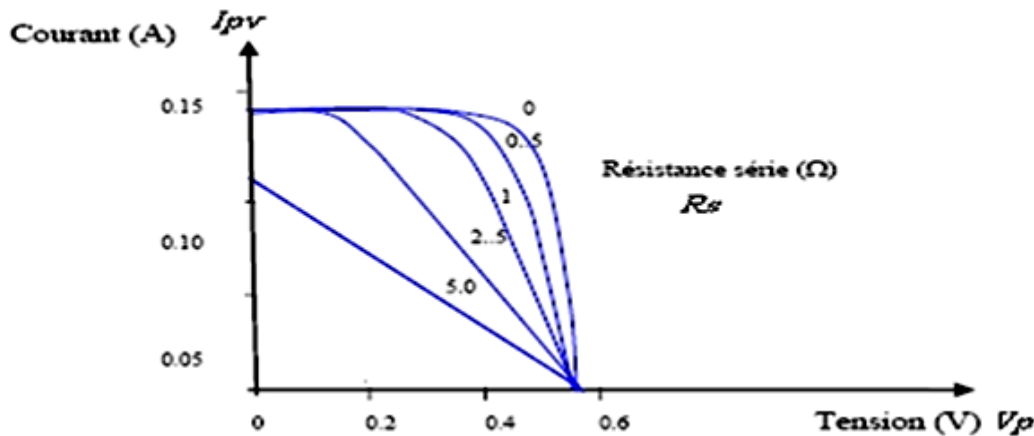


Fig.I.7 Influence de la résistance série sur la caractéristique $I_{pv}(V_p)$

La Figure (I.7) traduit l'influence de la résistance série sur la caractéristique de la cellule. On observe notamment la diminution de la pente de $V_p(I_{pv})$ dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension pratiquement constant. Mais lorsque (R_s) est anormalement élevée, la résistance série diminue notablement le courant de court-circuit (I_{cc}).

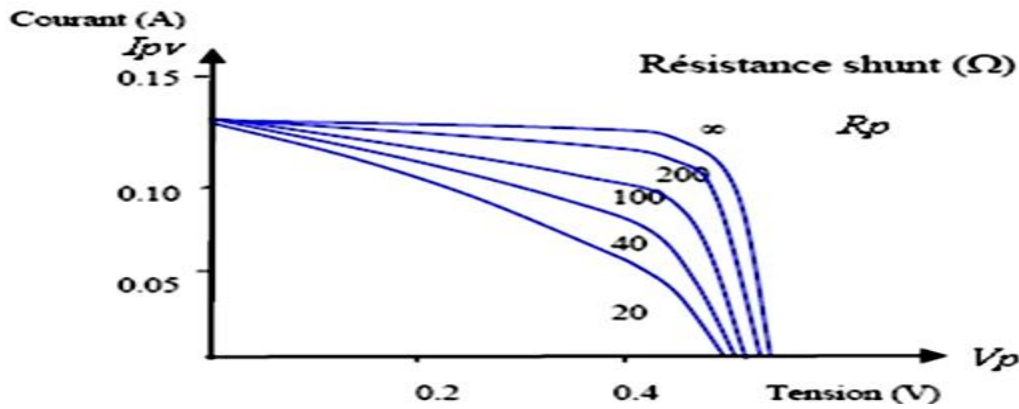


Fig.I.8 Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I_{pv} (V_p)

Comme on le voit sur la figure (I.8), la résistance shunt se traduit par une diminution légère de la tension de circuit-ouvert, et une certaine augmentation de la pente de la caractéristique de la cellule dans la zone où elle fonctionne en générateur de courant presque constant.

b) Paramètres externes : influence de l'ensoleillement et de la température

Le courant produit par la cellule photovoltaïque (I_{ph}) est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire (E). Par contre, sa tension (V_p) reste quasi constante. La tension de circuit ouvert ne diminue que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique que la puissance de la cellule est aussi proportionnelle à l'éclairement (voir Figure (I.9, I.10)).

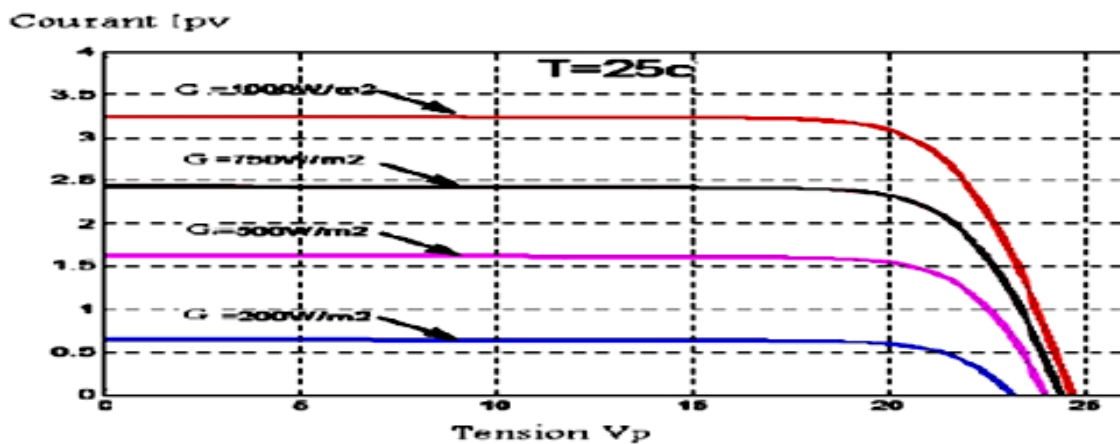


Fig.I.9 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I_{pv} (V_p) à température constante

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

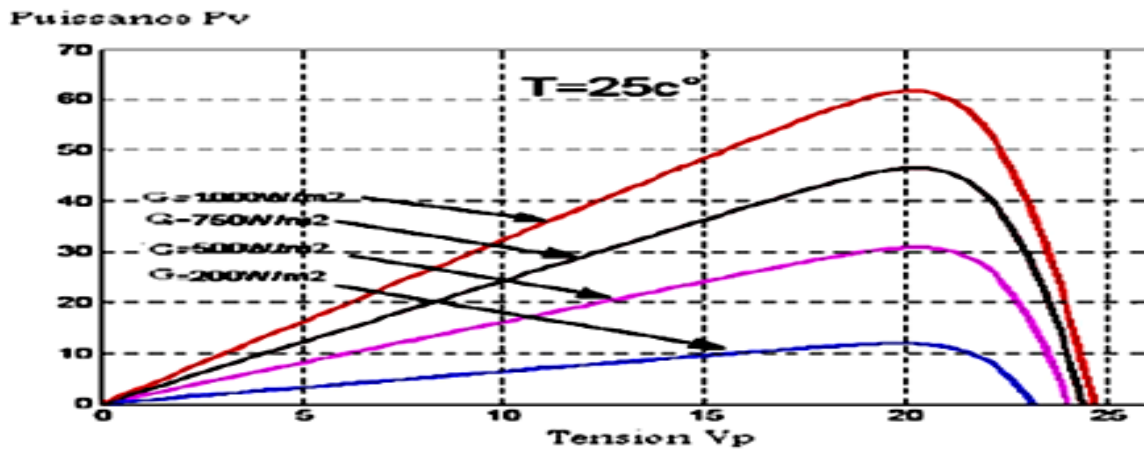


Fig.I.10 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P_v (V_p)

Lorsque la température change, on peut observer que la tension change considérablement alors que le courant reste pratiquement constant. On en déduit que la puissance de sortie de la cellule solaire dépend aussi de la température.

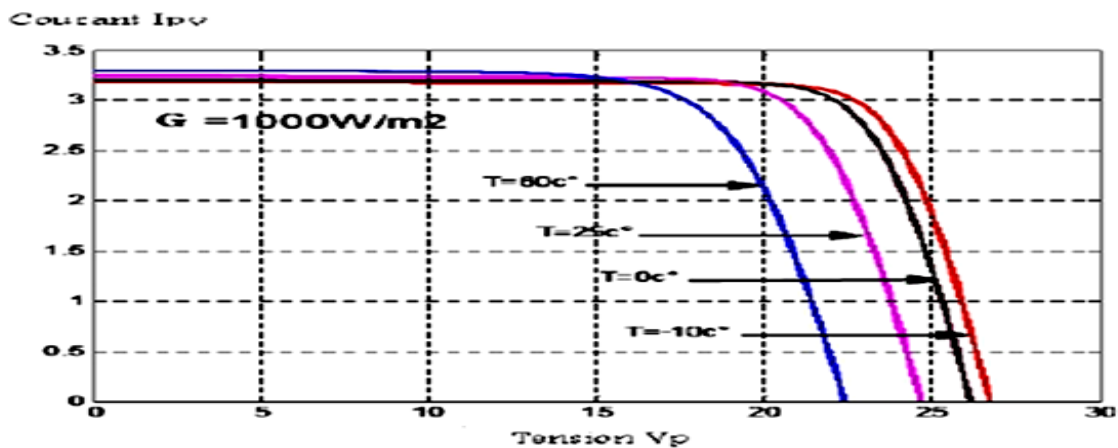


Fig.I.11 Influence de la température sur la caractéristique I_{pv} (V_p) à un l'ensoleillement constant

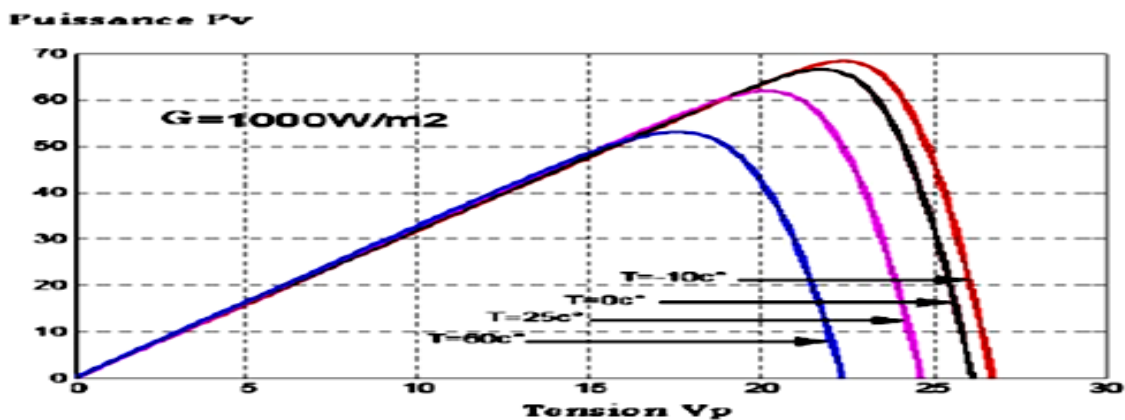


Fig.I.12 Influence de la température sur la caractéristique P_v (V_p) à un ensoleillement constant

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

c) Les différentes technologies de fabrication de cellules

Il y'a plusieurs technologies de fabrication des cellules photovoltaïques, qui sont résumés dans un tableau comparatif ci-dessous :

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono Cristallin	12 à 18 % (24,7 % en laboratoire).	20 à 30 ans.	Très performant. Stabilité de production d'énergie. Méthode de production couteuse etlaborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades, ...
Silicium Polycristallin	11 à 15 % (19,8 % en laboratoire).	20 à 30 ans.	Adapté à la production à grande échelle. Stabilité de production d'énergie (plus de 50 % de la production mondiale).	Modules pour toits, façades, générateurs, ...
Amorphe	5à8% (13 % en laboratoire).		Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. Fonctionnement sous faible luminosité. Fonctionnement par temps couvert. Fonctionnement sous ombrage partiel. La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20 % supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices, ...), intégration dans le bâtiment.
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20 % (27,5 % en laboratoire).		Lourd, fissure facilement.	Systèmes de concentrateurs aérospatiaux (satellites).
Composite poly cristallin (CdS,CdTe, CuInGaSe2, etc.)	8% (16 % en laboratoire).		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes.	Appareils électroniques (montres, calculatrices, ...), intégration dans le bâtiment.

Tableau I. 1 caractéristique des différentes technologies des cellules PV

Les cellules PV au silicium cristallin (mono ou multi) représentent la majorité de la production mondiale (29 et 51% de la production mondiale). Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques autre que la technologie « silicium » existent mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche. Elles sont appelées à s'imposer là où les technologies du silicium et, plus largement, de l'inorganique sont ou seront mal positionnées. Il s'agit des cellules composites et organiques.

IV.1 Limites pratiques et avantages du photovoltaïque

a) Avantages

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- Ils sont de fonctionnement sûr, non polluant et silencieux ; L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.
- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite nicombustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

b) Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

V.1 Système photovoltaïque autonome

Ce système fournit de l'électricité pour un bâtiment ou un autre consommateur qui n'est pas relié au réseau. Ces systèmes autonomes possèdent plusieurs domaines d'applications et ont en commun la description suivante :

a) Description

Ce système, indépendant d'autres sources d'énergie produit l'énergie grâce aux panneaux solaires photovoltaïques qui est utilisée immédiatement ou stockée dans des batteries pour être utilisée ultérieurement. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif.

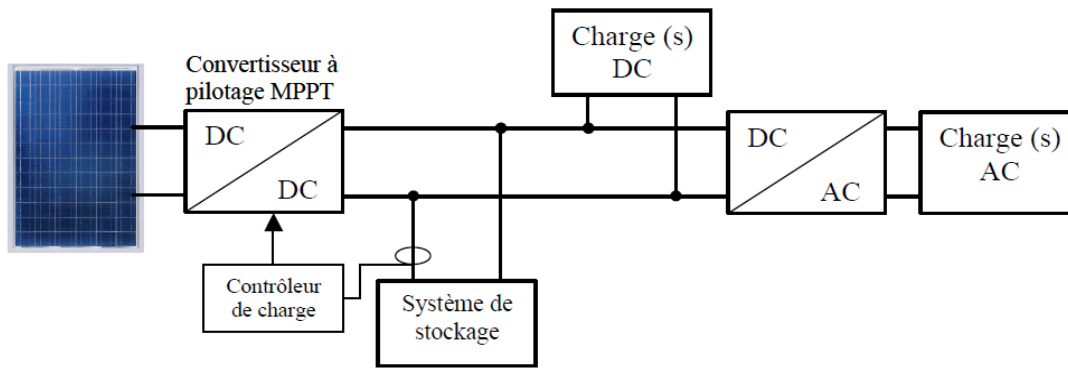


Fig.I.13 Installation photovoltaïque autonome

b) Avantages

- Conversion directe d'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité,
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans),
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour),
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente,
- Sécurité absolue si l'installation est conforme,
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel [11].

c) Inconvénients

Sa puissance limitée est variable selon la saison (conditions météorologiques), entraînant une diminution de la consommation suite à la baisse de la production, au risque de détruire la batterie par décharge profonde. Lorsque les conditions sont favorables à la production et que toute la capacité de stockage est totalement utilisée, l'arrêt de la production, donc le délestage semble la seule solution. Ces systèmes sont plus coûteux à cause des batteries.

Le coût initial des systèmes PV est élevé, même si la rentabilité à long terme est assurée. De même l'électricité solaire photovoltaïque n'est pas économiquement viable pour les charges thermiques de type cuisson, chauffage, ou repassage.

d) Applications

Conçu généralement pour l'électrification des bâtiments ou d'un autre consommateur isolé, le système autonome peut être utilisé dans les domaines comme :

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

❖ **Domaine professionnel**

- Elles concernent des secteurs comme :
- Les communications, par l'alimentation des relais de télécommunication souvent situés dans des zones peu accessibles ou exclues du réseau électrique.
- Le transport, pour l'alimentation des dispositifs de signalisation ou de balisage terrestre, aérien et maritimes placés sur des sites isolés.
- Le mobilier urbain principalement pour l'équipement des éléments de voirie comme : les lampadaires, les enseignes publicitaires, les panneaux d'affichage, etc.

❖ **Domaine spatial**

Ce secteur possède la meilleure technologie en termes de rendement de l'énergie photovoltaïque et fait partie des premiers domaines à l'avoir utilisé.

❖ **Domaine domestique ou agricole**

Le système photovoltaïque permet l'électrification des habitations rurales, des centres de santé, des îles en compensant le déficit du réseau électrique ou d'activité agricoles, comme l'utilisation du pompage solaire au fil de l'eau.

❖ **Domaine de l'électronique**

Ce domaine d'utilisation s'applique aux petits appareils électroniques de très faible consommation, comme les téléphones mobiles, les applications nautiques les calculatrices, les étiquettes électroniques, très souvent équipés de mini-générateurs photovoltaïques au silicium amorphes.

VI.1 Système photovoltaïque hybride autonome

• **Description**

Systèmes hybrides indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène, ou aux deux à la fois. Ces systèmes peuvent posséder des batteries qui peuvent aussi être rechargées par l'autre source en cas de décharge.

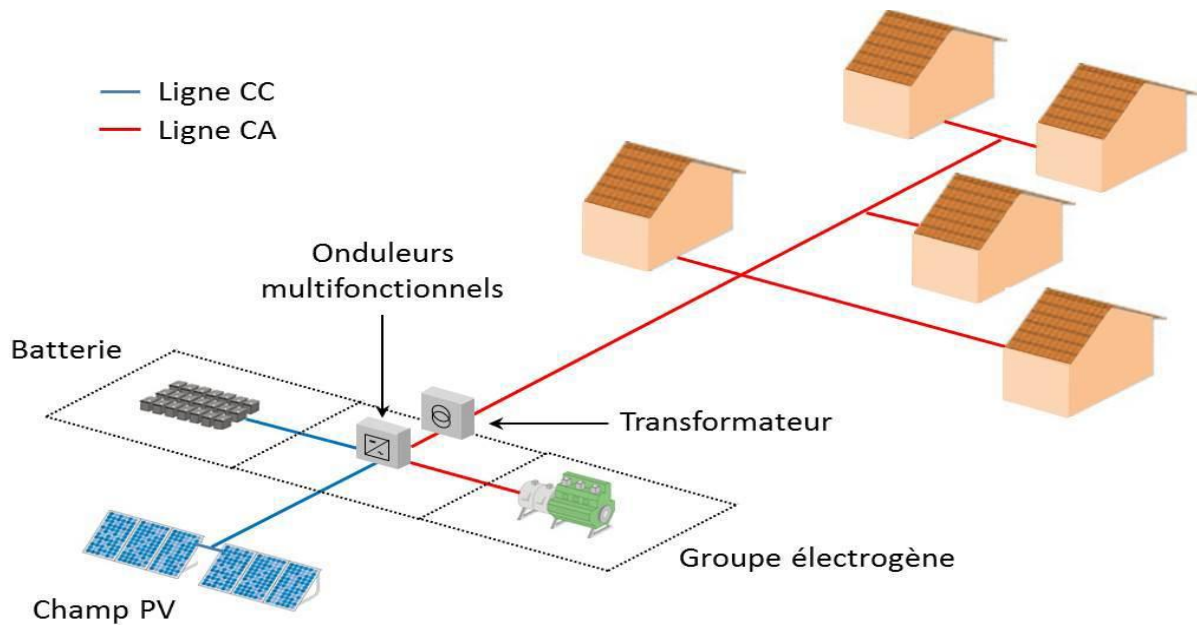


Fig.I.14 Plan schématique d'un système hybride PV-diesel pour l'électrification rurale

VI.1 Système photovoltaïque raccordé au réseau

a) Description

Ce système regroupe l'ensemble de panneaux solaires relié au réseau de distribution suite à une transformation par un onduleur spécifique du courant continu en courant alternatif adapté aux caractéristiques du réseau. Lorsque la production photovoltaïque n'arrive pas à satisfaire la demande, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public pour l'alimentation des consommateurs.

L'énergie produite est soit consommée sur place par l'utilisateur (et le surplus est rejeté sur le réseau), soit injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite quantitative.

Ces systèmes peuvent être connectés avec ou sans batterie :

b) Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage

Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité. Le principal composant de ce type de système est l'onduleur. Il convertit la puissance continue (DC) obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement. Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système PV et le réseau constitué par un panneau de distribution. La maintenance de ce système fonctionnant sans batterie, est particulièrement facile. Elle se résume à la vérification de l'état de propreté des modules (PV).

c) Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie de stockage

Ce système a pour objectif de permettre, en absence d'énergie fournie par le réseau l'utilisation d'énergie stockée par le parc batterie et celle fournie par le champ photovoltaïque afin d'alimenter des usages propriétaires de l'installation. Cette option de sécurisation introduit les batteries d'accumulateurs, une fonction redresseur- onduleur de type alimentation sans interruption (ASI) avec une sortie secours associé à un mode de fonction autonome de l'onduleur. Cette configuration permet d'utiliser au maximum l'énergie produite par les modules PV par l'intermédiaire des caractéristique spécifiques de l'onduleur permettant un fonctionnement en mode synchrone sur la sortie du réseau, assurant en cas de défaillance du réseau, une alimentation instantanée des appareils de faible puissance grâce au mode fonctionnement autonome. Cette version est plus coûteuse et n'a d'intérêt pour le producteur que si les risques de non fiabilité (défaillance) du réseau sont trop élevés.

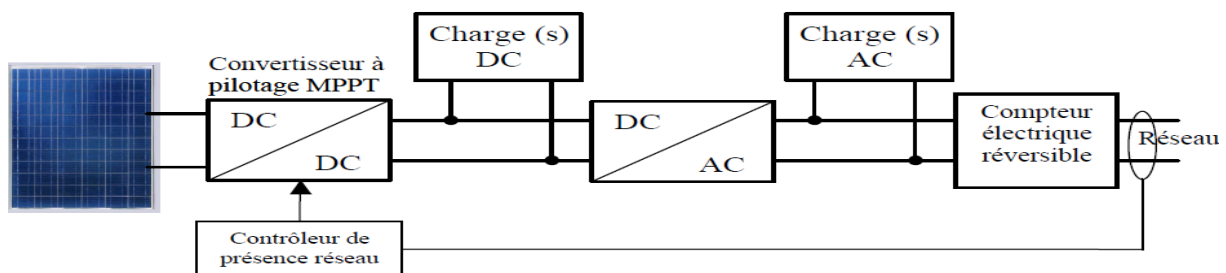


Fig.I.15 Installation photovoltaïque relié au réseau

VII.1 Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque)

Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, l'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations. Le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie a l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels. Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur du courant électrique qui peut être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu et d'un groupe motopompe [17]. Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries. Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques reliés en série et en parallèle selon la puissance requise. La figure 1.6 présente les différents éléments constitutifs d'une installation solaire de pompage d'eau.

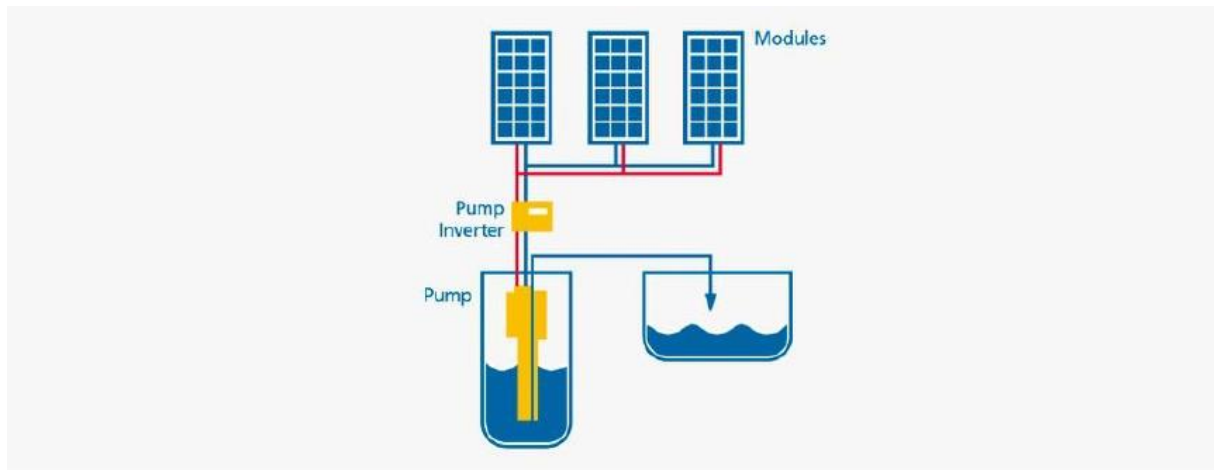


Fig.I.16 Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque

VII.2 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque

Les éléments d'un système de pompage photovoltaïque doivent être conçus pour fonctionner comme un seul ensemble pour la maximisation des performances globales du système.

Différentes solutions peuvent être adoptées pour pomper un certain volume d'eau à une certaine hauteur en fonction des plages de puissance nécessaire dans une application spécifique. Bien que les pompes soient installées en surface ou bien flottante, la configuration la plus commune est une pompe immergée installée dans un trou de forage.

La configuration d'un système de pompage PV est déterminée par la définition du type de générateur photovoltaïque, le type de pompe et de type moteur ; ainsi que le type de conditionnement de puissance. On peut distinguer les types de systèmes de pompage photovoltaïques suivants :

a) Systèmes de petite puissance (50-400W).

Dans ce type de systèmes, il est utilisé principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou à déplacement positif [18]. Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation [19]. Les applications de cette configuration est généralement destinée au pompage des volumes d'eau pouvant atteindre jusqu'à 150m³/Jour.

Les principaux constituants de ces systèmes sont :

- Le Générateur photovoltaïque
- le convertisseur DC/DC (facultatif)
- Moteur à courant continu
- Pompe
- Entrepôt de stockage (facultatif)

La figure (1.7) montre un schéma synoptique de ce type de configuration,

Le système de pompage PV à moteur courant continu constitué d'un DC moteur et une pompe. Les types de moteurs à courant continu sont classés selon le champ d'excitation : excitation séparée (aimant permanent), des séries et des moteurs de dérivation. Le choix d'un moteur à

CHAPITRE I : ÉTUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Le courant continu pour un système de propulsion PV est économique parce que le pouvoir des panneaux photovoltaïques en courant continu. En outre, les modules photovoltaïques produisent du courant continu, donc l'utilisation de moteurs à courant continu élimine le besoin de convertisseurs de puissance.

La figure 1.7 montre le schéma simplifié d'un système de pompage utilisant le moteur à courant continu. Le couplage est direct (sans stockage électrique) avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu : un entretien régulier.

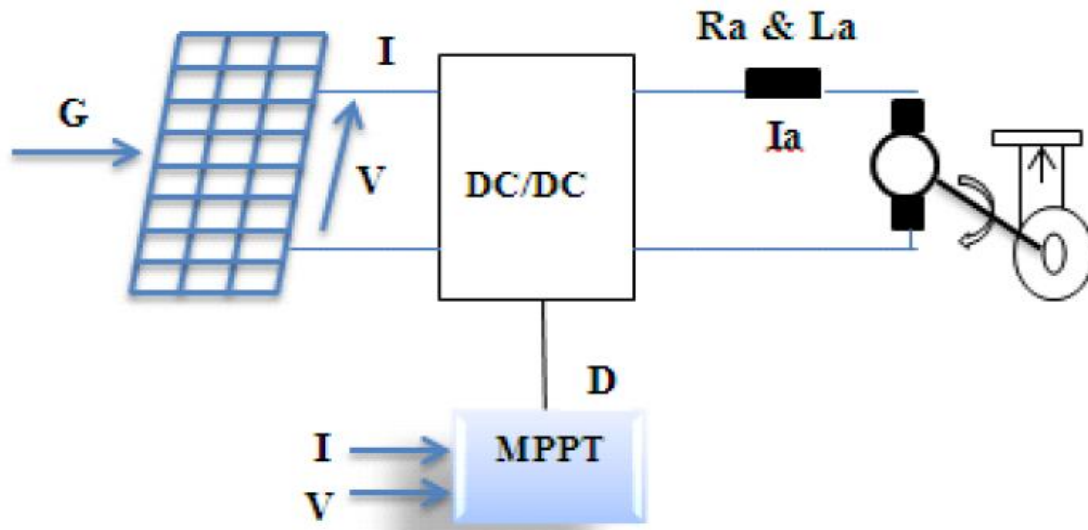


Fig.I.17 Systèmes de petite puissance

b) Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W)

Composé essentiellement d'une pompe immergée centrifuge entraînée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable, comme le montre la figure ci-dessous. Un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT) [22]. Ces types de systèmes sont caractérisés par leur haute fiabilité ainsi que de leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque. Les volumes d'eau pouvant être pompés varient entre 150 jusqu'à 1500 m³/Jour.

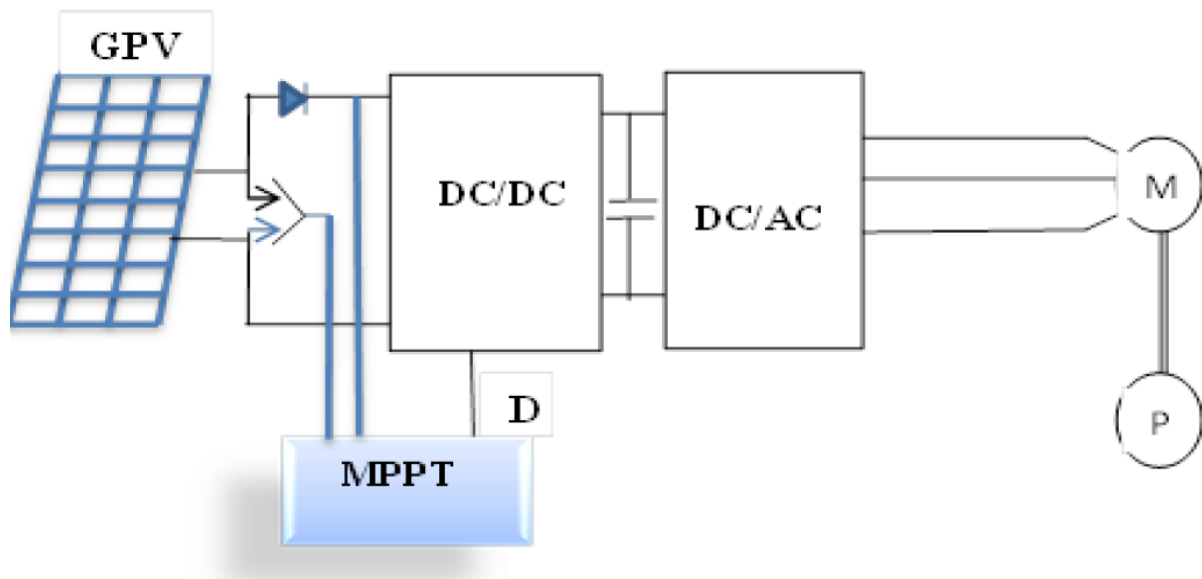


Fig.I.18 Les systèmes de moyenne puissance

Les éléments clés de ces types de systèmes sont :

- Générateur photovoltaïque
- Le convertisseur DC/DC (MPPT)
- Le convertisseur DC/ AC
- Moteur AC
- Pompe immergée
- Entrepôt de stockage (facultatif)

VII.2.1 Technologie des moteurs

On ce qui concerne la technologie des moteurs, il y a trois types de moteur actuellement utilisés pour des applications de pompage photovoltaïques.

- Moteur à courant continue
- Moteur à courant continu à aimant permanent sans balais.
- Moteur à courant alternatif.

a) Moteur à courant continu

En termes de simplicité le moteur à courant continu est une option attractive parce que le générateur photovoltaïque produit du courant continu, et moins d'équipement spécialisé sont nécessaire pour traitement de puissance. Pour un moteur à courant continu conventionnel les pertes d'énergie qui se produisant dans les enroulements est élevé, par conséquent le rendement global est faible. Si des aimants permanents sont utilisés pour produire le champ magnétique, aucune puissance ne sera consommée dans les bobines d'excitation et par conséquent des rendements plus élevés seront obtenu. Cette augmentation de rendement est très appropriée aux systèmes de pompage photovoltaïques. Le problème avec le moteur à courant continu c'est qu'il a besoin des balais pour la commutation. Les balais se détériorent avec le temps et doivent être remplacées après approximativement 1000 heures de l'opération [2], ce qui est très inconfortable parce que ceci signifie un supplément l'entretien et des coûts.

b) Moteur à courant continu sans balais

Ces dernières années, il y a eu une croissance rapide de l'utilisation du moteur à courant continu sans balais en tant que machine rotative pour les systèmes de pompage photovoltaïques.

Un moteur à courant continu sans balais est une machine électrique tournante où le stator est un stator classique triphasé comme celui d'un moteur asynchrone et le rotor a les aimants permanents montés extérieurs. À cet égard, le moteur à courant continu sans balais est équivalent à un moteur à courant continu avec le commutateur sont inversé où l'aimant tourne tandis que les conducteurs restent stationnaires.

Dans les moteurs à courant continu avec commutateur, la polarité du courant est changée par les commutateurs est les balais. Par contre, dans le moteur à courant continu sans balais l'inversion de polarité est assurée par les transistors de puissance commutant en synchronisation avec la position de rotor. Donc, les moteurs à courant continu sans balais incorporent souvent les sondes de position internes ou externes pour sensé la position réelle du rotor [28].

Le moteur à courant continu sans balais nécessite une excitation avec un onduleur triphasé de fréquence et amplitude variable. L'onduleur est généralement pour assurer la commutation électronique et la régulation du courant.

c) Moteur a courant alternatif

Les moteurs a courant alternatif comme le moteur asynchrone ; sont des moteurs sans balais avec un rotor de construction robuste qui permet le fonctionnement fiable et sans entretien. La simplicité de la construction du rotor a également comme conséquence la base du prix du moteur et un rapport puissance /poids plus élevé. C'est l'avantage principal des moteurs asynchrone sur les moteurs à courant continu et l'un des raisons pour lesquelles ce type de moteur est le plus utilisé dans les systèmes de pompage photovoltaïques.

Néanmoins, le moteur à induction sous sa forme standard, contrairement au moteur à courant continu, sont inconvénient majeur est d'être inflexible dans la variation de vitesse. Ce type de moteur à courant alternatif tourne à une vitesse l'égerment inférieur à la vitesse de synchronisme et sa vitesse est déterminée par la fréquence de source d'alimentation et le nombre de pôles du stator. Donc une gamme de variation de la vitesse du moteur asynchrone et seulement possible lorsque la fréquence de la source d'alimentation est possible. Cela signifie que l'utilisation du moteur asynchrone dans les applications photovoltaïques de pompage nécessite un circuit électronique de commande à fréquence variable (onduleur) pour commander la vitesse, et ceci ajoute un coût de plus au système. L'inclusion de l'onduleur dans le système permet des performances excellentes à la vitesse de rotation du moteur.

Plusieurs systèmes de pompage photovoltaïques basés sur le moteur à induction alimentés, soit par une source de tension ou source de courant ont été proposés :Altas et Sharaf [29] ont appliqué la commande de la logique floue avec succès, pour rechercher le point de puissance maximale dans les systèmes de conversion d'énergie PV, et pour transférer Le tableau 1.2 présente quelques avantages et inconvénients des moteurs électriques :

Type de moteurs	Les avantages	Les inconvénients
Moteur à courant continu	-Simple et efficace pour les faibles charges. -Ne nécessitant pas un circuit de commande compliqué	Les balais doivent être Remplacé périodiquement
Moteur à courant continu sans balais	Un bon rendement Ne demande pas de maintenance	La commutation électronique ajoute des dépenses de plus et avec le risque de défaillance
Moteur à courant alternative	- De larges gammes disponibles pour de larges gammes de charge -Moins cher que le moteur à courant continu	-Moins efficace que le moteur à courant continu -Nécessités un onduleur

Tableau 1.2 : résume les avantages et les inconvénients des moteurs mentionner ci-dessus.

VIII.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les fondements de bases de l'énergie solaire photovoltaïque en passant en revue la cellule photovoltaïque qui est à la base de la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en électricité. On a présenté également les principales applications des systèmes photovoltaïques à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes connectés au réseau et enfin les systèmes de pompage photovoltaïque. Les schémas de principes de chaque type de systèmes est donnée pour distinguer le principe de fonctionnement de chaque configuration.

Notre intérêt c'est porté sur les systèmes de pompage où nous avons passé en revue les configurations adoptées afin de nous guider ultérieurement dans l'étude que nous projetions de mener dans ce mémoire. Une revue bibliographique sur les types des moteurs et de pompes est également reportée dans ce chapitre pour comprendre leurs fonctionnements dans un système de pompage photovoltaïque.

CHAPITRE 2 :
Modélisation et
optimisation d'un
systeme de pompage
PV

I.1 Introduction

Le pompage de l'eau est essentiel dans le monde pour de nombreux usages, notamment l'irrigation, l'abreuvement, l'approvisionnement en eau des villages et l'utilisation domestique. On estime que 11 % de la population mondiale, soit 768 millions de personnes, n'avait pas accès à l'eau potable en 2011. Cependant, le pompage des eaux souterraines ne peut être effectué de manière durable que dans la mesure où le taux d'extraction est égal au taux de reconstitution de l'aquifère. Sinon, une nappe phréatique abaissée conduit à des puits secs et des dégâts écologiques et sociaux. Les systèmes de pompage PV peuvent varier considérablement selon ces applications : le moment des besoins en eau, la capacité de la source d'eau, la profondeur des puits, le taux de réapprovisionnement de la source, la variabilité saisonnière et les caractéristiques d'insolation solaire. La modélisation des différents éléments d'un système de pompage PV tels que, le générateur PV, l'onduleur, la motopompe et le circuit hydraulique implique la connaissance de plusieurs disciplines : météorologie, l'électronique, l'électrotechnique et l'hydraulique, ect... et exige une bonne compréhension des interactions entre elles. Dans ce chapitre, nous présentons les modèles mathématiques des différents éléments d'un système de pompage PV. Le schéma de la figure (II.1) représente une configuration typique d'un système de pompage PV.

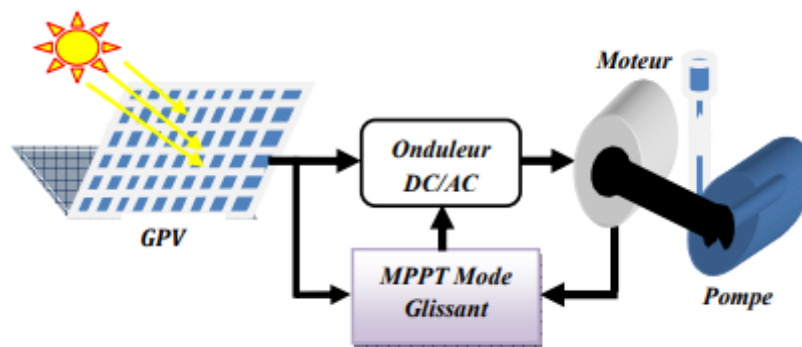


Fig.II.1. Système de pompage PV étudié

II.1 Modélisation des différents éléments d'un système de pompage PV

A. Générateur photovoltaïque GPV

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un panneau PV et l'association de plusieurs panneaux PV donne lieu à un GPV.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un panneau PV et l'association de plusieurs panneaux PV donne lieu à un GPV.

- **Modèle électrique**

Le comportement électrique d'une cellule PV est décrit le plus souvent soit par :

un modèle à une diode (en une seule exponentielle) ;

soit par un modèle à deux diodes (en double exponentielle) figure (II.2).

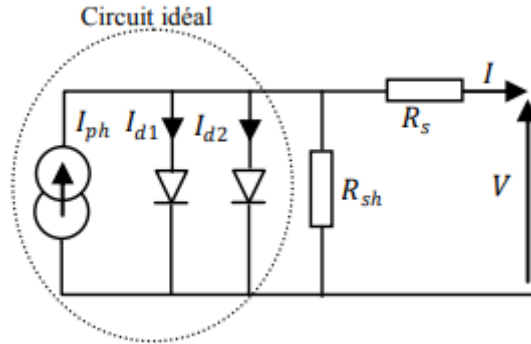


Fig.II.2 Structure d'une cellule photovoltaïque

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et shunt R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure (II.2). La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé. La résistance shunt est due au courant de fuite au niveau de la jonction PN [49, 50]. Les deux modélisations sont représentées respectivement par les équations qui suivent :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_r \tag{II.01}$$

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_r \tag{II.02}$$

Avec

$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{\phi}{1000} \right)$: Photo-courant de cellule proportionnel à l'éclairement ϕ . Ce courant correspond également au courant de court-circuit I_{cc} .

- $I_d = I_0 \left(\exp \left(V + \frac{R_s I}{n k T} \right) - 1 \right)$: est le courant traversant la diode. On peut faire apparaître le potentiel thermodynamique $V_t = \frac{n k T}{q}$.
- I_0 : courant de saturation inverse de la diode.
- q : charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)
- k : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$)
- n : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.
- T : température de la jonction en degré K.
- $I_r = \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$ est le courant dérivé par la résistance shunt.

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule PV ainsi que sa caractéristique courant-tension.

$$I = I_{cc} \left(\frac{\phi}{1000} \right) - I_0 1 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t}} \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{II.03}$$

$$I = I_{cc} \left(\frac{\phi}{1000} \right) - I_0 1 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t}} \right) - I_0 2 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_t}} \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{II.04}$$

Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système de pompage PV

À noter que pour le modèle en une seule exponentielle, la diode D sera éliminée. La représentation avec un modèle en double exponentielle est utilisée souvent pour des cellules en silicium polycristallin. Par contre pour des cellules en silicium amorphe, un modèle en une seule exponentielle est souvent utilisé. Plusieurs travaux de recherche ont montré que les deux modèles possèdent un domaine de validité; le modèle en double exponentielle se prête mieux aux mesures de la caractéristique courant-tension pour des tensions élevées tandis que celui à une exponentielle est plus précis pour de basses et moyennes tensions. Quelque soit le modèle utilisé (avec une seule exponentielle ou avec double exponentielle), le point de fonctionnement du panneau PV est caractérisé par :

$$V_{pv} = N_s \cdot V \quad (II.05)$$

$$I_{pv} = N_p \cdot I \quad (II.06)$$

- **Paramètres externes**

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes I(V), ou de l'équation (II.06). Les plus usuels sont les suivants :

- Courant de court-circuit : c'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du GPV est nulle. Dans le cas idéal (R_{snulle} , $R_{shinfinie}$) ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.3), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{(R_{slcc})}{Vt}} - 1 \right) - \frac{R_{slcc}}{R_{sh}} \quad (II.07)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_0 \left(e^{\frac{(R_{slcc})}{Vt}} - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (II.08)$$

Pour le silicium $I_{cc} = 30 \text{ mA/Cm}^2$ pour un éclairage maximal.

- Tension de circuit ouvert : c'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un GPV). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{Vt}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (II.09)$$

Dans le cas idéal sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = VT \ln(I_{ph}/I_0 + 1) \quad (II.10)$$

Pour une photopile en silicium la tension de circuit ouvert V_{co} est de 0.55 à 0.6V.

- Facteur de forme FF : dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou fill factor, il est défini par :

$$FF = \left(\frac{V_{mIm}}{V_{coIcc}} \right) \quad (II.11)$$

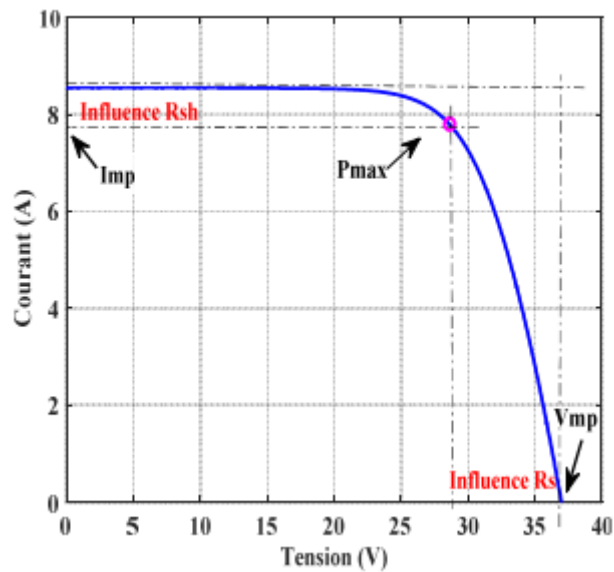


Fig.II.3 Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique I(V) d'une cellule PV

Ce facteur montre la déviation de la courbe I(V) par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}), qui correspond à la photopile idéale.

La puissance des modules PV s'exprime en Watt-crête. Cette dernière représente la puissance que fournit un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m² et à une température de 25°C.

- Rendement : La puissance est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I(V). Le rapport de la puissance électrique optimale à la puissance incidente.

$$n = \frac{P_m}{P_0} \quad (II.12)$$

P_0 : est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles $P_0 = \psi * S$

Ψ : Flux global [W/m²]

S : surface de générateur [M²]

III.1 Association des photopiles, Module PV :

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible (de l'ordre de 3 W). Pour accroître cette puissance, on assemble ces cellules soit en série (pour augmenter la tension), soit en parallèle (pour augmenter le courant). Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et sur la surface arrière d'une feuille de Tedlar (Polyvinyle fluorure). Les cellules sont assemblées pour former un GPV élémentaire (module PV) qui est généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation

Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système de pompage PV

Les cellules d'un module PV typique sont séparées en plusieurs segments qui sont protégées par des diodes antiparallèles. Si une de ces cellules venait à être ombragée, la diode se déclencherait de manière à protéger les cellules de cette partie de module.



Fig.II.4 Différents types de modules PV

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire de monter les modules en rangées série-parallèle pour former ce que l'on appelle champ PV

a) Association en série

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant (Fig.II.5)

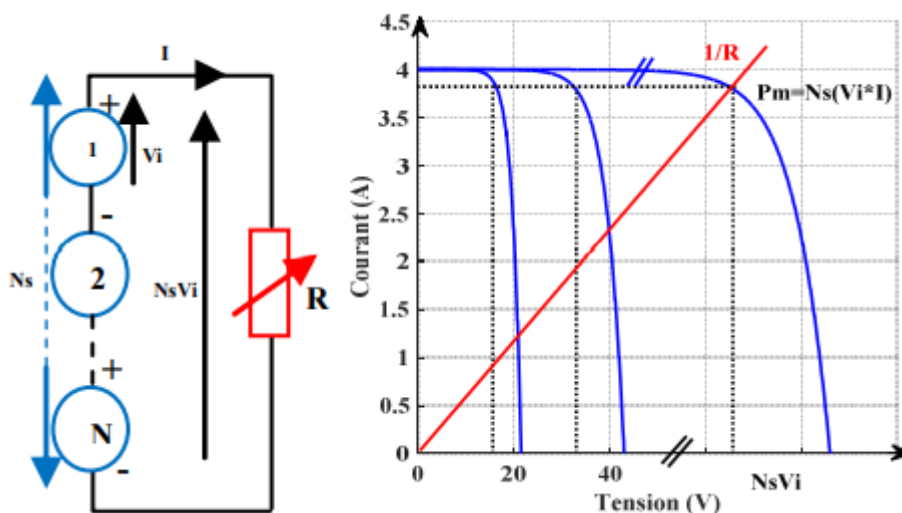


Fig.II.5 Cellule en séries

b) Association en parallèle

Les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension.

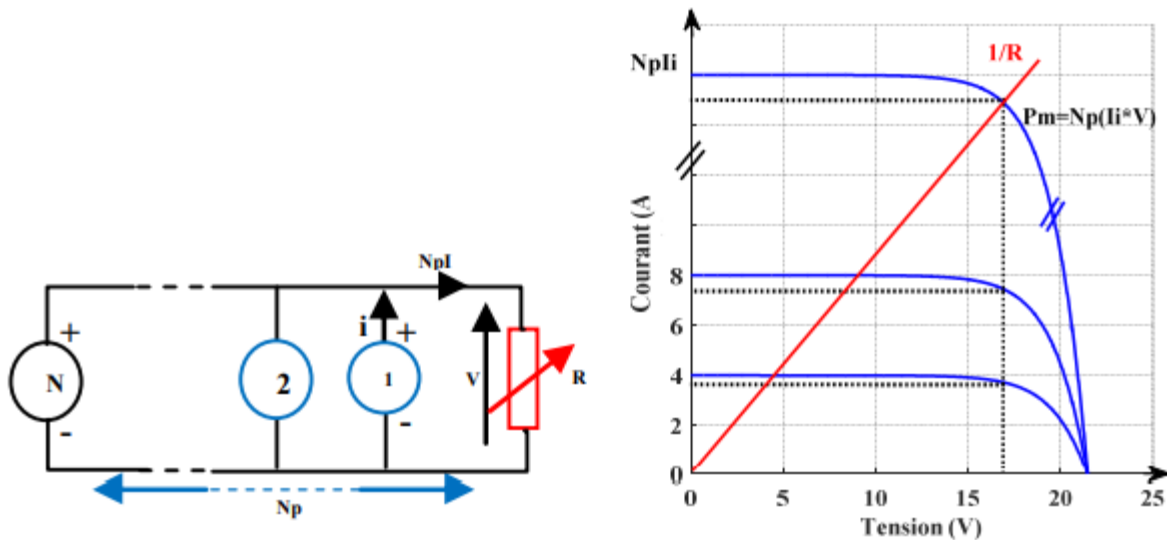


Fig.II.6 Cellules en parallèles

Pour appliquer les caractéristiques : courant tension $I(V)$ et puissance tension $P(V)$ d'une seule cellule sur un module, quelques hypothèses sont nécessaires :

- Tous les modules ont les mêmes caractéristiques électriques (même I_{cc} et même V_{co})
- Aucune occultation partielle.
- Aucune influence thermique.

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise de β cellules en série et α en parallèle est la suivante :

$$I = \alpha I_{cc} \left(\frac{\varphi}{1000} \right) - \alpha I_0 \left(e^{\frac{(\beta V + \frac{\beta R_s I}{\alpha})}{\beta V t}} \right) - \frac{(\beta V + \frac{\beta R_s I}{\alpha})}{\frac{\beta}{\alpha} R_{sh}} \quad (II.12)$$

IV.1 Convertisseur DC/DC Boost

Un convertisseur Boost, (ou parallèle) est connu par le nom d'élévateur de tension. Ce convertisseur est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP.

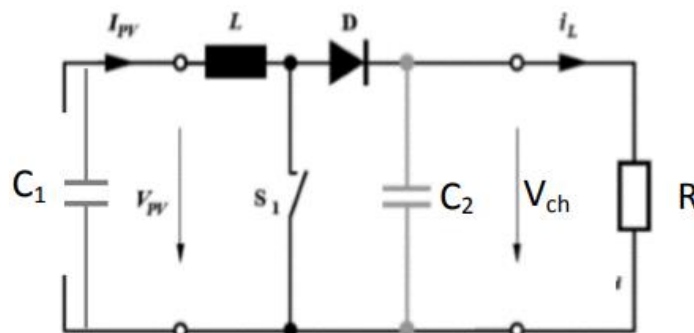


Fig.II.7 Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost

IV.2 Fonctionnement du convertisseur

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (S1 ferme, et S1 ouvert), puis faire un modèle approximé (Averaged Model), qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrées et de sorties du convertisseur.

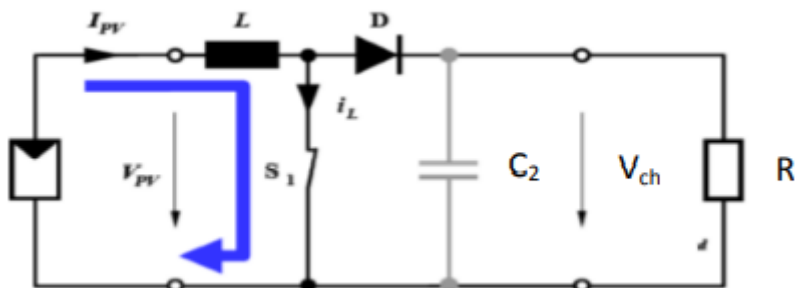


Fig.II.8 Convertisseur Boost durant l'état on

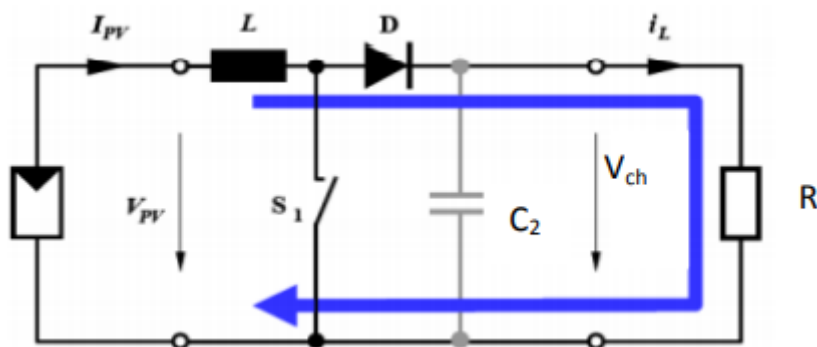


Fig.II.9 Convertisseur Boost durant l'état off

• Chronogrammes

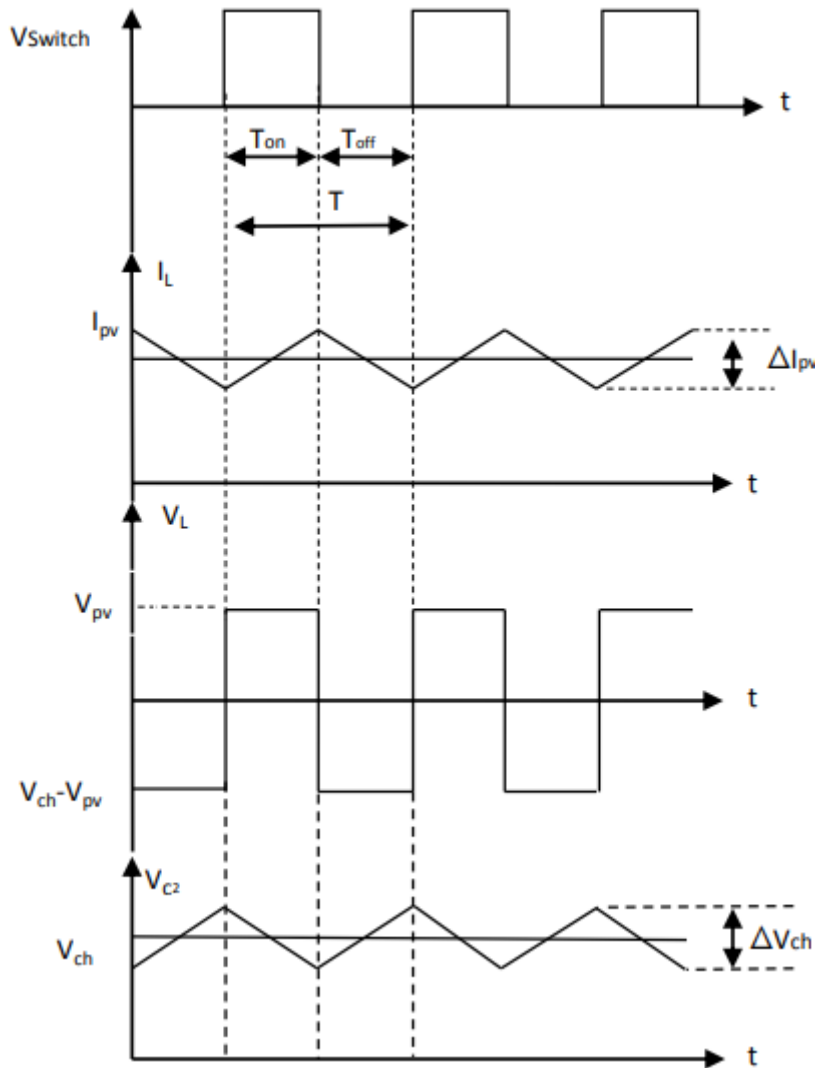


Fig.II.10 Formes typiques d'onde du convertisseur boost

IV.2.1 Modèle mathématique

a) Pour la première période DTs

Lorsque le commutateur est activé S1 fermé, Fig.II-8, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période DTs .

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \\ I_{C2} = C_2 \frac{dV_{ch}}{dt} = -I_{ch} \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L \cdot I_L \end{cases} \quad (II.13)$$

b) Pour la deuxième période (1-D)Ts

Lorsque S1 est désactivé (S1 ouvert, Fig.II.9), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant I_L traversant l'inductance, traverse ensuite la diode D, C2 et la charge, la bobine génère une tension qui s'ajoute à la tension de source. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée. Le courant décroît ensuite progressivement, car $V_{ch} > V_{PV}$.

Le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \\ I_{C2} = C_2 \frac{dV_{ch}}{dt} = I_L - I_{ch} \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_{ch} - R_L \cdot I_L \end{cases} \quad (II.14)$$

La forme d'onde de la tension de la charge est représentée sur la Fig.II.12. La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C2, lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge. En général :

$$V_{PV} \cdot t_{on} = (V_{ch} - V_{pv}) \cdot t_{off} \quad (II.15)$$

Et ainsi :

$$V_{ch} = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} V_{pv} \quad (II.16)$$

Le rapport t_{on}/T : est le rapport cyclique D avec : $(0 < D < 1)$

On considère ici uniquement le comportement du circuit en conduction continue (ARROUF, 2007). La tension de la charge est donnée par :

$$V_{ch} = \frac{T}{t_{off}} V_{pv} = \frac{1}{1-D} V_{pv} \quad (II.17)$$

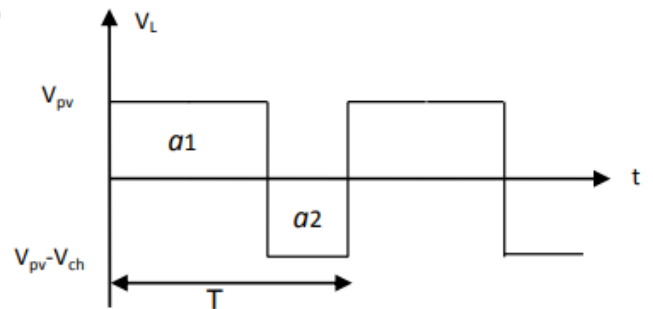
Ou :

V_{ch} : tension aux bornes de la charge.

V_{pv} : tension d'entrée (cellule solaire).

t_{on} : durée de temps quand le commutateur est fermé.

Calcul de la fonction de transfert : $V_{ch} = f(V_{pv})$



$$a_1 = V_{pv} \cdot DT \quad (II.18)$$

$$a_2 = (V_{pv} - V_{ch}) \cdot (T - DT) \quad (II.19)$$

Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système de pompage PV

La valeur moyenne de la tension aux bornes d'une bobine est toujours nulle :

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T U_L(t) dt = \frac{1}{T} [a_1 + a_2] = 0 \quad (II.20)$$

$$V_{pv}D + (V_{pv} - V_{ch})(1 - D) = 0 \quad (II.21)$$

$$V_{pv} - V_{ch} + DV_{ch} = 0 \quad (II.22)$$

$$V_{ch} = \frac{V_{pv}}{1-D} \quad (II.23)$$

Courbe du transfert

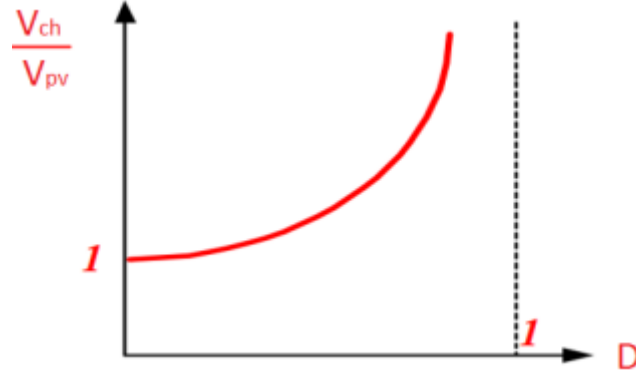


Fig.II.11 Courbe de transfert du convertisseur de type Boost

En appliquant la relation (II.24) sur les systèmes d'équations (II.13) et (II.14), on trouve le modèle approxime du convertisseur Boost par la relation (II.25):

$$\frac{dx}{dt} T_s = \frac{dx}{dt_{(DT_s)}} DT_s + \frac{dx}{dt_{((1-D)T_s)}} \cdot (1 - D) T_s \quad (II.24)$$

Donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} T_s = DT_s \cdot (I_{pv} - I_L) + (1 - D) T_s \cdot (I_{pv} - I_L) \\ C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} T_s = DT_s \cdot I_{ch} + (1 - D) T_s \cdot (I_{pv} - I_{ch}) \\ L \frac{dI_L}{dt} T_s = DT_s (V_{PV} - R_L \cdot I_L) + (1 - D) T_s \cdot (V_{pv} - V_{ch} - R_L \cdot I_L) \end{array} \right. \quad (II.25)$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation, on obtient la modélisation dynamique du convertisseur suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_L = I_{pv} - C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \\ I_{ch} = (1 - D) I_L - C_2 \frac{dV_{ch}}{dt} \\ V_{pv} = (1 - D) V_{ch} + R_L \cdot I_L + L \frac{dI_L}{dt} \end{array} \right. \quad (II.26)$$

Les valeurs crête à crête des courants et des tensions sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{Lcc} = 2\Delta I_L = \frac{V_{PV} - R_L \cdot I_L}{L} \\ V_{pvcc} = 2\Delta V_{pv} = \frac{I_{pv} - I_L}{C_1} DT_s \\ V_{chcc} = 2\Delta V_{ch} = \frac{-I_{ch}}{C_2} DT_s \end{array} \right. \quad (II.27)$$

Les valeurs des composants à choisir pour des ondulations données sont (KAZIMIERCZUK, 2014):

$$\begin{cases} L = \frac{V_{PI} - R_L I_L}{2\Delta I_L} D \cdot T_S \\ C_1 = \frac{I_{pv} - I_L}{2\Delta V_{pv}} D \cdot T_S \\ C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{ch}} D \cdot T_S \end{cases} \quad (II.28)$$

La tension moyenne aux bornes de l'inductance dans l'état d'équilibre est :

$$v_{L(Av)} = \frac{1}{T} \int_0^T v_L dt = 0 \quad (II.29)$$

En se référant à la Fig.II.10 :

$$V_{pv}DT = (V_{ch} - V_{pv})(1 - D)T \quad (II.30)$$

Donc :

$$V_{ch} = \frac{V_{pv}}{1-D} \quad (II.31)$$

La fonction de transfert de tension continue du convertisseur :

$$M_{VDC} = \frac{V_{ch}}{V_{pv}} = \frac{I_{pv}}{I_{ch}} = \frac{1}{1-D} \quad (II.32)$$

Avec :

$$1 \leq M_{VDC} \leq \infty$$

Le courant max pour une puissance maximal :

$$I_{chmax} = \frac{P_{chmax}}{V_0} \quad (II.33)$$

Minimum résistance de charge :

$$R_{Lmin} = \frac{V_{ch}}{I_{chmax}} \quad (II.34)$$

La fonction de transfert

$$M_{VDC} = \frac{V_{ch}}{V_{pv}} \quad (II.35)$$

$$D_{min} = \frac{D_{max}}{M_{VDC} - 1} \quad (II.36)$$

$$L = \frac{D_{max}^2 R_{Lmin}}{2f_s M_{VDC} (M_{VDC} - 1)} \quad (II.37)$$

V_r : tension d'ondulation

$$V_{C_{pp}} = \frac{V_r}{2} = V_r = 0.055 * V_0 \text{ si on suppose que } \left(\frac{V_r}{V_0} \leq 5.5\%\right)$$

Par conséquent, la capacité est donnée par (CDC) (Falinirina F. Rak, 2011) :

$$C_{DCV} = \frac{D_{max} V_{ch}}{f_s R_{Lmin} V_{C_{pp}}} \quad (II.38)$$

$$C_{PV} \geq \frac{D_m^2 I_{ch-m}}{0,02(1-D_m) f_s V_{PV-mpP}} \quad (II.39)$$

F_s : Fréquence de switch

I_{om} : Courant de sortie pour la puissance maximale

V_{pv-mpp} : Tension du panneau pour la puissance maximale

V_{cpp} : Tension crête à crête d'ondulation de la capacité C.

V. Optimisation du générateur photovoltaïque.

V.1 Principe du MPPT

L'exploitation de l'énergie solaire présente un potentiel énorme. C'est dans cette optique que sont conçus les panneaux photovoltaïques. Même s'il est connu que les rendements sont relativement peu élevés (de l'ordre de 30 à 40%), la recherche de la puissance maximale est nécessaire. Or, les panneaux photovoltaïques sont soumis à des conditions changeantes au niveau de l'ensoleillement et de la température qui modifie la puissance extractible.

En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance extractible est variable et fonction de la tension (ou du courant) imposée aux bornes du panneau photovoltaïque. Il est donc nécessaire que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le plus de puissance possible : c'est ainsi que naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracker).

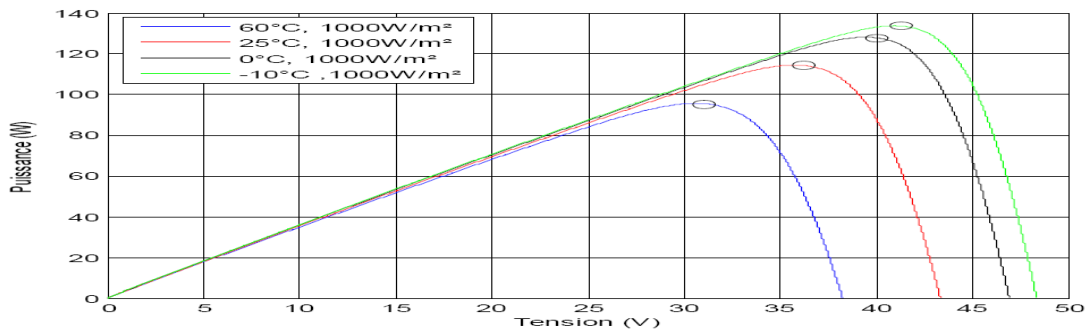


Fig.II.12 Variations de P pour G constant et T variable

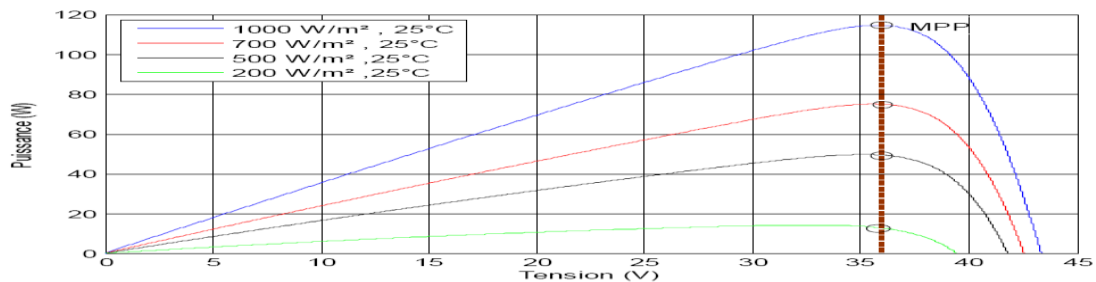


Fig.II.13 Variations de P pour T constant et G variable

Les courbes précédentes, extraites de la Fig.II.12, matérialisent bien la nécessité d'un algorithme d'optimisation d'extraction de la puissance ; cela d'autant plus que dans la réalité, contrairement aux deux figures ci-dessus, la température et l'ensoleillement varient en même temps.

Il faut apparaître donc nécessaire d'adjoindre un algorithme MPPT à chaque panneau photovoltaïque. Toutefois, une question demeure : existe-t-il un algorithme encore plus performant que d'autre ?

Nous allons à présent passer en revue les solutions MPPT actuellement disponibles sur le marché.

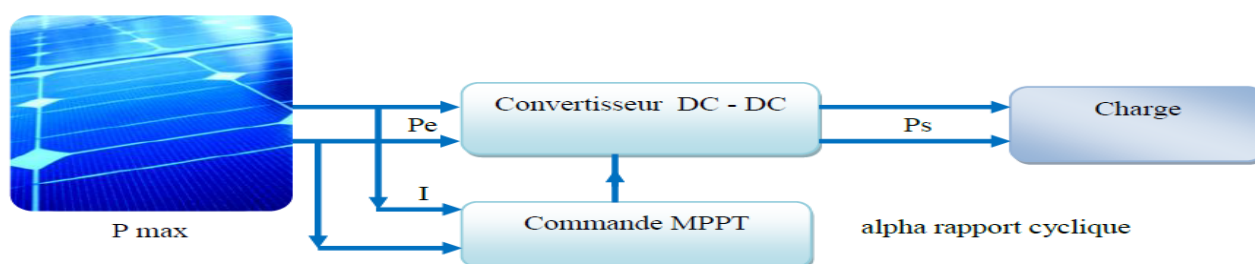


Fig.II.14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

V.2 Différents types de la commande MPPT

Dans la recherche du point de fonctionnement optimal MPPT (Maximum Power Point Tracking) il s'agit de suivre continûment l'optimum de la puissance délivrée par le générateur PV. Pour cela, on décrira dans ce qui suit deux méthodes: analogique et numérique.

a) Méthode de recherche analogique

Dans cette méthode, on impose une tension initiale V à laquelle sera superposée une petite variation ΔV de forme sinusoïdale. La puissance P obtenue présente aussi une variation ΔP . Trois cas peuvent avoir lieu :

Lorsque V se trouve à gauche du point de fonctionnement optimal, le produit $\Delta V \cdot \Delta P$ est supérieur à zéro ($\Delta V \cdot \Delta P > 0$), il faut alors augmenter la valeur de V ,

Lorsque V se trouve à droite du point de fonctionnement optimal, le produit $\Delta V \cdot \Delta P$ est inférieur à zéro ($\Delta V \cdot \Delta P < 0$), il faut alors réduire la valeur de V ,

Enfin, au point de fonctionnement optimal, le produit $\Delta V \cdot \Delta P$ s'annule ($\Delta V \cdot \Delta P = 0$), la tension V représente alors la tension optimale.

Cette stratégie de recherche convient particulièrement si les circuits de commande et de réglage sont réalisés analogiquement.

b) Méthode de recherche numérique

Cette méthode est itérative, elle est basée sur le principe suivant:

A partir d'un certain point initial de fonctionnement (V_0, P_0), on fait varier la tension V d'une valeur ΔV relativement grossière. Après un laps de temps Δt , afin de permettre la stabilisation du nouveau point de fonctionnement, on mesure la puissance P et on calcule la différence ΔP entre la nouvelle valeur et la valeur précédente:

Si $\Delta P < 0$, on procède dans la même direction avec le même pas ΔV ,

Si $\Delta V < 0$, il faut changer la direction de variation de la tension continue en partageant par deux le pas du gardian .

Cette procédure est poursuivie jusqu'à ce que le pas ΔV soit devenu suffisamment petit, et dans ce cas, le point de fonctionnement optimal est atteint .

V.3 Techniques de commande MPPT

Dans la littérature, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale (PPM). la méthode la plus utilisée est : Perturb&Observ (P&O) qui sera adaptée pour notre système.

a) Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode Perturb& Observe (P&O) qui est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation. Elle consiste à perturber la tension (V_{pv}) d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance (P_{pv}) qui en résulte [39].

Comme illustré à la figure (III.15), on peut observer que si une incrémentation positive de la tension (V_{pv}) engendre un accroissement de la puissance (P_{pv}), le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Au contraire, si la puissance décroît, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique (P_{pv}/V_{pv}), on peut facilement situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de le faire converger vers le maximum de puissance en imposant une valeur appropriée au courant de sortie du module PV.

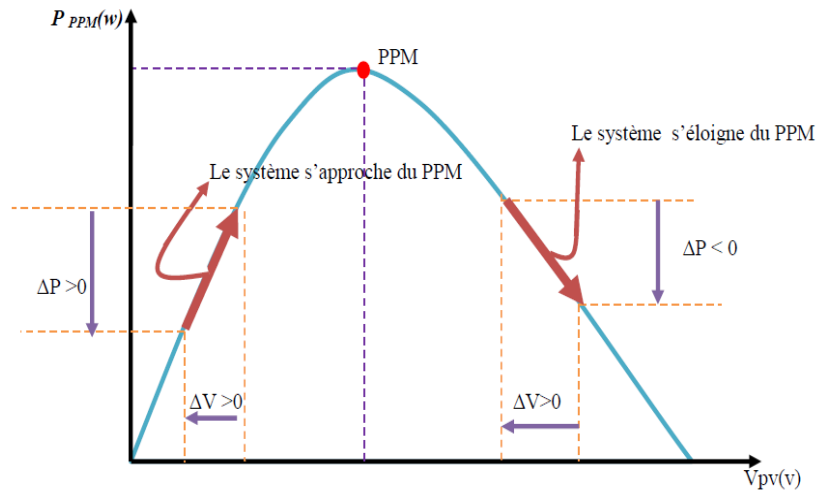


Fig.II.15 Schéma du principe de la méthode P&O

La figure (II.16) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

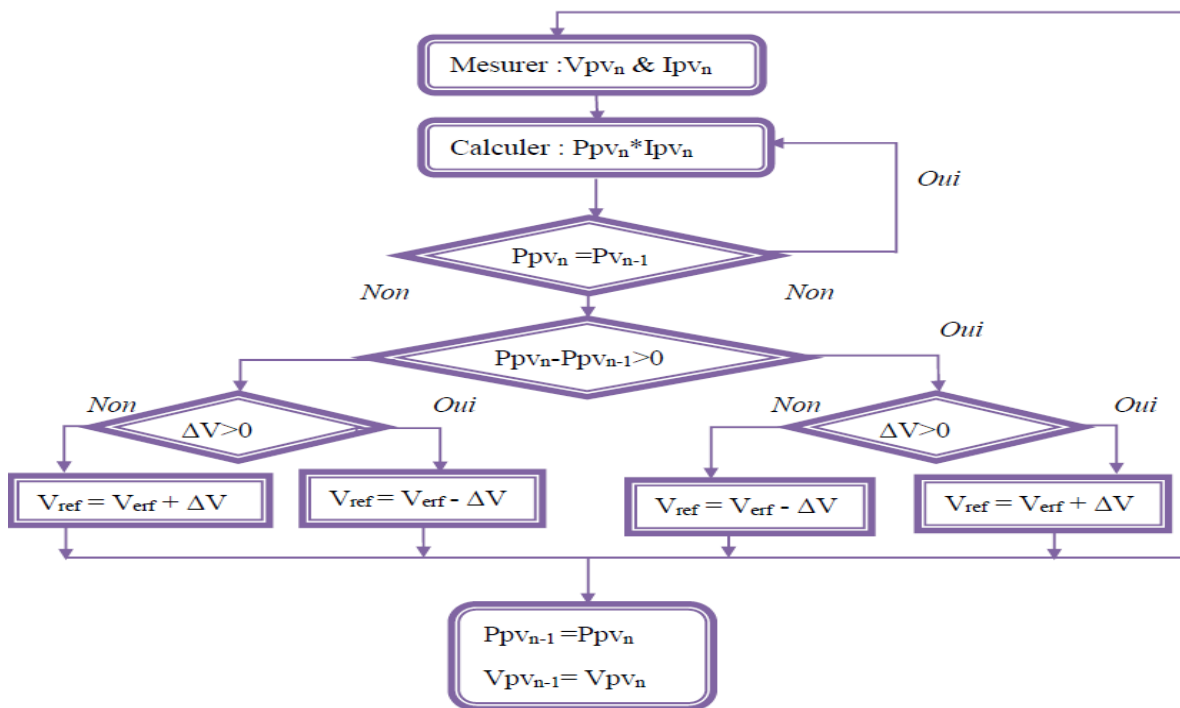


Fig.II.16 Algorithme de la méthode Perturb&Observ

Telle que : Si $\Delta P = P_{pv_n} - P_{pv_{n-1}} < 0$ et si $\Delta V = V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}} < 0$, on augmente V_{pv_n} ; si $\Delta V > 0$, on diminue V_{pv_n} . Si $\Delta P > 0$ et si $\Delta V < 0$, on diminue V_{pv_n} ; si $\Delta V > 0$, on augmente V_{pv_n} .

La méthode P&O présente néanmoins quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une

fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité.

VI. Onduleur de tension

Pour les applications de pompage PV, les moteurs électriques à courant alternatif sont souvent utilisés. Il serait donc préférable d'utiliser des onduleurs de tension pour alimenter ces moteurs à partir des panneaux PV. Ces onduleurs transforment la tension continue issue des panneaux en une tension alternative monophasée ou triphasée avec une fréquence variable en agissant sur la commande de ces interrupteurs, qui sont synthétisés par la mise d'anti-parallèle d'un IGBT et d'une diode. Les hypothèses suivantes sont faites à propos des semi-conducteurs : les commutations se font sans pertes et instantanément et les effets des empiètements ou des chevauchements seront négligés. Dès lors, chaque ensemble transistor diode peut être assimilé à un interrupteur idéal

La figure (II.17) présente le schéma d'un onduleur de tension triphasé utilisé dans un système de pompage PV.

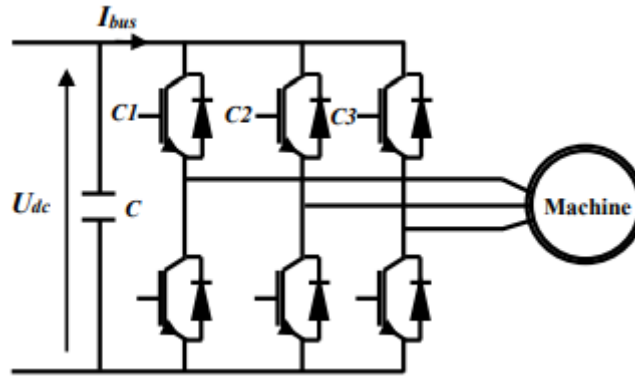


Fig.II.17 Schéma simplifié d'un onduleur triphasé utilisé pour le pompage PV

Les ordres de commande de l'onduleur sont transmis aux trois bras par l'intermédiaire des signaux de commandes C1, C2, C3. La convention adoptée pour le fonctionnement de chaque bras est la suivante :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Et le courant I_{bus} à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$I_{bus} = C_1 I_a + C_2 I_b + C_3 I_c \quad (\text{II.41})$$

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} U_{ac} \\ U_{ba} \\ U_{cb} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Le potentiel du point neutre est :

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.43})$$

VI.1 Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale PWM

La technique de commande MLI permet de définir les instants de commande des interrupteurs de l'onduleur. Les trois tensions de phase sont générées par comparaison de trois tensions de référence ayant une certaine fréquence à un signal triangulaire commun d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure à celle des tensions de sortie. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La figure (II.18) montre le comportement d'une MLI réalisée avec la technique "Sinus-triangle".

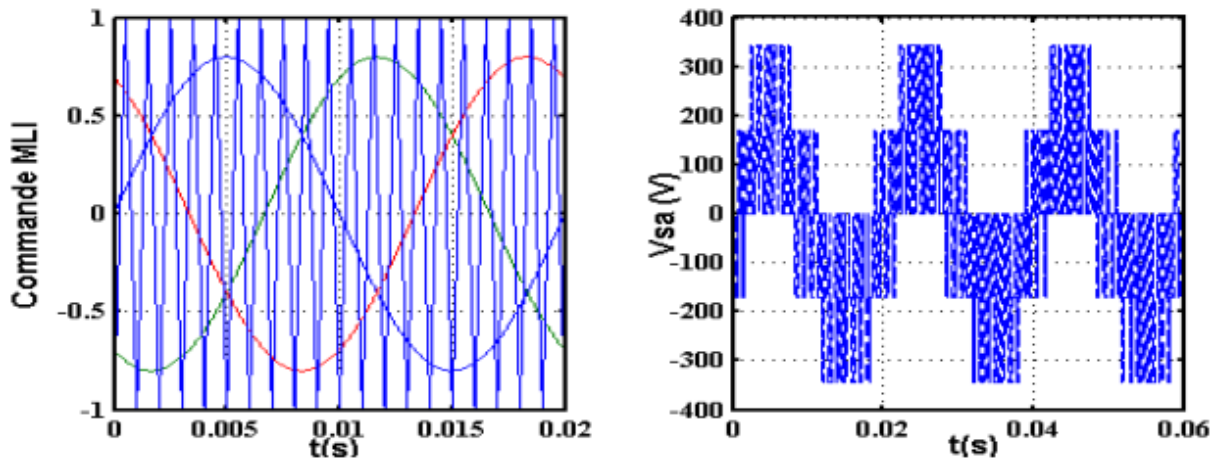


Fig.II.18 Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale

La stratégie triangulo- sinusoidale est caractérisée par deux paramètres qui sont l'indice de modulation m qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse f_p à la fréquence de référence ou modulante f_s et r le coefficient de réglage en tension qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence V_s à la valeur de crête de la porteuse V_p .

$$m = \frac{f_p}{f_s} \tag{II.44}$$

$$r = \frac{V_s}{V_p} \tag{II.45}$$

Modélisation du groupe motopompe

Modélisation de la machine asynchrone MAS

La mise en équation de la MAS est effectuée en adoptant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- l'entrefer est d'épaisseur uniforme l'effet d'encoche n'est pas pris en compte ;
- la densité du courant est uniforme dans les sections des conducteurs ;
- la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- les résistances des enroulements ne varient pas avec la température ;

- la distribution spatiale des forces magnétomotrices est supposée sinusoïdale le long de l'entrefer.

VI.2 Représentation générale

Il est habituel de représenter les machines électriques et en particulier les machines asynchrones dans un repère de Fresnel triphasé et équilibré. Considérons donc une MAS triphasé au stator et au rotor représentée schématiquement sur la figure (II.19)

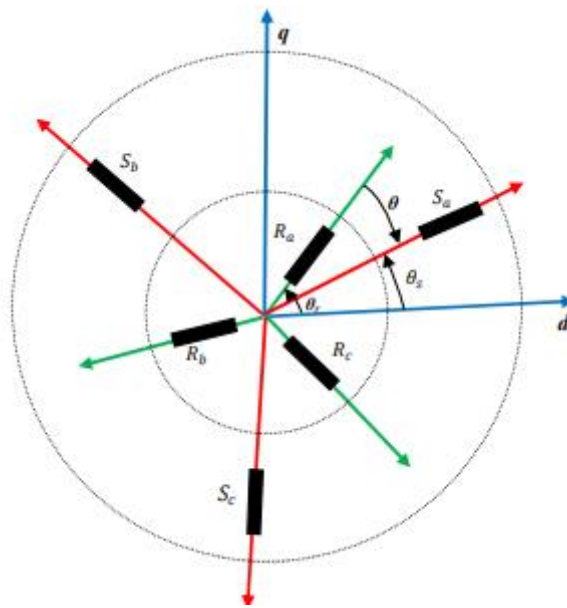


Fig.II.19 Représentation schématique d'une MAS

Les phases sont repérées respectivement par (Sa, Sb, Sc) et (Ra, Rb, Rc); la position relative instantanée entre les deux axes "Sa" et "Ra" est définie par l'angle électrique (θ) variable et fonction du temps. Les angles (θ_s) et (θ_r) sont respectivement les angles entre l'axe "a" du stator ou du rotor et la référence "d" de la base (dq). A priori, nous pouvons exprimer la relation liant ces angles entre eux par :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (II.46)$$

Pour établir les équations régissant le fonctionnement du moteur, il est préférable de travailler avec un angle de rotation électrique (θ) au lieu d'un angle de rotation mécanique (θ_m). La relation entre ces deux angles est donnée par :

$$\theta = p\theta_m \quad (II.47)$$

Avec les hypothèses décrites précédemment, nous pouvons écrire les équations des tensions et du flux statorique et rotorique sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_r][I_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}] \\ [\varphi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \\ [\varphi_{sabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \end{cases} \quad (II.48)$$

Avec :

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances cycliques et des mutuelles d'une phase statorique;

$[L_{rr}]$: Matrice des inductances cycliques et des mutuelles d'une phase rotorique ;

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre une phase statorique et rotorique.

Le modèle mathématique de la MAS dans le repère triphasé est très complexe et non linéaire. Il est donc nécessaire de développer un modèle plus simple pour faciliter la modélisation. L'utilisation de la transformation de Park, sous certaines hypothèses simplificatrices, permet de rapporter les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électriquement perpendiculaires appelés d pour l'axe direct, et q pour celui en quadrature. Toutes les grandeurs électromagnétiques sont ramenées sur un seul repère (dq). Cela s'explique par une transformation de trois enroulements en deux enroulements.

Les équations des tensions et des flux de la MAS, écrites dans le plan (dq), sont les suivantes :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.49)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dqs} = L_s I_{dqs} + L_m I_{dqr} \\ \varphi_{dqr} = L_r I_{dqr} + L_m I_{dqs} \end{cases} \quad (II.50)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad (II.51)$$

$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ Est la pulsation statorique, $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$ est la pulsation rotorique et $\omega + \omega_r = \omega_s$ avec $\omega = p\Omega$ la pulsation mécanique.

Cependant, nous pouvons simplifier ces équations encore en choisissant un référentiel particulier pour dq. En effet, trois types de référentiels peuvent être envisagés, à savoir :

Référentiel lié au stator : caractérisé par $\theta_s = 0$, et par conséquence $\theta_r = -\theta$, le système d'équations (II.23) devient alors :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.52)$$

- Référentiel lié au rotor: caractérisé par $\theta_r = 0 = 0$, et par conséquence $\theta_s = 0$. Le système d'équations (II.49) devient alors :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r I_{qs} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (II.53)$$

- Référentiel lié au champ tournant: le système d'équation (II.49) devient alors :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.54)$$

C'est dans ce référentiel que nous allons travailler par la suite. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation. Il existe plusieurs façons de choisir les variables d'état de la MAS dans les repères de Park. En général, le choix est fixé par l'utilisateur suivant ses besoins dans l'étude et la conception de sa commande. Pour cela : $X=AX+BU$

$$\text{Avec } X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (II.55)$$

Dans ce cas, le modèle de la MAS mis sous forme variable d'état est donné par :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{R_a}{\sigma L_s} i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \varphi_{dr} + \frac{M\omega_m}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{R_a}{\sigma L_s} i_{qs} - \omega_s i_{ds} - \frac{M\omega_m}{\sigma L_s L_r} \varphi_{dr} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{qs} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega_m) \varphi_{qr} + \frac{MR_r}{L_r} i_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -(\omega_s - \omega_m) \varphi_{dr} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{qr} + \frac{MR_r}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (II.56)$$

$$\text{Avec : } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} R_a = R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \quad (II.57)$$

Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système de pompage PV

L'expression du couple en fonction des courants statoriques et les flux rotoriques est donnée par:

$$T_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}) \quad (II.58)$$

L'équation de couple électromagnétique n'est pas linéaire, à cause de produit croisé des composantes du courant et du flux (couplage). Cela implique une commande permettant de résoudre ce problème.

L'équation mécanique devient :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_e - T_r \quad (II.59)$$

VII. Commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la MAS comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple

- **Commande par orientation de flux rotorique**

Le principe de la commande vectorielle est de réduire l'expression du couple (II.29), ce qui la rend comparable à l'expression du couple de la MCC. La technique consiste à placer le repère (dq) tel que l'axe d coïncide avec le flux à orienter ; ce qui revient à imposer les composantes $(\phi_{\hat{d}} = \phi_{\hat{d}} ; \phi_{\hat{q}} = 0)$ dans un repère lié au champ tournant.

Le couple se réduira alors à :

$$T_e = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{sq}) \quad (II.60)$$

L'équation (II.58) devient :

$$\begin{cases} \sigma L_S \frac{di_{ds}}{dt} = -R_a i_{ds} + \sigma L_S \omega_S i_{qs} + \frac{MR_r}{L_r^2} \varphi_{dr} + v_{ds} \\ \sigma L_S \frac{di_{qs}}{dt} = -R_a i_{qs} - \sigma L_S \omega_S i_{ds} - \frac{M\omega_m}{L_r} \varphi_{dr} + v_{qs} \\ L_r \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -R_r \varphi_{dr} + MR_r i_{ds} \\ 0 = -(\omega_s - \omega_m) \varphi_{dr} + \frac{MR_r}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (II.61)$$

À partir du système d'équation (II.61), le flux et la vitesse estimés sont:

$$\varphi_{dr} = \frac{M}{1 + \left(\frac{L_r}{R_r}\right) \sigma} i_{ds} \quad (II.62)$$

$$\omega_r = \frac{M}{\varphi_{dr}} \left(\frac{R_r}{L_r}\right) i_{qs} \quad (II.63)$$

- **Découplage et compensation**

Le système d'équations (II.54) montre que V_d et V_q dépendent à la fois des courants statoriques sur les axes (dq) ce qui nous amène à implanter un découplage.

Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système de pompage PV

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation, cette dernière consiste à faire une régulation des courants en négligeant les termes de couplage qui seront rajoutés aux sorties des régulateurs des courants afin d'obtenir des tensions de références pour alimenter l'onduleur. Les termes de couplage sont définis de telle sorte que les tensions restantes soient une relation du premier ordre avec les composantes des courants

Les sorties des régulateurs des courants sont :

$$\begin{cases} V_{ds}^* = R_a i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} \\ V_{qs}^* = R_a i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (II.64)$$

On pose :

$$\begin{cases} e_{sd} = \sigma L_s \omega_s i_{qs} + \frac{MR_r}{L_r^2} \varphi_{dr} \\ e_{sq} = -\sigma L_s \omega_s i_{ds} - \frac{M\omega_m}{L_r} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.65)$$

Les tensions de références sont alors :

$$\begin{cases} v_{ds_ref} = V_{ds}^* - e_{sd} \\ v_{qs_ref} = V_{qs}^* - e_{sq} \end{cases} \quad (II.66)$$

$$\begin{cases} v_{ds_ref} = (\sigma L_s S + R_a) i_{ds} - \sigma L_s \omega_s i_{qs} - \frac{MR_r}{L_r^2} \varphi_{dr} \\ v_{qs_ref} = (\sigma L_s S + R_a) i_{qs} - \sigma L_s \omega_s i_{ds} - \frac{M\omega_m}{L_r} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.67)$$

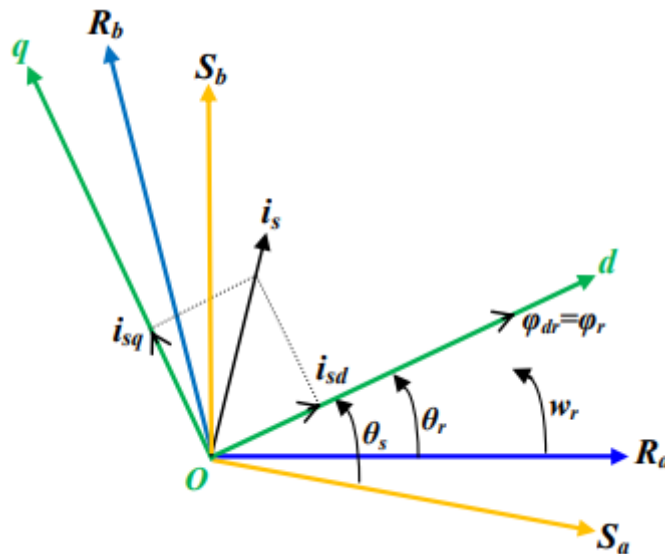


Fig.II.20 Représentation schématique de la commande vectorielle

VII. Calcul des régulateurs

a) Régulation de flux

Le schéma bloc de la régulation de flux est représenté par la figure (II.21). Il convient de régler le flux en agissant sur la composante du courant statorique i_{sd}^* .

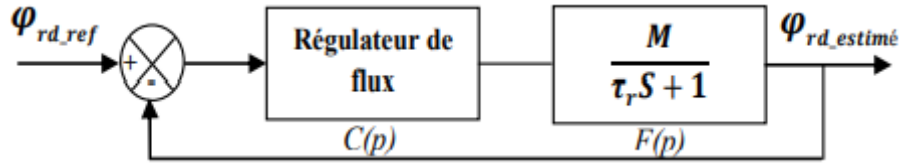


Fig.II.21 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation du flux rotorique

Prenant l'équation (II.62), le φ_{dr} sera :

$$(L_r S + R_r)\varphi_{dr} = MR_r i_{ds} \quad (II.68)$$

$$\frac{\varphi_{dr}}{i_{ds}} = \frac{MR_r}{L_r S + 1} \quad (II.69)$$

$$\frac{\varphi_{dr}}{i_{ds}} = \frac{M}{\tau_r S + 1} \quad (II.70)$$

Avec : $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$H(p) = C(p)F(p) \quad (II.71)$$

Avec : $C(P) = G \left(\frac{\tau_r' S + 1}{\tau_r' S} \right)$ (II.72)

$$H(P) = \left[G \left(\frac{\tau_r S + 1}{\tau_r S} \right) \right] \left[\frac{M}{\tau_r S + 1} \right] = \frac{MG}{\tau_r S} \quad (II.73)$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$G(p) = \frac{H(p)}{H(p)+1} \quad (II.74)$$

$$G(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{MG} S} = \frac{1}{1 + \tau_n S} \quad (II.75)$$

$$t_r = 3\tau_n = 3 \frac{\tau_r}{MG} \quad (II.76)$$

$$G = \frac{3L_s}{RMt_r} \quad (II.77)$$

b) Régulation des courants

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (II.22).

De l'équation (II.64) et (II.65) on déduit :

$$\begin{cases} \sigma L_s S i_{ds} + R_a i_{ds} = e_{sd} \\ \sigma L_s S i_{qs} + R_a i_{qs} = e_{sq} \end{cases} \quad (II.78)$$

$$\frac{i_{sdq}}{e_{sdq}} = \frac{1}{R_a} \left(\frac{1}{\tau_r S + 1} \right) \quad (II.79)$$

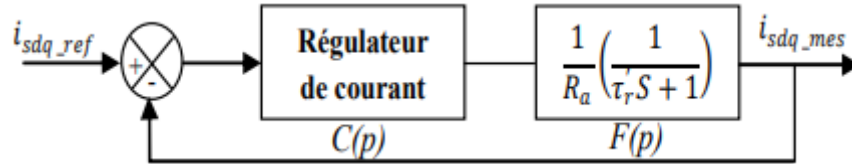


Fig.II.22 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation des courants statoriques

Avec : $\tau'_r = \frac{L}{R_a}$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$H(p) = C(p)F(p) \tag{II.80}$$

Avec : $C(p) = G \left(\frac{\tau'_r s + 1}{\tau'_r s} \right)$

$$H(p) = G \left[\left(\frac{\tau'_r s + 1}{\tau'_r s} \right) \right] \left[\frac{1}{R_a (\tau'_r s + 1)} \right] = \frac{G}{\tau'_r s R_a} \tag{II.81}$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$G(p) = \frac{H(p)}{H(p)+1} \tag{II.82}$$

$$G(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau'_r R_a}{G} s} = \frac{1}{1 + \tau_n s} \tag{II.83}$$

$$t_r = 3\tau_n = 3 \frac{\tau'_r R_a}{G} \tag{II.84}$$

$$G = \frac{3L_s}{t_r} \tag{II.85}$$

c) Régulation de vitesse

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (II.23). Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple électromagnétique.

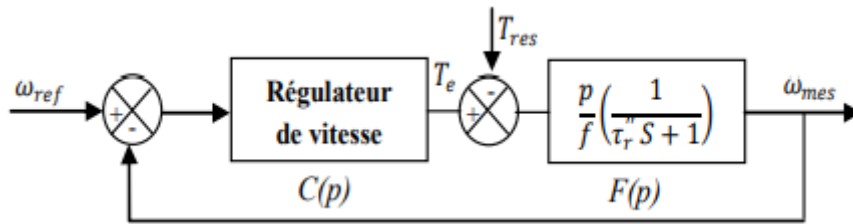


Fig.II.23 Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de la vitesse

Avec : $\tau''_r = \frac{J}{f}$

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

$$\frac{J d\Omega}{dt} + f\Omega = T_e \tag{II.86}$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + \frac{f}{p} \omega = T_e \tag{II.87}$$

$$\omega \left(\frac{J}{p} S + \frac{f}{p} \right) = T_e \tag{II.88}$$

$$\omega = \frac{p}{J s + f} T_e \tag{II.89}$$

Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système de pompage PV

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$H(p) = C(p)F(p) \quad (\text{II.90})$$

$$\text{Avec : } C(p) = G \left(\frac{\tau \gg rS+1}{\tau \gg rS} \right) \quad (\text{II.91})$$

$$H(p) = \left[\frac{G(\tau''rS+1)}{\tau''rS} \right] \left[\frac{P}{f} \left(\frac{1}{\tau''rS+1} \right) \right] = \frac{PG}{f\tau''rS} \quad (\text{II.92})$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$G(p) = \frac{H(p)}{H(p)+1} \quad (\text{II.93})$$

$$G(p) = \frac{1}{1 + \frac{f}{G}\tau''rS} \quad (\text{II.94})$$

$$\tau_m = \frac{f}{G}\tau''r$$

$$G = \frac{3J}{t_r}$$

VIII. Description du système global

La figure (II.24) montre la commande vectorielle d'une MAS dans un repère (dq), utilisé pour réguler le courant et le flux en fonction de leurs références. La commande vectorielle se caractérise par le découplage naturel entre le flux du rotor et le couple électromagnétique. Le découplage est obtenu en contrôlant les deux composantes du vecteur de courant du stator I_{ds} et I_{qs}

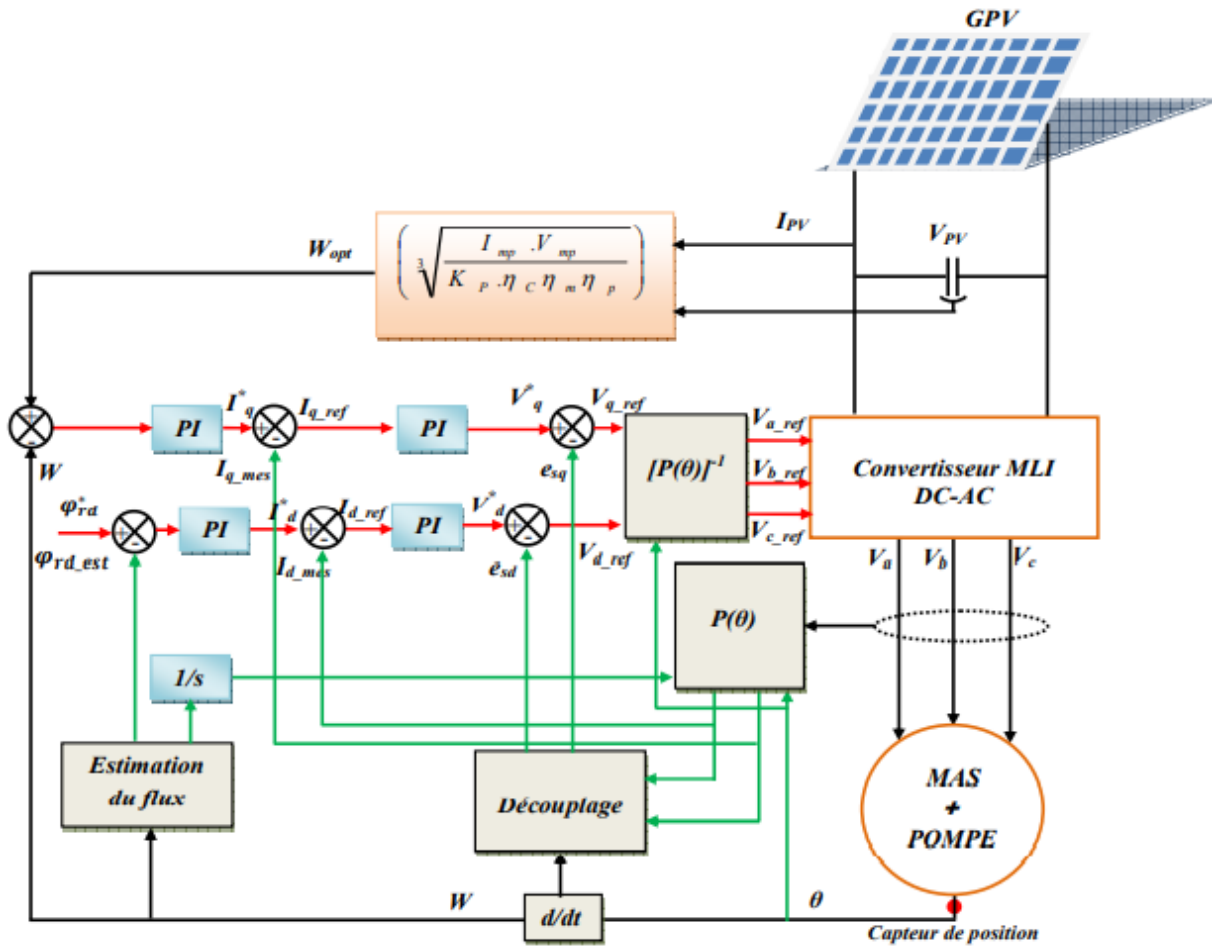


Fig.II.24 Schéma global de la commande vectorielle d'une MAS

Le flux rotorique réduit à sa seule composante d peut être commandé par le courant I_{ds} et le couple ou la vitesse par le courant I_{qs} .

IX. Modélisation de la pompe centrifuge

Le dimensionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres : le débit, la vitesse et la hauteur. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite.

a) Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale dépend fortement de la hauteur géodésique qui est la hauteur nette de transport d'eau. De plus de la hauteur géodésique, d'autres facteurs influent sur la hauteur manométrique totale à savoir les pertes de charge linéaires (ΔH_1) et singulières (ΔH_2) dans les conduites. Cette hauteur peut être exprimée sous cette formule

$$H = H_g + \Delta H \quad (\text{II.95})$$

b) Pertes de charges linéaires

Se sont les pertes d'eau dans la tuyauterie données par la formule (II.88):

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.96})$$

Avec :

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s²).

V : Vitesse moyennes du fluide (m/s) qui est donnée par : $v = \frac{4q}{\pi D^2}$

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(8 \frac{Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{II.97})$$

Les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation. Ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation et quand le diamètre de la conduite augmente, elles diminuent considérablement.

c) Pertes de charges singulières (locales)

Ces pertes dues essentiellement aux divers changements de section qui correspondent aux accidents de parcours dans les réseaux hydrauliques, elles peuvent être exprimées par

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \quad (\text{II.98})$$

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (\text{II.99})$$

$$\Delta H = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} = k_{fr} Q^2 \quad (\text{II.100})$$

Avec : k_{fr} Constante de canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_g + k_{fr}Q^2 \quad (II.101)$$

d) Caractéristique débit-hauteur

En général, la pompe est décrite par sa caractéristique hauteur/débit $H(Q)$ dont (H) est la hauteur manométrique totale et (Q) est le débit de la pompe. La caractéristique peut être estimée par le modèle de « Pleider-Peterman » et exprimée par la formule (II.94):

$$H = a_0\omega_m^2 - a_1\omega_m Q - a_2Q^2 \quad (II.102)$$

Avec a : 0, a_1 , a_2 des coefficients donnés par les fabricants.

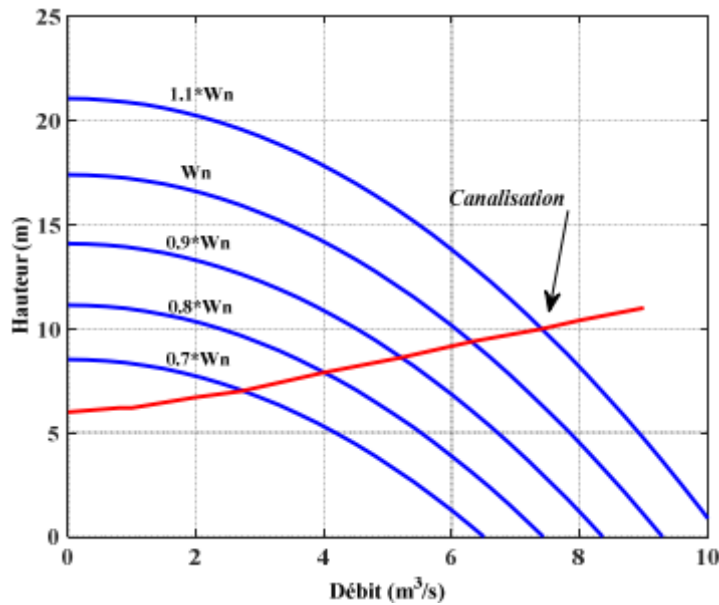


Fig.II.25 Caractéristiques $H(Q)$ et caractéristique de canalisation

e) Caractéristique couple vitesse $C(\omega)$ de la pompe

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse du moteur qui est de la forme suivante :

$$T_L = k_r\omega_m^2 \quad (II.103)$$

Avec : $K_r = \frac{P_m}{\omega_m^3}$

f) Calcul de puissance

L'énergie mécanique nécessaire à une pompe est toujours supérieure à l'énergie transmise au fluide suite aux différents frottements des organes de rotation. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_H = \frac{\rho g Q H}{\eta_P} \quad (II.104)$$

Avec : η_P le rendement de la pompe qui est de l'ordre de 0.4 à 0.8 pour les pompes centrifuges.

X. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique de chaque élément constituant notre système de pompage PV. Ce dernier est constitué de panneaux solaires, d'un convertisseur DC/DC, du groupe motopompe et d'un circuit hydraulique. Pour le générateur PV, nous avons présenté deux modèles: le modèle en une seule exponentielle et celui en double exponentielle. Ensuite, nous avons décrit brièvement le modèle du convertisseur DC/DCboost aussi on a présenté l'optimisation de l'énergie photovoltaïque par les différentes méthodes MPPT. Ainsi pour le dernier chapitre on va appliquer en simulations la commande MPPT par la méthode perturbe et observe.

L'onduleur de tension est étudié en considérant que ses composants sont parfaits et que la commutation de ses bras se fait d'une manière instantanée. Après cela nous avons présenté les modèles dynamiques des machines asynchrone utilisées pour ce type de système de pompage PV. Nous avons terminé le chapitre avec la modélisation de la pompe centrifuge. Pour la partie hydraulique, nous avons reporté les modèles caractérisant le fonctionnement d'une pompe centrifuge tout en tenant compte du régime d'écoulement et des pertes de charge. Donc l'objectif du chapitre suivant sera consacré au dimensionnement et à la simulation du fonctionnement du système.

CHAPITRE 3 :

DIMENTIONNEMENT

ET SIMULATION

I. Introduction

La modélisation et la simulation jouent un rôle très important dans l'analyse et la conception des systèmes, et depuis quelques années le développement des calculateurs a rendu la simulation du fonctionnement et le comportement d'un système quelconque possible. Ceci a permis un gain du temps énorme dans la vérification et la mise en épreuve d'une conception d'une part, l'évaluation des performances et les limites d'une réalisation d'autre part.

Le logiciel utilisé est MATLAB/SIMULINK parce qu'il permet la représentation facile, par des blocs accomplissant chacun une fonction prédéterminée, des systèmes dynamiques.

MATLAB est un logiciel de calcul numérique, de visualisation et de programmation très raffinée et conviviale, développé par la société (Mathworks). Mais aussi, un environnement des applications à part entière, il permet à l'utilisateur d'élaborer ses propres fonctions de véritables programmes, ainsi que, des interfaces graphiques très performantes.

Objectifs

- l'étude d'un système de pompage photovoltaïque, dont la motorisation est une pompe qui a pour entraînement une machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque.
- on a fait la simulation à éclairage constant et à éclairage variable.

II. Dimensionnement du générateur photovoltaïque et la pompe

Le débit crête Q (m^3/h) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3.6P_h}{g_h} \quad (III.01)$$

Où

P_h : Puissance hydraulique nécessaire (W).

g : Accélération de la pesanteur ($9.81 m/s^2$).

h : Hauteur manométrique totale (m).

La puissance hydraulique crête (P_h) nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque (P_e) est donnée par :

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad (III.02)$$

Où

η_{MB} : Rendement crête du sous-système moteur-pompe.

A. Énergie requise pour la pompe

$$E_{elec} = \frac{\text{constante hydraulique} * \text{le débit journalier} * \text{HMT}}{\text{Rendement du groupe motopompe}} \quad (\text{III.03})$$

$$E_{elec} = \frac{C_H * Q \left(\frac{m^3}{j} \right) * \text{HMT}(m)}{\eta_P} \quad (\text{III.04})$$

Où

E_{elec} : est habituellement exprimé en kWh

$$C_H = g * \varrho = \frac{9.81(m.s^{-2}) * 10 \left(\frac{kg}{m^3} \right)}{3600 \left(\frac{s}{h} \right)} = 2.725 \left(kg. s. \frac{h}{m^2} \right) \quad (\text{III.05})$$

Où

g : La constante de la gravité (9,81 m/s²) ;

ϱ : La densité de l'eau (1000 kg/m³) ;

η_P : Le rendement des groupes motopompes est de 30% à 45%, selon le type de pompe et de moteur.

- ✓ Projet : Irrigation d'une oasis de 365 de palmiers.
- ✓ Site : Ville de Tougourt
- ✓ Irradiation quotidienne : 5.71 kWh/m²/jour.
- ✓ Débit maximum : 8 m³/h
- ✓ Forage : HMT = 60 m.
- ✓ Module photovoltaïque choisi :

Poly-cristallin IBC Solo Sol
- ✓ Comportement lors de conditions de test standard (STC*)
- ✓ Puissance au point de puissance maximale Pmax = 225.14Wc
- ✓ Tension à vide Uoc = 36.7 V
- ✓ Tension au point de puissance maximale = 29.9 V
- ✓ Courant de court-circuit Isc= 8,18 A
- ✓ Courant au point de puissance maximale Impp = 7,53 A

B. Énergie hydraulique

$$E_c = \frac{C_H * Q * HMT}{\eta_p} = 8,720 \text{ Wh/j} \quad (\text{III.06})$$

$$\eta_p = 0.6$$

Énergie hydraulique est : $E_c = 8,720 \text{ Wh/j}$.

C. Énergie électrique

$$K = 0.7$$

$$E_p = \frac{E_c}{k} = 12,457.14 \text{ Wh/j.} \quad (\text{III.07})$$

$$\text{Énergie électrique } EP = 12,457.14 \text{ Wh/j.}$$

D. Puissance crête des panneaux photovoltaïques

$$I_R = 5.71 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$$

$$P_{pv} = E_p / I_R = 2181.63 \text{ W} \quad (\text{III.08})$$

E. Nombre total de panneaux

$$N_T = \frac{P_{pv}}{P_{Panneaux}} = \frac{2181.63}{225.14} = 9.69 \text{ panneaux} \quad (\text{III.09})$$

F. Nombre de panneaux en série

$$N_s = \text{Ent} \left(\frac{U_{\text{ond.max}}}{U_{\text{co}} * 1.15} \right) = \text{Ent} \left(\frac{400}{36.7 * 1.15} \right) = 9.47 \text{ donc: } 10 \text{ panneaux} \quad (\text{III.10})$$

G. Nombre de branche en parallèle

$$N_p = \text{Ent} \left(\frac{N_T}{N_s} \right) = \text{Ent} \left(\frac{10}{9.10} \right) = 1 \text{ donc } 1 \text{ branches} \quad (\text{III.11})$$

Donc le nombre de branche des panneaux en parallèle sera :

$$N_p = 1 \text{ branches}$$

Donc le nombre panneaux corrigé sera: 10 panneaux donc la puissance crête corrigé est de $10 * 225.14 = 2225.14 \text{ W} = 2.25 \text{ Kw}$

$$P_c = 2225.14 \text{ Wc}$$

On 10 panneaux car $10 * 225.14 = 2251.47 \text{ Wc} = 2.25 \text{ Kw}$

III. CHOIX DE MATERIEL

III.1 Choix de la pompe

On choisit la pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale, on calcule le débit horaire par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q\left(\frac{\text{m}^3}{\text{jour}}\right)}{h} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

h : Nombre d'heures d'ensoleillement moyens (Environ 4 heures).

Q : Débit voulu (32 m³/jour).

$$Q_h = \frac{32}{4} = 8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Sachant que la hauteur manométrique totale est de 60 m, alors on choisit une pompe. Qui a les caractéristiques suivantes:

A partir de la documentation sur les pompes on détermine le type de pompe à utiliser.

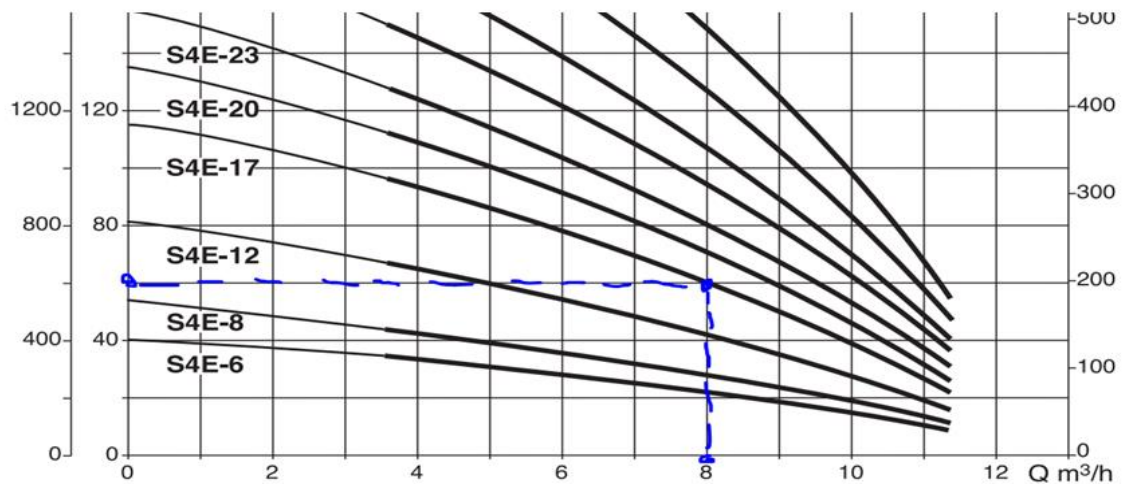


Fig.III.01 Caractéristique de la pompe utilisée

MODÈLE	DONNÉES ÉLECTRIQUES				
	MOTEUR	P2 NOMINALE		ALIMENTATION 50 Hz	In A
		kW	ch		
S4 E 17	4GGT	2,2	3	3x400 V ~	5,9
	40LT	2,2	3	3x400 V ~	6
S4 E 20	4GGT	3	4	3x400 V ~	8,3
	40LT	3	4	3x400 V ~	7,9
S4 E 23	4GGT	3	4	3x400 V ~	8,3
	40LT	3	4	3x400 V ~	7,9
S4 E 27	4GGT	4	5,5	3x400 V ~	10
	40LT	4	5,5	3x400 V ~	10,2

Fig.III.02 Catalogue et abaque des pompes.

A partir de la documentation sur les pompes immergées, on détermine sur l'abaque $H = f(Q)$ le type de pompe à utiliser voir figure (III.02).

Les caractéristiques de la pompe choisie

Type : DAB. - ~~S4E-17~~

-Débit nominal : 8m³/h.

-Tension d'entrée : 3x400 v.

-Immersion : Jusqu'à 60 m

IV. simulation du système global

Dans ce chapitre l'optimisation du système motopompe est effectuée par l'intégration entre l'onduleur et le générateur photovoltaïque un hacheur qui garantit l'extraction de la puissance optimale et ce grâce à l'algorithme MPPT.

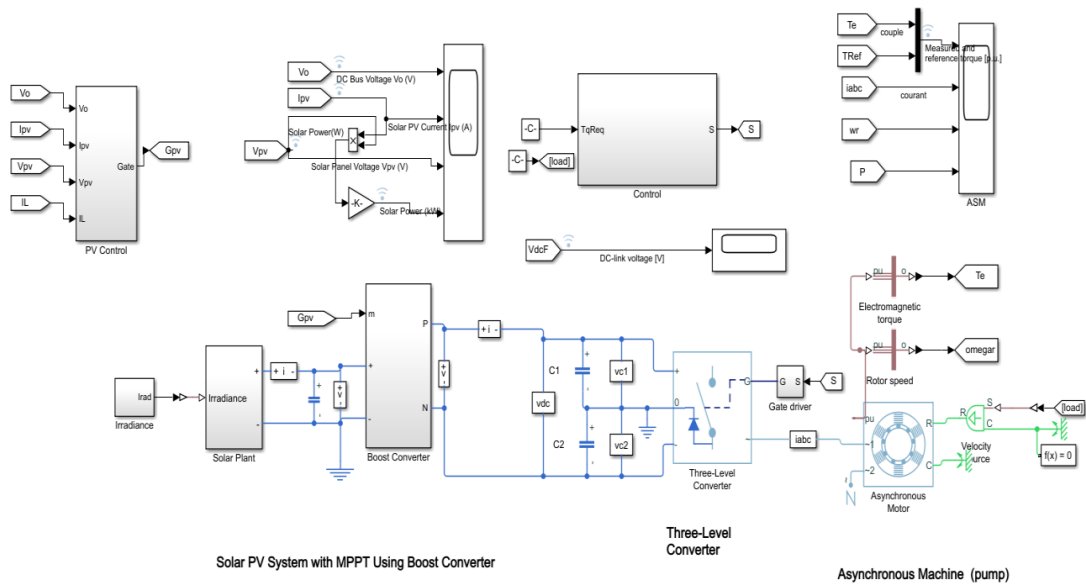


Fig.III. 03 Bloc de simulation du système complet

A. Description du système de pompage étudié

Ce système contient un contrôleur une boucle de régulation de vitesse externe pour le fonctionnement optimal du groupe motopompe, un algorithme de poursuite du point de puissance. La fonction MPPT est assurée par un convertisseur DC/DC de type élévateur.

B. Choix de la motopompe et du générateur PV

Le choix de la puissance de la pompe a été dicté par la puissance de moteur, lui-même dicté par un choix de débit et une HMT (8 m³/h ; 80m) voir chapitre II.

C. Fonctionnement sous des conditions constantes

La technique d'optimisation utilisée, soit la méthode de perturbation et observation Cette technique consiste en la maximisation de puissance électrique et ce, pour le générateur photovoltaïque et pour la quantité d'eau pompée pour des paramètres climatiques données (éclairage, température).

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température=25°C et =1000W/m².

D. Résultats de simulation

Coté GPV

Dans ce cas de simulations les paramètres (température T et l'ensoleillement G) sont maintenus constants. Les Figure III-(2,3,4,5) montrent les signaux de courant de sortie du GPV ; de la puissance de sortie du panneau solaire ; la tension de sorties du GPV et la tension a la sortie du hacheur boost .

La figure (III.04) représente l'évolution de courant de panneau photovoltaïque, La courbe à monte jusqu'à ce 8A puis stabilise. Progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne 7.5 A,

La figure (III.05) représente l'évolution la puissance générée par le GPV en fonction de temps, avant le BOOST, la puissance est égale à 2,25kw.

La figure (III.06) représente l'évolution de tension de panneau photovoltaïque, avant le !BOOST, on à t=0, une augmentation de tension jusqu'à 220v puis une petite chute à 200v puis elle augmente progressivement jusqu'à 280v.

La figure (III.07) représente l'évolution de tension de du bus continu, après le hacheur élévateur qui atteint la valeur de 380

Cote la MAS

Figure (III.12) présente L'allure du courant de sortie isd et isq Après le BOOST, le courant isq est nulle qui caractérise la commande vectorielle a flux rotorique oriente, par contre l'allure de isd se stabilise vers 3A.

Le flux de la Figure (III.09) suit le même trajet de l'allure de isd car ils sont proportionnels.

Figure (III.10) représente l'allure de couple mesuré, on voit que le couple augmente jusqu'à 24 A puis se stabilise vers sa référence 12.5A.

Figure (III.12) représente l'allure de courant rotorique en fonction de temps, on remarque quand t=0.1 s, le courant oscille de -3 à 3 A.

Figure (III.13) représente La vitesse de Rotation qui se stabilise vers n=1500 tr/min.



Fig.III.04 L'allure de l'évolution du courant a la sortie de PV(I_{pv}) en fonction de temps



Fig.III.05 L'allure de l'évolution de puissance absorbée dans PV en fonction de temps.

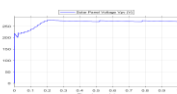


Fig.III.06 L'allure de l'évolution de la tension dans le PV(V_{pv}) en fonction de temps

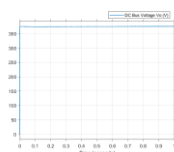


Fig.III.07 tension du bus continu Vdc

Cote la MAS

Figure (III.08) présente L'allure de le courant de sortie isd et isq Après le BOOST, le courant isq est nulle qui caractérise la commande vectorielle a flux rotorique oriente, par contre l'allure de isd se stabilise vers 3A. Le flux Figure IV-7 suit le même trajet de l'allure de isd car ils sont proportionnels.

Figure (III.11) représente L'allure de l'évolution de La puissance absorbe par la MAS en fonction de temps , on remarque quand $t=0.1s$, une pique jusqu'à $p=3.9kw$, puis quand $t = t > 0.1 s$, la puissance se stabilise vers $p=2kw$.

Figure (III.10) représente l'allure de couple mesuré, on voit que le couple augmente jusqu'à 24 A puis se stabilise vers sa référence 12.5A.

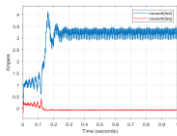


Fig.III.08 L'allure du courant de sortie isd et isq.

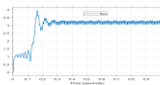


Fig.III.09 L'allure de l'évolution de Le flux magnétique en fonction de temps.

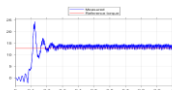


Fig.III.10 L'allure d'évolution Couple Mesuré et la référence.

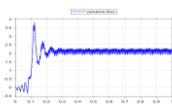


Fig.III.11 L'allure de l'évolution de La puissance de MAS en fonction de temps.

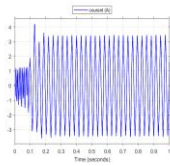


Fig.III.12 L'allure de l'évolution de courant Rotorique en fonction de

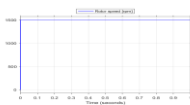


Fig.III.13 Vitesse de Rotation

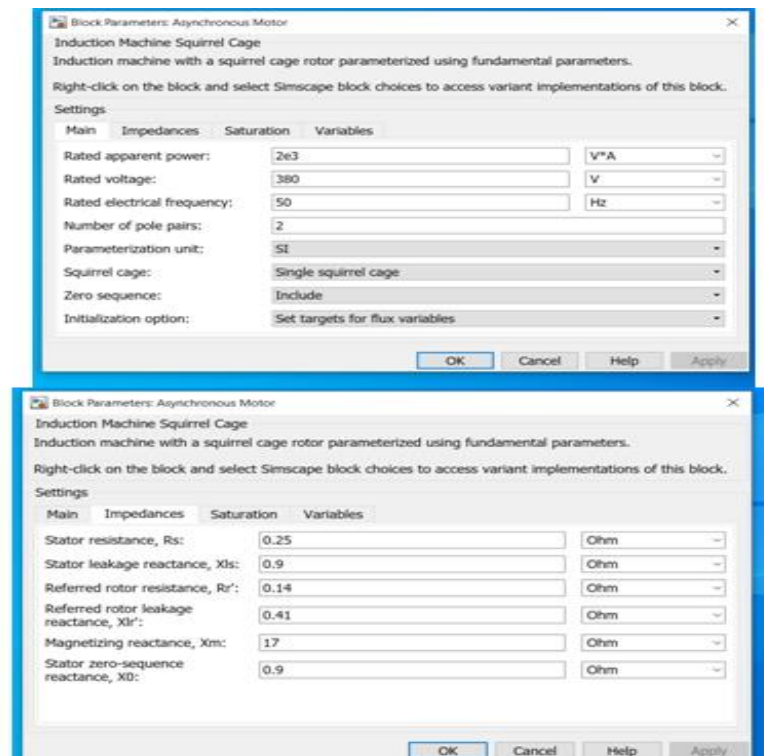


Fig.III.14 Les paramètres utilisés.

V. CONCLUSION

Les résultats de dimensionnement sont bien validés par la simulation ceci montrent l'avantage de la commande en puissance d'un système de pompage photovoltaïque.

CONCLUSION

GENERAL

Conclusion générale

Le présent travail a porté sur la modélisation et la simulation des systèmes de pompage photovoltaïque. Ces systèmes se présentent comme une solution idéale pour l'alimentation en eau pour les régions isolées.

Dans cette étude, nous avons présenté les modèles mathématiques qui régissent le fonctionnement de chaque composante du système globale à savoir : le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC et enfin le groupe motopompe.

Le système de pompage solaire est effectué sans aucun stockage d'électricité et réalisé à l'aide d'une connexion directe au générateur photovoltaïque.

Une commande vectorielle du MAS est utilisée pour augmenter l'efficacité et la performance du système ou la vitesse de référence du moteur est modifiée selon la valeur de la puissance maximale disponible au générateur photovoltaïque. Le point de puissance maximale est déterminé en utilisant des techniques MPPT (P&O, Filtre Kalman). Les résultats de simulation ont montré la différence entre le système de pompage solaire sans commande MPPT et avec MPPT et ainsi de suite l'influence de l'MPPT sur le rendement de pompage, aussi la différence entre les deux méthodes de commande MPPT. En ce qui concerne les perspectives de ce travail, nous pouvons citer :

- ✓ L'optimisation de système de pompage photovoltaïque par des techniques de l'intelligence artificielle comme les algorithmes génétiques, la logique floue, les réseaux de neurones artificiels.
- ✓ Développer des lois de commande à base des techniques intelligentes et ceux-ci en vue de surmonter les problèmes de non linéarité du modèle imposé par la source PV et la charge. Par ailleurs, l'amélioration du bilan énergétique pourrait être examinée en considérant le niveau du flux rotorique comme un degré supplémentaire dans la procédure d'optimisation.

Bibliographies

- [1] Ionel Vechiu, « *MODELISATION ET ANALYSE DE L'INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS UN RESEAU AUTONOME* », Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [2] M.MAHMOUDI, « *Modélisation et Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone.* » Document cours, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [3] H.TAMRABET, «*Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone.* » Thèse de magister, université de Batna 2006.
- [4] G.BUSHE, « *Commande Vectorielle de Machine Asynchrone en Environnement Réel Matlab /Simulink.* » Thèse d'ingénieur, C.U.E.F.A Grenoble, 7 mars 2001.
- [5] Philippe Barret, «*Régimes transitoires des machines électriques*», Edition EYROLLES, 1987.
- [6] Rabah BELHADEF, Bilal BOUTAYA, « *Commande vectorielle et par logique de la MAS sans capteur*», mémoire de l'ingénieur d'état en électrotechnique, école national polytechnique, 2008.
- [7] G.SEGUIER, « *Convertisseurs de l'Electronique de Puissance, VI : la Conversion Alternative-Continue.* » Technique et Documentation Lavoisier (Paris), 1984.
- [8] Y.DAILI, A.MAKOUF, Med-S NAIT.SAID, « *Une Simple Technique de Contrôle de Courant par Hystérésis d'un onduleur de tension à fréquence de commutation constante.* » Document cours, Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction.
- [9] H.WANG, B.FAHIMI, S.PEKAREK, E.ZIVI, J.CIEZKI, « *Improvement of Fault Tolerance in AC Motor Drives Using a Digital Delta-Hysteresis Modulation Scheme.* » ESRDC Research Project Report, 13 janvier 2004.
- [10] H.CHEKIREB, « *La Conversion Continue Alternative.* » Notes de cours Electronique de Puissance, Ecole Nationale Polytechnique.
- [11] Ionel VECHIU : « *Modélisation et Analyse de L'Intégration des énergies renouvelables Dans les Réseaux Autonomes* », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Havre (Basque de san Sebastian), 2005.

- [12] O.AMRANI, D.REKIOUA : « *Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques* », Université de Bejaïa.
- [13] « *Handbook on Solar Water Pumping, Intermediate Technology Power & Partners*», 1984.
- [14] N. BENYAHIA, K. SRAIRI, S. M. MIMOUNE, « *Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique* », Courrier du Savoir N°06, Juin 2005.
- [15] Melle Kefsi Djamilia, Melle Ouikene Fetta, « *Commande d'un système photovoltaïque* », Université Mouloud MAMMERRI de TIZI-OUZOU, 2009.
- [16] Pierre Mayé , « *Aide-mémoire Electrotechnique*», Edition DUNOD, Paris 2006.
- [17] A.Saadi , « *Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque* ». Mémoire De Magister en Electrotechnique, Université Mohammed Khider, Biskra, 2001.
- [18] L.BAGHLI,« *Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques.* », Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy, 14 janvier 1999.
- [19] H. BUHLER «*Réglage par Logique Floue* », Collection Electricité, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994.
- [20] H. BELHADEF & S. BENDAOU «*La Logique Floue avec Optimisation par les Algorithmes Génétiques Appliquée à la Commande d'Attitude d'un Satellite* », PFE, Département de Mathématique, Faculté de Sciences, Université Saad Dahlab, Blida, 2005.
- [21] P. BORNE & J. ROZINOER & J.-Y. DIEULOT & L. DUBOIS, «*Introduction à la Logique Floue* », Editions TECHNIP, Mars 1998.
- [22] A. KAUFMANN «*Introduction à la Logique Floue*», technique de l'ingénieur, Volume A 120 ; R7 032.
- [23] J.-M.ALLENBACH «*Systèmes Asservis, Volume 5R : Asservissement par logique floue*», Document de cours, Centre de Compétences en Automatisation Industrielle et Productique, Ecole d'ingénieurs de Genève, édition 2001.
- [24] Paul Akiki « *Conception multi-physique de machines électriques à flux radial et axial pour des applications entraînement direct* » thèse doctorat, École Supérieure d'Electricité, September 2017.
- [25] .P. Carou and J.P. Hautier, “Modélisation et commande de la machine asynchrone, ” *Méthode et pratique de l'ingénieur*, Paris, Chapitre 2, pp. 42,1995.

- [26] L. Zarour, R. Chenni, "Improvement of synchronous and asynchronous motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control," *Journal of Electrical*.
- [27] A. Ghoneim, "Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 11, pp. 1449-1463, Oct 2006.
- [28] A. Mokeddem and A. Midoun, "Performance of a directly-coupled PV water pumping.
- [29] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies," ,” *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, vol. 146, issue 2, pp. 193-200, 1999.
- [30] A. Betka and A. Attali, "Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory," *Solar Energy*, vol. 84, issue 7, pp. 1273–1283, 2010.
- [31] A. A. Ghoneim "Design optimization of photovoltaic powered waterpumping systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 1449–1463, 2006.
- [32] A. Lokriti and Y. Zidani, "Comparaison des performances des régulateurs PI et IP appliques pour la commande vectorielle a flux rotorique oriente d'une machine asynchrone," in *Proc. 8^{ème} Conférence Internationale de modélisation et simulation*, 2010.
- [33] M. F. Mimouni, M. N. Mansouri, B. Benghanem, and M. Annabi, "Vectorial command of an asynchronous motor fed by a photovoltaic generator," *Renewable Energy* , vol. 29, issue 3, pp. 433–442, 2004.
- [34] A. A. Ghoneim, "Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 1449–1463, 2006.
- [35] M. Arrouf and S. Ghabroub, "Modeling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the Matlab/Simulink programming environment," *Desalination*, vol. 209, pp. 23–30, 2007.
- [36] N. Argaw, " Optimization of photovoltaic water pumps coupled with an interfacing pulse width modulated dc/ac inverter power conditioning device," in *Proc. 1994 IEEE First WCPEC*, 1994, pp. 1156-1168.
- [37] Abdelhak Bouchakour, Mostéfa Brahami, Abdelhalim Borni, Layachi Zaghba, Fazzani Amor, "A comparative and analytical study of various MPPT techniques

applied in PV systems for fast changing environmental conditions” 978-1-4673-7894-9/15/\$31.00 ©2015 IEEE

- [38] **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami, Abdelhalim Borni, Layachi Zaghba, Fazzani Amor, “Performance Comparison of PI and IP Controllers Used to Control a DC Machine Powered by a Photovoltaic Generator” *Proceedings of Engineering and Technology – PET Copyright - IPCO 2015*.
- [39] **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami and Abdelhalim Borni “Comparative Study on Photovoltaic Pumping Systems Driven by Different Motors Optimized with Sliding Mode Control” *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 7, no. 32017, pp201.216,

RESUME

Ce travail porte sur l'étude d'un système d'énergie photovoltaïque qui alimente une machine asynchrone. L'insertion d'un étage d'adaptation entre un générateur photovoltaïque (PV) et la charge optimise le transfert d'énergie. Ainsi, cet étage, commandé par une MPPT (Maximum Power Point Tracking), permet de rechercher en permanence le point maximum de puissance délivrée par le module PV. Les résultats de la simulation montrent que l'algorithme MPPT proposé via l'approche P&O, permet d'améliorer le rendement du système photovoltaïque de manière significative et assurer aussi la robustesse. L'onduleur triphasé représente un sous-ensemble important pour entraîner le moteur Asynchrone alimenté par un générateur photovoltaïque,

نبذة مختصرة

يركز هذا العمل على دراسة نظام الطاقة الكهروضوئية الذي يشغل آلة غير متزامنة. يؤدي إدخال والحمل إلى تحسين نقل الطاقة. وبالتالي، فإن هذه (PV) مرحلة المطابقة بين المولد الكهروضوئي (أقصى تتبع لنقطة الطاقة)، تجعل من الممكن البحث MPPT المرحلة، التي يتم التحكم فيها بواسطة بشكل دائم عن أقصى نقطة للطاقة التي توفرها الوحدة الكهروضوئية. تظهر نتائج المحاكاة أن تعمل على تحسين كفاءة النظام الكهروضوئي بشكل كبير P&O المقترحة عبر نهج MPPT خوارزمية وتضمن أيضاً المتانة. يمثل العاكس ثلاثي الطور مجموعة فرعية مهمة لقيادة المحرك غير المتزامن المدعوم بمولد كهروضوئي،

Mots clé :

Système de pompage photovoltaïque, convertisseur DC/DC, moteur à courant continu, convertisseur Boost, commande MPPT, Machine asynchrone, Commande vectorielle,

الكلمات الدالة:

، آلة غير MPPT ، محول دفعة ، تحكم DC ، محرك DC / DC نظام الضخ الكهروضوئي، محول متزامنة ، تحكم في القوة الموجهة ،