

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Sciences et Technologie



N° Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Spécialité : Électromécanique

Commande de moteur synchrone à aimant permanent par un système photovoltaïque pour application d'un pompage d'eau

Présenté par :

1/ Beldjaatit Chahinez

2/ Boudechiche Randa

Soutenu devant le jury :

Mme. M.BENENIA
M. N.GUERFI
M. B.Mehimmedetsi

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon Dieu, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Nous voulons exprimer notre gratitude à notre encadreur, **MS MEHIMMEDETSI BOUDJEMAA** pour avoir proposé et dirigé ce travail. Son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de cette recherche.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercions également tous enseignants du département d'électromécanique.

Enfin nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à qui me sont les plus chers

♣ *A mes chers parents, pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs amours, leurs soutiens et leurs encouragements.*

♣ *A mes chers frères « Amine, Yasser ».*

♣ *A mes chers sœurs, je leur souhaite tout le succès et de la réussite dans leurs études.*

♣ *A toute la famille et à tous mes amies, je vous souhaite le courage et le succès dans votre vie.*

♣ *Ainsi qu'à toutes les personnes que je connais de près ou de loin.*

Beldjaatit chahinez

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience. A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

- ♣ *Mes chers Parents.*
- ♣ *Mes Frères.*
- ♣ *Mes Sœur.*
- ♣ *Ma Famille et tous mes Proches.*
- ♣ *Et à tous qui me connaît et compte sur moi...*
- ♣ *Tous mes Amis(es)*

Boudechiche Randa

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Table des illustrations

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

Introduction générale

CHAPITRE I : LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

I.1. Introduction.....	3
I.2. Description d'une cellule photovoltaïque	4
I.2.1. L'effet photovoltaïque	5
I.2.2. Historique de système photovoltaïque	5
I.2.3. Rayonnements solaires.....	6
I.2.4. Spectre du rayonnement.....	8
I.2.5. Durée d'insolation.....	8
I.3. Description des éléments d'un système photovoltaïque	9
I.3.1. La cellule photovoltaïque.....	9
I.3.2. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.3.3. Les Technologies des cellules photovoltaïques	11
I.4. La mise en série et en parallèles des cellules photovoltaïques	11
I.4.1. Association des cellules PV en série.....	11
I.4.2. Association des cellules PV en parallèle	12
I.5. Module photovoltaïque	13
I.5.1. Caractéristiques d'un module	13
I.6. Le panneau solaire	14

I.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	15
I.7.1. Cas d'une cellule photovoltaïque idéale	15
I.7.2. Cas d'une cellule photovoltaïque réelle.....	16
I.7.3. Quelques paramètres d'une cellule photovoltaïque	18
I.8. Conclusion	20

CHAPITRE II : LE SYSTEME DE CONVERSION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.

II.1. Les convertisseurs.....	22
II.1.1. Type du convertisseur statique	22
II.1.1.1. Continu-alternatif (DC-DC) : Les Hacheurs	22
II.1.1.1.1. Le hacheur Buck :.....	23
II.1.1.1.2. Le hacheur boost :.....	26
II.1.1.2. Le convertisseur continu-alternatif (DC-AC) : Les Onduleurs	28
II.1.1.2.1. Principe de fonctionnement	29
II.1.1.2.2. Classification des onduleurs	29
II.1.1.2.3. Types d'onduleurs	30
II.1.1.2.4. Domaine d'application	30
II.1.1.2.5. Onduleur de tension triphasé	31
II.2. Conclusion :.....	36

CHPITRE III : MOTEUR SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT- POMPE CENTRIFUGE

III.1. Introduction	38
III.2. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)	38
III.2.1. Description de MSAP.....	38
III.2.1.1. Le stator.....	38
III.2.1.2. Le rotor.....	39

III.2.2. Structure des inducteurs des moteurs à aimant permanent	39
III.2.3. Les aimants permanents	41
III.2.3.1. Définition des aimants permanents	41
III.2.3.2. Les différents types des aimants permanents	41
III.2.4. Le principe de fonctionnement de moteur synchrone à aimant permanent :	41
III.2.5. Les avantages et les inconvénients de MSAP :	42
III.3. Domaines d'application de MSAP :	42
III.4. La modélisation de moteur synchrone à aimant permanent :	42
III.4.1. Mise en équations de MSAP dans le repère (abc).....	43
III.4.1.1. Equations électriques.....	43
III.4.1.2. Equations magnétiques.....	44
III.4.1.3. Equation mécanique	44
III.4.1.4. Mise en équation de moteur synchrone à aimant permanent en diphasé :	45
III.4.1.4.1. Le principe de la transformation de Park	45
III.5. Les pompes.....	48
III.5.1. Introduction :	48
III.5.2. Définition :	48
III.5.3. Différents types de pompe :	48
III.5.3.1. Pompe volumétrique	49
III.5.3.2. Pompe centrifuge.....	50
III.5.3.2.1. Définition	50
III.5.3.2.2. Constitution :	50
III.5.3.2.3. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge [30] :	51
III.5.3.2.4. La modélisation de la pompe centrifuge :	53
III.5.3.2.5. Les pertes de charge :	54
III.5.3.2.6. Caractéristiques d'une pompe centrifuge :	55
III.6. Conclusion :	60

Chapitre IV : Modélisation Du Système Complet Photovoltaïque-Moteur Pmsm-Pompe

IV.1. Introduction.....	62
IV.2. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque :	62
IV.3. Principe de la recherche du MPPT.....	64
IV.3.1. Les algorithmes du point de puissance maximale :.....	65
IV.3.1.1. La commande MPPT perturbe & observe.....	65
IV.4. Modélisation et simulation du système complet	67
IV.4.1. Résultats de simulation	68
IV.4.1.1. Discussion des résultats	71
IV.5. Conclusion :	71

Conclusion générale

Bibliographie

Résumé

Table des illustrations

Figure 1 . Principe d'une cellule solaire	3
Figure 2. La cellule solaire	5
Figure 3.Le rayonnement solaire	6
Figure 4. Spectre de rayonnement solaire.....	8
Figure 5. Présentation schématique d'une cellule solaire.....	9
Figure 6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	10
Figure 7.Schéma de trois cellules photovoltaïques associées en série.	11
Figure 8.Caractéristique P-V des cellules en série	12
Figure 9.Caractéristique I-V des cellules en série	12
Figure 10.Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.	12
Figure 11.Characteristique P-V des cellules en parallèles.....	13
Figure 12.Characteristique I-V des cellules en parallèles.....	13
Figure 13.Constitutions d'un champ et panneau	15
Figure 14.Schéma équivalent d'une cellule idéale	13
Figure 15.schéma équivalent d'une cellule réelle.....	16
Figure 16.le courant de court-circuit.....	19
Figure 17.Tension de circuit ouvert.	19
Figure 18.Les différents types de convertisseurs statiques.....	22
Figure 19.Schéma de principe du hacheur.....	23
Figure 20.Schéma électrique d'un hacheur buck	23
Figure 21.Chronogrammes de tension et de courant d'un hacheur Buck.....	24
Figure 22.Schéma électrique d'un hacheur buck fermé	25
Figure 23.Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.....	25
Figure 24.Schéma électrique d'un hacheur boost	26
Figure 25.Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.	27
Figure 26.Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	27

Figure 27.Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.....	28
Figure 28.schéma de principe de la conversion continu- Alternative (DC-AC).....	29
Figure 29.principe de fonctionnement d'un onduleur	29
Figure 30. Schéma d'un onduleur de tension connecté au PV	31
Figure 31. Structure d'un onduleur triphasé	31
Figure 32. Schéma synoptique de la ML	35
Figure 33 Moteur synchrone à aimant permanent.	38
Figure 34.le stator de MSAP.....	39
Figure 35.le rotor de MSAP.....	39
Figure 36.avec pièce polaire alimentation radiale (p=2)	40
Figure 37.avec pièce polaire, aimantation tangentielle (p=4).....	40
Figure 38.sans pièce polaire, Aimantation radiale (p=2).....	40
Figure 39.Sans pièce polaire, aimantation tangentielle (p=2)	40
Figure 40.Principe de fonctionnement de moteur synchrone à aimant permanent.....	41
Figure 41.Schéma de la MSAP dans le repère abc.	43
Figure 42.Différents couples qui agissent sur le rotor.	44
Figure 43.Représentation de la transformation de Park.....	45
Figure 44.Classification des pompes.	48
Figure 45.Pompe volumétrique alternative. [27]	49
Figure 46.Pompe volumétrique rotative. [27].....	49
Figure 47.pompe centrifuge.	50
Figure 48.Constitution d'une pompe centrifuge. [29]	51
Figure 49.types des roues.....	52
Figure 50.pompe centrifuge mono- étage.	53
Figure 51.pompe centrifuge multi-étage.....	53
Figure 52.dimension d'une roue.	56
Figure 53.Triangles des vitesses.	56

Figure 54.courbe Caractéristiques de la pompe H(Q) et de la canalisation.....	58
Figure 55.Courbe C (ω) d'une pompe centrifuge.....	59
Figure 56.Courbes caractéristiques.....	60
Figure 57. Figure : schéma synoptique d'un système de pompage photovoltaïque.	62
Figure 58.schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.....	64
Figure 59.Principe de P&O.....	65
Figure 60.Organigramme de la méthode perturbation et observation.	66
Figure 61.Bloc de simulation de la commande P&O.	66
Figure 62.schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simulink	67
Figure 63.La variation de vitesse de MSAP.	68
Figure 64.Les courants statoriques de moteur.	68
Figure 65.Les courant biphasé de moteur i_d, i_q	69
Figure 66.Le couple électromagnétique de moteur et de la pompe centrifuge.....	69
Figure 67.puissance de moteur.	70
Figure 68.puissance de la pompe centrifuge.....	70

Liste des tableaux

Tableau 1. Les différentes technologies d'une cellule photovoltaïque.....	11
Tableau 2. Les paramètres physiques et électriques de GPV	64

Liste des abréviations

PV : photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque.

DC=CC : courant continu.

AC=CA : courant alternatif.

MPP : point de fonctionnement optimal 'Maximum power point '.

MPPT : suiveur/algorithmes du point de fonctionnement optimal.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

MSAP : moteur synchrone à aimant permanent.

Pmsm : Permanent magnet synchronous motor.

P&O : Pertub & Observ.

Liste des symboles

G : L'éclairement absorbé par la cellule.

$G_{réf}$: L'éclairement de référence ($1000\text{W}/\text{m}^2$).

V_t : Tension thermique.

N : Facteur d'idéalité de la photopile.

K : La constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23}\text{J}/\text{K}$).

q : Charge de l'électron ($1,6.10^{-19}\text{C}$)

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Photo courant créer par la cellule.

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh}

I_{cc} : Courant de court circuit .

V_{co} : La Tension de circuit-ouvert

k_i : Coefficient de la température de court circuit.

T_{op} : Température de fonctionnement de la cellule PV [K°].

$T_{réf}$: Température de référence de la cellule PV [K°].

E_g : Énergie de gap.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

I_s : Courant de saturation inverse de la diode.

I_{sc} : Est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence et l'éclairement de référence.

V_{pv} : La tension de sortie.

V_d : La tension de la diode.

R_{se} : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur.

R_{sh} : Résistance shunt (parallèle).

FF : facteur de forme

η : Rendement.

V_{mpp} : Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

I_{mpp} : Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

Ω : La vitesse de rotation de moteur (rad/s).

P : Le nombre de paire de pole de moteur.

ω : La pulsation des courants statoriques (rad/s).

J : Moment d'inerte du moteur.

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur.

C_r : Couple résistant.

f : Coefficient de frottement.

Q_v : Le débit volumique de la pompe centrifuge.

H_m : La hauteur manométrique.

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

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s)

$K_0; K_1 ; K_2$: Des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

ρ : Masse volumique d'eau (Kg /m^3).

k_p : Coefficients de proportionnalité [$(Nm/rad.s^{-1})^2$]

C_s : Le couple statique.

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, l'énergie a toujours constitué un jeu vital pour l'humanité. Parmi ces énergies les énergies renouvelables constituent une source d'énergie inépuisable et fiable pour l'homme. Elles sont issues des phénomènes naturels réguliers ou constants provoqué par les astres, principalement le soleil, le vent (l'énergie éolienne) et la chaleur de terre.

L'énergie photovoltaïque PV est la plus dominante et l'une des plus exploitables. Elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans recours aux autres énergies fossiles

Afin de s'adapter au mieux à la variation de rayonnement et la température. La plupart des systèmes de contrôle utilisent des algorithmes de suivi du point de fonctionnement optimal (MPPT : maximum power point tracking) des panneaux photovoltaïques.

Au jour d'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie en plein essor. Le système photovoltaïque est une solution bien adaptée pour la production de l'électricité dans les régions éloignées désertiques.

Un système de pompage d'eau photovoltaïque est généralement alimenté par un système comprennent un générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques DC /DC, onduleur DC/AC et un groupe moteur-pompe. La connexion entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge de type alternatif reste encore un sujet d'étude.

Dans le cadre de ce mémoire, notre étude se porte sur la commande de moteur MSAP et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

Nous avons abordé dans ce mémoire cinq chapitres :

- Dans le premier chapitre : nous avons présenté un aperçu général sur le générateur photovoltaïque, ainsi que le modèle de la cellule photovoltaïque.
- Dans le deuxième chapitre : est une description générale des convertisseurs statiques (hacheur et l'onduleur), ainsi que leurs commandes.
- Dans le troisième chapitre : fera l'objet de l'étude théorique et mathématique de l'ensemble motopompe, on présentera d'une manière brève le moteur synchrone à aimant permanent (système biphasé) et la pompe centrifuge.
- Dans le dernier chapitre : nous allons voir la modélisation du système de pompage photovoltaïque et la discussion des résultats.

CHAPITRE I : LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée et aussi l'origine de toute forme d'énergie. Depuis long temps, l'homme cherche à mettre à profit cette énergie importante est diffusée sur l'ensemble de planète, il est arrivé à atteindre ce but par le moyen dit « cellule photovoltaïque ».

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. L'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839, le terme photovoltaïque est un phénomène physique qui signifie littérairement la « lumière électricité ».

Dans ce chapitre, nous décrivons la conception d'un système solaire photovoltaïque, une présentation simple de son principe de fonctionnement et les principales technologies. À la fin nous abordons la modélisation d'une cellule photovoltaïque.



Figure 1.Principe d'une cellule solaire.

Les avantages et inconvénients des systèmes PV :

✓ Les avantages :

Les systèmes PV présentent les avantages suivants :

- haute fiabilité.
- La pollution est nulle.
- Processus de fabrication avancée.
- pas de pièce en rotation, donc sans bruit.
- Energie indépendante et renouvelable.

- La nature modulaire des panneaux PV permet un montage simple et adaptable aux besoins énergétiques.

-La durée de vie des panneaux photovoltaïques est longue.

✓ **Les inconvénients :**

Les systèmes PV présentent les inconvénients suivants :

- Le rendement réel de conversion d'un module photovoltaïque est faible.

- Relatif à des conditions météorologiques.

- les installations domestiques nécessitent un système d'appoint (batteries).

- il existe encore de nombreux problèmes dans le stockage de l'énergie électrique.

- sur une installation photovoltaïque, Le coût d'investissement est élevé.

I.2. Description d'une cellule photovoltaïque

Le photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. Il utilise des matériaux qui absorbent les photons de lumière et libèrent des charges d'électrons. Il peut être utilisé pour faire des générateurs électriques. L'élément de base de ces générateurs est appelé cellule PV. [1]

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les Photopiles (cellules photovoltaïque) sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin, un semi-conducteur. Une des faces de la cellule est dopée n (par exemple du phosphore). L'autre est dopée p (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique.

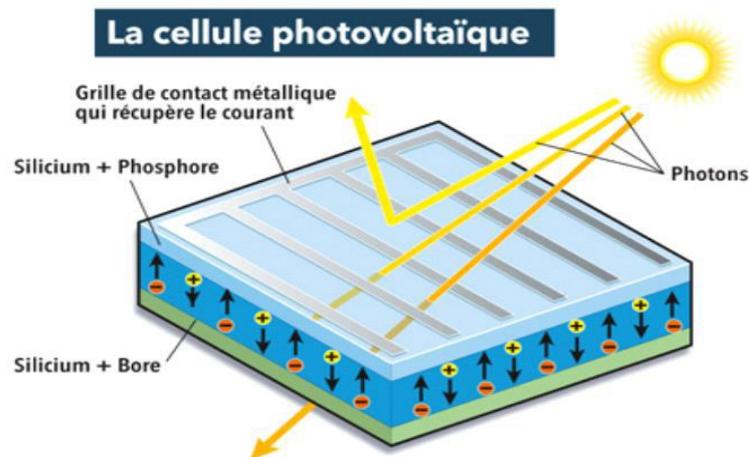


Figure 2. La cellule solaire

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion. Les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons.

I.2.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectriques. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire.

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (Excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet Photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires Photovoltaïques [2].

I.2.2. Historique de système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les premières applications ont débuté avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites.

Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : L'effet photovoltaïque découvert par le physicien français Edmond Becquerel.

1873 : Le physicien Willoughby Smith a découvert la photoconductivité du sélénium.

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

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

1958 : Les premiers satellites sont alimentés par des cellules solaires et sont envoyés dans l'espace.

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

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

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

I.2.3. Rayonnements solaires

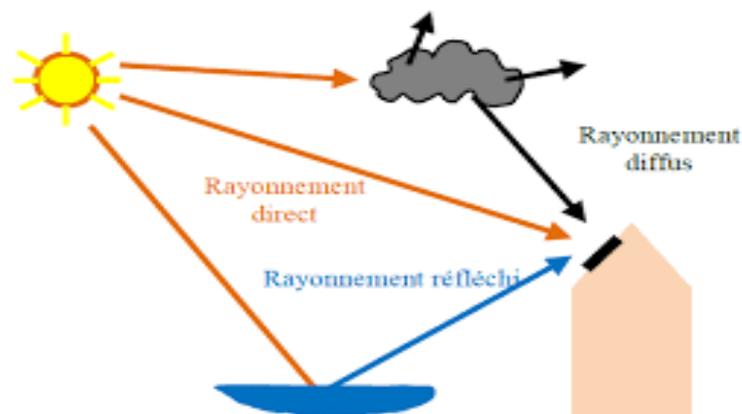


Figure 3. Le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire Hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes ; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [3].

Sa lumière à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780k [4] :

- Diamètre de soleil $D_s=1.39.10^9 m$
- Diamètre de la terre $D_t=1.27.10^7 m$
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts}=1.5.10^{11} m$

Le rayonnement solaire est la quantité d'énergie provenant du soleil sous forme des rayonnements électromagnétiques composés de grains de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière C. L'énergie E de chaque photon est directement liée à sa longueur d'onde λ par la relation(I.1) [5] :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où λ est la longueur d'onde, h est la constante de Planck, $h = 6.62 \times 10^{-34} J \cdot s$. et c est la vitesse de la lumière.

Il y a quatre types de rayonnement : [6]

- **Le rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

- **Le rayonnement diffus** est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

- **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

- **Le rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

I.2.4. Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de grains de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ . Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%

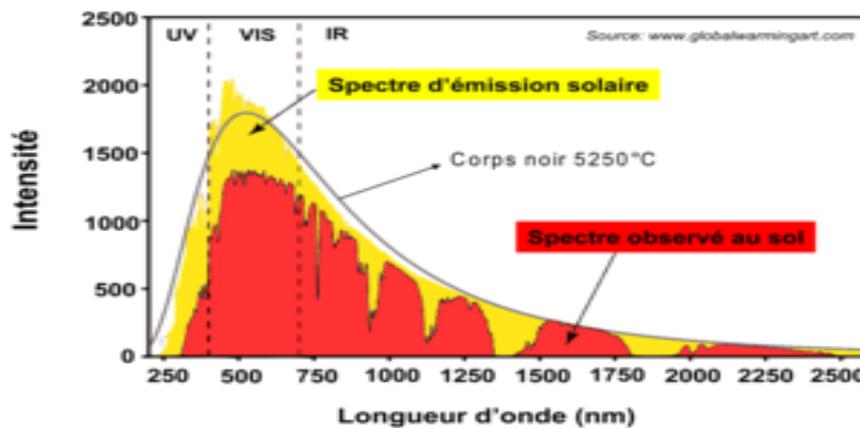


Figure 4. Spectre de rayonnement solaire

I.2.5. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

A défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour, c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle-même dépend de la période de l'année considérée. [7]

I.3. Description des éléments d'un système photovoltaïque

I.3.1. La cellule photovoltaïque

Une cellule PV qu'on appelle aussi photopile est assimilable à une diode photosensible et le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est réalisée à l'aide de matériaux semi-conducteur, c'est-à-dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne. [8]

Dans la figure (5) un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident.

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ($h\nu$) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap (E_g), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. [8]

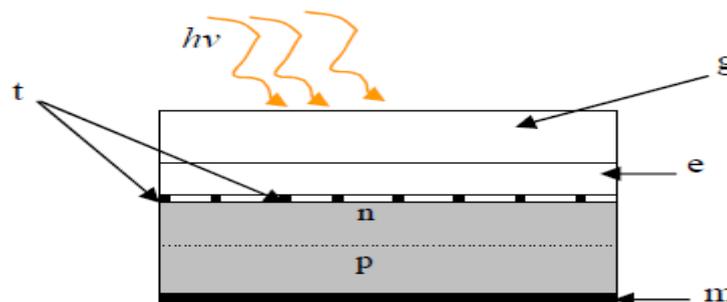


Figure 5. Présentation schématique d'une cellule solaire.

I.3.2. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. [9]

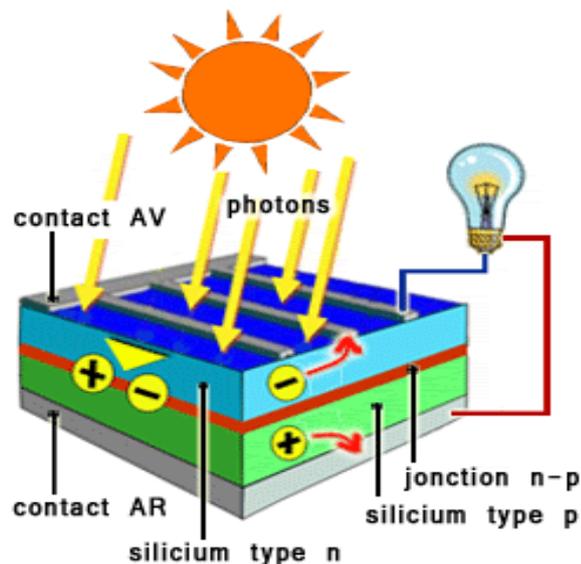


Figure 6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.3.3. Les Technologies des cellules photovoltaïques

Aujourd’hui, le silicium est l’un des éléments essentiels de la production des modules photovoltaïque dans le monde. Il est parfaitement homogène, sable et non toxique. D’après la nature et la fabrication de silicium, en distingue trois technologies principales

- *Cellules de Silicium monocristallin*
- *Cellules de silicium multicristallin*
- *Cellules de silicium amorphe*

Tableau 2. Les différentes technologies d’une cellule photovoltaïque

a-Si	p-Si	m-Si
		

I.4. La mise en série et en parallèles des cellules photovoltaïques

I.4.1. Association des cellules PV en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. Les figures (7) montrent les caractéristiques résultantes (I_{scc}, V_{sco}) obtenues en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}):

$$I_{scc} = I_{cc}$$

$$(I.2)$$

et

$$V_{sco} = N_s \times V_{co}$$

$$(I.3)$$

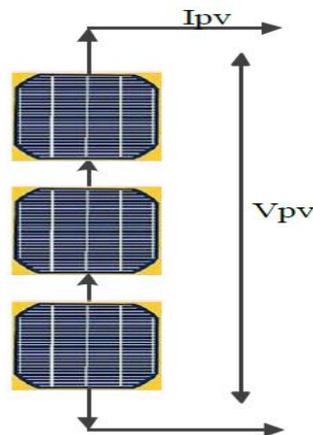


Figure 7. Schéma de trois cellules photovoltaïques associées en série.

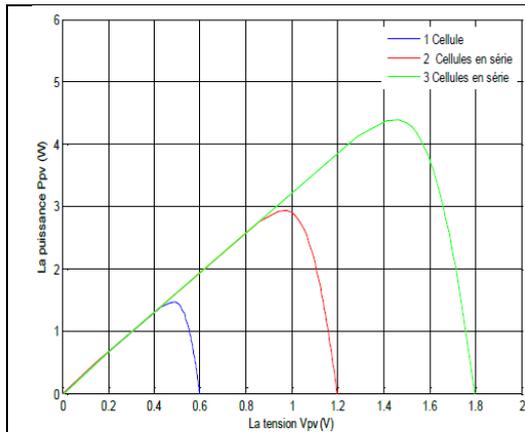


Figure 8. Caractéristique P-V des cellules en série

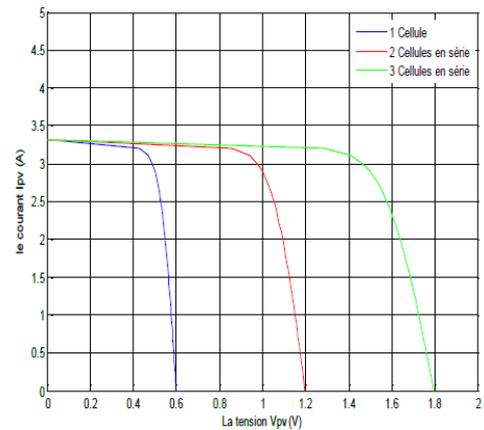


Figure 9. Caractéristique I-V des cellules en série

I.4.2. Association des cellules PV en parallèle

En additionnant des cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle dans la branche. Les figures (10) montrent les caractéristiques résultantes (I_{pcc}, V_{pco}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques :

$$I_{pcc} = N_p \times I_{cc} \quad (I.4)$$

et

$$V_{pco} = V_{co} \quad (I.5)$$

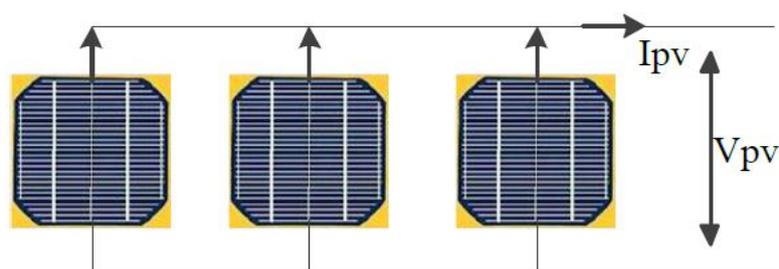


Figure 10. Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

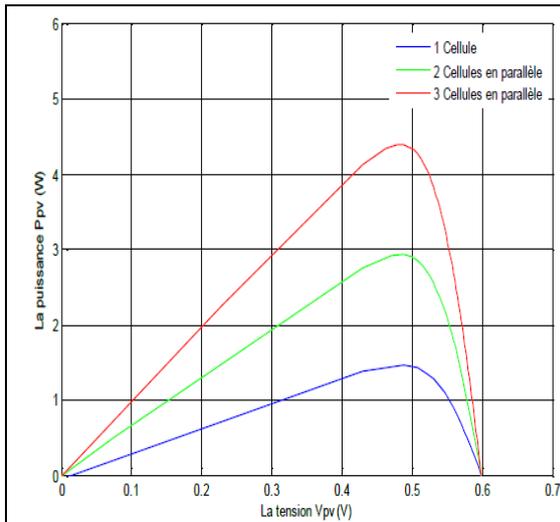


Figure 11. Caractéristique P-V des cellules en parallèles

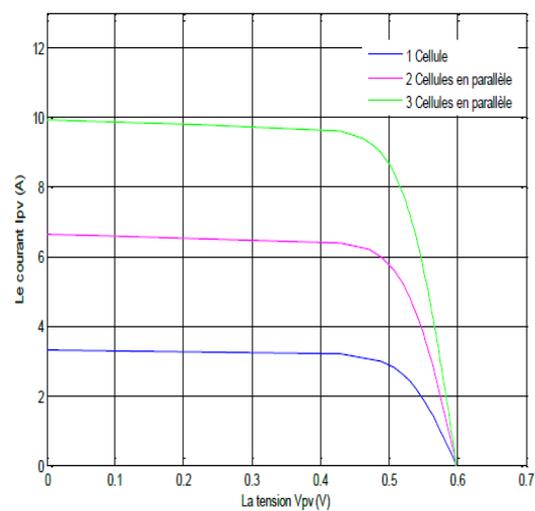


Figure 12. Caractéristique I-V des cellules en parallèles

I.5. Module photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque (ou panneau solaire photovoltaïque) est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les centrales solaires photovoltaïques.

Pour obtenir une puissance élevée, de nombreuses cellules sont connectées en série et en parallèle. Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série, la tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules [10], tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Elles sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique.

I.5.1. Caractéristiques d'un module

Les modules ont les caractéristiques suivantes :

♦ **La puissance de crête, P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).

♦ **La caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

♦ **Tension à vide, V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

♦ **Courant de court-circuit, I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

♦ **Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$

♦ **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

♦ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : V_{co}, I_{cc} .

I.6. Le panneau solaire

Le panneau solaire est constitué de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. En général, on distingue deux types de panneaux solaires, le panneau solaire thermique, qui convertit la lumière en chaleur, et le panneau solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité.

Un panneau photovoltaïque est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un champ Photovoltaïque.

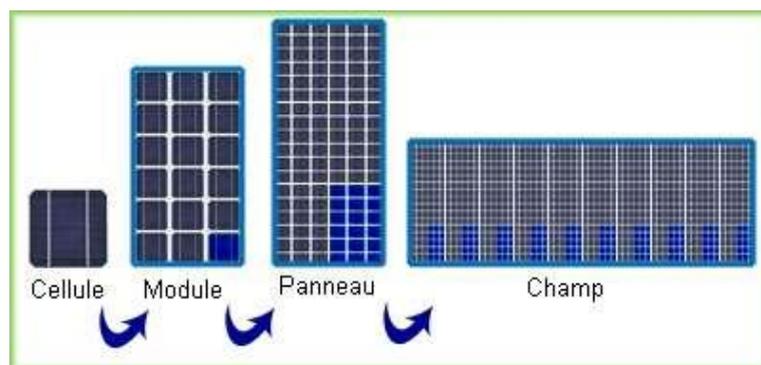


Figure 13. Constitutions d'un champ et panneau

I.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

I.7.1. Cas d'une cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de façon simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode selon la figure (14), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

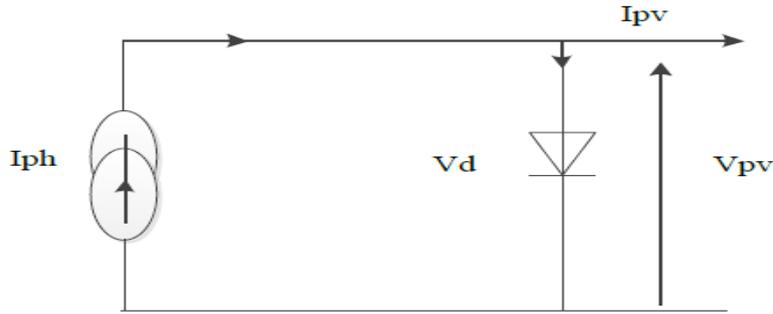


Figure 14. Schéma équivalent d'une cellule idéale

Les équations retenues de ce modèle sont

D'après la loi de nœuds :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (I.6)$$

Pour un générateur PV idéal :

$$V_d = V_{pv} \quad (I.7)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique est donnée par la relation

$$I_d = I_s(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (I.8)$$

$$V_t = \frac{N.K.T_{op}}{q} \quad (I.9)$$

Donc la relation devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (I.10)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_s avec $V_{pv}=0$, courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_s \frac{G}{G_{réf}} \quad (I.11)$$

Ou :

G : L'éclairement absorbé par la cellule.

G_{réf}: L'éclairement de référence (1000W/m²).

V_t : Tension thermique.

N : Facteur d'idéalité de la photopile.

K : La constante de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K).

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹ C).

I.7.2. Cas d'une cellule photovoltaïque réelle

Ainsi la caractéristique I-V du générateur PV est basé sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure (15). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle pour les phénomènes physique de polarisation, ainsi que des résistances série R_{se} et parallèle (shunt) R_{sh} pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

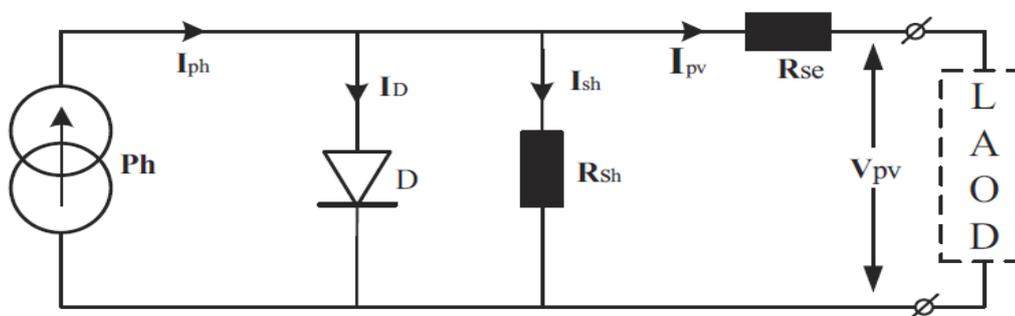


Figure 15. Schéma équivalent d'une cellule réelle.

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

- **La résistance série** : est la résistance interne de la cellule, elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

- **La résistance shunt** : est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.[11]

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.12)$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule.

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} .

$$I_{sh} = \frac{V_d + R_{se} \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.13)$$

Le photon- courant est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température. Son expression est la suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_i(T_{op} - T_{réf})] \cdot \frac{G}{G_{réf}} \quad (I.14)$$

Avec :

I_{cc} : Courant de court-circuit

k_i : Coefficient de la température de court-circuit.

T_{op} : Température de fonctionnement de la cellule PV [K°].

$T_{réf}$: Température de référence de la cellule PV [K°].

Pour un générateur PV réelle :

$$V_d = V_{pv} + I \cdot R_{se} \quad (I.15)$$

Donc :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + I \cdot R_{se}}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.16)$$

Le courant de saturation de la diode est donné par l'expression suivant :

$$I_s = I_{sc} \left(\frac{T_{op}}{T_{réf}} \right)^3 e^{\left[\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_{réf}} - \frac{1}{T_{op}} \right) \right]} \quad (I.17)$$

Si on remplace I_{ph} et I_{sh} par ses expressions l'équation total devient :

$$I_{pv} = [I_{cc} + k_i(T_{op} - T_{réf})] \cdot \frac{G}{G_{réf}} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + I \cdot R_{se}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_d + R_{se} \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.18)$$

Avec :

E_g : Énergie de gap.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

I_s : Courant de saturation inverse de la diode.

I_{sc} : Est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence et l'éclairement de référence.

V_{pv} : La tension de sortie.

V_d : La tension de la diode.

R_{se} : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur.

R_{sh} : Résistance shunt (parallèle).

I.7.3. Quelques paramètres d'une cellule photovoltaïque

➤ **Le courant de court-circuit (I_{cc}) :**

C'est la plus grande valeur de courant dans lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle :

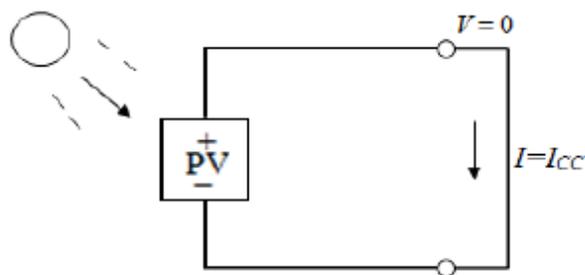


Figure 16. Le courant de court-circuit

➤ **La Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :**

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule **PV** est nul. Son expression est déduite de l'équation suivante:

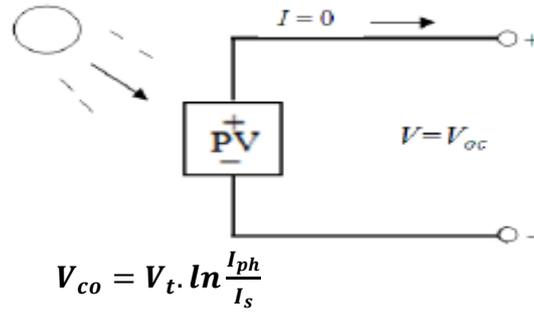


Figure 17.Tension de circuit ouvert.

- **La puissance de cellule photovoltaïque $P = I_{pv} \cdot V_{pv}$**

En remplaçant I par son expression, on peut écrire que:

$$P = V_{ph} \left[I_{cc} + k_i (T_{op} - T_{réf}) \right] \frac{G}{G_{réf}} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_{se}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_d + R_{se} I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.20)$$

- **Facteur de forme « FF » :**

On appelle facteur de forme **FF** (filling factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance (V_{opt}, I_{opt}) et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (V_{co}, I_{cc}). Ce facteur de puissance permet de déterminer la qualité de la cellule.

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{theo}} = \frac{V_{opt} I_{opt}}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.21)$$

- **Rendement « η » :**

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} et la puissance solaire incidente P_o . Son expression donnée par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_o} = \frac{V_{opt} I_{opt}}{E S} \quad (I.22)$$

Avec P_o qui est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles.

I.8. Conclusion

Durant le présent chapitre, nous avons donné une approche générale sur l'énergie photovoltaïque avec ces avantages et ces inconvénients. On a abordé la modélisation d'une cellule photovoltaïque, les caractéristiques du générateur PV avec sa performance et l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

CHAPITRE II : Le Système de conversion de l'énergie électrique

II.1. Les convertisseurs

Un convertisseur statique est un dispositif à base de semi-conducteur permettant à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue ou une tension alternative.

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de L'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc.

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

II.1.1. Type du convertisseur statique

Les différents réseaux électriques industriels alimentent de nombreux actionneurs. Cette énergie apparaît sous deux formes : alternative (tensions ou courants sinusoïdaux à valeur moyenne nulle) ou continue.

Suivant le type d'actionneur, il est nécessaire d'adapter la forme de l'énergie fournie par le réseau. Les différentes possibilités apparaissent à la Figure (18)

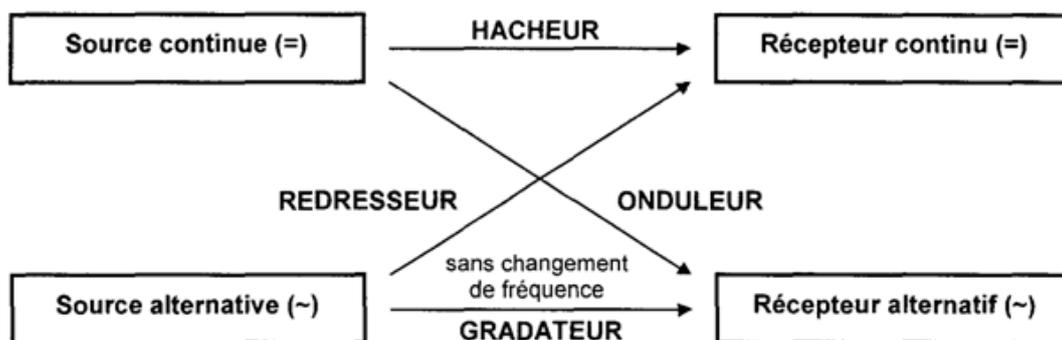


Figure 18. Les différents types de convertisseurs statiques

II.1.1.1. Continu-alternatif (DC-DC) : Les Hacheurs

Le hacheur ou convertisseur statique continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance permet de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension. Voir la figure (19)

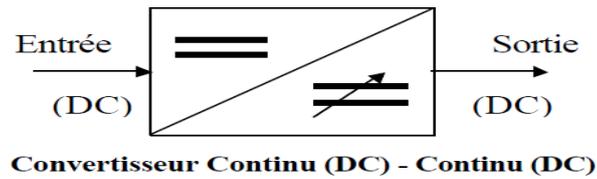


Figure 19. Schéma de principe du hacheur.

On distingue trois familles de convertisseurs statiques (hacheurs) :

- Hacheur abaisseur (série ou buck).
- Hacheur élévateur (parallèle ou boost).
- Hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

II.1.1.1. Le hacheur Buck :

Le hacheur série (Buck) est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur 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) [12]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

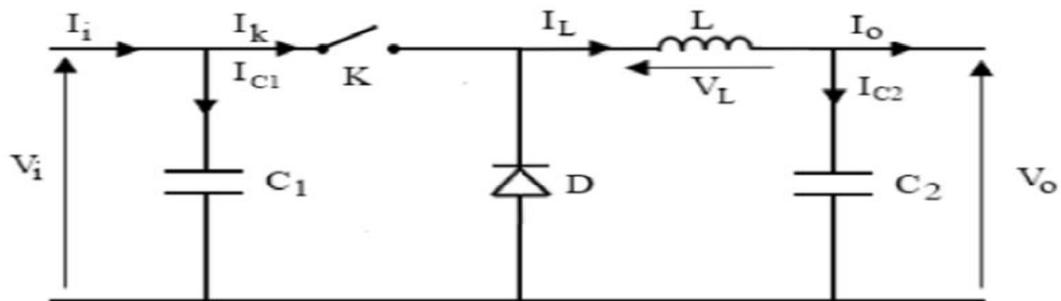


Figure 20. Schéma électrique d'un hacheur buck.

Les éléments **L** et **C** forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie.

→ On note α : le rapport cyclique des impulsions.

Le rapport cyclique est défini comme le temps T_{on} pendant lequel interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement de montage T , soit :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T}$$

a) Le fonctionnement

Le fonctionnement d'un hacheur Buck peut être divisé en deux configuration suivant l'état de l'interrupteur K :

➤ **Dans l'état passant :** l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i , L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f = \frac{1}{T}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance.

➤ **Dans l'état bloqué :** Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle.

Les chronogrammes sont tracés dans le cas d'une conduction continue (cas idéale) voire la figure (21), c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle :

$$V_0 = \alpha \times V_i \tag{II.1}$$

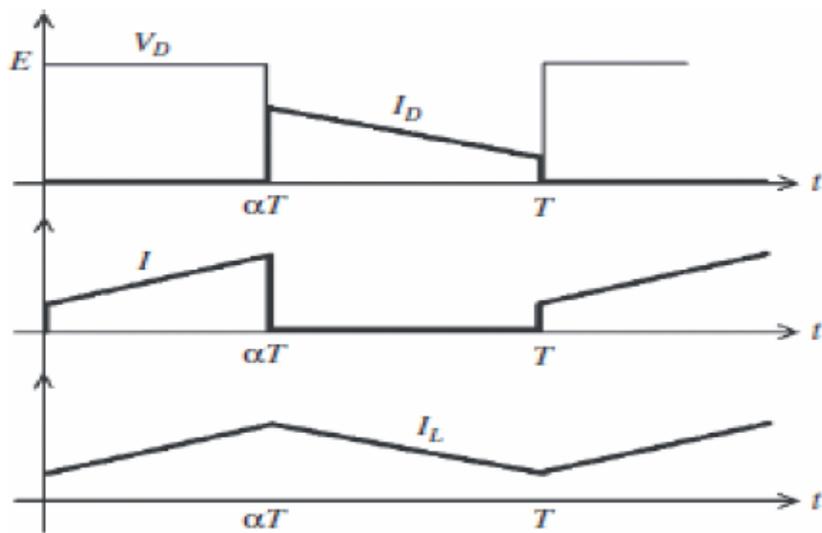


Figure 21.Chronogrammes de tension et de courant d'un hacheur Buck.

b) Modèle mathématique équivalent

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur puis de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (22) représente le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur:[13] dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (23) montre le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha)T$

À partir de la **loi de Kirchhoff** que nous avons appliqué sur le circuit ci-dessus, on retrouve les équations suivantes :

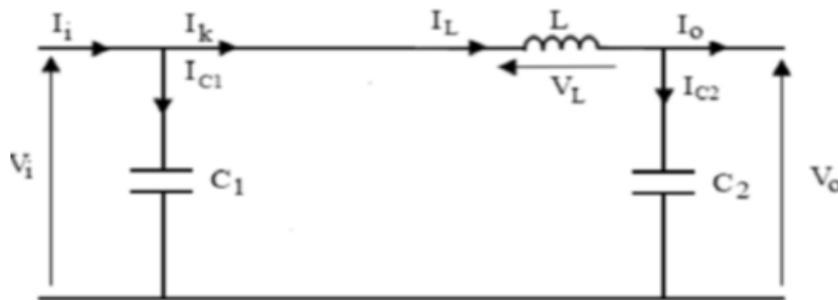


Figure 22. Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.2)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (II.3)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (II.4)$$

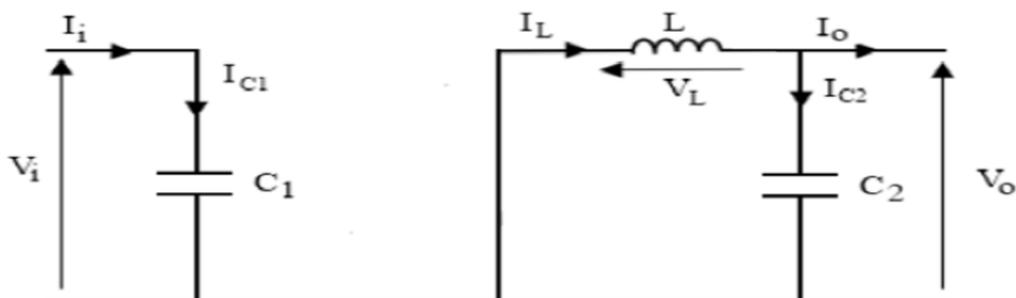


Figure 23. Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert

Les équations suivantes sont déduites de la figure (23) :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (\text{II.5})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (\text{II.6})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t) \quad (\text{II.7})$$

II.1.1.1.2. Le hacheur boost :

C'est un convertisseur DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). 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) [14]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

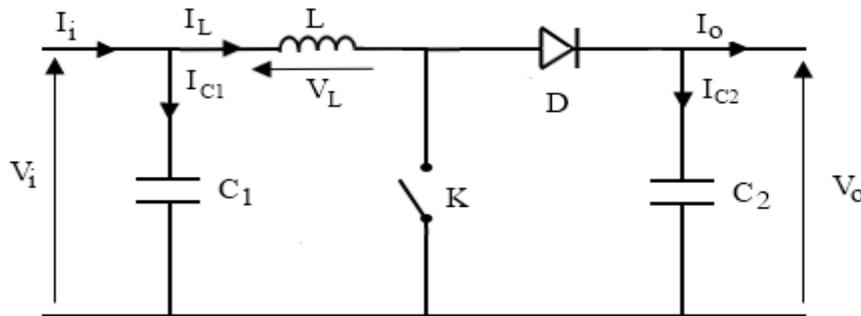


Figure 24.Schéma électrique d'un hacheur boost

a) Fonctionnement :

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

L'état passant : Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement et la tension aux bornes de K est nulle. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

L'état bloqué : Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$, L'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a $V_k = V_o$ alors En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_o(1 - \alpha) = V_i \quad (\text{II.8})$$

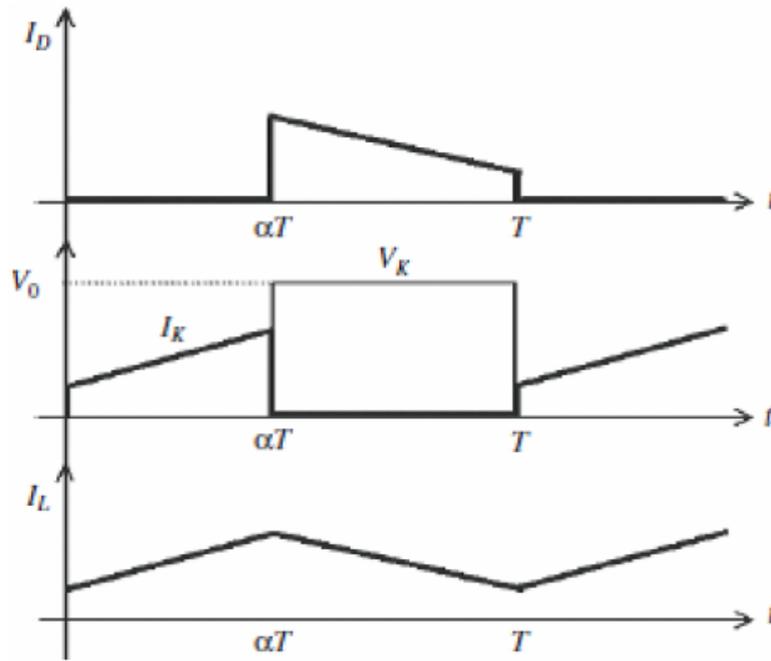


Figure 25. Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (26), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d entre $[0, \alpha T]$. [15]

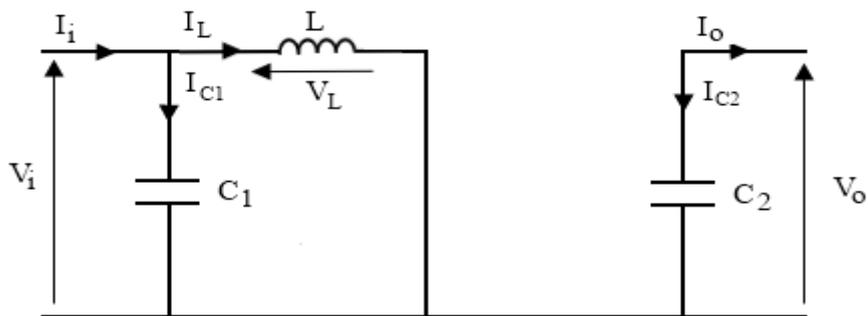


Figure 26. Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.9})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II.10})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.11})$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

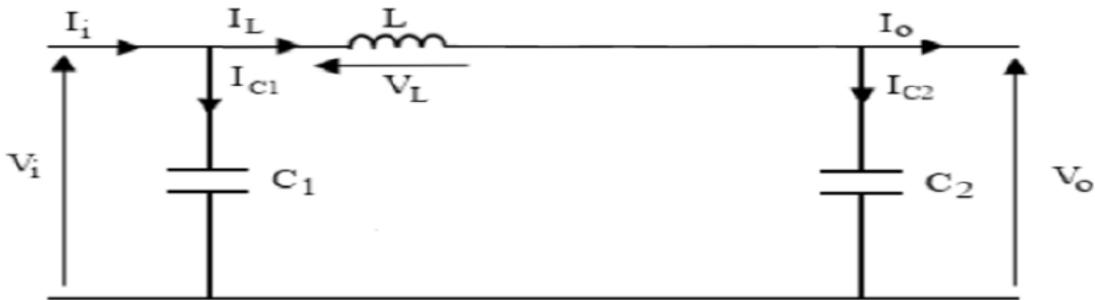


Figure 27. Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.12})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (\text{II.13})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.14})$$

II.1.1.2. Le convertisseur continu-alternatif (DC-AC) : Les Onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source de tension ou de courant continue en une tension ou courant alternative, Il s'agit d'un dispositif électronique qui accomplit la fonction inverse du redresseur (Figure (28)).

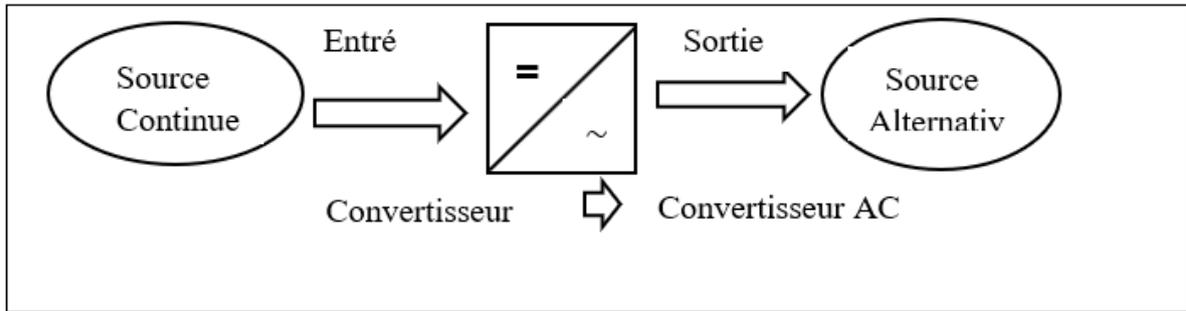


Figure 28. Schéma de principe de la conversion continu- Alternative (DC-AC)

II.1.1.2.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la Figure (29).

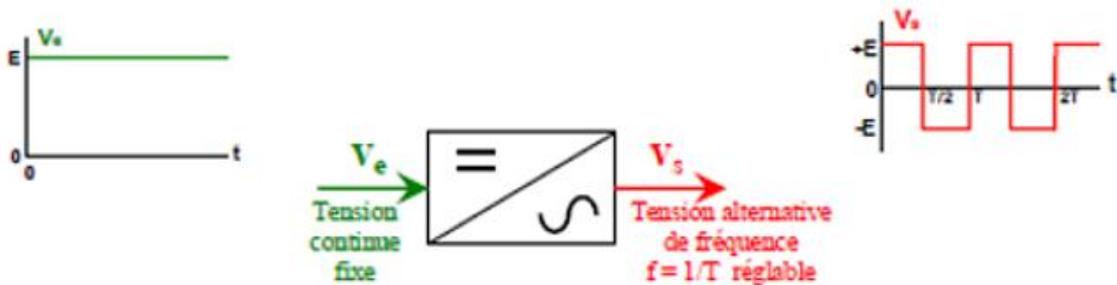


Figure 29. Principe de fonctionnement d'un onduleur

II.1.1.2.2. Classification des onduleurs

En général les onduleurs sont classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs. Nous distinguons deux grandes catégories d'onduleurs : les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes.

• Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La Charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner. [16]

- **Onduleurs non autonomes**

Un onduleur non autonome ou assisté est un montage redresseur tous thyristors, à fréquence fixe. Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est naturelle contrairement à l'onduleur autonome. [17]

II.1.1.2.3. Types d'onduleurs

➤ **Coté commande** : il existe trois types :

- Onduleur à commande pleine d'onde (commande symétrique).
- Onduleur à commande décalée.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI.

➤ **Coté puissance** : il existe aussi trois types

- L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée (appelé Onduleur en demi-pont)
- L'Onduleur avec transformateur de sortie à point milieu.(appelé Onduleur push-pull).
- Onduleur en pont complet.

II.1.1.2.4. Domaine d'application

Les onduleurs ont été conçus essentiellement pour fonctionner dans 2 domaines d'application

- La variation de vitesse : la façon la plus efficace de régler la vitesse des machines (MAS) et d'agir sur la fréquence de leur tension d'alimentation. Pour répondre à ce besoin, on conçoit donc un redresseur triphasé qui fournit une tension continue et on place un onduleur à la suite qui crée le réseau de tension triphasé sinusoïdal à une l'amplitude et à la fréquence permettant le fonctionnement désiré. [18]

- Les alimentations sans interruption (ASI) : Certaines applications sensibles (hôpitaux, serveurs informatiques...) ne peuvent supporter la moindre panne d'alimentation. Pour réaliser une alimentation sécurisée, on a la même structure que précédemment avec des batteries sur le bus continu, ce qui permet de continuer à fournir de l'énergie et donc une tension sinusoïdale le temps qu'un groupe électrogène prenne le relais. (Rq: onduleurs plus souvent en monophasé)

II.1.1.2.5. Onduleur de tension triphasé

L'alimentation d'un moteur électrique triphasé avec un générateur photovoltaïque nécessite l'utilisation d'un convertisseur qui transforme la tension continue produite par le générateur en un système d'alimentation triphasé alternative d'amplitude et de fréquence réglables ; ceci peut être réalisable par un onduleur de tension. [19]

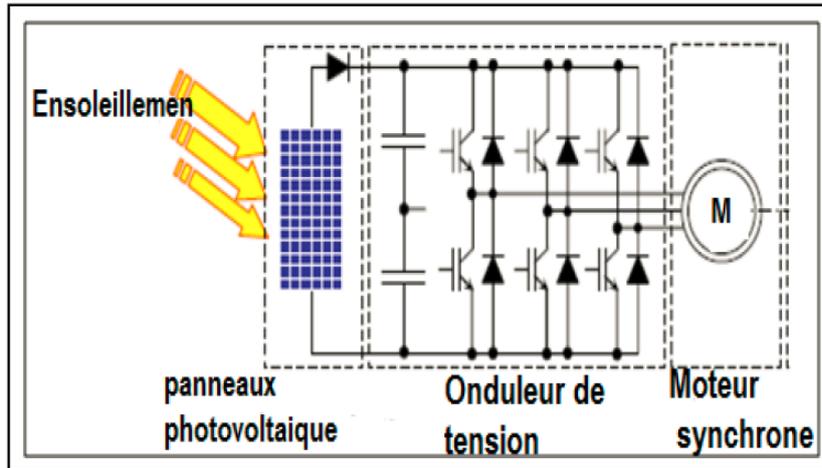


Figure 30. Schéma d'un onduleur de tension connecté au PV

La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif i_1, i_2, i_3 , les interrupteurs T_1, T'_1 et T_2, T'_2, T_3 et T'_3 doivent être complémentaires deux à deux. [20]

On définit $T_i = (K_i, D_i)$

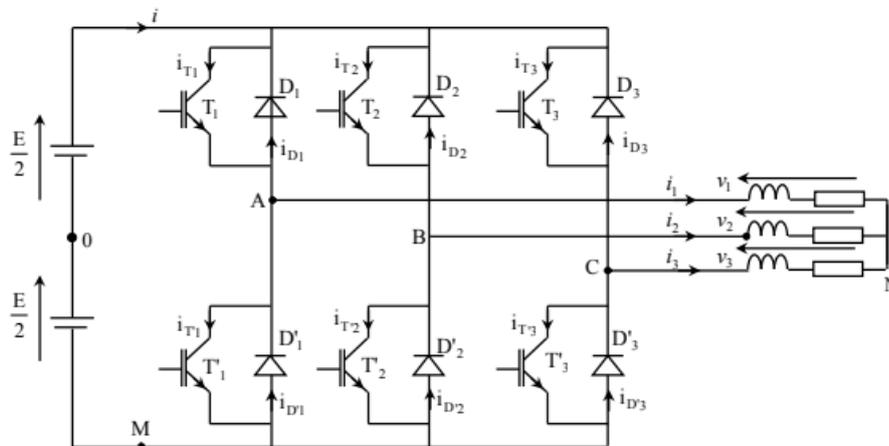


Figure 31. Structure d'un onduleur triphasé.

a) Principe de fonctionnement

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la (figure I.3) Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif i_1 , i_2 et i_3 , les interrupteur T_1 et T'_1 , T_2 et T'_2 , T_3 et T'_3 doivent être complémentaire deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_1 , V_2 et V_3 soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental prés, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le précédent.

En commande pleine onde on ferme donc :

T_1 pour $\omega t = 0$ et T'_1 pour $\omega t = \pi$.

T_2 pour $\omega t = 2\pi/3$ et T'_2 pour $\omega t = \pi + 2\pi/3$.

T_3 pour $\omega t = 4\pi/3$ et T'_3 pour $\omega t = \pi + 4\pi/3$.

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « 0 » du la source, Donc supprimer celui- ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit [21].

b) Modèle de commande de l'onduleur de tension triphasé :

Les interrupteurs les interrupteur T_1 et T'_1 , T_2 et T'_2 , T_3 et T'_3 doivent être complémentaires deux à deux, quel que soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI ; quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu (fictif) O de la source de tension.

$$V_1 - V_O = \frac{E}{2} \Rightarrow T_1 \text{ fermé} \quad \text{Et} \quad V_1 - V_O = -\frac{E}{2} \Rightarrow T_1 \text{ ouverte.} \quad (\text{II.15})$$

$$V_2 - V_O = \frac{E}{2} \Rightarrow T_2 \text{ fermé} \quad \text{Et} \quad V_2 - V_O = -\frac{E}{2} \Rightarrow T_2 \text{ ouverte.} \quad (\text{II.16})$$

$$V_3 - V_O = \frac{E}{2} \Rightarrow T_3 \text{ fermé} \quad \text{Et} \quad V_3 - V_O = -\frac{E}{2} \Rightarrow T_3 \text{ ouverte.} \quad (\text{II.17})$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions.

$$V_1 - V_2 = (V_1 - V_0) - (V_2 - V_0) = E \text{ Si } K_1 \text{ fermé et } K_2 \text{ ouverte.} \quad (\text{II.18})$$

$$V_1 - V_2 = (V_1 - V_0) - (V_2 - V_0) = 0 \text{ Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermé.} \quad (\text{II.19})$$

$$V_1 - V_2 = (V_1 - V_0) - (V_2 - V_0) = -E \text{ Si } K_1 \text{ ouverte et } K_2 \text{ fermé.} \quad (\text{II.20})$$

$$V_1 - V_2 = (V_1 - V_0) - (V_2 - V_0) = 0 \text{ Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermé.} \quad (\text{II.21})$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_A , V_B , V_C à la sortie de l'onduleur. Pour que, quelle que soit leurs formes d'ondes, les trois courants I_A , I_B , I_C aient une somme nulle, il faut que leurs trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques.

Si le récepteur est équilibré, si trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produits impédances 'Z' - courants, c'est-à-dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que les systèmes harmoniques successifs, en ajoutant toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions. [22]

❖ **Pour un système équilibré**

On a:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (\text{II.22})$$

$$v_1 + v_2 + v_3 = 0 \quad (\text{II.23})$$

Donc on peut écrire :

$$\frac{1}{3}(V_A - V_B) - \frac{1}{3}(V_C - V_A) = \frac{2}{3}V_A - \frac{1}{3}V_B - \frac{1}{3}V_C = V_A - \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \quad (\text{II.24})$$

Et

$$V_A = \frac{1}{3}(V_A - V_B) - \frac{1}{3}(V_C - V_A) \quad (\text{II.25})$$

$$V_B = \frac{1}{3}(V_B - V_C) - \frac{1}{3}(V_A - V_B) \quad (\text{II.26})$$

$$V_C = \frac{1}{3}(V_C - V_A) - \frac{1}{3}(V_B - V_C) \quad (\text{II.27})$$

On obtient finalement :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_A = \frac{1}{3} [2(V_A - V_O) - (V_B - V_O) - (V_C - V_O)] \quad (\text{II.28}) \\ V_B = \frac{1}{3} [-(V_A - V_O) + 2(V_B - V_O) - (V_C - V_O)] \quad (\text{II.29}) \\ V_C = \frac{1}{3} [-(V_A - V_O) - (V_B - V_O) + 2(V_C - V_O)] \quad (\text{II.30}) \end{array} \right.$$

Si V_{AO} , V_{BO} et V_{CO} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeur continues).

Alors V_A , V_B et V_C sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeurs alternatives), par conséquent l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice $[T]$ assurant le passage continu -alternatif (DC-AC).

On aura alors :

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{DC}] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$[V_{AC}] = [V_A \ V_B \ V_C]^T : \text{Tension alternatif équilibrée} \quad (\text{II.32})$$

$$[V_{DC}] = [V_{AO} \ V_{BO} \ V_{CO}]^T : \text{Tension continue.} \quad (\text{II.33})$$

$$S_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \text{ ou (exclusif) } i = 1, 2, 3 \text{ (commutation supposées idéales)} \quad (\text{II.34})$$

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Ainsi l'onduleur est modélisé par cette matrice de transfert $[T]$.

c) Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion est un signal numérique consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer.

c.1) Principe de la modulation de largeur d'impulsion :

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueilli à la sortie de l'onduleur, figure (32)

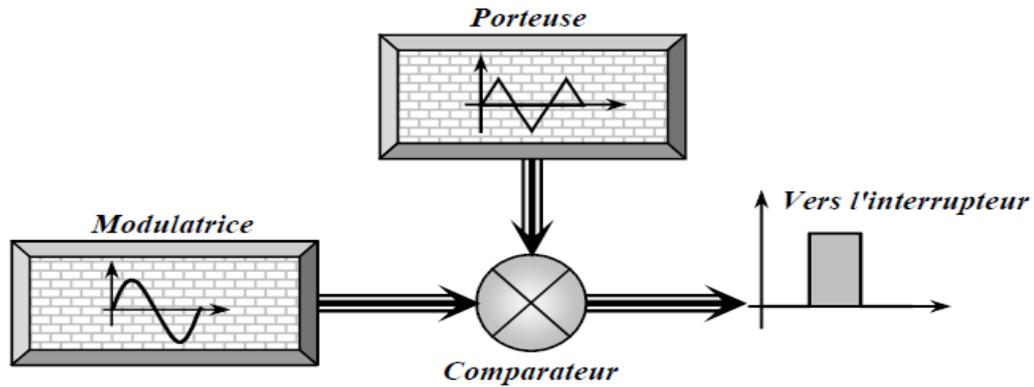


Figure 32. Schéma synoptique de la MLI

c.2) Caractéristiques de la MLI

La technique de la MLI se caractérise par les grandeurs suivantes :

- **La fréquence de la modulation :** f_p

- **Le coefficient de réglage :** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse : $r = \frac{A_r}{A_p}$ (II.36)

- **L'indice de modulation :** Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (II.37)$$

II.2. Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié les convertisseurs statiques (le hacheur et l'onduleur) avec ses différents types et caractéristiques, après nous avons présenté la commande MLI a le but d'obtenir l'allure sinusoïdale au niveau de la sortie de l'onduleur.

CHAPITRE III :
Moteur synchrone à
aimant permanent-
pompe centrifuge

III.1. Introduction

Aujourd'hui, les machines à courant alternatif remplacent de plus en plus les machines à courant continu dans de nombreux domaines.

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements à vitesse variable, le moteur synchrone à aimants permanents reste un bon choix pour la commande des mécanismes industriels. Son utilisation devient attractive et concurrente de celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents qu'ils soient à base d'alliage ou à terre rare.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent.

III.2. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Le moteur synchrone est un dispositif électromécanique, son rotor tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator, c'est-à-dire à la même vitesse que ce champ.

Cette vitesse est donc liée à la fréquence de la source et comme cette fréquence est constante, la vitesse du moteur est uniquement constante. Elle ne varie ni avec la charge, ni avec la tension de la source.



Figure 33. Moteur synchrone à aimant permanent.

III.2.1. Description de MSAP

Le moteur se compose d'une partie mobile (rotor) et d'une partie fixe (stator), la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer :

III.2.1.1. Le stator

Ou l'induit est la partie fixe de moteur, il se compose de trois enroulements décalés l'un par rapport à l'autre de 120° dans l'espace et dans le temps et qui permettent le passage du courant et la création du champ magnétique statorique tournant le long de l'entrefer.

Le fonctionnement de stator est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles du moteur et à la pulsation des courants statoriques soit [23] :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\Omega \text{ en rad/s}) \quad (\text{III.1})$$

III.2.1.2. Le rotor

Où l'inducteur est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation, il se compose d'aimants permanents qui servent à générer une excitation permanente.

Il existe deux types de rotor :

- Rotor avec pièces polaires.
- Rotor sans pièces polaires.



Figure 34. le stator de MSAP

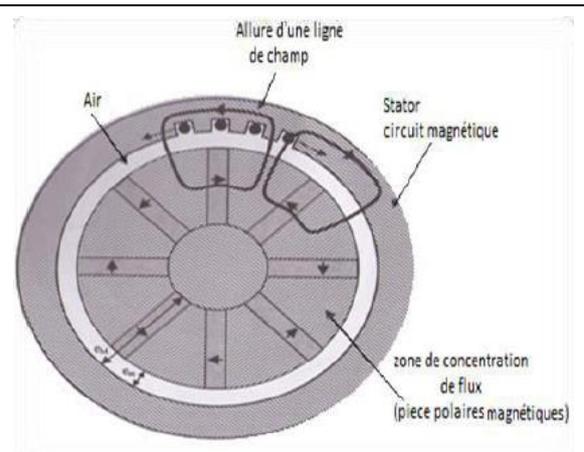
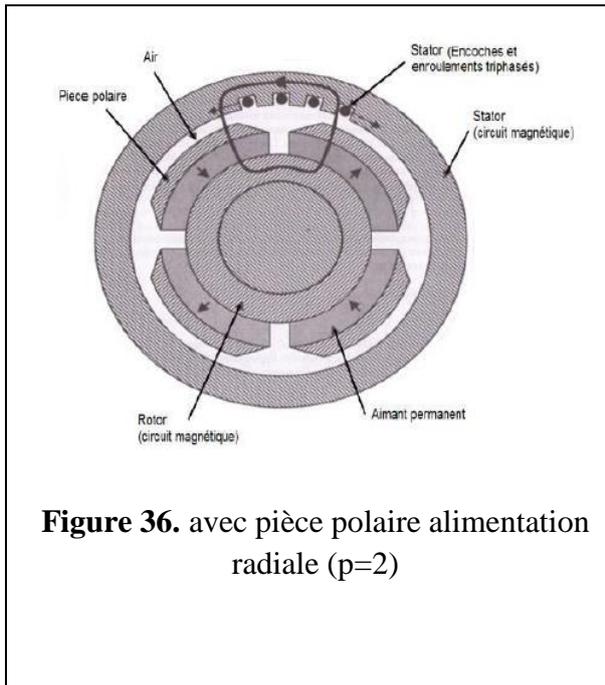


Figure 35. le rotor de MSAP

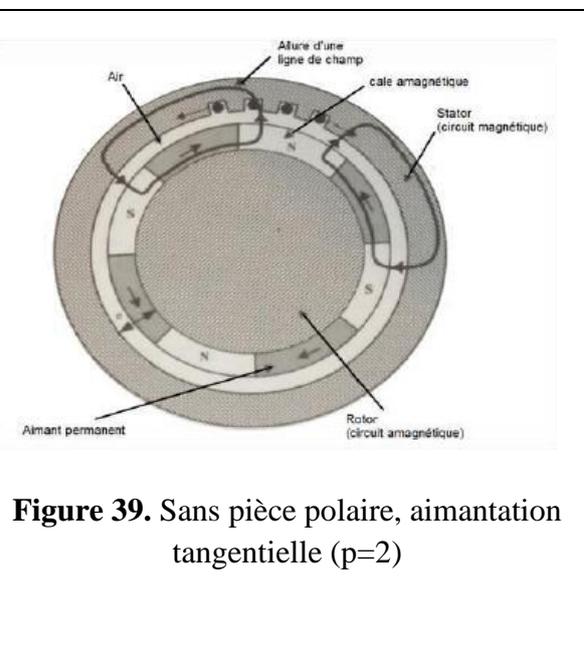
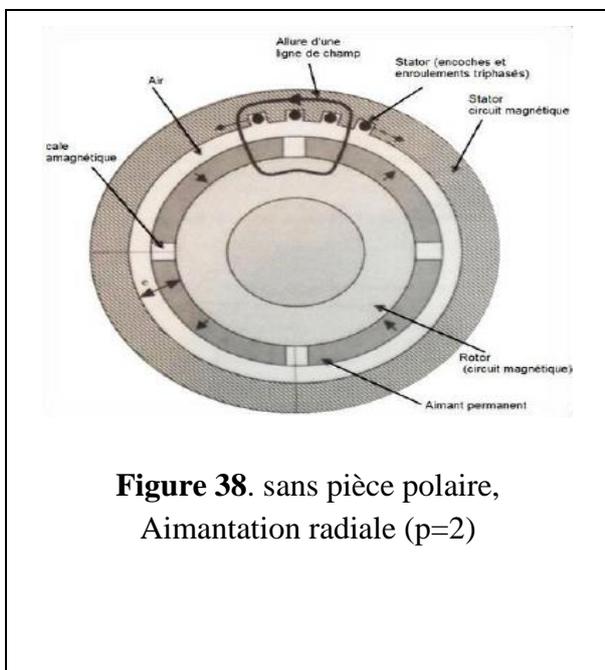
III.2.2. Structure des inducteurs des moteurs à aimant permanent

➤ **Rotor avec pièces polaires** : l'aimantation soit radiale figure (36) soit tangentielle figure (37) .Dans ce type de moteur, l'inducteur est à pôles saillants.

CHAPITRE III : Moteur synchrone à aimant permanent-pompe centrifuge



➤ **Rotor sans pièces polaires :** l'entrefer est constant, dans lequel les aimants sont orientés soit perpendiculairement à l'entrefer (aimantation radial) figure (38), soit parallèlement (aimantation tangentielle) figure (39).



III.2.3. Les aimants permanents

III.2.3.1. Définition des aimants permanents

Un aimant permanent est une substance magnétique qui a une bonne propriété de résistance à l'élimination de l'aimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas nécessairement en présence d'un champ magnétique extérieure.

III.2.3.2. Les différents types des aimants permanents

On distingue trois types :

- **Les alnico** : sont des alliages à base de fer, d'aluminium et de nickel, avec des additions de cobalt, cuivre ou de titane.
- **Les ferrites** : sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium.
- **Les terres rares** : telles que les Samarium-Cobalt sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (Jusqu'à 300°C), mais ils sont très coûteux.

III.2.4. Le principe de fonctionnement de moteur synchrone à aimant permanent :

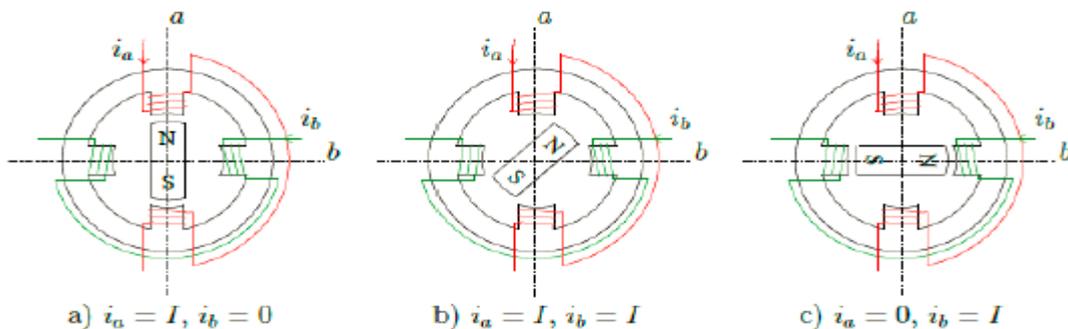


Figure 40. Principe de fonctionnement de moteur synchrone à aimant permanent.

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont

Alimentées par un réseau triphasé. Le champ créé par les enroulements oriente le rotor qui est constitué par des aimants. La Figure (40) représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator comportant une paire de pôles. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un pas élémentaire θ comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure $\theta = 90^\circ$. Ceci correspond au passage de la Figure (40.a) à la Figure (40.c). Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (Figure (40.b)). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure. [24]

III.2.5. Les avantages et les inconvénients de MSAP :

A : Les avantages :

- Le rotor est un aimant permanent, donc l'absence des pertes joules au niveau de rotor.
- Un bon rendement, et une faible inertie de rotor.
- La possibilité de fonctionnement à très haute vitesse.
- Une grande fiabilité.
- La simplicité de construction et de maintenance à cause d'absence des collecteurs et des balais.
- La puissance massique est importante.

B : Les inconvénients :

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Le flux d'inducteur est difficile à régler.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de moteur.
- Ondulations de couple.
- Interaction magnétique due au changement de structure.

III.3. Domaines d'application de MSAP :

Le moteur Synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs mégawatts (systèmes de Propulsion des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la Synchronisation d'entraînement à vitesse variable, et la traction.

- Il fonctionne comme compensateur Synchrone.
- Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, Tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges.
- L'existence de champ magnétique en l'absence de courant est mise à profit pour la Réalisation des capteurs, par exemple des capteurs de proximité. [25]

III.4. La modélisation de moteur synchrone à aimant permanent :

La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP est nécessaire pour l'étude de sa commande dans les différents régimes de fonctionnements transitoire et permanent.

III.4.1. Mise en équations de MSAP dans le repère (abc)

La figure (41) donne la représentation des enroulements pour un moteur synchrone triphasée à aimant permanent.

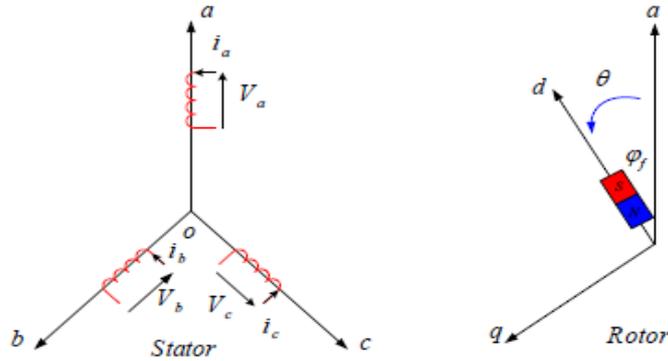


Figure 41. Schéma de la MSAP dans le repère abc.

Le comportement de la machine est entièrement défini par trois types d'équations comme suit:

- ❖ Equations électriques.
- ❖ Equations magnétique.
- ❖ Equations mécaniques.

III.4.1.1. Equations électriques

Les équations électriques de moteur synchrone à aimant permanent triphasée s'écrivent :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \tag{III.2}$$

Avec :

Vecteur de tensions statoriques :

$$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T \tag{III.3}$$

Vecteur de courants statoriques :(III.3)

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T \tag{III.4}$$

Vecteur de flux statoriques :

$$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T \tag{III.5}$$

Matrice résistance de stator :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

III.4.1.2. Equations magnétiques

$$[\varphi_s] = [L_s][i_s] + [\varphi_{f abc}] \quad (\text{III.7})$$

$$[\varphi_s] = \varphi_{f abc} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Ou :

Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statorique :

$$[\varphi_{f abc}] = [\varphi_{fa} \varphi_{fb} \varphi_{fc}]^T \quad (\text{III.9})$$

Matrice inductance du stator :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

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

$$\theta = \int_0^t \omega d(\tau) \quad (\text{III.11})$$

ω : La pulsation électrique des courants statoriques (rad/s).

III.4.1.3. Equation mécanique

L'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de moteur :

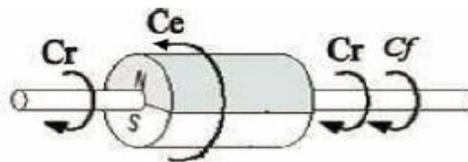


Figure 42. Différents couples qui agissent sur le rotor.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{III.12})$$

Avec :

J : Moment d'inerte du moteur.

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur.

C_r : Couple résistant.

f : Coefficient de frottement.

III.4.1.4. Mise en équation de moteur synchrone à aimant permanent en diphasé :

III.4.1.4.1. Le principe de la transformation de Park

Le modèle synchrone dans le référentiel (a, b, c) étant fort complexe, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables, le but des transformations matricielles est de le simplifier pour réduire l'ordre de système.

La transformation de **Park** est un outil mathématique consiste à transformé le système triphasé (a, b, c) en un système biphasé (d,q). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor, l'aimant se situe sur l'axe d. [26]

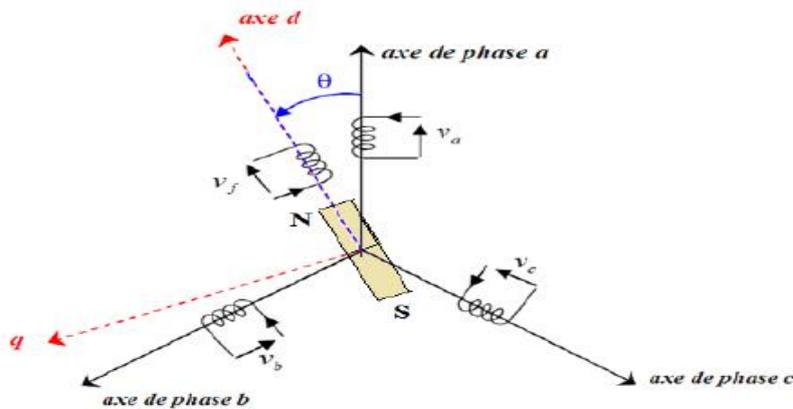


Figure 43. Représentation de la transformation de Park.

a) Passage direct : du triphasé au biphasé :

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

$$[X_{dq0}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}]^T \quad (\text{III.13})$$

Avec :

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

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

X : représente soit le courant soit la tension soit le flux.

$$[V_{dq0}] = P(\theta) \cdot [V_{abc}]^T \quad (\text{III.15})$$

$$[i_{dq0}] = P(\theta) \cdot [i_{abc}]^T \quad (\text{III.16})$$

$$[\varphi_{dq0}] = P(\theta) \cdot [\varphi_{abc}]^T \quad (\text{III.17})$$

b) Passage inverse : du biphasé au triphasé

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

$$[X_{abc}] = P(\theta)^{-1} [X_{dq0}] \quad (\text{III.18})$$

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

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

A l'aide des équations précédentes on obtient les équations statoriques de moteur exprimées dans le référentiel de **Park** lié au rotor :

$$\begin{cases} V_d = R_s + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \cdot \varphi_q \\ V_q = R_s + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \cdot \varphi_d \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Ou : $\frac{d\theta}{dt} = \omega$

Les flux peuvent être formulés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

L_d Et L_q Inductances d'axes directe et en quadrature :

➤ Le modèle de la MSAP peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_d = R_s + \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ V_q = R_s + \frac{di_q}{dt} + \omega \cdot (L_d \cdot i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Expression de la puissance et du couple électromagnétique :

La puissance électrique absorbée par le moteur est exprimée par :

$$P(t) = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (\text{III.23})$$

Dans le référentiel de **Park**, la puissance électrique s'écrit comme suit :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q) \quad (\text{III.24})$$

La connaissance du couple électromagnétique C_{em} de moteur est essentielle pour l'étude de moteur et sa commande, sachant que :

$$P(t) = C_{em} \cdot \omega \Rightarrow C_{em} = \frac{3}{2} P [i_q \cdot \varphi_d + i_d \cdot \varphi_q] \quad (\text{III.25})$$

On peut l'écrire en fonction des inductances L_d et L_q directe et en quadrature comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_q \cdot i_d + \varphi_f \cdot i_q] \quad (\text{III.26})$$

p : nombre de pair de pôles.

Pour une MSAP bipolaire (P=1) et a rotor lisse ($L_d = L_q$) on aura le couple suivant :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot \varphi_f \cdot i_q = \frac{3}{2} \cdot \varphi_f \cdot i_d \quad (\text{III.27})$$

III.5. Les pompes

III.5.1. Introduction :

On appelle turbomachine tout appareil dans laquelle un fluide échange l'énergie avec une ou plusieurs roues munis d'aubes. D'une manière générale, une turbomachine est définie comme un dispositif qui permet de donner ou de retirer de l'énergie à un fluide par l'action dynamique d'un « élément rotative » appelé le rotor.

Toutes les éléments (machines) de détente porte le nom de turbines, alors que celle de compression se subdivisent en pompes ; ventilateurs, compresseur ou soufflantes selon la nature du fluide véhiculé et sa compressibilité.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de pompe et la modélisation de la pompe centrifuge.

III.5.2. Définition :

On dit une pompe, tous appareils qui servent à déplacer un fluide d'une région de basse pression vers une région à grande pression. Ainsi d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la quantité (le débit) de liquide qui traverse une conduite. D'une manière générale, et du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie hydraulique à partir l'énergie mécanique.

III.5.3. Différents types de pompe :

Généralement, Les pompes se partagent en plusieurs familles :

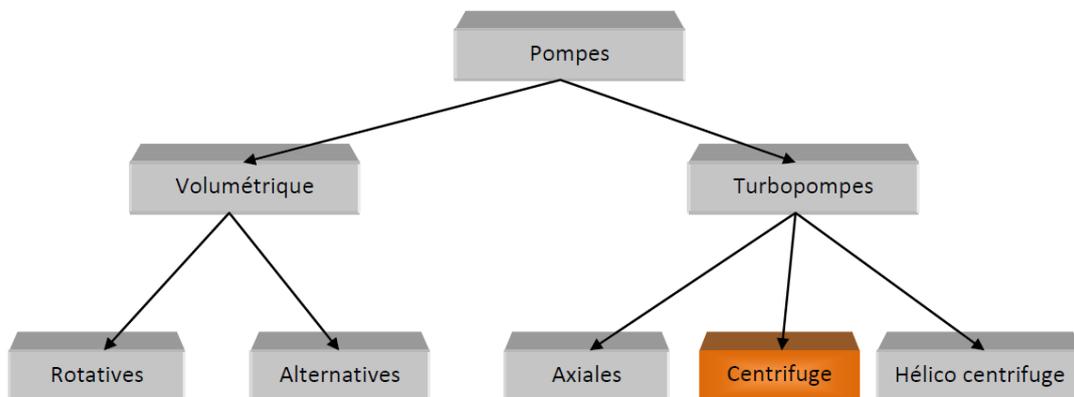


Figure 44. Classification des pompes.

III.5.3.1. Pompe volumétrique

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Elles utilisent la variation de volume pour déplacer le fluide, Le rendement volumétrique est le rapport entre le volume engendré.

Généralement, les pompes volumétriques se divisent en deux grands types :

- Les pompes alternatives.
- Les pompes rotatives.

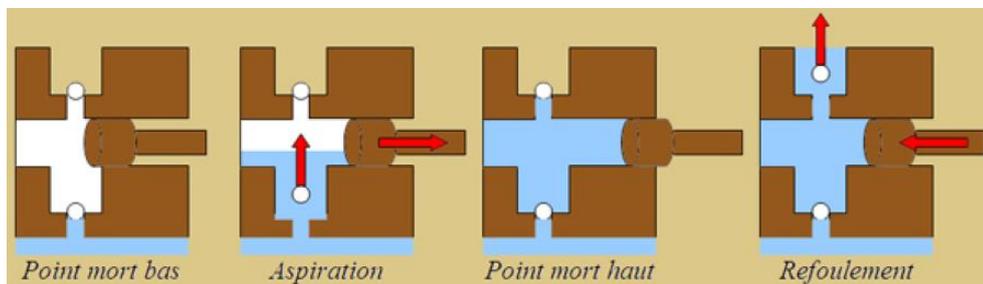


Figure 45. Pompe volumétrique alternative. [27]

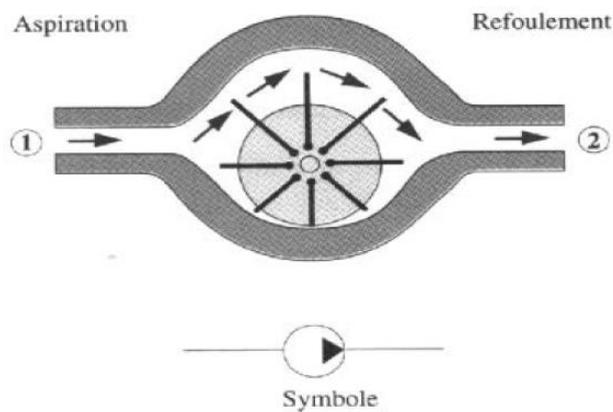


Figure 46. Pompe volumétrique rotative. [27]

III.5.3.2. Pompe centrifuge

III.5.3.2.1. Définition

La pompe centrifuge est un élément (machine) tournante qui grâce à un rotor à aubes convenablement orientées augmente l'énergie cinétique et projette à l'aide de la force centrifuge le liquide à la périphérie sur la volute.

A la sortie et à l'aide d'un divergent, une grande partie de l'énergie cinétique se transforme en pression motrice.

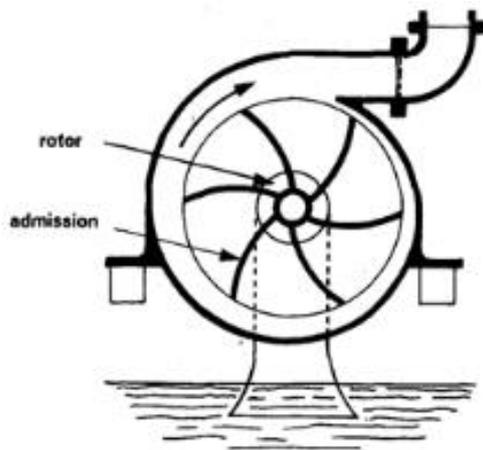


Figure 47. Pompe centrifuge.

III.5.3.2.2. Constitution :

La pompe centrifuge est constituée essentiellement, en allant de l'entrée à la sortie par :

- **Le distributeur** : sorte de tubulure profilée qui sert à conduire l'eau avec une vitesse et une direction convenable dans l'axe de la pompe (roue).

- **La roue** : est constituée par moyeu porté par un arbre et muni d'aubes tournant à l'intérieur de deux coquilles formant ainsi le corps de la pompe, on distingue, des roues ouvertes et semi-ouvertes.

- **La volute** : elle est placée à l'extérieur de la roue, de section circulaire ou trapézoïdale et se termine par cône convergent (voir la figure 46) [28]

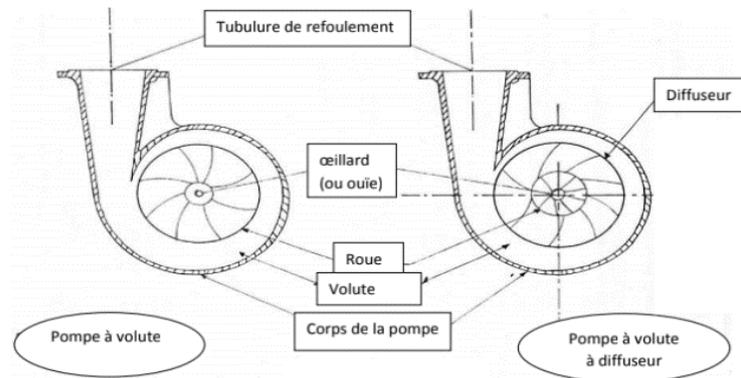


Figure 48. Constitution d'une pompe centrifuge. [29]

III.5.3.2.3. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge [30] :

On peut décomposer le fonctionnement en trois étapes :

➤ **L'aspiration** : le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

➤ **L'accélération** : transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique par le rotor. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. Dans un même corps de pompe on peut monter des roues différentes en fonction des caractéristiques du fluide.

➤ **Le refoulement** : Dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accroissement de pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression au niveau de diffuseur.

a) Avantages et inconvénients des pompes :

A. Avantages :

- Ces machines sont de construction simple et demande peu d'entretien.
- Prix modérés et coût de maintenance faible.
- Pompes compactes et peu encombrantes.

- Bons rendements.
- Le débit est continu.
- Vitesse de rotation élevée, entraînement direct possible par moteur électrique ou turbine.
- Conviennent à des puissances élevées.

B. Inconvénients :

- le débit volumétrique dépend de la pression de refoulement.
- Elle n'est pas auto-amorçant.
- Elle ne fonctionne pas avec des fluides trop visqueux.
- Elle nécessite des dispositifs d'équilibrage.

I.3.2.2 Classification des pompes centrifuges:

On classe les pompes centrifuges d'après le principe de fonctionnement.

Il existe différentes formes de roues et d'aubes qui induisent une classification de ces machines.

- Des rotors fermés ;
- Des rotors ouverts ;
- Des rotors semi-ouverts ;

Le nombre des roues correspondant au nombre d'étage monocellulaire ou mon-étagée [31]

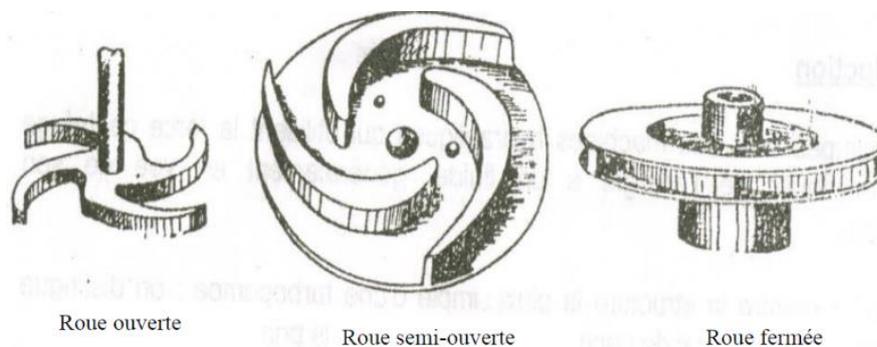


Figure 49. types des roues.

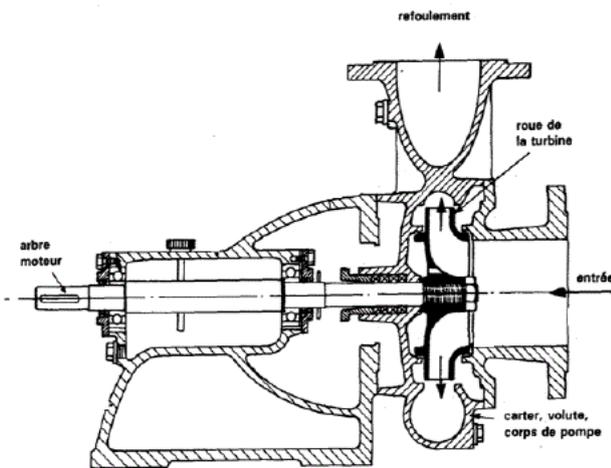


Figure 50. Pompe centrifuge mono- étage.

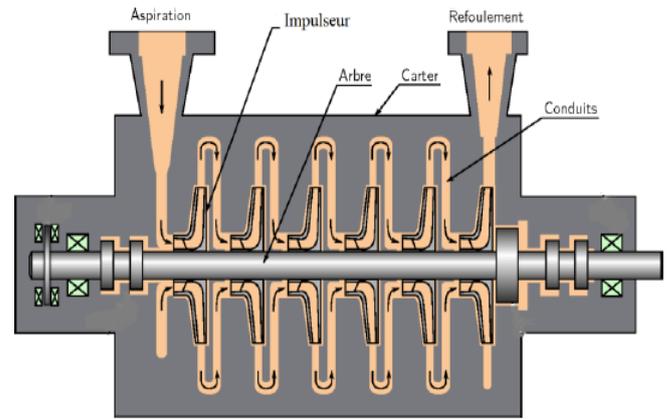


Figure 51. Pompe centrifuge multi-étage.

III.5.3.2.4. La modélisation de la pompe centrifuge :

Les trois principaux paramètres qui caractérisent le fonctionnement d'une pompe centrifuge sont :

-La hauteur manométrique H_m , le débit volumique Q_v et la vitesse Ω ayant pour équation :

$$f(H, Q, \Omega) = 0$$

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

❖ **Le débit volumique Q_v :**

Le débit volumique (Q_v) par une pompe est le volume d'eau qu'elle refoule S par unité de temps t . Il s'exprime en litres par minute (l/min) ou, plus pratiquement, en mètres cubes par heure (m^3/h). Cette quantité de liquide est aussi caractérisée par la vitesse de passage à travers cette section.

$$Q_v = V \cdot S \tag{III.28}$$

❖ **La hauteur manométrique totale H_{MT}**

La hauteur manométrique H_{MT} d'une pompe est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Si H_{TA} est la charge totale du liquide à l'aspiration et H_{TR} la charge totale du fluide à l'orifice du refoulement, la Hauteur manométrique de la pompe est :

$$H_{MT} = H_{TA} - H_{TR} \tag{III.29}$$

Généralement, La hauteur H_T du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H_T = H_s + H_d \quad (\text{III.29})$$

H_T : Hauteur totale du pompage.

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

H_d : est la somme des pertes linéaires et singuliers.

III.5.3.2.5. Les pertes de charge :

A. Les pertes de charge linéaires:

Ce sont des pertes d'eau dans la tuyauterie. Elles sont données par la Formule suivante [32] :

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III.30})$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

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

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

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{III.31})$$

Q : débit (m^3/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{III.32})$$

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

B. Les pertes de charge singulières (locale) :

Sont dues essentiellement aux divers changements de section (Produites par tout phénomène local). Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \frac{8.Q^2}{\pi^2 D^4 g} \quad (\text{III.33})$$

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

Alors, La hauteur dynamique est la somme des deux pertes (linéaires et singulières)

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (\text{III.34})$$

$$H_d = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8.Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} Q^2 \quad (\text{III.35})$$

K_{fr} : Constante de la canalisation.

Donc, la hauteur totale de pompage est :

$$H_T = H_s + K_{fr} Q^2 \quad (\text{III.36})$$

III.5.3.2.6. Caractéristiques d'une pompe centrifuge :

B. Dimension principale

La pompe centrifuge est principale :

D_0 = diamètre de l'oreillard (mm)

D_1 = diamètre d'entrée de la roue (mm)

D_2 = diamètre extérieur de la roue (mm)

b_2 = largeur des canaux de la roue à la sortie (mm)

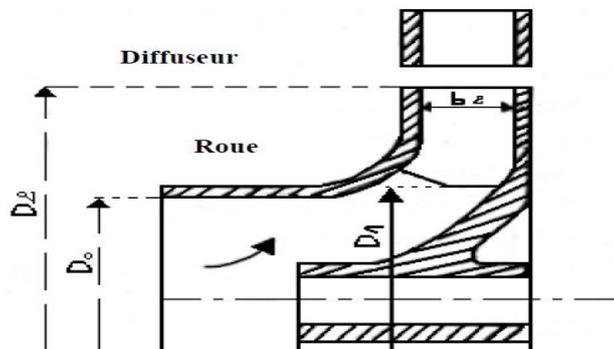


Figure 52. Dimension d'une roue.

C. Triangles des vitesses et angles caractéristiques [33] :

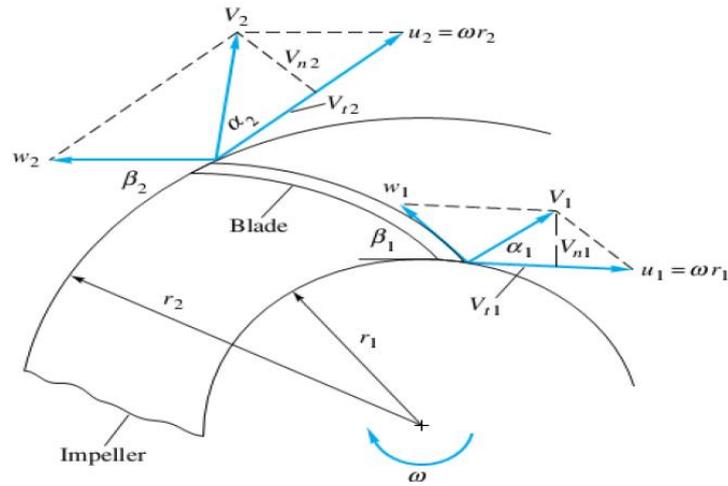


Figure 53. Triangles des vitesses.

• Les vitesses à l'entrée :

\vec{U}_1 : vitesse **tangentielle** au droit du point d'entrée (m/s)

\vec{W}_1 : vitesse relative de l'eau par rapport à l'aubage (m/s)

\vec{V}_1 : vitesse absolue de l'eau

Sachant que : $\vec{V}_1 = \vec{U}_1 + \vec{W}_1$ (III.37)

▪ à la sortie : il en est de même que $\vec{V}_2 = \vec{U}_2 + \vec{W}_2$ (III.38)

A l'entrée de la roue, l'eau pénètre à peu près radialement dans la turbine, en conséquence sa vitesse absolue \vec{V}_1 formera avec \vec{U}_1 , un angle très voisin de 90° .

• Les vitesses à la sortie :

à la sortie de l'aubage en (2) les vitesses sont : $W_2; U_2; V_2$.

De la même manière : $\vec{V}_2 = \vec{U}_2 + \vec{W}_2$ (III.39)

$$U_1 = \omega R_1 \quad (III.40)$$

$$U_2 = \omega R_2 \quad (III.41)$$

R_1 et R_2 Rayons de la roue d'entrée et de sortie.

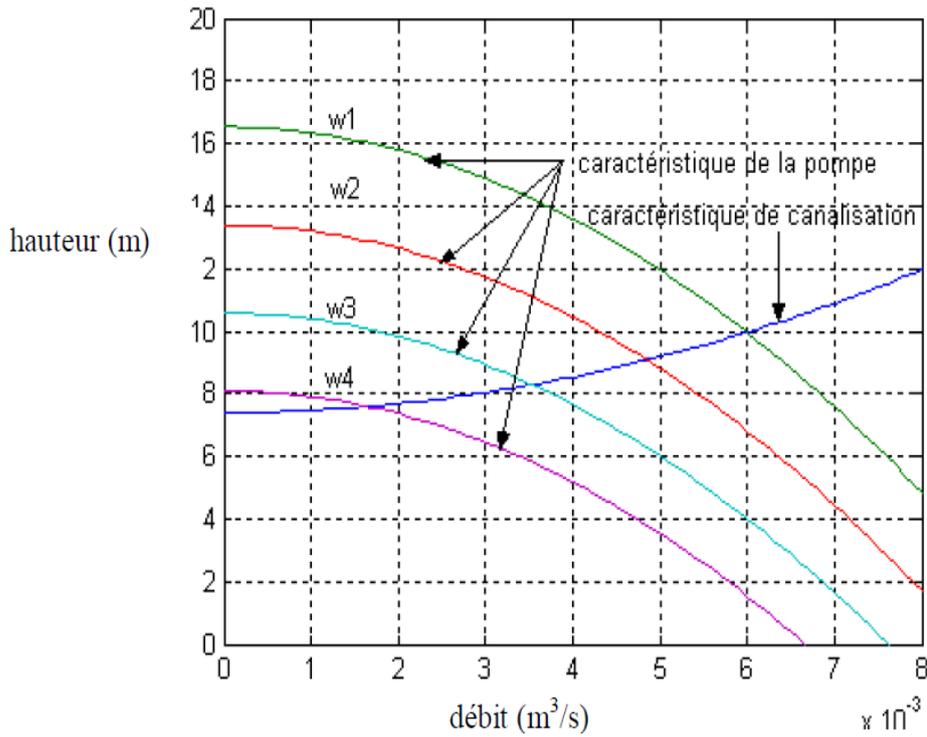


Figure 54. Courbe Caractéristiques de la pompe $H(Q)$ et de la canalisation.

• **La vitesse de rotation**

n (tr/min) : c'est le nombre de tours qu'effectue la pompe par unité de temps.

$$\omega = 2\pi n/60(\text{rd/sec})$$

ω : vitesse de rotation de la roue (rd/s)

n : Nombre de tours (tour/min)

• **Les angles à l'entrée :**

α_1 : Angle formé entre les vitesses \vec{U}_1 et \vec{V}_1

Pour les pompes centrifuges $\alpha_1 = 90^\circ$

β_1 : Angle d'entrée des aubages formé par \vec{W}_1 et la tangente au point 1 au diamètre D_1

• **Les angles à la sortie :**

α_1 : Angle entre les vitesses \vec{U}_1 et \vec{V}_1

β_2 : Angle de sortie des aubages formé par \vec{W}_2 et la tangente **au point 2** au diamètre D_2

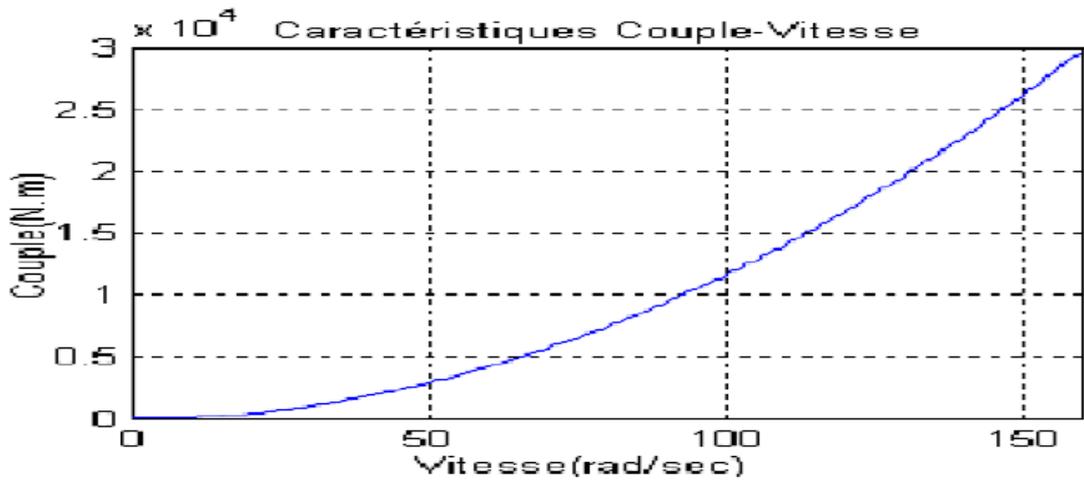


Figure 55. Courbe $C(\omega)$ d'une pompe centrifuge.

Enfin, l'angle β_2 est appelé angle de sortie de la roue .sa valeur est comprise entre 15° et 30° ($15^\circ < \alpha < 30^\circ$)

D. Caractéristiques Débit – hauteur :

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

$$H = K_0 \times \omega^2 - K_1 \times \omega \times Q - K_2 \times Q^2 \quad (\text{III.42})$$

Avec : $K_0; K_1; K_2$ sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

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

E. Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement est l'intersection de ces deux caractéristiques. Alors pour une vitesse donnée, il y a seulement un point de fonctionnement qui dépend fortement des Caractéristiques de tuyauterie d'une pompe indiquée. Par conséquent une bonne conception et une tuyauterie de bon choix donnent de bons résultats dans le système de pompage. [32]

F. La caractéristique couple vitesse $C(\omega)$ de la pompe :

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

$$C_r = K_p \omega^2 + C_s \quad (\text{III.43})$$

Avec :

$$K_p = \frac{P_m}{\omega^3} \quad (\text{III.44})$$

k_p : Coefficients de proportionnalité $[(\text{Nm}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})^2]$

C_s : Le couple statique, très petite.

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

$$P_{méc} = k_p \omega \quad (\text{III.45})$$

G. Puissance des pompes centrifuges :

C'est le produit de la variation de pression entre l'aval et l'amont de la pompe par le débit volumique Q :

Tel que :

$$P = \rho \cdot g \cdot H_{th} \cdot Q \quad (\text{III.46})$$

ρ : Masse volumique d'eau (Kg/m^3) ;

g : est l'accélération de la pesanteur ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$).

H_{th} : La hauteur théorique (m) ;

Q : le débit (m^3/s) ;

H. Le Rendement η :

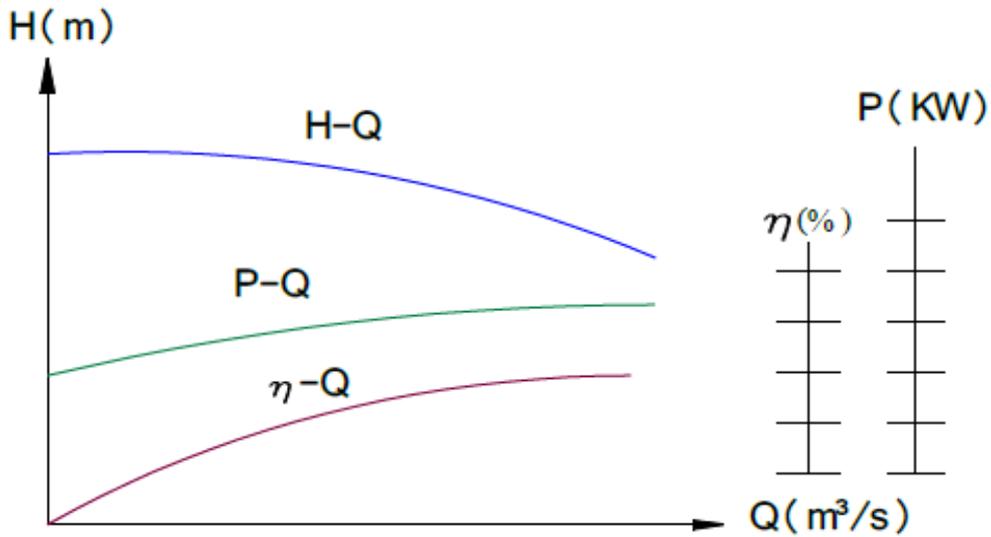
Le rendement η d'une pompe est le rapport de la puissance utile **Pu** à la puissance absorbée **Pa** qui donnée par la relation suivante :

$$\eta (\%) = 100 \frac{P_u}{P_a} = 100 \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{P_a} \quad (\text{III.47})$$

• **Pa** : Puissance absorbée c'est la puissance consommée par le moteur d'entraînement de la pompe.

• **Pu** : Puissance fournie par le moteur.

• η : Rendement de la pompe c'est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée.



III.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, un aperçu général sur le moteur synchrone à aimant permanent et la pompe centrifuge, ainsi que la modélisation sous équations mathématiques de groupe motopompe.

CHAPITRE IV :
Modélisation du
système complet
Photovoltaïque-
Moteur-Pmsm-Pompe

IV.1. Introduction

Le rayonnement solaire est une source d'énergie inépuisable qui peut être exploitée pour générer de l'électricité. L'eau est une ressource essentielle et devrait être extractible quel que soit l'endroit sur la planète et le besoin d'eau étant plus important dans les régions éloignées, désertiques et reculées. Le pompage d'eau à l'aide de cette énergie est une solution bien adaptée, surtout si la majorité de ces régions sont caractérisées par un fort ensoleillement.

Ainsi, un grand intérêt doit être porté sur l'utilisation des générateurs solaires comme source d'énergie alimentant les motopompes.

Pour ce dernier chapitre, nous présentons la simulation du système de pompage à l'aide d'un générateur photovoltaïque. Ensuite nous montrons l'influence de la température et de l'éclairement sur les performances du système

IV.2. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque :

Les principales composantes d'une chaîne de pompage photovoltaïque seront modélisées et simulés dans l'environnement Matlab/Simulink à savoir :

- Le générateur photovoltaïque.
- Le convertisseur Continu/Continu (Hacheur boost).
- Le convertisseur Continu/Alternatif (Onduleur).
- Le groupe motopompe composé d'un moteur synchrone à aimant permanent avec une pompe centrifuge.

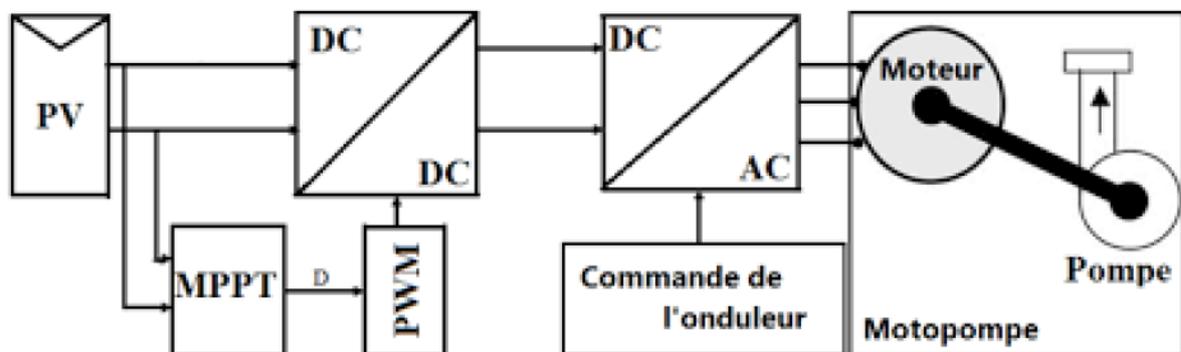


Figure 57. schéma synoptique d'un système de pompage photovoltaïque.

La pompe centrifuge est caractérisée essentiellement par un couple qui est nécessaire pour son entraînement et qui est proportionnelle au carrée de la vitesse de rotation de moteur ω :

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 \quad (IV.1)$$

Avec :

K_r : le coefficient de proportionnalité [$\text{Nm}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})^2$]

ω : la vitesse angulaire de MSAP (rad/s)

$$K_r = \frac{C_r}{\omega^2} \quad (IV.2)$$

$\omega = \frac{N \cdot \pi}{30}$, N : la vitesse nominale du moteur (rpm).

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

$$P_{mec} = K_r \cdot \omega^3 \quad (IV.3)$$

Quand le groupe moteur-pompe est alimenté par le GPV il réalise ont aux égalités suivantes :

$$\begin{cases} V_m = V_{GPV} \\ I_m = I_{GPV} \\ C_m = C_r \end{cases} \quad (IV.4)$$

Si on suppose que le convertisseur est idéal, en fonctionnement optimal, la puissance maximale délivrée par le générateur sous un courant I_{mp} et une tension V_{mp} est :

D'après notre modèle de GPV :

$$V_{mp} = V_{oc} \cdot 0.76 \rightarrow V_{mp} = 22,10,76 = 16,796V \quad (IV.5)$$

$$V_{mpp} = V_{mp} \cdot N_{ms} \rightarrow V_{mpp} = 16,796.18 = 302,33V \quad (IV.6)$$

Donc la puissance maximale totale est :

$$P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \cdot N_{mp} \rightarrow P_{GPV} = 302,33.6,498.2 = 3929,50 W \quad (IV.7)$$

Les paramètres physiques et électriques de ce module photovoltaïque sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 2 : Les paramètres physiques et électriques de GPV

Les paramètres du module	Les valeurs
Les nombres des cellules	36
Les nombres des modules en série N_{ms}	18
Les nombres des modules en parallèle N_{mp}	2
L'éclairement G	500 W/m ²
Température de fonctionnement de cellule	288°K
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	22.1V
I_{mp}	6.5A
V_{mp}	16.796V
V_{mpp}	302.33V
P_{mpp}	3929,50 W

IV.3. Principe de la recherche du MPPT

La figure 45 représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT. Par définition, une commande MPPT ((Maximum Power Point Tracker), associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Il est basé sur la variation du rapport cyclique d'un convertisseur (DC-DC) à l'aide d'un signal électrique, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (I_{mpp} , V_{mpp}).

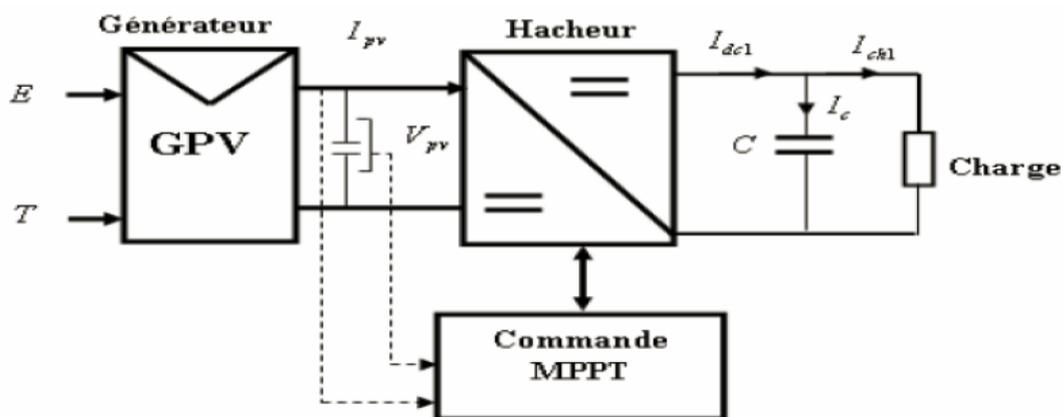


Figure 58. Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.

IV.3.1. Les algorithmes du point de puissance maximale :

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées :

- Perturb & Observ (P&O).
- L'incrément de Conductance (Inc.Cond)
- Algorithme capacité- parasite (PC)

IV.3.1.1. La commande MPPT perturbe & observe

Nous avons choisi l'algorithme P&O parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le panneau photovoltaïque fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP. La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau V_{PV} avec un ΔD et en observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

Si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

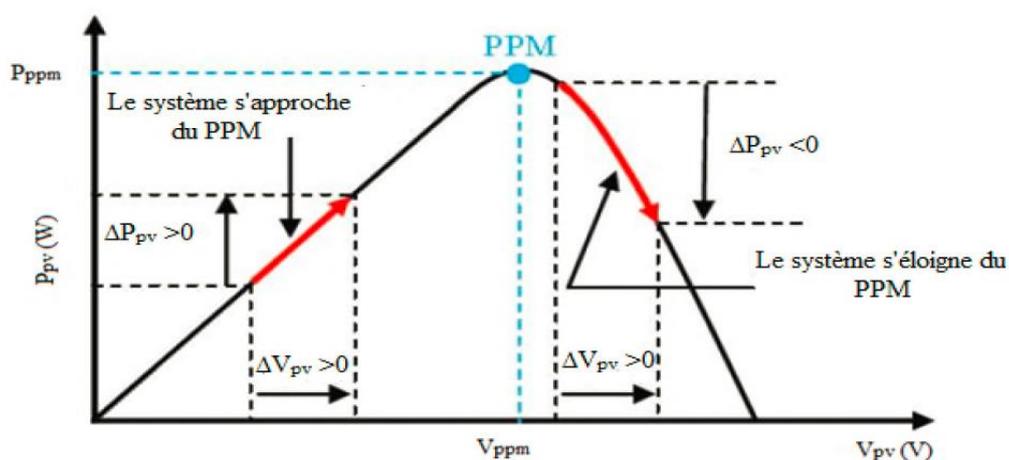


Figure 59. Principe de P&O

La figure (60) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O :

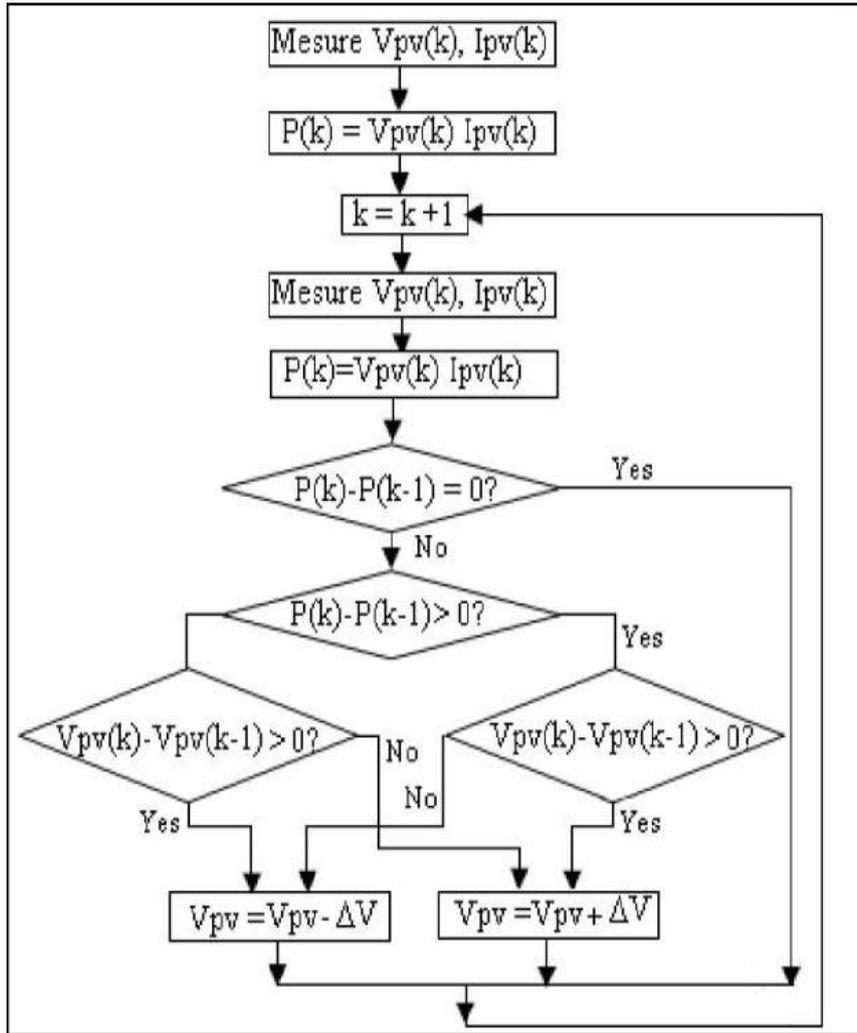


Figure 60. Organigramme de la méthode perturbation et observation.

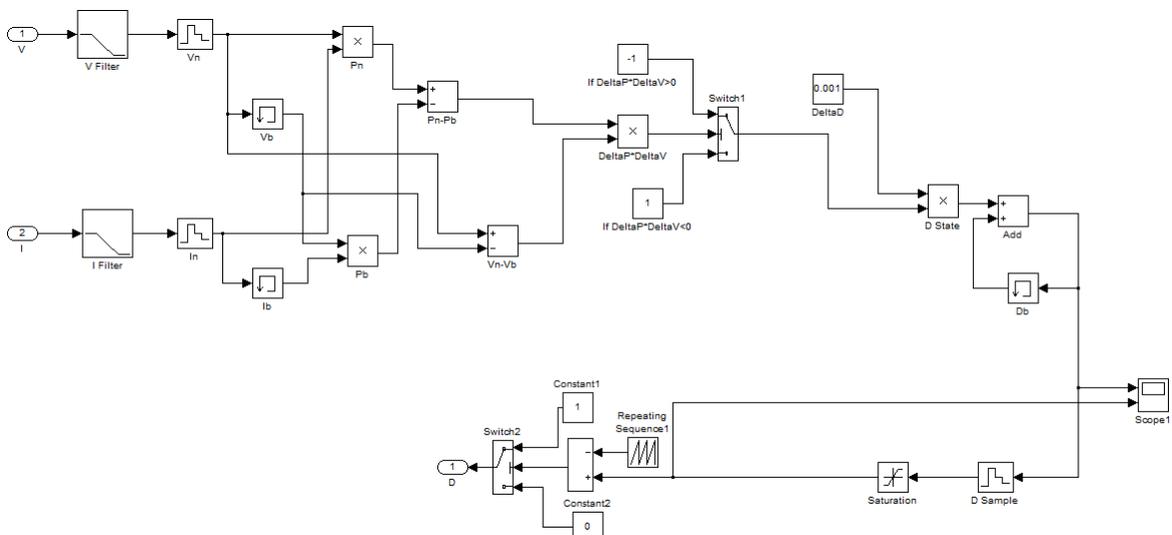


Figure 61. Bloc de simulation de la commande P&O.

IV.4. Modélisation et simulation du système complet

Le modèle SIMULINK présenté dans la figure ... représente le groupement du modèle SIMULINK du générateur photovoltaïque, la commande MPPT, le hacheur boost, l'onduleur MLI, le moteur synchrone à aimant permanent et la pompe centrifuge.

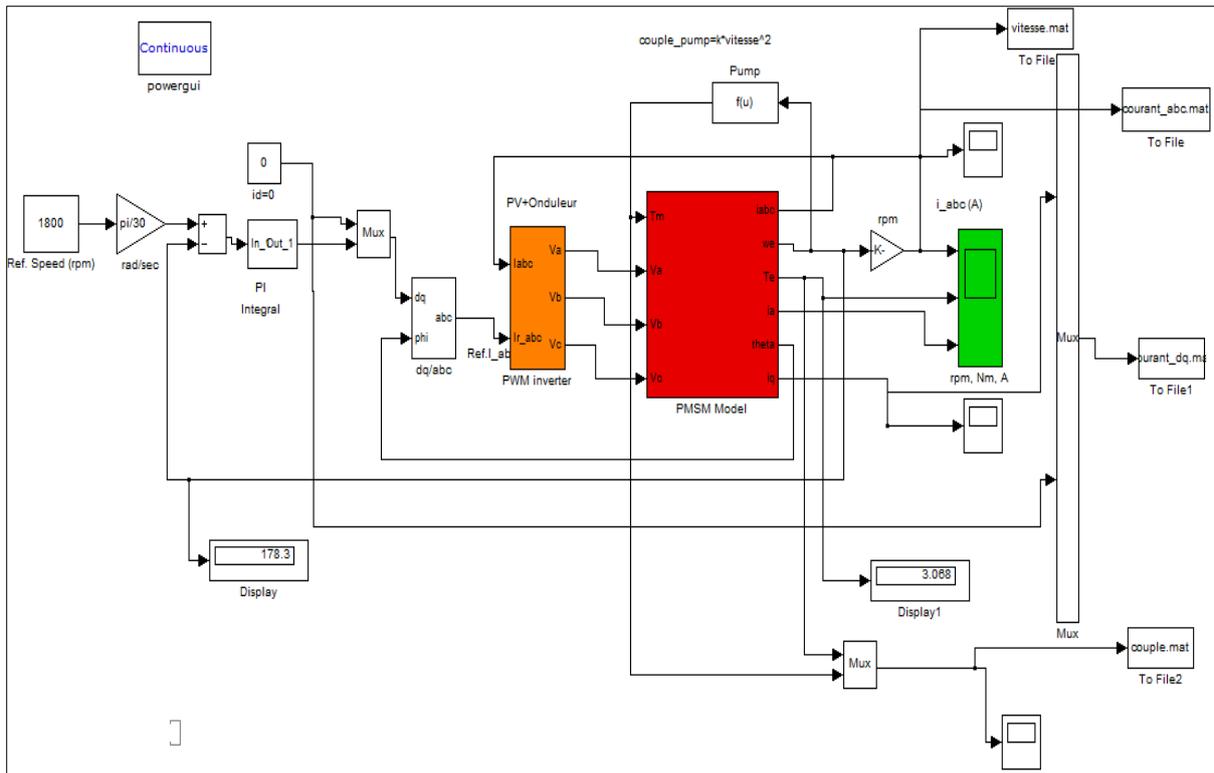


Figure 62. Schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

IV.4.1. Résultats de simulation

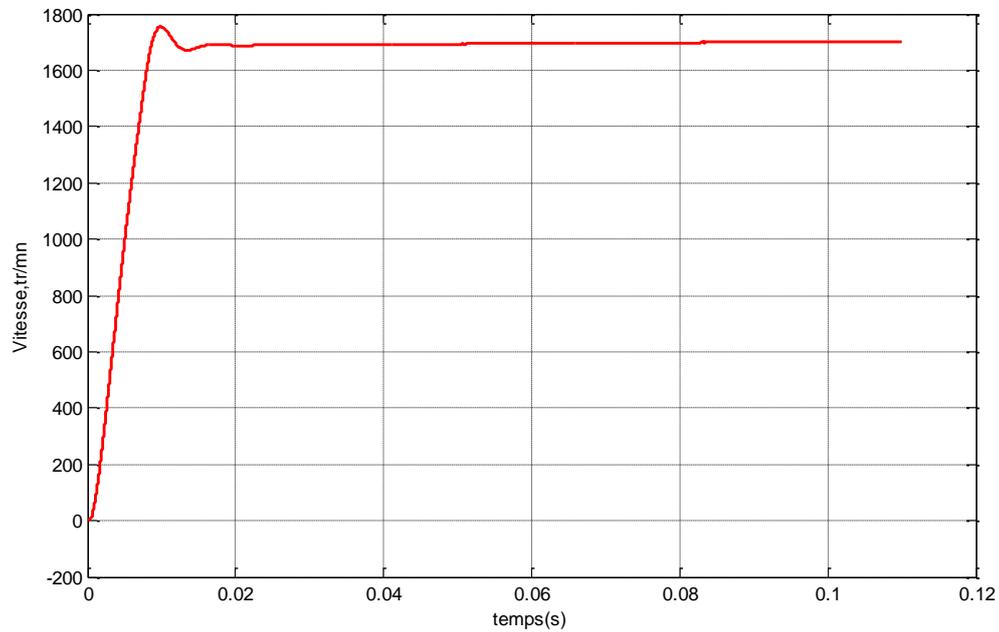


Figure 63. La variation de vitesse de MSAP.

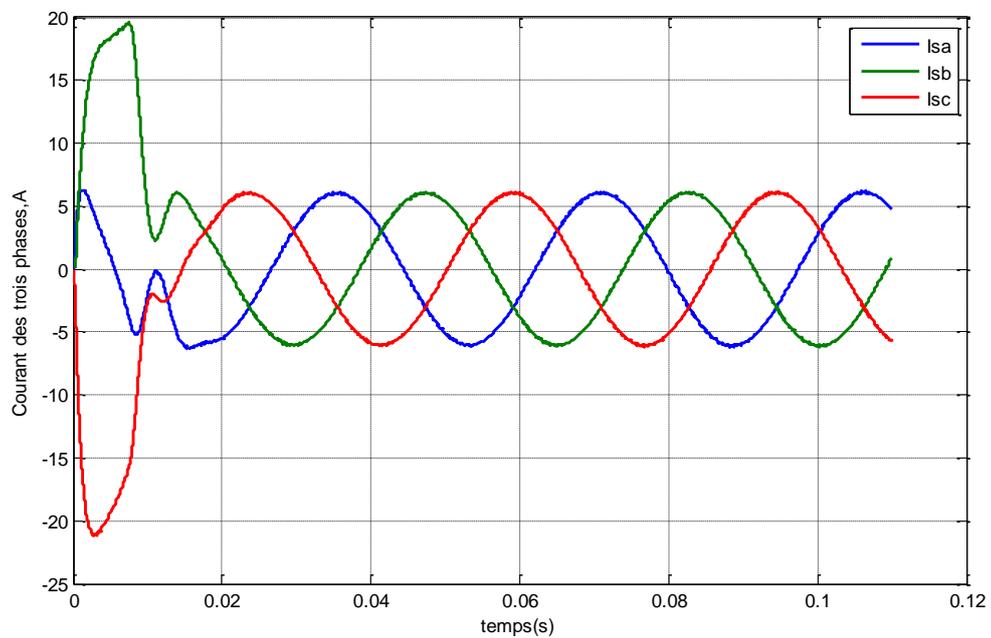


Figure 64. Les courants statoriques de moteur.

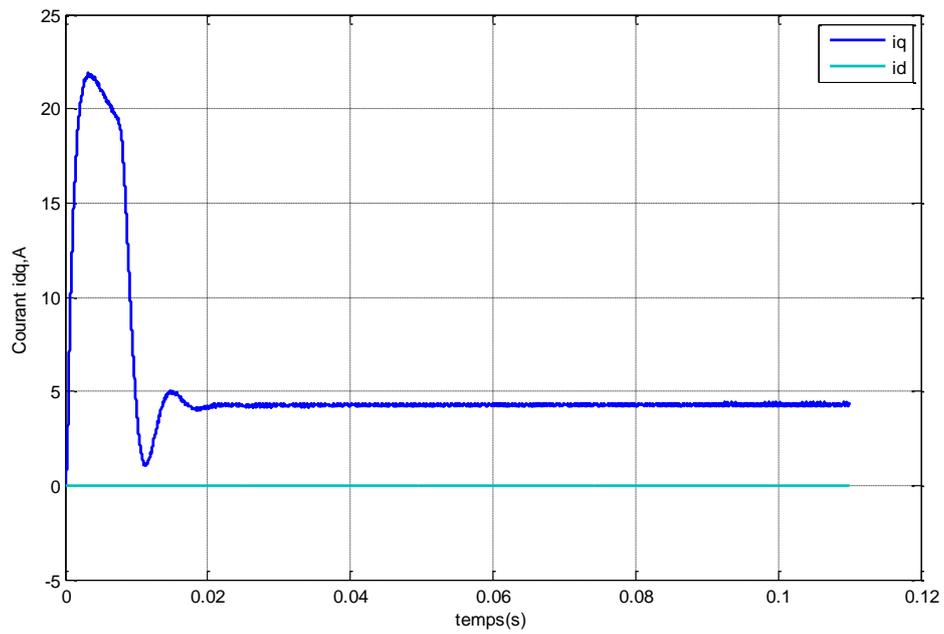


Figure 65. Les courant biphasé de moteur i_d, i_q

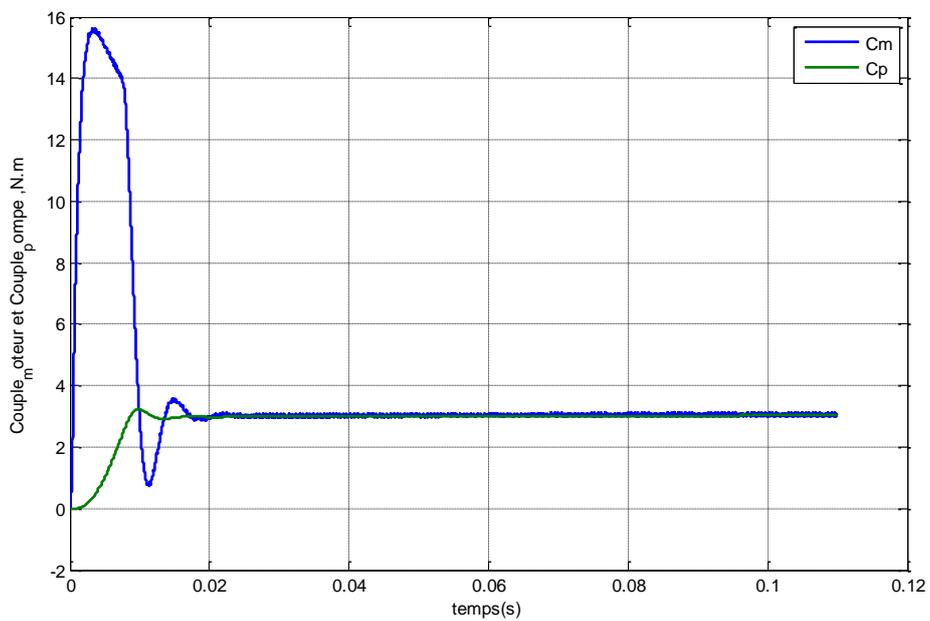


Figure 66. Le couple électromagnétique de moteur et de la pompe centrifuge.

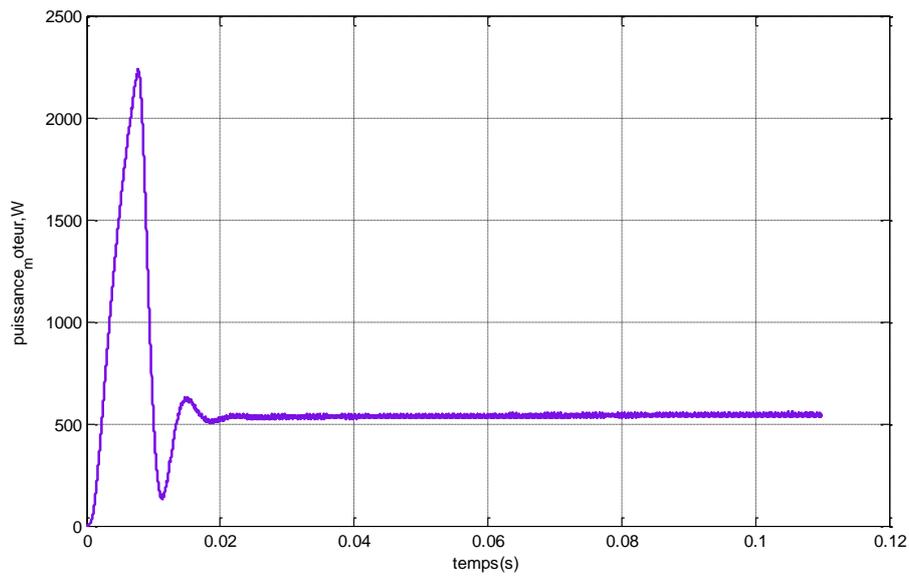


Figure 67. Puissance de moteur.

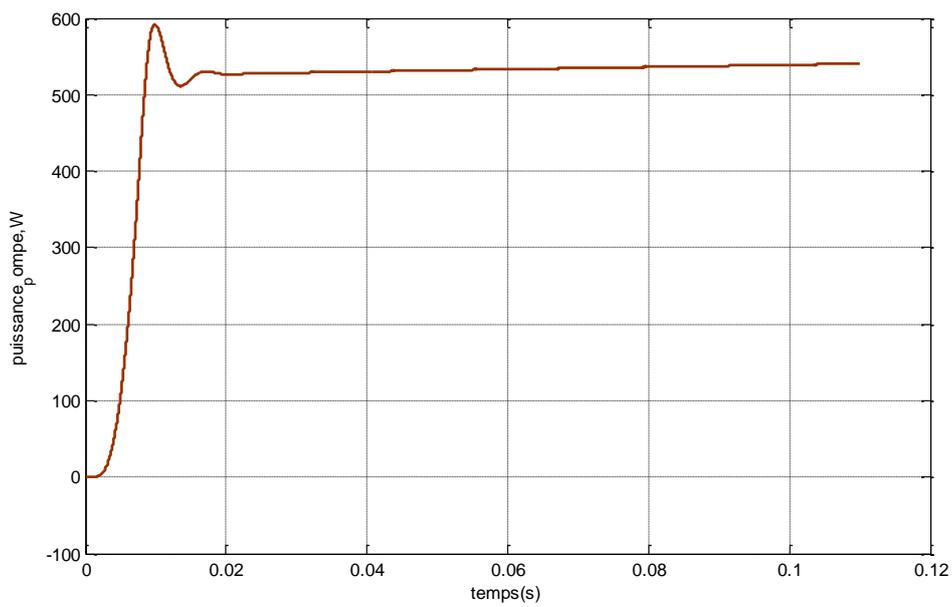


Figure 68. Puissance de la pompe centrifuge.

IV.4.1.1. Discussion des résultats

la **figure (63)** montre l'évaluation de la vitesse de rotation de moteur. On remarque la croissance de la vitesse est presque linéaire lors de la phase de démarrage puis elle atteint un état stable valeur de 1750tr/min.

la **figure (64)** présente l'allure des courants statoriques de MSAP. Les formes d'ondes actuelles montrent un courant un peu plus élevé pendant le départ. A l'état d'équilibre le courant diminue et s'installe à la valeur nominale.

La **figure (66)** montre les courbes du couple de moteur et de la pompe. On observe que le couple électromagnétique de moteur présente d'un pic au démarrage qui est dû au régime transitoire. Le couple de charge varie en relation avec la vitesse du moteur, puis le couple du moteur et de la pompe atteint la même valeur nominale de 3 N.m. on peut voir aussi l'influence de courant biphasé i_q échantillonné sur la même forme du couple de moteur (**La figure (65)**).

Les **figure (67)** et **(68)** présente les allures de puissance de la pompe et de moteur. la puissance de la pompe et de la moteur atteint également la même valeur nominale en régime permanent de 545W.

IV.5. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons mis en évidence la simulation d'une chaîne de pompage photovoltaïque composée de 18 modules photovoltaïques associés à un convertisseur DC/DC boost commandé par un algorithme d'optimisation MPPT qui de fonctionnement du générateur photovoltaïque à son maximum de puissance. Un groupe motopompe est alimenté par le générateur photovoltaïque à travers d'un onduleur de tension MLI, ainsi que la discussion des résultats de simulation de notre système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail s'est porté sur la commande de moteur synchrone à aimant permanent par un système photovoltaïque pour l'application de pompage d'eau.

Ces dernières années, la demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelle fossiles diminuent en raison d'une grande consommation et développement de l'industrie. Pour répondre aux besoins énergétiques, des recherches sont conduits à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différent application tel que le pompage d'eau présente un intérêt, très important, cependant les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un cout élevé.

Les moteurs synchrones à aimant permanent apportent une solution intéressant pour la réalisation des systèmes de pompage photovoltaïque, ces machines ont des avantages par rapport aux machines asynchrones ou à courant continu et aussi le MSAP présente un bon comportement en fonction de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

La technique d'algorithme d'optimisation du générateur solaire, qui à été étudiée est la perturbation et l'observation (P&O), elle est généralement utilisée par les concepteurs de suiveur de point de puissance maximum (MPPT), vue son simple implantation, mais elle souffre de quelque inconvénient du point de vue de l'exécution ou dans le processus de poursuite.

Notre étude à commencer par une présentation du modèle pour chaque élément constituant la chaine de pompage photovoltaïque, ainsi que la modélisation et la simulation de notre système de pompage composé de : le hacheur, onduleur, le moteur synchrone à aimant permanent et la pompe centrifuge branchés sur un générateur photovoltaïque dans l'environnement de programmation de Matlab/Simulink, les résultats de simulation obtenus ont montré l'évolution de quelque paramètres des éléments de la chaine de pompage photovoltaïque.

Bibliographie

Bibliographie

[1]: R.Djamila “ Ernest Matagne Optimization of Photovoltaic Power Systems Modelization, Simulation and Control”.

[2]: Tahar Tafticht « Analyse et commande d’une système Hybride Photovoltaïque Eolien » thèse présentée à L’Université du QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES.

[3] : https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://fr-static.z-dn.net/files/d9e/1059a79cf5cb4e0ca98788107f427c43.pdf&ved=2ahUKEwjGsoTGjs_nAhXISxUIHWO0Bn4QFjACegQIAhAB&usg=AOvVaw1XZAL_IRmHs__9_U13CCeI

[4], [5]: M. Dankassoua 1, S. Madougou 1, A. Aboubacar 2 et A. Foulani 1 « Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l’année 2013 (mai à octobre) » Université Abdou Moumouni ,Niger.

[6] : Jimmy Royar, Thomas Djiako, Eric Schiller Bocar sada Sy, Le pompage Photovoltaïque, Direction de Eric Schiller.

[7] ,[8] : Belhadj Mohammed « Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome »,Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar Institut des Sciences Exactes 2008.

[9] : Dr. BelaidLalouni Sofia «Cours Energie Solaire Photovoltaïque» Université de Bejaia.

[10] : D.THOMAS, R. JIMMY, S.ERIC, S.BOCAR « Le pompage photovoltaïque ‘manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens’ ». Université d’Ottawa. Canada, 1998.

[11] : B.Djamil, « optimisation d’un système d’énergie potovoltaïque application au pompage » ; Université Mentouri de Constantine.2007

[12], [14] : Lequeu Thierry, "Cours d’électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005.

[13],[15] : M.Med Nadjib et H.Charaf Eddin « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ». UNIVERSITÉ KASDI MERBAH –OUARGLA, 2013.

[16],[17]:Ms A.Bouزيد « onduleur triphasé commandé par la stratégie d’élimination d’harmonique « SHE » » école normal Supérieurs d’Enseignement technique –ORAN-,2009/2010.

- [18] :B.Abdeslam « Etude, simulation et réalisation d'un onduleur triphasé pour les trains électro-diesel ».école supérieure en sciences appliquées-TLEMCEN-,2018/2019
- [19] : S.youcef « optimisation et dimensionnement d'un système solaire de pompage d'eau ».université Larbi ben m'Hidi-Oum El Bouaghi-,2015 /2016.
- [20], [21] : O. Salah et B.Walid « étude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI ».Université Mohamed Boudiaf-M'sila-,2018/2019.
- [22]:A.Nadia et B.Wahiba « modélisation et commande d'un onduleur MLI ».Universitaire larbi ben m'hidi.oum el-boughi,2008 /2009.
- [23] : BENCHABANE Fateh, Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering, mémoire de magister, Université mohamed khider de Biskra, Algérie, année 2005
- [24] : N.Bounasla, « commande par mode de glissement d'ordre supérieur de la machine synchrone à aimants permanents ». Université Ferhat ABBAS Sétif -1,2014
- [25] : B. Nogarede, «Etude de moteurs sans encoches à aimants permanents de forte puissance à basse vitesse», Thèse de Magister, l'Institut National Polytechnique de Toulouse(France), 1990.
- [26] : M.T.Latreche. « Commande Floue De La Machine Synchrone A Aimant Permanent (MSAP) Utilisée Dans Un Système Eolien », Mémoire de Magister, Université ferhat abbas de Setif (UFAS),2012
- [27] : Mr. M HAMADACHE « Commande d'une pompe alimentaire de la centrale de Ras Djinet à l'aide d'un API S7 300 ». 2015/2016.
- [28] ,[29],[33] :M.Ali « Etude de la cavitation dans une pompe centrifuge.Université Saad Dahlab de Blida, 2013/2014.
- [30] :Mr B.Benaissa, mémoire master « Etude comparative 'Equation d'Euler' Dimensionnelle Et Expérimentale. Cas d'une pompe centrifuge radiale de POVAL », 2014.
- [31] : F. Bahi Eddine et H. Ibn Sinâa « Etude de la cavitation dans les pompes centrifuges ».Université Mohemad boudiaf-M'sila-,2016/2017.
- [32] :B.Djamil « OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU POMPAGE ».Université Mentouri de Constantine ,2007

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour diverses applications, telles que domestique ou industrielles comme l'éclairage, la réfrigération et le pompage d'eau, centrale solaire.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la simulation d'un système solaire de pompage d'eau.

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

Mots-clés :

Energie solaire, Panneau photovoltaïque, pompage solaire, convertisseur DC/DC, convertisseur DC/AC, Moteur, MPPT perturbe & observe.

Abstract

Photovoltaic solar energy is increasingly used for various applications, such as domestic or industrial such as lighting, refrigeration and water pumping, solar power plant.

The work presented in this thesis concerns the modeling and simulation of a solar water pumping system.

This system consists of a set of elements: photovoltaic panels, voltage inverter, permanent magnet synchronous engine and centrifugal pump.

Key words:

Solar Energy, Solar panel, solar pumping; DC / DC converter, inverter, MPPT disturbs & observes.

ملخص

يتم استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية بشكل متزايد لتشغيل مختلف التطبيقات المنزلي والصناعي مثل الإضاءة والتبريد وضخ المياه محطة الطاقة

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بنمذجة ومحاكاة نظام ضخ المياه بالطاقة الشمسية

يتكون هذا النظام من مجموعة من العناصر؛ وهي الألواح الكهروضوئية، وعاكس الجهد، والمحرك المتزامن المغناطيس

الدائم ومضخة الطرد المركزي

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية؛ لوحة الضوئية؛ ضخ بالطاقة الشمسية؛ محول مستمر / مستمر؛ عاكس كهربائي؛ تتبع

نقطة القوة القصوى يزجج ويلاحظ