



Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'études

En vue l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Thème

Etude d'une machine asynchrone dédiée à un système de pompage photovoltaïque.

PRÉSENTÉ PAR :

- GUEDDOU OUSSAMA (Commande électrique).
- ZIANI SAMI (Energie renouvelable).
- KANDI BILAL (Machine électrique).

PROMOTEURS :

- LARBA MOUHAMED.
- HAMITOCHE KAMEL.

Remerciements

Nous tenons vivement à exprimer toute notre reconnaissance à nos deux promoteurs Mr K. Hamitouche et Mr M. Laraba, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour leurs confiances et leurs disponibilités qu'ils nous ont attribuées.

Nous remercions les membres du jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égard nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Enfin, nos sincères gratitudees s'adressent à nos familles, sans leurs encouragements permanents et leur soutien moral nous ne serions parvenues là où nous somme.

Dédicaces

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Nos dédions ce travail à :

❖ *A nos parents :*

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de nos études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer nos respects, nos considérations et nos profonds sentiments envers eux.

❖ *A nos très chers frères et sœurs :*

Ils vont trouver ici l'expression de nos sentiments de respects et de reconnaissances pour le soutien qu'ils n'ont cessé de nous porter.

❖ *A nos amis :*

Nous tenons à remercier tous nos amis spécialement Yacine ouaziz qui nous a aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce modeste travail.

Table de matière

Liste des figures	I
Liste des tableaux.....	II
Nomenclature	III
Glossaire	IV
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Energie et systèmes photovoltaïques.

I.1. Introduction	3
I.2. L'énergie solaire.....	3
I.3. Rayonnement solaire	4
I.3.1. Spectre du rayonnement	4
I.3.2. Différents types de rayonnement.....	4
I.4. L'énergie photovoltaïque	6
I.4.1. Historique	6
I.4.2. Définition	7
I .5. La cellule photovoltaïque	7
I.5.1. Définition	7
I.5.1.1. Association des Cellules Photovoltaïques.....	8
I.5.2. Le principe de fonctionnement.....	9
I.5.3. Les différents types des cellules PV.....	10
I.6. Différents types des systèmes photovoltaïques	10
I.6.1. Les systèmes autonomes	11
I.6.2. Systèmes hybrides	12
I.6.3. Systèmes connectés à un réseau	12
I.6.4. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	13
I.7. Les systèmes de pompage photovoltaïque	13

Table de matière.

I.7.1. Les différents types de pompage	13
I.7.1.1. Pompage au fil de soleil	13
I.7.1.2. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries).....	14
I.7.2. Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque	14
I.7.2.1. Le groupe motopompe	15
I.7.2.1.1. Moteur électrique	15
I.7.2.1.2. Les Pompes	17
I.7.2.2. Convertisseurs statique.....	19
I.7.2.2.1. Définition des convertisseurs statique.....	19
I.7.2.2.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur)	19
I.7.2.2.3. Convertisseur DC/AC (Les onduleurs)	20
I.8. Conclusion.....	20

Chapitre II : Modélisation des systèmes photovoltaïques.

II.1. Introduction :.....	21
II.2. Modélisation de l'irradiation :	21
II.2.1. Modèle d'éclairement sur une surface horizontale :.....	21
II.2.2. Modèle d'éclairement sur une surface inclinée :.....	22
II.3. Modélisation Du Générateur Photovoltaïque :	24
II.3.1. Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques du module photovoltaïque :.....	26
II.3.1.1. Influence de la température :.....	26
II.3.1.2. Influence de l'éclairement :	27
II.3.1.3. Influence de l'éclairement et la température :.....	28
II.4. Modélisation De la cellule solaire :	29
II.4.1. La courbe courant-tension d'une cellule solaire :.....	29
II.4.2. La caractéristique puissance-tension d'une cellule PV :.....	30
II.4.3. Le courant de court-circuit I_{cc} :	31
II.4.4. La tension de circuit ouvert V_{co} :	31

Table de matière.

II.4.5. Facteur de Forme FF :	31
II.4.6. Le rendement de conversion d'énergie (η) :	32
II.4.7. La température de jonction :	32
II.5. Commande MPPT :	32
II.5.1. Principe de la commande MPPT :	33
II.5.2. Commande perturb & observe (P&O) :	33
II.5.3. Simulation du générateur photovoltaïque avec la commande MPPT :	35
II.6. Modélisation du hacheur élévateur de tension (Boost) :	36
II.7. Conclusion :	37

Chapitre III : Modélisation du groupe motopompe.

III.1. Introduction :	38
III.2. La machine asynchrone :	38
III.2.1. Principe de fonctionnement :	38
III.2.2. Le glissement :	39
III.2.3. Modélisation de la MAS :	39
III.2.3.1. Hypothèses simplificatrices :	39
III.2.3.2. Modèle de moteur asynchrone triphasée :	39
III.2.3.3. Équations électriques :	40
III.2.3.4. Équations magnétique :	41
III.2.3.5. Équations mécanique :	42
III.2.3.6. Transformation de Park :	42
III.2.3.7. Modèle de PARK de la machine asynchrone :	43
III.2.3.8. Expression du couple électromagnétique :	45
III.2.3.9. Choix du référentiel :	46
III.2.3.10. Equation d'état de la machine asynchrone :	46
III.3. Convertisseur statique :	47
III.3.1. Modulation sinus- triangle :	49
III.4. La pompe centrifuge :	50

Table de matière.

III.4.1. Constitution d'une pompe centrifuge :	50
III.4.2. Fonction d'une pompe centrifuge :	51
III.5. Modélisation d'une pompe centrifuge :	51
III.5.1. Hauteur manométrique totale :	51
III.5.2. Pertes de charges linéaires :	51
III.5.3. Pertes de charges singulières (locale) :	52
III.5.4. La caractéristique Q (H) de la pompe :	53
III.5.5. La caractéristique C (ω) de la pompe :	53
III.5.6. Calcul de puissance :	54
III.5.7. Calcul du rendement :	54
III.6. Conclusion :	54

Chapitre IV : Dimensionnement du pompage photovoltaïque.

IV.1. Introduction :	55
IV.2. L'outil Matlab/Simulink :	55
IV.3. Dimensionnement du système photovoltaïque :	56
IV.3.1. -Dimensionnement de la Motopompe :	56
IV.3.2. Dimensionnement du générateur photovoltaïque :	57
IV.4. Simulation du système globale :	58
IV.4.1. Résultats de la simulation :	58
IV.4.2. Interprétation des courbes :	60
IV.5. Conclusion :	61

Conclusion générale	62
----------------------------------	----

Bibliographies	V
-----------------------------	---

Annexes	VI
----------------------	----

Liste des figures

N° de figure	Titres	Pages
I.1	Analyse spectrale du rayonnement solaire.	4
I.2	Les trois composantes du rayonnement solaire.	5
I.3	Structure basique d'une cellule solaire.	7
I.4	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.	8
I.5	Schéma de trois cellules photovoltaïques associées en série.	8
I.6	Schéma de trois cellules photovoltaïques associées en parallèle.	9
I.7	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.	9
I.8	Système photovoltaïque autonome sans stockage.	11
I.9	Systèmes hybrides.	12
I.10	Système photovoltaïque connectés à un réseau.	12
I.11	Caractéristique du pompage au fil du soleil.	14
I.12	Caractéristique du pompage avec batteries.	14
I.13	Système de pompage photovoltaïque.	15
I.14	Moteur synchrone.	16
I.15	Moteur asynchrone.	17
I.16	Pompe centrifuge.	18
I.17	Pompe volumétrique.	18
I.18	Schéma d'un hacheur dévolteur.	19
I.19	Schéma d'un hacheur survolteur.	19
I.20	Convertisseur Buck-Boost.	20
.....
II.1	Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode.	24
II.2	Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.	26
II.3	Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.	26
II.4	Influence ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$.	27
II.5	Influence ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$.	27
II.6	Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$.	28
II.7	Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$.	28
II.8	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairage.	29

Liste des figures.

N° de figure	Titres	Pages
II.9	Différentes zones de la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	30
II.10	Caractéristique $P=f(U)$ puissance-tension d'une cellule PV.	30
II.11	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec la commande MPPT	33
II.12	Organigramme de l'algorithme MPPT (P&O).	34
II.13	Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$ avec la commande MPPT.	35
II.14	Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ avec la commande MPPT.	35
II.15	Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost).	36
.....
III.1	Représentation du moteur asynchrone dans l'espace électrique.	40
III.2	Modèle biphasé de la MAS dans le repère (d,q).	45
III.3	Onduleur triphasé.	48
III.4	Le schéma de l'interrupteur.	48
III.5	Tensions porteuse et modulante.	49
III.6	Commande F1, F2 et F3 de l'onduleur.	49
III.7	Tension simple et composé à la sortie de l'onduleur.	50
III.8	Constitution d'une pompe centrifuge.	50
III.9	La courbe H (Q) de la pompe centrifuge et la caractéristique de canalisation.	53
.....
IV.1	Bibliothèque SIMULINK.	56
IV.2	Schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous MATLAB/Simulink.	58
IV.3	L'éclairement E_s .	58
IV.4	Température de jonction T_j .	59
IV.5	Tension photovoltaïque V_{pv} .	59
IV.6	Vitesse de rotation ω .	59
IV.7	Débit d'eau Q.	60
IV.8	Couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r .	60

Liste des tableaux

N° de tableau	Titres	Pages
I.1	Historique de l'évolution de la technologie photovoltaïque.	6
I.2	Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.	10
.....
II.1	Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110-24.	25

Nomenclatures

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce mémoire sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Symbole	Nom	Unité
t	Temps.	s
U	Tension.	V
I	Courant.	A
P	Puissance.	W
F	Fréquence.	Hz
f_r	Fréquence de synchronisme.	Hz
R _s	Résistance série.	Ω
R _{sh}	Résistance shunt.	Ω
I _{cc}	Courant de court-circuit.	A
V _{co}	Tension de circuit ouvert.	V
g	Glissement.	%
Ω	Vitesse mécanique de rotation du rotor.	tr/s
Ω_s	Vitesse de synchronisme.	tr/s
H	Hauteur manométrique total.	m
P _{pv}	Puissance photovoltaïque.	W
V _{pv}	Tension photovoltaïque.	V
P _m	Puissance mécanique du moteur.	W
v	Vitesse moyenne du fluide	m/s

Constantes

Symbole	Nom	Valeur	Unité
K	Constante de Boltzmann.	$1.38 \cdot 10^{-23}$	J/k
Q	Charge de l'électron.	$1.6 \cdot 10^{-19}$	C
E _g	Énergie de gap.	$1.76 \cdot 10^{-19}$	e.v
ρ	La masse volumique de l'eau..	1000	Kg/m ³
g	Accélération de la pesanteur.	9.81	m/s ²

Glossaire

Acronyme	Signification
GPV	Générateur photovoltaïque.
MPPT	Maximum Power Point Triking.
MPP	Power Point Maximum.
PV	Photovoltaïque.
P&O	Perturbe et Observe.
STC	Standard Test Condition.
DC	Direct Current.
AC	Alternating Current.
FF	Fill Factor.
MAS	Machine ASynchrone.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions.

Introduction générale

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

Suite à l'augmentation des prix de production de l'énergie électrique à partir de l'énergie fossile, beaucoup de pays qui ne disposent pas des ressources naturelles mènent la voile à la recherche d'autres ressources énergétiques fiables, inépuisables, propres et surtout rentables ; tel que l'énergie renouvelable. En Algérie, malgré les immenses projets réalisés par la SONELGAZ pour couvrir et satisfaire le territoire national en électricité, plusieurs régions restent non connectées au réseau public d'électricité et le problème d'isolement persiste. Ce qui a poussé à investir dans le domaine des énergies renouvelables, particulièrement dans l'énergie solaire vu que notre pays en dispose avec abondance. Cela afin de combler ce déficit et répondre ainsi aux besoins du consommateur dans les régions isolées.

Cette énergie solaire est captée, puis transformée en électricité grâce à une technologie connue sous le nom de photovoltaïque, qui consiste à mettre en exposition au soleil des panneaux qui captent le rayonnement solaire et le transforment ainsi en une énergie électrique prête pour la consommation.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) commence à séduire dans diverses applications utiles et comme solutions de remplacement aux systèmes d'alimentations classiques (réseau électrique, groupe électrogène etc..) à titre d'exemple l'éclairage, le pompage, les télécommunications...etc. Le système (PV) dans sa constitution physique et matérielle, ne contient aucune pièce mobile ou amovible et ne nécessite aucun combustible, et donc aucun entretien sur cet aspect-là de sa constitution, par conséquent les coûts récurrents à l'installation sont relativement faibles, c'est pour cela que l'énergie photovoltaïque s'avère une solution plus qu'intéressante pour les habitations dans des endroits ruraux et isolés du réseau électrique avec une faible consommation en énergie électrique [1].

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à

condition d'être bien dimensionnée. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèles qui reflètent la réalité et qui se doivent d'être précis [2].

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. Mais le système qu'on a choisi est au fil du soleil, ce procédé consiste à pomper l'eau tant que le soleil est présent vers un réservoir qui assure la régulation de la consommation. Ainsi, le consommateur peut être alimenté même la nuit et pendant les journées nuageuses. L'eau pompée peut être employée dans beaucoup d'applications, telles que l'utilisation domestique et l'irrigation. Le système largement utilisé est celui dit au 'fil du soleil'. Ce système est le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. La pompe ne fonctionnera qu'en présence de lumière et dès que l'éclairement sera suffisant, elle atteindra la puissance demandée. La particularité des pompes solaires installées au fil du soleil est que les caractéristiques (débit, pression, rendement) sont en fonction de l'éclairement qui varie au cours de la journée et au cours des saisons [3].

Ce travail sera subdivisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre donnera une description générale des systèmes photovoltaïques, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant les systèmes de pompage.
- Dans le deuxième chapitre, nous abordons la modélisation des systèmes photovoltaïques ainsi que le convertisseur DC/DC (hacheur survolteur), ensuite nous allons nous intéresser à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque par la commande MPPT nous allons utiliser la méthode perturbation et observation.
- Dans le troisième chapitre, nous allons modéliser le groupe motopompe qui est composé d'une machine asynchrone et d'une pompe centrifuge.
- Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation et au dimensionnement du système de pompage photovoltaïque.
- Nous clôturerons notre travail par une conclusion générale qui fera office de récapitulatif.

Chapitre I :

Energie et systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, à leur impact sur l'environnement et aux déchets qu'ils engendrent.

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs Milliers de fois notre consommation globale d'énergie [4]. C'est pourquoi, l'homme cherche Depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la Planète, ceci est devenu réalisable grâce aux cellules photovoltaïques.

Ce phénomène fut découvert au 19^{ème} siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquerel]. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utilisé pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications [5].

Dans ce premier chapitre, Nous allons présenter des généralités sur l'énergie photovoltaïque, nous passerons ensuite au pompage photovoltaïque et ses types ainsi que leurs composants.

I.2. L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. On distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire :

- **Conversion en électricité** : énergie solaire photovoltaïque, qui utilise directement le rayonnement solaire pour transformer la lumière en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque.

- **Conversion en chaleur** : énergie solaire thermique, qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis la convertir en électricité [7].

I.3. Rayonnement solaire :

I.3.1. Spectre du rayonnement :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre (150.10^6 Km), la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante (180.10^6 GW), c'est pour cela que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie [8].

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm , sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, elle arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui l'absorbent.

La figure (I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi : [7]

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visible ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande infrarouge ($> 0.8 \mu\text{m}$).

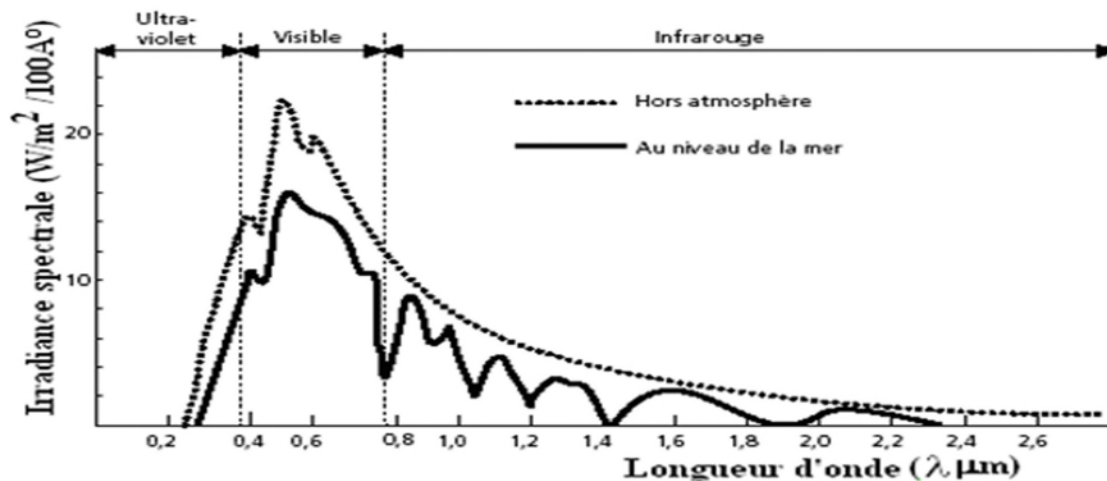


Fig. (I.1) : Analyse spectrale du rayonnement solaire. [7]

I.3.2. Différents types de rayonnement :

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçue sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watt/mètre carré (W/m^2). L'ensoleillement varie de zéro, au lever du soleil, à sa valeur maximale typiquement au midi solaire.

L'insolation peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé [9].

Il existe quatre types de rayonnement :

❖ **Le rayonnement direct :**

Il a fait un trajet dans l'atmosphère sans déviation géométrique, et correspond donc à la portion du rayonnement incident dans la direction d'éclairement du Soleil, Il est mesuré par un appareil appelé pyréliomètre.

❖ **Le rayonnement diffus :**

C'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 un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct.

❖ **Le rayonnement réfléchi dû à l'albédo :**

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. Sa Valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé.

Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont : les nuages, les surfaces de neige et de glace. Par exemple, l'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie Solaire sont réfléchis par ce type de neige. Il peut être mesuré par un Albédo mètre.

❖ **Le rayonnement global :**

C'est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et qui représente la Somme des composants précédents comme le montre la figure (I.2).

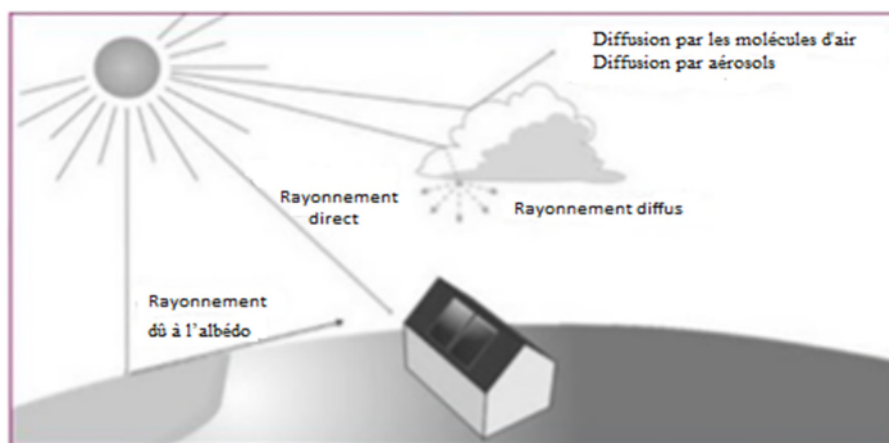


Fig. (I.2) : Les trois composants du rayonnement solaire [9].

I.4. L'énergie photovoltaïque :

I.4.1. Historique :

Le tableau ci-dessous décrit un bref historique de l'évolution de la technologie photovoltaïque [10] :

TAB. (I.1) : Historique de l'évolution de la technologie photovoltaïque.

Année	Découverte
1839	Découverte du processus d'utilisation de l'ensoleillement comme source d'énergie électrique par Edmond BECQUEREL. (Effet photovoltaïque)
1875	Premier article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs par Werner Von Siemens
1954	Mise au point d'une cellule photovoltaïque à haut rendement par Chapin, Pearson et Pearce comme solution au problème d'alimentation des satellites.
1958	Déploiement des premiers satellites alimentés par des cellules solaires.
1960	Généralisation de l'usage du photovoltaïque pour les satellites.
1970	Développement des satellites sur des applications terrestres et maritimes
1973	Construction de la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques à l'université du Delaware
1974	Construction du premier bâtiment exclusivement alimenté à Albuquerque au nouveau Mexique.
1980	Début d'une progression régulière et de la généralisation de la technologie photovoltaïque.
1983	Première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.
1985	Rendement >20% pour les cellules à base de Si sous rayonnement solaire.
1994	Rendements >30% avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA).
2002	Puissance mondiale cumulative du photovoltaïque atteint les 2000 MW.
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA).
2009	<ul style="list-style-type: none"> • Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA) . • Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA).

I.4.2. Définition :

Le terme photovoltaïque est d'origine grecque. Il est composé de deux parties : le terme « photos » voulant dire lumière et « Volt » qui est l'unité de la tension électrique, du nom Alessandro Volta. Le photovoltaïque est une énergie renouvelable issue du soleil, qui utilise directement le rayonnement solaire pour transformer la lumière en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque. L'électricité est produite à partir de la lumière du jour et pas seulement par l'exposition au soleil [6].

I .5. La cellule photovoltaïque :

I.5.1. Définition :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découvert par E. Becquerel en 1839.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

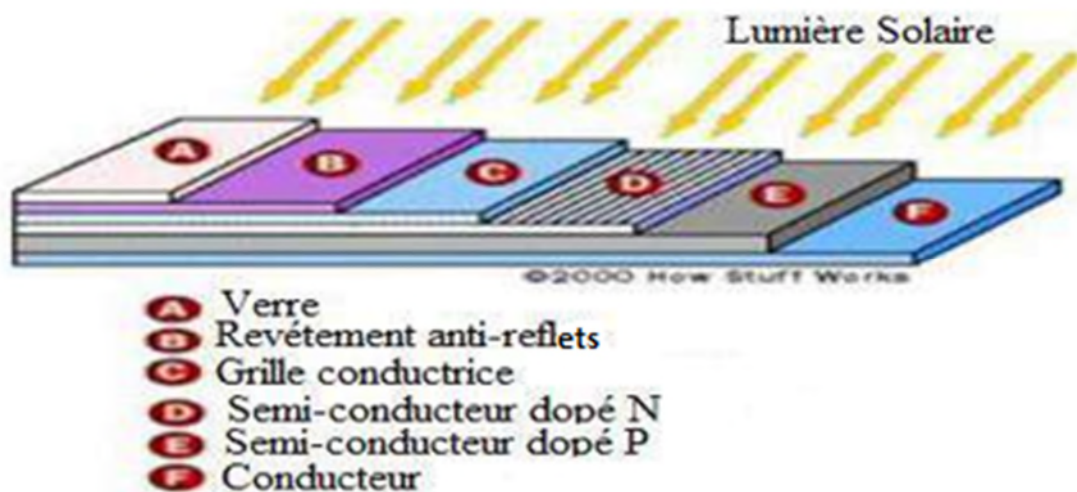


Fig. (I.3) : Structure basique d'une cellule solaire [7].

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet « photovoltaïque », qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [7].

La figure (I.4) représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

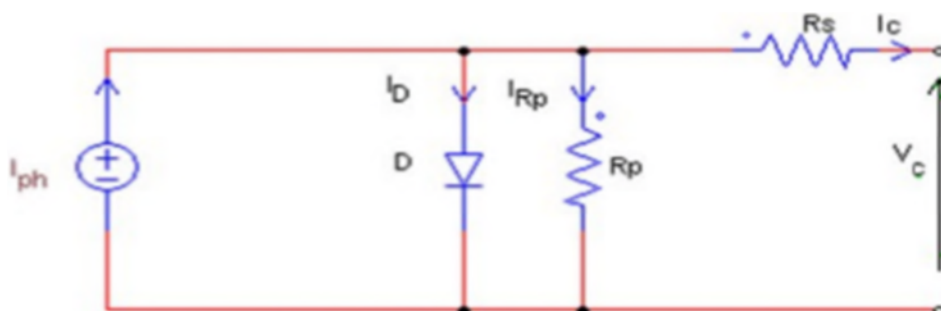


Fig. (I.4) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

- Un générateur de courant représentant la conversion du flux lumineux en énergie électrique.
- Une résistance série R_s représentant les contacts et les connexions.
- Une diode en parallèle représentant la jonction PN de la cellule.
- Une résistance parallèle en R_p représentant les pertes actives dans la diode.

I.5.1.1. Association des Cellules Photovoltaïques :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures (I.8-11) [6].

❖ Association en série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

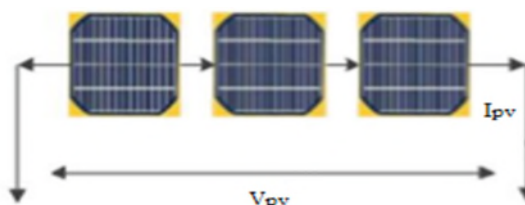


Fig. (I.5) : Schéma de trois cellules photovoltaïques associées en série [6].

❖ Association en parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la

même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

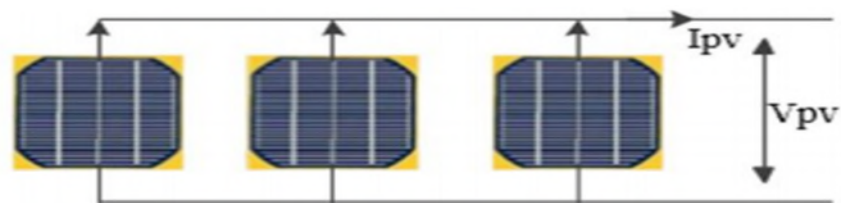


Fig. (I.6) : Schéma de trois cellules photovoltaïques associées en parallèle [6].

I.5.2. Le principe de fonctionnement :

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons libres (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{CO}).

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

La figure (I.14) représente le principe de fonctionnement [7].

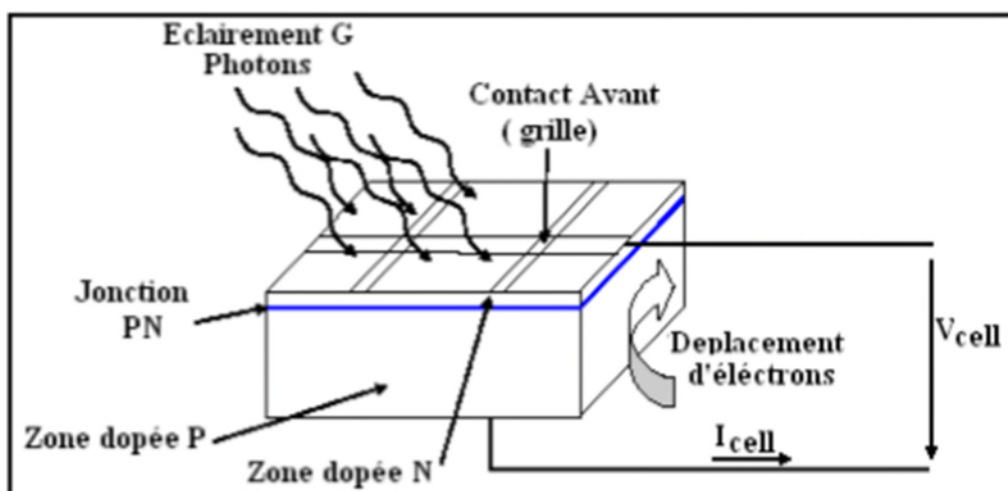
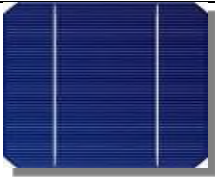


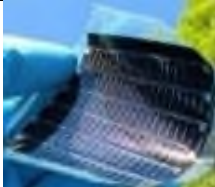

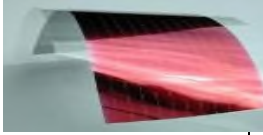


Fig. (I.7) : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [7].

I.5.3. Les différents types des cellules PV :

Dans le tableau ci-dessous on résume les différentes performances des technologies [11] :

TAB. (I.2) : Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium monocristalline	13-17%.	Bon rendement pour une cellule.	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication.	
Silicium poly-cristallin	11-15%.	Les cellules peuvent être de forme carrée (à coins arrondis pour le monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module	Rendement faible sous un faible éclairciment (plage d'utilisation : 200 à 1000 W/m ²).	
Silicium amorphe	5-9%.	Facile à fabriquer.	Mauvais rendement.	
CdTe	7-11%.	Absorbe 90% des photons Incidents.	Cadmium très polluant.	
CIGS	20%.	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés.	Manque de matière première.	
Cellules organiques	≤ 5%.	Faible cout de fabrication, Flexible.	Rendement encore trop bas.	

I.6. Différents types des systèmes photovoltaïques :

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau.

I.6.1. Les systèmes autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont :

- **Système autonome avec stockage :**

Le système autonome avec stockage est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques [12].

- **Système autonome sans stockage :**

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour le démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique. La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et fonction du rayonnement solaire [13].

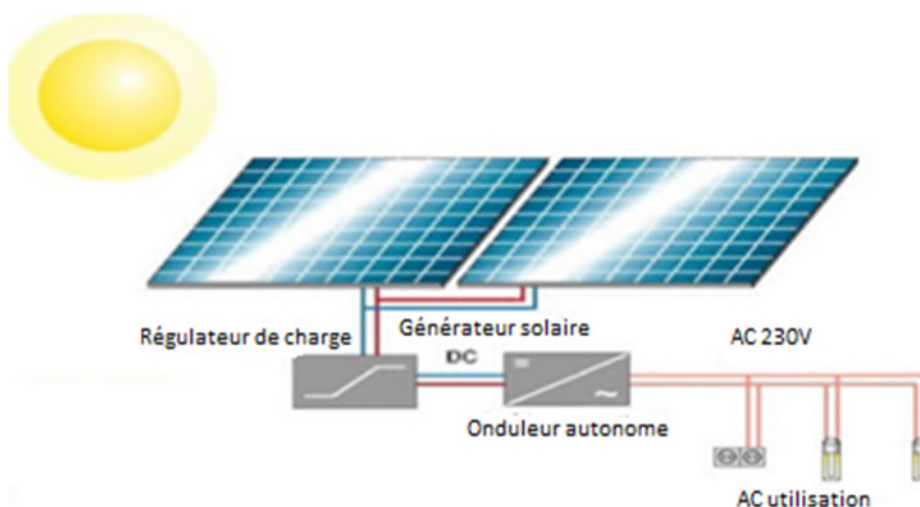


Fig. (I.8) : Système photovoltaïque autonome sans stockage [14].

I.6.2. Systèmes hybrides :

Le système hybride est la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables, on prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique [15].

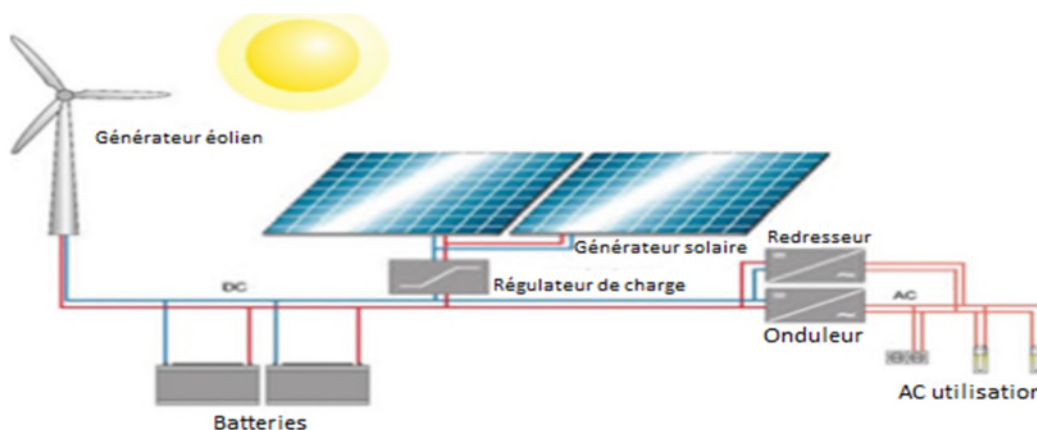


Fig. (I.9) : Systèmes hybrides [14].

I.6.3. Systèmes connectés à un réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique.

L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par des grandes centrales thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau [16].

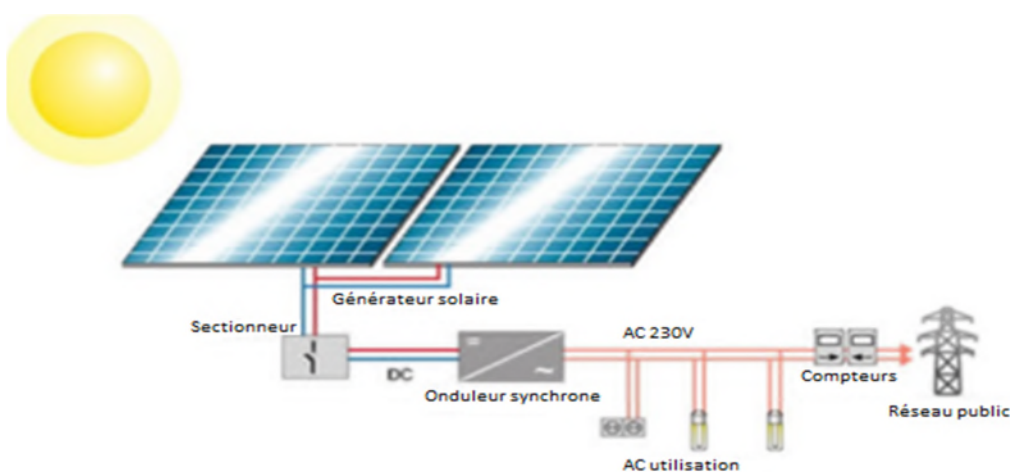


Fig. (I.10) : Système photovoltaïque connectés à un réseau [14].

I.6.4. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :

❖ Avantages :

- Une haute fiabilité.
- L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées.
- Les entretiens sont réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu [17].

❖ Inconvénients :

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [17].

I.7. Les systèmes de pompage photovoltaïque :

I.7.1. Les différents types de pompage :

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux techniques sont possibles : Dans la première technique, l'énergie solaire est consommée en « temps réel ». On parle alors d'un « pompage au fil du soleil ». Cette solution nécessite un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard le soir par exemple). La deuxième méthode consiste à utiliser un stockage de l'énergie, cette fois-ci via des batteries. L'énergie stockée la journée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau.

I.7.1.1. Pompage au fil de soleil :

Pour éviter un coût supplémentaire de l'installation, la plupart des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au 'fil du soleil' où le moteur d'entraînement est directement couplé au générateur sans stockage d'énergie (la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'éclairage). Cet arrangement est bien adapté aux charges non critiques telles que les pompes, qui ne nécessitent pas une opération continue durant toute la journée, aussi, les horaires de cette production ne sont pas compatibles avec les horaires de la majorité des activités agricoles.

(Elles commencent généralement à débiter vers 8h et fonctionnent à leur maximum de 11h à 13h et s'arrêtent vers 17h, soit environ 8 heures de fonctionnement par jour) [18].

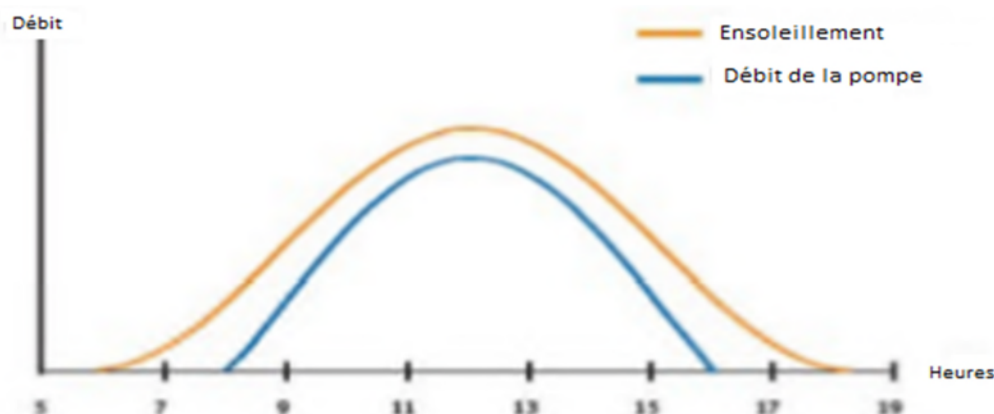


Fig. (I.11) : Caractéristique du pompage au fil du soleil [18].

- Le pompage au fil du soleil est suffisant, la pompe est mise en route.
- La nuit ou quand le rayonnement devient trop faible, la pompe s'arrête.

I.7.1.2. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement ou nécessite une intensité régulière, pour remédier à ces limitations, une batterie est ajoutée au système [18].



Fig. (I.12) : Caractéristique du pompage avec batteries [18].

- Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement.
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.

I.7.2. Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque :

Un système de pompage photovoltaïque est généralement constitué [19] :

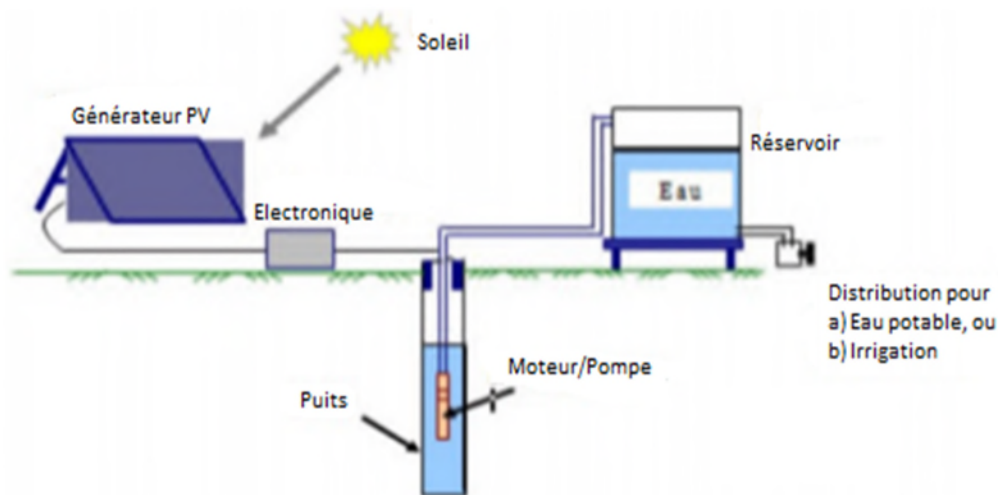


Fig. (I.13) : Système de pompage photovoltaïque [19].

- Un générateur photovoltaïque, constitué de modules photovoltaïques.
- Un équipement électronique de puissance (système de commutation, onduleur, hacheur, ...etc.).
- Un groupe motopompe, qui se décompose en deux parties : le moteur électrique et une pompe généralement centrifuge ou volumétrique.
- Autres éléments peuvent être associés à ce système, et qui dépendent de sa technique de conception, avec stockage ou sans stockage.

I.7.2.1. Le groupe motopompe :

Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe, Différents types de moteurs et de la pompe sont utilisés.

I.7.2.1.1. Moteur électrique :

Pour que les pompes fonctionnent elles ont besoin d'une énergie mécanique fournie par le biais d'un moteur qui fait convertir l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le choix du type du moteur dépend de plusieurs facteurs tels que la fiabilité, support technique, prix, ...etc.

❖ Moteur à courant alternatif :

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilowatts), une alimentation monophasée standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité [15].

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones.
- Les moteurs asynchrones.

Un moteur à courant alternatif est moins cher et plus facile à trouver sur le marché, mais Il exige l'utilisation d'un onduleur pour fonctionner avec une alimentation photovoltaïque.

a) Les moteurs synchrones :

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1 500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation [15].

Le terme de moteur synchrone regroupe toutes les moteurs dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant, ils ont des emplois spécifiques, par exemple là où une rotation uniforme est primordiale. Il présente des caractéristiques remarquables, qui sont, la vitesse constante quelle que soit la charge. Il peut fournir de la puissance réactive, ce qui le rend capable d'améliorer le facteur de puissance d'une installation. Il peut supporter des chutes de tension relativement importantes et ceci grâce aux possibilités de surexcitation sans décrocher. Par contre l'inconvénient du moteur synchrone est la difficulté lors de son démarrage [21].

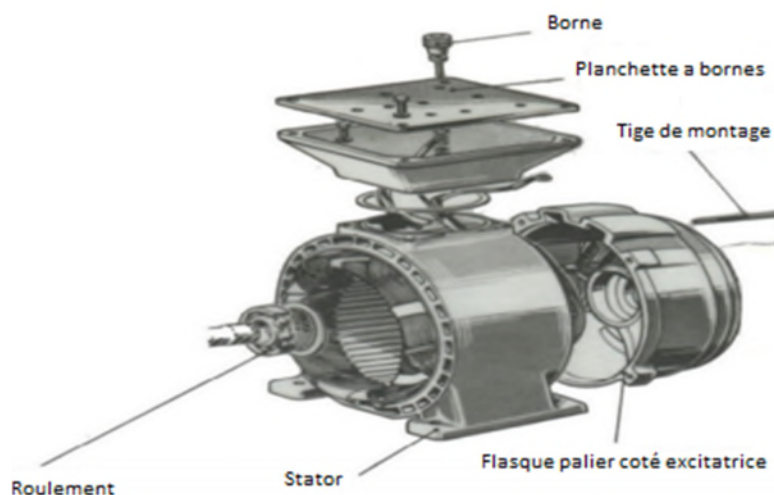


Fig. (I.14) : Moteur synchrone [21].

b) Les moteurs asynchrones :

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur [15].

Toutefois les machines asynchrones sont les plus utilisées devant les machines synchrones pour une application de pompage, grâce aux avantages suivants :

- Sa disponibilité dans le marché avec un coût bas.
- Son entretien qui est nul de fait de l'absence complète de pièces en frottement.
- Son utilisation augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation.
- Disponible pour une large plage de charge.
- Le rapport puissance / poids est élevé.

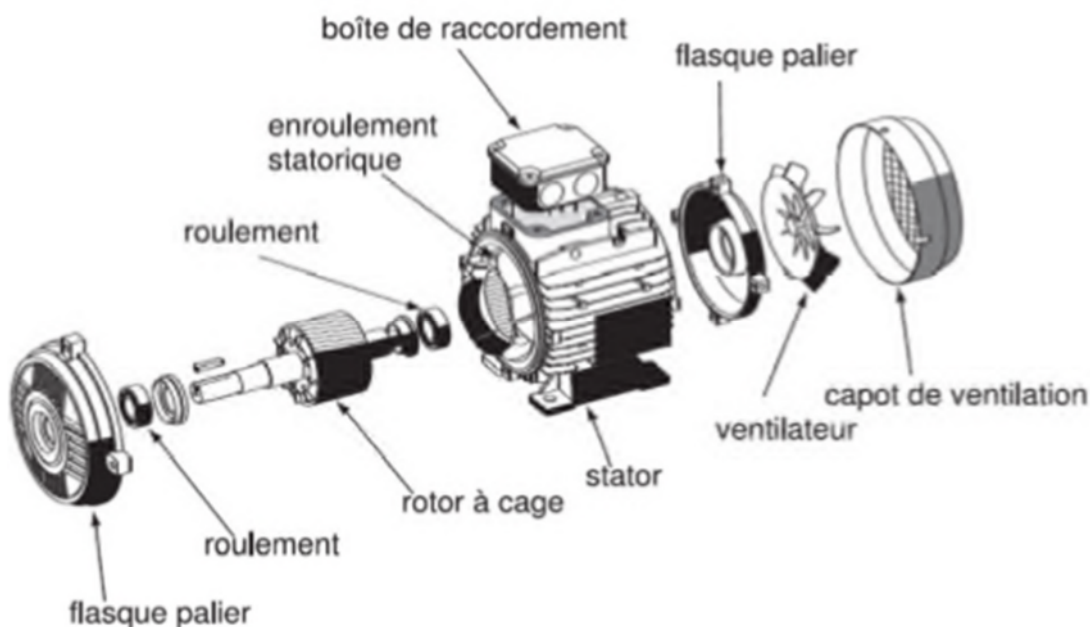


Fig. (I.15): Moteur asynchrone [21].

I.7.2.1.2. Les Pompes :

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type centrifuge ou volumétrique [22].

1) Pompe centrifuge :

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse.

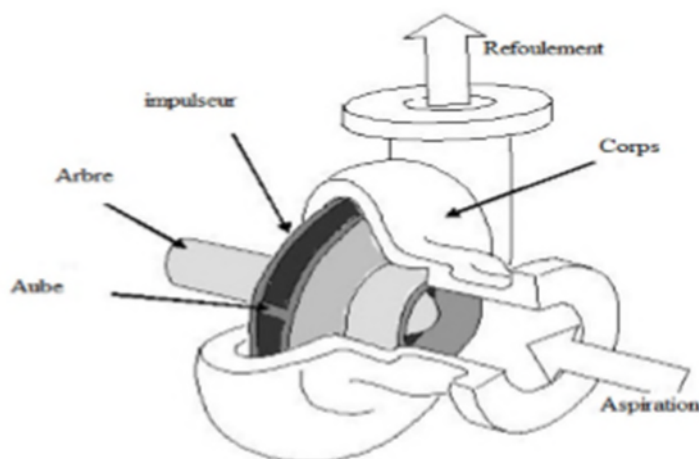


Fig. (I.16) : Pompe centrifuge [22].

2) Pompes volumétriques :

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à noyau plongeur, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, à palettes, à engrenages, ...etc.).

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

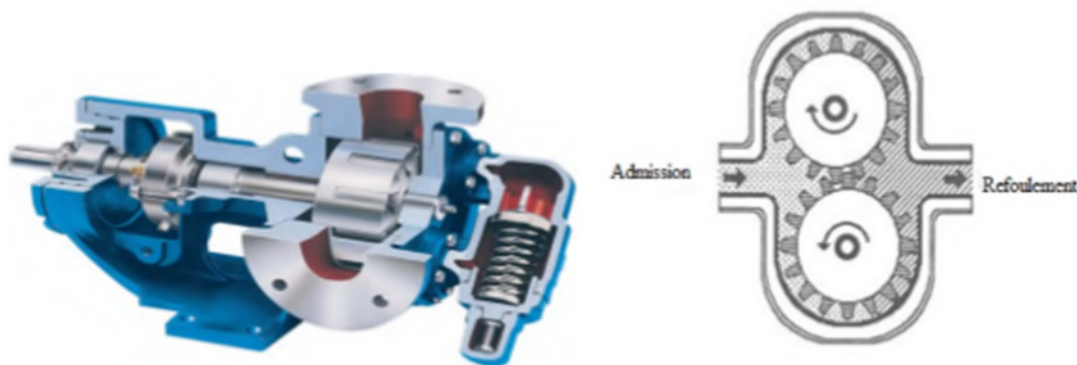


Fig. (I.17) : Pompe volumétrique [22].

I.7.2.2. Convertisseurs statique :

I.7.2.2.1. Définition des convertisseurs statique :

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue déférente, soit à une tension alternative [23].

I.7.2.2.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur) :

Le convertisseur « continu-continu » ou le hacheur a pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé [20].

➤ Hacheur dévolteur (Buck) :

Le hacheur dévolteur appelé aussi hacheur abaisseur au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. La figure (I.29) présente le Schéma d'un hacheur dévolteur.

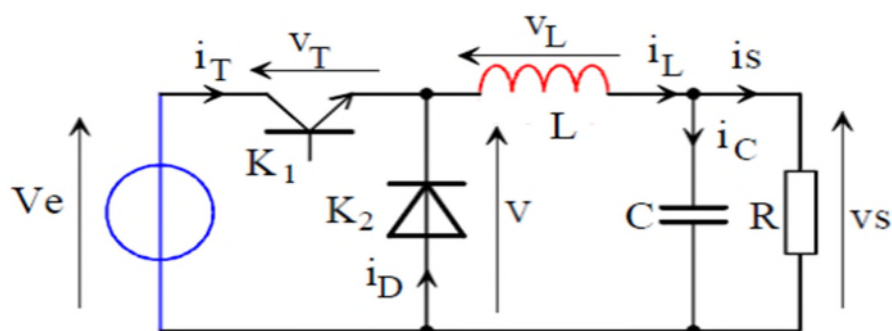


Fig. (I.18) : Schéma d'un hacheur dévolteur [24].

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.

➤ Hacheur survolteur (Boost) :

Le hacheur survolteur appelé aussi élévateur de tension dont la tension de sortie supérieur à la tension d'entrée. La figure (II.27) présente le Schéma d'un hacheur survolteur.

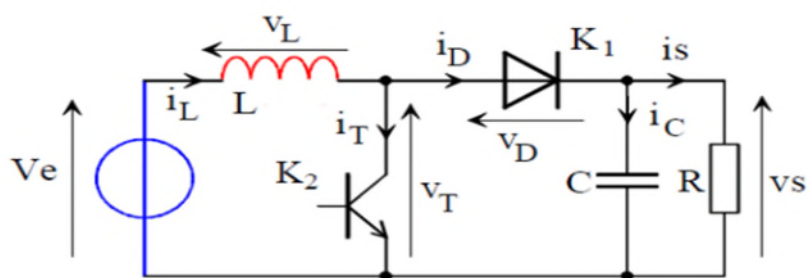


Fig. (I.19) : Schéma d'un hacheur survolteur [24].

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

➤ **Hacheur « survolteur-dévolteur » Buck-Boost :**

Le convertisseur « Buck-Boost » est également appelé hacheur « abaisseur-élevateur » de la tension. Il est caractérisé par son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique.

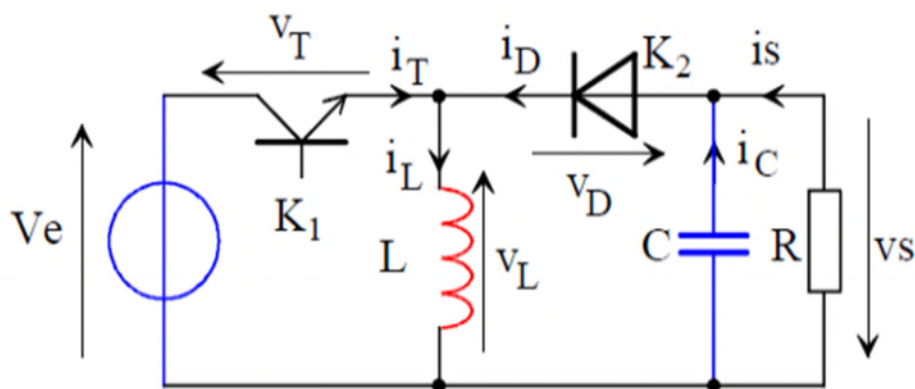


Fig. (I.20): Convertisseur Buck-Boost [24].

I.7.2.2.3. Convertisseur DC/AC (Les onduleurs) :

La fonction de l'onduleur est de transformer le courant continu produit par le générateur photovoltaïque, en courant alternatifs monophasé ou triphasé.

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques de puissance comme des IGBT (transistors de puissance).

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche générale sur l'énergie Photovoltaïque avec ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes Photovoltaïques dont nous nous intéressons particulièrement au système de pompage photovoltaïque au fil de soleil. Ce chapitre a été aussi consacré à l'établissement des généralités et définition du système de pompage photovoltaïque ainsi que la prise de connaissance des différents composants de ce système, nous permettant de pouvoir mieux assimiler et entamer la suite de ce travail de modélisation et de simulation.

Chapitre II :

Modélisation des systèmes photovoltaïques

II.1. Introduction :

Après avoir défini les différents composants du système photovoltaïque, nous présenterons les divers modèles du générateur photovoltaïque.

Un générateur photovoltaïque (GPV) ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires, montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques satisfaisantes telles que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert. Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque (GPV), il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent. De nombreux modèles mathématiques ont été développées pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations mathématiques caractérisant tous les éléments du système étudié. Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque. Nous présentons les différents modèles mathématiques des sous-systèmes du Système étudié.

II.2. Modélisation de l'irradiation :

II.2.1. Modèle d'éclairement sur une surface horizontale :

C'est le modèle d'un rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque au niveau du sol.

A. Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles n'ayant pas été dispersé par l'atmosphère. Pour des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct suivante [32] :

$$S_H(i) = 1367 \times C(j) \times \sin\left(h(i) \times \exp\left(\frac{-T_l}{0.9 \times 9.41 \times M(i)}\right)\right) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$S_H(i)$: flux direct horizontal.

$C(j)$: la correction de la distance terre soleil.

$h(i)$: hauteur du soleil.

T_L : facteur de trouble.

$M(i)$: Nombre d'aire masse.

B. Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus (D) par l'heure i est statistiquement donné par l'équation II.2 [25] :

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} \times C(j) - \sin[h(i) - 2] \times \exp\left[-0.5 \times \log\left(\frac{T_c}{22 \times M(i)^{-65}}\right)^2\right] \quad (\text{II.2})$$

C. Rayonnement global:

Un plan reçoit un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des deux compositions directe et diffuse :

$$\Phi_{GB} = S_H + D_H \quad (\text{II.3})$$

II.2.2 Modèle d'éclairement sur une surface inclinée :

Une surface inclinée par rapport à l'horizontale avec l'angle β reçoit une puissance énergétique répartie entre le direct et le diffus [25].

A. Rayonnement direct :

Soit un lieu de latitude φ , le flux est défini par :

$$R_b = \frac{S_B}{S_H} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \times \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta)} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

R_b : Rapport de flux direct.

S_B : Flux direct pour un plan d'inclinaison.

ω : Déclinaison du soleil.

δ : angle horaire du soleil.

Alors le flux direct pour le plan incliné B :

$$S_B = R_b \times S_H = \frac{\cos(\varphi - \beta) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \times \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta)} \times S_H \quad (\text{II.5})$$

B. Rayonnement diffus :

Le flux à une inclinaison β et latitude j capté par une surface orientée face au Sud-Est est donné par le modèle suivant :

Pour l'heure i : Nous utilisons le modèle « WILLMOTT » [25].

$$D_b = D_H \times \left[F(i) \times \frac{1+\cos(\beta)}{2} + (1 - F(i)) \times \frac{\cos \theta(i)}{\sin h(i)} \right] \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$F(i) = 1 - K_T(i) \times \left[1 - \frac{S_H}{G_H} \right] \quad (\text{II.7})$$

$$K_T(i) = \frac{\theta_{GH}(i)}{\theta(i)} \quad (\text{II.8})$$

Et :

$K_T(i)$: Coefficient de sérénité.

$\theta(i)$: Angle d'incidence du rayon direct par rapport au incliné.

C. Rayonnement global :

Il est la superposition des deux flux précédents dont il est la somme des deux composantes :

$$\Phi_{GB} = S_B + D_b \quad (\text{II.9})$$

On peut calculer le flux solaire global par la relation suivante pour un plan incliné d'un angle β .

$$\Phi_{GB} = R \times \Phi_{GH} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

R : Rapport du flux global.

D'où :

$$R = \frac{\Phi_{GB}}{\Phi_{GH}} = \left(1 - \frac{D_H}{\Phi_{GH}} \right) \times R_b + \frac{D_H}{\Phi_{GH}} \times \left(\frac{1+\cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.11})$$

En connaissant le flux global et les composantes du flux pour un plan horizontal on peut déterminer le flux global incliné reçu par un plan :

$$\Phi_G = R \times \Phi_{GH} \quad (\text{II.12})$$

II.3. Modélisation Du Générateur Photovoltaïque :

➤ **Modèle à une diode :**

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacte et de connexions, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN [26].

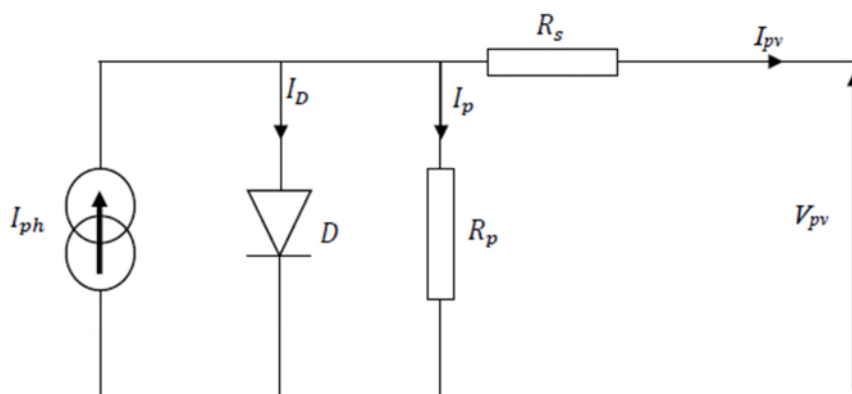


Fig. (II.1) : Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode [26].

A partir du schéma (II.1) le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (II.13)$$

Avec :

I_{ph} : Photo courant.

I_D : Courant de diode.

I_p : Le courant shunt.

$$I_{ph} = P_1 \times E_s \times [1 + P_2 \times (E_s - E_{sref}) + P_3 \times (T_j - T_{jref})] \quad (II.14)$$

Avec :

E_{sref} : Représente l'éclairement sous condition stc=1000w/m².

E_s : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface.

T_{jref} : Représente la température sous condition stc=25^oc.

T_j : Température de jonction.

$P_1 ; P_2 ; P_3$: paramètres constants.

$$I_D = I_S \times \left[\exp\left(\frac{Q \times (V_{PV} + R_S \times I_{PV})}{A \times K \times N_S \times T_j}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.15})$$

Avec :

I_S : courant de saturation de la diode.

Q : Charge de l'électron ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$).

K : constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{j/k}$).

A : coefficient d'idéalité de la cellule.

N_s : nombre de cellules connectées en série.

$$I_S = P_4 \times T_j^3 \times \exp\left[\frac{-E_g}{K \times T_j}\right] \quad (\text{II.16})$$

Avec :

P_4 : paramètre constant.

$$I_p = \frac{V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{R_P} \quad (\text{II.17})$$

Ainsi, l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante :

$$I_{pv} = P_1 \times E_S \times [1 + P_2 \times (E_S - E_{Sref}) + P_3 \times (T_j - T_{jref})] - P_4 \times T_j^3 \times \exp\left[\frac{-E_g}{K \times T_j}\right] \times \left[\exp\left(\frac{Q \times (V_{PV} + R_S \times I_{PV})}{A \times K \times N_S \times T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{R_P} \quad (\text{II.18})$$

➤ **Détermination des paramètres du modèle :**

L'identification des paramètres P_1, P_2, P_3 et P_4 se fait à partir de mesures expérimentales Et de paramètres standards (STC) $E_s=1000 \text{W/m}^2, T_a=25^\circ \text{C}$.

Tableau (II.1) : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110-24.

P_1	P_2	P_3	P_4	R_s	R_p	A	N_s
0.00345	0.58×10^{-5}	-0.336×10^{-4}	31.2367	0.6	150	1	72

II.3.1. Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques du module photovoltaïque :

II.3.1.1. Influence de la température :

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ($E_s=1000\text{W/m}^2$) pour différentes température (15°C , 25°C , 35°C , 45°C et 55°C). Les résultats sont montrés sur les figures (II.2-3) :

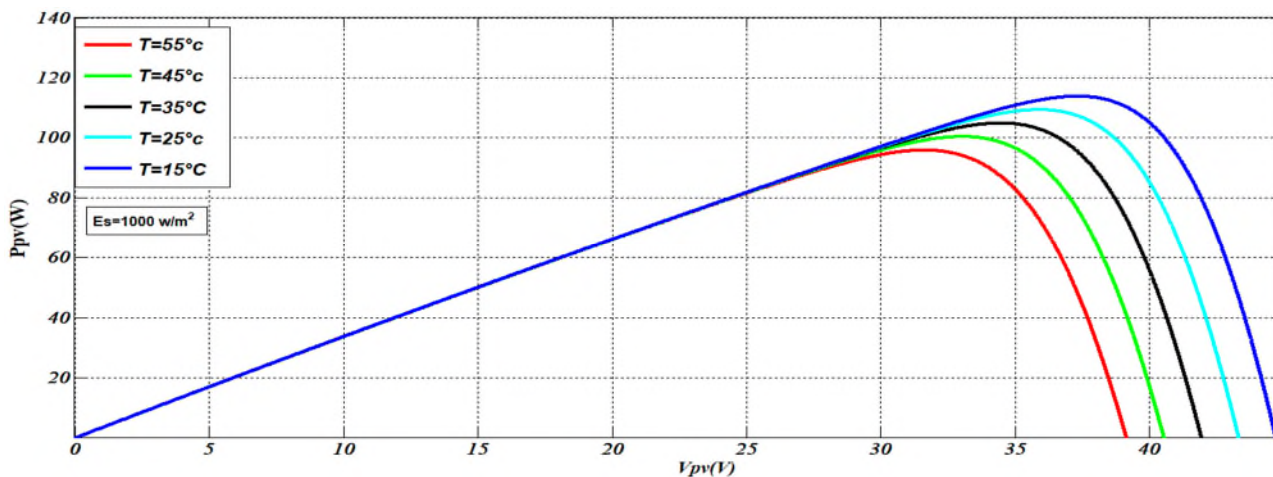


Fig. (II.2) : Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

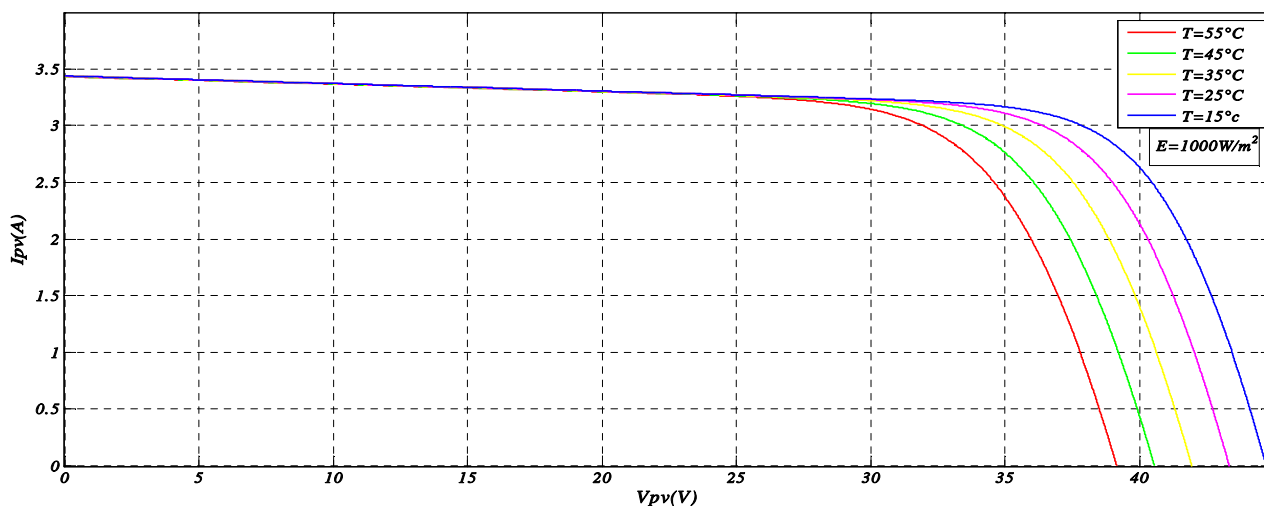


Fig. (II.3) : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- ✓ En faisant varier la température de (15°c à 55°c), nous remarquons que le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance P_{pv} sont presque dépendants de la température.
- ✓ En revanche, la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue lorsque la température augmente.

II.3.1.2. Influence de l'éclairement :

Nous avons maintenu une température constante (25°C) à différents éclairements. Les figures (II.4-5) montrent les résultats de simulations :

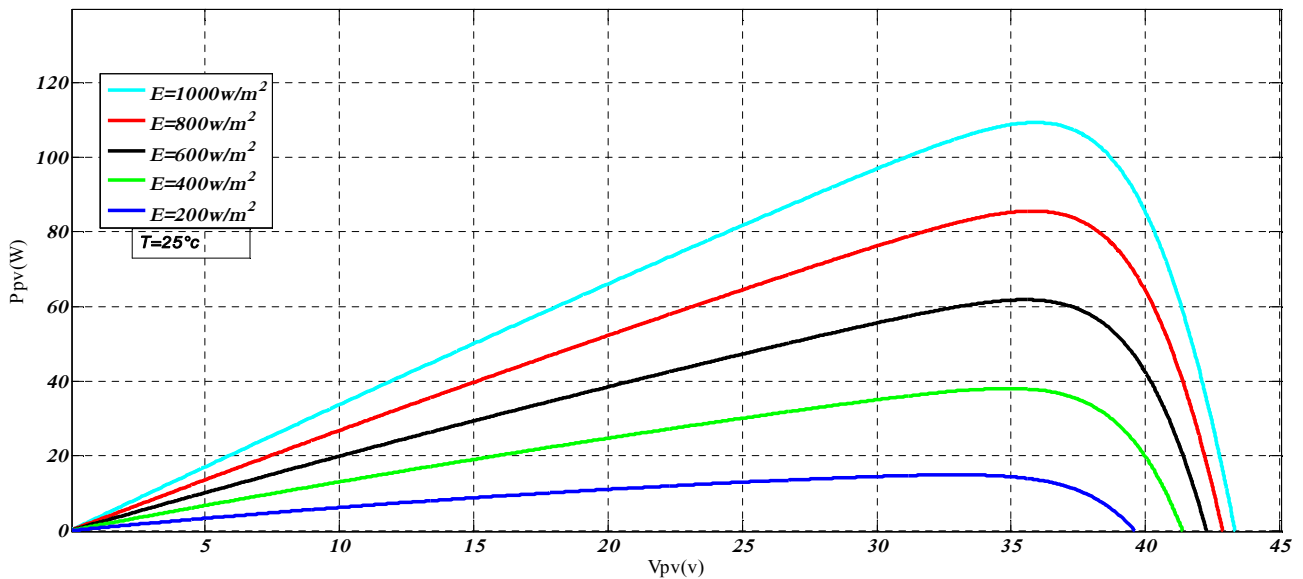


Figure (II.4) : Influence ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$.

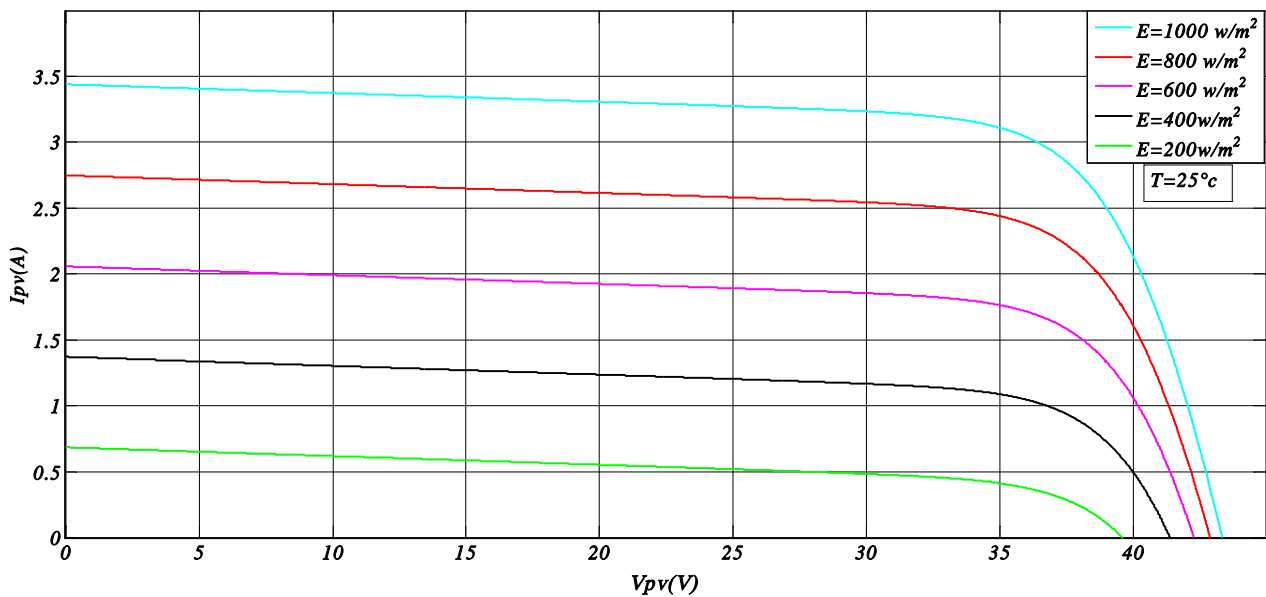


Fig. (II.5) : Influence ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- ✓ Le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance varient proportionnellement à l'ensoleillement E .
- ✓ La tension à vide V_{oc} varie peu avec l'ensoleillement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

II.3.1.3. Influence de l'éclairement et la température :

Les figures (II.6-7) montrent la variation de la température et de l'éclairement au même temps.

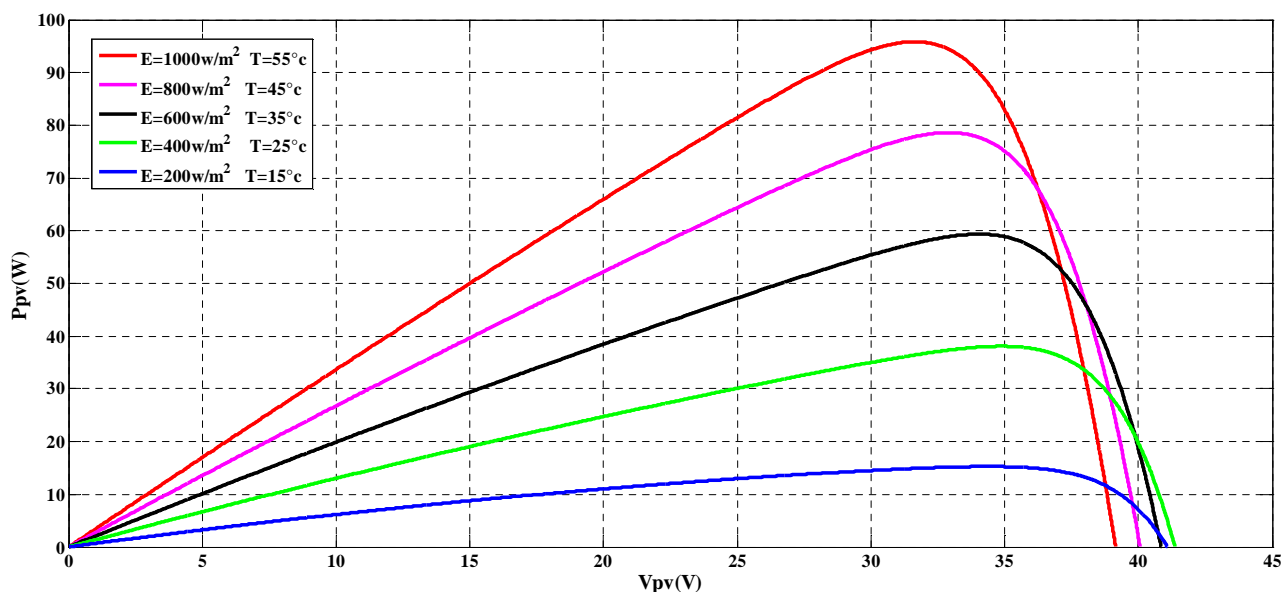


Figure (II.6) : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$.

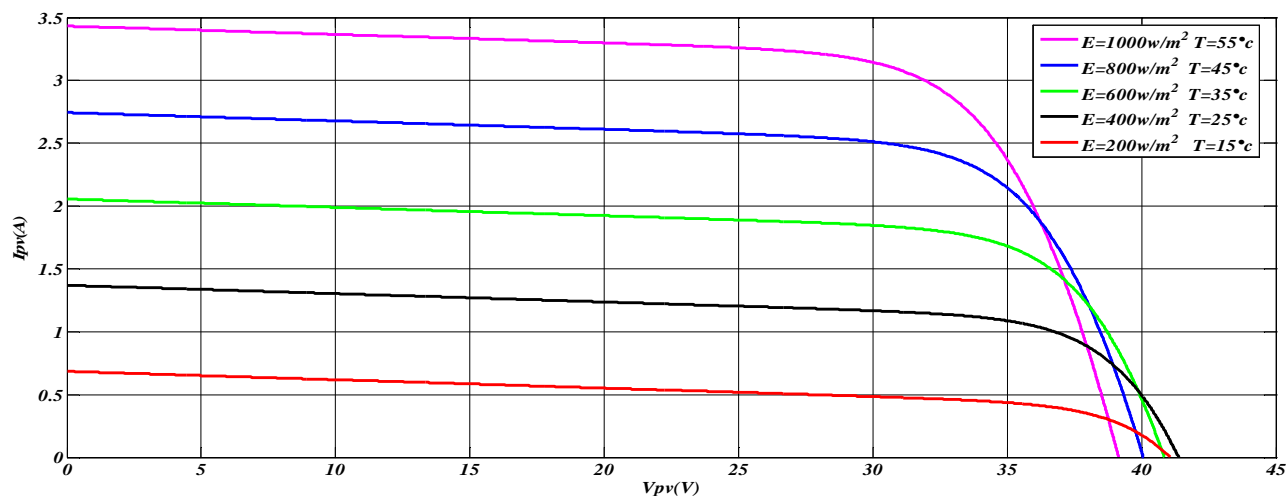


Figure (II.7) : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$.

En observant la figure II.6, on remarque que lorsque la température et l'ensoleillement atteint la valeur la plus élevée la valeur de la puissance P_m est grande tandis que la valeur de la tension V_{co} est la plus petite. et quand on diminue l'ensoleillement et la température on remarque que la puissance diminue et la tension augmente. C'est le même constat pour le courant dans la figure II.7.

II.4. Modélisation De la cellule solaire :

II.4.1. La courbe courant-tension d'une cellule solaire :

La courbe de la caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement donné (répartition du rayonnement donnée, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée).

En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement [27].

A température fixée, pour les deux régimes (sous obscurité et sous éclaircissement) la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :

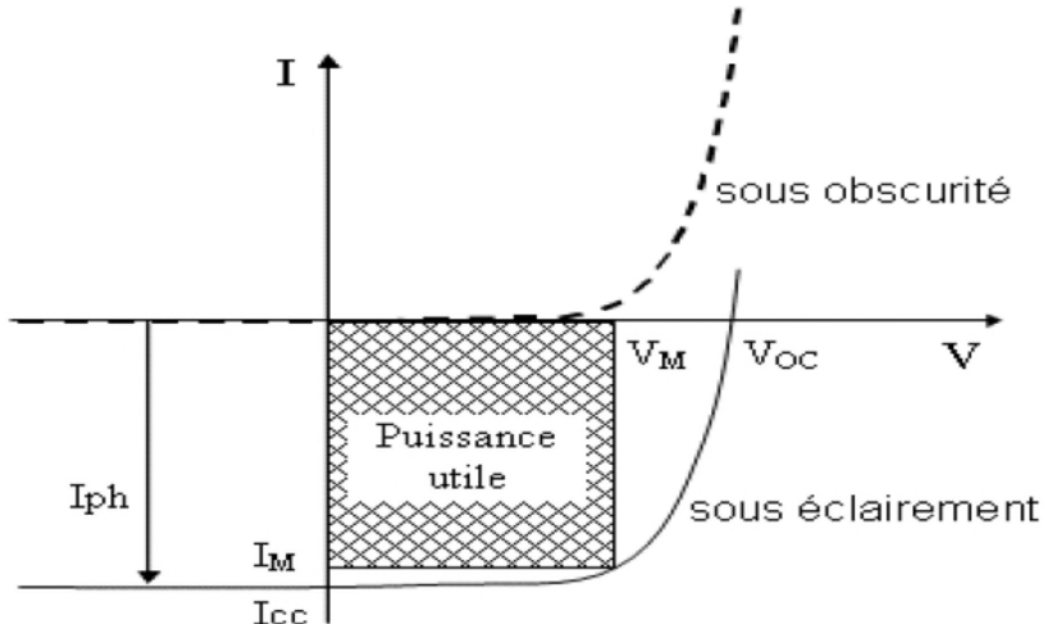


Fig. (II.8) : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclaircissement [27].

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{cc} (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension maximale de circuit ouvert).

On peut regrouper trois zones essentielles :

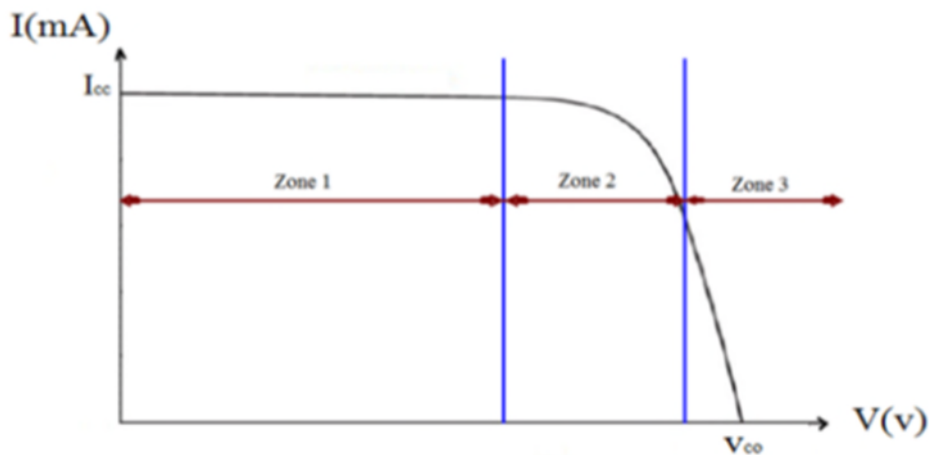


Fig. (II.9) : Différentes zones de la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque [27].

La zone 1 : le courant reste constant quelle que soit la tension. Dans cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone 2 : correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone 3 : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilable à un générateur de tension.

II.4.2. La caractéristique puissance-tension d'une cellule PV :

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ($P = U \times I$) en fonction de la tension U , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension.

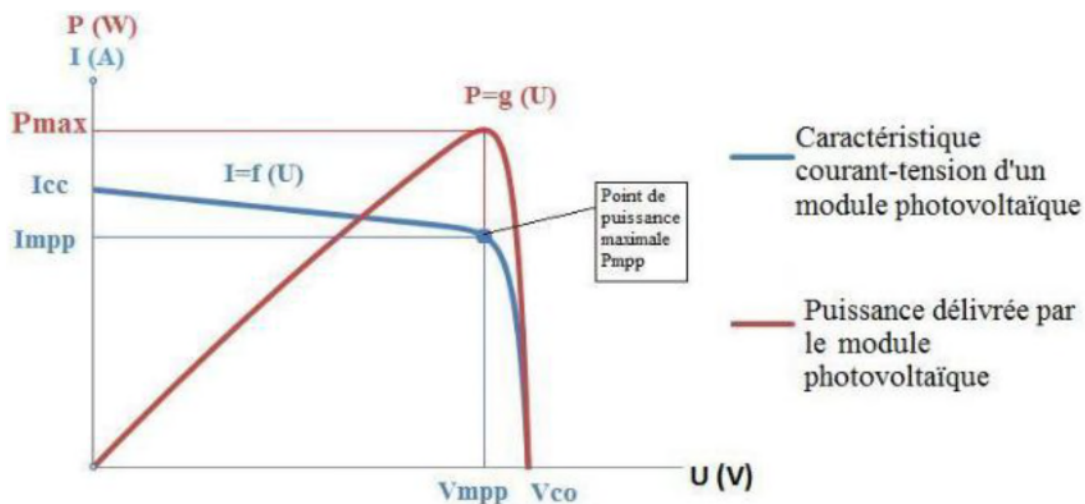


Fig. (II.10) : Caractéristique $P=f(U)$ puissance-tension d'une cellule PV [28].

- **Le point de puissance maximale P_{mpp} (Maximum Power Point) :** correspond aux coordonnées V_{mpp} (tension où le panneau produit son maximum de puissance), et I_{mpp} (intensité de courant correspondant à la tension V_{mpp}). C'est le point de la puissance que le panneau solaire est capable de produire par un ensoleillement optimal.

II.4.3. Le courant de court-circuit I_{cc} :

C'est la plus grande valeur du courant généré par une cellule pour une tension nulle ($V_{pv}=0$).

II.4.4. La tension de circuit ouvert V_{co} :

Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_d=I_{ph}$) quand ($I_{pv}=0$). Elle reflète la tension de la cellule en l'absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par [28] :

$$V_{CO} = \frac{A \times K \times T_j}{q} \times \ln\left(\frac{I_{CC}}{I_S}\right) = V_{th} \times \ln\left(\frac{I_{CC}}{I_S}\right) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$V_{th} = \frac{A \times K \times T_j}{q} \quad (\text{II.20})$$

Et :

A : Facteur idéal de la jonction.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{th} : Tension thermique.

II.4.5. Facteur de Forme FF :

On appelle facteur de forme (FF) le rapport de la puissance électrique maximale au produit $I_{cc} \times V_{co}$, et qui définit l'efficacité de la cellule solaire donné par la relation suivante [30] :

$$FF = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (\text{II.21})$$

On a :

$$P_{mpp} = V_{mpp} \times I_{mpp} \quad (\text{II.22})$$

Alors :

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

V_{mpp} : Tension de point de puissance maximale.

I_{mpp} : Courant de point de puissance maximale.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

P_{mpp} : Puissance de point de puissance maximale.

II.4.6. Le rendement de conversion d'énergie (η) :

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement solaire incident sur la surface S de la cellule. Il est donné par la relation suivante [29] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (\text{II.24})$$

D'après la relation (II.23) on a :

$$P_{mpp} = FF \times I_{CC} \times V_{CO} \quad (\text{II.25})$$

$$P_{in} = E_S \times S \quad (\text{II.26})$$

$$\eta = \frac{FF \times I_{CC} \times V_{CO}}{E_S \times S}. \quad (\text{II.27})$$

Avec :

P_{in} : puissance du flux lumineux incident.

S : La surface effective des cellules.

II.4.7. La température de jonction :

La température de jonction T_j de la cellule est donnée par la relation suivante [29] :

$$T_j = T_a + \frac{NOCT-20}{800} \times E_S \quad (\text{II.28})$$

Avec :

NOCT : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a : Température ambiante.

II.5. Commande MPPT :

La commande MPPT, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [30].

II.5.1. Principe de la commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximal (I_{mpp} , V_{mpp}) [5].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II.11).

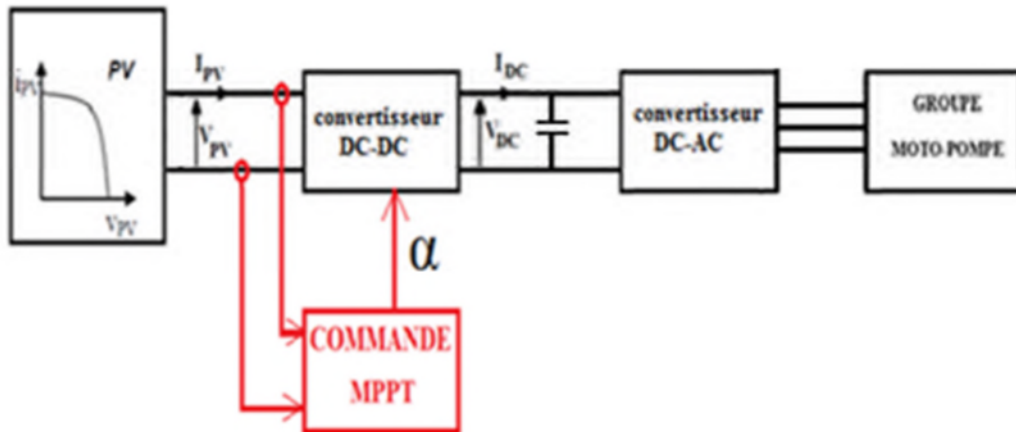


Fig. (II.11) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec la commande MPPT [5].

II.5.2. Commande perturb & observe (P&O) :

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

En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k-1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [30].

Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. La figure (II.12) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure (II.11), la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$

est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

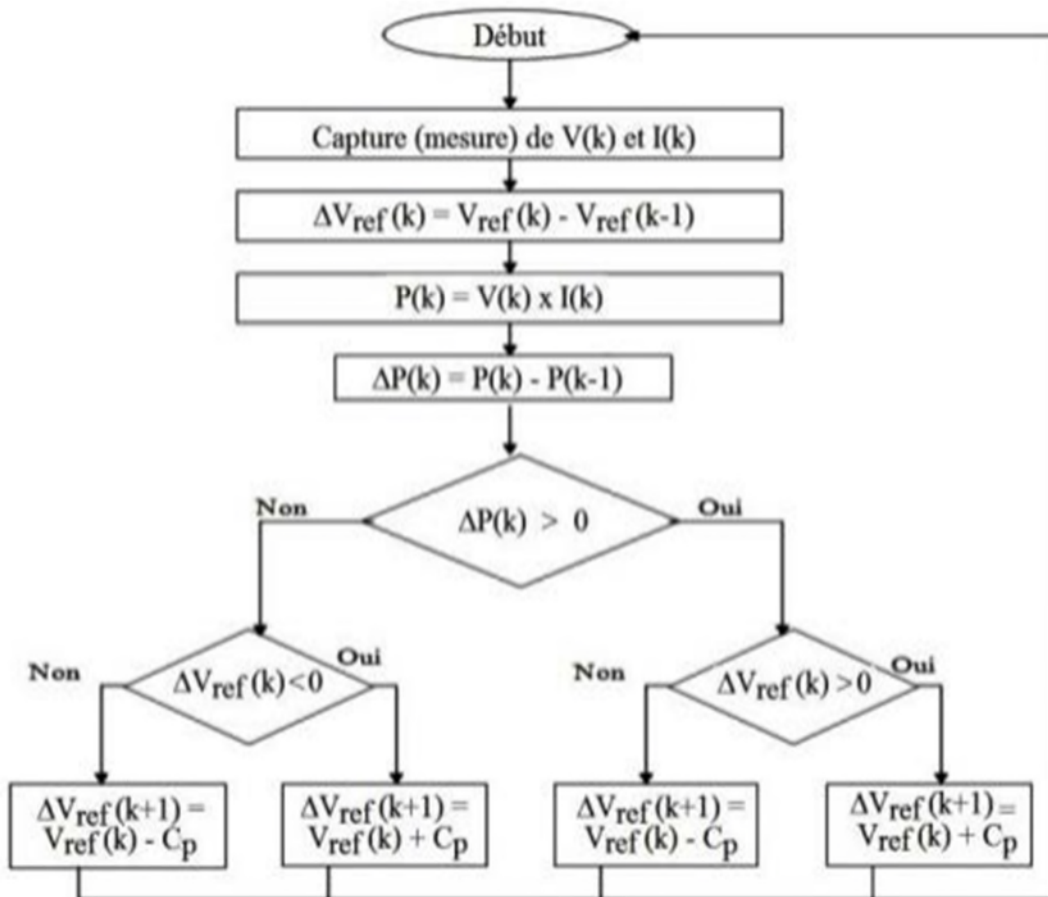


Fig. (II.12) : Organigramme de l’algorithme MPPT (P&O) [30].

Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d’une perturbation simple C_p .

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

$$v_k = v_{(k-1)} + \Delta_v \times \text{signe} \left(\frac{dp}{dv} \right) \quad (\text{II.29})$$

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

II.5.3. Simulation du générateur photovoltaïque avec la commande MPPT :

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque avec l'application de l'algorithme d'optimisation MPPT, pour une extraction maximale de la puissance pour toute variation de l'ensoleillement et de la température.

La figure (II.13) représente les caractéristiques $P=f(V)$ pour une variation de l'ensoleillement et une température constante puis variation de la température et l'ensoleillement constant.

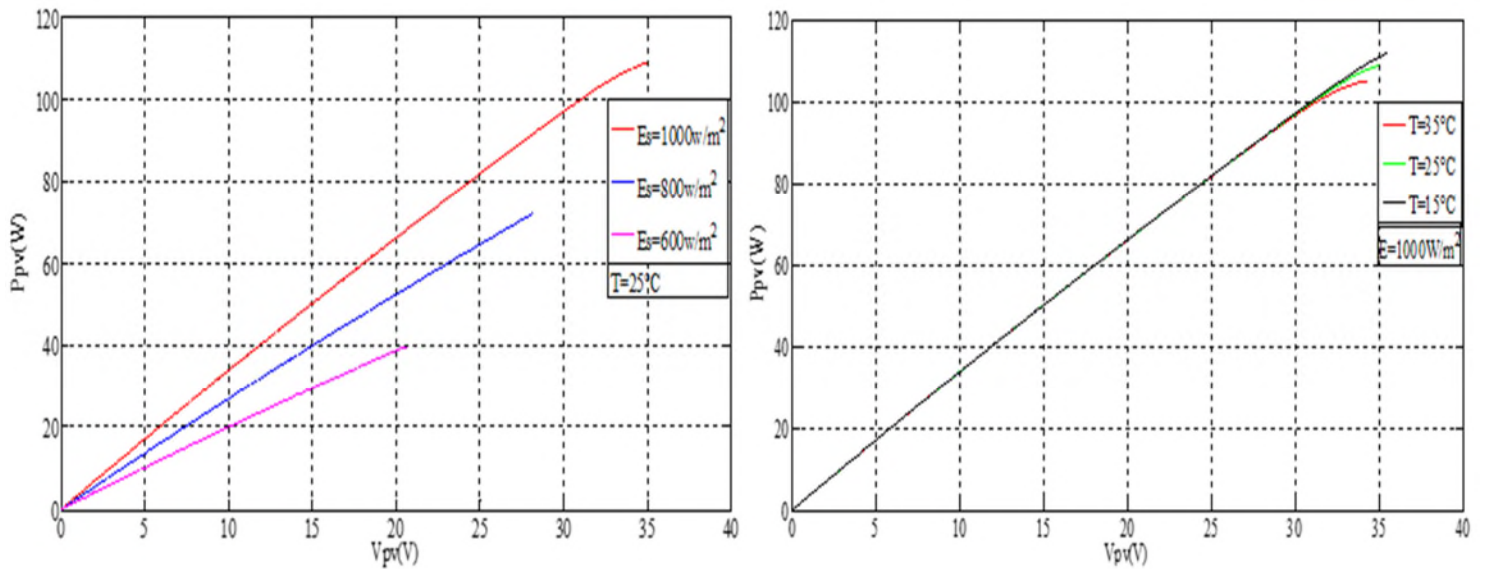


Fig. (II.13) : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$ avec la commande MPPT.

La figure (II.14) représente les caractéristiques $I=f(V)$ pour une variation de l'ensoleillement et une température constante puis variation de la température et l'ensoleillement constant.

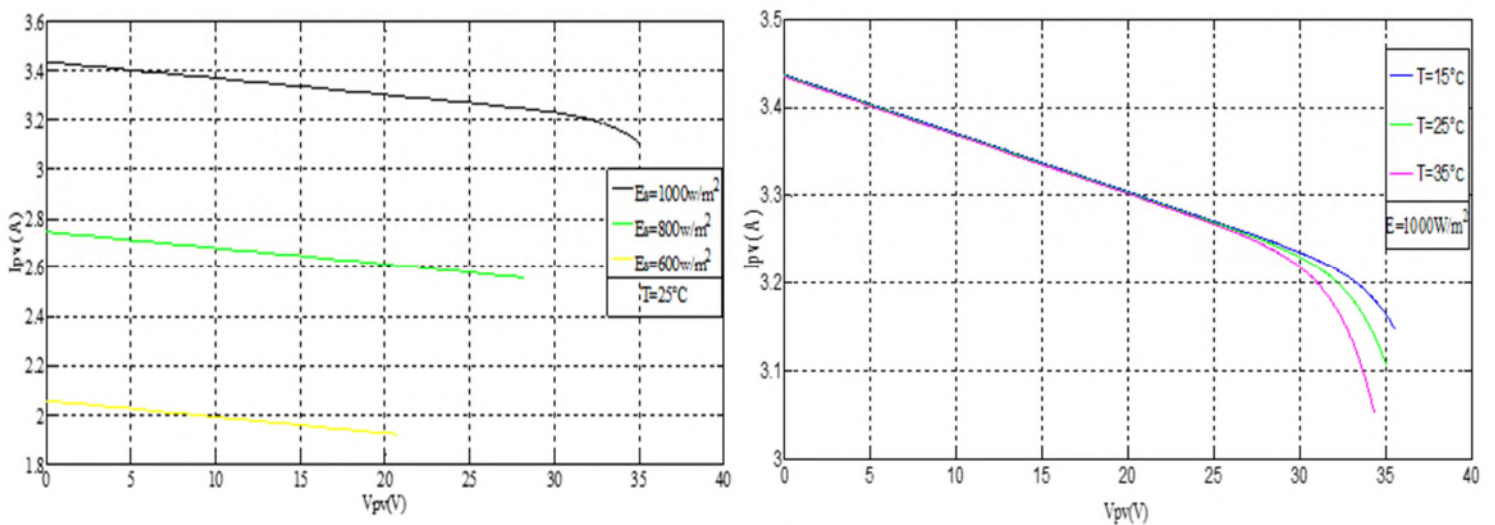


Fig. (II.14) : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ avec la commande MPPT.

II.6. Modélisation du hacheur élévateur de tension (Boost) :

Les convertisseurs statiques DC-DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie généré par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Le convertisseur boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. La figure (II.15) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.

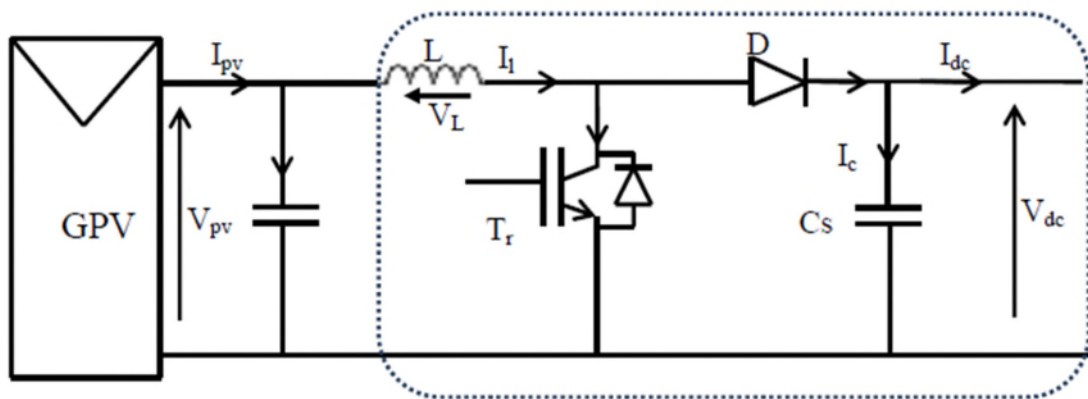


Fig. (II.15) : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost) [31].

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant (T_r est passant) et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha.T$ (α rapport cyclique, et compris entre 0 et 1). La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv}$, le courant traversant l'inductance augmente linéairement. Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de $\alpha.T$ à T .

La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv} - V_{dc}$, dans cette phase le condensateur C_s se charge au même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [31]. Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_1}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (II.30)$$

$$(1 - \alpha)I_1 = C_s \frac{dV_C}{dt} + I_{dc} \quad (II.31)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.32).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{PV} \quad (II.32)$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_1 \quad (\text{II.33})$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé la modélisation des différents composants de système photovoltaïque tel que le générateur photovoltaïque, Les cellules solaires. Nous avons présenté en détails les équations qui forment les modèles d'un générateur Photovoltaïque. Pour lequel nous avons opté pour le modèle à une seule diode qui présente des simplifications dans les calculs.

L'objectif est de fournir toutes les informations nécessaires pour élaborer ce modèle sous Matlab/Simulink.

Chapitre III :

Modélisation du groupe motopompe

III.1. Introduction :

Après avoir étudié et cité les différents composants du système de pompage photovoltaïque, nous procédons à la modélisation de notre système.

La modélisation d'un système physique donné consiste à établir son modèle mathématique afin de le simuler sous un logiciel mathématique et mieux comprendre son fonctionnement et de faciliter son dimensionnement. L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiables afin de bien dimensionner le système global à étudier.

Pour qu'une pompe fonctionne il faut un entraînement qui produit sa rotation, le choix de l'entraînement de la pompe dépend de plusieurs facteurs tels que le type de la pompe, la puissance et son application.

Pour le pompage photovoltaïque, il faut un onduleur pour commander la vitesse, ce qui augmentera le coût, mais l'utilisation d'un onduleur avec le moteur asynchrone conduit pratiquement aux mêmes prix qu'avec l'utilisation d'un moteur à courant continu. Parmi les machines à courant alternatif utilisées, la machine asynchrone est la plus simple des machines tournantes, et la plus économique. Elle trouve un domaine d'application très étendu & très vaste.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de la machine asynchrone, on définit les équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la MAS toute en spécifiant le modèle à utiliser pour modéliser notre système d'équations, nous allons, pour cela, exploiter le modèle de Park et aussi présenter la modélisation de la pompe centrifuge et des convertisseurs statiques.

III.2. La machine asynchrone :

III.2.1. Principe de fonctionnement :

Les trois enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation de synchronisme. Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant. Ils sont alors traversés par des courants de Foucault induits d'après la loi de Lenz (les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur donnent naissance). Les enroulements du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants

est alors possible. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation. De principe, la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme $f_r < f_s$ [32].

III.2.2. Le glissement :

On définit le glissement par l'expression :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{III.1})$$

On l'exprime en %, ordre de grandeur 3 à 5 % (pour le nominal)

Le moteur asynchrone est donc caractérisé par :

- ✓ La présence d'un bobinage polyphasé alimenté par une source extérieure au stator.
- ✓ Les trois bobinages rotoriques sont en court circuit.

III.2.3. Modélisation de la MAS :

III.2.3.1. Hypothèses simplificatrices :

Nous avons posé des hypothèses simplificatrices [33] :

- Entrefer constant, l'effet des encoches est négligeable.
- Distribution spatiale et des forces magnétomotrices d'entrefer sinusoïdales.
- Circuit magnétique est non saturé et parfaitement feuilleté (au stator comme au rotor).
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.
- La répartition de l'induction le long de l'entrefer est sinusoïdale.

III.2.3.2. Modèle de moteur asynchrone triphasé :

Le moteur asynchrone représenté par la figure (III.1) se compose [34] :

- ✓ D'un circuit statoriques fixe comportant trois phases identiques décalées entre elles de 120° .
- ✓ D'un circuit rotorique mobile comportant trois phases identiques en court circuits décalées entre elles de 120° .

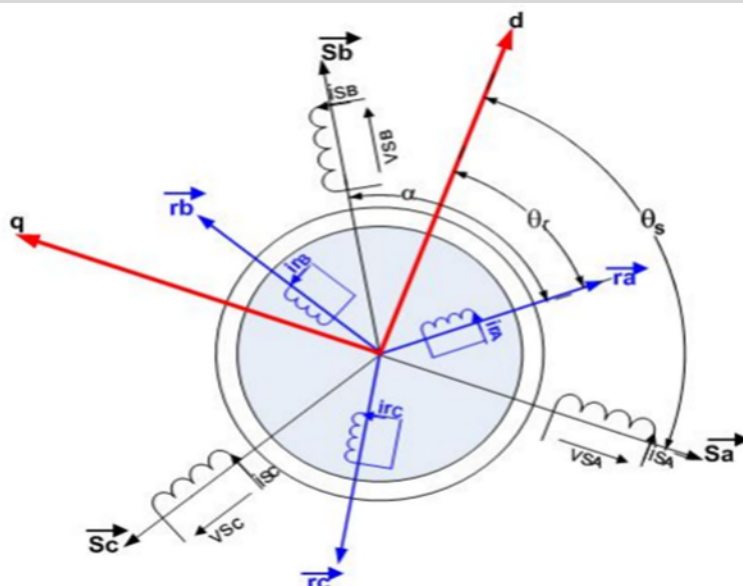


Fig. (III.1) : Représentation du moteur asynchrone dans l'espace électrique [34].

III.2.3.3. Équations électriques :

A partir du schéma électrique du moteur asynchrone de la figure (III.1), nous pouvons déduire les équations suivantes [32] [35] :

➤ Pour le stator :

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

➤ Pour le rotor :

$$V_r = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

- $[V_s]_{abc}$: Tensions instantanées des phases a, b et c statoriques.
- $[V_r]_{abc}$: Tensions instantanées des phases a, b et c rotoriques.
- $[I_s]_{abc}$: Courants instantanées des phases a, b et c statoriques.
- $[I_r]_{abc}$: Courants instantanées des phases a, b et c rotoriques.
- $[\varphi_s]_{abc}$: Flux totaux à travers les phases a, b et c statoriques.
- $[\varphi_r]_{abc}$: Flux totaux à travers les phases a, b et c rotoriques.

R_s Et R_r : Respectivement les résistances totales d'une phase statorique et d'une phase rotorique.

$$V_s = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \quad (III.4)$$

$$I_s = [I_{sa} \quad I_{sb} \quad I_{sc}]^T \quad (III.5)$$

$$\varphi_s = [\varphi_{sa} \quad \varphi_{sb} \quad \varphi_{sc}]^T \quad (III.6)$$

$$V_r = [V_{ra} \quad V_{rb} \quad V_{rc}]^T \quad (III.7)$$

$$I_r = [I_{ra} \quad I_{rb} \quad I_{rc}]^T \quad (III.8)$$

$$\varphi_r = [\varphi_{ra} \quad \varphi_{rb} \quad \varphi_{rc}]^T \quad (III.9)$$

III.2.3.4. Équations magnétique :

Les relations entre le flux et les courants s'écrivent comme suit [33] :

➤ Pour le stator :

$$\begin{cases} \varphi_{sa} = l_s I_{sa} + m_s I_{sb} + m_s I_{sc} + m \cos(\theta) I_{ra} + m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) I_{rb} + m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) I_{rc} \\ \varphi_{sb} = m_s I_{sa} + l_s I_{sb} + m_s I_{sc} + m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) I_{ra} + m \cos(\theta) I_{rb} + m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) I_{rc} \\ \varphi_{sc} = l_s I_{sa} + m_s I_{sb} + m_s I_{sc} + m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) I_{ra} + m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) I_{rb} + m \cos(\theta) I_{rc} \end{cases} \quad (III.10)$$

➤ Pour le rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{ra} = l_r I_{ra} + m_r I_{rb} + m_r I_{rc} + m \cos(\theta) I_{sa} + m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) I_{sb} + m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) I_{sc} \\ \varphi_{rb} = m_r I_{ra} + l_r I_{rb} + m_r I_{rc} + m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) I_{sa} + m \cos(\theta) I_{sb} + m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) I_{sc} \\ \varphi_{rc} = l_r I_{ra} + m_r I_{rb} + m_r I_{rc} + m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) I_{sa} + m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) I_{sb} + m \cos(\theta) I_{sc} \end{cases} \quad (III.11)$$

Sous forme matricielle on a :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_s][I_s]_{abc} + [M_{sr}][I_r]_{abc} \quad (III.12)$$

$$[\varphi_r]_{abc} = [L_r][I_r]_{abc} + [M_{rs}][I_s]_{abc} \quad (III.13)$$

Avec :

$$L_s = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

L'angle θ désigne l'angle électrique entre une phase du rotor et la phase correspondante du stator.

III.2.3.5. Équations mécanique :

L'équation mécanique est donnée par [32] [33] :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$p\Omega = p \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (\text{III.18})$$

Où :

J : Inertie totale des parties mobiles.

Ω : vitesse mécanique de rotation du rotor.

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine.

C_r : Couple de charge.

f : Coefficient de frottement.

p : Nombre de paires de pôles de la machine.

ω : Vitesse électrique du rotor par rapport au stator.

III.2.3.6. Transformation de Park :

La transformation de Park est une transformation du repère triphasé fixe(abc) un repère biphasé (dq). Cette transformation permet de réduire la complexité du système [36] [37]. La transformation de Park est obtenue à partir d'une matrice unique (3 * 3) donnée par :

$$[P] = K_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ K_1 & K_1 & K_1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Pour la transformation avec conservation de l'amplitude : K_0 est une constante qui peut prendre la valeur $\frac{2}{3}$ et K_1 est une constante qui peut prendre la valeur $\frac{1}{2}$. La transformation de park devient :

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

La matrice inverse $[P]^{-1}$ est donnée par :

$$[P]^{-1} = \frac{2}{3} \frac{1}{K_0} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{2K_1} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2K_1} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2K_1} \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

Le passage du système triphasé au système diphasé est défini par le système d'équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Avec :

X : Grandeur statorique ou rotorique (représente le vecteur de tension, courant ou flux).

X_0 : La composante homopolaire choisie nulle pour un système équilibré.

III.2.3.7. Modèle de PARK de la machine asynchrone :

L'application de la transformation de PARK au système d'équation (III.2) donne [33] [35] [38] :

$$[P]^{-1} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = R_s [P]^{-1} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left([P]^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{s0} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{III.24})$$

En multipliant les deux membres de l'équation par $[P]$ et après développement on obtient l'équation (III.25) :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left([P]^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{s0} \end{bmatrix} \right) + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Pour le rotor, on effectue les mêmes opérations que pour le stator et après développement on aura l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_{r0} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ I_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left([P]^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \\ \varphi_{r0} \end{bmatrix} \right) + (\omega_s - \omega) \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \\ \varphi_{r0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Puisque le neutre n'est pas relié, la composante homo-polaire est nulle, d'où les équations suivantes :

➤ Pour les tensions :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_s - \omega) \\ (\omega_s - \omega) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

➤ Pour les flux :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

Avec : - $L_s = l_s - m_s$: Inductance cyclique propre statorique.

- $L_r = l_r - m_r$: Inductance cyclique propre rotorique.

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

Le développement des équations matricielles donne le système suivant :

➤ Les tensions :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

Le rotor du moteur asynchrone à rotor bobiné étant fermé sur lui-même (court-circuité), on prend V_{rd} et V_{rq} égales à zéro.

➤ Les flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Le modèle biphasé de moteur asynchrone dans le repère (d,q) est donné par la figure (III.2) :

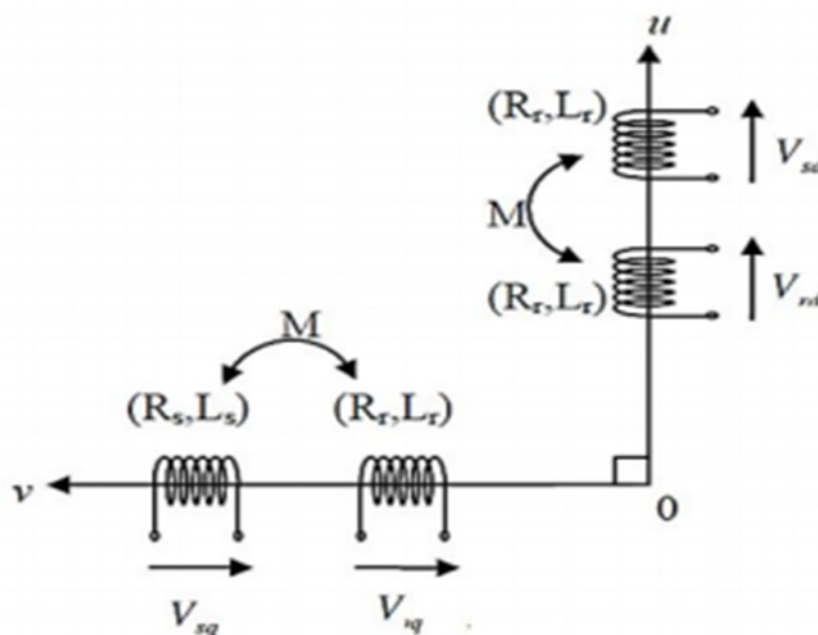


Fig. (III.2) : Modèle biphasé de la MAS dans le repère (d,q) [38].

III.2.3.8. Expression du couple électromagnétique :

La puissance instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques s'écrit [37] :

$$P_e = [V_s]^{-1}[I_s] + [V_r]^{-1}[I_r] \quad (\text{III.33})$$

En appliquant la transformation de Park, elle s'exprime en fonction des grandeurs d'axes(dq) :

$$P_e = (V_{sd} \quad V_{sq}) \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + (V_{rd} \quad V_{rq}) \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \left[I_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + I_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + I_{rd} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} + I_{rq} \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \right] + \left[(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \omega_s + (\varphi_{rd} I_{rq} - \varphi_{rq} I_{rd}) \omega_r \right] + \left[R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + R_r (I_{rd}^2 + I_{rq}^2) \right] \quad (\text{III.34})$$

- Le premier crochet représente l'énergie magnétique emmagasinée dans le fer.
- Le deuxième crochet représente la puissance P_{em} de la machine.
- Le troisième crochet représente les pertes joules.

D'après l'expression de la puissance électromagnétique on peut déduire le couple électromagnétique donnée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2}P(\varphi_{sd}I_{sq} + \varphi_{sq}I_{sd}) \quad (III.35)$$

III.2.3.9. Choix du référentiel :

La position du système d'axes (d,q) peut être fixée suivant les objectifs de l'application [33] [34] [38] :

- ❖ Référentiel immobile par rapport au stator (Référentiel lié au stator) ($\omega_s = 0$) : étude des grandeurs statoriques (système d'axes (α, β)).
- ❖ Référentiel immobile par rapport au rotor (Référentiel lié au rotor) ($\omega_s = \omega$) : étude des grandeurs rotoriques (système d'axes (x, y)).
- ❖ Référentiel lié au champs tournant ($\omega_s - \omega = \omega_r$) étude de la commande (système d'axes (d, q)).

III.2.3.10. Equation d'état de la machine asynchrone :

Le modèle de la machine asynchrone mise sous forme d'équation d'états de la forme [33] [34] [38] :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (III.36)$$

Avec :

[A] : Matrice d'évolution.

[B] : Matrice de commande.

[U] = [V_{sd} V_{sq}]^T : vecteur de commande.

En choisissant les variables d'état I_{sdq} φ_{rdq} on obtient le vecteur [X] :

$$[X] = [I_{sd} I_{sq} \varphi_{rd} \varphi_{rq}]^T \quad (III.37)$$

Après les calculs on obtient :

$$\frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} - \gamma I_{sd} + \omega_s I_{sq} + \frac{\alpha}{\tau_r} \varphi_{rd} + \alpha \omega \varphi_{rq} \quad (III.38)$$

$$\frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} - \omega_s I_{sd} - \gamma I_{sq} - \alpha \omega \varphi_{rd} + \frac{\alpha}{\tau_r} \varphi_{rq} \quad (III.39)$$

$$\frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \frac{M}{\tau_r} I_{sd} - \frac{1}{\tau_r} \varphi_{rd} + \omega_r \varphi_{rq} \quad (III.40)$$

$$\frac{d\varphi_{rq}}{dt} = \frac{M}{\tau_r} I_{sq} - \omega_r \varphi_{rd} - \frac{1}{\tau_r} \varphi_{rq} \quad (III.41)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{J} C_e - \frac{f}{J} \omega - \frac{P}{J} C_r \quad (\text{III.42})$$

Donc on peut déterminer les matrices [A], [B] et [U] :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\gamma & \omega_s & \frac{\alpha}{\tau_r} & \omega\alpha \\ -\omega_s & -\gamma & -\omega\alpha & \frac{\alpha}{\tau_r} \\ \frac{M}{\tau_r} & 0 & -\frac{1}{\tau_r} & \omega_r \\ 0 & \frac{M}{\tau_r} & -\omega_r & -\frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [U] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}; \quad [X] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}; \quad \alpha = \frac{M}{\sigma L_s L_r}; \quad \gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r M^2}{\sigma L_s L_r}$$

III.3. Convertisseur statique :

La forte évolution de l'onduleur de tension s'est appuyée d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, robustes et rapides, et d'autre part sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de "Modulation de Largeur d'Impulsions" (MLI). Ces dernières s'appuient sur les performances en termes de fréquence de découpage. Pour les applications de pompage solaire, un moteur électrique à courant alternatif est souvent utilisé. Ainsi, il faut utiliser un onduleur de tension pour alimenter ce moteur à partir des panneaux photovoltaïques [39].

Ces onduleurs transforment la tension continue issue des panneaux en une tension alternative triphasée avec une fréquence variable.

D'une façon générale le convertisseur statique (onduleur) joue le rôle d'interface entre source d'énergie électrique et le moteur.

Le convertisseur statique utilisé dans notre travail est un onduleur de tension triphasé. Celui-ci est composé de six (06) interrupteurs.

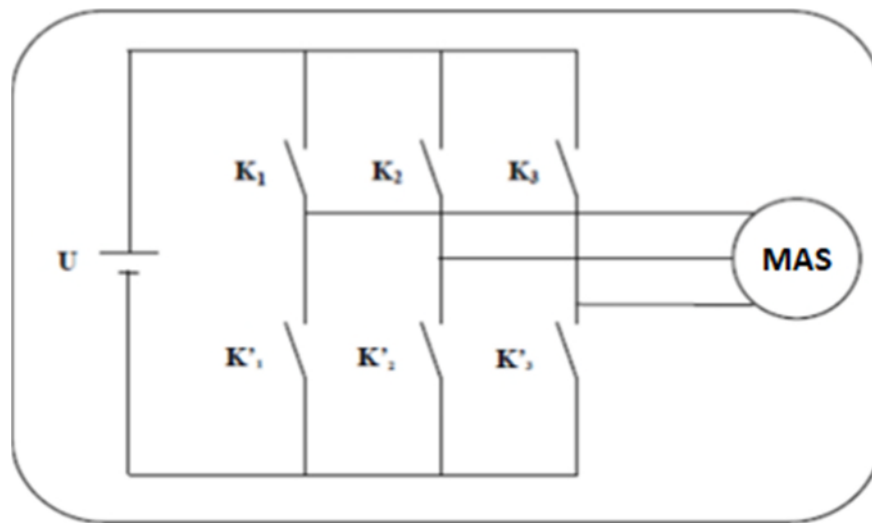


Fig. (III.3) : Onduleur triphasé [39].

Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et une diode en inverse comme le montre la figure (III.4) :

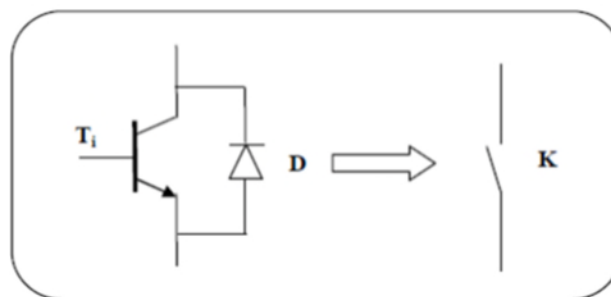


Fig. (III.4) : Schéma de l'interrupteur [39].

Les interrupteurs des bras de l'onduleur sont commandés de manières complémentaires, si K_i est fermé alors K_i' est ouvert à partir des grandeurs logiques F_i et F_i' .

Avec $F_i = F_i'$ et $i=1, 2, 3$

Donc nous pouvons écrire :

- $F_i=1$ ($F_i'=0$) alors K_i est passant (K_i' est ouvert).
- $F_i=0$ ($F_i'=1$) alors K_i est bloqué (K_i' est fermée).

Les tensions simples aux bornes du moteur s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{U}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.43})$$

III.3.1. Modulation sinus- triangle :

La technique de MLI triangle-sinus est réalisée par comparaison d'une onde modulante (tension de référence) ayant une basse fréquence à une onde porteuse triangulaire d'amplitude fixe et une fréquence supérieure à celle de la modulante [39].

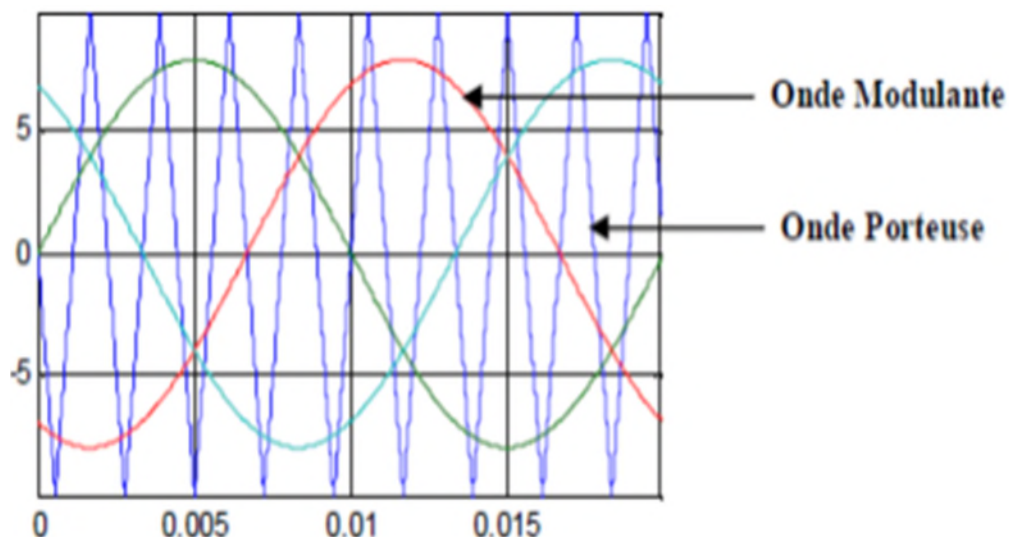


Fig. (III.5) : Tensions porteuse et modulante.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de modulation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

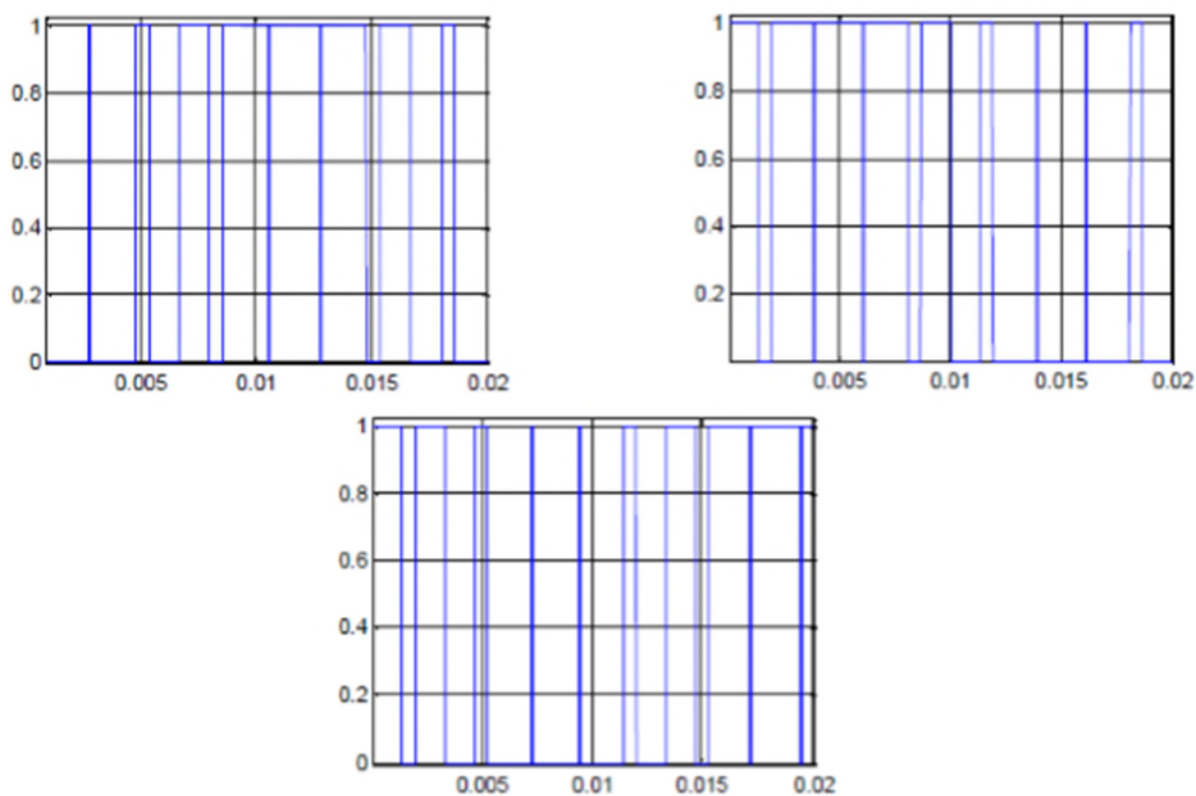


Fig. (III.6) : Commande F1, F2 et F3 de l'onduleur.

La tension de sortie est formée d'un créneau de largeur variable et d'amplitude égale à la tension continu d'alimentation (+U et -U).

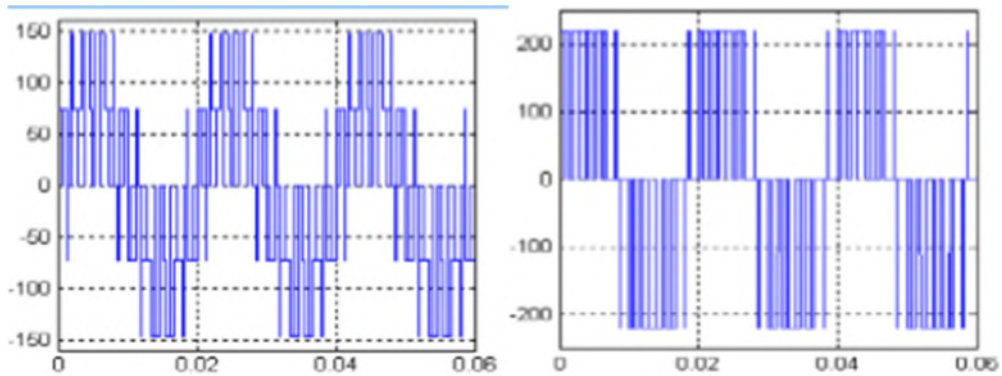


Fig. (III.7) : Tension simple et composé à la sortie de l'onduleur.

III.4. La pompe centrifuge :

III.4.1. Constitution d'une pompe centrifuge :

Les pompes se composent de deux éléments essentiels :

- Une roue qui impose au liquide un mouvement de rotation. Celle-ci est montée sur un arbre porté par des paliers et entraîné par un moteur.
- Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous plus haute pression. Le corps de pompe comprend une tubulure d'aspiration et une tubulure de refoulement, supporte les paliers et l'ensemble du rotor [40] [41].

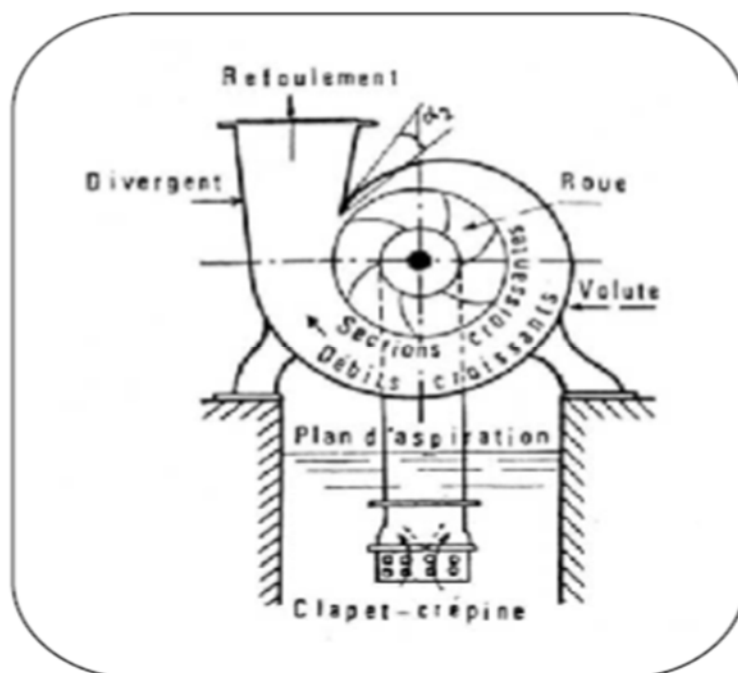


Fig. (III.8) : Constitution d'une pompe centrifuge [40].

III.4.2. Fonction d'une pompe centrifuge :

La théorie des fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmenté, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique, cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenue dans une pièce placés à l'intérieur de la roue appelle limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent .

III.5. Modélisation d'une pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur manométrique totale, le débit et la vitesse [42].

III.5.1. Hauteur manométrique totale :

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

$$H = H_s + H_d \quad \text{(III.44)}$$

H : Hauteur totale du pompage.

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

H_d : Hauteur dynamique. Elle est égale à la somme des pertes linéaires et singuliers.

III.5.2. Pertes de charges linéaires :

Ce sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante [43] :

$$\Delta H_1 = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{(III.45)}$$

Avec :

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

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

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

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{III.46})$$

Avec :

Q : débit (m^3/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{III.47})$$

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

III.5.3. Pertes de charges singulières (locale) :

Sont dues essentiellement aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante [41] :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \cdot \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 g} \quad (\text{III.48})$$

Avec :

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (\text{III.49})$$

$$H_d = \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \cdot \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = k_{Fr} \cdot Q^2 \quad (\text{III.50})$$

$$k_{Fr} = \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \cdot \left(\frac{8}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{III.51})$$

Avec :

k_{fr} : constante de la canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + k_{Fr} \cdot Q^2 \quad (\text{III.52})$$

III.5.4. La caractéristique Q (H) de la pompe :

La relation liant la hauteur d'eau H avec le débit de la pompe Q est donnée par le modèle de "PELEIDER-PETERMAN" et exprimée par la formule :

$$H = a_0 \cdot \omega^2 - a_1 \cdot \omega \cdot Q - a_2 \cdot Q^2 \quad (\text{III.53})$$

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

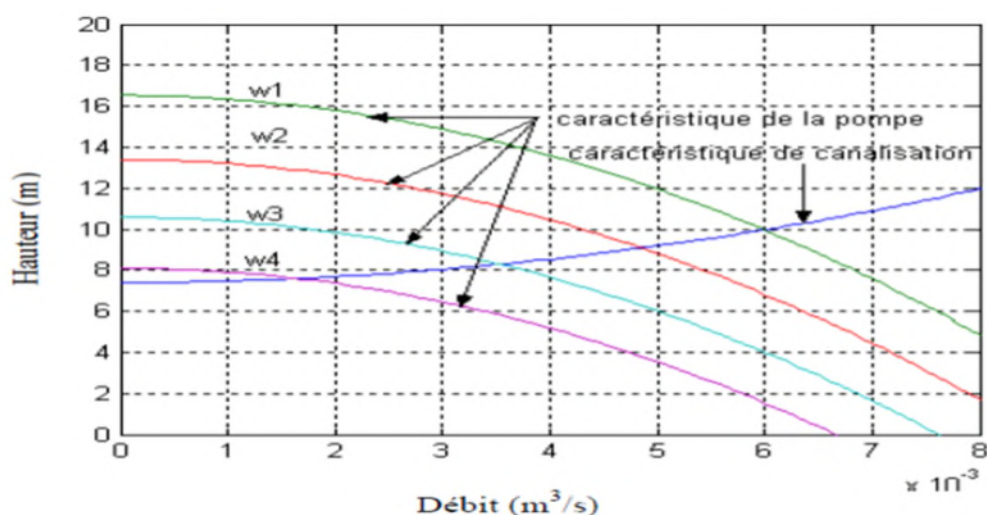


Fig. (III.9) : La courbe H (Q) de la pompe centrifuge et la caractéristique de canalisation [41].

Le point de fonctionnement est l'intersection de la caractéristique de la pompe et de canalisation. 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.

III.5.5. La caractéristique C (ω) de la pompe :

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

$$c_r = k_p \cdot \omega^2 \quad (\text{III.54})$$

Où :

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

ω : La vitesse angulaire de la machine [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

Avec :

$$k_p = \frac{P_m}{\omega_n^3} \quad (\text{III.55})$$

III.5.6. Calcul de puissance :

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (w) \quad (III.56)$$

L'autre expression à considérer est celle de la puissance absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimé par la relation suivante :

$$P_m = 9.81 \cdot \rho \cdot H \cdot Q / \eta_p \quad (w) \quad (III.57)$$

Avec :

η_p : Le rendement de la pompe.

P_m : Puissance mécanique du moteur.

ρ : La masse volumique de l'eau (=1000Kg au m^3).

III.5.7. Calcul du rendement :

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

$$\eta_{m_p} = \frac{P_H}{P_a} \quad (III.58)$$

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé le système Moto-Pompe, nous avons commencé par la modélisation de la MAS en nous basant sur les équations électriques, magnétiques et mécaniques, qui régissent le comportement de la machine.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la pompe centrifuge qui est le type le plus utilisé dans le pompage photovoltaïque.

Chapitre IV :

Dimensionnement du pompage photovoltaïque

IV.1. Introduction :

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté et établi les modèles de chaque composant du système de pompage photovoltaïque et développé un outil de simulation du système complet. Nous allons passer maintenant à la phase de dimensionnement et simulation du système de pompage photovoltaïque.

Un bon dimensionnement est primordial pour un bon fonctionnement et une bonne exploitation du système de pompage, car l'efficacité de toute installation électrique dépend essentiellement de la rigueur de son dimensionnement et influe directement sur le coût et les performances de l'installation.

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

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode de dimensionnement et une simulation des systèmes de pompage photovoltaïque basée sur les modèles présentés précédemment.

IV.2. L'outil Matlab/Simulink :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- ❖ Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- ❖ Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- ❖ Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- ❖ D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- ❖ Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [44].

La Figure (IV.1) présente la bibliothèque de l'environnement SIMULINK :

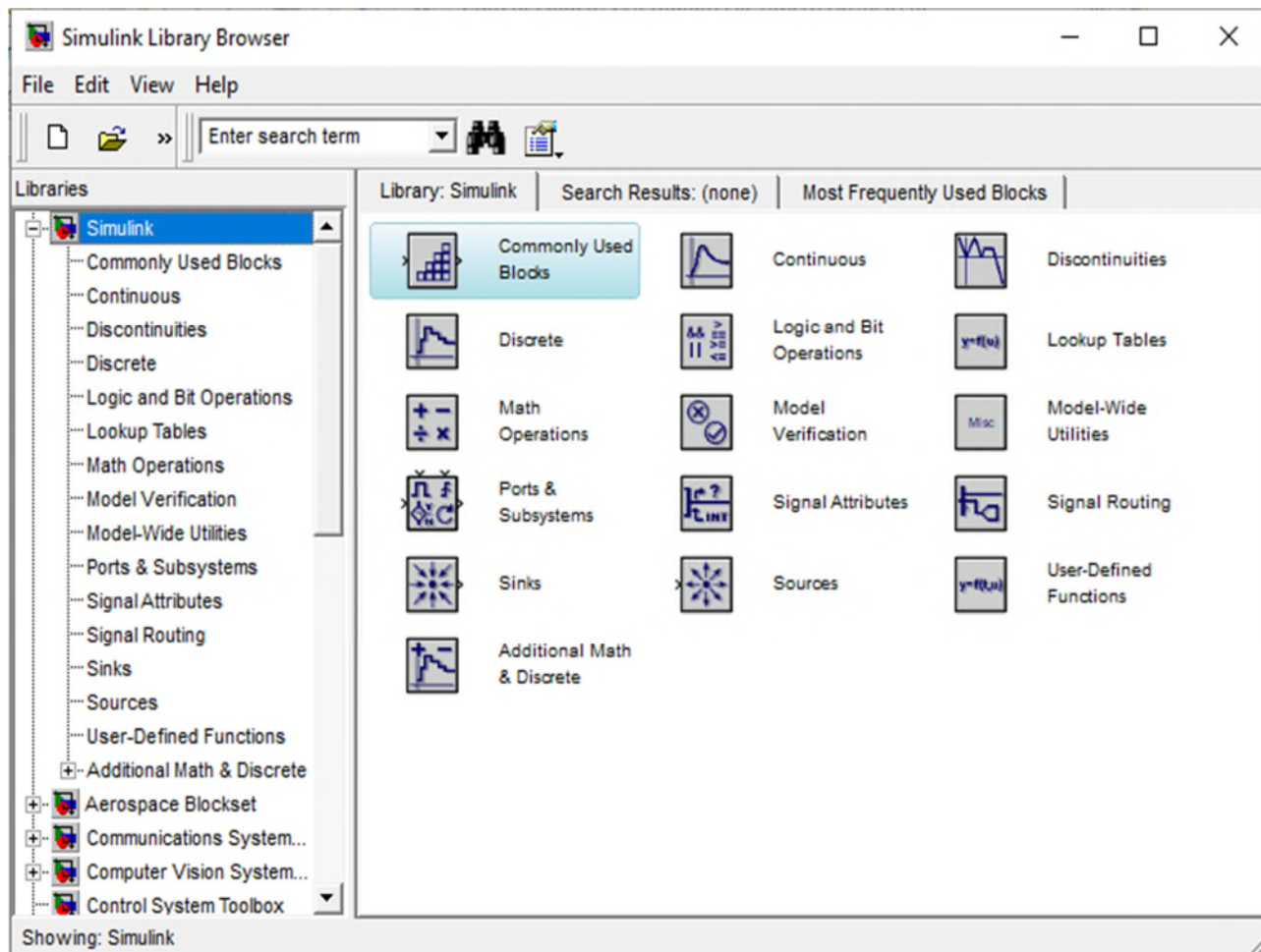


Fig. (IV.1) : Bibliothèque SIMULINK.

IV.3. Dimensionnement du système photovoltaïque :

IV.3.1. -Dimensionnement de la Motopompe :

Comme a été mentionné au paragraphe (III-5-5), le moteur qui entraîne la pompe peut être dimensionné selon la quantité d'eau demandée. Le débit d'eau lié à la puissance mécanique absorbée par la pompe est donné par la relation suivante :

$$Q = (P_m \cdot \eta_p) / (\rho \cdot g \cdot H) \quad (IV.1)$$

Si on suppose que le rendement de l'accouplement est égal à 1, alors la puissance mécanique du moteur (utile) est égale à la puissance absorbée par la pompe.

Connaissant le rendement du moteur, la puissance électrique absorbée par le moteur est :

$$P_a = P_u / \eta_m \quad (IV.2)$$

Tel que P_u est la puissance de moteur et η_m est le rendement de moteur.

Pour prévoir certains imprévus d'exploitation, il serait prudent de majorer la puissance absorbée par la pompe des quantités suivantes [45] :

- 30 % pour une puissance absorbée inférieure à 4 kW.
- 20 % pour une puissance absorbée comprise entre 4 et 20 kW.
- 10 % pour une puissance absorbée supérieure à 20 kW.

Dans notre étude la puissance mécanique de la pompe est 953.75 W, on applique alors une marge de sécurité de 30 %. Ce qui veut dire que la puissance mécanique du moteur doit être supérieure ou égale à 1239.875 W.

Dans notre cas nous avons choisis un moteur asynchrone dont la puissance mécanique est 1500 W.

Le rendement du moteur est estimé à 0.85, la puissance absorber par le moteur serait :

$$P_a = \frac{1500}{0.85} = 1764.7 \text{ W}$$

IV.3.2. Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

La puissance que doit fournir le générateur photovoltaïque sera déterminée par la puissance nominale demandée par l'ensemble motopompe.

La puissance nominale demandée par le moteur est de 1764.7 W.

Le rendement du convertisseur est de l'ordre de 0.95, on aura la puissance que doit générer les panneaux photovoltaïques calculé par :

$$P_{GPV} = \frac{P_a}{\eta_c} = \frac{1764.7}{0.95} = 1857.6 \text{ W} \quad (IV.3)$$

On doit dimensionner le générateur PV, en déterminant le nombre de modules qui le constituent pour alimenter le moteur.

$$P_{mpp} = 35 \cdot 3.15 = 110.25 \text{ W}$$

$$N_{PV} = \frac{P_{GPV}}{P_{mpp}} = \frac{1857.6}{110.25} = 16.85 \approx 17 \quad (IV.4)$$

Donc le nombre de module en série est $N_s=17$ et le nombre de modules en parallèle est $N_p=1$.
Donc la puissance maximale est $35 \times 3.15 \times 17 = 1874.25W$.

IV.4. Simulation du système globale :

Pour tester le bon fonctionnement de l'ensemble des éléments du système on a utilisé l'environnement Simulink, le schéma bloc est représenté comme suit :

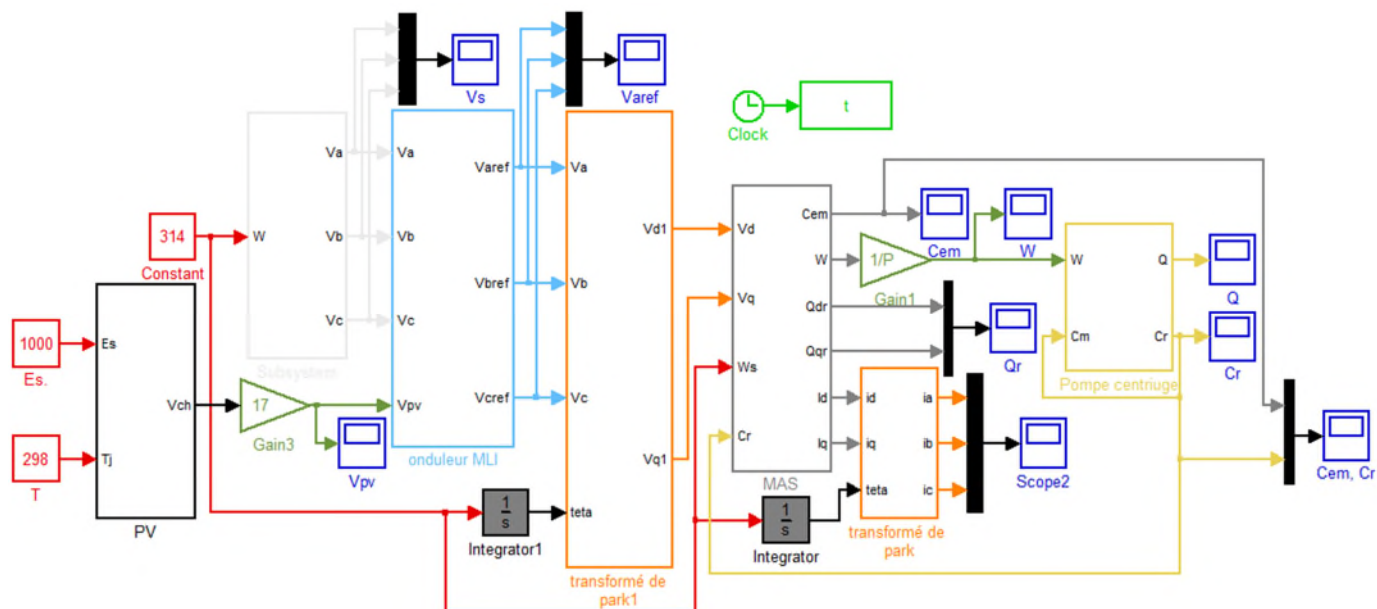


Fig. (IV.2) : Schéma bloc du système de pompage photovoltaïque sous MATLAB/Simulink.

IV.4.1. Résultats de la simulation :

Nous représentons les évolutions en fonction du temps de l'éclairement E_s , la température de jonction T_j , et on relève les courbes de la tension photovoltaïque V_{pv} , de la vitesse de rotation ω , du débit d'eau Q , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r .

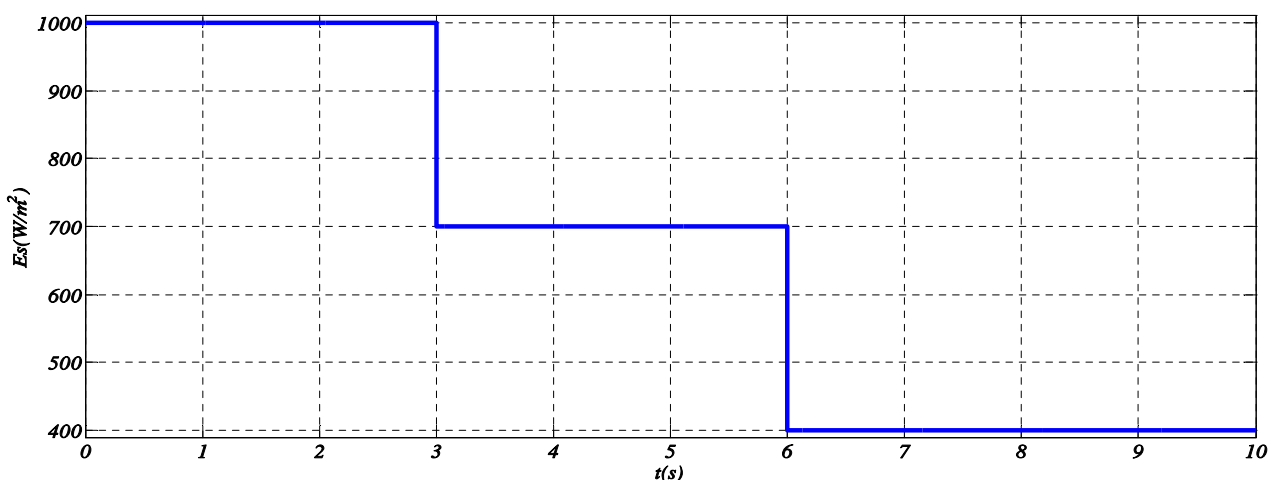


Fig. (IV.3): L'éclairement E_s .

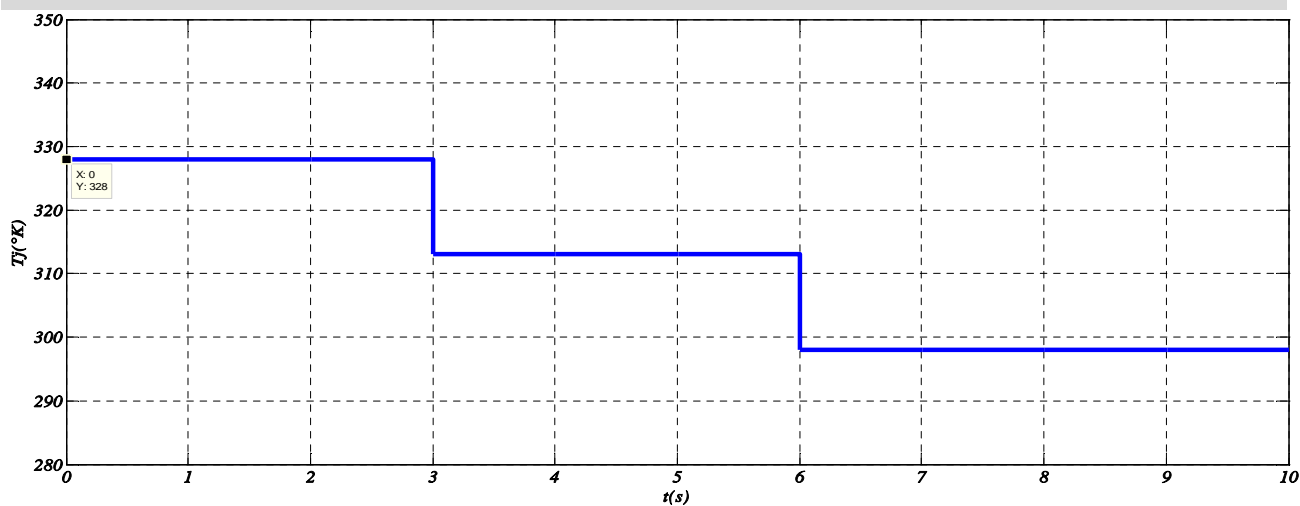


Fig. (IV.4) : Température de jonction T_j .

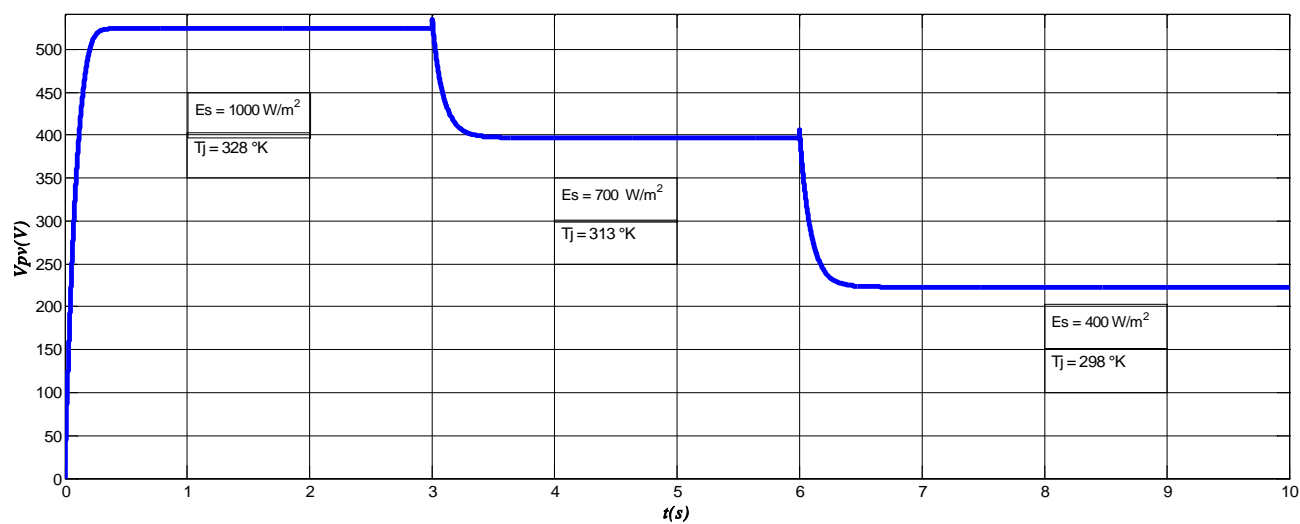


Fig. (IV.5) : Tension photovoltaïque V_{pv} .

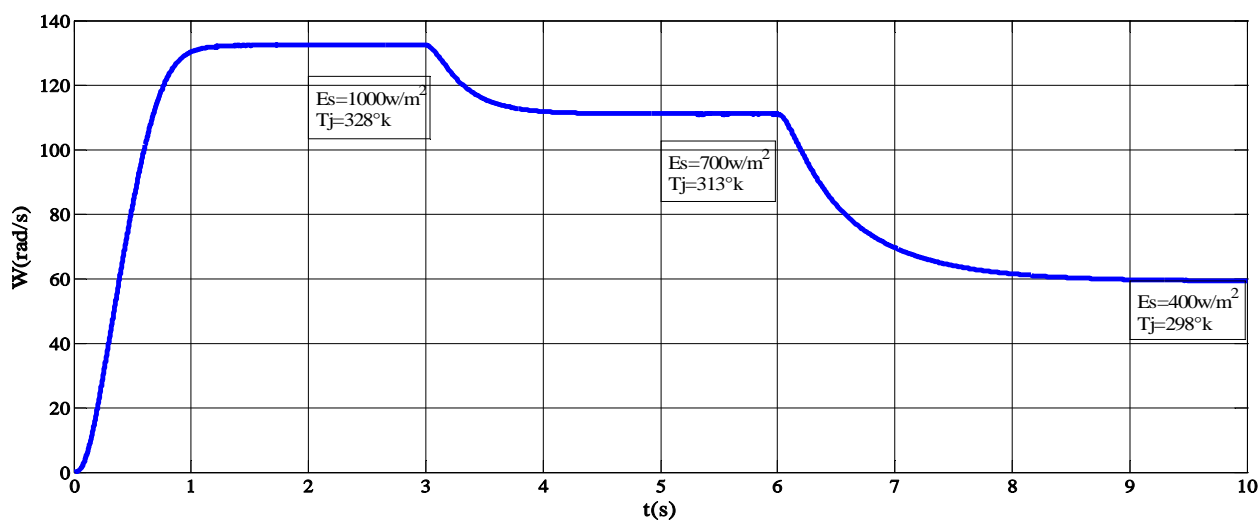


Fig. (IV.6) : Vitesse de rotation ω .

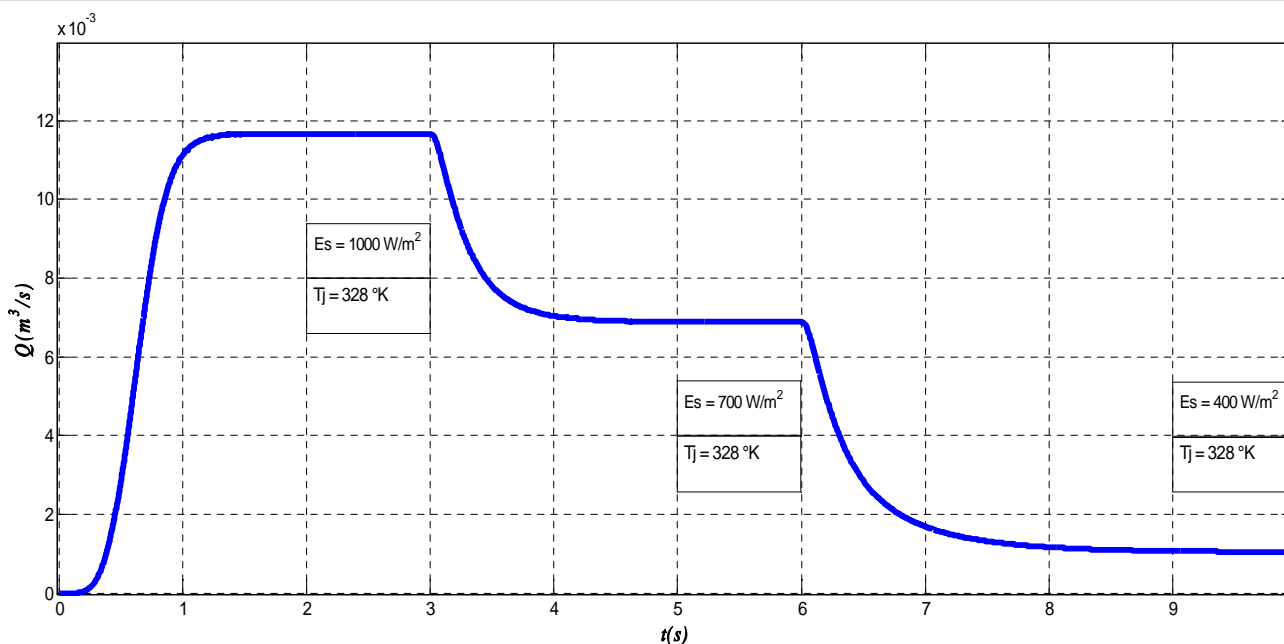


Fig. (IV.7) : Débit d'eau Q.

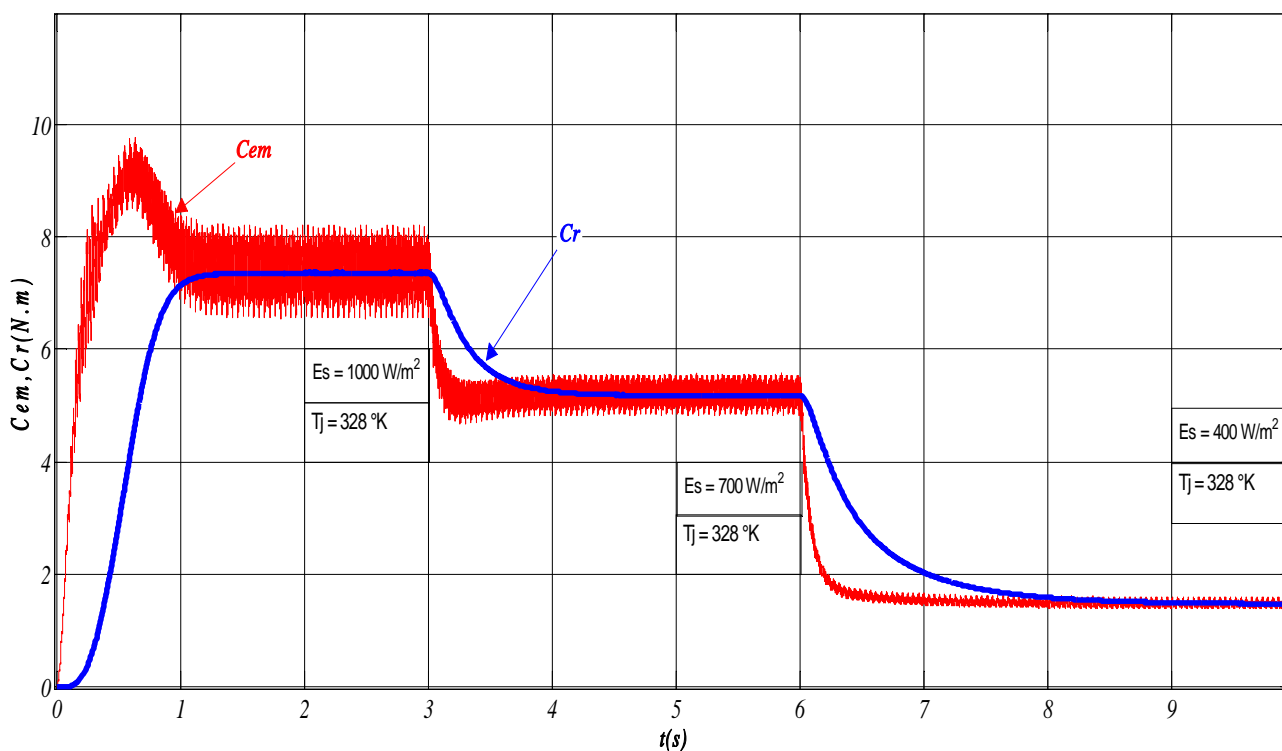


Fig. (IV.8) : Couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r .

IV.4.2. Interprétation des courbes :

Comme le démontre la figure (IV.3), nous avons imposé une baisse périodique de l'éclairement d'une valeur de 300 W/m^2 , et de 15°K pour la température de jonction (figure IV.4). La période de variation est fixée à 3s.

L'éclairement solaire étant la principale source d'énergie de notre machine, sa variation et donc, et celle de la température, ont un impact direct sur le reste de nos grandeurs :

- **Tension photovoltaïque :** La figure IV.5 nous montre qu'après alimentation, la valeur de V_{pv} atteint 525.1V, avant de subir une baisse à $t=3s$; et une diminution à $t=6s$ dépendamment des valeurs de l'éclairement et de la température de jonction. (397.1V puis 223.1V).
- **Vitesse de rotation :** Pareillement à la tension photovoltaïque, la vitesse de rotation représentée dans la figure (IV.6) prend une valeur de 132.3 rad/s pour un ensoleillement de 1000W avant de subir à son tour une diminution à $t=3s$, prenant une valeur de 111 rad/s correspondant à $E_s=700W$, puis elle atteint la valeur de 59.24 rad/s à $t=6s$ pour un ensoleillement de 400W.
- **Débit d'eau :** Le débit d'eau (figure IV.7), voit sa valeur atteindre $11.66 \times 10^{-3} \text{ m}^3/s$, avant de diminuer à $6.88 \times 10^{-3} \text{ m}^3/s$ après 3s ; puis $1.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3/s$ après 6s. cette diminution est due à la diminution de la valeur de l'ensoleillement E_s .
- **Couple électromagnétique(C_{em}) et Couple résistant(C_r) :** En observant la figure IV.8, on remarque qu'après alimentation, C_r atteint sa valeur nominale de 7.3 N.m avant de subir une baisse à $t=3s$ (5.1 N.m), puis 6s (1.48 N.m). C_{em} , pour sa part, atteint d'abord sa valeur maximale de 9.1 N.m avant de reprendre sa valeur nominale superposée à celle de C_r . Le couple électromagnétique suit parfaitement le couple résistant de la pompe en diminuant à chaque diminution de l'ensoleillement.

IV.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons dimensionné les différents composants du système de pompage PV, à savoir la pompe centrifuge et son moteur asynchrone d'entraînement, ainsi que le nombre de panneaux nécessaire pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation, on a simulé le système global en appliquant différent profil (d'ensoleillement et de température). Les résultats de simulation nous ont montré que la tension d'alimentation de la machine diminue proportionnellement à l'ensoleillement, ce qui influe sur la vitesse de rotation et sur le débit de l'eau, et cela serait remarqué pendant le début de la journée correspondant à un ensoleillement faible et aussi pendant l'après-midi et prendra sa valeur maximale au milieu de la journée correspondant à un ensoleillement maximal.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'étude d'une machine asynchrone dédiée au pompage photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque, de convertisseurs d'électroniques de puissance et d'un groupe motopompe.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque et sur les systèmes de pompage utilisant cette dernière comme source d'énergie. A sa fin, nous avons choisi les différents éléments du système étudié.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différentes composantes du système photovoltaïque. On a présenté le modèle du générateur photovoltaïque à une diode qui présente un bon compromis entre simplicité et précision. Ensuite, nous avons simulé un panneau (module) photovoltaïque pour différents ensoleillements et températures afin de tracer les différentes caractéristiques (courant/ tension et puissance / tension) ainsi que le convertisseur statique appelé convertisseur DC-DC (boost). Pour exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum, une commande MPPT a été utilisée pour permettre le fonctionnement au PPM. Nous avons utilisé l'algorithme Perturbation et observation "P&O" car il a une structure de régulation simple et peu de paramètres de mesure.

Dans le troisième chapitre nous avons abordé le système Motopompe, à commencer par la modélisation de la MAS en nous basant sur les équations électriques et mécaniques qui régissent le comportement de la machine, ensuite nous avons abordé brièvement la modélisation de la partie d'alimentation (onduleur de tension à deux niveaux) et sa commande, enfin nous avons reporté le principe ainsi que la modélisation de la pompe centrifuge en tenant comptes des pertes de charges linéaires et singulières.

Le dimensionnement et la simulation du système de pompage photovoltaïque a été présenté dans le quatrième chapitre, au cours duquel nous avons obtenu des résultats plutôt satisfaisants, bien que loin d'être parfaits. D'après les résultats de simulation on a constaté que :

- Une bonne dynamique du couple résistant et électromagnétique qui ceux sont confondus ensemble.
- Le débit suit la variation de la vitesse qui dépend de la puissance photovoltaïque qui est dû aux variations des conditions météorologiques (éclairage et température).

Conclusion générale.

- Nous avons constaté aussi que la tension de bus continu suit les variations de l'ensoleillement et de la température.

Les résultats de ce travail nous permettent de dégager les perspectives suivantes :

- Il serait intéressant d'utiliser d'autres techniques MPPT pour maximiser la puissance du générateur photovoltaïque tel que la logique floue, la méthode de conductance incrémentielle, la méthode neuro-floue.....
- Utiliser d'autres modèles mathématiques du générateur photovoltaïque.
- Concrétisation pratique de ce travail sur un banc d'essai expérimental.
- Ajouter un régulateur pour la régulation de la vitesse et de la tension du bus continu.

Bibliographies

[1]	"A. Mehdaoui, M. Sadok, S.A. Chikhi et A. Mammeri" « Gain énergétique entre deux configurations de système de pompage d'eau photovoltaïque Application au site d'Adrar », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 571 – 582
[2]	"Y. Bakelli. A. Hadj Arabe et B. Azzoui" « Modélisation d'un groupe moteur pompe dans le banc d'essai de pompage photovoltaïque de l'URAER Ghardaïa », Revue des énergies renouvelables, vol : 15 No 1, pp 103-109, 2012.
[3]	"H. Ammar, M.T. Bouziane et Y. Bakelli" « Influence de la variation de débit sur les performances d'une pompe solaire », Revue des énergies renouvelables SIENR' 12 Ghardaïa pp 23-28, 2012.
[4]	(2010) https://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSZY7xw
[5]	"B. Dendib" « Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative », Université Ferhat Abbas-Sétif, mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
[6]	"A. Resfa" « Étude d'un système de pompage photovoltaïque », Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –, Mémoire de master académique, Département génie électrique, 2017.
[7]	" K. Bouzine et H. Gaddouri" « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque optimisé », Université Larbi Tebessi – Tébessa, Mémoire de master académique, Département génie électrique, 2017.
[8]	"B.Equer" « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
[9]	"H. Naim" « Etude et gestion d'une mini centrale et mise au point d'un dispositif automatique de mesure, contrôles et régulation de l'Energie électrique », Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Thèse doctorat, Département de Physique Energétique, 2016.
[10]	"N. Touil et S. Ghenbazi" « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », Mémoire de master académique, Université El Oued, 2015.
[11]	"A. Mcevoy, L. Castaner and T. Markvart" « Solar cells », Edition Elsevier, 2012.
[12]	"T. Akassewa" « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de doctorat. Université de Nancy1 2010.
[13]	"M. Mezzai, S. Mouloudji" « Contribution à l'étude d'un système de pompage PV », Mémoire de master université de Bejaia 2014.

Bibliographies.

[14]	https://www.transtech-africa.de/
[15]	" F. bendjoudi et F.lakhdari " « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries », Mémoire de master, Université De Bejaia, 2014.
[16]	"A. Buyers" « Les systèmes photovoltaïques », Article Canada 2002. Site : https://www.rncan.gc.ca/
[17]	"F. Salama" « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2011.
[18]	"K. Rahrah" « Dimensionnement Et Optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque Destinés Pour L'alimentation En Eau Potable », Thèse Doctorat En Electrotechnique Option Système Electro Energétique, Université A.Mira De Bejaia, 2016.
[19]	"J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sadasy" « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Éditions Multi Mondes, Université d'Ottawa, 1998.
[20]	"M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia" « Le Pompage Photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69- 73) ,2002.
[21]	"L. Messaoudi" « Commande et optimisation d'un système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien) », Mémoire de master, Université De Bejaia, 2015.
[22]	"A. Belhocine et S. Zaidi" « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome », Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012.
[23]	"A.mohammedi" « étude d'un système de pompage photovoltaïque », Option Electromécanique, Université A.Mira De Bejaia, 2016.
[24]	"R. Bausiere, L. François, S. Guy" « les convertisseurs de l'électronique de puissance », La conversion continu-continu, volume 3.
[25]	"M. Gapderou" « Atlas Solaire de L'algérie », Tomel,2, OPU 1983.
[26]	"I. Hadj Mohammed" « Modélisation du générateur photovoltaïque », Mémoire de magister, Département d'électronique. Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
[27]	http://www.photovoltaique.guidenr.fr/III_1_caracteristique-courant-tension-module-photovoltaique.php
[28]	"Dr. S. Belaid" « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Département génie électrique, 2015.
[29]	" K. Dehouche et K. Mouhoubi" « Etude et Conception D'un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique », Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Mémoire de master académique, Département génie électrique, 2014.

Bibliographies.

[30]	"A. Bessem" « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque », Université Badji Mokhtar- Annaba, Mémoire de master académique, Département Électromécanique, 2018.
[31]	"A. Hamidat, B. Benyoucef, T. Hartani" « Small-Scall Irrigation With Photovoltaic Water Pumping System In Sahara Regions », Renewable Energy, Vol. 28, pp.1081 1096, 2003.
[32]	"B.Hosseini" « Prototypage rapide à base de FPGA d'un algorithme de contrôle avancé pour le moteur à induction », Mémoire pour la maîtrise en génie électrique, Université de Québec a trois rivières, Canada. 2010.
[33]	"S.Arezki" « Contribution au contrôle directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone à cage alimenté par un onduleur multi niveaux », Mémoire de Magister, Université M'hammed Bougara de Boumerdes, Algérie 2009.
[34]	"R.Saleh" « Application à la machine asynchrone : commande vectorielle sans capteurs mécanique SVPWM mode glissant MRAS », Mémoire de Magister , Université Mentouri de constantine, Algérie. 2009.
[35]	"Y.Messoudi" « Synthèse des contrôleurs par Backstepping de la machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie.2010.
[36]	"B.Lotfi" « Modélisation et Commande de la machine asynchrone », Notes cours, IUFM de lorraine.UHP, France 2005.
[37]	"A.Meroufel" « Contrôle de la machine asynchrone », Recueil, Université Djillali Liabés Sidi Bel Abbes, Algérie. 2009.
[38]	"C.Azeddine" « Commande Backstepping d'une machine asynchrone sans captures de vitesse », Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie.2011.
[39]	"F.Labrique , G.Seguiet, R.Baussiere" «Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec.Doc.Paris 1995.
[40]	"A. Saadi" « Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque », Thèse de magister, Université de Biskra 2001.
[41]	"J. M. Hirtz" « Les stations de Pompage D'eau », Lavoisier TEC & DOC 1991.
[42]	"K. Benlarbi" « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thèse de Magister, Université de Batna 2003.
[43]	"A. Betka" « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil », Thèse de Magistère, Université de Biskra.1997.
[44]	"M ^{elle} M. ALI" « Modélisation et simulation du module photovoltaïque (ATERSA75) », Université de Boumerdes, Mémoire de Master en Mécatronique, 2009.
[45]	"A. Dupont" « Hydraulique urbaine », Tome 2 Edition Eyrolles 1988.

Annexes

Puissance nominale	P	1500	W
Vitesse nominale	N	1486.9	Tr/min
Tension nominale	U_{sn}	220	V
Courant nominale	I_{sn}	3	A
Résistance statorique	R_s	4.85	Ω
Résistance rotorique	R_r	3.805	Ω
Le moment d'inertie	J	0.0031	Kg/m^2
Coefficient de frottement	f	0.0001	Nm/(rad/s)
Nombre de pôles	P	2	/
Inductance cyclique statorique	L_s	0.274	H
Inductance cyclique rotorique	L_r	0.274	H
Inductance cyclique mutuelle	M	0.258	H

TAB. (A.1) : Caractéristique de la machine asynchrone.

Puissance nominale	P_n	953.75	W
Vitesse nominale	N	1750	Tr/min
Hauteur totale du pompage	H	10	m
Hauteur statique	H_s	7.4	m
Longueur de la tuyauterie	L	7.4	m
Accélération de la pesanteur	G	9.81	m/s^2
La masse volumique de l'eau	P	1000	Kg/m^2

TAB. (A.2) : Caractéristique de la pompe centrifuge.

Paramètre de la pompe centrifuge :

- $a_0 = 4.9234 \cdot 10^{-3} \text{ m / (rad /s)}^2$.
- $a_1 = 1.5825 \cdot 10^{-5} \text{ m / ((rad /s).(m}^2\text{/s))}$.
- $a_2 = -18144 \text{ m / (m}^3 \text{/s)}^2$

Annexes.

Dimension extérieur	D	1316×660	mm
Epaisseur	epaisseur	40	mm
Poids	poids	11.5	Kg
Puissance maximale du panneau	P_{mpp}	110	W
Courant au point de puissance maximale	I_{mpp}	3.15	A
Tension au point de puissance maximale	V_{mpp}	35	V
Courant de court-circuit	I_{cc}	3.45	A
Tension en circuit ouvert	V_{co}	43.5	V
Coefficient d'incrément de température	α_{sc}	1.4	mA/°C
Coefficient d'incrément de température	β_{oc}	-152	mV/°C

TAB. (A.3) : Caractéristique des panneaux photovoltaïques SIEMENS SM 110-24.

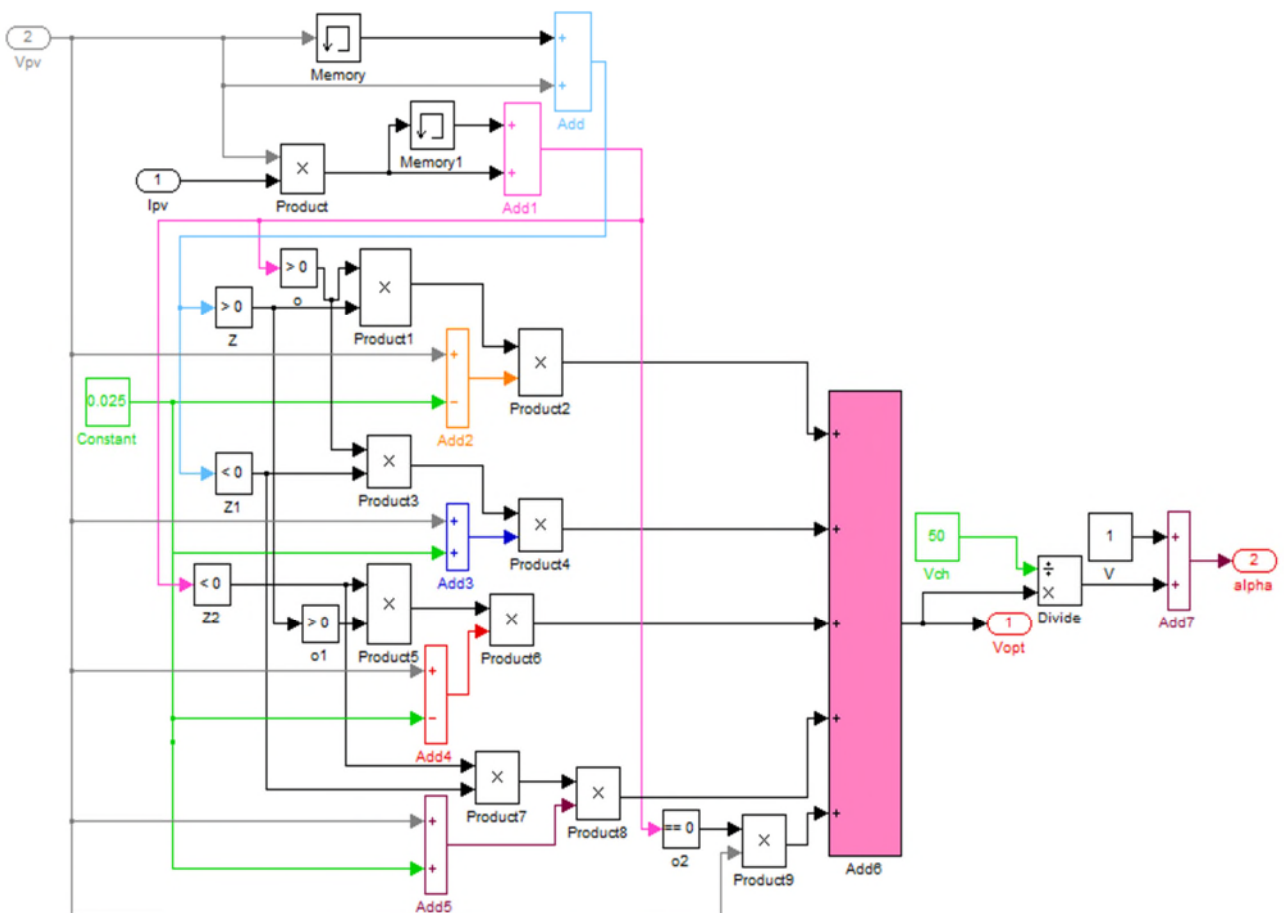


Fig. (A.1) : Simulation d'un MPPT.

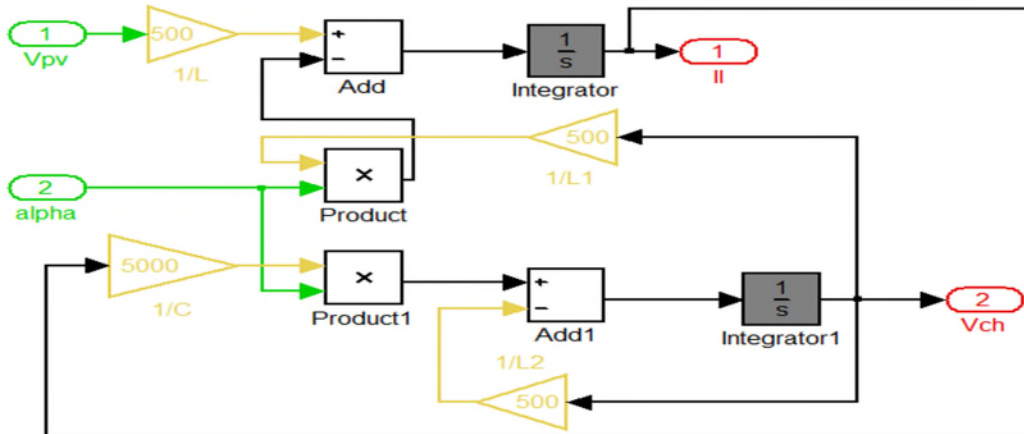


Fig. (A.2) : Simulation d'un hacheur survolteur.

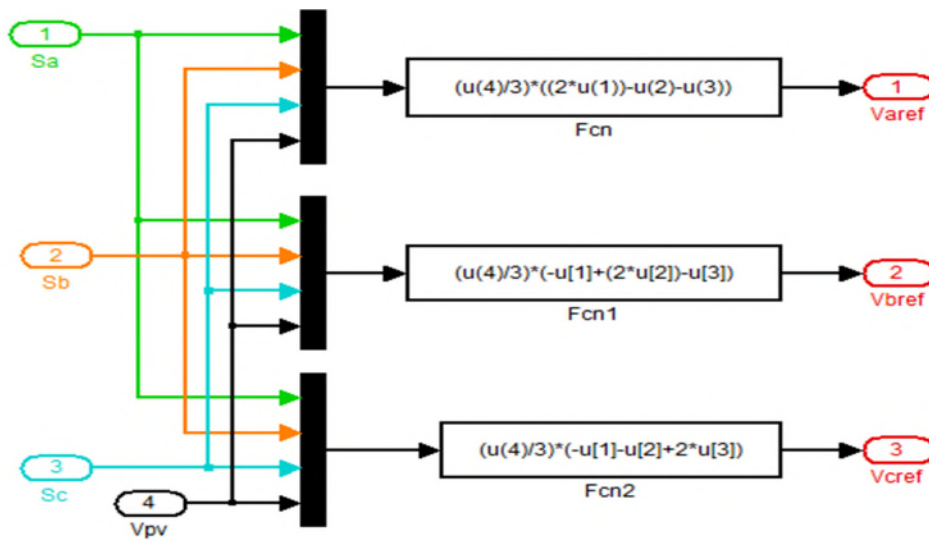


Fig. (A.3) : Simulation d'onduleur.

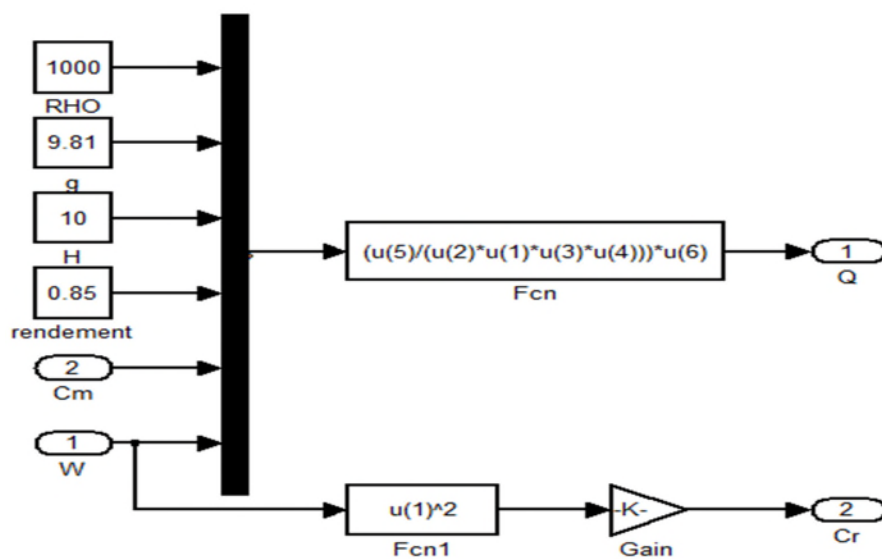


Fig. (A.4) : Simulation de la pompe.