

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des sciences et de la technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم و التكنولوجيا

Département de l'électrotechnique

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de

Master en Électromécanique *Option : Électromécanique*

Thème

Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque

Encadré par:

Mr : HadeF Mounir

Réalisé par:

Yakoub Berkas

Tarek Boudjerda

Année universitaire 2019/2020

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89
<http://www.univ-jijel.dz>

Remerciements

Tout d'abord, louange à « ALLAH » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

*Nous tenons à exprimer mes remerciements et notre gratitude à monsieur **Hadef Mounir**, pour tous ses efforts, ses conseils, son soutien moral et scientifique nous a permis de mener à terme ce travail.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants de département Génie Electrique de l'université Mohamed Seddik ben Yahia de Jijel, pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Pour terminer, nous tenons à remercier tous nos collègues et nos amis pour leur soutien moral et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, mes relatives, qui ont su me motiver afin de réussir dans ma vie, qui ont consacré leur vie en pour mon bonheur et mon bien être.

Mes sœurs et frères, Mes amis qui ont toujours été un grand appui pour moi.

*Mon encadreur monsieur, **Hadef Mounir** qui m'a été d'une grande aide durant la réalisation de ce mémoire.*

Mes enseignants, mes amis et mes collègues durant Cinq ans de ma formation

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

TAREK

YAKOUB



Sommaire

Table des matières

Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Généralités sur les système de pompage PV</u>	
Introduction.....	3
I.1 Énergie renouvelable en Algérie	3
I.2 Potentiel solaire en Algérie	4
I.3 Généralités sur le panneau photovoltaïque	4
I.3.1 Le solaire photovoltaïque.....	4
I.3.2 Rayonnements solaires	5
I.3.3 Types des cellules photovoltaïques.....	6
I.3.4 Différents types des systèmes photovoltaïques	7
I.3.5 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque	8
I.3.6 Secteurs d'applications	9
I.4 Convertisseurs de puissance.....	10
I.4.1 Les hacheurs	10
I.4.2 Les onduleurs	12
I.5 Notions de base sur la MSAP.....	14
I.5.1 Stator	14
I.5.2 Rotor.....	15
I.5.3 Structure des aimants de la machine.....	16
I.5.4 principe de fonctionnement	16
I.5.5 Les avantages et les inconvénients de la MSAP	17
I.5.6 Domaine d'application	17
I.6 Notions générales sur les Pompes.....	18
I.6.1 définition d'une pompe.....	18
I.6.2 Les différents types des pompes	18
I.6.3 Constitution d'une pompe centrifuge	19
I.6.4 Les différents types des pompes centrifuges	20
I.6.5 Caractéristiques d'une pompe.....	22
I.6.6 Critères de choix d'une pompe centrifuge	23
I.6.7 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges	23
Conclusion.....	24

Chapitre II ; Modélisation et Simulation des différents composants d'un système de pompage PV

Introduction.....	25
II.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	25
II.1.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	25
II.1.2 Caractéristiques d'un module photovoltaïque	29
II.1.3 Interprétations des Résultats.....	37
II.3 Modélisation du convertisseur Boost.....	37
II.4 La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT).....	39
II.4.1 La méthode Perturbation & Observation (P&O).....	39
II.5 Modélisation de la MSAP	41
II.5.1 Hypothèses simplificatrices	41
II.5.2 Mise en équation de la MSAP en triphasé	42
II.5.2.1 Les équations électriques	42
II.5.2.2 Équation électromagnétique.....	44
II.5.2.3 Équation mécanique	44
II.5.2.4 La puissance absorbée	44
II.5.3 Mise en équation de la MSAP en diphasé (model vectoriel).....	45
II.5.3.1 Principe de la transformation de Park	45
II.5.3.2 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park.....	46
II.5.3.3 Le choix de référentiel	49
II.5.4 résultats de simulation de la MSAP	50
II.5.5 Interprétation des résultats.....	51
II.6 Modélisation de la pompe centrifuge	51
II.6.1 Les pertes de charge	52
II.6.2 Caractéristiques d'une pompe centrifuge	53
II.6.2.1 Caractéristique Débit -vitesse	53
II.6.2.3 Caractéristique Débit - hauteur	54
II.6.2.4 Caractéristique de la puissance	55
II.6.3 Modèle de la pompe utilisé en simulation	56
Conclusion	56

Chapitre III : Association des différents composants d'un système de pompage PV

Introduction.....	57
III.1 Méthode de dimensionnement	57
III.2 Evaluation des besoins en eau	57
III.3 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.....	58
III.4 Dimensionnement de la pompe centrifuge	58
III.5 Dimensionnement du moteur.....	59
III.6 Dimensionnement du champ photovoltaïque	59
III.6.1 Estimation du nombre de modules	59
III.6.2 Estimation du nombre de module en série.....	60
III.6.3 Estimation du nombre de branche en parallèle	60
III.7 Résultats de simulation.....	60
III.8 Interprétations des résultats	64
Conclusion	64
Conclusion générale.....	65

Liste des Figures

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de pompage PV

Figure I.1 : Différents familles d'énergies renouvelables.....	3
Figure I.2 : Carte préliminaire des irradiances solaires de l'Algérie.....	4
Figure I.3 : La conversion d'énergie solaire photovoltaïque.....	5
Figure I.4 : Types des cellules photovoltaïques.....	7
Figure I.5 : Schéma représentative d'une chaîne de pompage photovoltaïque	9
Figure I.6 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	11
Figure I.7 : Schéma électrique d'un hacheur Buck	11
Figure I.8 : Schéma électrique d'un hacheur BOOST	12
Figure I.9 : Convertisseur dévolteur-survolteur.....	12
Figure I.10 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont.....	13
Figure I.11 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont.....	13
Figure I.12 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé.....	14
Figure I.13 : Structure d'une machine synchrone à aimants permanents	14
Figure I.14 : Moteur à aimants permanents.....	15
Figure I.15 : Formes simplifiées de la machine synchrone à aimants permanents	15
Figure I.16 : Différentes configurations rotorique de MSAP.....	16
Figure I.17 : Schéma d'une pompe centrifuge	20
Figure I.18 : Classification des pompes.....	21
Figure I.19 : Types des Pompes centrifuges.....	21

Chapitre II : Modélisation et simulation des différents composants d'un système de pompage PV

Figure II.1 : schéma d'une cellule photovoltaïque idéale.....	25
Figure II.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque réelle.....	27
Figure II.3 : Schéma d'un champ photovoltaïque réelle	28
Figure II.4 : la caractéristique électrique I (V) du module Isofoton I_106 dans les conditions Standards.....	29
Figure II.5 : la caractéristique électrique P(V) du module Isofoton I_106 ans les conditions standards.....	30
Figure II.6 : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques I(V).....	30
Figure II.7 : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P(V).....	31

Figure II.8 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V).....	31
Figure II.9 : Influence de la température sur les caractéristiques P(V).....	32
Figure II.10 : L'influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques électriques I(V).....	32
Figure II.11 : L'influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques électriques P(V).....	33
Figure II.12 : L'influence de la résistance shunt R_{sh} sur les caractéristiques électriques I(V).....	33
Figure II.13 : L'influence de la résistance shunt R_{sh} sur les caractéristiques électriques P(V).....	34
Figure II.14 : Caractéristique I(V) des cellules en série.....	34
Figure II.15 : Caractéristique P(V) des cellules en série.....	35
Figure II.16 : Caractéristique I(V) des cellules en parallèle.....	35
Figure II.17 : Caractéristique P(V) des cellules en parallèle.....	36
Figure II.18 : Caractéristique I(V) d'une association mixte.....	36
Figure II.19 : Caractéristique P(V) d'une association mixte.....	37
Figure II.20 : Schéma électrique d'un hacheur BOOST.....	37
Figure II.21 : principe de la commande perturbation & d'observation.....	40
Figure II.22 : Algorithme de la méthode P&O.....	41
Figure II.23 : Représentation d'une machine synchrone à aimants permanent dans le Repère triphasé.....	42
Figure II.24 : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q).....	45
Figure II.25 : Représentation de la MSAP dans le système d'axe biphasé d-q.....	46
Figure II.26 : Vitesse de rotation.....	50
Figure II.27 : Courants statoriques.....	50
Figure II.28 : Couple électromagnétique.....	51
Figure II.29 : Composantes $\alpha\beta$ du flux φ_s	51
Figure II.30 : Caractéristique débit-vitesse d'une pompe centrifuge.....	54
Figure II.31 : Caractéristique couple - vitesse d'une pompe centrifuge.....	54
Figure II.32 : Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.....	55
Figure II.33 : Caractéristique de la puissance hydraulique de la pompe centrifuge.....	56

Chapitre III : Association des différents composants d'un système de pompage PV

Figure III.1 : Schéma d'association des éléments de pompage PV.....	56
Figure III.2 : Courbe des puissances en fonction du temps.....	59
Figure III.3 : Courbe de la variation du couple en fonction du temps.....	60
Figure III.4 : Courbe de la variation du débit en fonction de la vitesse.....	60
Figure III.5 : Courbe de la variation du couple moteur C_r en fonction de la vitesse	60
Figure III.6 : Courbe de la variation de la hauteur en fonction du temps.....	61
Figure III.7 : Courbe de la variation de la puissance hydraulique en fonction du débit.....	61
Figure III.8 : Courbe de la variation de la puissance hydraulique en fonction du temps.....	61
Figure III.9 : Courbe de la variation du débit en fonction du temps.....	62
Figure III.10 : Courbe de la variation de la hauteur en fonction du débit.....	62
Figure III.11 : Courbe de la variation de la vitesse en fonction du temps.....	62

Liste des symboles

Liste des symboles

E_{ph} : Énergie des photons en (Joule)

λ : Longueur d'onde en (μm)

ν : Fréquence des photons en (Hz)

C : Vitesse de la lumière

I_0 : Courant de saturation inverse

V_{ch} : Tension de système

V_{mp} : Tension de panneau

V_d : Tension aux bornes de la diode

V_t : Potentiel thermique

P_d : La puissance désirée (W)

P_{mp} : La puissance crête aux bornes de panneau isofoton_106

$I_{0,ref}$: Courant de saturation inverse de référence

E_g : Energie de gap (1.12 pour Si)

n : Facteur d'idéalité de la jonction PN

k : Constante de Stefan Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

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

I_{ph} : Courant de photons (A)

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

R_s : Résistance série (Ω)

R_{sh} : Résistance parallèle (Ω)

T : Température actuelle de la cellule (K)

T_{ref} : Température de référence de la cellule solaire (K)

N_s : Nombres des cellules connectées qui contient le panneau

N_{ss} : Les nombre des modules en séries

N_{pp} : Les nombre des modules en parallèle

K_v : Coefficient de court-circuit

φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant à travers les enroulements statoriques

φ_d : La composante de flux sur l'axe direct

Liste des symboles

φ_q : La composante de flux sur l'axe quadratique

θ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé

ω : La pulsation électrique

p : Le nombre de paires de pôles de la machine

Ω_r : La vitesse de rotation de la machine (rotor)

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur

C_r : Couple résistant

f : Coefficient de frottement

J : Moment d'inertie du moteur

P_a : La puissance absorbée par le moteur en (W)

n_s : La vitesse du champ tournant en (tr/s)

X : représente les variables considérées de la machine qui sont tensions, courants ou flux

X_o : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible

V_{dqo} : sont les composants directs, en quadrature et homopolaire de la tension

i_{dqo} : sont les composants directs, en quadrature et homopolaire du courant

φ_{dqo} : sont les composants directs, en quadrature et homopolaire du flux

H : Hauteur manométrique totale de la pompe en (m)

H_s : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau

H_d : Est la somme des pertes linéaires et singulières

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires

L : Longueur de la tuyauterie (m)

D : Diamètre de la tuyauterie (m)

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

V : Vitesse moyenne du fluide (m/s)

K_{fr} : Constante de la canalisation

K_0, K_1, K_2 : Des constants propres de la pompe donnée par le constructeur

P_h : Énergie hydraulique (W)

Q : Volume d'eau (m^3/s)

ρ : Densité de l'eau (1000 kg/m^3)

Liste des symboles

g : Accélération de la pesanteur ($9,81\text{m/s}^2$)

$Z_{s,d}$: Cote géodésique entre les brides de refoulement et d'aspiration de la pompe en m

V_d : Vitesse d'écoulement au niveau de la bride de refoulement

V_s : Vitesse d'écoulement au niveau de la bride d'aspiration

D : Diamètre intérieur de la bride considérée en m

Δp : Pression de refoulement en (Pa)

Q : Le débit (m^3/s)

Q_1 : Le débit max (m^3/s)

H_1 : La hauteur max (m)

P : La puissance (W)

P_1 : La puissance max (W)

N : La vitesse (rad/s)

N_1 : La vitesse max (rad/s)

P_h : La puissance hydraulique (W)

P_{mec} : La puissance mécanique (W)

n_p : Le rendement de pompe centrifuge

P_e : La puissance électrique (W)

P_{mec} : La puissance mécanique (W)

n_m : Le rendement de MSAP

φ : Facteur de puissance

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole, qui représente 81% de la production énergétique dans le monde en 2009 ce qui entraînera dans les quelques prochaines décennies un risque d'épuisement de ces ressources. En plus, la croissance de la demande d'énergie se traduit généralement par une fluctuation du prix du pétrole dans le marché mondial [1].

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles ; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre [2].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée dans diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage.

Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible ; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [3].

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes solaires de pompage de l'eau pour fournir des approvisionnements domestiques, bétail et irrigation en eau dans des régions éloignées, ont gagné énormément d'acceptation, fiabilité et performance et de nos jours ils appartiennent à la plupart des applications significatives d'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique [4].

Ce travail est principalement subdivisé en trois chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion générale.

- Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les éléments qui constituent un système de pompage photovoltaïque et ses applications dont on va expliquer le principe de fonctionnement de chaque élément et leur application.
- Le deuxième chapitre est réservé à la modélisation mathématique et la simulation de différents composants essentiels à la chaîne individuellement.
- Le troisième chapitre présentera une simple méthode de dimensionnement de système PV puis la simulation de la chaîne globale du système de pompage PV.

Finalement, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

***Chapitre I : Généralités sur les systèmes
de pompage PV***

Introduction

Ces dernières années, la consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter en raison de la croissance démographique et aux développements technologiques. Par contre, les ressources combustibles fossiles sont en cours d'épuisement. Alors, il est indispensable de s'orienter vers d'autres alternatives, basées sur les énergies renouvelables permettant de satisfaire la demande en énergie électrique universel. L'Algérie possède d'énormes potentiels inépuisables comme l'énergie éolienne, solaire et hydraulique..., la figure (I.1) décrit les différentes formes d'énergies renouvelables.



Figure I.1 : Différents familles d'énergies renouvelables

L'énergie solaire photovoltaïque reste une alternative pour la protection de l'environnement. Les systèmes de pompage sont parmi les applications les plus intéressantes de l'énergie photovoltaïque dans les sites isolés.

Dans la première partie de ce chapitre on va présenter des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, puis on va exposer un état l'art sur les interpréteurs d'électronique de puissance. On terminera le chapitre par des notions de base sur les groupes motopompes.

1.1 Énergie renouvelable en Algérie

Les réalisations algériennes dans le domaine des énergies renouvelables sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc d'énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des stades très avancés.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui

dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700kwh/m²/an au Nord et 2263kwh/m²/an au Sud. [5] - [6]

1.2 Potentiel solaire en Algérie

Au sud algériens, les premières expériences ont été effectuées au début des années quatre-vingt, où la première station d'énergie solaire a été installée à Melouka par une société du Royaume de Belgique, la station est aujourd'hui à l'arrêt, le recours aux énergies renouvelables au sud algérien est indispensable et prioritaire dans tout développement durable de la région, les distances existantes entre les localités, la dispersion de la population dans le sud rend le raccordement au réseau électrique très coûteux. [5] - [6]

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires. [7]

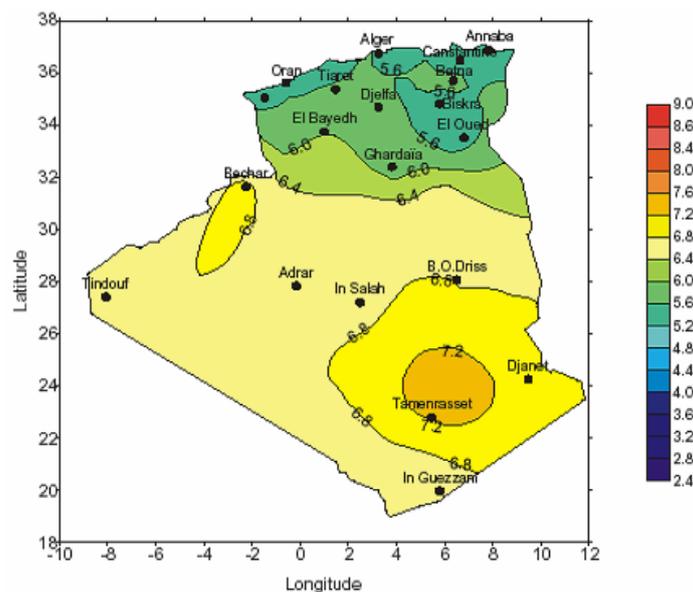


Figure I.2 : Carte préliminaire des irradiations solaires de l'Algérie [7]

1.3 Généralités sur le panneau photovoltaïque

1.3.1 Le solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie.

Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.

Le fonctionnement des dispositifs photovoltaïques se base sur la capacité de certains matériaux semi-conducteurs, traités spécialement, de convertir l'énergie de la radiation solaire en énergie électrique (courant continu) sans avoir recours à des organes mécaniques en mouvement. Le matériau semi-conducteur le plus couramment employé dans ce but est les silices. Le composant de base d'une installation PV est la cellule photovoltaïque, capable de produire environ 1,5 W de puissance en conditions standards, c'est à dire à une température de 25°C et soumise à une puissance de la radiation égale à 1000 W/m². La figure (I. 3) montre la conversion d'énergie photovoltaïque. [8]

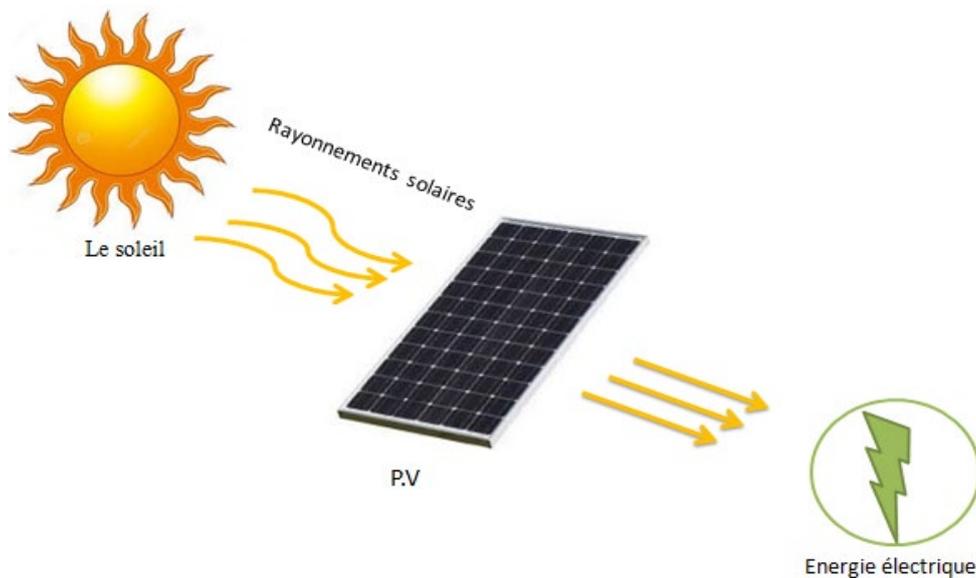


Figure I.3 : La conversion d'énergie solaire photovoltaïque.

I.3.2 Rayonnements solaires

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altération et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère ; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes...). Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope) L'autre partie dite directe est anisotrope. [9]

La lumière c'est une onde électromagnétique se propage avec une vitesse de 3×10^8 m/s, évidemment qu'elle est considérée comme des grains photons, caractérisé par leur propre longueur d'onde, vitesse, et sa propre énergie emmagasinée dans celui-ci :

$$E_{ph} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

D'où :

E_{ph} : Énergie des photons en [Joule].

λ : Longueur d'onde en [μm].

ν : Fréquence des photons en [Hz].

C : vitesse de la lumière.

Généralement on exprime l'énergie des photons E en électron-volt [eV].

1.3.3 Types des cellules photovoltaïques [10]

Il existe trois technologies principales des cellules solaires à base de silicium : cellule en silicium monocristallin, poly-cristallin et cellule en silicium amorphe avec une quatrième technologie qui consiste à la mise en contact des deux matériaux, appelé cellule hétérojonction, elle est reçue par dépôt de silicium amorphe hydrogéné ultrafines sur le substrat cristallin comme l'indique la Figure (I.4), à chaque type de cellule correspond un rendement et un coût.

a) Cellule mono- cristallin

Cette cellule est constituée d'un monocristal scindé en deux couches. C'est la cellule qui a le meilleur rendement (12- 16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), la cellule qui est la plus proche du modèle théorique mais aussi celle qui a le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée, elle est identifiée par leur forme carrée avec 4 côtés coupés.

b) Cellule poly- cristallin

La conception de la cellule multi- cristallin étant la plus facile, elle est composée d'une accumulation de cristaux. Elles proviennent également du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : 11% - 14% (18% en laboratoire). Elle est identifiée par leur forme carrée.

c) Cellule amorphe à couche mince

Cette catégorie a un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium déposé sur un support généralement flexible. Elle est

utilisée couramment dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres.

d) Cellule solaire HIT

Une cellule solaire HIT est composée d'une tranche de silicium cristallin mono-mince entourée de couches de silicium amorphe ultra-minces. L'acronyme HIT signifie "hétérojonction avec couche mince intrinsèque". Les cellules HIT sont produites par la multinationale japonaise d'électronique Panasonic. Les cellules solaires HIT présentent un meilleur coefficient de température que les cellules solaires conventionnelles p/n homo-jonction c-Si. Par conséquent, on peut obtenir plus de puissance avec les cellules solaires HIT en utilisation réelle que les cellules solaires c-Si conventionnelles.

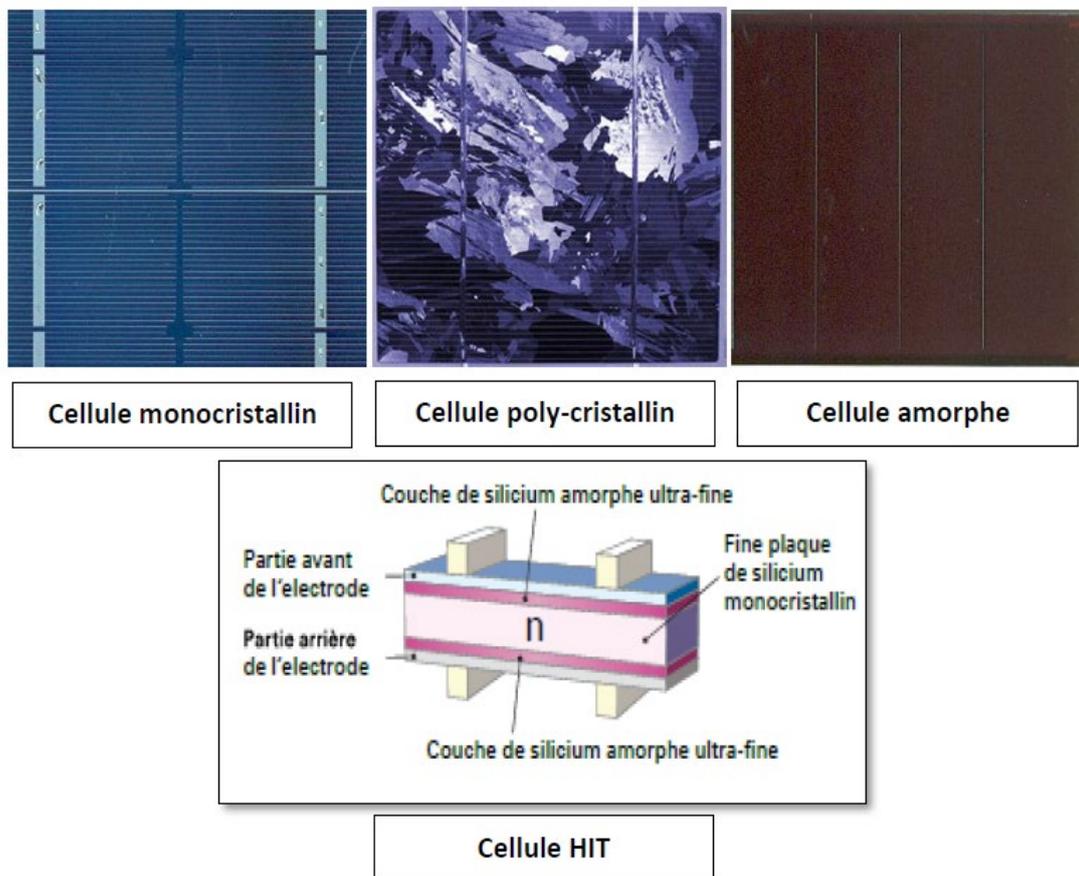


Figure I.4 : Types des cellules photovoltaïques

I.3.4 Différents types des systèmes photovoltaïques

Une centrale solaire photovoltaïque est constituée d'un ensemble de modules solaires photovoltaïques. Il existe plusieurs sortes de mise en œuvre d'une centrale solaire photovoltaïque. [11]

a) Système autonome sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont la charge de type continu est alimentée directement par GPV car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

b) Système autonome avec batterie

La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge.

c) Système autonome hybrides

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser, au risque de détruire la batterie par décharge profonde. Or, les consommateurs que nous sommes ne sont pas des machines et ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons.

d) Systèmes raccordés au réseau

Les installations photovoltaïques sont raccordées au réseau électrique grâce à un onduleur, qui permet la conversion du courant continu d'origine photovoltaïque en courant alternatif. L'électricité produite est directement utilisée par la charge ou injectée dans le réseau électrique. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

e) Systèmes fonctionnant au fil du soleil (pompage photovoltaïque)

Il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir. La pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un convertisseur. Le débit d'arrivée de l'eau dans le réservoir est donc variable, directement fonction du rayonnement solaire, d'où l'expression « au fil du soleil ». Quant à l'utilisation, elle pourra se faire à n'importe quel moment.

I.3.5 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Les systèmes de pompage photovoltaïques comportent un Générateur, un moteur d'entraînement faire fonctionner une pompe. La figure (I.5) représente les différents éléments essentiels d'un système de pompage solaire photovoltaïque.

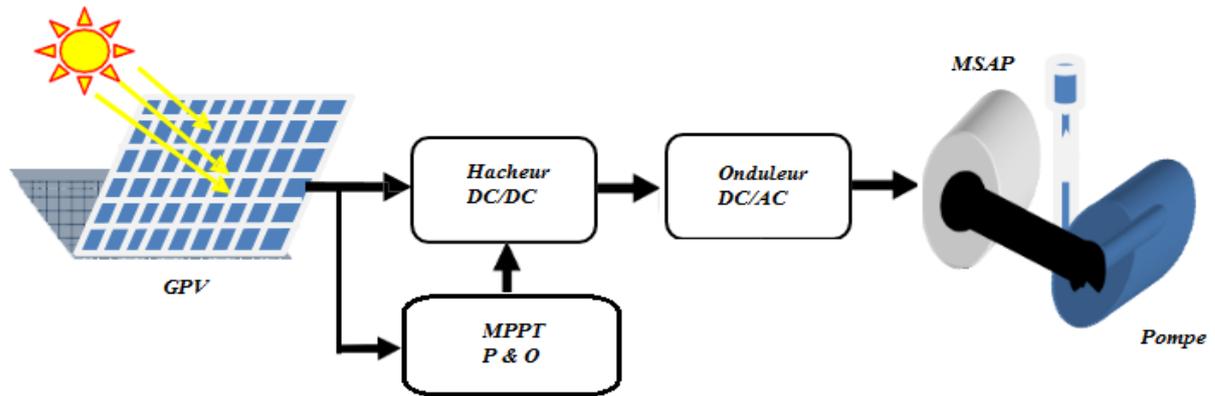


Figure I.5 : Schéma représentative d'une chaîne de pompage photovoltaïque

a) Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu, variable selon l'influence de l'éclairement sur les panneaux solaires. Le composant de base de cette conversion est la cellule photovoltaïque.

b) Moteur d'entraînement

Un moteur à courant alternatif est moins cher et plus facile à le trouver sur le marché, mais Il exige l'utilisation d'un onduleur pour fonctionner avec une alimentation photovoltaïque. Dans ce mémoire on a utilisé un moteur synchrone à aimant permanent qui est de plus en plus utilisé dans diverses applications telles que les machines-outils, la robotique, les ventilateurs et le pompage photovoltaïque, grâce au développement de l'électronique de puissance et des matériaux magnétiques et aussi à l'avantage des aimants permanent qui ont remplacés le rotor bobiné. Ce qui a permis à la machine synchrone à aimant permanent d'avoir un bon rendement par rapport à la machine asynchrone où à courant continu. [12]

c) Pompe de refoulement

Le choix du système de pompage doit être fait en prenant en compte non seulement les contraintes techniques (type de pompe, énergie, hauteur de refoulement, débit, turbidité de l'eau), mais aussi les contraintes liées au contexte socio-économique (système de pompage accepté, disponibilité des pièces détachées, facilité de maintenance des pompes).

I.3.6 Secteurs d'applications

✓ Domaine spatial

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites,) remontent aux années soixante.

✓ *Habitation isolée*

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement.

✓ *Industrie isolée*

La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centre de santé, télécommunication, ...).

✓ *Centrale de puissance*

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage ; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. [13]

1.4 Convertisseurs de puissance

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement et avec l'apparition des semi-conducteurs, de l'électronique de puissance, des diodes, des transistors et des thyristors etc.... Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques. [14]

1.4.1 Les hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [15]

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. [16]

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation. [17]

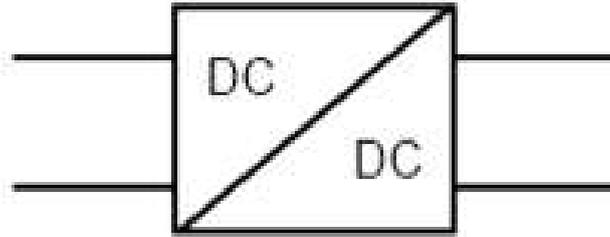


Figure I.6 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que l'influence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [18] :

- Des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- Des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension. Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).
 - Hacheur abaisseur (ou Buck).
 - Hacheur élévateur (ou boost)
 - Hacheur élévateur - abaisseur (Buck–boost).

a) Hacheur série (Buck)

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur Buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom d'hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [19]

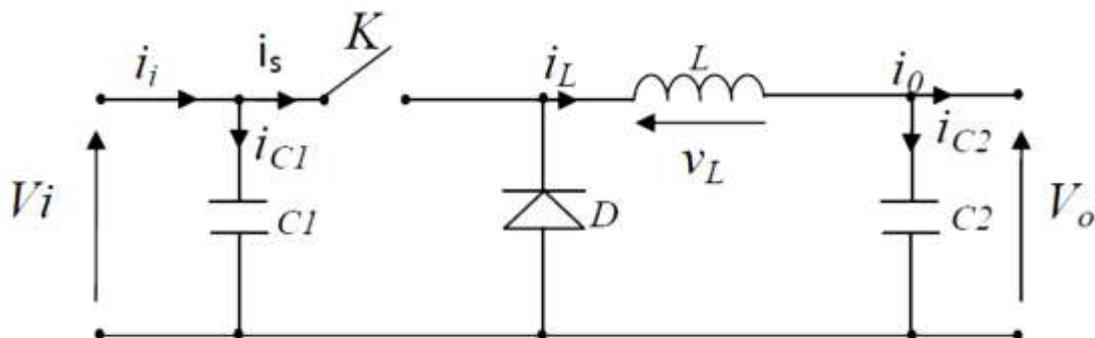


Figure I.7 : Schéma électrique d'un hacheur Buck

b) Hacheur parallèle (BOOST)

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur BOOST et un hacheur élévateur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom d'hacheur élévateur ou hacheur parallèle, son schéma de base est illustré par la figure (I.8).

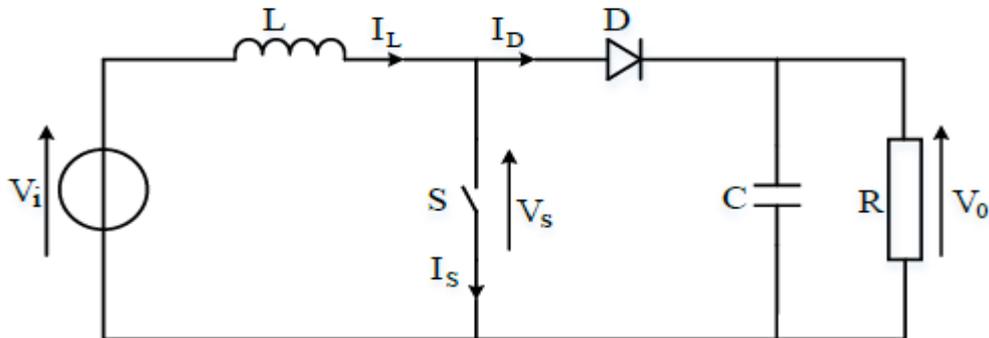


Figure I.8 : Schéma électrique d'un hacheur BOOST

c) Convertisseur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux Convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée [20], la figure (I. 9) illustre Le schéma de base.

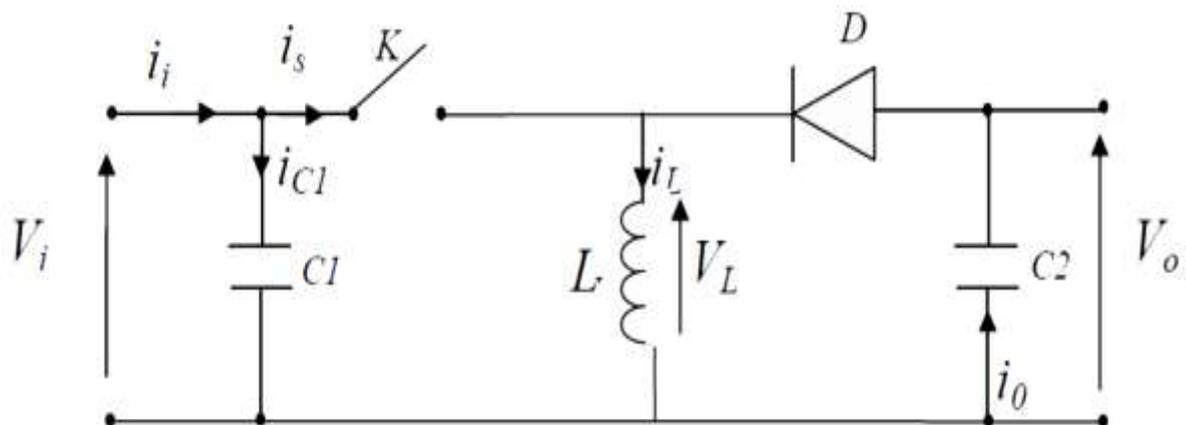


Figure I.9 : Convertisseur dévolteur-survolteur

I.4.2 Les onduleurs

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment une puissance électrique sous forme continue en une puissance sous forme alternative, à une valeur désirée de tension ou du courant et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée. [21]

a) Onduleur de tension monophasé

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

- **Onduleur monophasé en demi-pont :**

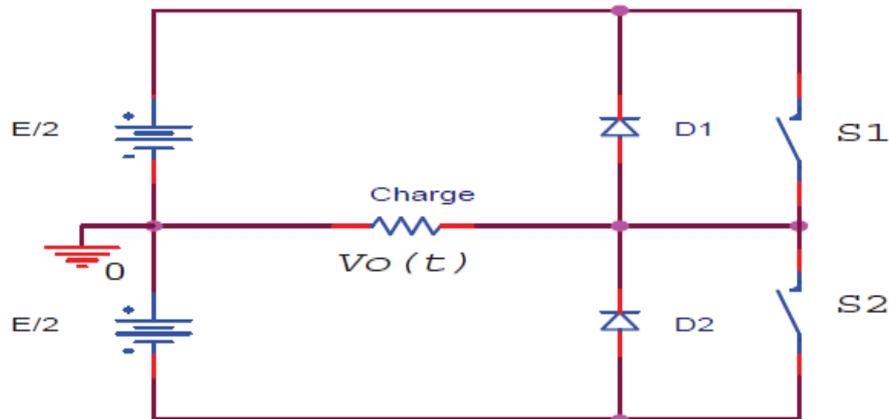


Figure I.10 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont

- **Onduleur monophasé en pont :**

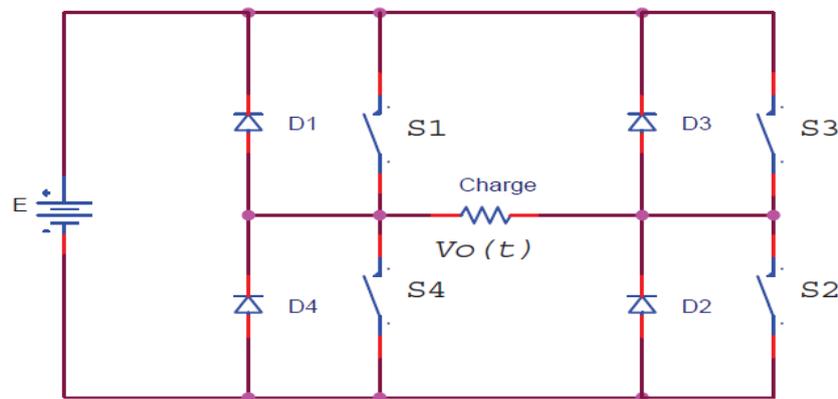


Figure I.11 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont

b) Onduleur de tension triphasé

Comme le montre la figure (I.12), l'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ce sont des transistors de type IGBT auxquels sont placés des diodes en antiparallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire [21]. Les séquences de commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commandes-en MLI).

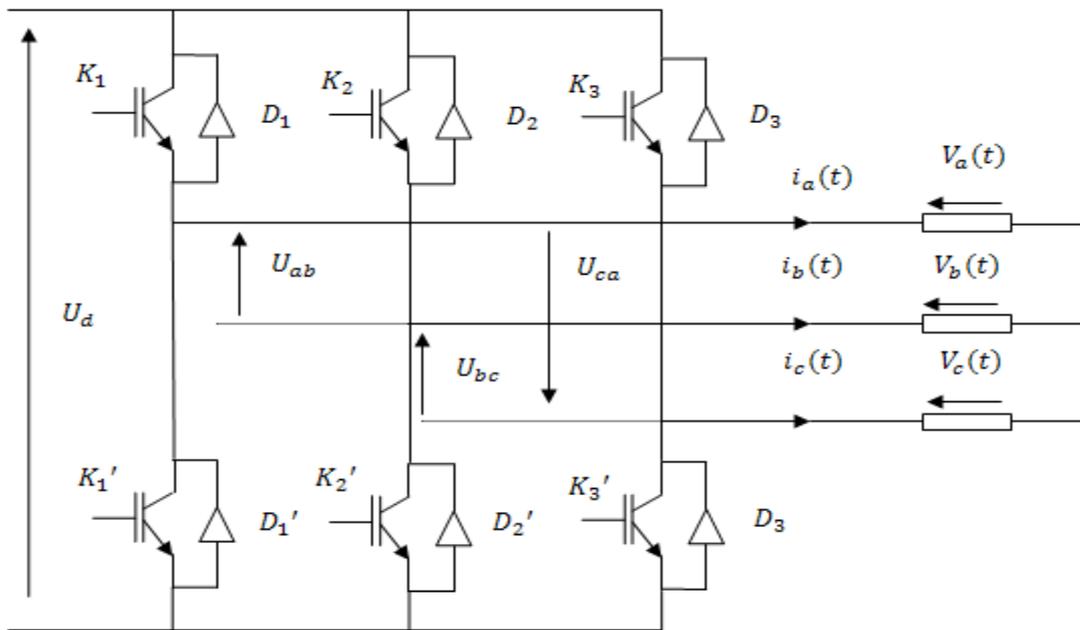


Figure I.12 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé

I.5 Notions de base sur la MSAP

Comme toutes les autres machines électriques, les MSAP sont composés d'un rotor et d'un stator Figure (I.13). Alors que le stator des MSAP est toujours constitué de bobinages électriques, la particularité de ce type de machine concerne l'utilisation d'aimants permanents liés au rotor de la machine afin de créer un champ magnétique tournant. [22]

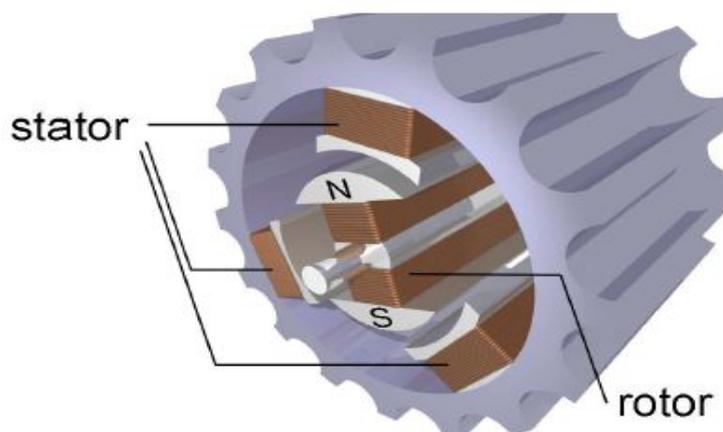


Figure I.13 : Structure d'une machine synchrone à aimants permanents [22]

I.5.1 Stator

Un membre fixe ou un membre statique est un terme appelé un composant d'un générateur électrique ou d'un moteur électrique. Les différents types des moteurs électriques asynchrones ou synchrones ne diffèrent que par le rotor, et dans tous les cas, la partie fixe, au moins en

principe, reste la même. L'élément immobile (stator) est constitué de feuilles isolées (dans le but de réduire les pertes dans les courants) le fer est moulé avec un matériau ferromagnétique ou du silicium ou d'un cœur de fer. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $2\pi/3$.

I.5.2 Rotor

Le rotor est une partie mobile, se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents apportent beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). [22]

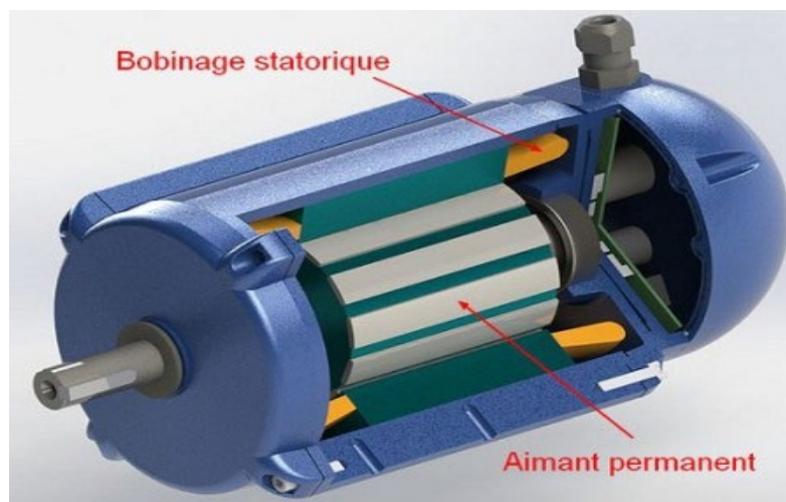


Figure I.14 : moteur à aimants permanents.

Suivant la disposition des aimants, on distingue [23] :

- La machine à pôles lisses.
- La machine à pôles saillants.

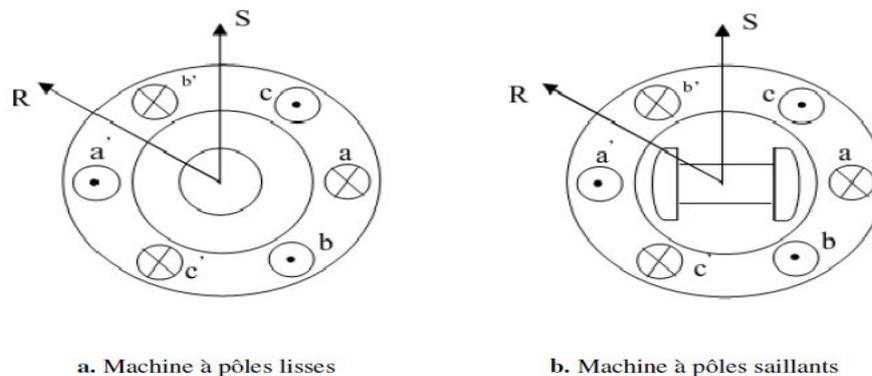


Figure I.15 : Formes simplifiées de la machine synchrone à aimants permanents. [23]

I.5.3. Structure des aimants de la machine

Il existe plusieurs types de MSAP qui dépendent du placement des aimants permanents sur le rotor de la machine comme le montre la figure (I.16). Les principales structures des rotors utilisées dans les MSAP sont les suivantes :

- Aimants montés en surface
- Aimants insérés
- Aimants enterrés
- Aimants à concentration de flux

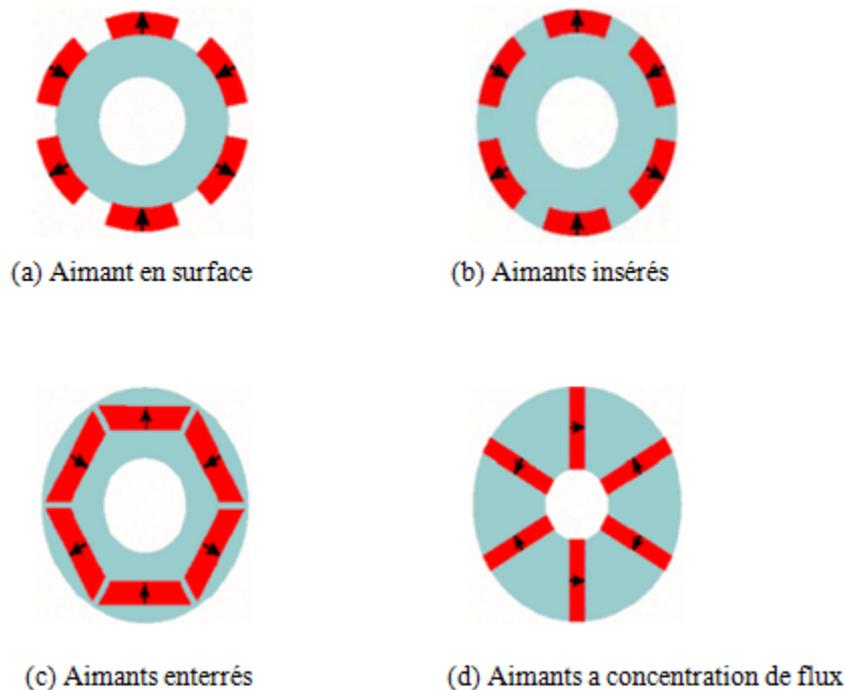


Figure I.16 : Différentes configurations rotorique de MSAP

I.5.4 principe de fonctionnement

L'enroulement statorique, parcouru par un système triphasé équilibré de courants de pulsation ω_s crée une tension magnétique tournante d'entrefer à la vitesse synchrone Ω_s , soit avec p paires de pôles :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (I.2)$$

Le champ magnétique engendré par l'enroulement inducteur ou les aimants est fixe par rapport au rotor. L'interaction entre le champ tournant du stator et le champ fixe du rotor crée un couple dont le moment a une valeur moyenne nulle. Le moteur

synchrone ne démarre pas spontanément. Par contre, si le rotor est entraîné à la vitesse synchrone, l'interaction entre les champs tournants du stator et du rotor crée un couple dont le moment a une valeur moyenne non nulle. [24]

1.5.5 Les avantages et les inconvénients de la MSAP

a) Avantages de la MSAP

A titre d'illustration quelques avantages des machines à aimants permanents sont cités ci-dessous [22] - [25] - [26].

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.

Le couple volumique et la puissance massique importants permettent une meilleure compacité.

- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.

- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.

- Rendement plus élevé grâce à l'utilisation d'aimants permanents en remplacement des enroulements rotorique.

- Fiabilité de la machine en raison de l'absence de bagues et de balais.

- Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est amélioré.

b) Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

Coût élevé à cause du prix des aimants.

- Problème de support de température des aimants.

- Problème de désaimantation et de vieillissement des aimants permanents. [27]

1.5.6 Domaine d'application

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant des centaines des watts (servomoteur) à plusieurs méga watts (système de propulsion des navires) C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme [28] :

- Les équipements domestiques (machine à laver le linge).

- Les automobiles.

- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives).

- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.

- Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- Les servomoteurs.
- Les applications robotique.
- La production d'électricité.
- Les propulsions des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.
- Les machines-outils.
- Les applications de l'énergie de l'éolienne.

1.6 Notions générales sur les Pompes

1.6.1 Définition d'une pompe

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence, les liquides alimentaires etc....) d'un point à un endroit voulu. La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé.

La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- Energie cinétique $V^2/2g$.
- Energie potentielle H ou Z.
- Energie de pression $P/\rho g$.

Alors la pompe est un appareil qui génère une différence de pression Δp entre l'entrée et la sortie de la machine, l'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend :

- Des propriétés du fluide : la masse volumique ρ , la viscosité dynamique μ .
- Des caractéristiques de l'écoulement : la pression, la vitesse V, le débit Q, la hauteur H.
- Des caractéristiques de l'installation : la longueur des conduites L, le diamètre D, et la rugosité absolue. [29]

1.6.2 Les différents types des pompes :

Il existe deux grandes familles des pompes [30] :

- Les pompes volumétriques.
- Les pompes centrifuges.

a) Les pompes volumétriques

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

Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres). L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur.

Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multi-pales. [31]

b) Les pompes centrifuges

Dans les pompes centrifuges l'augmentation de pression résulte du recours à la force centrifuge imprimée au fluide par une roue ou propulseur qui se meut à l'intérieur d'un corps de pompe, qui oriente le fluide, de l'entrée à la sortie. [32]

I.6.3 Constitution d'une pompe centrifuge

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute.

Le fluide arrivant par l'ouïe et dirigé vers la roue en rotation qui sous l'effet de la force centrifuge lui communique de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans la volute. Un diffuseur à la périphérie de la roue permet d'optimiser le flux sortant est ainsi de limiter les pertes d'énergie. [33]

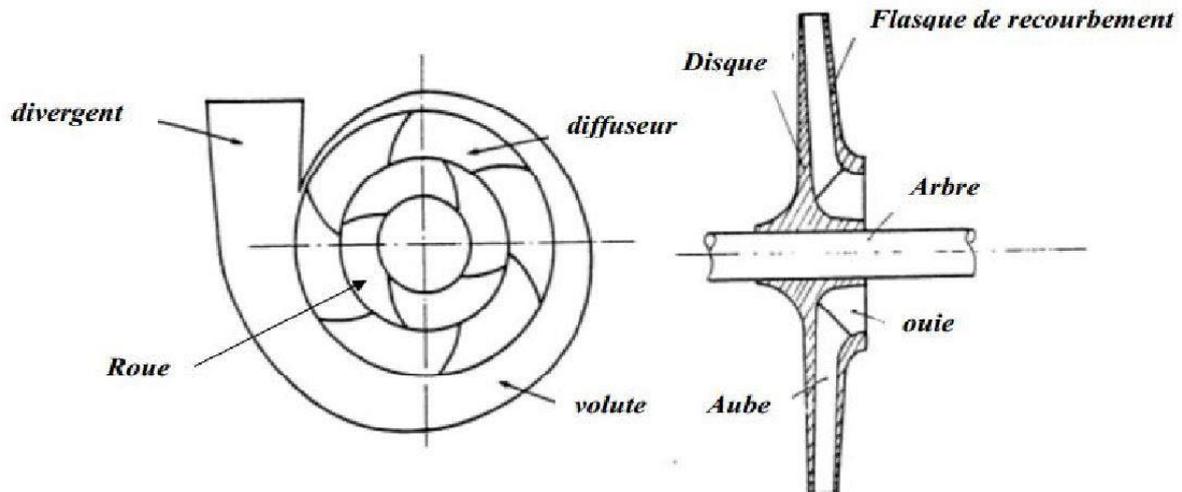


Figure I.17 : Schéma d'une pompe centrifuge [33]

I.6.4 Les différents types des pompes centrifuges

Les turbopompes sont actuellement parmi les plus employées. Les principales raisons de ce choix sont les suivantes : ces appareils étant rotatifs et ne comportant aucune liaison articulée, leur entraînement, par un moteur électrique ou à combustion interne, ne présente aucune difficulté. D'autre part, l'encombrement de la turbopompe est environ huit fois moindre que celui des pompes volumétriques, et peut être encore réduit en adoptant une disposition à axe vertical. Ce moindre encombrement et aussi un poids plus faible permettent de réaliser d'appréciables économies sur les bâtiments abritant les installations. De plus, les frais d'entretien d'une turbopompe sont peu élevés. Suivant le type de rotor et son mode d'action il faut distinguer dans la catégorie des turbopompes :

- Les pompes centrifuges.
- Les pompes hélices.
- Les pompes hélico-centrifuges.

Cette classification est basée sur la forme de la trajectoire à l'intérieur du rotor de la pompe. Voir à cet effet les figures a, b, c.

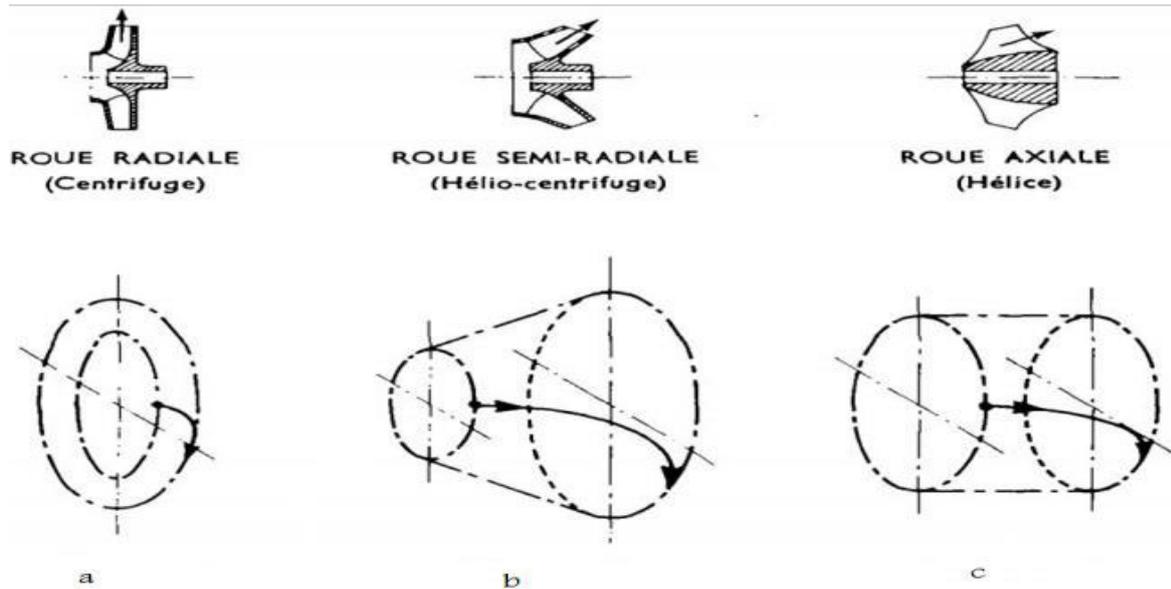


Figure I.18 : Classification des pompes

A titre indicatif il faut signaler qu'il existe un certain nombre d'autres Classifications des turbopompes, reposant sur les critères suivants [34] :

- Disposition de l'axe (horizontal, vertical, incliné).
- Nombre de rotors (monocellulaire, multicellulaire).
- Importance de la pression produite (basse, moyenne, haute).
- Utilisation (irrigation, eaux chargées, forages). D'un point de vue qualitatif.
- Les pompes centrifuges sont utilisées pour des hauteurs d'élévation importantes (plusieurs dizaines de mètres).
- Les pompes hélices sont utilisées pour élever des débits importants (plusieurs centaines de l/s) à des hauteurs faibles (quelques mètres).

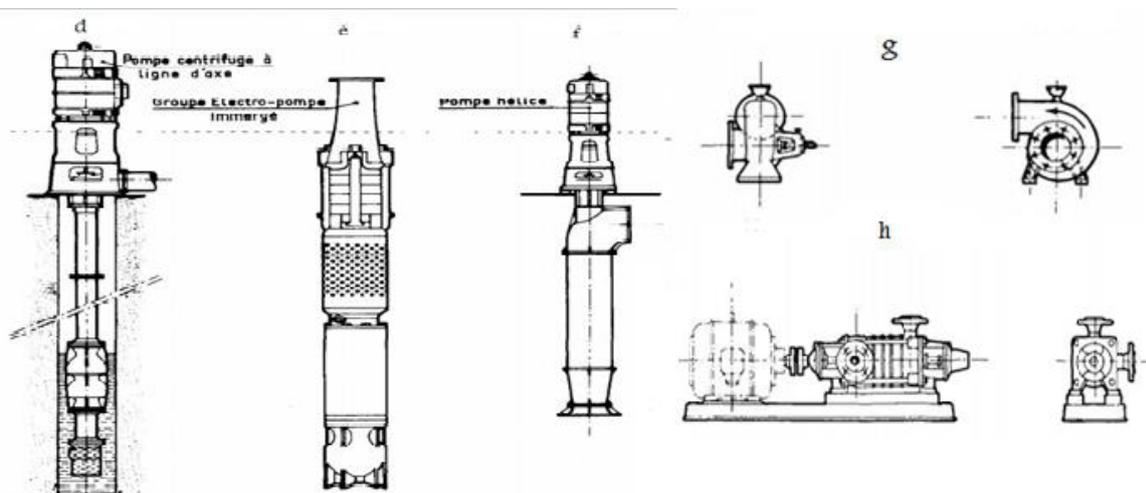


Figure I.19 : Types des Pompes centrifuges

1.6.5 Caractéristiques d'une pompe

a) Débit refoulé de la pompe

Le débit refoulé Q ; est le volume utile débité au refoulement de la pompe par unité de temps en m^3/s (unités également utilisées : l/s et m^3/h). Il est proportionnel à la vitesse de rotation de la pompe. Le débit de fuite ainsi que les écoulements dans les jeux ne sont pas compris dans le débit refoulé. [35]

b) Hauteur manométrique totale, et la pression de refoulement de la pompe

La pression de refoulement de la pompe est le travail mécanique utile en Nm fourni au fluide refoulé par unité de poids en N du fluide refoulé. Elle est exprimée en $Nm/N = m$ (également appelée colonne de fluide m).

La hauteur manométrique totale est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation de la roue et indépendante de la masse volumique ρ du fluide refoulé, c.-à-d. une pompe centrifuge donnée élevé à la même hauteur manométrique différents fluides (de même viscosité cinématique ν) indépendamment de leur masse volumique ρ . Cette caractéristique s'applique à toutes les pompes centrifuges.

La hauteur manométrique totale HMT d'une pompe se compose, selon le théorème de Bernoulli :

$$\Delta p = \rho \cdot \left[H - Z_{s,d} - (V_d^2 - V_s^2) / 2 \cdot g \right] \quad (L3)$$

Avec :

ρ : Masse volumique du fluide refoulé en kg/m^3 .

g : accélération de la pesanteur : $9,81 m/s^2$.

H : hauteur manométrique totale de la pompe en m.

$Z_{s,d}$: cote géodésique entre les brides de refoulement et d'aspiration de la pompe en m.

V_d : vitesse d'écoulement au niveau de la bride de refoulement, $V_d = 4 \cdot Q / \pi \cdot D_d^2$.

V_s : vitesse d'écoulement au niveau de la bride d'aspiration $V_s = 4 \cdot Q / \pi \cdot D_s^2$.

Q : débit de la pompe à la bride considérée en m^3/s .

D : diamètre intérieur de la bride considérée en m.

Δp : pression de refoulement en N/m^2 (conversion en bar : $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ N/m}^2$). [35]

c) Vitesse de rotation

Si la vitesse de rotation d'une pompe centrifuge passe de n_1 à n_2 tours par minute, le débit Q et la hauteur manométrique HMT et la puissance absorbée P varient dans les rapports suivants. Les formules ci-dessus sont valables pour autant que la variation du Nombre de tours ne soit pas très grande.

$$Q_1 = Q \cdot \frac{N_1}{N} \quad \text{(I.4)}$$

$$H_1 = H \cdot \left(\frac{N_1}{N}\right)^2 \quad \text{(I.5)}$$

$$P_1 = P \cdot \left(\frac{N_1}{N}\right)^3 \quad \text{(I.6)}$$

Q : Le débit (m^3/s).

Q_1 : Le débit max (m^3/s).

H : La hauteur (m).

H_1 La hauteur max (m).

P : La puissance (w).

P_1 : La puissance max (w).

N : La vitesse (rad/s).

N_1 : La vitesse max (rad/s).

I.6.6 Critères de choix d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge doit être choisie selon les caractéristiques réelles de l'installation. Les données nécessaires pour un dimensionnement correct sont [35] :

- Le débit désiré. - La hauteur géométrique à l'aspiration.
- La hauteur géométrique au refoulement. - NPSH.

I.6.7 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges**a) Les Avantages**

- Faible encombrement.
- Bruit négligeable.
- Simplicité de construction.
- Régularité dans le fonctionnement.

- Aptitude au fonctionnement à grande vitesse, donc l'accouplement peut se faire directement avec des moteurs électriques ou des moteurs diesels.

b) Les Inconvénients

- A faible débit et aux grandes hauteurs de refoulement, le rendement diminue.
- Phénomène de cavitation en cas de fuite d'air dans la conduite d'aspiration.
- Diminution de la hauteur de refoulement en cas de fuite d'air dans la conduite d'aspiration.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement et les composants essentiels d'une chaîne de pompage photovoltaïque, cette étude nous a permis d'avoir une bonne connaissance sur le sujet. Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation des différents éléments du système.

***Chapitre II : Modélisation et Simulation
des différents composants d'un système de
pompage PV***

Introduction

La modélisation mathématique de système de pompage photovoltaïque reste indispensable pour toute opération d'étude du fonctionnement. L'objectif principal de ce chapitre est la modélisation de ce système et la présentation de principe de fonctionnement de la commande MPPT et nous présentons les modèles relatifs à chaque partie du système.

Pour assurer le fonctionnement d'une pompe et sa rotation il est nécessaire de coupler la pompe avec un moteur d'entraînement, il existe plusieurs familles de moteurs qu'offre des performance dynamiques, électriques robustes, parmi les machines électriques utilisées dans ce domaine : MCC, MAS.

La MSAP présente une solution exceptionnelle pour entrainer la pompe, elle possède des hautes performances, une réponse de couple rapide, un bon rendement, ainsi un bon facteur de puissance qui encouragera d'implémenter la MSAP comme un organe actif dans un système de pompage.

II.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

II.1.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

a) Cas idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple figure (II.1) comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes de la cellule photovoltaïque cette dernière y débite un courant I [36].

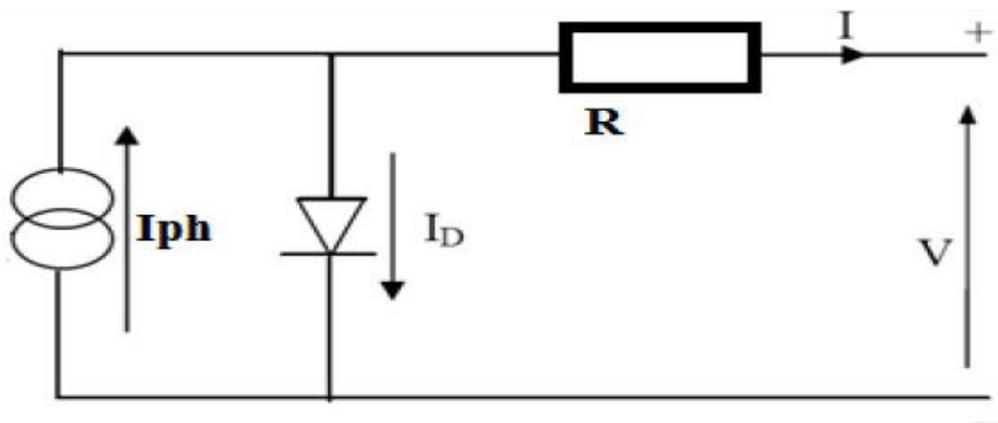


Figure II.1 : Schéma d'une cellule photovoltaïque idéale

D'après les lois des nœuds :

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

$$I_{ph} \approx I_{cc} \quad (\text{II.2})$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

$$I_0 = I_{0,ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \quad (\text{II.4})$$

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\left(\frac{q \cdot V_{co}}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1\right)} \quad (\text{II.5})$$

$$V_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad (\text{II.6})$$

Pour une cellule PV idéale, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_d$.

Avec :

I_0 : Courant de saturation inverse

V_d : Tension au borne de la diode

V_t : Potentiel thermique

$I_{0,ref}$: Courant de saturation inverse de référence

T_{ref} : Température ambiante de la cellule

E_g : Energie de gap (1.12 pour Si)

n : Facteur d'idéalité de la jonction PN

k : Constante de Stefan Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

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

T : Température de la cellule en Kelvin (K)

I_{ph} : Courant de photons (A)

I_{cc} : courant de court-circuit (A)

V_{co} : Tension de circuit- ouvert (V)

b) Cellule photovoltaïque réelle

Le modèle photovoltaïque précédent ne rend pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} [36].

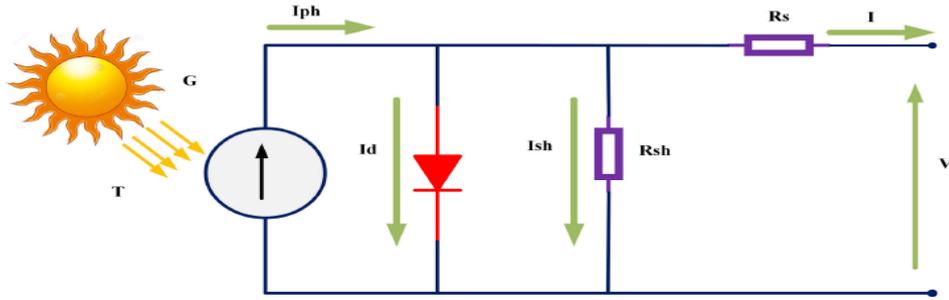


Figure II.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque réelle

Comme l'indique la figure (II.2). L'équation de la caractéristique tension-courant de la cellule solaire est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \exp\left(\frac{V + R_s I}{n \cdot V_t}\right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{E}{E_{ref}} \quad (\text{II.8})$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

$$I_{0,ref} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{V_{co}}{n \cdot V_t}\right) - 1} \quad (\text{II.10})$$

$$I_0 = I_{0,ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \quad (\text{II.11})$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (\text{II.12})$$

Où :

E : Eclairement actuelle de la cellule

E_{ref} : Eclairement de référence

R_s : Résistance série (Ω)

R_{sh} : Résistance parallèle (Ω)

T : température actuelle de la cellule (K)

T_{ref} : Température de référence de la cellule solaire (K)

c) Modélisation de champ photovoltaïque

Le champ PV est constitué des modules connectés en séries et en parallèle pour but d'obtenir la puissance souhaitée, comme la figure (II.3) montre :

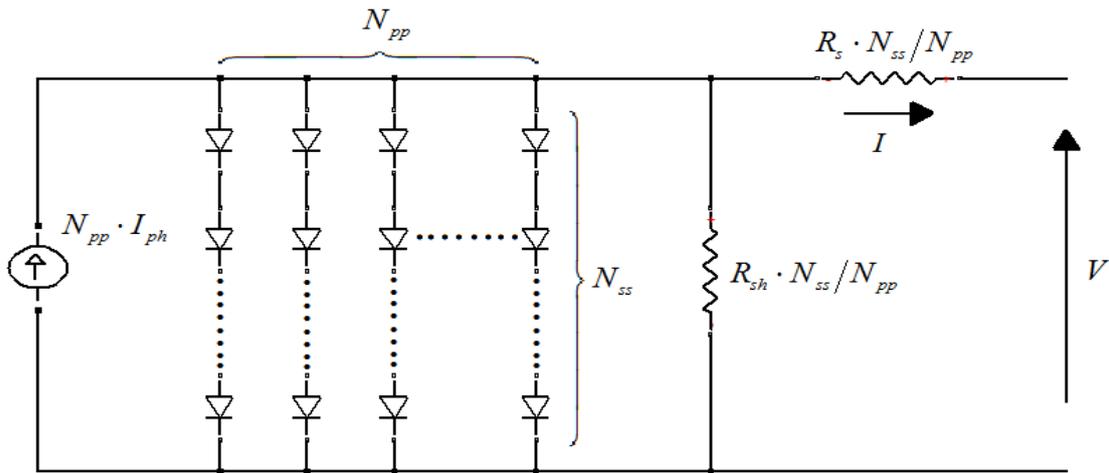


Figure II.3 : Schéma d'un champ photovoltaïque réelle

L'équation caractéristique de champ est donnée par :

$$I = N_{pp} \cdot I_{ph} - N_{pp} \cdot I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + (R_s \cdot N_{ss} / N_{pp}) \cdot I}{n \cdot N_s \cdot V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + (R_s \cdot N_{ss} / N_{pp}) \cdot I}{R_{sh} \cdot N_{ss} / N_{pp}} \quad \text{(II.13)}$$

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{E}{E_{ref}} \quad \text{(II.14)}$$

$$I_0 = \frac{I_{cc} + K_i \cdot \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v \cdot \Delta T}{n \cdot N_s \cdot V_t}\right) - 1} \quad \text{(II.15)}$$

Avec :

N_s : nombres des cellules connectées qui contient le panneau

N_{ss} : les nombre des modules en séries

N_{pp} : les nombre des modules en parallèle

K_v : coefficient de court-circuit

Les équations : (II.10), (II.11) sont aussi valable pour modéliser le courant inverse I_0 et on obtient les même résultats.

II.1.2 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

a) Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant- tension d'un module photovoltaïque à l'allure de la figure (II.4)

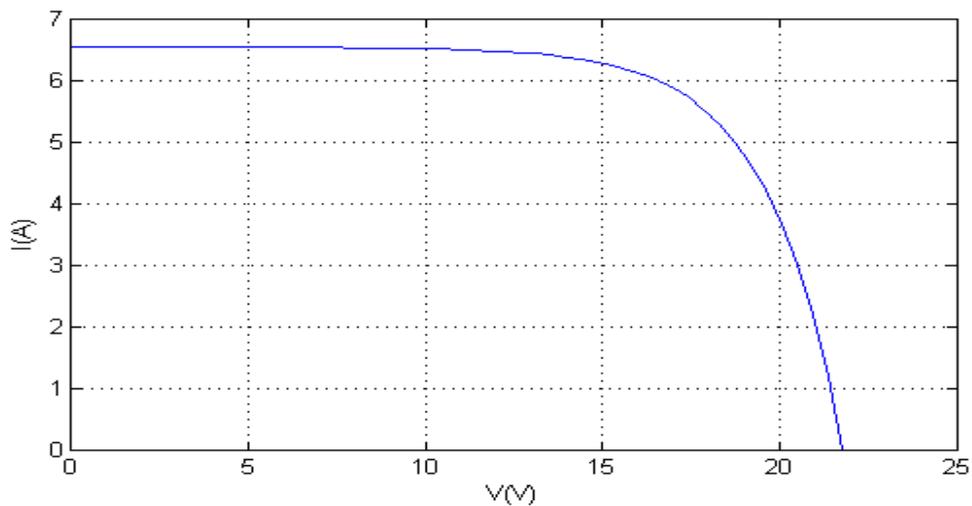


Figure II.4 : La caractéristique électrique I (V) du module Isofoton I_106 dans les conditions Standards

b) Caractéristique Puissance-tension

La caractéristique puissance- tension d'un module solaire à l'allure de la figure (II.5)

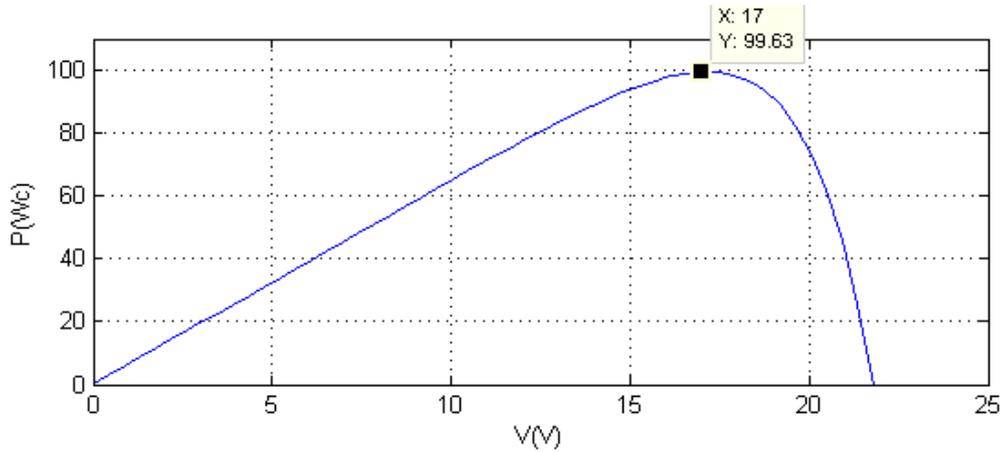


Figure II.5 : La caractéristique électrique $P(V)$ du module Isofoton I_106 ans les conditions standards

c) Influence de l'éclairement

L'augmentation de l'éclairement est directement proportionnelle à l'intensité du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement .

Les figures (II.6) et (II.7) montrent que la puissance maximale produite par la cellule est proportionnelle au rayonnement solaire. C'est un paramètre extrêmement influant sur le point de fonctionnement de la cellule solaire. En effet, il est reporté que si l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croit, d'où une production de puissance électrique plus importante .

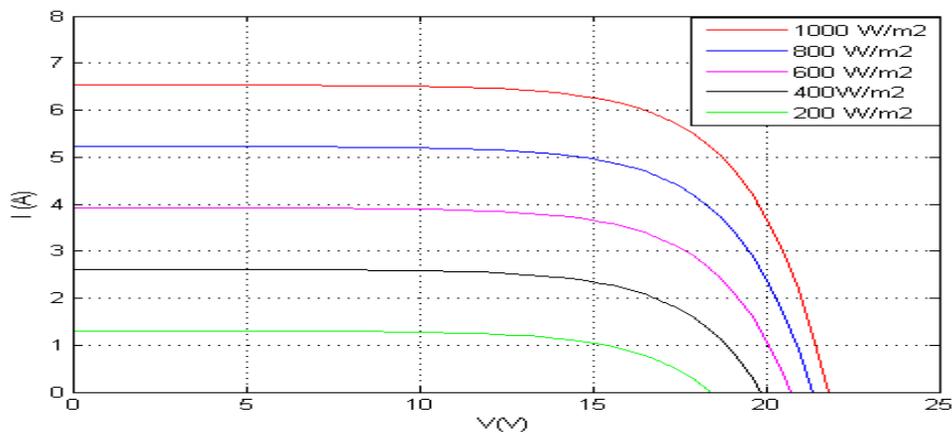


Figure II.6 : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques $I(V)$

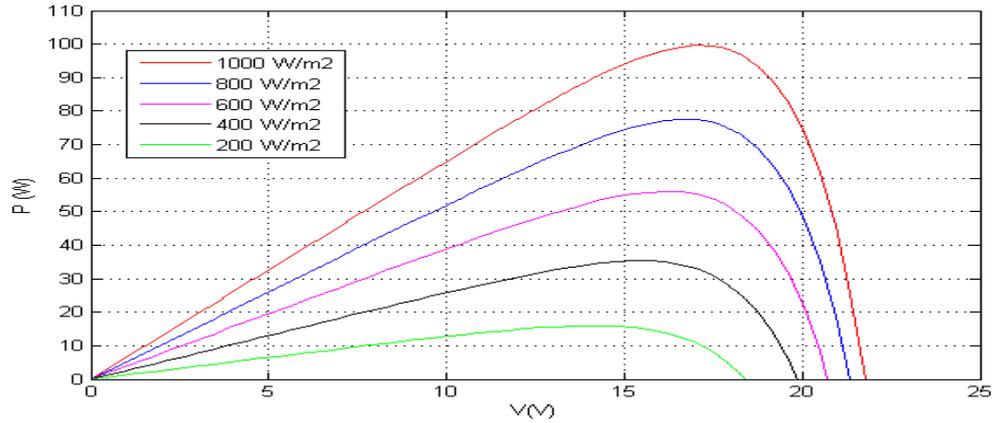


Figure II.7 : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques $P(V)$

d) Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. Les figures (II.8) et (II.9) montrent que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale .

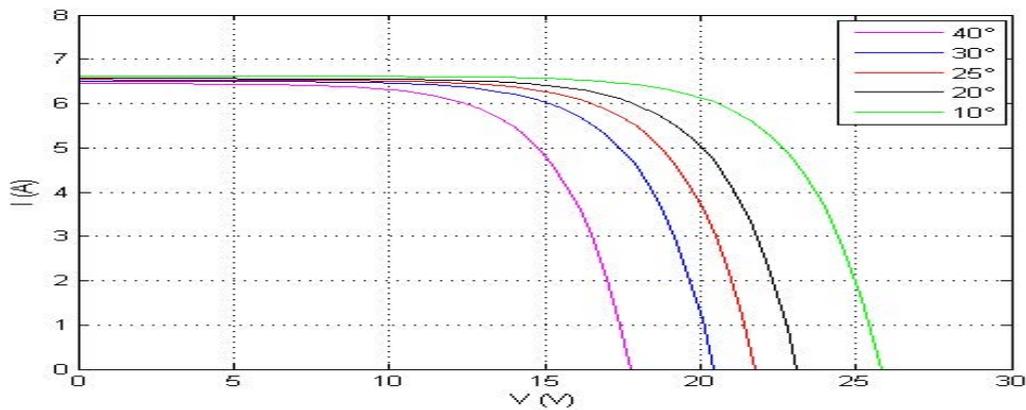


Figure II.8 : Influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$

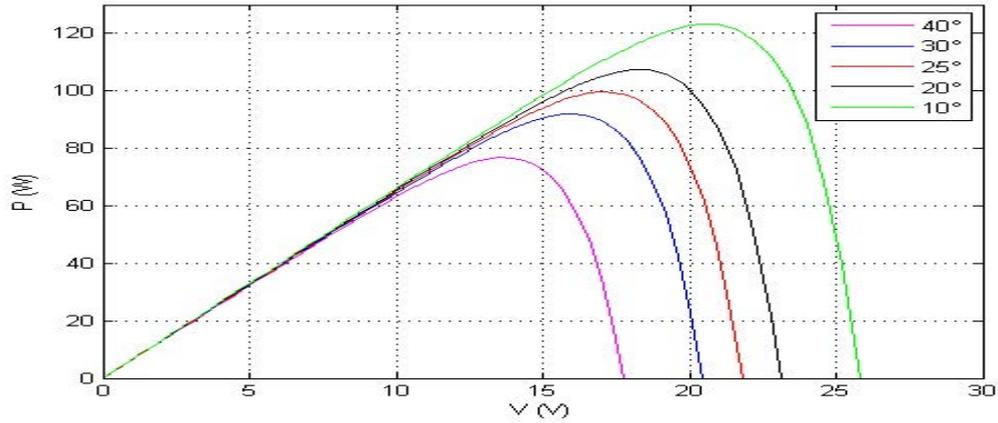


Figure II.9 : Influence de la température sur les caractéristiques $P(V)$

e) Influence de la résistance série

Les figures (II.10) et (II.11) montrent l'influence de la résistance série sur les courbes $I(V)$, et $P(V)$ qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance $P(V)$ dans la zone où le générateur photovoltaïque fonctionne comme générateur de tension constante .

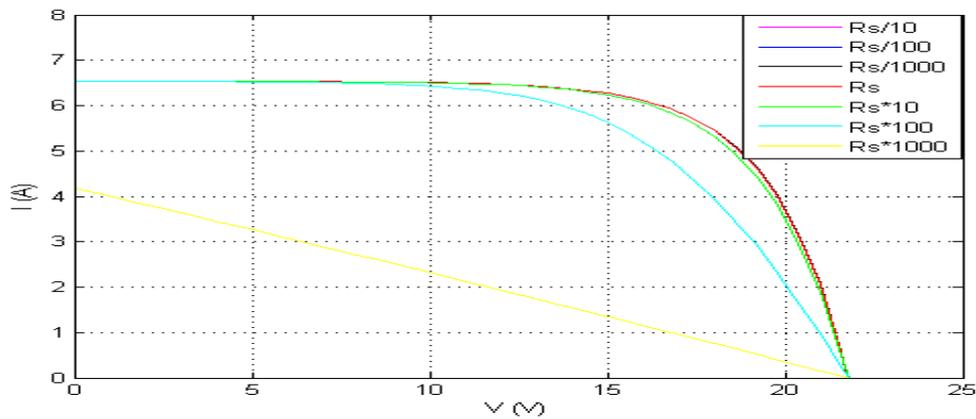


Figure II.10 : L'influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques électriques $I(V)$

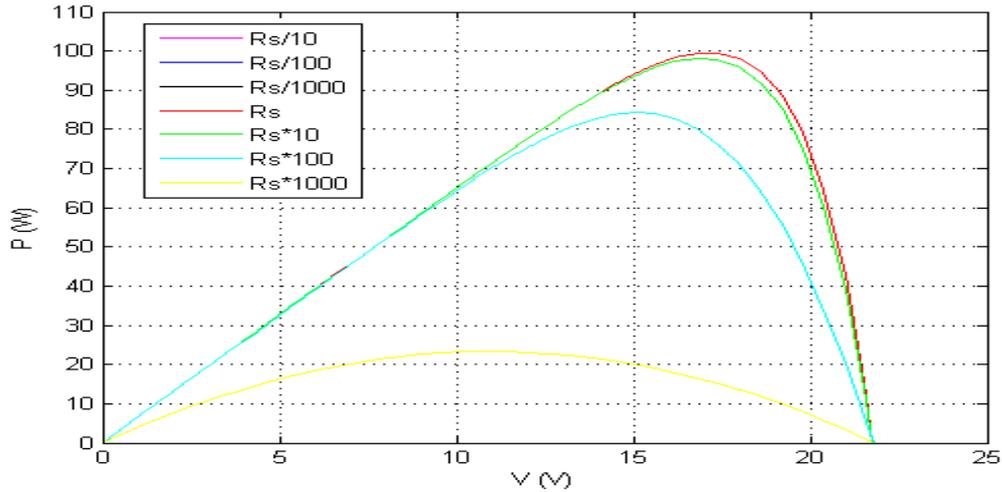


Figure II.11 : L'influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques électriques $P(V)$

f) Influence de la résistance parallèle

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant (figure II.12 et II.13) .

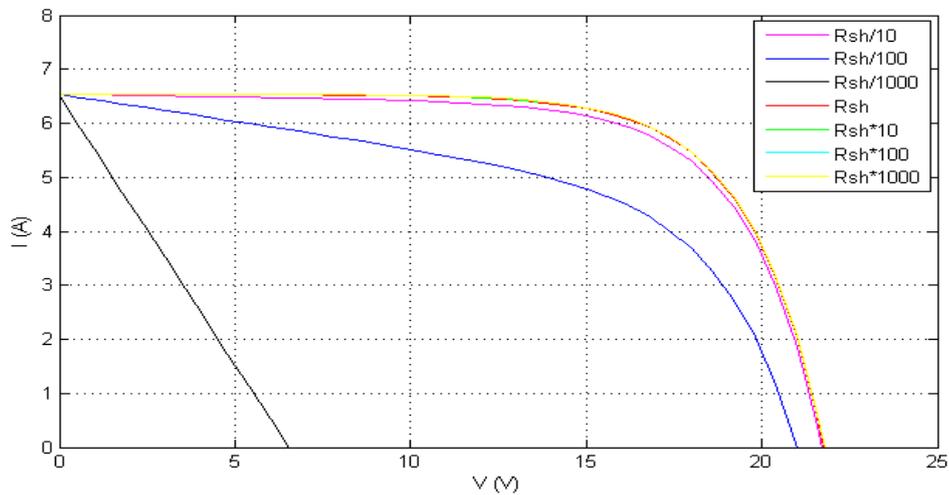


Figure II.12 : L'influence de la résistance shunt R_{sh} sur les caractéristiques électriques $I(V)$

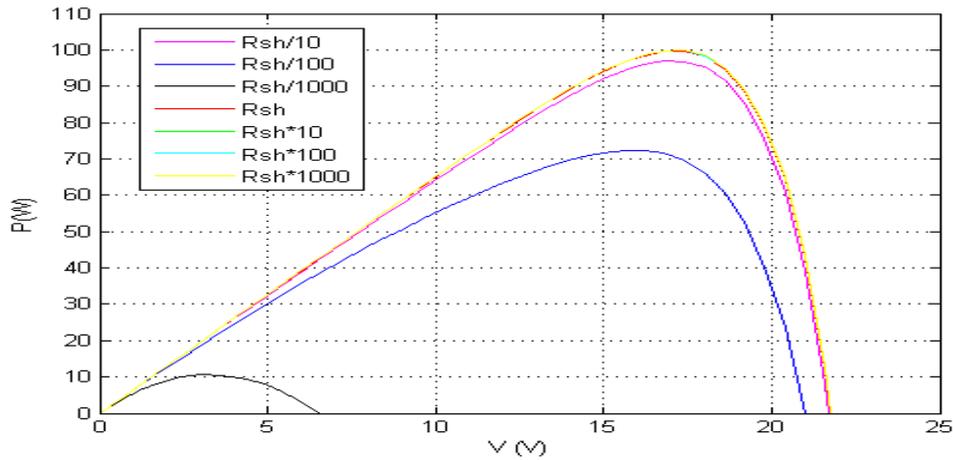


Figure II.13 : L'influence de la résistance shunt R_{sh} sur les caractéristiques électriques $P(V)$

g) Influence de l'association des cellules

a) Association série

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

Les caractéristiques d'un groupement de N_s cellules solaires en série sont représentées par les figures (II.14) et (II.15)

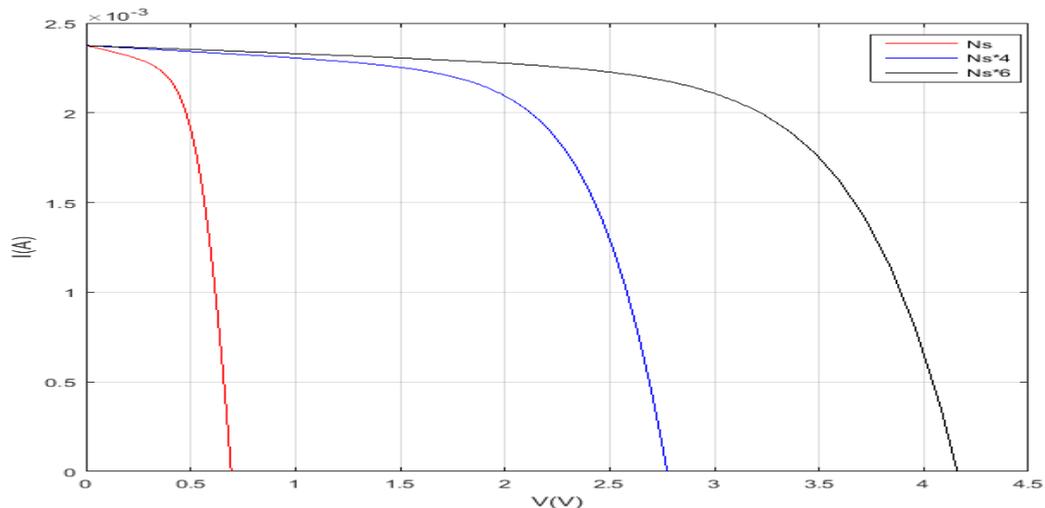


Figure II.14 : Caractéristique $I(V)$ des cellules en série

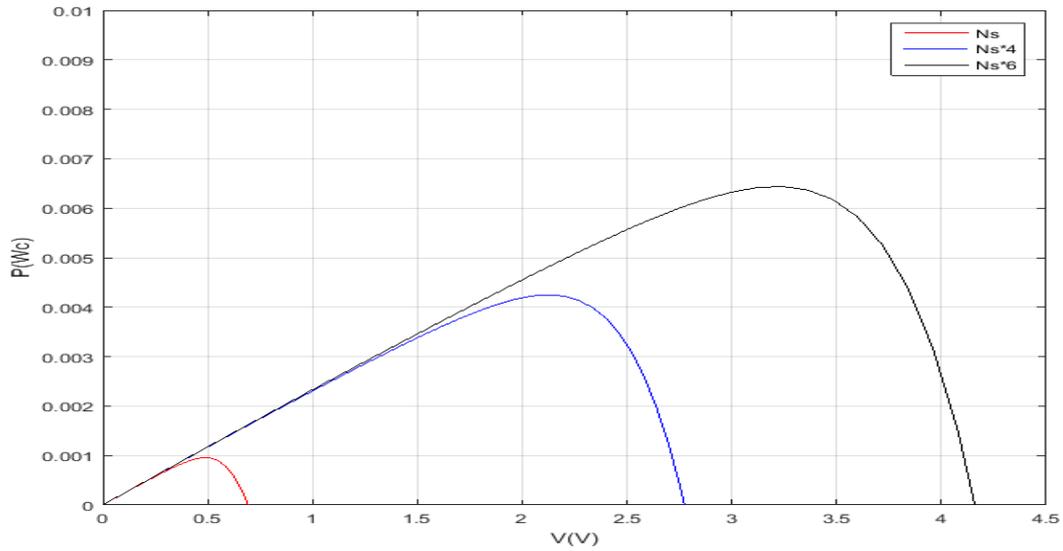


Figure II.15 : Caractéristique $P(V)$ des cellules en série

b) Association Parallèle

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

Les caractéristiques d'un groupement de N_p cellules solaires en parallèle sont représentées par les figures (II.16) et (II.17):

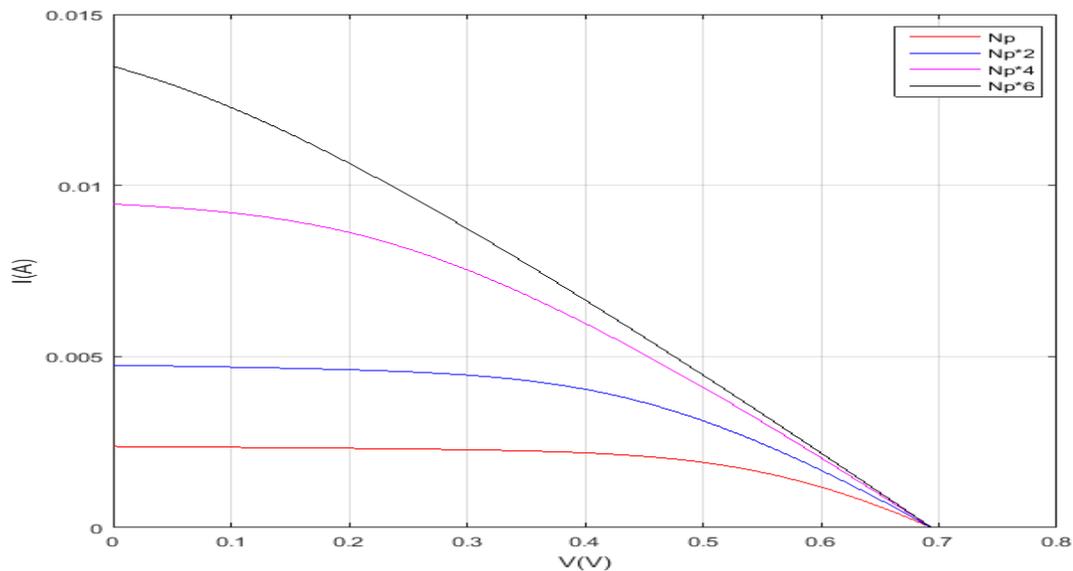


Figure II.16 : Caractéristique $I(V)$ des cellules en parallèle

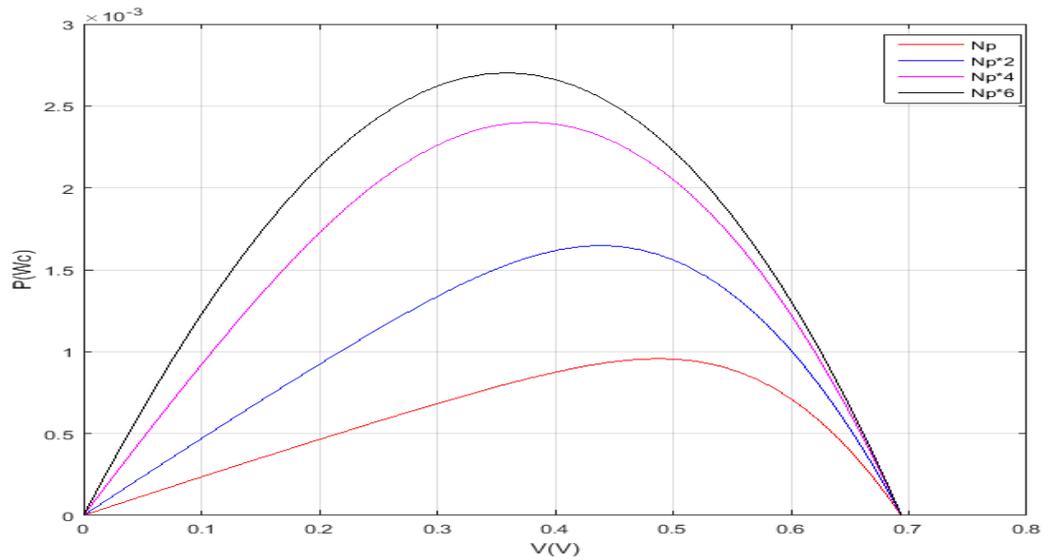


Figure II.17 : Caractéristique $P(V)$ des cellules en parallèle

c) Association mixte (Série + Parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle comme l'indique la figure (II.18) et la figure (II.19).

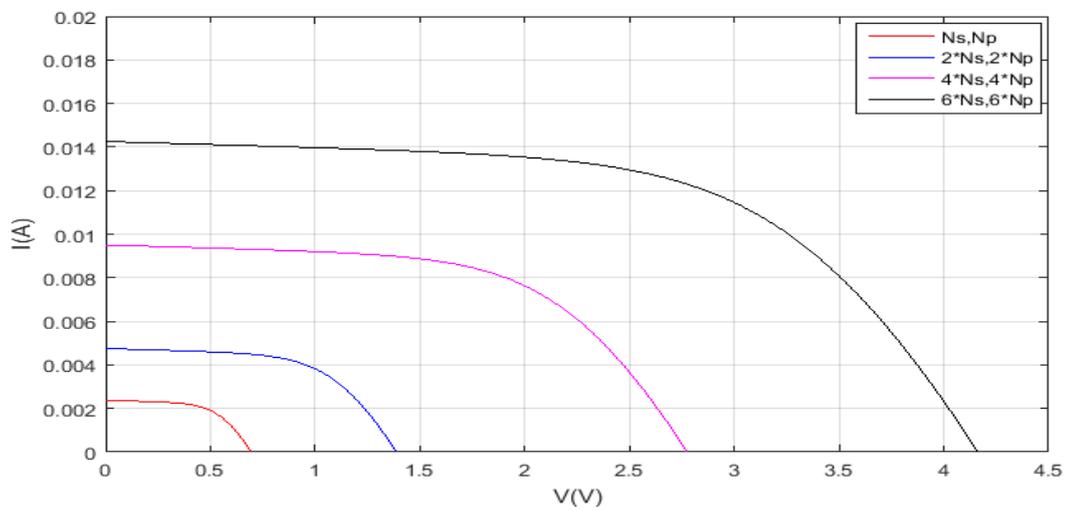


Figure II.18 : Caractéristique $I(V)$ d'une association mixte

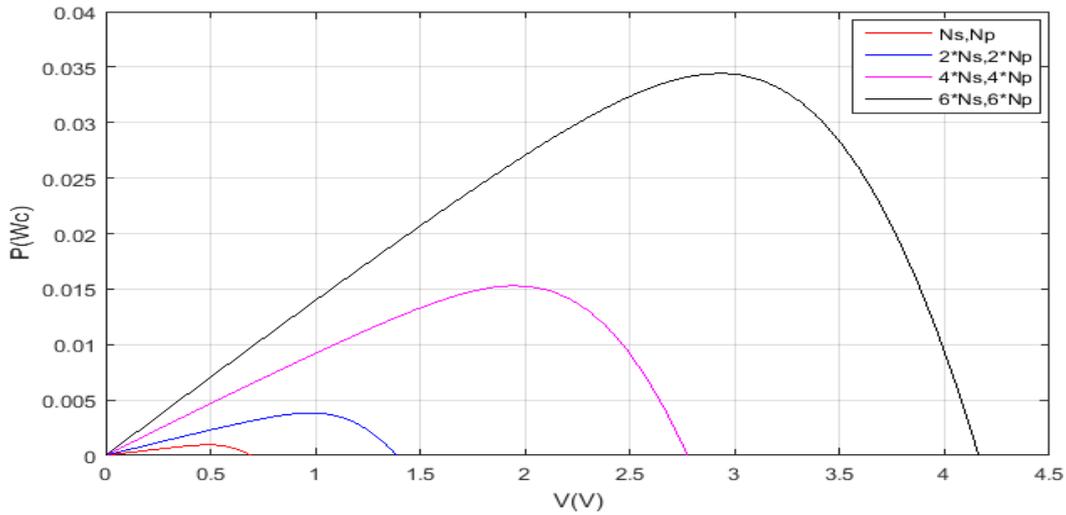


Figure II.19 : Caractéristique $P(V)$ d'une association mixte

II.1.3 Interprétations des Résultats

La figure (II.6) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$. Il est clairement remarquable que Le courant débité par le générateur photovoltaïque est pratiquement proportionnel à l'éclairement. Par contre la tension à circuit ouvert est peu sensible à cette variation qui varie de façon logarithmique, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

La figure (II.8) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$. La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. Lorsque la température augmente, le courant augmente légèrement. Par contre, la température influe négativement sur la tension on remarque que la tension décroît de $2 \cdot 10^{-3}$ V par degré.

Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $P(V)$ L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de 2 W par degré.

II.3 modélisation du convertisseur Boost

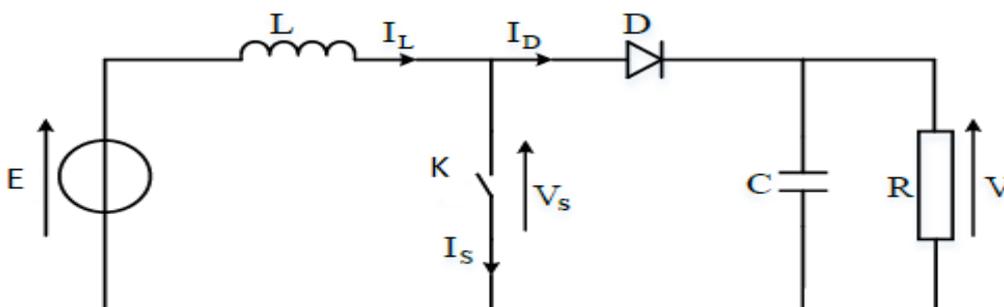


Figure II.20 : Schéma électrique d'un hacheur BOOST

On distingue deux cas :

➤ $0 \leq t \leq \alpha T$: *K fermé, D ouvert*

$$E - L \cdot \frac{di}{dt} = 0$$

Donc :
$$L \cdot \frac{di}{dt} = E \Rightarrow I = \frac{E}{L} \cdot t + A$$

$$I(0) = I_{\min} = A$$

$$I = \frac{E}{L} \cdot t + I_{\min} \tag{II.16}$$

➤ $\alpha T \leq t \leq T$: *K ouvert, D fermé*

$$E - L \cdot \frac{di}{dt} = V \Rightarrow L \cdot \frac{di}{dt} = E - V$$

$$I = \frac{E - V}{L} \cdot (t - \alpha \cdot T) + B$$

$$I(\alpha \cdot T) = I_{\max} = B$$

$$I = \frac{E - V}{L} \cdot (t - \alpha \cdot T) + I_{\max} \tag{II.17}$$

La relation entre E et V

$$I(0) = I_{\min} = I(T) = \frac{E - V}{L} \cdot (t - \alpha \cdot T) + I_{\max} \dots\dots\dots (1)$$

$$i(\alpha \cdot T) = I_{\max} = \frac{E}{L} \cdot (\alpha \cdot T) + I_{\min} \dots\dots\dots (2)$$

$$(1) - (2) \quad \frac{E - V}{L} \cdot (t - \alpha \cdot T) = -\frac{E}{L} \cdot (\alpha \cdot T)$$

$$E = (1 - \alpha) \cdot V \tag{II.18}$$

II.4 La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT)

Par définition, une commande MPPT, associé à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quel que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt} , I_{opt}).

Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs méthodes peuvent être utilisées [37] :

- La méthode d'ajustement de courbe
- La méthode « look-up table »
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur
- La méthode de court-circuit
- La méthode Perturbation et Observation (P&O)
- La méthode d'incrément de conductance
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones)

Le système de poursuite du point de puissance maximale que nous avons choisi est la méthode perturbation & observation (P&O). Vu sa facilité d'implémentation, elle permet d'obtenir un bon rendement.

II.4.1 La méthode Perturbation & Observation (P&O) : [37]

La méthode perturbation & observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM ; on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

Comme indiqué précédemment, le principe de commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.21), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectuée lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport

au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

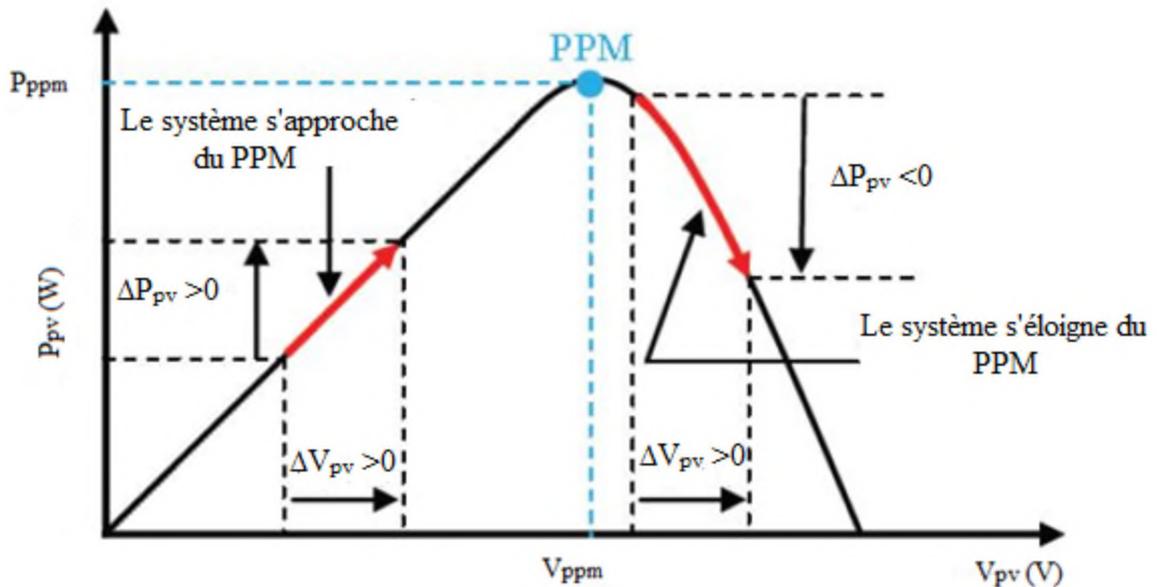


Figure II.21 : principe de la commande perturbation & d'observation

La figure (II.22) 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 (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation.

Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents

changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

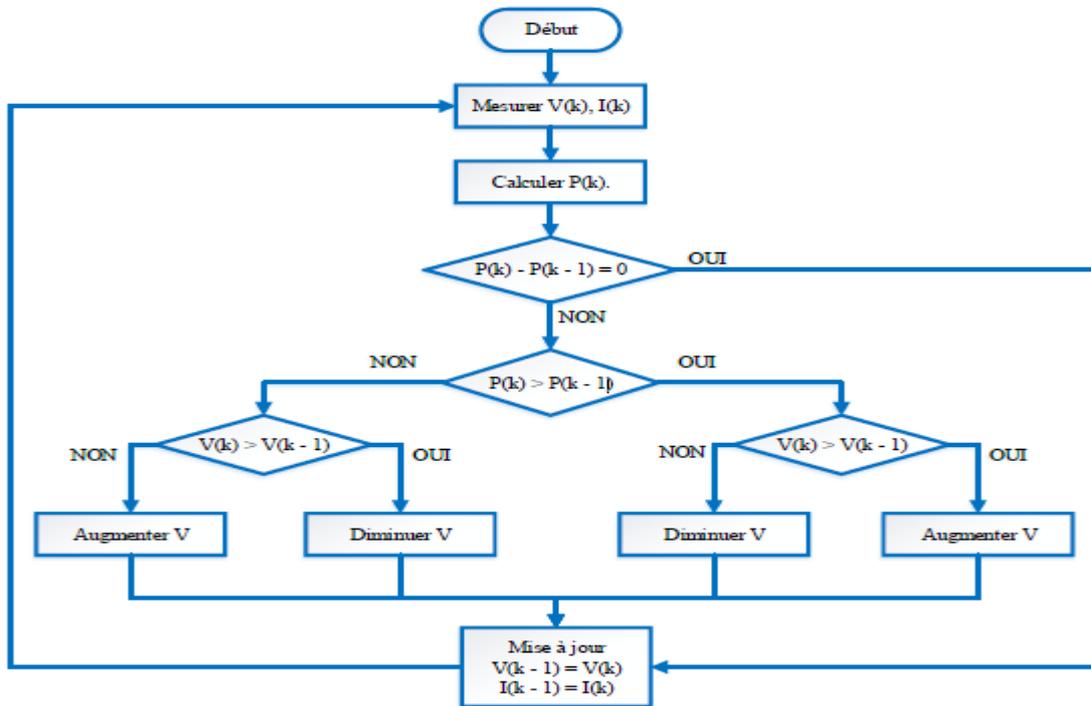


Figure II.22 : Algorithme de la méthode P&O

II.5 Modélisation de la MSAP

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagé. La modélisation d'un moteur synchrone à aimants permanents est identique à celle d'une machine synchrone classique sauf que l'excitation en courant continu attachée au rotor est remplacée par le flux de l'aimant. Donc, le modèle est issu du modèle de la machine synchrone classique [38].

II.5.1 Hypothèses simplificatrices

Avant d'établir le modèle mathématique nous devons imposer quelques hypothèses [39]-[40] [41] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelles sont indépendante des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- La distribution des forces électromotrices, le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale.
- Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.

II.5.2 Mise en équation de la MSAP en triphasé

II.5.2.1 Les équations électriques

Les tensions, flux et courants statoriques triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes respectivement : $[V_s]$, $[\varphi_s]$ et $[i_s]$

La figure suivante représente les enroulements d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents :

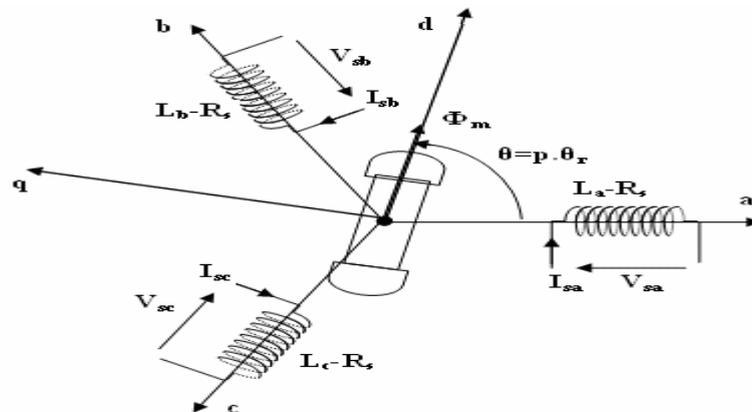


Figure II.23 : Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents dans le Repère triphasé

A partir de la figure (II.23), nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad \text{(II.19)}$$

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [i_s] + [\varphi_{sf}] \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$[V_s]^T = [V_a \quad V_b \quad V_c]^T : \text{Vecteur tensions statoriques}$$

$$[\varphi_s]^T = [\varphi_a \quad \varphi_b \quad \varphi_c]^T : \text{Vecteur flux statoriques}$$

$$[I_s]^T = [I_a \quad I_b \quad I_c]^T : \text{Vecteur courant statoriques}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistances du stator}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} : \text{Matrice inductance du stator}$$

$$[\varphi_{sf}] = \varphi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} : \text{Vecteur flux engendré par l'aimant}$$

φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant à travers les enroulements statoriques

θ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé défini par :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega \cdot d(t) \quad (\text{II.21})$$

Avec : $\omega = p \cdot \Omega_r$

ω : La pulsation électrique

p : Le nombre de paires de pôles de la machine

Ω_r : La vitesse de rotation de la machine (rotor)

II.5.2.2 Equation électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique de la machine est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande :

$$C_{em} = [I_s]^T \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d[L_s]}{d\theta} \cdot [I_s] + \frac{d[\Phi_{sf}]}{d\theta} \quad (\text{II.22})$$

II.5.2.3 Equation mécanique

L'équation de la machine est donnée par

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = \sum_i C_i \quad (\text{II.23})$$

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega_r \quad (\text{II.24})$$

Avec :

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur

C_r : Couple résistant

f : Coefficient de frottement

J : Moment d'inertie du moteur

II.5.2.4 La puissance absorbée

La puissance absorbée par le moteur synchrone à aimants permanents est donnée par l'équation suivante :

$$P_a = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (\text{II.25})$$

Avec :

P_a : La puissance absorbée par le moteur en (W)

ϕ : Facteur de puissance

L'étude analytique du comportement des équations (II.19) et (II.20) est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations

mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de Park .

II.5.3 Mise en équation de la MSAP en diphasé (modèle vectoriel)

II.5.3.1 Principe de la transformation de Park

Le modèle diphasé de la MSAP s'effectue par une transformation du repère triphasé Réel en un repère diphasé fictif, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs Physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park [42]- [43].

Le repère (d,q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, Selon L'objectif de l'application. La figure (II.24) présente la MSAP en modèle de Park.

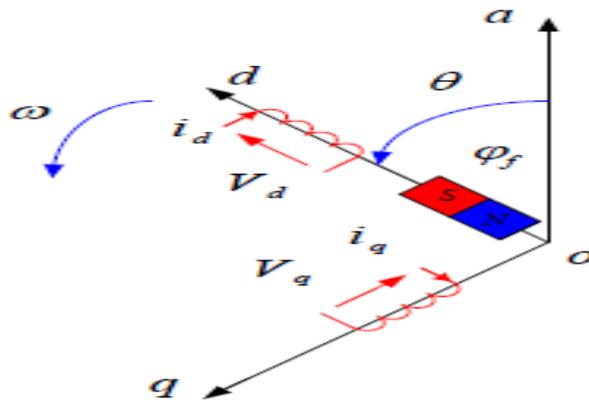


Figure II.24 : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)

Le repère (o,a) est fixe. Le repère (d,q) tourne avec la vitesse de synchronisme ω_r .

a) Passage direct (triphasé- diphasé)

L'équation qui traduit le passage du système triphasé (a,b,c) au système diphasé (d,q) est donnée par :

$$[X_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad \text{(II .26)}$$

Avec :

$[P(\theta)]$: La matrice de passage direct de Park

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2 \cdot \pi/3) & \cos(\theta - 4 \cdot \pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2 \cdot \pi/3) & -\sin(\theta - 4 \cdot \pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Où :

X : représente les variables considérées de la machine qui sont tensions, courants ou flux

X_o : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre

b) Passage inverse (diphase au triphasé)

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dgo}] \quad (\text{II.28})$$

La matrice de passage inverse de Park $[P(\theta)]^{-1}$ est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2 \cdot \pi/3) & -\sin(\theta - 2 \cdot \pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 4 \cdot \pi/3) & -\sin(\theta - 4 \cdot \pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

II.5.3.2 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park

a) Equations électriques

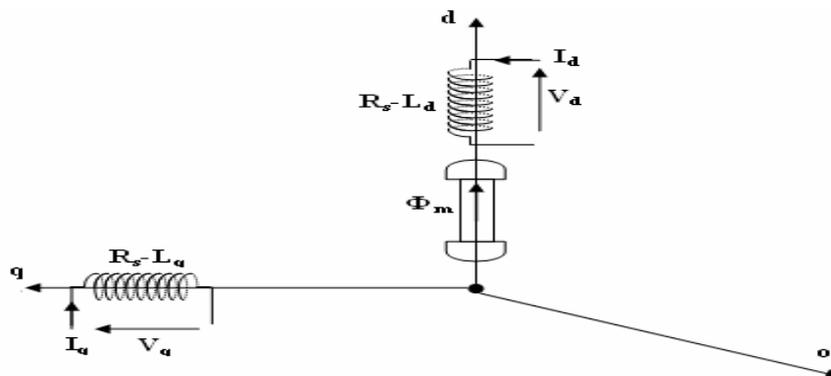


Figure II.25 : Représentation de la MSAP dans le système d'axe biphasé d-q

Dans ce paragraphe nous allons donner les équations électriques de la MSAP dans le système biphasé. En appliquant la transformation de Park à l'équation (II.19) on obtient :

$$[V_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot \left[[R_s] \cdot [i_{s,abc}] + \frac{d[\varphi_{s,abc}]}{dt} \right] \quad (\text{II.30})$$

En appliquant la transformation inverse de Park au courants et flux on obtient :

$$[i_{s,abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [i_{dqo}] \quad (\text{II.31})$$

$$[\varphi_{s,abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}] \quad (\text{II.32})$$

Telle que :

V_{dqo} : sont les composants directs, en quadrature et homopolaire de la tension

i_{dqo} : sont les composants directs, en quadrature et homopolaire du courant

φ_{dqo} : sont les composants directs, en quadrature et homopolaire du flux

On peut écrire l'équation de la tension sous :

$$\begin{cases} [V_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot \left[[R_s] \cdot [i_{dqo}] \cdot [P(\theta)]^{-1} + \frac{d}{dt} \left([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}] \right) \right] \\ [V_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [R_s] \cdot [P(\theta)]^{-1} \cdot [i_{dqo}] + [P(\theta)] \cdot \frac{d}{dt} \left([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}] \right) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

On a :

$$[P(\theta)] \cdot [R_s] \cdot [P(\theta)]^{-1} \cdot [i_{dqo}] = [R_s] \cdot [i_{dqo}] \quad (\text{II.34})$$

$$\begin{cases} [P(\theta)] \cdot \frac{d}{dt} \left([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}] \right) = [P(\theta)] \cdot \left[\frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} [\varphi_{dqo}] + [P(\theta)]^{-1} \cdot \frac{d[\varphi_{dqo}]}{dt} \right] \\ [P(\theta)] \cdot \frac{d}{dt} \left([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}] \right) = [P(\theta)] \cdot \frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} \cdot [\varphi_{dqo}] + [P(\theta)] \cdot [P(\theta)]^{-1} \cdot \frac{d[\varphi_{dqo}]}{dt} \\ [P(\theta)] \cdot \frac{d}{dt} \left([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}] \right) = [P(\theta)] \cdot \frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} \cdot [\varphi_{dqo}] + \frac{d[\varphi_{dqo}]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Après la simplification de l'équation on a :

$$[P(\theta)] \cdot \frac{d}{dt} ([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}]) = [P(\theta)] \cdot \frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} \cdot [\varphi_{dqo}] + \frac{d[\varphi_{dqo}]}{dt} \quad (\text{II.36})$$

En prenant, la dérivé de la matrice de Park inverse nous obtenons :

$$\frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta - 2 \cdot \pi/3) & -\cos(\theta - 2 \cdot \pi/3) & 0 \\ -\sin(\theta - 4 \cdot \pi/3) & -\cos(\theta - 4 \cdot \pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

En multipliant les équations (II.27) et (II.37) nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} [P(\theta)] \cdot \frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ [P(\theta)] \cdot \frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} = \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.38})$$

Alors :

$$[P(\theta)] \cdot \frac{d}{dt} ([P(\theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}]) = \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{d[\varphi_{dqo}]}{dt} \quad (\text{II.39})$$

On remplace les équations (II.34) et (II.39) dans l'équation (II.33)

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Puisque le système est équilibré, on obtient finalement le modèle électrique dynamique pour l'enroulement statorique biphase équivalent :

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_d] = [R_s] \cdot [i_d] + \frac{d[\varphi_d]}{dt} - \omega \cdot \varphi_q \\ [V_q] = [R_s] \cdot [i_q] + \frac{d[\varphi_q]}{dt} - \omega \cdot \varphi_d \end{array} \right. \quad (\text{II.41})$$

$$\begin{cases} [\varphi_d] = [L_s] \cdot [i_d] + \varphi_{sf} \\ [\varphi_q] = [L_s] \cdot [i_q] \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

b) Equation électromagnétique

Le couple électromagnétique C_e dans le référentiel (d, q) est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] + \varphi_{sf} \cdot i_q \quad (\text{II.43})$$

c) Equations mécaniques

L'équation mécanique développée par la machine est donnée par la relation suivante :

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} - f \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.44})$$

II.5.3.3 Le choix de référentiel

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

a) Référentiel lié au stator

Dans ce type de référentiel, les axes (d,q) par rapport aux axes statoriques et rotoriques sont définis par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (\text{II.45})$$

Ce type de référentiel est choisi lors des variations importantes de la vitesse du rotor.

b) Référentiel lié au rotor

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

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (\text{II.46})$$

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

c) *Référentiel lié au champ tournant*

Ce référentiel est défini par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II. 47})$$

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

II.5.4 Résultats de simulation de la MSAP

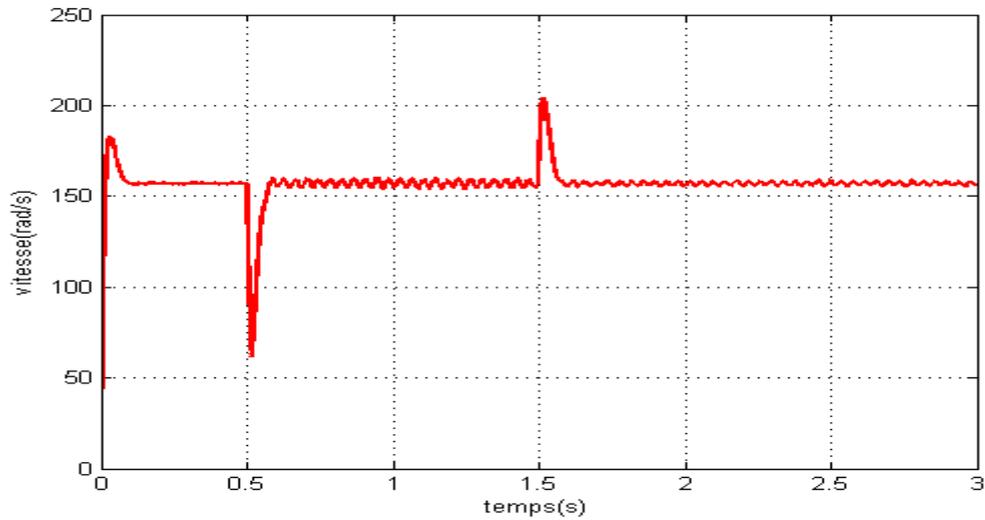


Figure II.26 : Vitesse de rotation

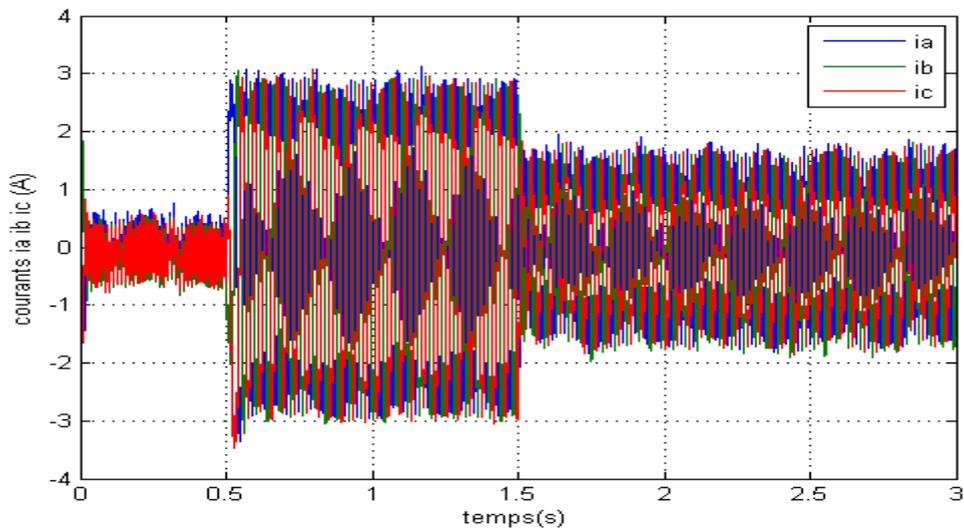


Figure II.27 : Courants statoriques

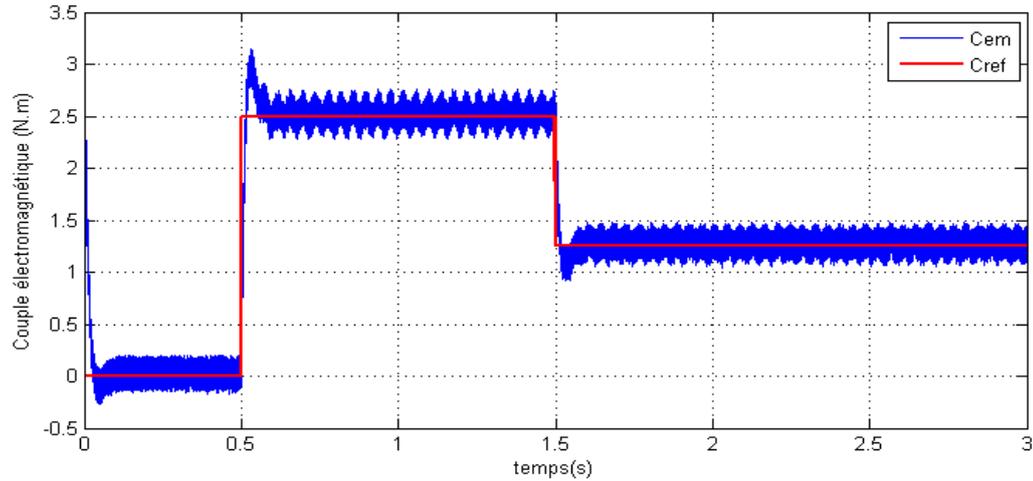


Figure II.28 : Couple électromagnétique

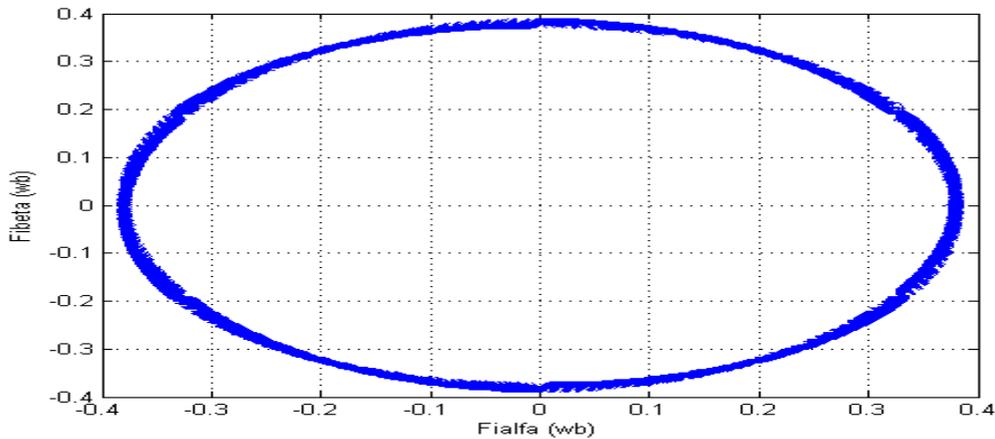


Figure II.29 : Composantes α, β du flux φ_s

II.5.5 Interprétation des résultats

D'après l'analyse des figures (II.26), (II.27), et (II.28), la vitesse tend vers la vitesse de la référence, lorsqu'on applique un couple électromagnétique, à 2.5 N.m la vitesse diminue puis elle est régulée par le régulateur de vitesse, par conséquent les courants de phases augmentent de 0.4 à 2.9A. Lorsqu'on diminue le couple électromagnétique à 1.5 N.m, on remarque une apparition d'un pic sur la vitesse puis elle se stabilise, le couple tend vers la référence par contre les courants de phase diminuent à 1.8A puisque le couple c'est l'image de courant.

II.6 Modélisation de la pompe centrifuge

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

$$f(H, Q, N) = 0 \quad (\text{II.48})$$

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

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

$$H = H_s + H_d \quad (\text{II.49})$$

H : Hauteur totale du pompage

H_s : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau

H_d : Est la somme des pertes linéaires et singuliers

II.6.1 Les pertes de charge

Représentent les pertes de pression dues aux différents obstacles s'opposant au déplacement du fluide pompé. On distingue :

a) Pertes de charges linéaires

Produites par le frottement du fluide sur les parois des conduites. Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (\text{II.50})$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires

L : Longueur de la tuyauterie (m)

D : Diamètre de la tuyauterie (m)

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

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

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{II.51})$$

Q : débit (m³/s)

$$\Delta H_L = \frac{L}{D} \cdot \left(\frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \right) \quad (\text{II.52})$$

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

a) Les pertes de charge singulières

Produites par tout phénomène local tel que changement de section ou de direction dans la conduite, vanne, etc. Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_s = \xi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = \xi \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \quad (\text{II.53})$$

ξ : Coefficient de pertes de charges locales

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$H_d = \Delta H_L + \Delta H_s$$
$$H_d = \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \xi \right) \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} = K_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{II.54})$$

K_{fr} : Constante de la canalisation

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + K_{fr} \cdot Q^2 \quad (\text{II.55})$$

II.6.2 Caractéristiques d'une pompe centrifuge

II.6.2.1 Caractéristique Débit -vitesse

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [45].

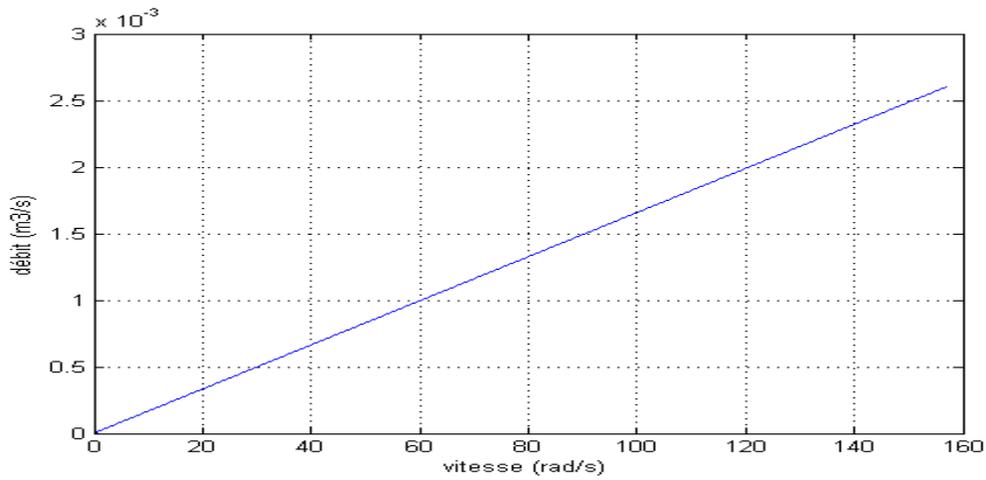


Figure II.30 : Caractéristique débit-vitesse d'une pompe centrifuge

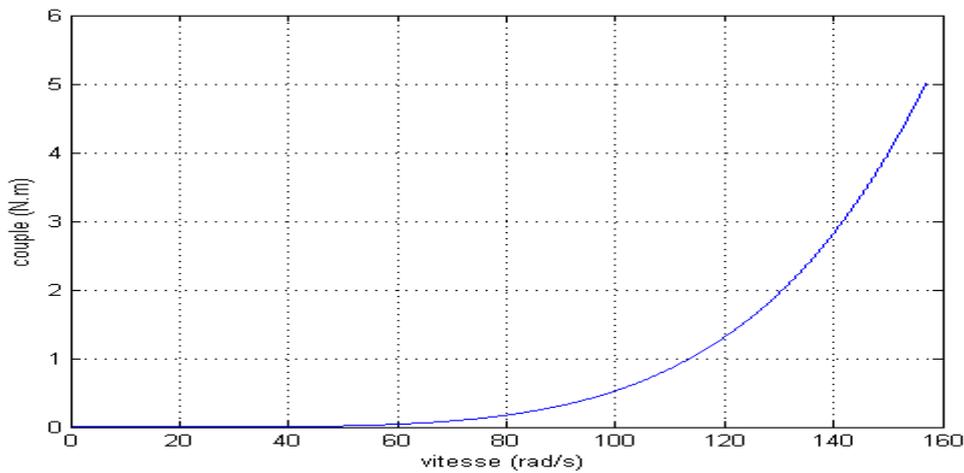


Figure II.31 : Caractéristique couple - vitesse d'une pompe centrifuge

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la

vitesse et est donnée par la relation suivante : $P_{méc} = C_r \cdot \omega$ (II.56)

II.6.2.3 Caractéristique Débit - hauteur

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit [47]. La charge du moteur est une pompe immergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit Q. En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN" [48].

$$H_{MT} = K_0 \cdot \omega^2 - K_1 \cdot \omega \cdot Q^2 - K_2 \cdot Q^2 \quad (\text{II.57})$$

Avec :

K_0, K_1, K_2 : Des constantes propres de la pompe donnée par le constructeur

La courbe HMT(Q) est une parabole. Le point de rencontre de la courbe HMT(Q) avec L'axe des ordonnées est le point à débit nul. C'est le point à vanne fermée ou encore point de barbotage [49]. Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes.

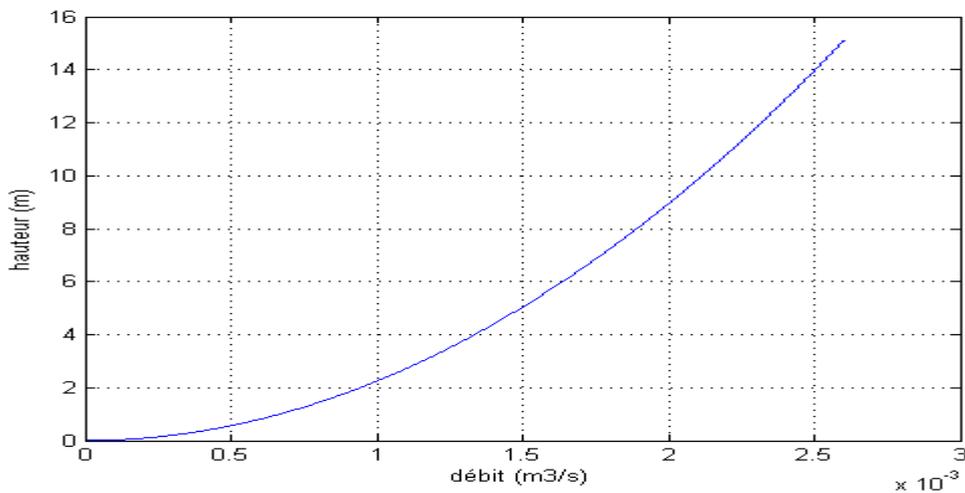


Figure II.32 : Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation

II.6.2.4 Caractéristique de la puissance

L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (\text{II.58})$$

Où :

ρ : La masse volumique de l'eau étant de 1000kg/m³

G: Accélération de la pesanteur (9,81m/s²)

La courbe de la figure (II.33), des puissances absorbées pour les différents débits est une branche de parabole qui peut présenter un maximum dans la plage utilisable.

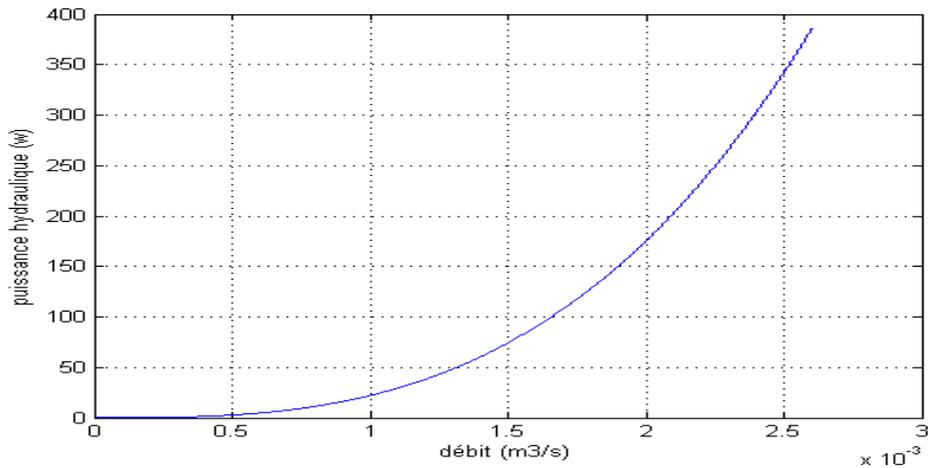


Figure II.33 : Caractéristique de la puissance hydraulique de la pompe centrifuge

II.6.3 Modèle de la pompe utilisé en simulation

$$Q_1 = Q \cdot \frac{N_1}{N} \quad \text{(II.59)}$$

$$H_1 = H \cdot \left(\frac{N_1}{N} \right)^2 \quad \text{(II.60)}$$

Avec Q et Q1, les débits correspondants respectivement à la vitesse N et N1 ; H et H1 les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse N et N1.

Notons que Q et H sont donnés par le constructeur.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes cellules du système de pompage photovoltaïque, on a commencé par la modélisation des cellules solaires, le hacheur boost Ensuite, la Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent en se basant sur les équations électriques et mécaniques qui régissent le comportement de la machine.

Pour la dernière partie nous avons modélisé la pompe centrifuge qui est la plus utilisé dans le domaine de pompage photovoltaïque.

Chapitre III : Association des différents composants d'un système de pompage PV

Introduction

Pour réaliser une simulation d'une chaîne de pompage photovoltaïque proche de la réalité, il faut dimensionner tous les éléments constitutants de la chaîne, en tenant compte des besoins énergétiques, énergie solaire disponible, et d'autres paramètres importants.

Dans la première partie de ce dernier chapitre, on va présenter une méthode de dimensionnement, alors que dans la deuxième, une simulation de l'association des éléments de la chaîne sous l'outil Matlab / Simulink 2012 va être réalisée.

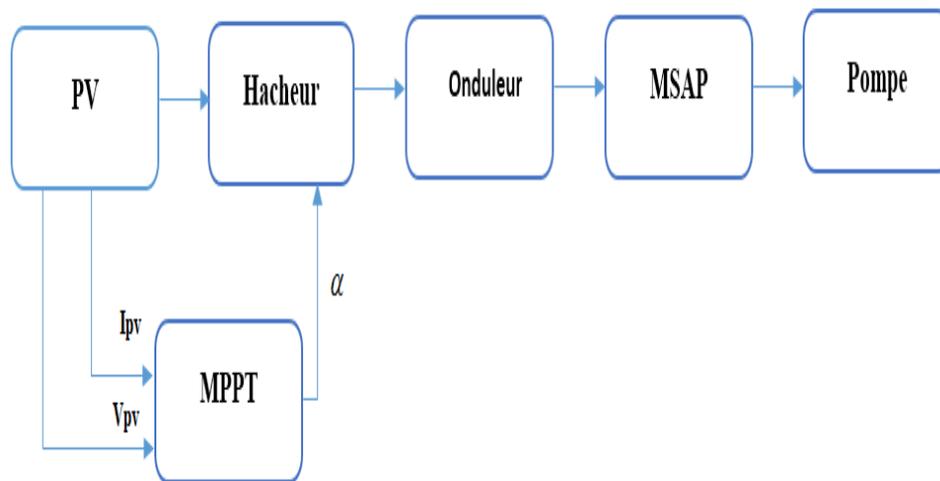


Figure III.1 : Schéma d'association des éléments de pompage PV

III.1 Méthode de dimensionnement :

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

III.1.1 Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail.

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du

sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système [55].

Dans ce travail, on choisie un débit de remplissage nominal $Q_n = 2.6$ l/s et une hauteur manométrique totale $HMT = 15.1$ m. Ces calculs permettent de dimensionner le générateur photovoltaïque, le régulateur et le moteur envisageables à cette application.

II.1.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Une fois définis les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [56] :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (\text{III.1})$$

Où :

P_h : Énergie hydraulique (W)

H : Hauteur totale (m)

Q : Débit d'eau (m^3/s)

ρ : Densité de l'eau ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)

g : Accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

AN :

$$P_h = 10^3 \cdot 9,81 \cdot 15,1 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} = 385,14 \text{ W}$$

III.2 Dimensionnement de la pompe centrifuge

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

$$n_p = \frac{P_h}{P_{mec}} \Rightarrow P_{mec} = \frac{P_h}{n_p} \quad (\text{III.2})$$

Où :

P_h : La puissance hydraulique (W).

P_{mec} : La puissance mécanique (W).

n_p : Le rendement de la pompe centrifuge.

Généralement le rendement de la pompe est compris entre 40 % et 60%, un rendement moyen sera relevé de 49% dans cette étude.

AN :

$$P_{mec} = \frac{P_h}{n_p} = \frac{385,14}{0,49} = 786 \text{ W}$$

III.3 Dimensionnement du moteur

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque. Pour que le moteur électrique fournit une puissance mécanique demandée, il absorbe une puissance électrique à ses bornes. Le moteur a un rendement de 78,6%.

$$n_m = \frac{P_{mec}}{P_e} \Rightarrow P_e = \frac{P_{mec}}{n_m} \quad (\text{III.3})$$

Où :

P_e : La puissance hydraulique (W)

P_{mec} : La puissance mécanique (W)

n_m : Le rendement de MSAP

AN :

$$P_e = \frac{P_{mec}}{n_m} = \frac{786}{0,786} = 1000 \text{ W}$$

III.4 Dimensionnement du champ photovoltaïque

Le moteur absorbe une puissance de 1000 W, choisissant un champ photovoltaïque désiré de 1200 W à cause des pertes. La puissance maximale fournie par le panneau isofoton_106 est de l'ordre de 100 W.

III.4.1 Estimation du nombre de modules

$$N = \frac{P_d}{P_{mp}} \quad (\text{III.4})$$

$$N = \frac{P_d}{P_{mp}} = \frac{1200}{100} = 12 \text{ panneaux}$$

Avec :

N : Le nombre de panneaux souhaités

P_d : La puissance désirée (W)

P_{mp} : La puissance crête aux bornes du panneau isofoton_106

III.4.2 Estimation du nombre de modules en série

La tension du champ photovoltaïque voulu $V_{\text{champ}} = 120 \text{ V}$

Le nombre de modules en série est :
$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{mp}} \quad (\text{III.5})$$

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{mp}} = \frac{120}{17} = 7,05 \approx 7 \text{ panneaux}$$

Où :

V_{ch} : Tension du système

V_{mp} : Tension du panneau

N_s : Nombre des panneaux en série

III.4.3 Estimation du nombre de branches en parallèle

Le nombre de branches en parallèle est :

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (\text{III.6})$$

$$N_p = \frac{N}{N_s} = \frac{12}{7} = 1,71 \approx 2 \text{ panneaux}$$

D'où :

N : Le nombre de panneaux souhaités

N_s : Nombre des panneaux en série

N_p : Nombre des panneaux en parallèle

III.5 Résultats de simulation

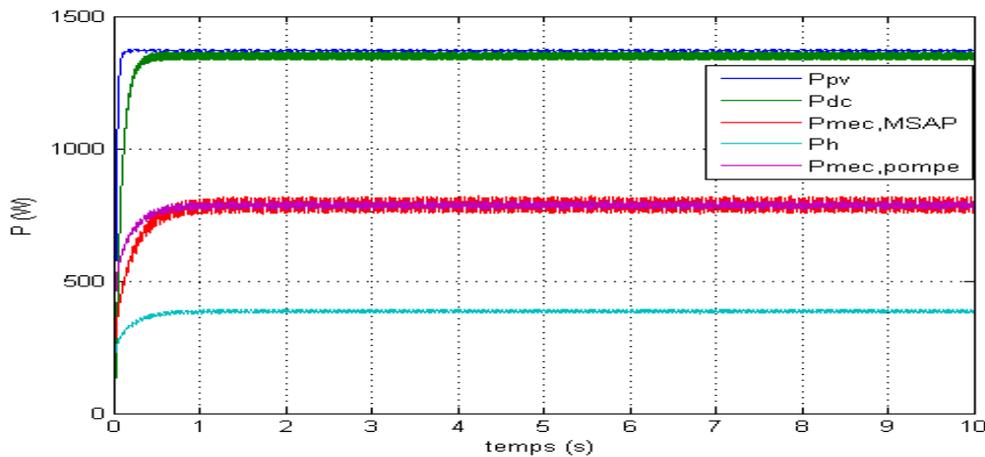


Figure III.2 : Courbe des puissances en fonction du temps

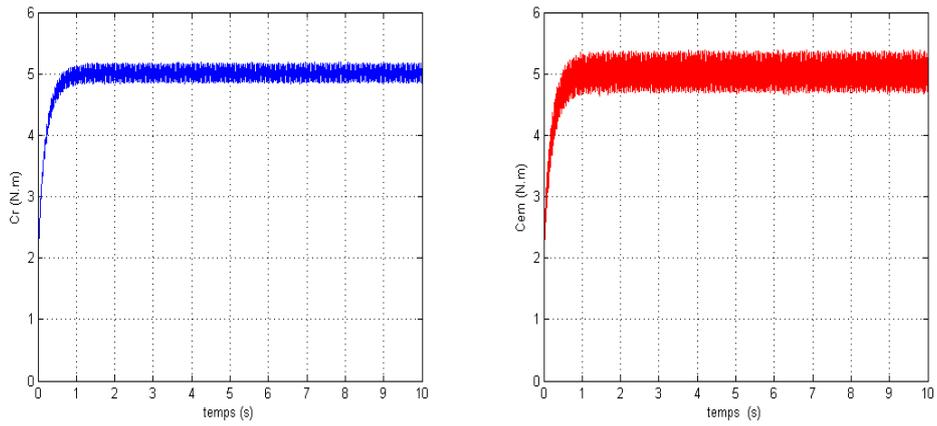


Figure III.3 : Courbe de la variation du couple en fonction du temps

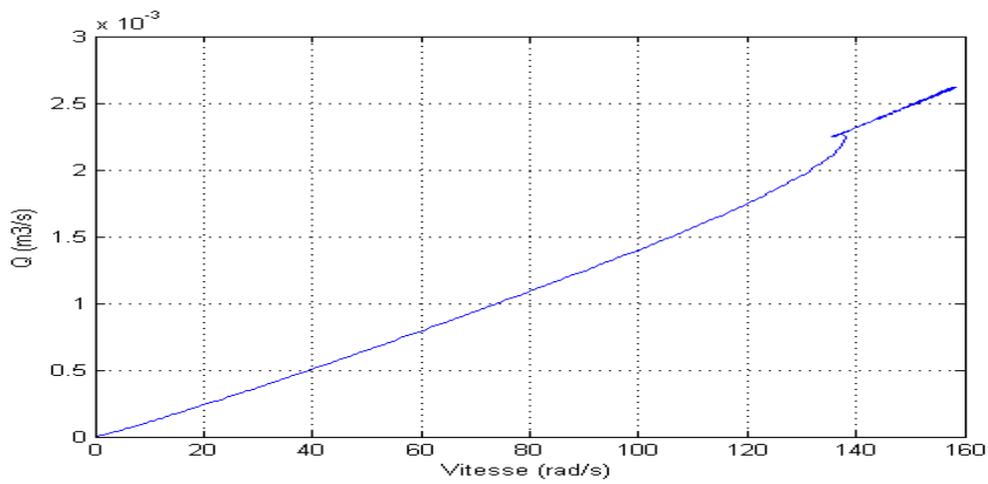


Figure III.4 : Courbe de la variation du débit en fonction de la vitesse

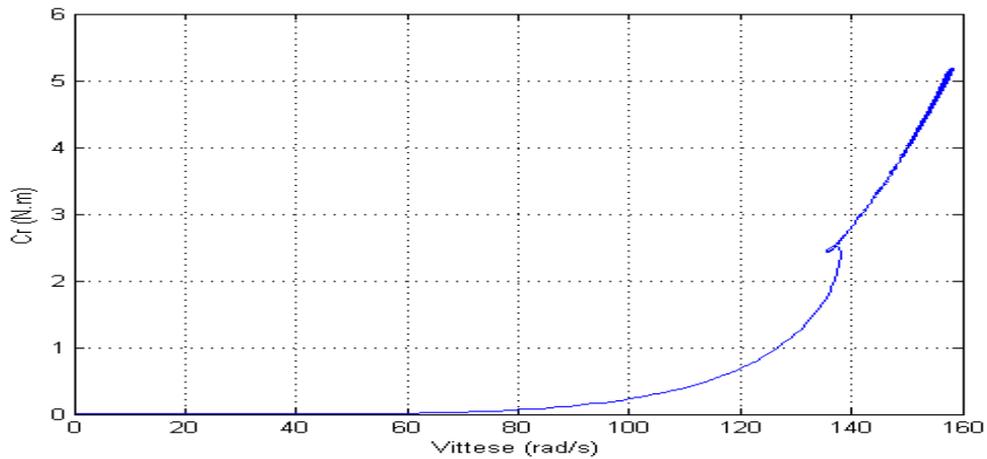


Figure III.5 : Courbe de la variation du couple moteur (Cr) en fonction de la vitesse

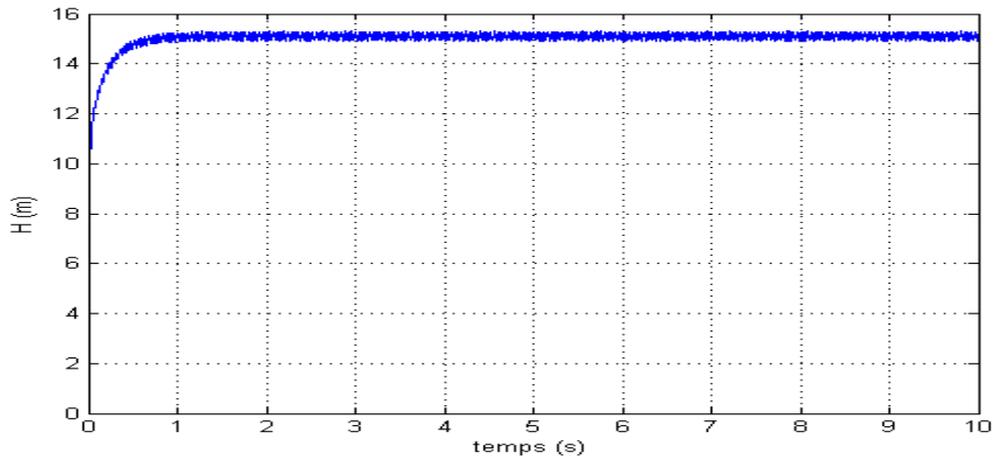


Figure III.6 : Courbe de la variation de la hauteur en fonction du temps

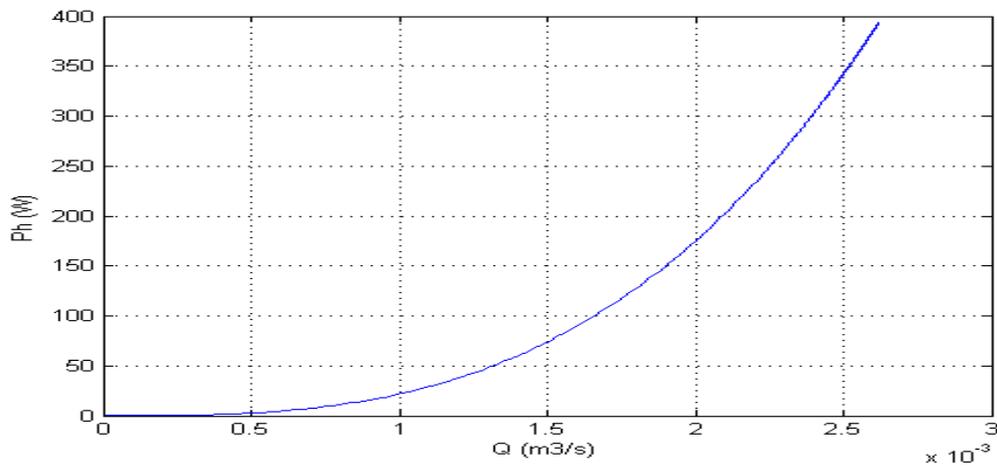


Figure III.7 : Courbe de la variation de la puissance hydraulique en fonction du débit

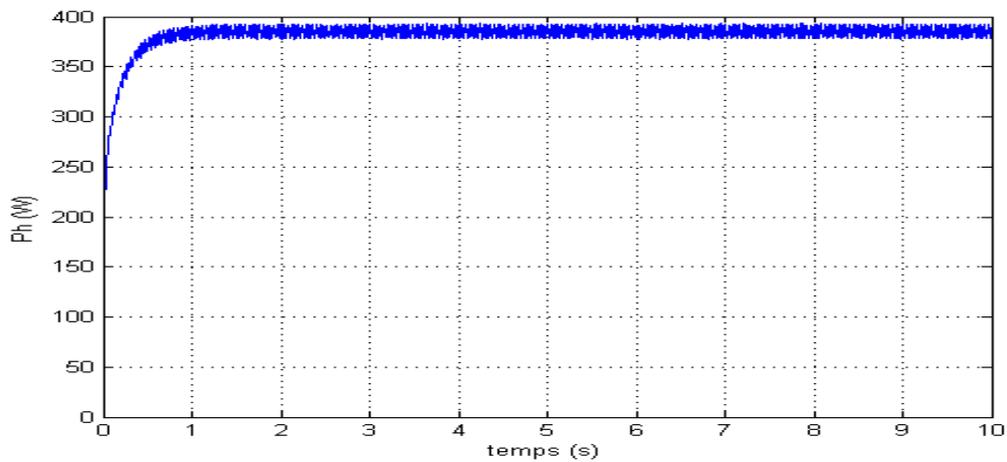


Figure III.8 : Courbe de la variation de la puissance hydraulique en fonction du temps

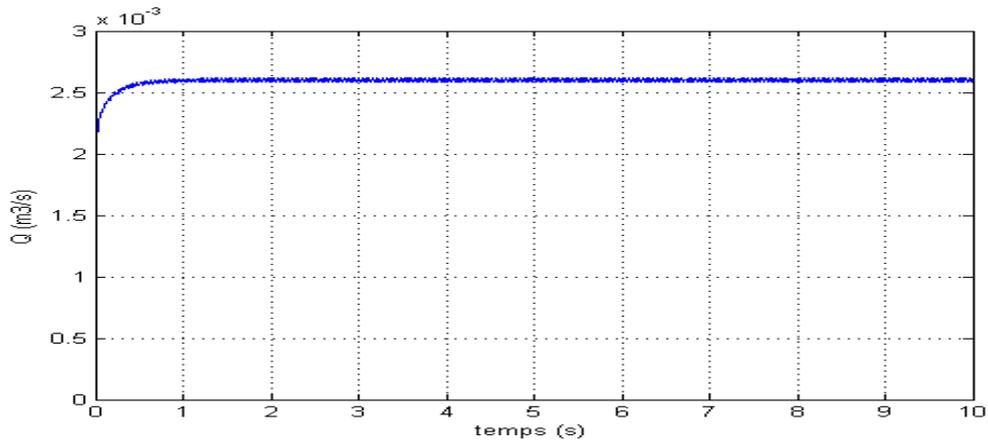


Figure III.9 : Courbe de la variation du débit en fonction du temps

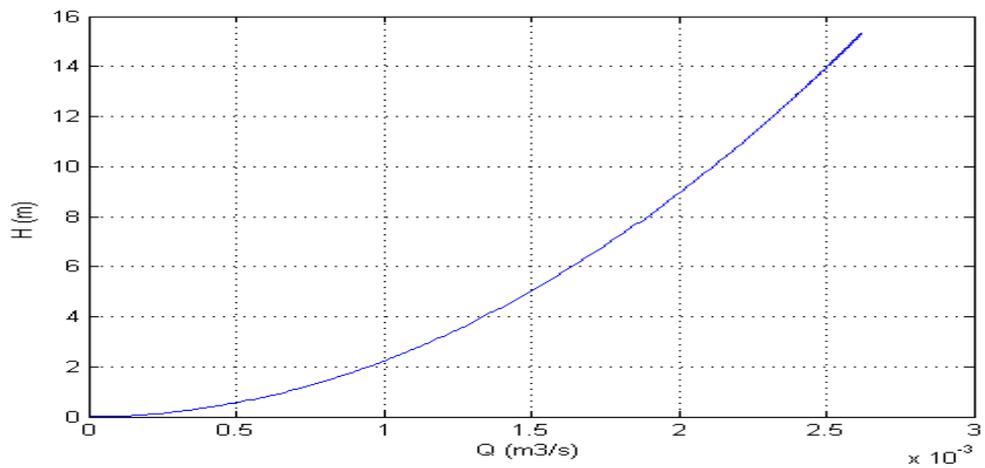


Figure III.10 : Courbe de la variation de la hauteur en fonction du débit

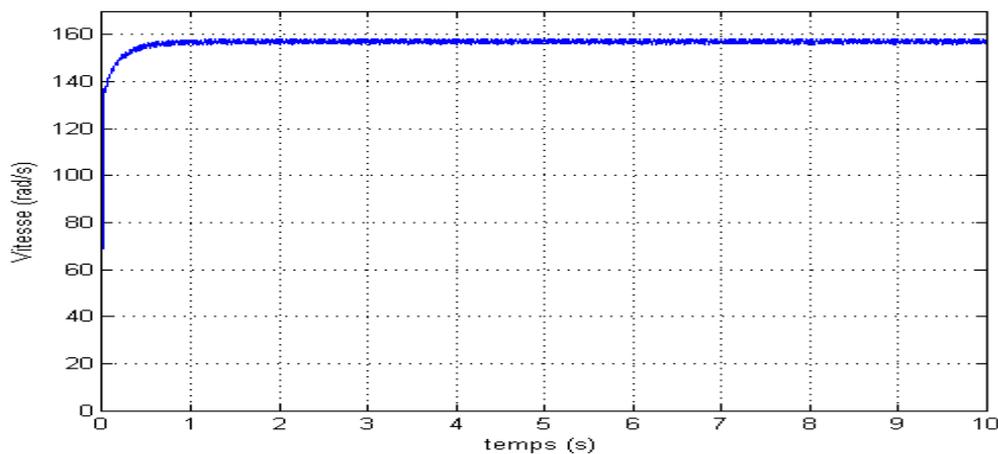


Figure III.11 : Courbe de la variation de la vitesse en fonction du temps

III.8 Interprétations des résultats

La figure (III.2) montre la variation des différentes puissances du système de pompage photovoltaïque débutant par le générateur PV jusqu'à la pompe, passant par l'étage d'adaptation (hacheur) et le groupe motopompe, au cours du temps, dont, il est remarquable que la puissance diminue de générateur vers la pompe à cause des besoins énergétique.

Le couple électromagnétique fournit par la MASP est identique au couple résistant comme le montre la figure (III.3).

Dans la figure (III.4) et (III.5), la caractéristique débit –vitesse est linéaire, par contre, la caractéristique couple- vitesse prend une forme hyperbolique. Tant que, la vitesse n'atteint pas le régime permanent, il est évident que le débit et le couple diminuent légèrement lorsque la vitesse diminue dans l'intervalle [135 140] rad/s.

Pour les figures (III.6), (III.8), (III.9) et (III.11) la hauteur, la puissance hydraulique, le débit, et la vitesse en fonction du temps, tendent respectivement et convergent très rapidement vers les valeurs désirées au régime permanent.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons commencé par le dimensionnement des différents éléments, constituant un système de pompage photovoltaïque (panneau photovoltaïque, machine synchrone à aimant permanent et la pompe centrifuge). Ainsi, nous avons élaboré sous Matlab 2012, la simulation du système globale interconnecté.

Dans la deuxième partie, les résultats de simulation, et les différentes courbes qui décrivent le comportement de ce système en fonction des différents paramètres sont présentées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine d'énergies renouvelables, aujourd'hui les chercheurs travaillent sur ce domaine. Le système de pompage photovoltaïque à l'aide d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) prend une place importante, c'est un sujet intéressant et récent. Ce système peut s'installer dans les sites isolés soit pour l'irrigation et/ou l'approvisionnement en eau.

Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV en se basant sur un circuit équivalent à une diode. L'objectif était la simulation du fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension et puissance-tension.

Afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Cet étage est composé par un hacheur contrôlé par un algorithme dit P&O. Le but de cette adaptation est d'assurer un transfert maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale de générateur. La partie alternative du système étudié dans ce mémoire comporte : un onduleur de tension à deux niveaux, MSAP et une pompe centrifuge. Le type de pompe employée dans le pompage photovoltaïque est la pompe centrifuge, grâce à sa simplicité et son rendement élevé même à faible vitesse d'entraînement.

Les résultats de fonctionnement du système étudié ont été présentés dans le troisième chapitre, l'interprétation des résultats a montré que le temps de réponse du système est très rapide.

Comme perspectives pour ce travail :

- La réalisation pratique et réelle de ce système, afin d'effectuer des tests et valider les résultats numériques de simulation.
- Provoquer des défauts, soit coté génération de tension de bus continue (PV, hacheur) soit coté group motopompe.
- Faire un diagnostic avec les méthodes d'intelligence Artificielle (Réseaux de neurone, logique floue...) pour détecter et localiser les différents défauts dans ce système.

Les références bibliographiques

Les références bibliographiques

- [1] K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivé 'Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique', université de maroc, revue des énergies renouvelables, pp 451 – 462, 2007.
- [2] D. BOUKHERS « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
- [3] O. GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » Thèse de doctorat en électrotechnique, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [4] BOUZERIA HAMZA, Thèse de doctorat 3ème cycle LMD en Électrotechnique, « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque », université hadj lakhdar batna, 2016.
- [5] FERRAI.A, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village » Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [6] DERBAL. M, DEBBAH. N « Étude et Commande d'un Système Hybride Eolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'Amélioration de la Qualité de l'Énergie. », Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'Etat en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique d'Alger Juin 2013.
- [7] B. Azoui et al, "Sizing and Optimization models for photovoltaic pumping system Using BLDCM Motor", AMSE, pp 55-69, 2003.
- [8] MaëlaJAOUEN « Les énergies renouvelables Etat des lieux et perspectives en Italie». Chargée de Mission Cathy RACAULT, Attachée Scientifique ; Juin 2005.
- [9] Touil.N, Ghenbazi.S, « Modélisation et Simulation d'un Systèm Photovoltaïque », MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued Septembre 2015.
- [10] Aicha DJALAB « Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle : Application sur un système photovoltaïque. » THESE DE DOCTORAT Filière : Automatique, Université de Djelfa, 2020
- [11] Soula Yousef « optimisation et dimensionnement d'un système solaire de pompage d'eau », mémoire de master option génie électrique, Université Larbi ben m'hidi- oum elbouaghi, juin 2016

- [12] BoukhersDjamil « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », université de Constantine 28.11.2007
- [13] Zigha Ali. "Étude et simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien. Mémoire de Master. Université Constantine I. Algérie 2014
- [14] MECHALIKH M. Nadjib, HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Thème de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013
- [15] CH. Maher « Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque » Mémoire Master Université Sfax 2007-2008.
- [16] K. Sobaihi « étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction » Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique
- [17] F. HANANOU A. ROUABAH :« Modélisation et simulation d'un système Soutenu publiquement Le 09 /06/2014
- [18] Mr. MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCCEN 14 / 11/ 2011
- [19] M.N. Cheikh et CH. Hmada « Modélisation et simulation d'un système Mémoire photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire de Master Université KasdiMerbah–Ouargla 2013
- [20] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [21] Aït Kaci D, Boubouzal N : « Etude et simulation d'un aérogénérateur ». Mémoire d'ingéniorat en Electrotechnique, UMMTO 2009.
- [22] N. Dakou, A. Chikhaoui, « Diagnostic des défauts entre spire de la Machine Synchrone à Aimant Permanent », Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2016.
- [23] A. Ameer, « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une Machine Synchrone à Aimant Permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants », Mémoire de Magister, université de Batna, 2005.
- [24] K. R. Weeber, M. R. Shah, K. Sivasubramaniam, A. ElRefaie, R. Qu, C. Stephens, and S. Galioto, "Advanced permanent magnet machines for a wide range of industrial applications," in Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Providence, RI, 2010.

- [25] M. Merzoug, « Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) », Mémoire de magister, Université de Batna, 2007.
- [26] K. Hachemi, « Etude de la Machine Synchrone Autopilotée : « Modélisation et Simulation », Thèse de Doctorat, université Mohammed Boudiaf d'Oran, juillet 2012.
- [27] B. Abde Raouf, « *commande vectorielle de la MSAP* », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2014.
- [28] Joël. M. Zinsalo, « pompes et station de pompage », notions de cours, université d'Abomey Calavi, Benin.
- [29] BELGUELIL Nadjat, « Etude Comparative Du Point De Vue Fonctionnement Et Maintenance Des Installation De Pompage », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf- M'sila, 2015.
- [30] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens Bibliothèque nationale du Canada, 1998.
- [31] Armando L'encastre, « Hydraulique générale », Edition Saint-Germain, 1991.
- [32] Otmani Abdeslam, « Contribution à l'étude de rénovation de la station de pompage d'eau de mer Alzinc-Ghazaouet », mémoire de master, université de Tlemcen, 2014.
- [33] Ministère de la coopération (République Française), « Les pompes et les petites stations de pompage » Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques SOGREAH, 1978.
- [34] KSB, « Détermination des pompes centrifuges ».
- [35] Berramdane lies et Younes bouassida mohamed reda « Étude d'un système de pompage photovoltaïque (modélisation et simulation)» Mémoire Master, Université Annaba, 2018
- [36] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. Solar energy materials solar cells. Vol 90, pp. 1555-1578, 2006;
- [37] R. Merah1, R. Chenni2, M. Houbes, « Modélisation et Simulation d'un Module PV par Matlab ». 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1, (2010)
- [38] T.Hualin and J. Chang, "Field Orientation and Adaptative Backstepping for Induction Motor Control", Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Vol.4, pp. 2357 – 2363, Oct 3-7, 1999.

- [39] I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic and A. S. Morse, "Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback Linearizable Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 36, Issue 11, pp. 1241-1253, November 1991.
- [40] M. CARRIERE Sébastien, Synthèse croisée de régulateurs et d'observateurs pour le contrôle robuste de la machine synchrone, Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, année 2010.
- [41] MERZOUG Med Salah, Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une machine synchrone à aimants permanents, mémoire de magister, Université de Batna, Algérie.
- [42] REZGUI SALAH EDDINE, Commande de machine électrique en environnement, Matlab/Simulink et Temps Réel, mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie, année 2009.
- [43] Bouchnafa, « Estimation des énergies incidentes et fournies par module photovoltaïque », Mémoire de DES, Université de Tlemcen, Juin 2001.
- [44] M. Masour niang & Souleymane Diop. Les pompes solaires : Dimensionnement d'une Station de pompage en zone maraîcher » Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT électrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation. 2008.
- [45] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande Appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [46] A. Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [47] E. Koutoulis, K. Kazantzakis, Member, IEEE, and Nicholas C. Voulgaris «Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System», IEEE transactions on power electronics, 2001
- [48] Saïd Keddache et Rabah Baoudj, Mémoire Master Académique « étude et simulation de système de pompage d'eau par le procédé photovoltaïque » spécialité Réseaux électriques UMMTO, 2013.
- [49] Melle Djoua Chafiaa et Melle Chiout Tinhinane, « Etude et simulation d'un système de pompage d'eau par énergie photovoltaïque », UMMTO, 2014.

Résumé :

Tout d'abord, le manque d'approvisionnement en eau dans les régions rurales et désertique donne un intérêt major à intégrer des systèmes de pompage photovoltaïque. En effet, la réalisation de ces systèmes sont fiables et à bon rendement, qui constitue une solution pratique et rentable pour ce problème, où l'extension du réseau électrique conventionnel serait impossible et onéreux.

L'objectif de cette étude, portant sur la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque d'eau au fil du soleil sous l'environnement MATLAB /Simulink.

Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction, à savoir, les panneaux photovoltaïques, Le convertisseur DC /DC, le convertisseur DC/AC, le moteur synchrone à aimant permanent, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique. L'adaptation entre le générateur PV et le groupe motopompe a été effectué à l'aide de l'algorithme MPPT, qui est basé sur la méthode perturber et observer (P & O) afin d'extraire le maximum de puissance débité par le générateur photovoltaïque, jouant sur le rapport cyclique de convertisseur DC/DC.

Enfin, les résultats obtenus ont montré que le pompage d'eau à une hauteur voulue est imposé par le débit de la pompe fonctionnant dans les conditions normales.

Mots clés : PV, énergie photovoltaïque, MPPT, pompage d'eau, pompe centrifuge, MSAP.

Abstract :

First, the lack of water supply in rural and desert areas gives a major interest in integrating photovoltaic pumping systems. Indeed, the realization of these systems are reliable and efficient, which constitutes a practical and cost-effective solution to this problem, where the extension of the conventional power grid would be impossible and expensive.

The objective of this study, focusing on the modeling and simulation of a solar photovoltaic water pumping system under the MATLAB / Simulink environment.

This system consists of a set of interacting elements, namely, the photovoltaic panels, the DC / DC converter, the DC / AC converter, the permanent magnet synchronous motor, the centrifugal pump and the hydraulic circuit. The adaptation between the PV generator and the pump set was carried out using the MPPT algorithm, which is based on the disturb and observe (P&O) method in order to extract the maximum power delivered by the generator. photovoltaic, playing on the duty cycle of the DC / DC converter.

Finally, the results obtained showed that the pumping of water to a desired height is imposed by the flow rate of the pump operating under normal conditions.

Keywords: PV, photovoltaic energy, MPPT, water pumping, centrifugal pump, PMSM.