

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE DJILALI BOUNAAMA KHEMIS-MILIANA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
En Vue de l'Obtention du Diplôme

MASTER

En

« ELECTROTECHNIQUE »

Option

« ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE »

THEME:

***Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage
Photovoltaïque***

Réalisé par:

Mme. AKERMI Amina

Mme. GUERROUCHE Radhia

Encadré par:

Dr. LAYATE Zakaria

Année universitaire: 2020/2021

Remerciements

- ❖ *Avant tout, on remercie ALLAH le tout puissant qui nous a donné du courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*
- ❖ *On tient à exprimer nos remerciements et notre gratitude à notre encadreur Mr. LAYATE Zakaria d'avoir accepté et dirigé ce travail, pour sa confiance, ses conseils et sa grande assistance.*
- ❖ *On tient à remercier les membres de jury d'avoir accepté l'évaluation de ce modeste travail.*
- ❖ *On tient à remercier également tous enseignants du département de technologie.*
- ❖ *On remercie tous ceux, qui de près ou de loin, qui ont contribué & participé à réaliser ce mémoire.*
- ❖ *A la classe d'Electrotechnique Industrielle Promo 2021.*

Akermi Amina & Guerrouache Radhia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à.....

- *Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*
- *Ma chère et seul sœur Hayet pour son encouragement permanent, et son soutien moral, et financière.*
- *Mes chers frères, Nouredine et Ilyes pour leur appui et leur encouragement.*
- *Toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, surtout la famille Nettar et les petits: Riadh, Israa, Farouk, Aymen et Imene et ma grand-mère.*
- *Tous mes chères amies: Sabah, Sara, Salima, Radja, Afaf, Yacine et Yasser.*
- *Mon cher binôme Amina et sa famille.*
- *Tous ceux qui me connaissant et m'aiment.*

Radhia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à.....

- *Mes chers parents, ma mère pour tous sa sacrifices, son amour, son tendresse, sa soutien et sa prières tout au long de mes études.*
- *Mon père qui a tant sacrifié pour me fournir tout ce dont j'avais besoin.*
- *Mes très chères sœurs Hadil et Ibtihel.*
- *Mes chers frères, Sid Ahmed, Lokman et Hocine.*
- *Toute les membres de la famille Akermi et la famille Ferguous pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*
- *Tous mes amies: Amel, Kenza, Salima et Hayet.*
- *Mon cher binôme Radhia et sa famille.*
- *Tous ceux qui me connaissant et m'aiment.*

Amina

Résumé :

L'énergie solaire est considérée comme l'une des énergies renouvelables les plus importantes en tant qu'alternative à l'énergie électrique, en particulier dans les zones isolées qui ne l'ont pas en raison des coûts de conduction élevés et d'autres facteurs.

Le but de ce travail est d'étudier le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque.

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa capacité maximale, l'utilisation d'un algorithme appelé MPPT est devenue une nécessité absolue ; pour cela, la technique de perturbation et observation P&O a été choisie.

Dans ce travail, nous présentons tout d'abord la modélisation et la simulation de : système photovoltaïque, onduleur et d'un hacheur. Ensuite, nous étudions l'état de la chaîne de pompage de la pompe centrifuge en utilisant un moteur asynchrone triphasé comme moteur d'entraînement.

Mots Clés :

L'énergie solaire photovoltaïque, Commande MPPT, Pompe centrifuge, Moteur asynchrone.

Abstract :

Solar energy is considered one of the most important renewable energies as an alternative to electric energy, especially in isolated areas that do not have it due to the high conduction costs and other factors.

The purpose of this work is to study water pumping using solar photovoltaic energy.

In order for the photovoltaic system to work at its maximum capacity, the use of an algorithm called MPPT became an absolute necessity; for the perturbation and observation P&O technique was chosen.

In this work, we first present the modeling and simulation of photovoltaic systems, static converters. Then we study the state of pumping chain of the centrifugal pump using a three-phase asynchronous motor as the drive motor.

Key Words :

Solar photovoltaic energy, MPPT command, Centrifugal pump, Asynchronous motor.

ملخص:

تعتبر الطاقة الشمسية من اهم الطاقات المتجددة باعتبارها بديل للطاقة الكهربائية خاصة في المناطق المعزولة التي لا تتوفر عليها بسبب غلاء التوصيل وعوامل أخرى.

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة ضخ المياه باستعمال الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

لكي يعمل النظام الكهروضوئي بأقصى طاقته أصبح استخدام خوارزمية تسمى MPPT ضرورة حتمية لهذا الغرض تم اختيار تقنية الاضطراب والملاحظة P&O.

قمنا في هذا العمل أولاً بتقديم النمذجة والمحاكاة لأنظمة الألواح الكهروضوئية، عاكس الجهد، القاطع المتناوب ; ثم درسنا حالة سلسلة الضخ للمضخة الطاردة المركزية باستخدام محرك غير متزامن ثلاثي الطور كمحرك دفع.

كلمات مفتاحية:

الطاقة الشمسية الكهروضوئية، تحكم MPPT، المضخة الطاردة المركزية، محرك غير متزامن.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I - Généralités sur les Systèmes Solaires Photovoltaïques

I.1 Introduction.....	4
I.2 Histoire de l'énergie électrique photovoltaïque.....	4
I.3 L'effet Photovoltaïque.....	5
I.4 Rayonnements solaires.....	6
I.4.1 Déclinaison du soleil.....	6
I.4.2 Durée d'insolation.....	7
I.4.3 Types de rayonnements solaires.....	7
I.4.3.1 Rayonnement solaire direct.....	8
I.4.3.2 Rayonnement solaire diffus.....	8
I.4.3.3 Rayonnement solaire réfléchi.....	9
I.4.3.4 Rayonnement solaire global.....	9
I.5 Cellules solaires photovoltaïques.....	10
I.5.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	10
I.5.2 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques.....	11
I.5.2.1 Première génération : Cellules à base de silicium cristallin.....	12
I.5.2.2 Deuxième génération : Cellules à base de couche minces.....	13
I.5.2.3 Troisième génération : Cellules organiques.....	13
I.6 Types des installations photovoltaïques.....	14
I.6.1 Installation autonome.....	14
I.6.2 Installation hybride.....	15
I.6.3 Installation couplée au réseau.....	15
I.7 Avantages et inconvénients des installations photovoltaïques.....	16
I.7.1 Avantages.....	16
I.7.2 Inconvénients.....	16
I.8 Conclusion.....	17

CHAPITRE II - Modélisation et Simulation du Système de Production Photovoltaïque

II.1	Introduction.....	18
II.2	Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque.....	18
II.2.1	Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	18
II.2.1.1	Modèle du cas réel.....	19
II.2.1.2	Modèle du cas idéal.....	20
II.2.1.3	Rendement de la cellule photovoltaïque.....	21
II.2.2	Simulation d'une cellule photovoltaïque.....	21
II.2.2.1	Influence des conditions climatiques.....	22
a	Influence de la température.....	22
b	Influence de l'ensoleillement.....	24
II.3	Regroupement des cellules en un générateur.....	25
II.3.1	Regroupement série des cellules.....	25
II.3.2	Regroupement parallèle des cellules.....	27
II.3.3	Regroupement mixte des cellules.....	28
II.4	Optimisation de la tension photovoltaïque générée.....	30
II.4.1	Conversion DC/DC par hacheur.....	30
II.4.2	Modélisation du hacheur Boost.....	32
II.4.3	Commande de poursuite du point de puissance maximale.....	33
II.4.4	Simulation de la commande MPPT par la technique P&O.....	34
II.5	Conversion DC/AC de la tension photovoltaïque.....	35
II.5.1	L'onduleur de tension triphasé.....	35
II.5.2	Modélisation de l'onduleur de tension triphasé.....	35
II.5.3	La commande MLI de l'onduleur triphasé.....	36
II.5.4	Simulation de la commande MLI.....	36
II.6	Conclusion.....	40

CHAPITRE III - Modélisation du groupe Moto-Pompe et Simulation du Pompage Photovoltaïque

III.1	Introduction.....	41
III.2	Moteur asynchrone à cage.....	41

III.2.1	Structure du moteur asynchrone à cage.....	42
III.2.1.1	Structure de stator.....	43
III.2.1.2	Structure de rotor.....	43
III.2.2	Principe de fonctionnement.....	44
III.2.3	Modèle de moteur asynchrone à cage.....	44
III.2.3.1	Hypothèses simplificatrices.....	45
III.2.3.2	Equations électriques.....	45
III.2.3.3	Equations magnétiques.....	46
III.2.3.4	Equations mécaniques.....	47
III.2.3.5	Mise en équations dans le référentiel de "Park".....	48
III.2.3.6	Représentation d'état du modèle de la MAS.....	50
III.2.4	Simulation du Moteur asynchrone.....	51
III.3	Pompe centrifuge.....	56
III.3.1	Généralité sur les pompes centrifuges.....	56
III.3.1.1	Présentation de la pompe centrifuge.....	57
III.3.1.2	Constitution de la pompe centrifuge.....	58
III.3.1.3	Utilisation des pompes centrifuges.....	58
III.3.2	Fonctionnement de la pompe centrifuge.....	59
III.3.3	Modélisation de la pompe centrifuge.....	60
III.3.3.1	Pertes de charges.....	60
a	Les pertes de charges linéaires.....	60
b	Les pertes de charges singuliers.....	60
III.3.3.2	Hauteur manométriques.....	61
III.3.3.3	Débit volume.....	61
III.3.3.4	Puissance hydraulique.....	62
III.4	Validation des résultats de simulation.....	62
III.4.1	Simulation du système pompage photovoltaïque.....	62
III.5	Conclusion.....	65
	Conclusion générale.....	67
	Bibliographie.....	68

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1:	Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction $P-N$	6
Figure I.2:	Courbe de déclinaison du soleil.....	7
Figure I.3:	Les différents types de rayonnement.....	8
Figure I.4:	Le rayonnement diffus.....	8
Figure I.5:	Composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.....	9
Figure I.6:	Cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.7:	Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.8:	Evolution de la production mondiale des technologies des cellules photovoltaïques.....	11
Figure I.9:	Evolution du rendement des différentes technologies.....	11
Figure I.10:	Cellules photovoltaïques en silicium.....	12
Figure I.11:	Cellule photovoltaïque à base de couche mince.....	13
Figure I.12:	Cellule photovoltaïque organique sur substrat souple.....	14
Figure I.13:	Installation photovoltaïque autonome.....	14
Figure I.14:	Installation hybride.....	15
Figure I.15:	Installation photovoltaïque couplée au réseau.....	16

CHAPITRE II

Figure II.1:	Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque réel.....	19
Figure II.2:	Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque idéale.....	20
Figure II.3:	Caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque.....	22
Figure II.4:	Caractéristique $P(V)$ de la cellule photovoltaïque.....	22
Figure II.5:	Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule.....	23
Figure II.6:	Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ de la cellule.....	23
Figure II.7:	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule.....	24
Figure II.8:	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P(V)$ de la cellule.....	24
Figure II.9:	Branchement série des cellules.....	25
Figure II.10:	Influence du regroupement série des cellules sur la caractéristique $I(V)$	26
Figure II.11:	Influence du regroupement série des cellules sur la caractéristique $P(V)$	26

Figure II.12:	Branchement parallèle des cellules.....	27
Figure II.13:	Influence du regroupement parallèle des cellules sur la caractéristique $I(V)$.....	27
Figure II.14:	Influence du regroupement parallèle des cellules sur la caractéristique $P(V)$.....	28
Figure II.15:	Branchement mixte des cellules.....	28
Figure II.16:	Influence de regroupement mixte des cellules sur la caractéristique $I(V)$.....	29
Figure II.17:	Influence de regroupement mixte des cellules sur la caractéristique $P(V)$.....	29
Figure II.18:	Circuit électrique basique du hacheur survolteur.....	30
Figure II.19:	Circuit électrique basique du hacheur dévolteur.....	31
Figure II.20:	Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.....	31
Figure II.21:	Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	32
Figure II.22:	Organigramme de l'algorithme Perturbation & Observation.....	33
Figure II.23:	Profil de l'ensoleillement.....	34
Figure II.24:	Tension continue photovoltaïque régulée V_d	34
Figure II.25:	Impact des variations de l'éclairement sur la tension continue photovoltaïque V_{dc}.....	34
Figure II.26:	Schéma d'un onduleur de tension triphasé.....	35
Figure II.27:	Génération des signaux de commande de l'onduleur pour $f_p = 350Hz$.....	37
Figure II.28:	Génération des signaux de commande de l'onduleur pour $f_p = 1400Hz$.....	37
Figure II.29:	Tensions simples V_{an} et V_{bn} de l'onduleur.....	38
Figure II.30:	Tension composée V_{ab} de l'onduleur.....	38
Figure II.31:	Tensions simples V_{an} et V_{bn} de l'onduleur.....	39
Figure II.32:	Tension composée V_{ab} de l'onduleur.....	39

CHAPITRE III

Figure III.1:	Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil.....	42
Figure III.2:	Stator du moteur asynchrone.....	43
Figure III.3:	Rotor du moteur asynchrone.....	43
Figure III.4:	Principe de la transformée de <i>PARK</i> (triphase vers le biphasé).....	48
Figure III.5:	Couple moteur.....	52
Figure III.6:	Vitesse de rotation du moteur.....	53
Figure III.7:	Courant statorique I_{sa}.....	53
Figure III.8:	Courant statorique I_{sb}.....	54
Figure III.9:	Courant statorique I_{sc}.....	54
Figure III.10:	Flux rotorique ϕ_{ra}.....	55

Figure III.11:	Flux rotorique ϕ_{rb}	55
Figure III.12:	Flux rotorique ϕ_{rc}	56
Figure III.13:	Pompe centrifuge	57
Figure III.14:	Constitution de la pompe centrifuge	58
Figure III.15:	Tension continue photovoltaïque V_{dc}	63
Figure III.16:	Tensions simples V_{an} de l'onduleur	63
Figure III.17:	Hauteur manométrique de la pompe centrifuge	64
Figure III.18:	Débit volume de la pompe centrifuge	64
Figure III.19:	Puissance hydraulique de la pompe centrifuge	65

Liste des tableaux

Tableau III.1	Paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	52
Tableau III.2	Paramètres de la pompe centrifuge.....	62

Liste des symboles

I : Courant de la cellule.

V : Tension de la cellule.

I_{ph} : Courant photoélectrique (sensible au photon solaire).

R_s et R_{sh} : Résistances représentant les pertes et la résistance du matériau.

I_{rs} : Courant de saturation de la diode.

I_{rr} : Courant de court-circuit de la cellule.

q : Charge d'électron ($1.6 * 10^{-19} C$).

A : Facteur d'idéalité de la diode.

K : Constante de Boltzmann ($1.38 * 10^{-23} J/K$).

T : Température ambiante ou de fonctionnement.

T_r : Température de référence ($25^{\circ}C$).

K_i : Coefficient de température de court-circuit.

G : Ensoleillement de fonctionnement.

G_r : L'ensoleillement référentiel ($1000 W/m^2$).

E_g : Energie de seuil.

η : Le rendement.

I_0 : Courant à vide.

I_D : Courant de la diode.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

P_{pv} : Puissance photovoltaïque.

V_{pv} : Tension photovoltaïque.

V_{dc} : La tension de bus continue.

N_p : Nombre des cellules en parallèles.

N_s : Nombre des cellules en série.

f_p : Fréquence de la porteuse.

f_m : Fréquence de référence.

m : Indice de modulation.

r : Coefficient de réglage en tension.

L_s : L'inductance propre statorique.

M_s : L'inductance mutuelle de couplage entre bobinages statoriques.

L_r : L'inductance propre rotorique.

M_r : L'inductance mutuelle de couplage entre bobinage rotoriques.

J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine [kg.m²].

K_f : Coefficient de frottement visqueux [Nm/rad/s].

C_r : Couple de charge [Nm].

Ω_r : Vitesse rotorique du moteur [rad/s].

W_s : Pulsation.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Φ_s : Flux statorique.

Φ_r : Flux rotorique.

W_r : Vitesse électrique du rotor.

λ : Coefficient de pertes de charge linéaires.

D : Diamètre interne du tube [m].

V : Vitesse moyenne du fluide [m/s].

g : Accélération de la pesanteur [m/s²].

L : Longueur de la tuyauterie [m].

Q : débit volume [m³/h].

H : Hauteur manométrique totale atteinte par la pompe [m].

P_H : Puissance communiquée au fluide par la pompe [W].

$H(t)$: Hauteur instantanée [m].

H_m : Hauteur maximale [m].

$N(t)$: Vitesse instantanée [tr/min].

N_m : Vitesse maximale [tr/min].

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

$Q(t)$: Débit instantané [m³/s].

Q_m : Débit maximal [m³/s].

ρ : Masse volumique du liquide [kg/m³].

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum power point tracker.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

AC : Courant alternatif.

DC : Courant continu.

P&O : Perturbation et observation.

MAS : Moteur asynchrone.

HMT : Hauteur manométrique totale.

INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie représente un grand problème dans les années à venir, à cause de son importance dans tous les secteurs pour les besoins énergétiques des pays industrialisés qu'ils ne cessent d'augmenter, et que les pays autour du développement ont toujours besoin d'énergie.

Au présent siècle notre consommation est basée sur les énergies fossiles, mais il reste le problème qui n'est toujours pas résolu et qui représente un point noir contre la terre qu'est la pollution causée par les émissions de gaz à effet de serre. Et aussi le point supplémentaire à ce sujet est la disparition ou la diminution importante du stock de ces énergies ce qui peut affecter négativement les générations futures. Suite à cela, pour trouver des meilleurs solutions, la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables, ce qui représente un secteur stratégique important et domine les recherches et le développement [1].

Le principal problème dont aucune solution n'a été trouvée pour la pollution de l'atmosphère sauf avec ces nouvelles inventions dont les énergies renouvelables pouvant diminuer la pollution qui existe et peuvent porter une solution à la couche d'ozone ainsi que la diminution de l'effet de gaz (dioxyde de carbone, oxyde d'azote) afin de rétablir le réchauffement climatique. Les énergies renouvelables ont les capacités de produire l'électricité avec un minimum de risque et avec une faible ressource par rapport aux autres énergies (non renouvelables), mais le problème de ses fluctuations naturelles demeure [1].

Parmi ces énergies il y a l'énergie solaire photovoltaïque. Elle est de plus en plus utilisée dans diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Pour cette énergie il est plus adapté pour une utilisation dans le milieu rural où les populations sont réparties dans des petites communautés, où la consommation d'énergie est relativement faible. De plus, le générateur lui-même ne nécessite pratiquement pas d'entretien car il ne contient pas de pièces mobiles, et les systèmes photovoltaïques ne nécessitent également aucune alimentation externe en combustible et en provenance de celui-ci en conséquence, nous pouvons dire que les coûts d'entretien et d'opération, qui sont également élevés sont réduits lorsque nous utilisons l'énergie solaire photovoltaïque [2].

La première installation de technologie de pompage d'eau utilisant l'énergie photovoltaïque a eu lieu à la fin des années 70, c'est une technologie émergente caractérisée par des coûts progressivement décroissants. Par conséquent, la technologie de pompage d'eau a un rôle important dans les projets d'application de l'énergie solaire, elle fait également partie des applications les plus importantes de l'énergie photovoltaïque, cela pourrait être dû aux coûts de connexion des sites distants au réseau électrique qui peut ne pas être économiquement viable [3].

Dans notre étude nous sommes intéressés à la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en trois chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous:

Le premier chapitre de ce travail correspond à des généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques. Nous allons présenter d'abord l'histoire de l'énergie électrique photovoltaïque et l'effet photovoltaïque. Puis, nous allons définir le rayonnement solaire et ces différentes caractéristiques: déclinaison de soleil, durée d'insolation et les types des rayonnements solaires (direct, diffus, réfléchi, et global). Après, nous nous sommes intéressés à la cellule solaire photovoltaïque comme élément essentiel qui rentre dans la constitution d'un système solaire photovoltaïque ; nous allons mentionner le principe de la cellule, puis nous allons présenter les technologies de fabrications des cellules, il existe en principe trois générations: cellules à base de silicium cristallin, cellules à base de couche mince et cellules organiques. Il existe plusieurs sortes de mise en œuvre d'une centrale photovoltaïque, on trouve l'installation autonome, l'installation hybride et l'installation couplée au réseau. Finalement, nous allons mentionnées les avantages et les inconvénients des installations photovoltaïques.

Le deuxième chapitre parle de la modélisation et simulation du système de production photovoltaïque. D'abord, nous allons faire la modélisation de la cellule photovoltaïque, on remarque qu'il y a deux cas: réel et idéal, et nous allons définir le rendement des cellules PV. Après la modélisation, et on utilise MatLab/Simulink nous allons simuler notre modèle d'étude pour obtenir des résultats et les expliquer. Puis, nous allons étudier l'influence des conditions climatiques: la température et l'ensoleillement. Pour former un générateur, il faut regrouper un nombre des cellules, il existe trois regroupements: série, parallèle, et mixte. Les convertisseurs statiques sont des éléments très importants dans la constitution de système photovoltaïque, dans notre système nous allons utiliser deux types des

convertisseurs: convertisseur DC/DC comme hacheur et convertisseur DC/AC comme onduleur. Nous allons définir le hacheur puis donner les types: Boost, Buck et Buck-Boost. Nous allons parler aussi de convertisseur DC/AC et donner la modélisation puis la simulation avec la commande MLI. La commande MPPT représente une partie essentielle dans les installations photovoltaïques, dans ce travail nous allons présenter l'MPPT puis donner les résultats de simulation de ce dernier.

Le troisième chapitre représente la modélisation du groupe moto-pompe et les résultats de simulation de pompage photovoltaïque. Pour compléter ce travail, nous allons choisir un moteur asynchrone à cage, nous allons d'abord donner sa structure « de stator et de rotor » ; puis nous allons expliquer le principe de fonctionnement de *MAS*. Pour passer à la simulation il faut d'abord donner la modélisation, et c'est lequel on a fait. Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques, magnétiques et mécaniques) dans son référentiel triphasé, mais avant ça nous allons mentionner les hypothèses simplificatrices. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de *PARK*. Cette transformation modélise la *MAS* dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. On lance la simulation de moteur et discute les résultats d'une manière détaillée. Dans notre travail, on a besoin d'une pompe, centrifuge cette fois, nous allons parler des généralités de la pompe ; nous allons faire la modélisation de la pompe mentionnant la hauteur manométrique, le débit et la puissance hydraulique.

On a finaliser notre étude par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités sur les Systèmes Solaires Photovoltaïques

1.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque est la plus appropriée pour avoir un monde propre et non pollué parce qu'on n'utilise pas de combustible pour cette conversion autre que le soleil, les systèmes photovoltaïques ne rejettent pas de pollution de l'air ou de l'eau nuisible dans l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (*PV*) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre on va essayer de donner une idée générale sur les systèmes solaires photovoltaïques, et quelques concepts qui vont nous aider à bien rentrer dans le thème.

1.2 Histoire de l'énergie électrique photovoltaïque

Le terme "*photovoltaïque*" vient du mot "photo" du grec "phos" qui signifie "lumière" et du mot "volt" patronyme du physicien *Alessandro Volta* qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité, appelé aussi module photovoltaïque, il permet la transformation directe de la lumière solaire en électricité par un processus appelé "*l'effet photovoltaïque*" au moyen de cellules généralement à base de silicium.

Le développement des cellules photovoltaïques a commencé en 1839 lorsque *Henri Becquerel* a observé le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide conducteur exposé à la lumière [4]. En 1883, *Charles Fritts* met au point la première cellule fonctionnelle à base de sélénium et d'or, elle présente un rendement d'environ **1%** [5].

En 1905, Albert Einstein explique l'effet photoélectrique. L'application directe de cette découverte majeure en physique n'a eu lieu qu'au milieu du 20^{ème} siècle avec la mise au point de la première cellule solaire à base de silicium cristallin avec un rendement énergétique de **6%** au *laboratoire Bel* (Etats Unis d'Amérique) en 1954 [6]. Toutefois, la commercialisation des cellules photovoltaïques a échoué en raison de leurs coûts prohibitifs. Et quelques années plus tard commence la conquête de l'espace, ce qui permet aux cellules solaires notamment à

base silicium de voir le jour en tant qu'applications commerciales. Puis, en 1958 une cellule avec un rendement de conversion de **9%** est mise au point et les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

Cependant, jusqu'au milieu des années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre ce qui a retardé cette nouvelle source d'énergie de s'imposer en dehors du domaine spatial.

Ce n'est qu'au début des années 80 que la technologie photovoltaïque a connu une période de plein essor partout dans le monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont alors étudiées en dépit des difficultés, les méthodes de fabrication se sont alors améliorées réduisant les coûts de production et permettant ainsi une augmentation des volumes de production.

Aujourd'hui la technologie du silicium domine le marché de la conversion photovoltaïque avec autour de **90%** de la production des panneaux solaires [7]. La plupart des modules commerciaux actuellement ont un rendement crête compris entre **13%** et **16%**, alors que les rendements record dans les laboratoires sont compris entre **20%** et **25%** pour les différents types de matériaux cristallins [8]. Néanmoins, la purification du silicium et l'utilisation de produits hautement toxiques constituent aujourd'hui un obstacle majeur au développement de l'énergie Photovoltaïque. Dans ce contexte de nouvelles filière prometteuse en cours de développement ont vu le jour comme le photovoltaïque à concentration, les pérovskites mais n'ont pas encore fait leurs preuves dans le domaine industriel [9].

1.3 L'effet Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés **P** (positif) et **N** (négatif), dénommé comme jonction **P-N** ou **N-P**. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **N** et dopée de type **P**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **N** diffusent dans le matériau **P** [10].

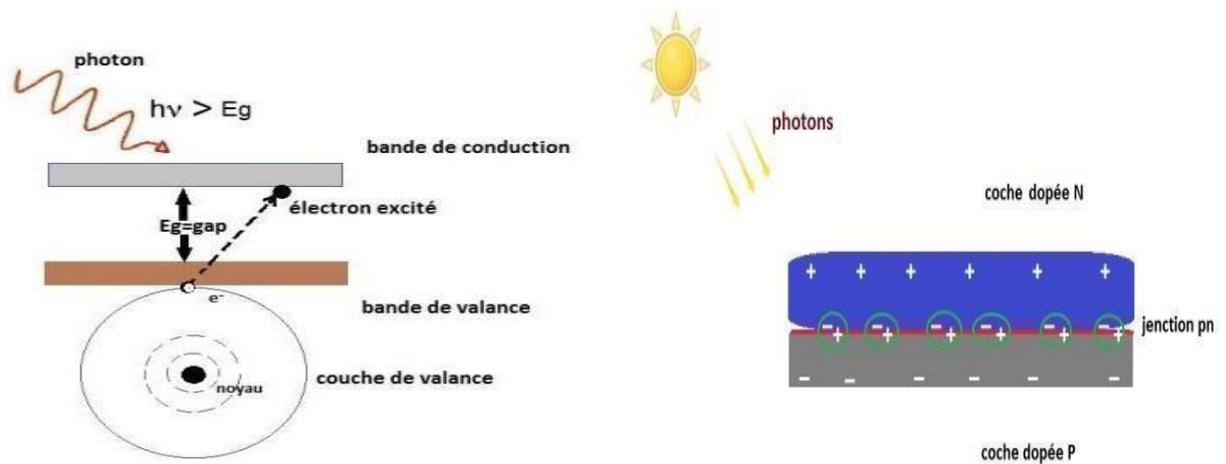


Figure I.1 Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction P-N [10]

I.4 Rayonnements solaires

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altération et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère, réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes...etc.). Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope) et l'autre partie dite directe est anisotrope [11].

I.4.1 Déclinaison du soleil

La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial. Sa valeur en degrés est donnée par l'équation de *Cooper* [12]:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (J - 80) \right] \quad \text{I.1}$$

Où, J est le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, c'est à dire, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

La déclinaison varie entre -23.45° marquée le 21 décembre et $+23.45^\circ$ pour le 21 juin comme l'exprime la figure (I.2).

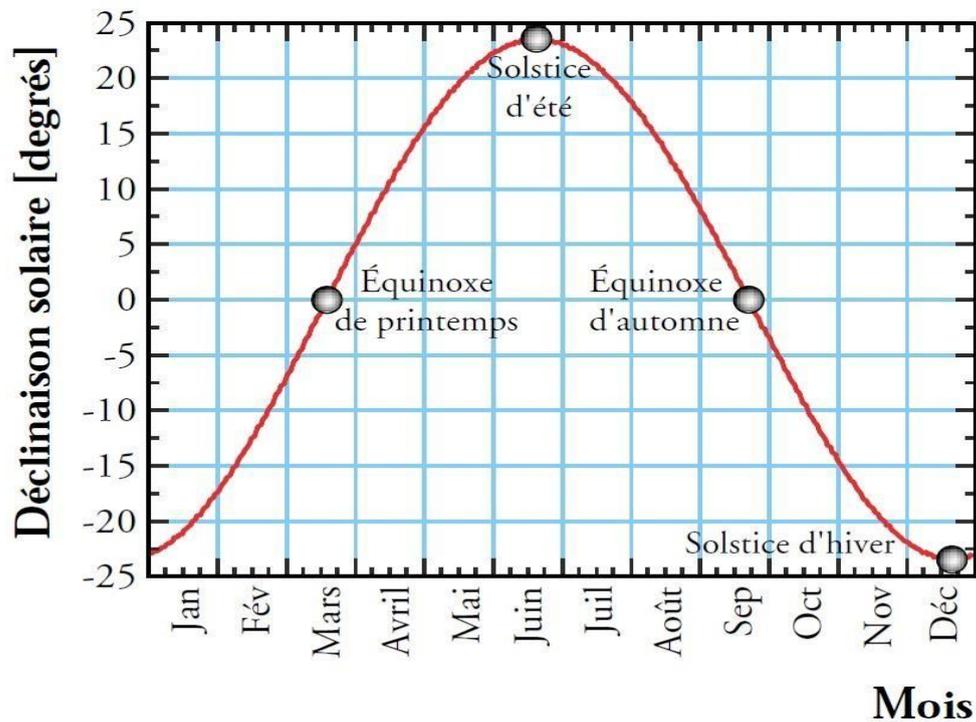


Figure I.2 Courbe de déclinaison du soleil [12]

1.4.2 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé *Campbell-Stokes* est un relevé héliographique sur laquelle nous nous appuyons pour lire le mouvement du soleil ou pour calculer l'heure effective de la journée. On peut aussi se fier au calcul du mouvement astronomique du soleil et de la terre, approximativement jusqu'au moment où le soleil est visible s'il n'est pas couvert de nuages. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle-même dépend de la période de l'année considérée [13,15].

1.4.3 Type des rayonnements solaires

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé vers le sol, on distingue plusieurs composantes expliquées par la figure ci-dessous [14].

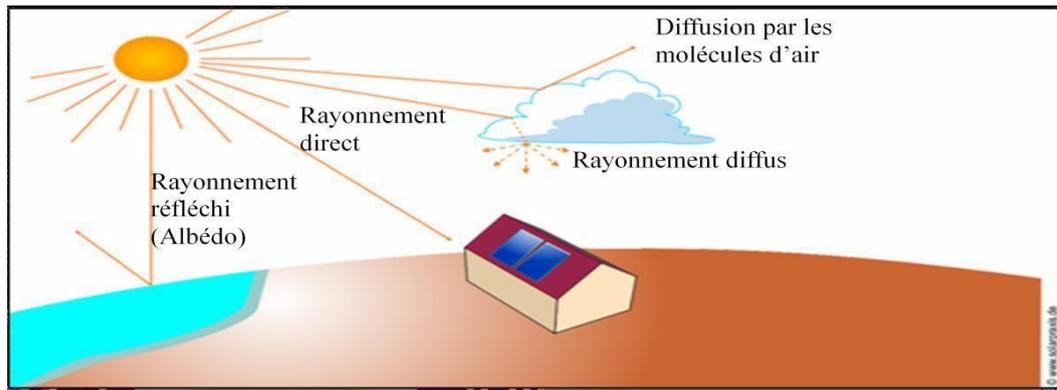


Figure I.3 Les différents types de rayonnement [14]

1.4.3.1 Rayonnement solaire direct

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement incident sur un plan donné provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire [14].

1.4.3.2 Rayonnement solaire diffus

C'est le rayonnement qui arrive au niveau du sol après avoir subi des collisions avec les constituants atmosphériques et qui est divisé en trois parties [16]:

- Le rayonnement diffus isotopique provenant de toute la voûte céleste.
- Le rayonnement diffus circonférence provenant de la couronne solaire.
- Le rayonnement diffus horizon provient d'une mince bande d'horizon due à une accumulation d'aérosol dans les basses altitudes.

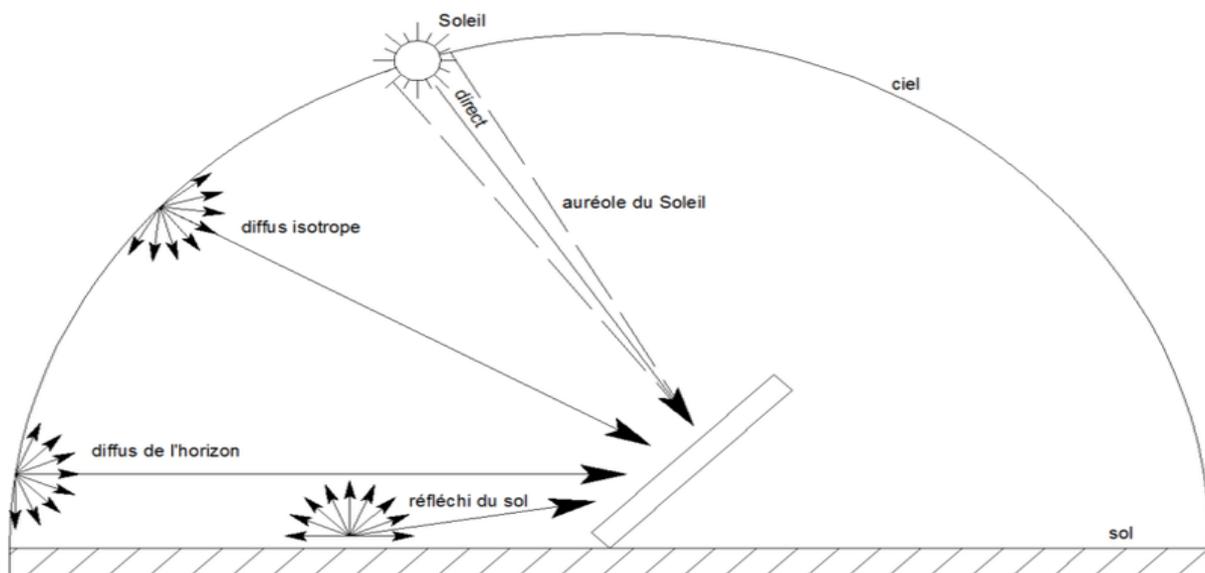


Figure I.4 Le rayonnement diffus [16]

La conversion photovoltaïque utilisant les modules photovoltaïques convertit aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus.

Le rayonnement diffus peut être estimé par la relation suivante [16]:

$$I_d = C \cdot I_b \quad \text{I.2}$$

Où C est le coefficient de diffusion du ciel, et ces valeurs sont tabulées et sont fonction des paramètres climatiques.

I.4.3.3 Rayonnement solaire réfléchi

C'est la fraction du rayonnement incident diffusée par le sol et les nuages. Ce terme étant généralement réservé au sol, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible et par définition, le corps noir possède un albédo nul. Le sol réfléchit une partie de l'éclairement qu'il reçoit en fonction de sa nature comme suivant [14]:

- Sol cultivé **10% à 25%**;
- Neige **60% à 90%**;
- Sable **30% à 40%**.

I.4.3.4 Rayonnement solaire global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et réfléti par le sol. La figure ci-dessous représente la schématisation de l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre [16].

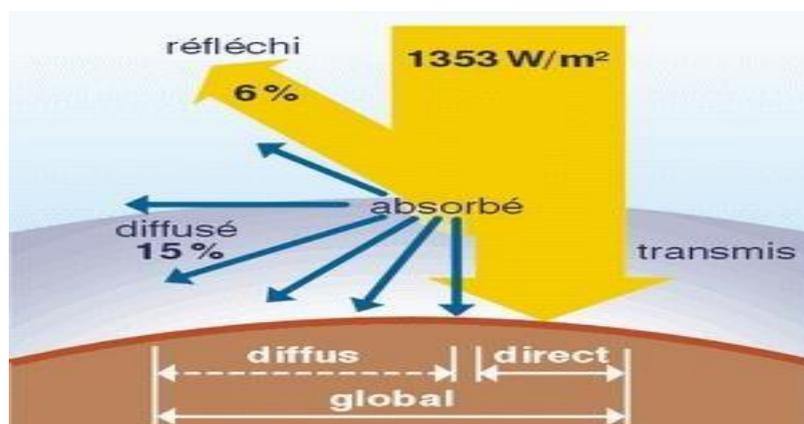


Figure I.5 Composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné [17]

- **Le rayonnement global sur une surface horizontale**

Pour un rayonnement incident I_b faisant un angle h avec l'horizontale, le rayonnement Global I_G est la somme du rayonnement direct I_b et du rayonnement diffus I_d [17].

$$I_G = I_b \sin(h) + I_d \quad \text{I.3}$$

- **Le rayonnement Global sur une surface inclinée**

Le rayonnement solaire global $I_G(\beta)$ sur une surface arbitraire ayant une inclinaison β par rapport à l'horizontale et un angle azimutal γ est la somme des composantes directe $I_b(\beta)$, diffuse $I_d(\beta)$ et réfléchi par le sol $I_r(\beta)$ du rayonnement solaire [17,18].

$$I_G(\beta) = I_b(\beta) + I_d(\beta) + I_r(\beta) \quad \text{I.4}$$

1.5 Cellules solaires photovoltaïques

La cellule photovoltaïque repose sur le principe d'un transformateur, elle transforme l'énergie solaire après l'absorption de l'énergie lumineuse directement en courant électrique, elle est composée d'un matériau semi-conducteur [19].

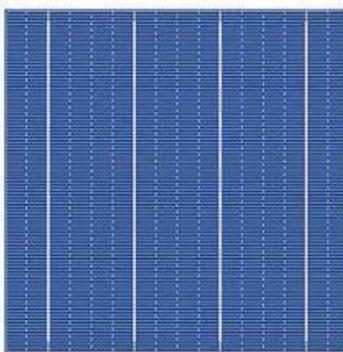


Figure I.6 Cellule photovoltaïque [19]

1.5.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives qui absorbe l'énergie lumineuse des rayons solaires et la transforme directement en électricité par le biais de la production et du transport sous l'effet de la lumière.

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium découpés en couches fines de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore.

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction $P-N$). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés comme le montre la figure (I.7) [20].

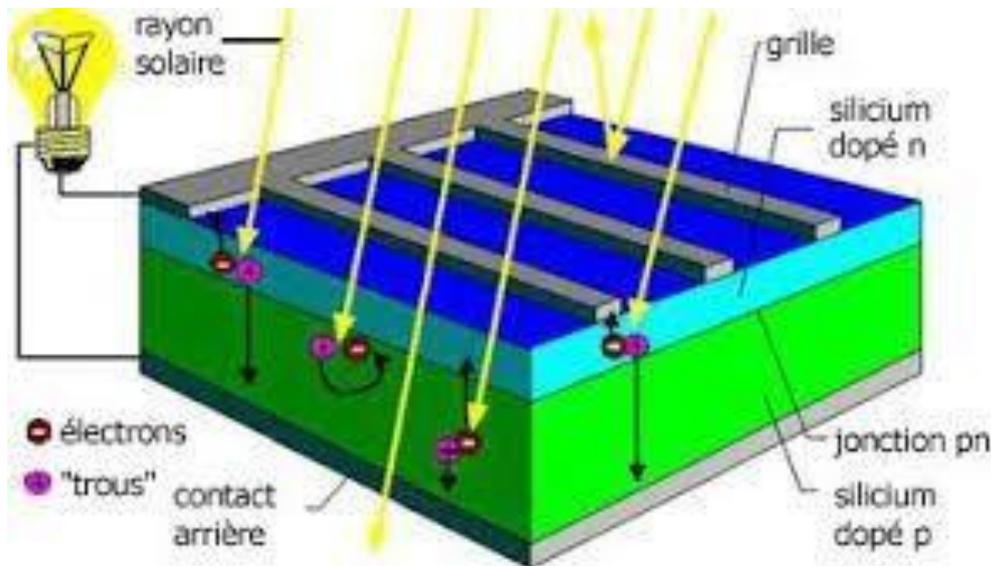


Figure I.7 Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque [20]

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [21]:

- Absorption de l'énergie du photon par le matériau constituant le dispositif;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique;
- Collecte des particules générées dans le dispositif, à cet effet, le matériau constituant la cellule doit donc posséder deux niveaux d'énergie et assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant.

1.5.2 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques

En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre la figure (I.8).

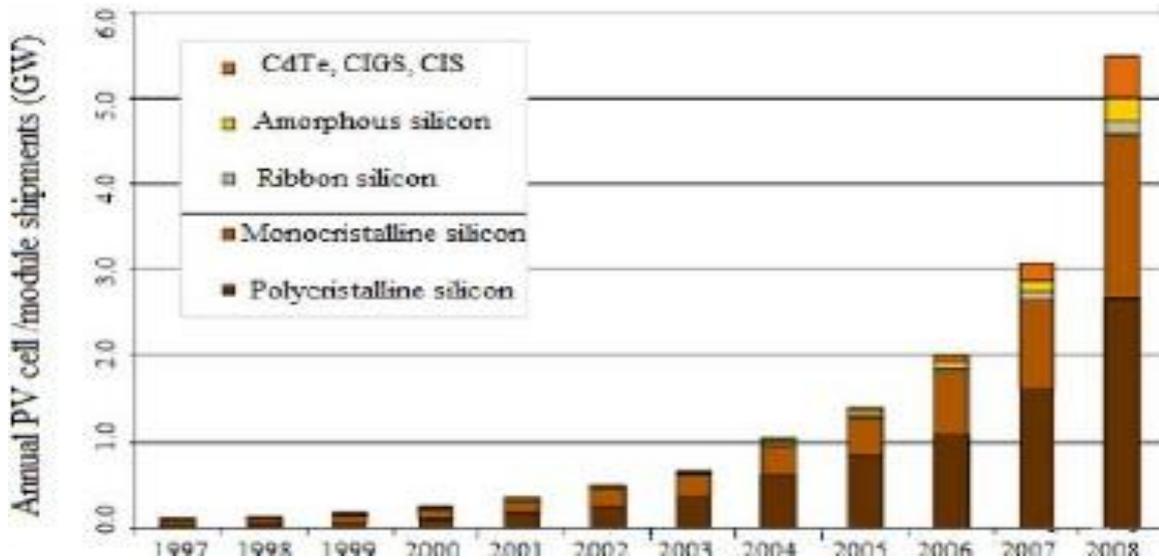


Figure I.8 Evolution de la production mondiale des technologies des cellules photovoltaïques [22]

La figure (I.9) représente l'évolution du rendement des différentes technologies des cellules. On remarque que toutes les filières continuent de progresser de façon continue depuis trente ans. Durant cette période, il n'y a pas eu de manque de continuité ou d'arrêt du progrès, ainsi que pour les nouveaux secteurs comme montre. On a pu montrer que la limite théorique du rendement de la conversion énergétique se situe au-delà de 80% et n'est pas, a priori, hors d'atteinte. Les records en laboratoire le rappellent régulièrement, tel celui de **41,6%** obtenu en 2008 aux USA [22].

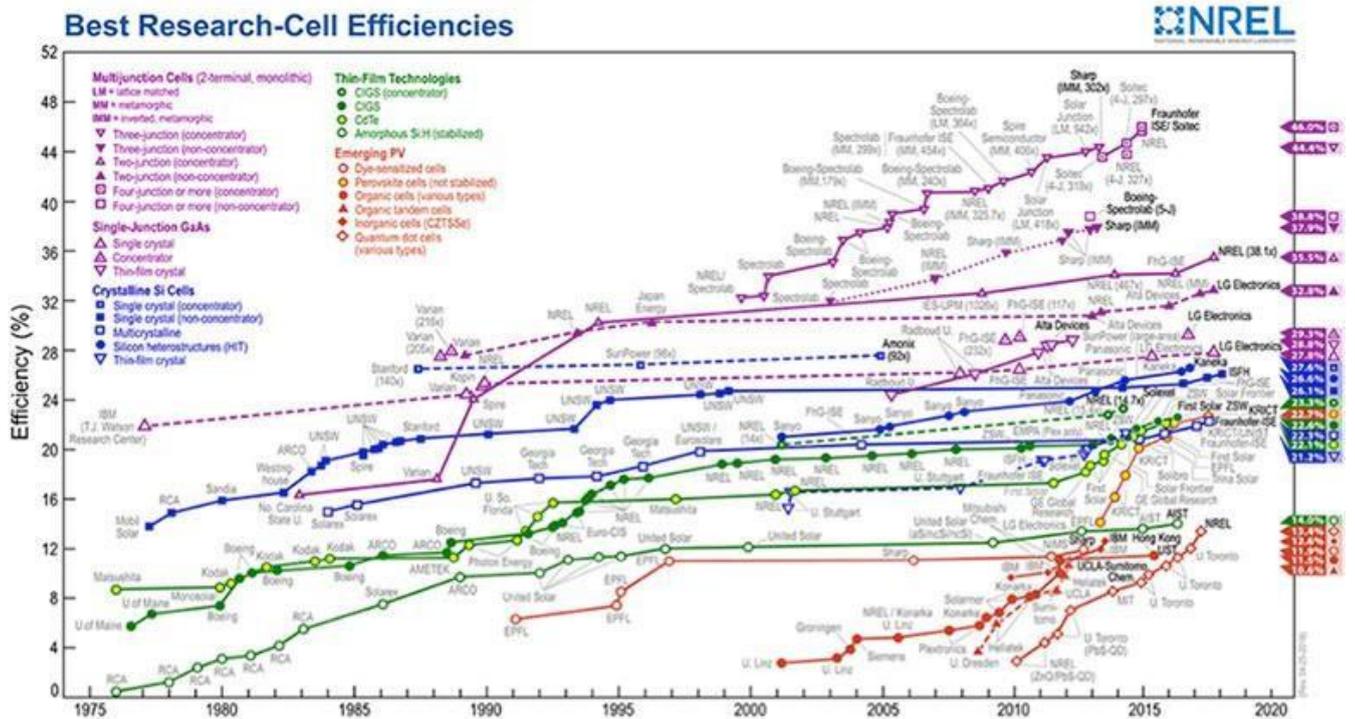


Figure I.9 Evolution du rendement des différentes technologies [22]

I.5.2.1 Première génération : Cellules à base de silicium cristallin

La plus grande partie de la production mondiale des panneaux photovoltaïques est constituée de silicium, et cela grâce aux ses avantages tels que son abondance, non-toxique et stable.

La filière silicium lui-même est divisée en plusieurs technologies en raison de la nature du silicium et/ou du mode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies [23]: le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin.

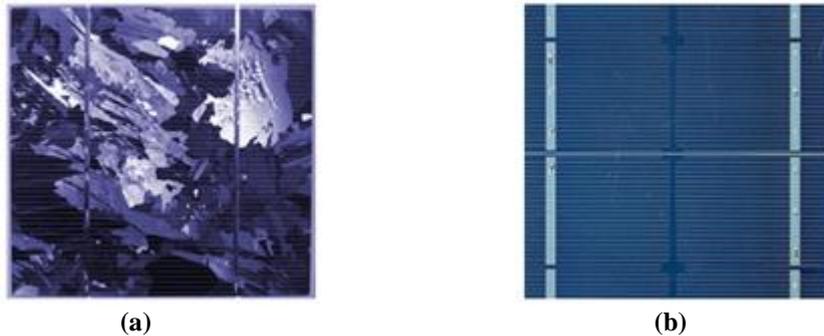


Figure I.10 Cellules photovoltaïques en silicium (a) Multi-cristallin et (b) Monocristallin [23]

- **Le silicium monocristallin**

Les cellules sont fabriquées en coupant le cristal fondu en fines lamelles. Ces cellules sont généralement d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre **12%** et **20%** pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi-cristallin [24].

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> • Excellent rendement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé ; • Rendement faible sous un faible éclaircissement.

- **Le silicium multi-cristallin (Poly-cristallin)**

L'utilisation du silicium multi-cristallin représente près de **50%** du marché et est la technologie la plus largement utilisée aujourd'hui. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend leur structure hétérogène. Sa fabrication est beaucoup plus simple, et donc les coûts de production sont plus faibles, mais son rendement est inférieur à celui du silicium monocristallin, qui varie entre **10%** et **14%** selon les fabricants [25].

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement 13%; • Moins cher que le monocristallin ; • Meilleur rapport qualité/prix. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible sous un faible éclairement.

1.5.2.2 Deuxième génération : Cellules à base de couche minces (Silicium amorphe)

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification où l'on constate que le prix de KW_C est élevé (KW_C est l'unité qui définit la puissance d'un générateur photovoltaïque aux Conditions de Test Standard (STC) ($1000W/m^2$ et $25^\circ C$)). Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui, malgré la baisse de ces dernières années. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (Figure 1.9) et ainsi de fabriquer des cellules souples à des coûts moins faible que ceux des cellules cristallines, en revanche, le rendement d'une cellule en silicium amorphe est inférieur à celui des cellules cristallines. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis des ombrages sévères [22].



Figure I.11 Cellule photovoltaïque à base de couche mince

1.5.2.3 Troisième génération : Cellules organiques

Ces cellules progressent de manière très rapide (environ **6%**), mais leur durée de vie est estimée à environ **1000heures**, et un obstacle à la stabilisation de leur performance demeure. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules "humides" et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules "plastiques" [26].

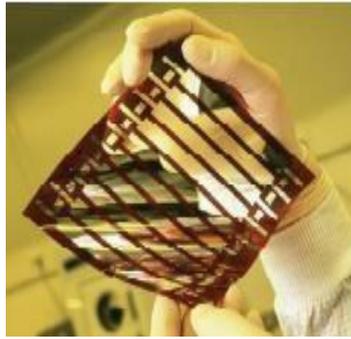


Figure I.12 Cellule photovoltaïque organique sur substrat souple

Ces cellules se caractérisent par la capacité de déposer en grande surface à grande vitesse, contrairement aux cellules constituées de matériaux inorganiques. Ces cellules devraient généralement être beaucoup moins chères que leurs concurrentes grâce au coût de fabrication inférieure [23].

1.6 Type des installations photovoltaïques

Une centrale solaire photovoltaïque est constituée d'un ensemble de modules solaires photovoltaïques. Il existe plusieurs sortes de mise en œuvre d'une centrale photovoltaïque [27]:

1.6.1 Installation autonome

Nous choisissons un type d'installation solaire autonome appelé "Stand-alone System", qui utilise l'électricité produite directement ou en stockant dans des batteries ; l'utilisation de ce type d'installation se fait dans le cas de bâtiments difficiles d'accès pour les logements pour leur fournir de l'énergie électrique, comme les montagnes ou les îles [28].

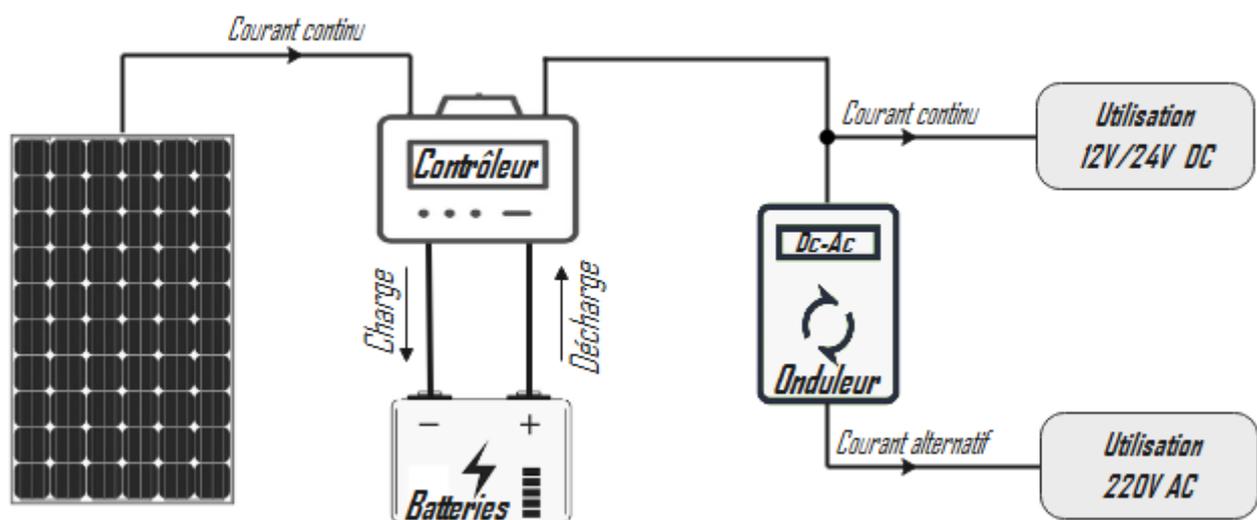


Figure I.13 Installation photovoltaïque autonome [28]

Une installation autonome se caractérise par un coût inférieur et est une source d'énergie fiable sans entretien et comme le montre la figure ci-dessus, elle est généralement constituée des éléments suivants [9]:

- Un ou plusieurs panneaux (x) photovoltaïque (s);
- Un régulateur solaire;
- Une ou plusieurs batteries d'accumulation;
- Un onduleur (seulement pour obtenir du courant alternatif).

1.6.2 Installation hybride

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, groupe électrogène...etc, et même parfois le réseau public d'électricité comme montre la figure.

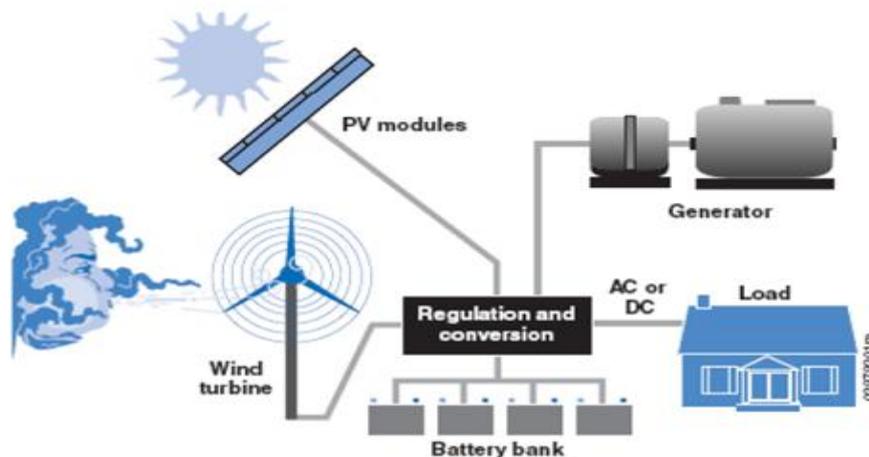


Figure I.14 Installation photovoltaïque hybride [26]

En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gasoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [26].

1.6.3 Installation couplée au réseau

Nous utilisons ces systèmes dans des bâtiments déjà connectés au réseau électrique, où ils sont connectés à l'aide d'un onduleur qui convertit le courant continu d'origine photovoltaïque en courant alternatif. Nous utilisons l'électricité des installations photovoltaïques produite directement par la charge ou injectée dans le réseau électrique [27].

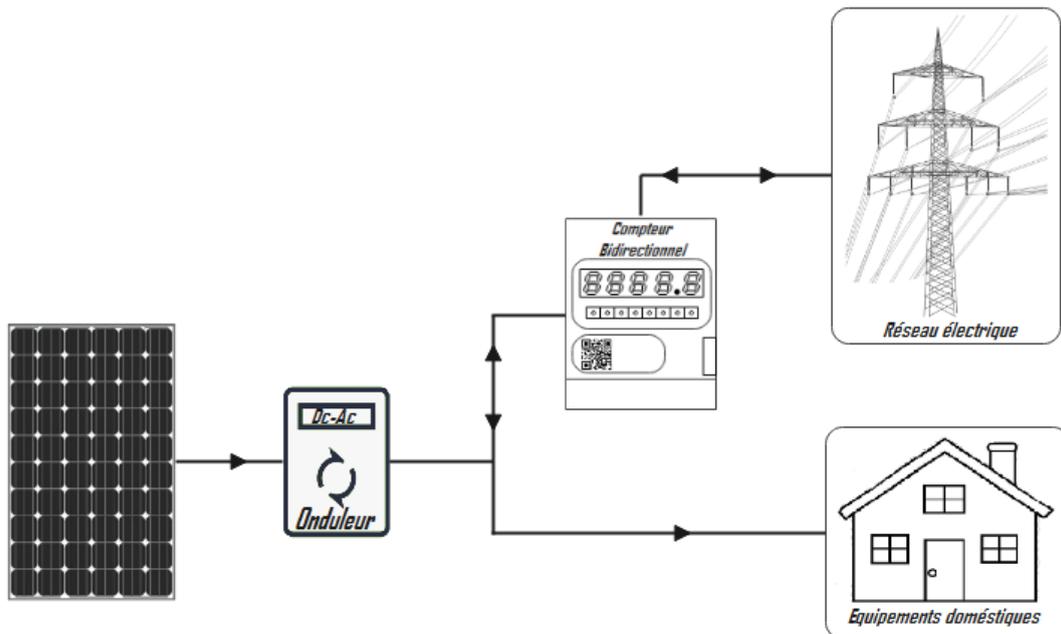


Figure I.15 Installation photovoltaïque couplée au réseau [27]

I.7 Avantages et inconvénients des installations photovoltaïques

I.7.1 Avantages[29]

- Vu que ces installations ne comportent aucune fixation de pièces mobile, elle présente également une grande fiabilité et grâce à cette faveur, elles sont adaptées particulièrement aux zones isolées.
- Coût de fonctionnement très faible où elle ne nécessite ni transport ni personnel hautement spécialisé. Alors, elles permettent un montage simple et adaptable aux besoins énergétiques divers.
- La technologie photovoltaïque est non polluant, silencieuse et n'entraîne aucune perturbation du milieu, et pour ces raison, elle son cout d'entretien est toujours minime et négligeable.

I.7.2 Inconvénients [29]

- Le coût de fabrication de l'unité photovoltaïque est élevé car il s'agit d'une haute technologie qui nécessite des investissements coûteux;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10% -15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%;
- Il y a une diminution de la demande d'énergie sur les générateurs photovoltaïques dans les régions isolées, de sorte que ces derniers ne concurrencent pas les générateurs diesel;
- Tributaire des conditions météorologiques;
- Le stockage de l'énergie électrique pose de nombreux problèmes car le coût du générateur augmente lorsqu'il est stocké sous forme chimique.

I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce premier chapitre, l'historique de l'énergie électrique photovoltaïque, l'effet photovoltaïque, le rayonnement solaire, et nous avons présenté aussi les différents éléments qui entrent dans la constitution d'un système solaire photovoltaïque tels que les cellules solaire photovoltaïques, les différents types des systèmes solaires photovoltaïques. Puis nous nous sommes intéressés aux différentes technologies des éléments constitutifs d'un système photovoltaïque. Finalement, nous avons mentionné les types des installations dans un système photovoltaïque, et nous avons cité les avantages et les inconvénients des installations.

CHAPITRE II

Modélisation et Simulation du Système de Production Photovoltaïque

II.1 Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutants. Après la modélisation, il y a l'étape de simulation de notre modèle pour obtenir les résultats voulus. Le but de ce chapitre est de modéliser puis simuler nos modèles d'étude. Le premier modèle qu'on a modélisé et simulé est la cellule photovoltaïque et puis on a étudié l'influence des conditions climatiques sur la cellule ; afin de regrouper des cellules pour former un générateur, étudions l'avantage de chaque regroupement (série, parallèle et mixte). Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant soit continu-continu soit continu-alternatif. Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Premièrement on commence par les convertisseurs *DC-DC* "Hacheur" ces différents types et la commande utilisée, et on termine par les convertisseurs *DC-AC* "Onduleur" et sa commande en Modulation de Largeur d'Impulsion "*MLI*" avec simulation. On présente dans ce chapitre, quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale "*MPPT*" basées sur la réaction de la puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et observation. Finalement, on a fini notre travail par une conclusion.

Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MatLab/Simulink.

II.2 Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque

II.2.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Pour modéliser les cellules photovoltaïques, il faut passer obligatoirement par un choix des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule photovoltaïque "*PV*" aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs

réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque [30].

II.2.1.1 Modèle du cas réel

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication est représenté sur la figure (II.1). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunt (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à R_s .

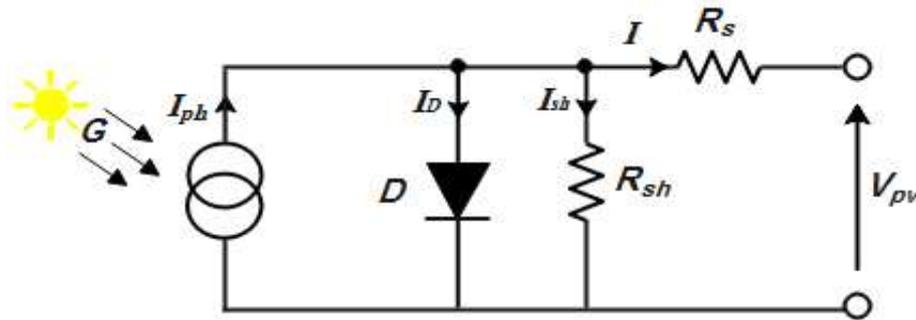


Figure II.1 Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque réel [31]

D'après le circuit et en appliquant la loi de Kirchhoff, on trouve que:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad \text{II.1}$$

Tant que I_{ph} est proportionnel à l'irradiation solaire comme indiqué dans l'équation [31]:

$$I_{ph} = [I_{rs} + K_i(T - T_r)] \frac{G}{G_r} \quad \text{II.2}$$

Où,

$$I_{rs} = I_{rr} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp\left(\frac{q E_g}{K A} \left[\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right] \right) \quad \text{II.3}$$

D'autre part, le courant à travers la diode I_D s'explique dans la relation suivante [32]:

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{K T_c A} \right) - 1 \right] \quad \text{II.4}$$

Selon la loi de Kirchhoff, le courant dans la résistance shunt est exprimé par:

$$I_{sh} = \left[\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right] \quad \text{II.5}$$

Avec,

I : Courant de la cellule;

V : Tension de la cellule;

I_{ph} : Courant photoélectrique(sensible au photon solaire);

R_s et R_{sh} :Résistances représentant les pertes et la résistance du matériau;

I_{rs} : Courant de saturation de la diode;

I_{rr} : Courant de court-circuit de la cellule;

q : Charge d'électron($1.6 * 10^{-19} C$);

A : Facteur d'idéalité de la diode;

K : Constante de Boltzmann ($1.38 * 10^{-23} J/K$);

T : Température ambiante ou de fonctionnement;

T_r : Température de référence (25°C);

K_i : Coefficient de température de court-circuit;

G : Ensoleillement de fonctionnement;

G_r : L'ensoleillement référentiel(1000W/m²);

E_g : Energie de seuil.

II.2.1.2 Modèle du cas idéal

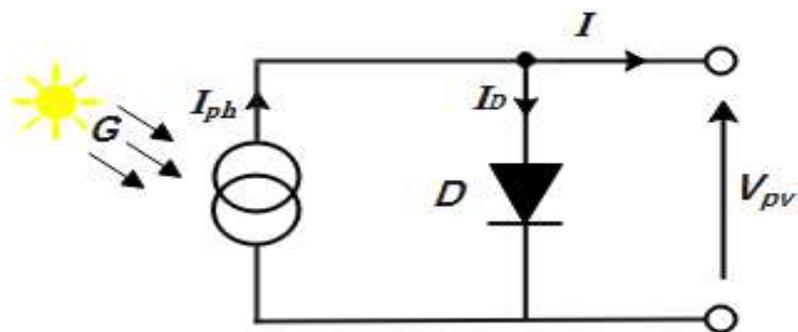


Figure II.2 Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque idéale [31]

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire idéale est représenté par la figure (II.2).

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme [31]:

$$I = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} \right) \quad \text{II.6}$$

D'où,

I_D est le courant de la diode exprimé par [31]:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} \right) \quad \text{II.7}$$

II.2.1.3 Rendement de la cellule photovoltaïque

Le rendement d'une cellule ou d'un module photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite par cette cellule ou module et l'énergie lumineuse reçue sur la surface correspondante:

$$\eta = \frac{P_{produite}}{P_{incidente}} \quad \text{II.8}$$

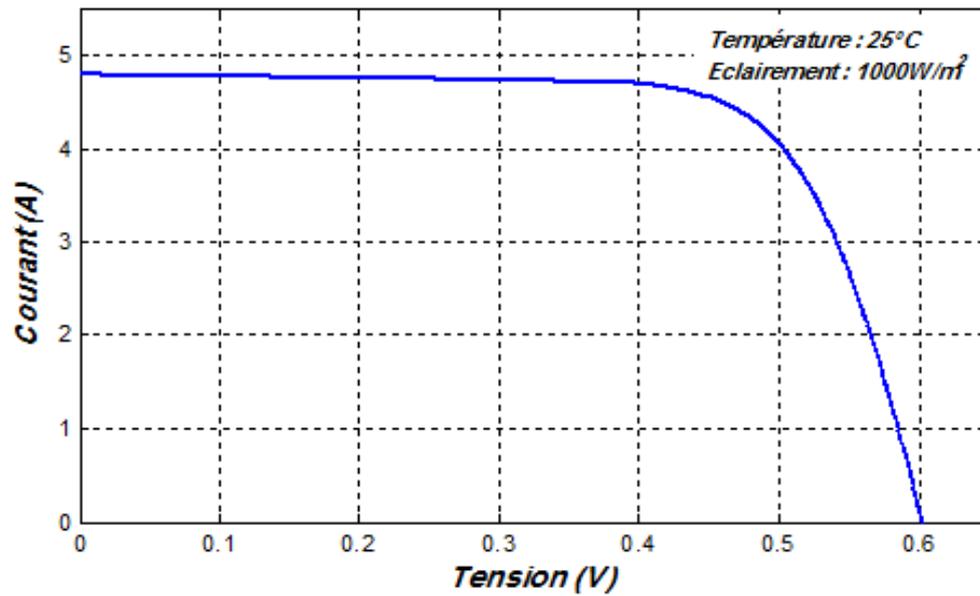
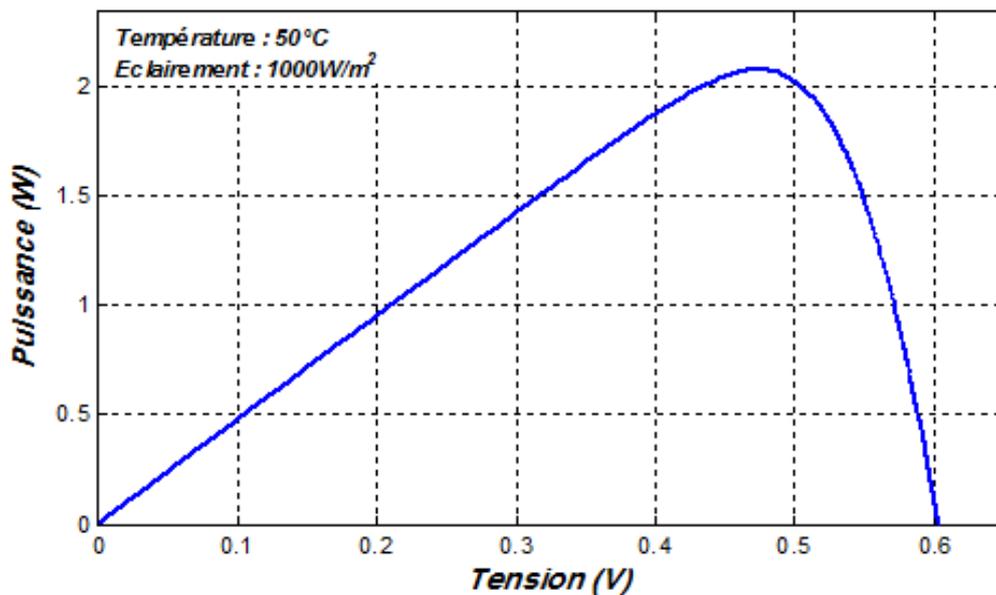
Le rendement réel varie donc continuellement, en fonction notamment, de l'énergie solaire incidente [32].

II.2.2 Simulation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle considéré dans notre travail est le modèle réel dont l'équation caractéristique tension-courant est donnée par [33]:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{KT_cA} \right) - 1 \right] - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \quad \text{II.9}$$

Le modèle de la cellule présenté a été validé en utilisant le logiciel MatLab/Simulink d'où, pour les conditions standard de fonctionnement sous une température ambiante de **25°C** et un éclairement solaire de **1000W/m²**, on a obtenu les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ illustrés par les figures (II.3) et (II.4).

Figure II.3 Caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïqueFigure II.4 Caractéristique $P(V)$ de la cellule photovoltaïque

II.2.2.1 Influence des conditions climatiques

a. Influence de la température

Pour pouvoir étudier l'influence de la température sur les paramètres de sorties d'une cellule photovoltaïque nous avons fixé l'éclairement à 1000W/m^2 et on a simulé le modèle pour différentes températures, 25°C , 45°C et 60°C d'où on a obtenu les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ sur les figures (II.5) et (II.6).

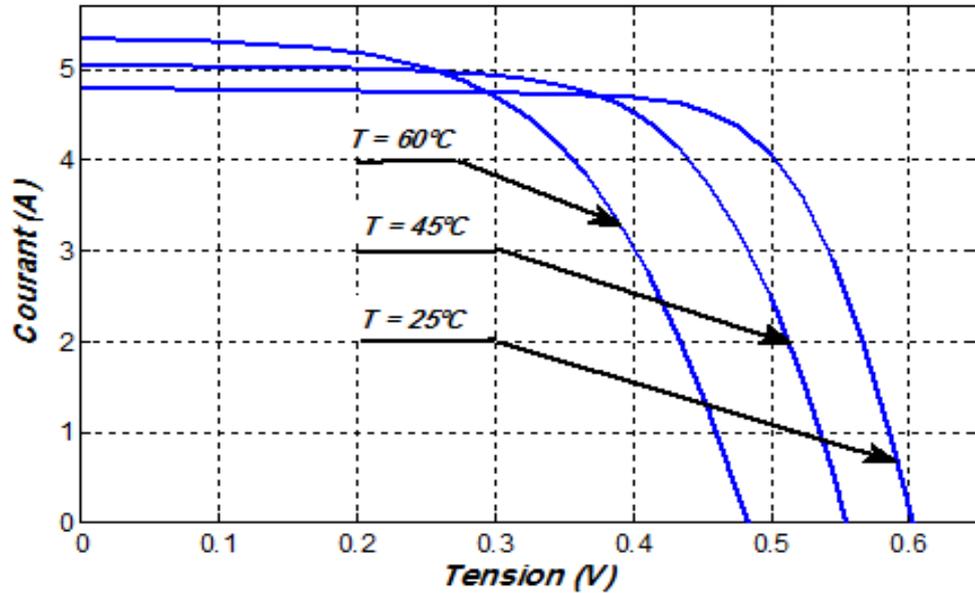


Figure II.5 Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule

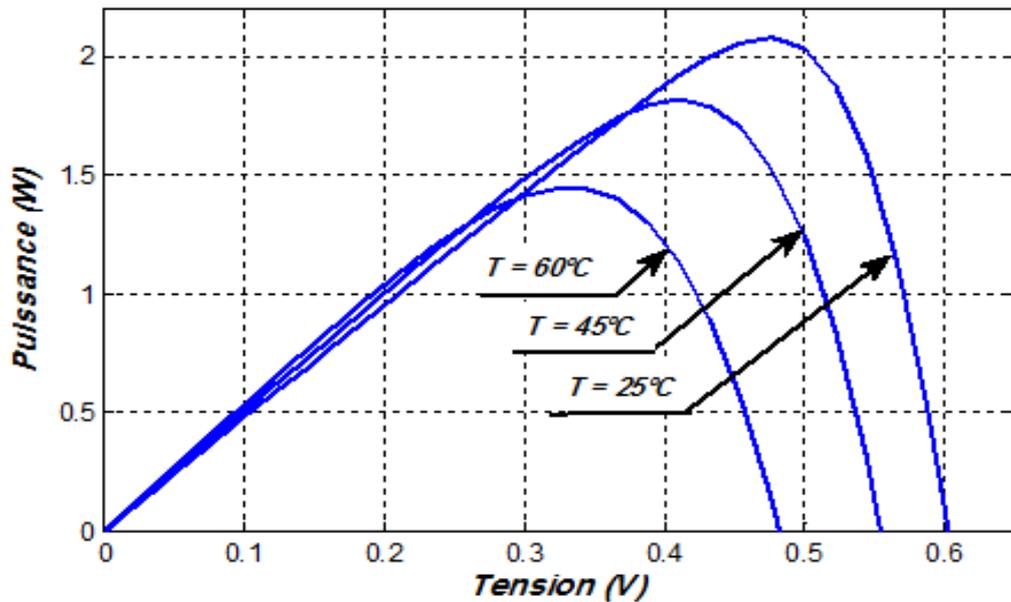


Figure II.6 Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ de la cellule

Selon les caractéristiques $I(V)$ qu'on a obtenues pour différentes valeurs de température, nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente comme le montre la figure (II.5). D'autre part, la température influe négativement sur la tension générée par la cellule d'où, on constate que l'augmentation de la température entraîne la diminution de la tension générée. Par conséquent, et selon les caractéristiques $P(V)$ de la figure (II.6), la puissance maximale de la cellule subit une diminution lorsque la température augmente.

b. Influence de l'ensoleillement

Dans cette essaie, on a simulé le modèle de la cellule pour une température fixé à 25°C mais pour différentes valeurs d'éclairement; $200\text{W}/\text{m}^2$, $500\text{W}/\text{m}^2$ et $1000\text{W}/\text{m}^2$.

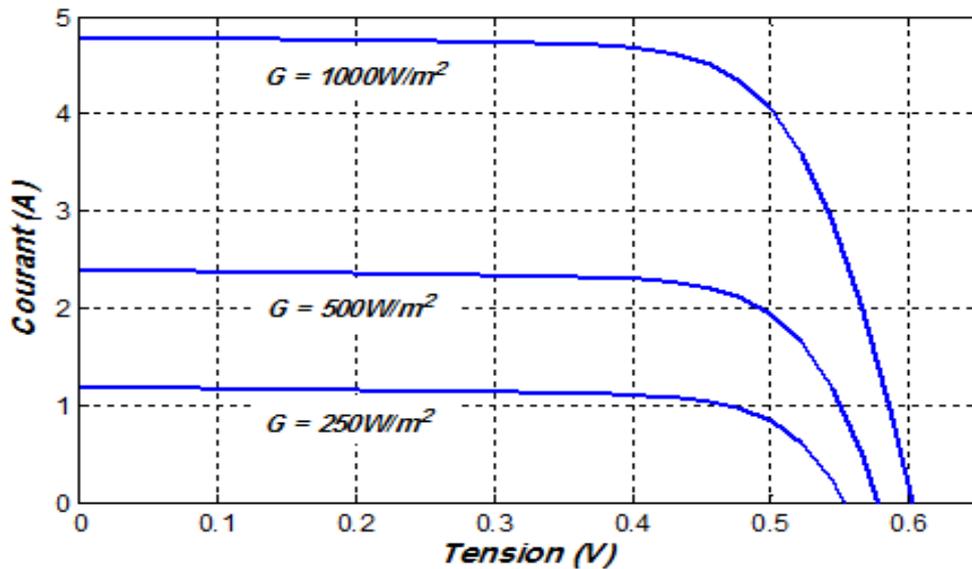


Figure II.7 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule

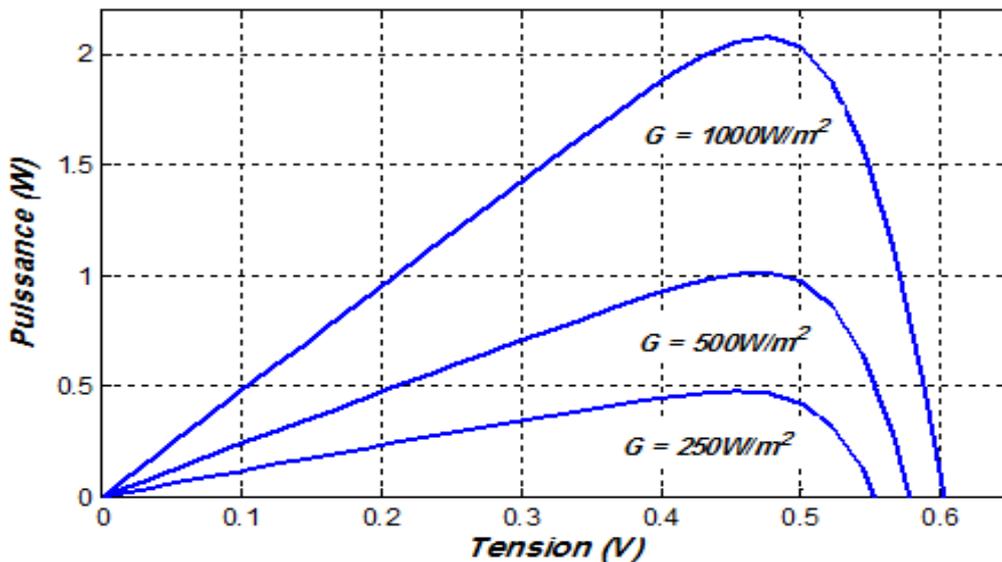


Figure II.8 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P(V)$ de la cellule

On peut voir sur la figure (II.7) que le courant subit une variation importante, d'où le courant produit par la cellule augmente avec l'augmentation de l'éclairement solaire. Comme nous le notons aussi, la tension est influencée positivement avec l'augmentation de l'éclairement solaire. L'augmentation de la tension et le courant produits par la cellule entraînent une augmentation importante de la puissance, et ce qui prouve que l'augmentation de l'ensoleillement augmente directement la puissance résultante (voir figure II.8).

II.3 Regroupement des cellules en un générateur

En raison de la faible tension générée par une cellule photovoltaïque (environ $0,5V$) et de sa faible puissance, il est nécessaire de combiner plusieurs cellules. On obtient alors un panneau solaire. On associe plusieurs cellules soit en série, soit en parallèle où en association série-parallèle (mixte) pour former un générateur photovoltaïque. Connectons ces cellules en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, alors la tension totale du générateur augmente. Si on les connecte en parallèle ça sera le contraire, c'est l'ampérage qui augmente. Mais, en branchement série-parallèle, on modifiant les deux paramètres (tension et courant) pour atteindre une puissance importante, cette interconnexion des cellules est la plus couramment utilisée pour former un module photovoltaïque.

Dans la constitution d'un module photovoltaïque, le modèle rend compte le nombre des cellules regroupées suivant les expressions suivantes [33]:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{A K T N_s}} - 1 \right] - N_p \left(\frac{q(V+R_s I)}{R_s * R_{sh}} \right) \quad \text{II.10}$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{q V_{oc}}{N_s K A T_c}\right) - 1 \right]} \quad \text{II.11}$$

II.3.1 Regroupement série des cellules

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même [34].

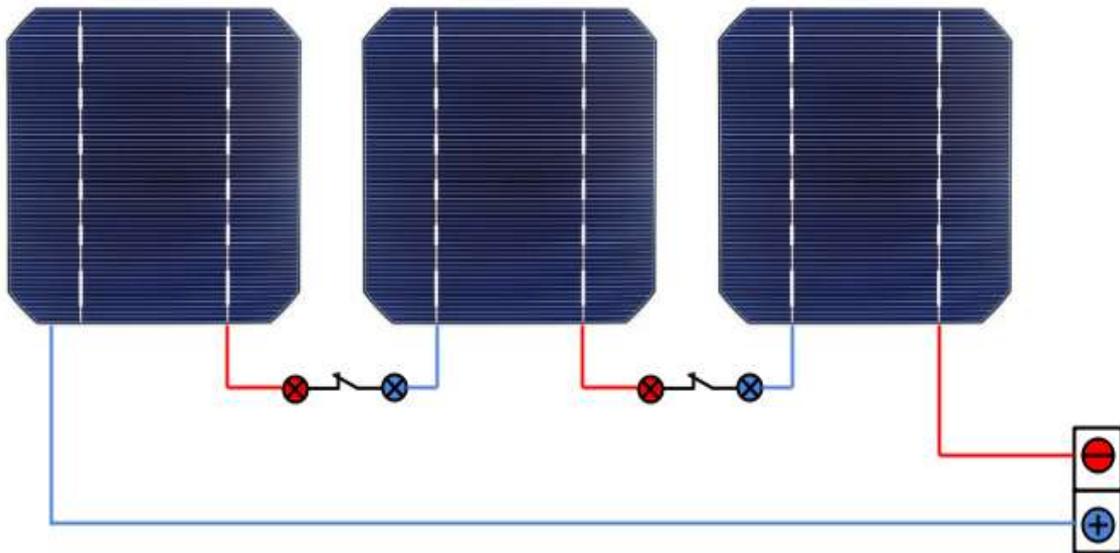


Figure II.9 Branchement série des cellules

La simulation du regroupement des cellules a été réalisé pour un nombre de cellule connectés en série N_s égale à 2 et 3

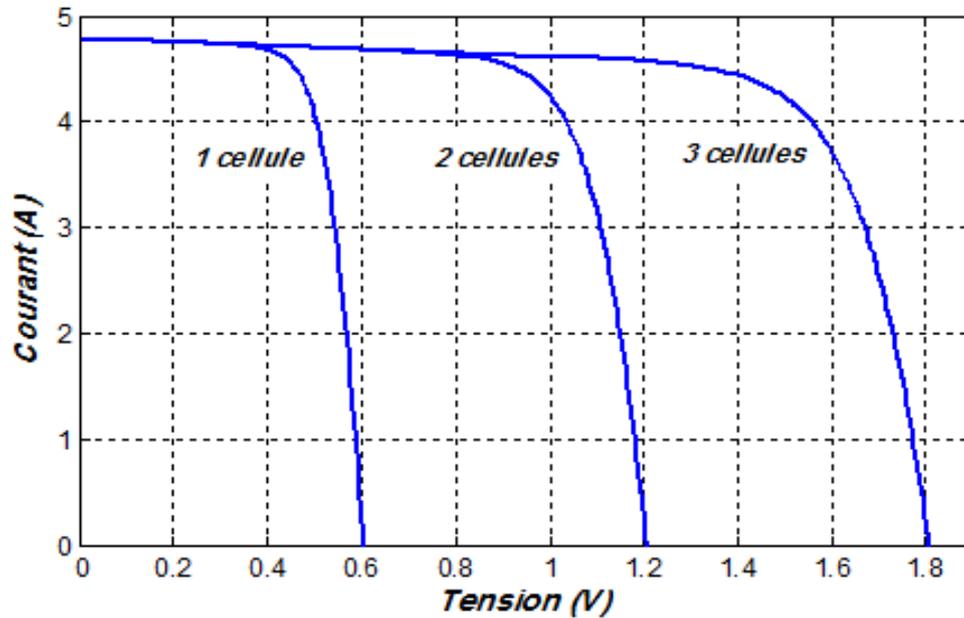


Figure II.10 Influence du regroupement série des cellules sur la caractéristique $I(V)$

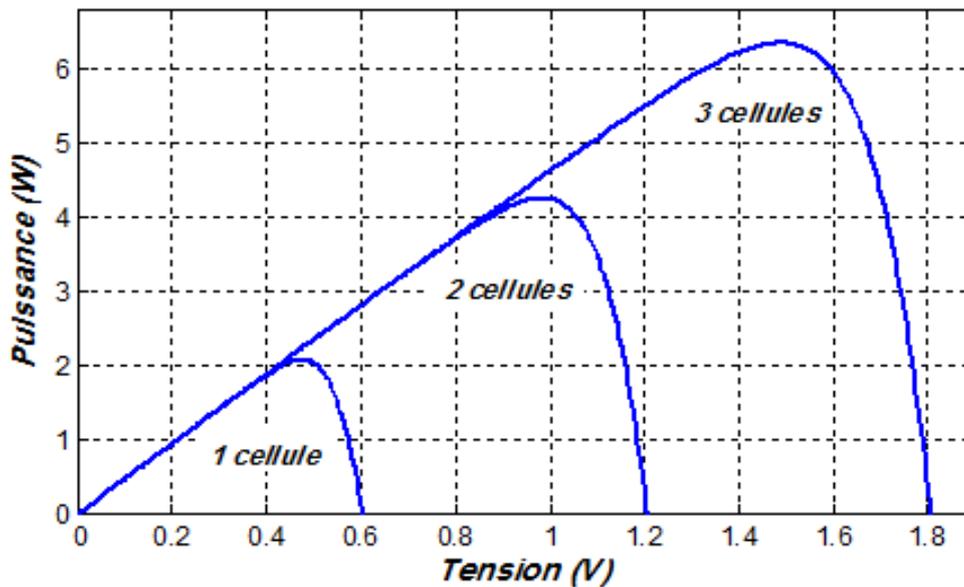


Figure II.11 Influence du regroupement série des cellules sur la caractéristique $P(V)$

Suivant les résultats obtenu, on remarque que lorsqu'on additionne des cellules en série, le courant reste toujours le même car dans un groupement série c'est la tension qui s'ajoute. Dans la figure (II.10) on constate que le courant est stable à **4.8A** quel que soit le nombre de cellules en série 1, 2 ou 3. Cependant, la tension s'améliore avec l'augmentation de nombre de cellules en série et par conséquent la puissance augmente aussi comme le montre la figure (II.11).

II.3.2 Regroupement parallèle des cellules

Dans un groupement de N_P cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition de courant [34].

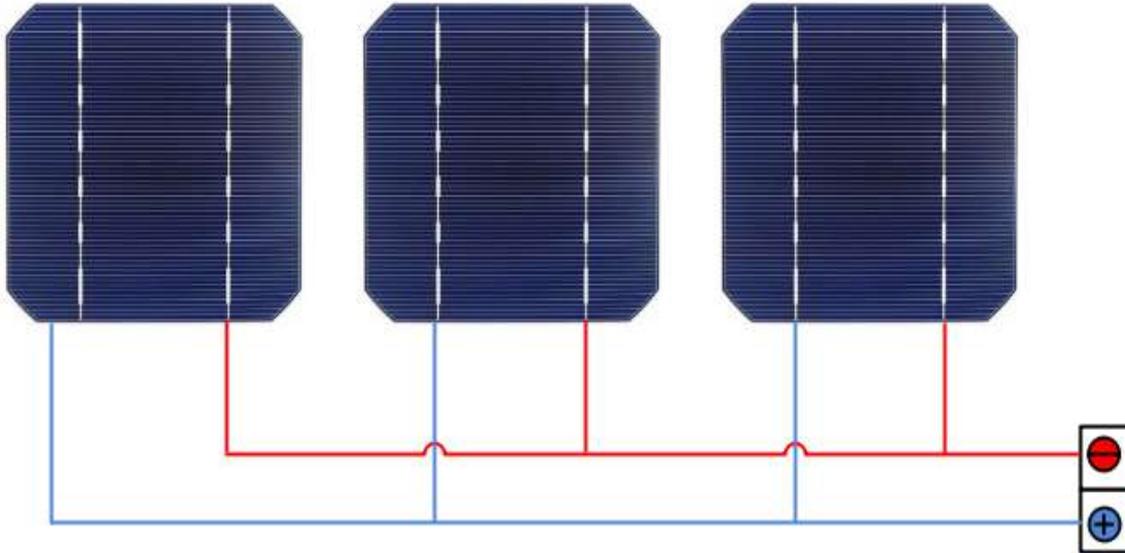


Figure II.12 Branchement parallèle des cellules

Dans cette essai, nous avons réalisé une connexion en parallèle d'un nombre de cellules photovoltaïques N_P égale 1, 2 et 3.

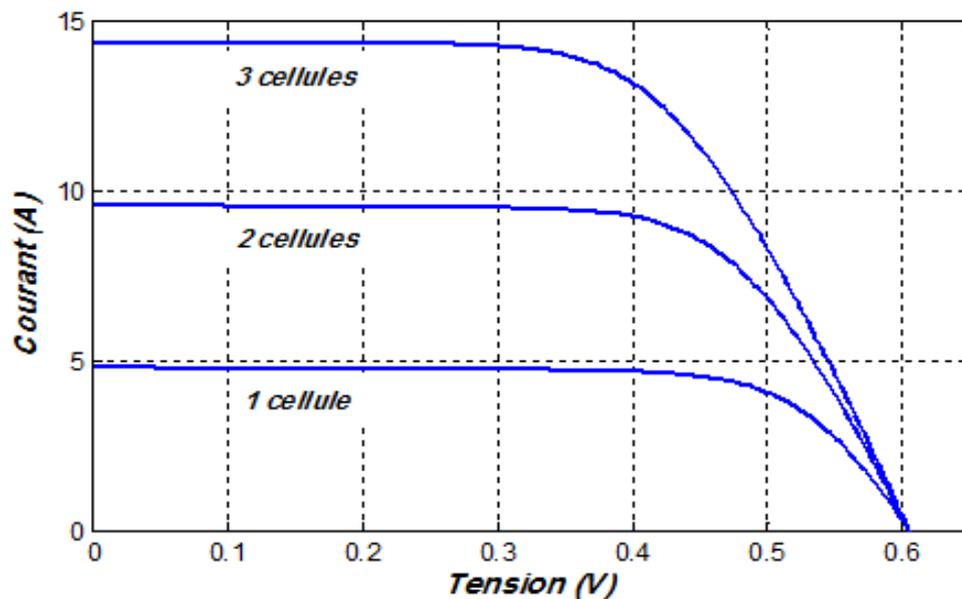


Figure II.13 Influence du regroupement parallèle des cellules sur la caractéristique $I(V)$

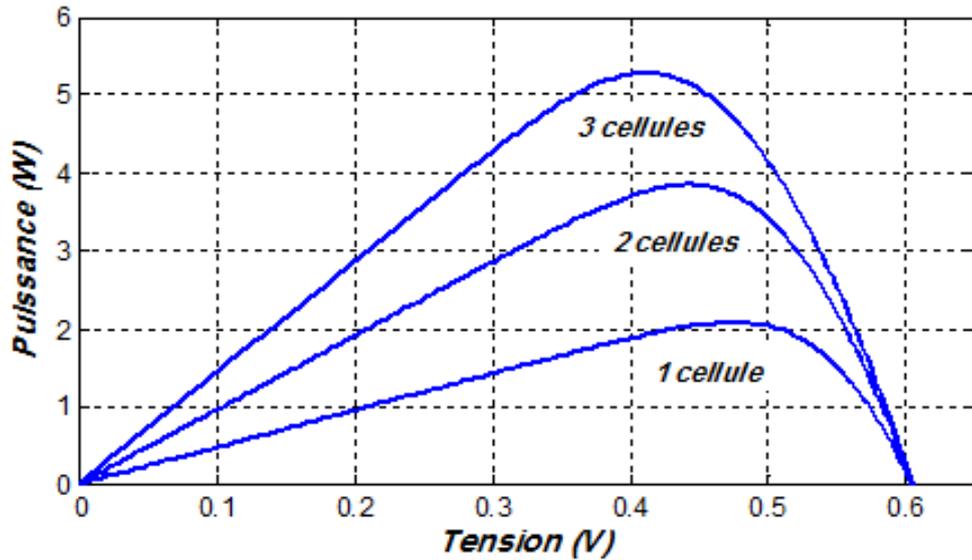


Figure II.14 Influence du regroupement parallèle des cellules sur la caractéristique $P(V)$

Dans le regroupement parallèle des cellules, c'est le courant qui s'additionne et c'est lequel on a remarqué sur les allures de la figure (II.13) d'où le courant augmente lorsque les cellules s'additionnent mais la tension reste toujours fixée. Cette augmentation du courant influe directement et positivement sur la puissance produite par le module et ce qui montre la figure (II.14) où la valeur maximale de la puissance maximale pour la connexion de 3 cellules est plus importante que la valeur maximale de la connexion de 2 cellules.

II.3.3 Regroupement mixte des cellules

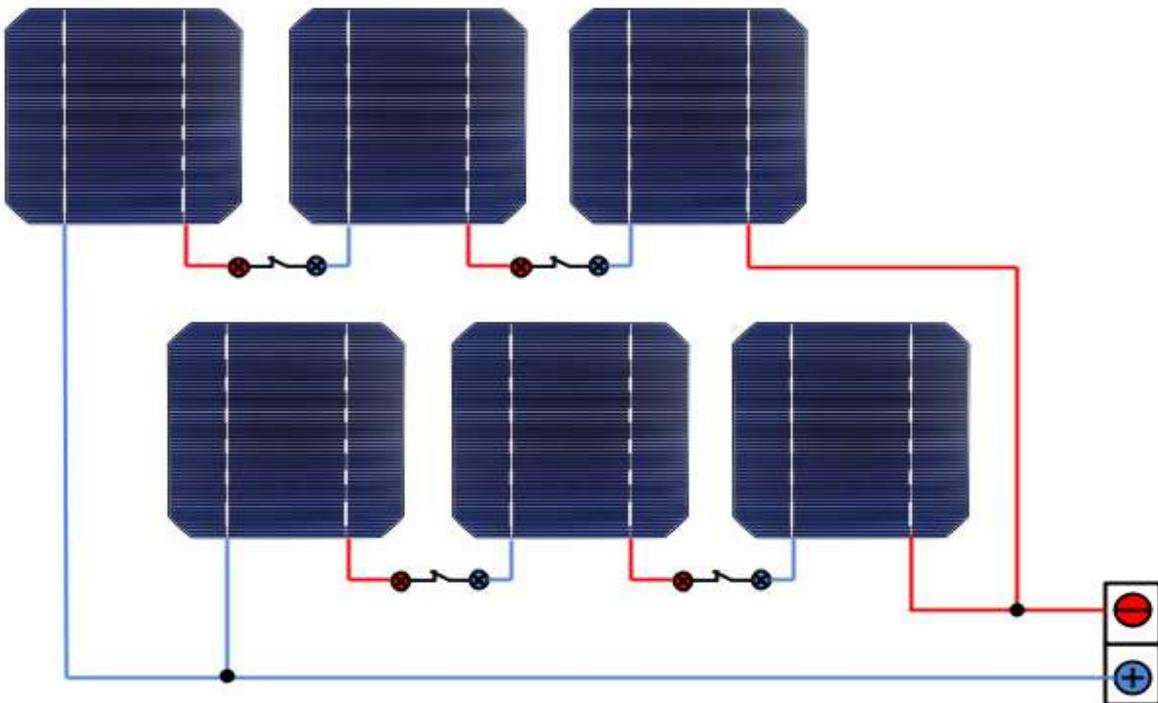


Figure II.15 Branchement mixte des cellules

Pour obtenir une tension et un courant plus élevée à la fois, on procède par une connexion en série-parallel d'un ensemble de cellules. La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on aura une augmentation de la tension pour un même courant et avec un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle on forme un module où on obtiendra un accroissement du courant et une conservation de la tension.

Dans cette essai nous avons formé un module photovoltaïque constituée par 6 branches de cellules dont chacune est composé de 4 cellules connectée en série ($N_S = 4$ et $N_P = 9$).

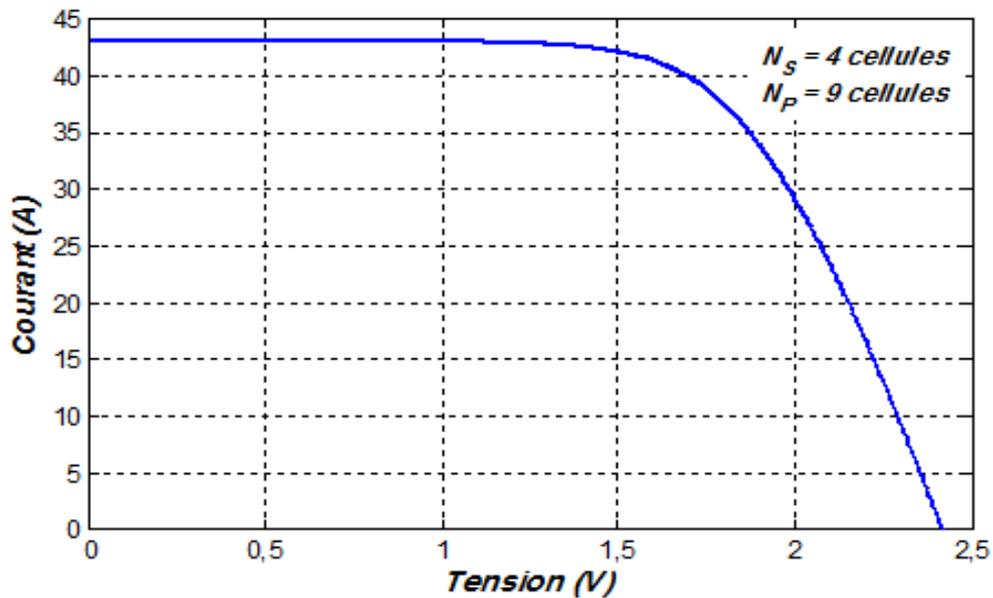


Figure II.16 Influence de regroupement mixte des cellules sur la caractéristique $I(V)$

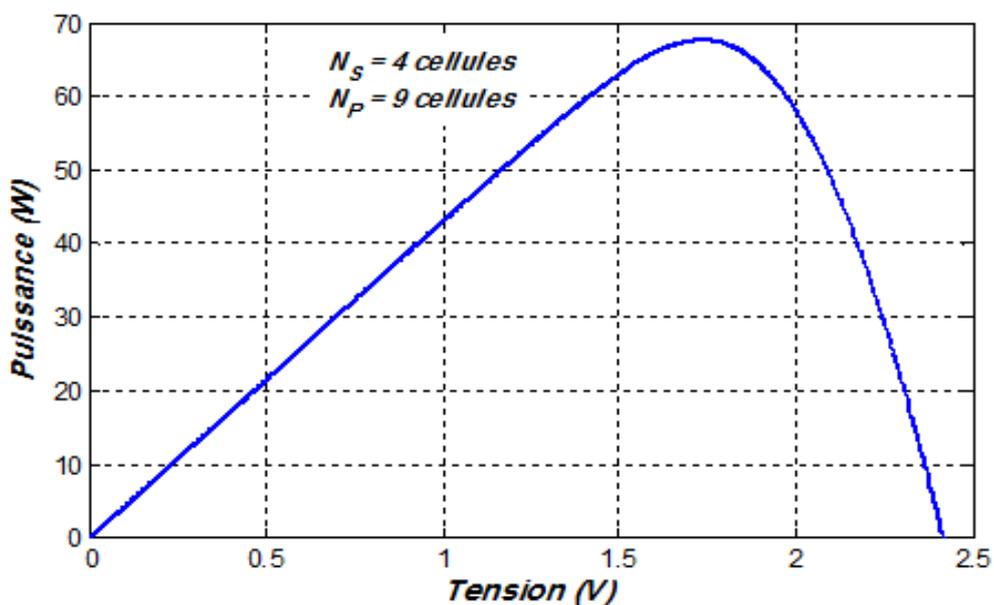


Figure II.17 Influence de regroupement mixte des cellules sur la caractéristique $P(V)$

Suivant les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ obtenus par simulation et représentées par les figures (II.16) et (II.17), on constate que le regroupement des cellules en série formant une branche de 4 cellules conduit à une augmentation à 4 fois de la tension d'une seule cellule où on a obtenu une tension du module égale à $2.4V$. On remarque aussi qu'une augmentation du courant à 9 fois ($43.2A$) par rapport au courant obtenu par une seule cellule (voir figure II.16).

II.4 Optimisation de la tension photovoltaïque générée

II.4.1 Conversion DC/DC par hacheur

- Définition

Le hacheur est un dispositif d'électronique de puissance qui convertit la tension continue en une tension continue réglable. Dans les hacheurs, on a de bons rendements car il se compose de condensateur et de commutateurs et tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active dans le cas idéal [35].

- Type des hacheurs

- a. Hacheur survolteur (Boost)

Le hacheur Boost est connu aussi par le nom "élévateur de tension". Le schéma de la figure(II.18) représente le circuit électrique du hacheur Boost, au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor s'ouvre pendant une durée de $(T-\alpha T)$ et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source (V_i), qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [35].

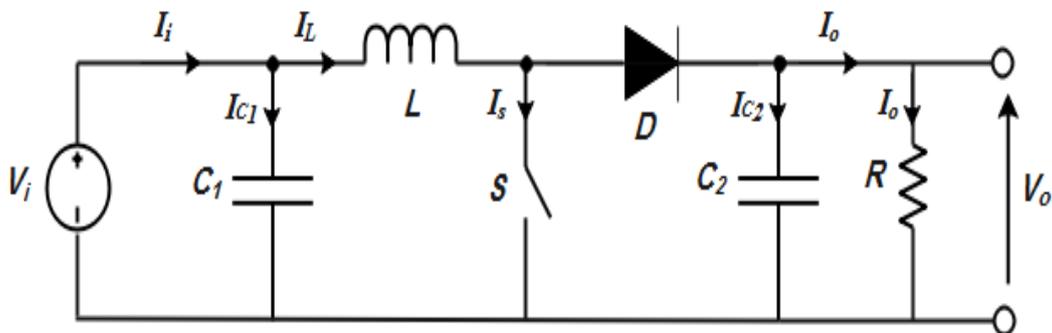


Figure II.18 Circuit électrique basique du hacheur survolteur [38]

- b. Hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur est illustré sous sa forme de base par la figure (II.19). Les composants clés sont l'inductance (L), le transistor représenté par le commutateur (S), la diode (D) et le

condensateur (C), celui-ci se charge par transistor qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement (T).

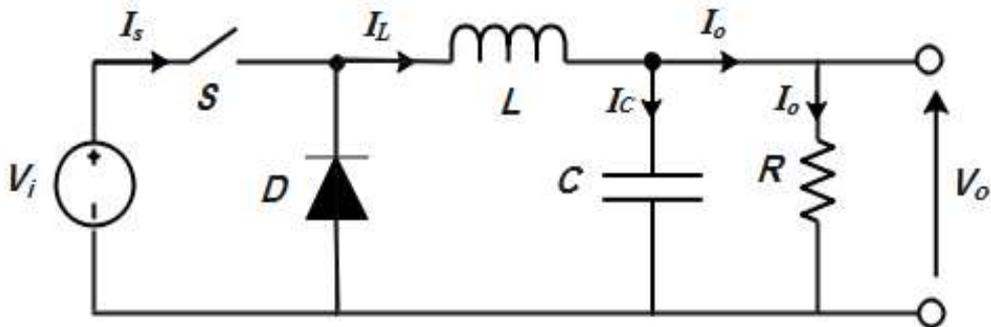


Figure II.19 Circuit électrique basique du hacheur dévolteur [39]

Le commutateur peut être un transistor *MOSFET* ou un *IGBT* qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge [36].

c. Hacheur Buck-Boost

La topologie basique de ce convertisseur est donnée par la figure (II.20). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque le transistor est sur la position "On", le courant dans l'inductance augmente et l'énergie est stockée. Et quand le commutateur tourne sur la position "Off", La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode et dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit [35]:

$$V_o = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i$$

II.12

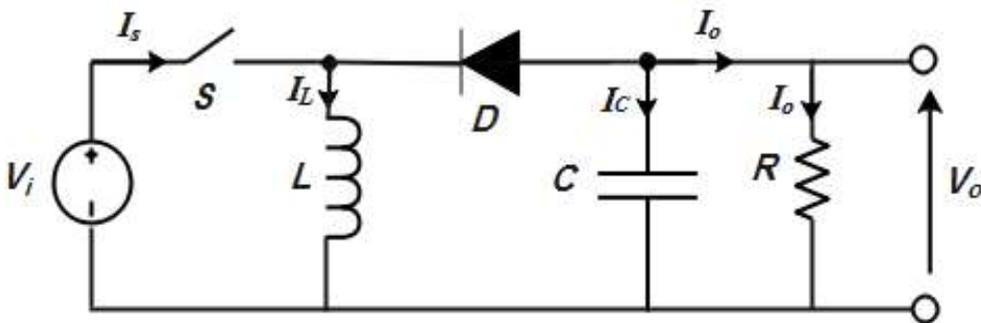


Figure II.20 Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur [39]

II.4.2 Modélisation du hacheur Boost

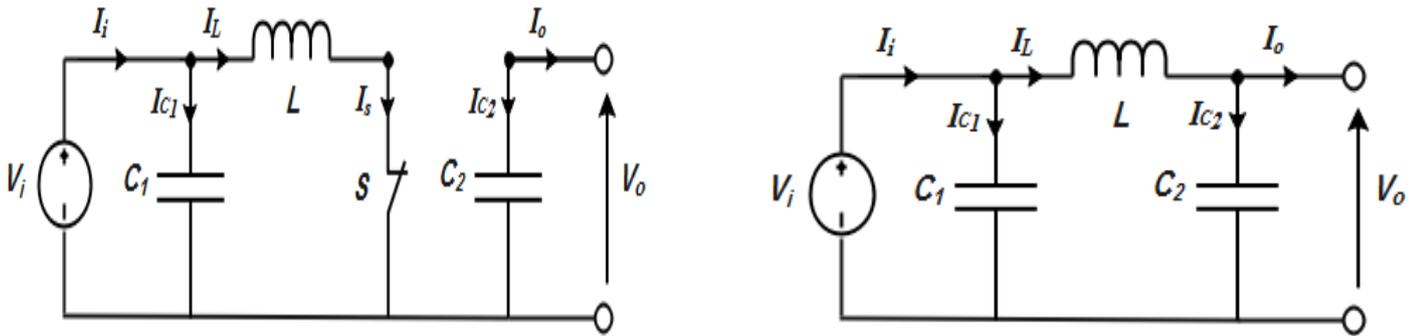


Figure II.21 Schémas équivalents du hacheur survolteur [40]
 (a) première phase de fonctionnement (b) deuxième phase de fonctionnement

Durant la première phase de fonctionnement (αT) du hacheur boost représenté par la figure (II.18) où le thyristor (S) est passant dont on peut le remplacer par interrupteur fermée comme le montre la figure (II.21 -a-), le modèle sera décrit par le système d'équation suivant [37]:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad \text{II.13}$$

Dans la deuxième phase ($T-\alpha T$), le thyristor (S) est bloqué et remplacé par une interrupteur ouverte d'où le circuit équivalent de cette phase est défini par la figure (II.21-b-), les équations décrivant le modèle du hacheur dans cette phase est le suivant [37]:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad \text{II.14}$$

On trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur:

$$\begin{cases} i_L(t) = i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0(t) = (1 - d)i_L(t) - c_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - d)V_0(t) \end{cases} \quad \text{II.15}$$

II.4.3 Commande de poursuite du point de puissance maximale

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de point de puissance maximum (MPPT: **M**aximum **P**ower **P**oint **T**racker) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension $I(V)$ des cellules. Donc, la commande **MPPT** est une partie essentielle dans la plupart des installations photovoltaïques.

Plusieurs techniques ont été développées depuis 1968, dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [38].

Dans la littérature plusieurs méthodes de tracking ont été proposées, mais dans ce travail on applique la commande Perturbation et Observation (**P&O**) qui est la technique la plus largement utilisée grâce à sa simplicité avec peu de paramètres de mesure [39]. Pour l'utiliser on considère que le module photovoltaïque fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le point de puissance maximale. La méthode **P&O** fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau (V_{pv}) et en observe la variation de la puissance électrique (P_{pv}) délivrée à la sortie du panneau [40].

La commande MPPT à base de la technique **P&O** se déroule selon l'organigramme suivant [39]:

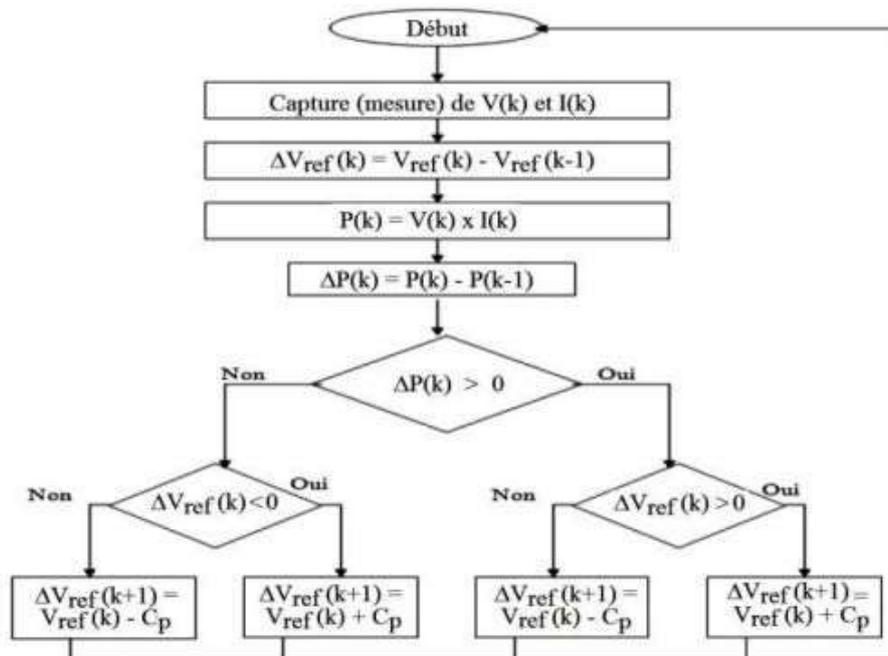


Figure II.22 Organigramme de l'algorithme Perturbation & Observation

II.4.4 Simulation de la commande MPPT par la technique P&O

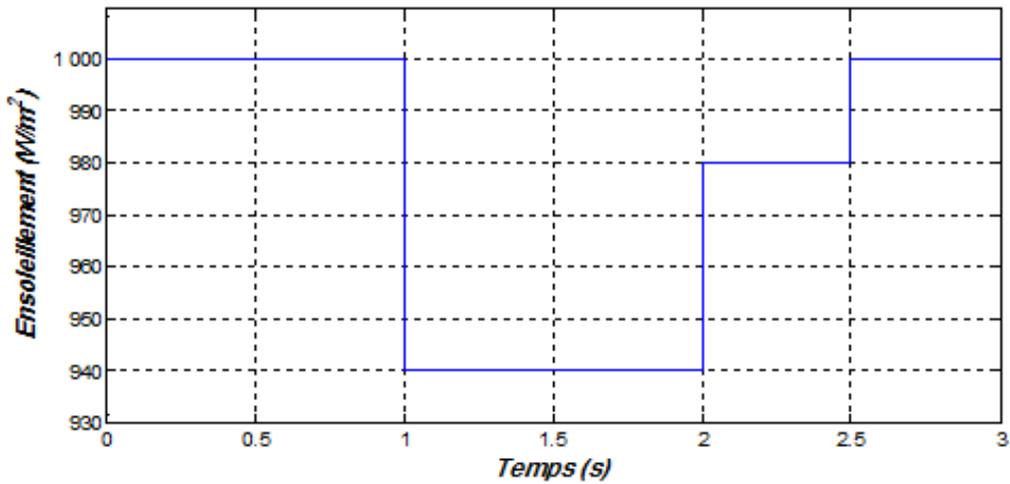


Figure II.23 Profile de l'ensoleillement

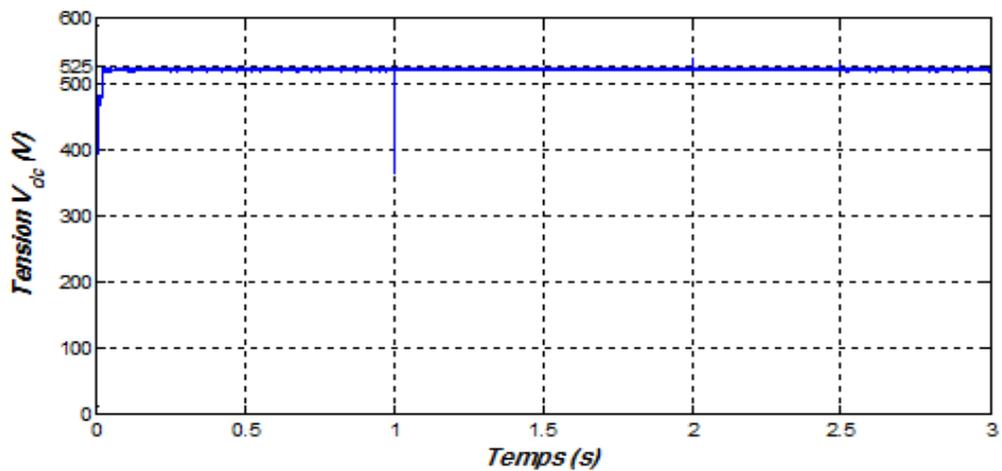


Figure II.24 Tension continue photovoltaïque régulée V_{dc}

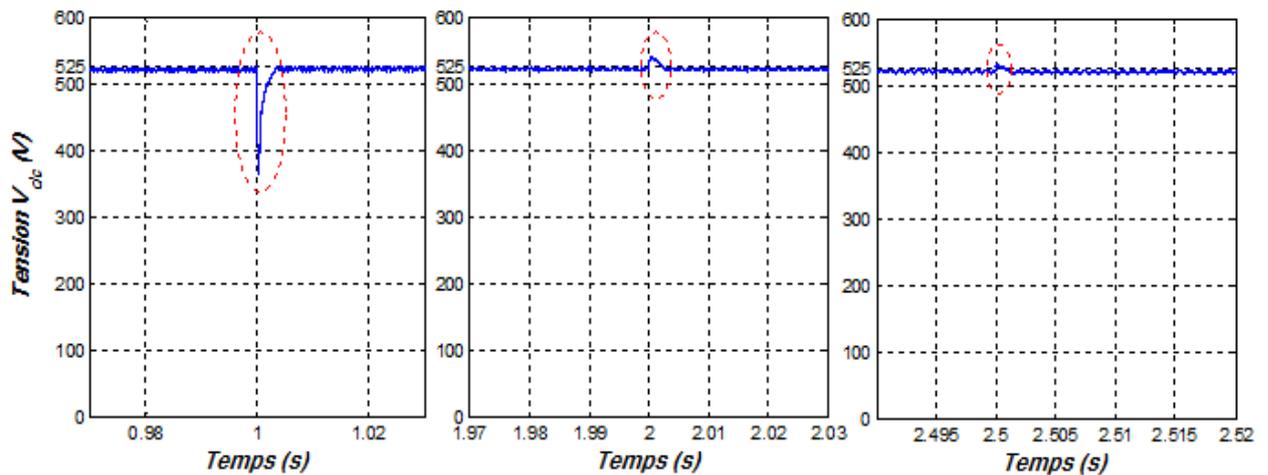


Figure II.25 Impact des variations de l'éclairement sur la tension continue photovoltaïque V_{dc}

La figure (II.24) représente l'allure de la tension photovoltaïque régulée sous l'impact des variations de l'éclairement solaire suivant le profile représenté par la figure (II.23) où nous avons démarré notre essai par l'application d'un éclairement solaire standard de $1000W/m^2$ jusqu'à l'instant $1s$, à ce moment, une diminution a été enregistrée où le niveau d'éclairement est dégradée à $940W/m^2$ durant les deux secondes qui suivent. Par la suite deux augmentations de l'éclairement solaire dont il a atteint la valeur $980W/m^2$ à l'instant $2s$ et dans la dernière phase il a revenu à sa valeur standard $1000W/m^2$ à partir de l'instant $2.5s$.

D'après l'allure de la tension obtenus et représenté par la figure (II.24), on remarque qu'après un phase transitoire très courte d'environ $0.05s$, la tension a été stabilisé sa valeur maximale de $525V$ et qui n'été pas influencé par les variations du niveau de l'ensoleillement sauf que des pics instantanés aux moments de chaque variation comme les montre les vues agrandit illustrées par figure (II.25) et ce qui prouve l'efficacité de la commande *MPPT* par la technique Perturbation et Observation face aux changements climatiques à imposer le système photovoltaïque à fournir sa production maximale.

II.5 Conversion DC/AC de la tension photovoltaïque

II.5.1 L'onduleur de tension triphasé

L'onduleur est un dispositif destiné à la convertir une tension continue constante en tension alternative réglable. Les onduleurs utilisés pour les systèmes de pompage alimenté par une machine à induction sont en général à source de tension d'amplitude et forme indépendantes de la charge à entrainer et sont aussi à fréquence variable, afin de permettre une variation de la vitesse de rotation du moteur alimentant la pompe.

II.5.2 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé

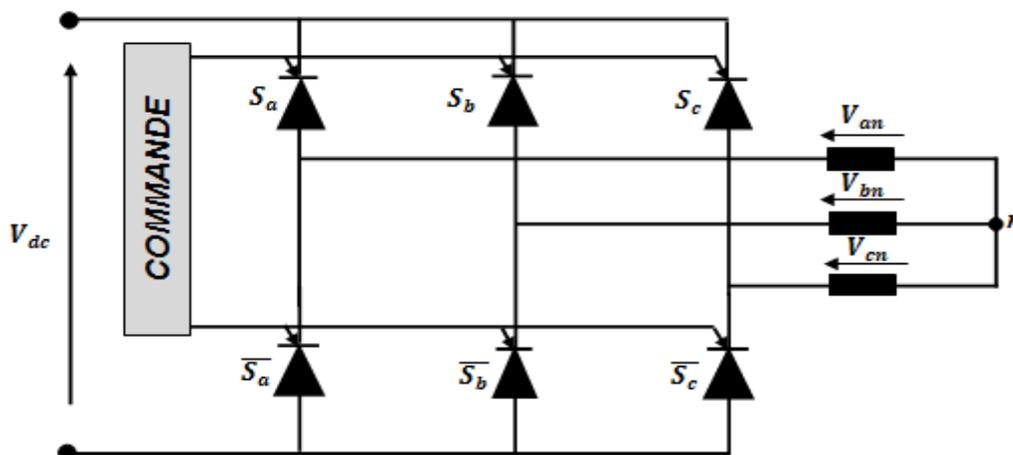


Figure II.26 Schéma d'un onduleur de tension triphasé

La modélisation de l'onduleur de tension triphasé est basée sur l'interruption des thyristors de l'étage supérieur S_a, S_b, S_c et la tension du bus continue V_{dc} d'où les tensions simples sont [41]:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

On peut reformuler le modèle ci-dessus par le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bn} = \frac{V_{dc}}{3} (-S_a + 2S_b - S_c) \\ V_{cn} = \frac{V_{dc}}{3} (-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad \text{II.17}$$

II.5.3 La commande MLI de l'onduleur triphasé

La Commande en *Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)*, consiste à la comparaison de deux signaux de commande, l'une est triangulaire à fréquence (f_p) appelée la porteuse et l'autre sinusoïdale de fréquence (f_m) inférieur à (f_p) appelé la référence et l'intersection des deux signaux forme une alternance de tension de sortie d'une succession des créneaux de largeur convenable. La commande *MLI* est caractérisée par deux paramètres qui sont [42]:

- L'indice de modulation " m ", égale au rapport $m = f_p / f_m$.
- Le coefficient de réglage en tension " r ", égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur crête de la porteuse $r = A_m / A_p$.

II.5.4 Simulation de la commande MLI

Dans cette section, nous avons simulé la modèle de l'onduleur à commande *MLI* pour différentes valeurs d'indice de modulation " m ", où nous avons fixé la fréquence de la référence " f_m " qui contrôle directement la tension de sortie de l'onduleur souhaité à **50Hz** et en variant à chaque fois la fréquence de la porteuse. Les états des interrupteurs statiques S_a, S_b, S_c sont obtenus par la comparaison des deux signaux de commande comme le montre la figure (II.24) en appliquant une tension de bus continu égale à **600V**.

Comme le montre les figures (II.24) et (II.25), la multiplication du nombre des impulsions formant chacune des alternances de la tension de sortie présente deux avantages importants:

- Elle repousse vers des fréquences plus élevées des harmoniques de la tension de sortie présentée par les figures (II.26) et (II.28), ce qui facilite le filtrage.
- Elle permet de faire varier la valeur du fondamentale de la tension de sortie et sa fréquence.

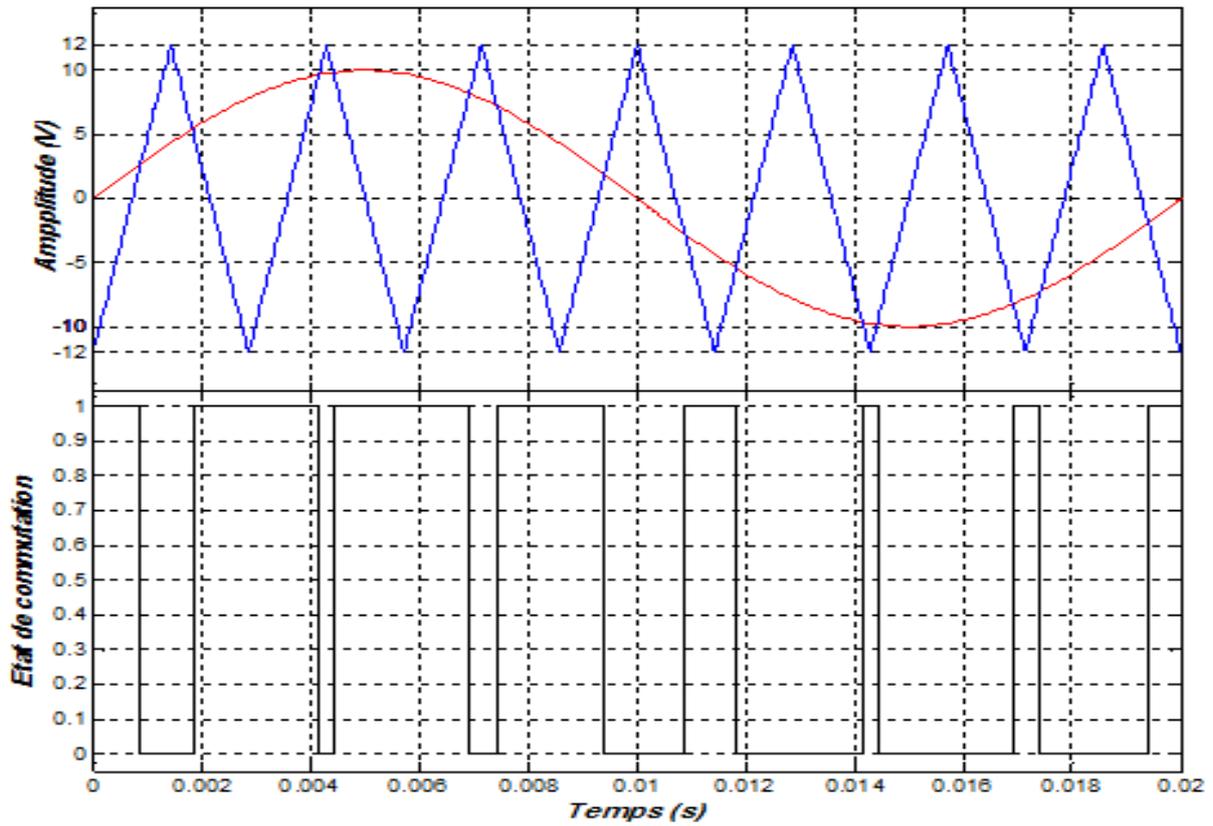


Figure II.27 Génération des signaux de commande de l'onduleur pour $f_p = 350\text{Hz}$

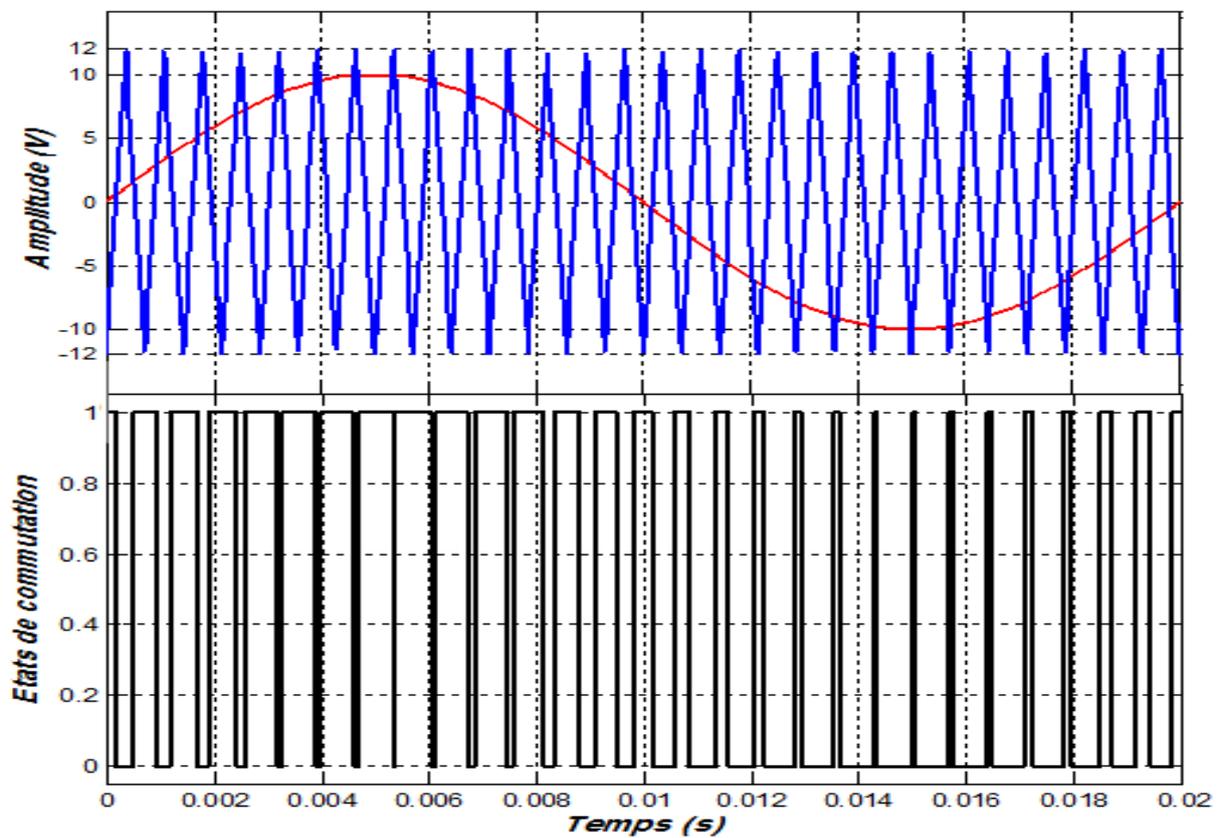


Figure II.28 Génération des signaux de commande de l'onduleur pour $f_p = 1400\text{Hz}$

- Pour: $f_p = 350\text{Hz} \Rightarrow m = 7$

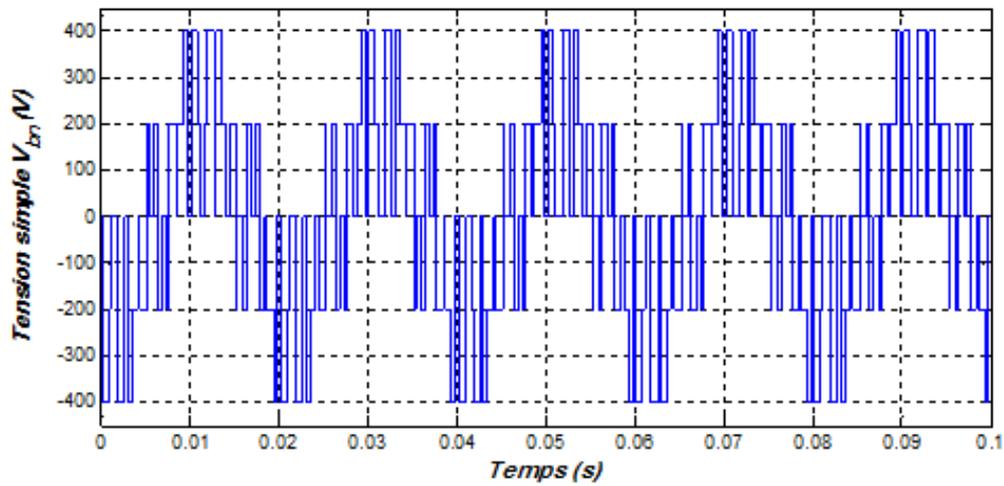
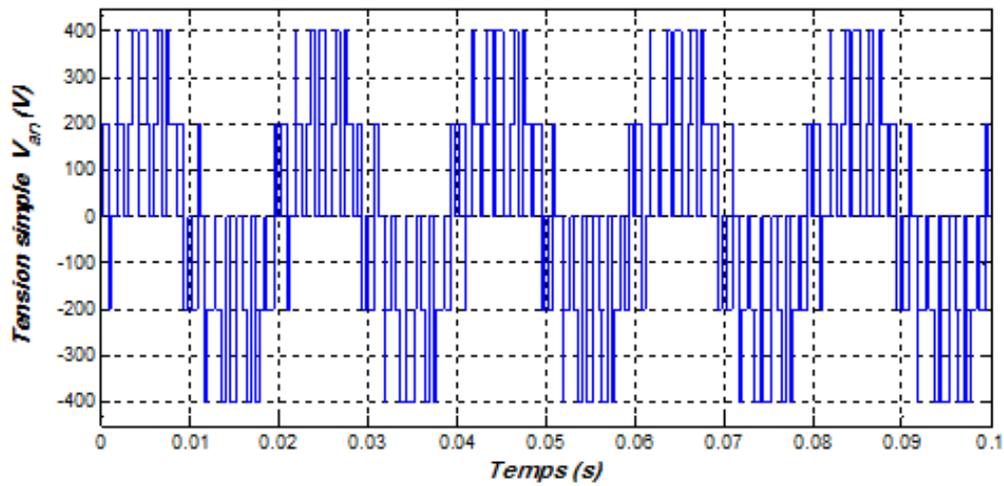


Figure II.29 Tensions simples V_{an} et V_{bn} de l'onduleur

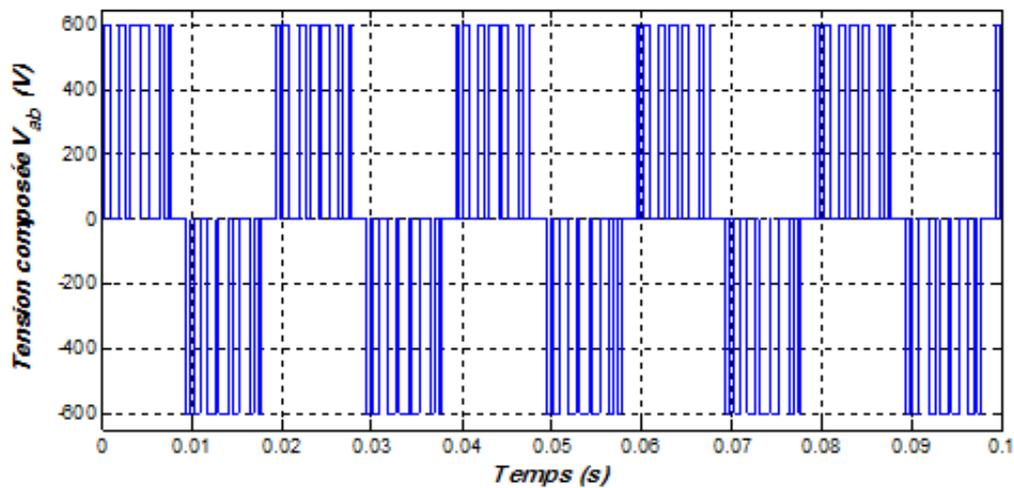


Figure II.30 Tension composée V_{ab} de l'onduleur

- Pour $f_p = 1400\text{Hz} \Rightarrow m = 28$

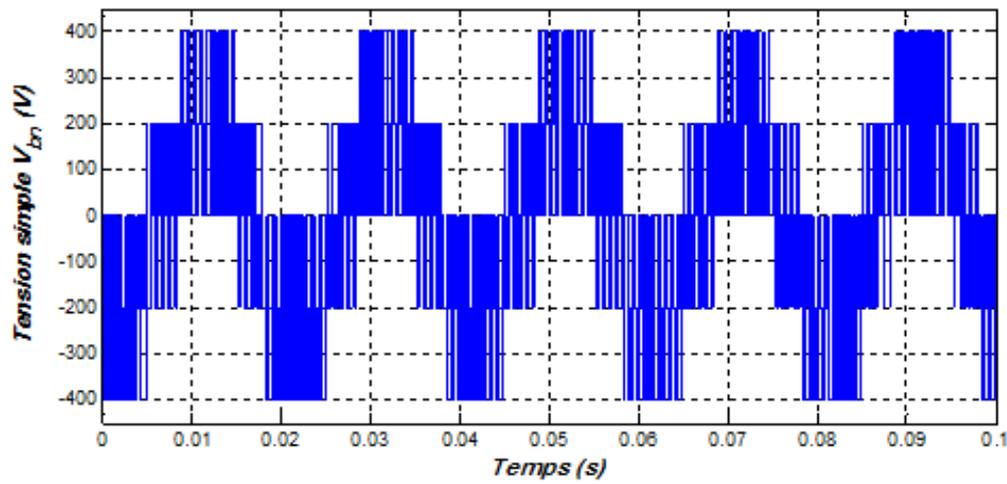
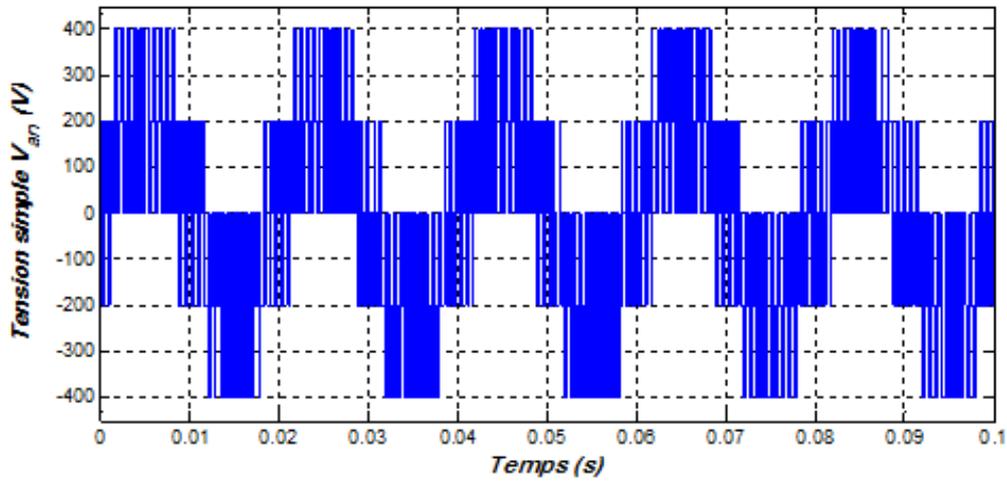


Figure II.31 Tensions simples V_{an} et V_{bn} de l'onduleur

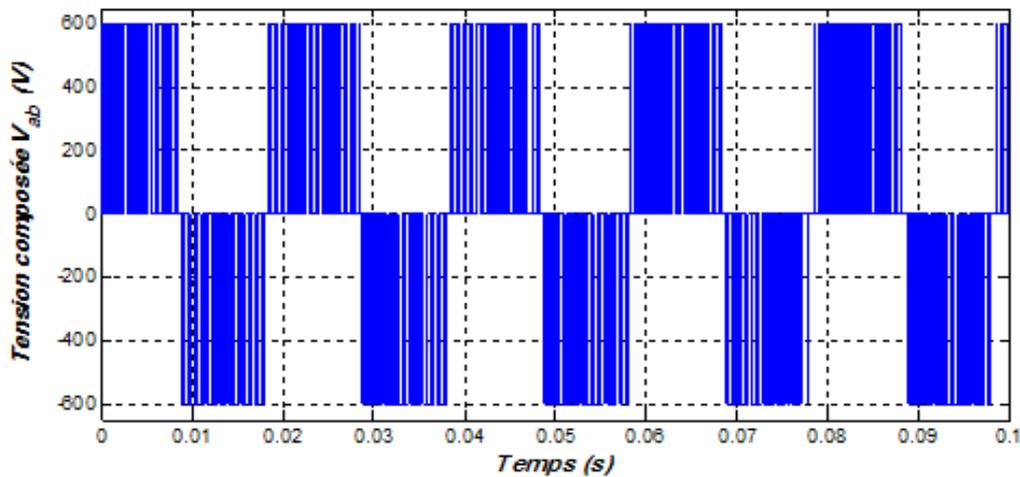


Figure II.32 Tension composée V_{ab} de l'onduleur

2.6 Conclusion

La modélisation est une étape importante utilisée pour donner d'une manière explicative les expressions formant le travail qui nécessite une simulation, puis on a les résultats de la simulation.

Dans ce chapitre nous avons modélisé puis simulé la cellule photovoltaïque étudions l'influence des conditions climatiques (la température et l'éclairement) sur la cellule.

Un générateur photovoltaïque est un groupe de cellules, le regroupement des cellules être soit en série soit en parallèle soit en série-parallèles (mixte), nous avons mentionné dans le travail l'avantage de chaque regroupement et également montré dans des figures après la simulation.

Les convertisseurs statiques sont aussi important car ils convertir le courant selon notre utilisation, nous avons utilisé deux convertisseurs statiques: le hacheur **DC/DC** et l'onduleur **DC/AC** avec la commande **MLI**.

La commande **MPPT** est une partie essentielle dans la plupart des installations photovoltaïques, un suiveur de point de puissance maximum **MPPT** est utilisée pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules ; pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire. Plusieurs méthodes de tracking ont été proposées, mais dans ce travail on applique la commande de Perturbation et Observation **P&O**.

CHAPITRE III

Modélisation du groupe Moto-Pompe et Simulation du Pompage Photovoltaïque

III.1 Introduction

Pour qu'une pompe fonctionne il faut un entraînement qui produit sa rotation, le choix de l'entraînement de la pompe prend en considération plusieurs facteurs tels que le type de la pompe, la puissance et son application. Principalement, les moteurs à courant continu et les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont considérés comme les deux familles dès les plus utilisées dans nos jours pour l'application de pompage photovoltaïque.

Dans ce travail, on utilise le moteur asynchrone à cage d'écureuil où nous présenterons d'abord le principe de modélisation et de simulation du moteur à cage. Ce dernier, grâce aux nombreux avantages qu'il procure par rapport aux autres types de moteurs électriques, c'est imposé comme le moteur de premier choix dans les mécanismes industriels. Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques, magnétiques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, nous simplifierons son modèle mathématique dans le référentiel biphasé en utilisant la transformation de *PARK*. En deuxième lieu, on passera à l'étude de généralités de pompage photovoltaïque puis son modèle et ses principales configurations.

III.2 Moteur asynchrone à cage

Les machines asynchrones sont des machines employées le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages à savoir, simplicité, robustesse, prix peu élevé, entretien facile, son faible encombrement, son bon rendement et de son excellente fiabilité. Malgré tous ces avantages, la consommation de l'énergie réactive reste un inconvénient de ce type de machines, qui sert toujours à magnétiser l'entrefer. Les moteurs asynchrones triphasés alimentés par un réseau électrique à fréquence fixe, représentant la grande majorité des applications, supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et à couple de démarrage nul sans artifice. On peut changer sa vitesse variable en faisant d'avantage « glisser

» le moteur, et cela fait partie des solutions techniques. C'est un moteur économique et facile à construire. Actuellement, ce sont les alimentations électroniques de puissance à fréquence variable qui sont amplement utilisées pour obtenir cette variation de vitesse, certes prix d'une certaine complexité des alimentations et des commandes associées [43].

III.2.1 Structure du moteur asynchrone à cage

On appelle machine asynchrone "MAS" à cage d'écureuil, une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, qui à deux enroulements dont le premier est statorique est alimenté par un réseau électrique de pulsation ω_s , alors que le deuxième est rotorique est fermé sur lui-même (appelé la cage d'écureuil), généralement ce type de machines est plus utilisée en moteur asynchrone (en triphasé) [44].

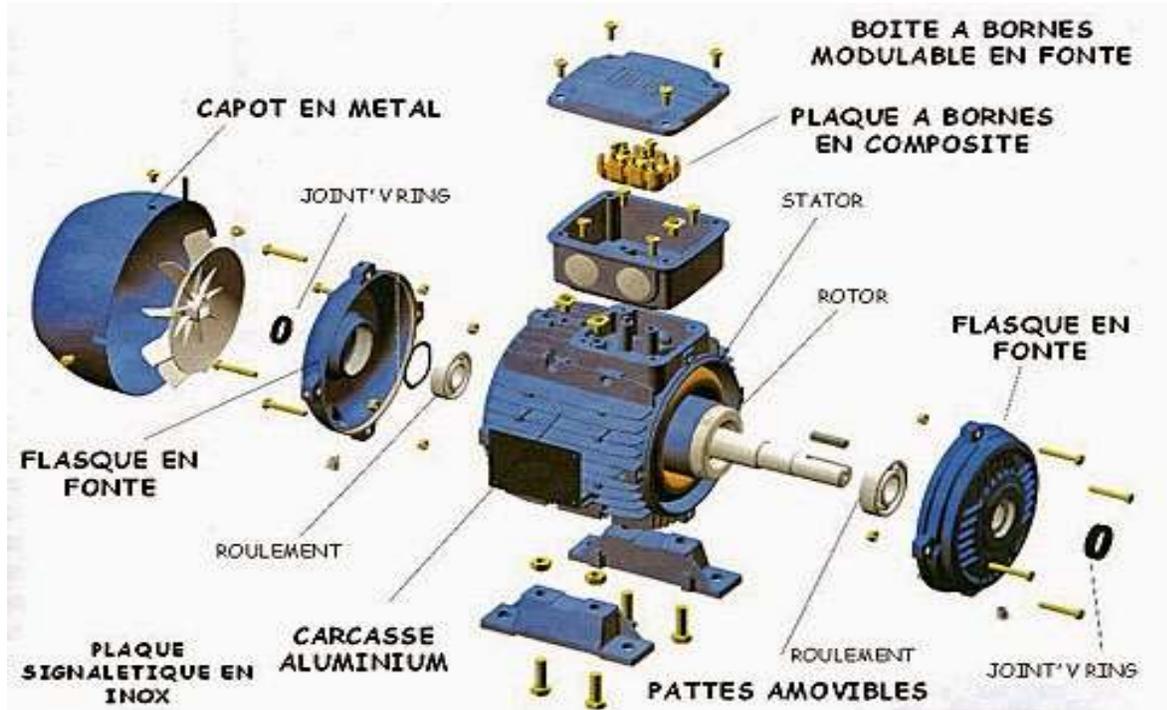


Figure III.1 Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil [44]

Par définition, on distingue alors deux parties principales constituant le moteur asynchrone à cage, le stator et le rotor lesquelles leur structure est comme suit [45]:

III.2.1.1 Structure de stator

Le stator comporte une carcasse en fonte ou en tôle d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles. Le stator d'une machine asynchrone triphasée porte un enroulement triphasé réparti dans des encoches du circuit magnétique.



Figure III.2 Stator du moteur asynchrone [45]

III.2.1.2 Structure de rotor

Il existe deux principaux types de structuration de pièces de rotor car il peut s'agir bobiné ou à cage. Pour ces deux types, le circuit magnétique du rotor est un assemblage de tôles ferromagnétiques muni d'encoches. Dans le rotor à cage, les encoches contiennent des barres reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit. L'ensemble forme une cage d'écureuil.



Figure III.3 Rotor du moteur asynchrone [45]

III.2.2 Principe de fonctionnement

Le stator alimenté par un système de tensions triphasées équilibrées crée un champ magnétique tournant. Par conséquent, on peut dire que le principe de fonctionnement du moteur repose sur les lois fondamentales de l'induction électromagnétique. La vitesse de rotation du champ tournant statorique N_s (vitesse synchrone), est rapportée à la fréquence de la tension d'alimentation f [Hz] et au nombre de pair de pôles p de chacun des enroulements par [44]:

$$N_s = \frac{60 f}{p} [tr/min] \quad \text{III.1}$$

Les enroulements rotoriques sont le siège d'un système de forces électromotrices triphasées qui génèrent trois courants rotoriques en fonction du champ tournant créé par le stator.

Les effets de l'induction statorique sur les courants induits par le rotor se manifestent par un moment électromagnétique qui entraîne le rotor à la vitesse N essayant d'atteindre la vitesse synchrone mais en vain. Lorsque les effets des courants tournant s'opposent à la cause qui les a générés, alors on peut dire que si le rotor est capable de tourner à une vitesse synchrone, cela conduit à l'annulation du couple. Ainsi, le fonctionnement du moteur est caractérisé par un glissement défini comme suite [45]:

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad \text{III.2}$$

Cette induction motrice créée en connectant les enroulements du stator au réseau de tension, contrairement à la machine à courant continu et de la machine synchrone. Et concernant les enroulements rotoriques, on l'appelle aussi machine à induction, bien qu'il ne soit relié à aucun réseau de tension car il est court-circuité sur lui-même [46].

III.2.3 Modèle de moteur asynchrone à cage

Le comportement de la machine asynchrone est entièrement défini par trois types d'équations à savoir:

- Les équations électriques;
- Les équations magnétiques;
- Les équations mécaniques.

III.2.3.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [47]:

- Les circuits magnétiques sont symétriques;
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale;
- L'entrefer est constant;
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants;
- L'effet de l'encoche est négligeable;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer:

- L'additivité du flux;
- La constance des inductances propres;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

III.2.3.2 Equations électriques

Pour l'ensemble des phases statoriques, les tensions sont définies par le système matricielle suivant [48]:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad \text{III.3}$$

Vu que les résistances statoriques étant égales pour les trois phases, il n'y a pas lieu d'écrire une matrice de résistances d'où on peut détailler le système matricielle représentant les tensions par:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III.4}$$

De même façon, et sachant que le rotor étant en court-circuit, les tensions nulles rotoriques sont exprimées par le système suivant [48]:

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] = [0] \quad \text{III.5}$$

Où,

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

V_s : La matrice des tensions par phase au stator;

V_r : La matrice des tensions par phase au rotor;

I_s : La matrice des courants au stator;

I_r : La matrice des courants au rotor.

III.2.3.3 Equations magnétiques

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux/inductance propre) [49]:

$$\begin{bmatrix} [\phi_{sabc}] \\ [\phi_{rabc}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{sabc}] \\ [I_{rabc}] \end{bmatrix} \quad \text{III.7}$$

Où, les matrices des bobinages statoriques et rotoriques sont respectivement, exprimées par:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \text{ Et } [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Où,

L_s :L'inductance propre statorique;

M_s :L'inductance mutuelle de couplage entre bobinages statoriques;

L_r : L'inductance propre rotorique;

M_r :L'inductance mutuelle de couplage entre bobinage rotoriques.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{III.8}$$

Où, θ représente l'angle électrique définissant la position relative instantanée entre les axes rotoriques et les axes statoriques choisis comme axes de références.

On aura finalement [49]:

$$[\phi_{sabc}] = [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad \text{III.9}$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_r][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \quad \text{III.10}$$

III.2.3.4 Equations mécaniques

Les caractéristiques dynamiques de la machine asynchrone fait introduire des variations non seulement des paramètres électrique (tension, courant, flux, FEM) mais aussi des paramètres mécanique (couple, vitesse).

L'équation dynamique représentant le mouvement de la machine s'écrit par [50]:

$$(C_{em} - C_r) = J \frac{d\Omega_r}{dt} + K_f * \Omega_r \quad \text{III.11}$$

Et à partir de cette relation, on obtient aussi [53]:

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - K_f * \Omega_r) \quad \text{III.12}$$

Avec;

J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine [$kg.m^2$];

K_f : Coefficient de frottement visqueux [$Nm/rad/s$];

C_r : Couple de charge [$N.m$];

Ω_r : Vitesse rotorique du moteur [rad/s];

La vitesse électrique du rotor est représentée par [50]:

$$\omega_r = P * \Omega \quad \text{III.13}$$

Où, p représente le nombre de pair de pôles de la machine.

Donc, on peut récrire l'équation dynamique défini par la relation III.12 sous la forme suivante [51]:

$$C_{em} - C_r = \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{K_f \omega_r}{P} \tag{III.14}$$

III.2.3.5 Mise en équations dans le référentiel de "Park"

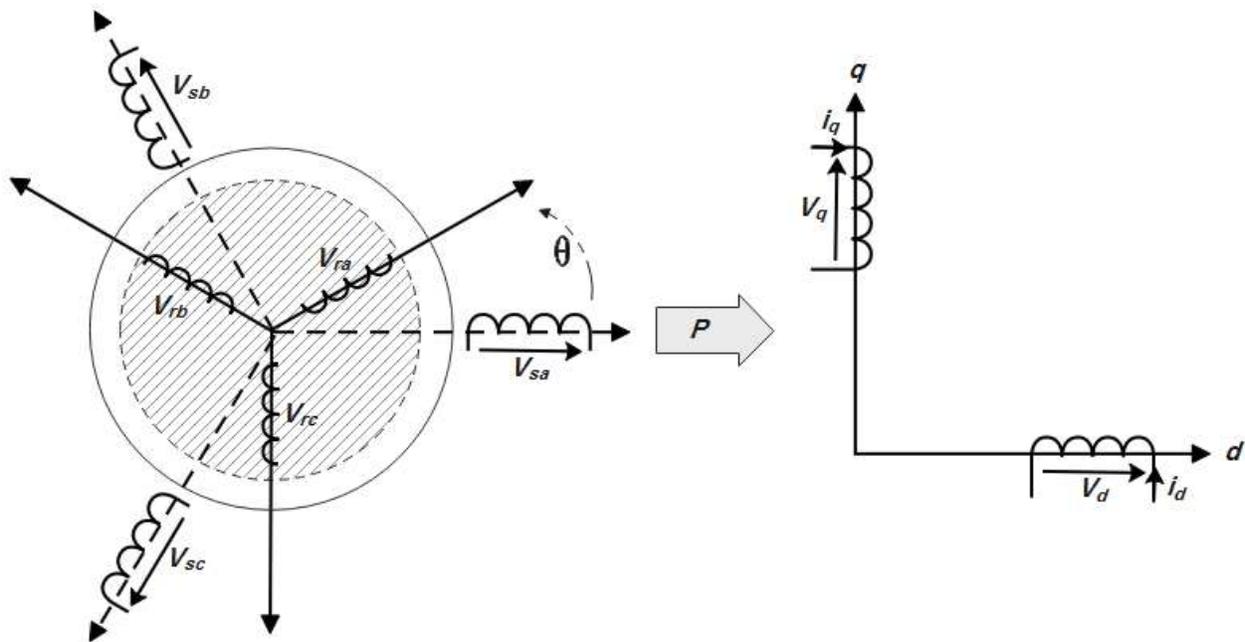


Figure III.4 Principe de la transformée de PARK (triphase vers le biphasé)

Pour simplifier la représentation des équations électriques, on introduit la transformation de *Park* normalisée qui est obtenue à l'aide de la matrice $[P]$ suivante [51]:

$$[P(\theta)] = K \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{III.15}$$

Avec, le coefficient $K = \begin{cases} 2/3 & \text{transformation avec non conservation de puissance} \\ \sqrt{2/3} & \text{transformation avec conservation de puissance} \end{cases}$

Souvent, le coefficient K est considéré comme étant égale à $\sqrt{\frac{3}{2}}$ pour donner une expression invariante du couple électromagnétique à partir de la propriété $P^{-1} = P^T$. Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux symbolisés dans le circuit statorique et dans le circuit rotorique par $X_{s a,b \text{ ou } c}$ et $X_{r a,b \text{ ou } c}$, respectivement, est définis par la transformation [51]:

$$\begin{bmatrix} X_{sd} \\ X_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_{rd} \\ X_{rq} \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_{ra} \\ X_{rb} \\ X_{rc} \end{bmatrix}$$

- **Les équations électriques**

Dans le repère de **Park** caractérisé par les axes d et q tournant à une vitesse angulaire $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$, les équations des tensions statoriques sont exprimées par [54]:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \phi_{qs} \omega_s \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \phi_{ds} \omega_s \end{cases} \quad \text{III.16}$$

Dans l'autre côté, les équations des tensions rotoriques auront la forme suivante [51]:

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \phi_{qr} (\omega_s - \omega_r) \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \phi_{dr} (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad \text{III.17}$$

- **Les équations magnétiques**

Concernant les composantes magnétiques statoriques sont définis dans le repère biphase de **Park** par le système d'équation ci-dessous [50]:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad \text{III.18}$$

- L'équation mécanique

Le couple électromagnétique peut prendre diverses formes, en fonction des variables que l'on élimine pendant le passage du système triphasé au biphasé d'où on peut le décrire par [52]:

$$C_{em} = \frac{P}{L_r} M (\phi_r i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad \text{III.19}$$

Pour le passage du système biphasé vers le système originare triphasé, l'utilisation de la matrice de transformation inversée de *Park* est devenue primordiale, et c'est exprimée par [53]:

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{III.20}$$

Donc, on peut transformer de système biphasé au système triphasé comme suit:

$$\begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{sd} \\ X_{sq} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad \begin{bmatrix} X_{ra} \\ X_{rb} \\ X_{rc} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{rd} \\ X_{rq} \end{bmatrix}$$

III.2.3.6 Représentation d'état du modèle de la MAS

Pour une machine asynchrone triphasée alimentée en tension, les tensions statoriques (V_{ds} et V_{qs}) et la vitesse du champ tournant sont considérées comme variables de commande, d'autre part, le couple résistant C_r est considéré comme perturbation. Ce choix de variable se justifie d'une part, par le fait que les courants statoriques sont mesurables et d'autre part parce que l'on veut contrôler la norme du flux rotorique. Pour mettre sous forme d'équation d'état, le modèle de la machine, nous devons modifier les équations d'état III.16 en utilisant III.18 pour les exprimer en fonction des variables du vecteur d'état. Nous choisissons dans notre cas, le vecteur d'état suivant les simplifications et réarrangement du modèle, d'où nous obtenons [54]:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad \text{III.21}$$

Avec;

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} di_{ds} \\ di_{qs} \\ d\phi_{dr} \\ d\phi_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad A = \begin{bmatrix} -\lambda & \omega_s & \frac{K_s}{T_r} & \omega_r K_s \\ -\omega_s & -\lambda & -\omega_r K_s & \frac{K_s}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_s \omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -(\omega_s \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\delta L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\delta L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$

On obtient alors :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = (-\lambda i_{ds}) + (\omega_s i_{qs}) + \left(\frac{K_s}{T_r} \phi_{dr}\right) + (\omega_r K_s \phi_{qr}) + \left(\frac{1}{\delta L_s} V_{ds}\right) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = (-\omega_s i_{ds}) - (\lambda i_{qs}) - (\omega_r K_s \phi_{dr}) + \left(\frac{K_s}{T_r} \phi_{qr}\right) + \left(\frac{1}{\delta L_s} V_{qs}\right) \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \left(\frac{M}{T_r} i_{ds}\right) - \left(\frac{1}{T_r} \phi_{dr}\right) + ((\omega_s - \omega_r) \phi_{qr}) \\ \frac{d\phi_{qr}}{dt} = \left(\frac{M}{T_r} i_{qs}\right) - ((\omega_s - \omega_r) \phi_{dr}) - \left(\frac{1}{T_r} \phi_{qr}\right) \end{cases} \quad \text{III.22}$$

Et on a aussi les équations du couple et de vitesse de rotation [54]:

$$\begin{cases} C_e = \frac{3PM}{2L_r} ((\phi_{dr} - i_{qs}) - (\phi_{qr} i_{ds})) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - (K_f \Omega_r)) \end{cases} \quad \text{III.23}$$

Où ;

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad \delta = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}; \quad K_s = \frac{M}{\delta L_s L_r}; \quad \lambda = \frac{R_s}{\delta L_s L_r} + \frac{R_r M^2}{\delta L_s L_r^2}$$

III.2.4 Simulation du Moteur asynchrone

Selon la modélisation par modèle d'état que nous avons présenté précédemment, on a lancé la simulation du moteur asynchrone à cage d'écureuil dont les paramètres sont donnés par le tableau suivante [54]:

Vitesse Nominale	1500 <i>tr/min</i>
Tension Nominale	1.5 <i>kw</i>
Fréquence Nominale	50 <i>Hz</i>
Résistance statorique R_s	4.850 <i>Ohm</i>
Résistance rotorique R_r	3.805 <i>Ohm</i>
Inductance cyclique statorique L_s	0.274 <i>H</i>
Inductance cyclique rotorique L_r	0.274 <i>H</i>
Inductance mutuelle M	0.258 <i>H</i>
Moment d'inertie J	0.031 <i>Kg.m²</i>
Coefficient de frottement visqueux K_f	0.00114 <i>N.m.s/rd</i>

Tableau III.1 Paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Dans cette section, nous avons commencé la simulation du modèle développé précédemment par un fonctionnement vide de la machine d'où nous avons obtenu les résultats illustrés ci-dessous.

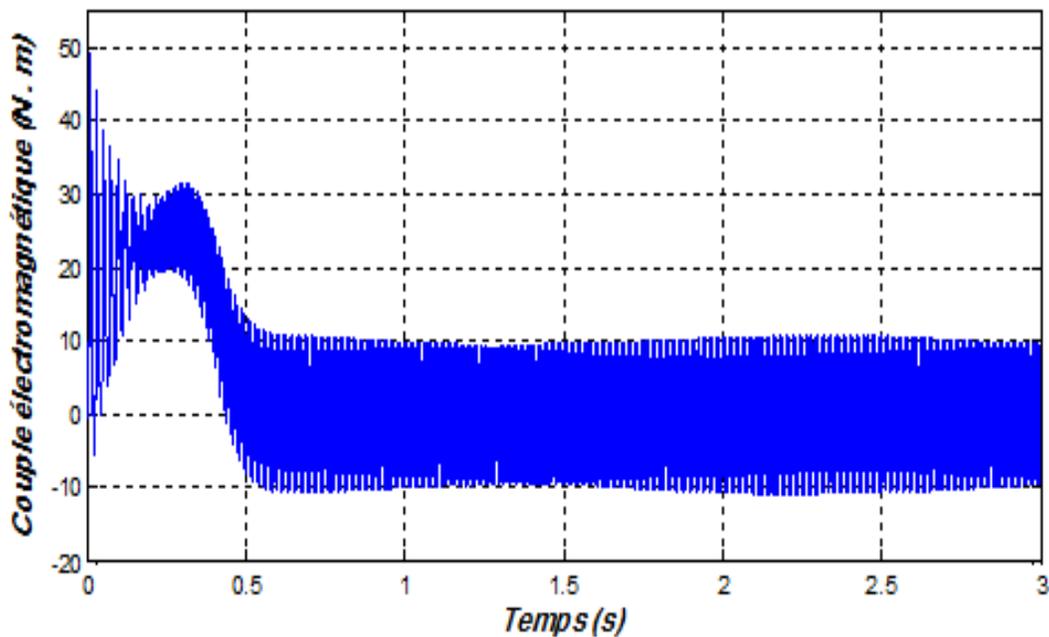


Figure III.5 Couple moteur

Cette figure présente l'allure du couple moteur en fonction du temps, on note durant la phase de démarrage une instabilité jusqu'à l'instant $t = 0.5s$, puis le couple se stabilise avec des oscillations de $\pm 10 N.m$ relatifs aux oscillations des courants statoriques.

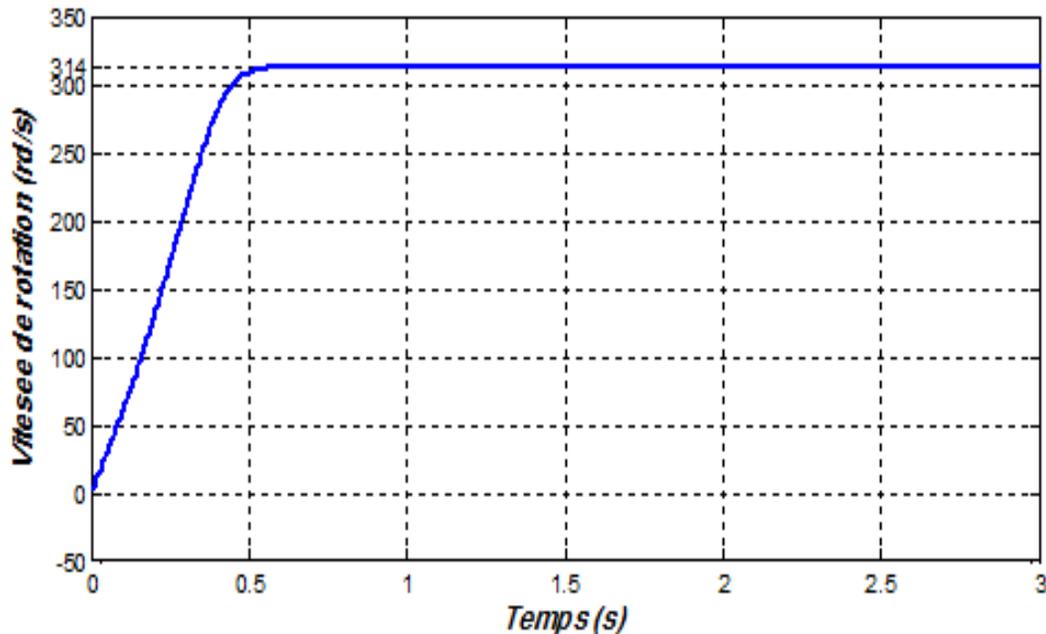


Figure III.6 Vitesse de rotation du moteur

Cette figure représente la vitesse de rotation (ω_r) en fonction du temps, on remarque que durant la phase transitoire, la vitesse augmente jusqu'à $t = 0.5s$, puis elle se stabilise à une valeur fixe de $\omega_r = 314 rd/s$ représentant la vitesse de synchronisme.

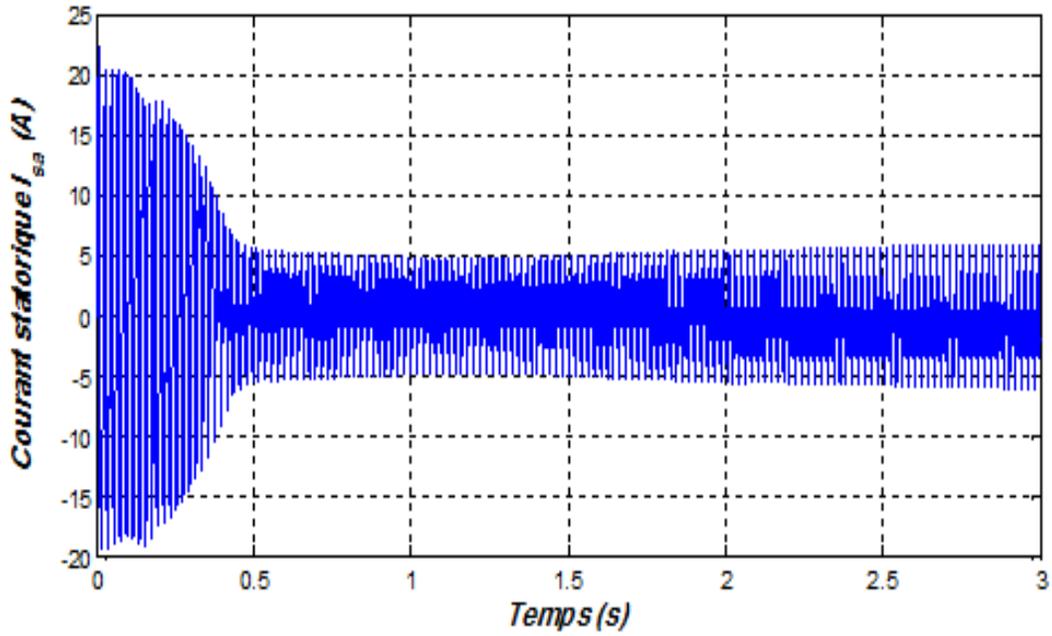


Figure III.7 Courant statorique I_{sa}

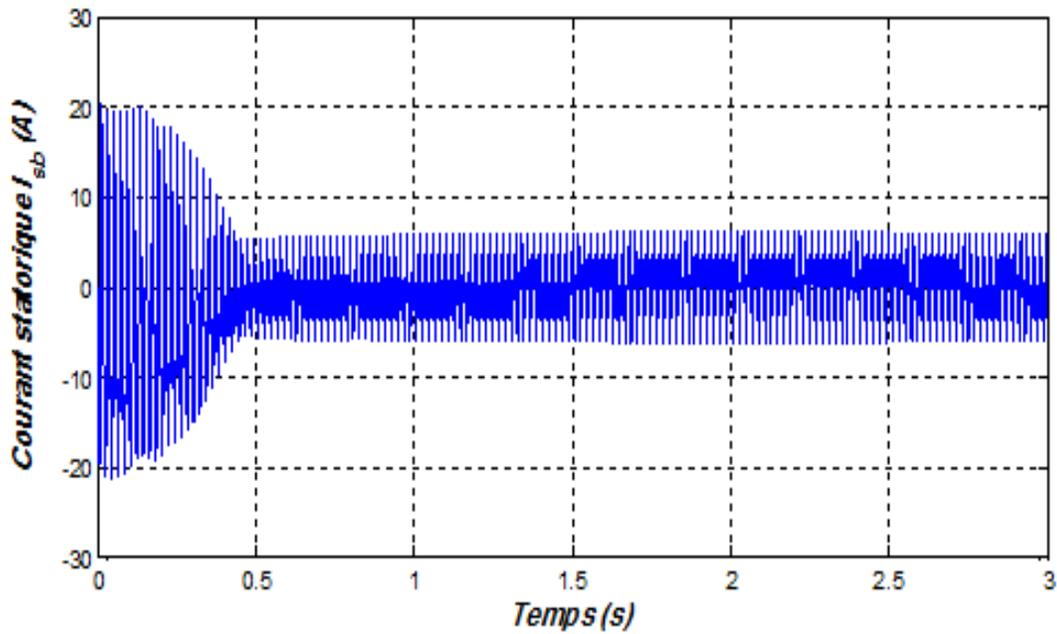
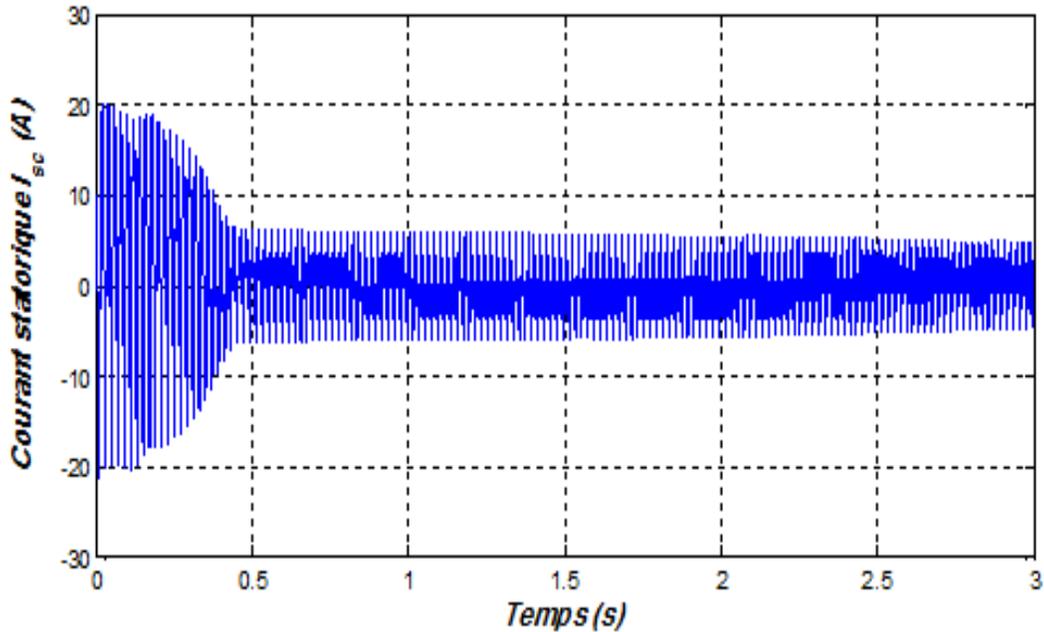
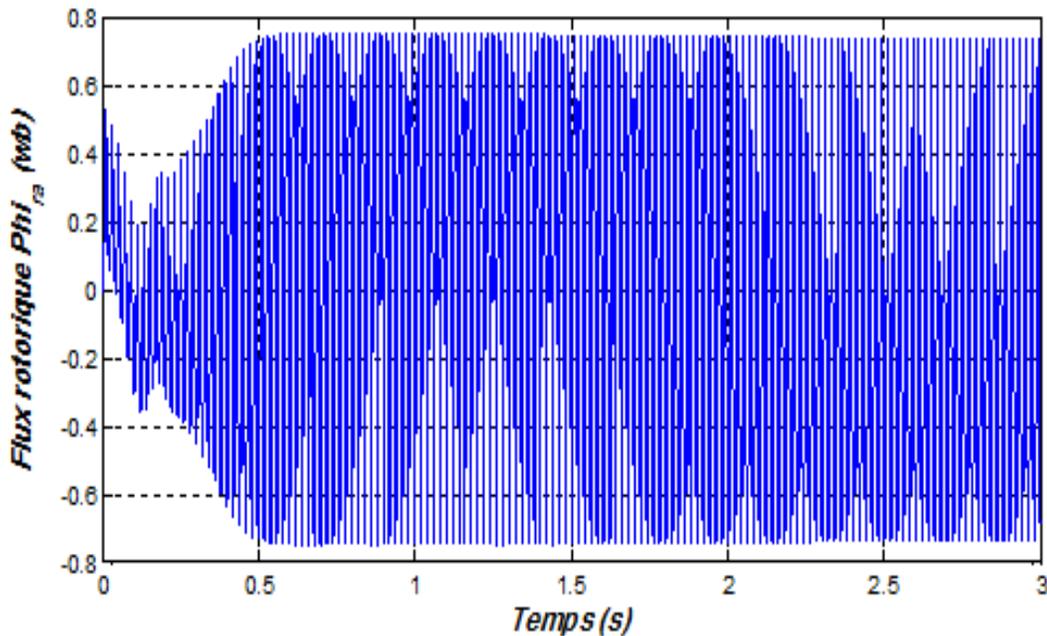
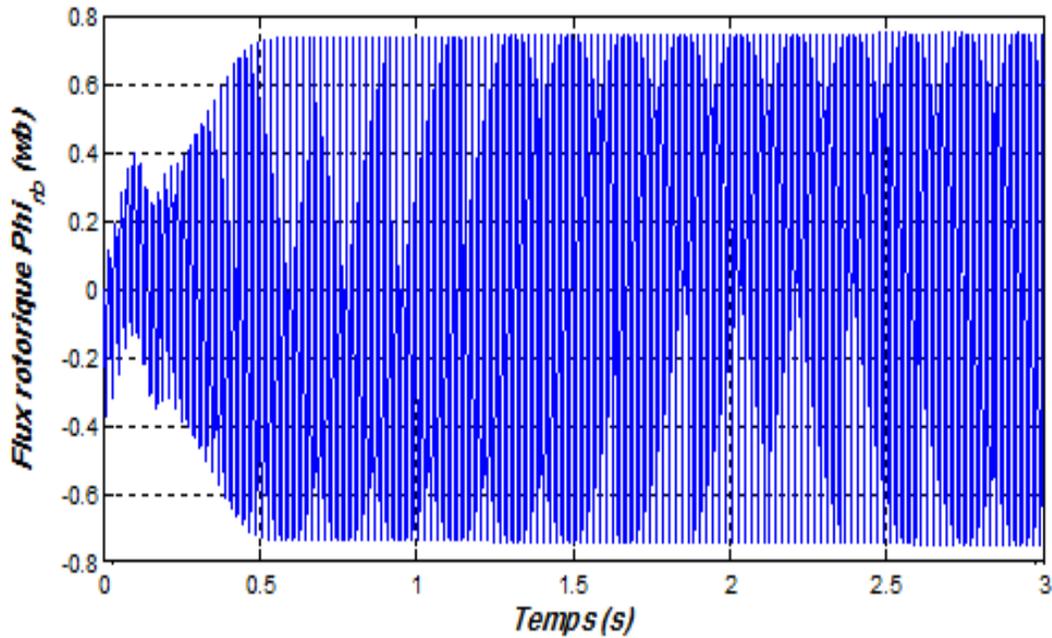
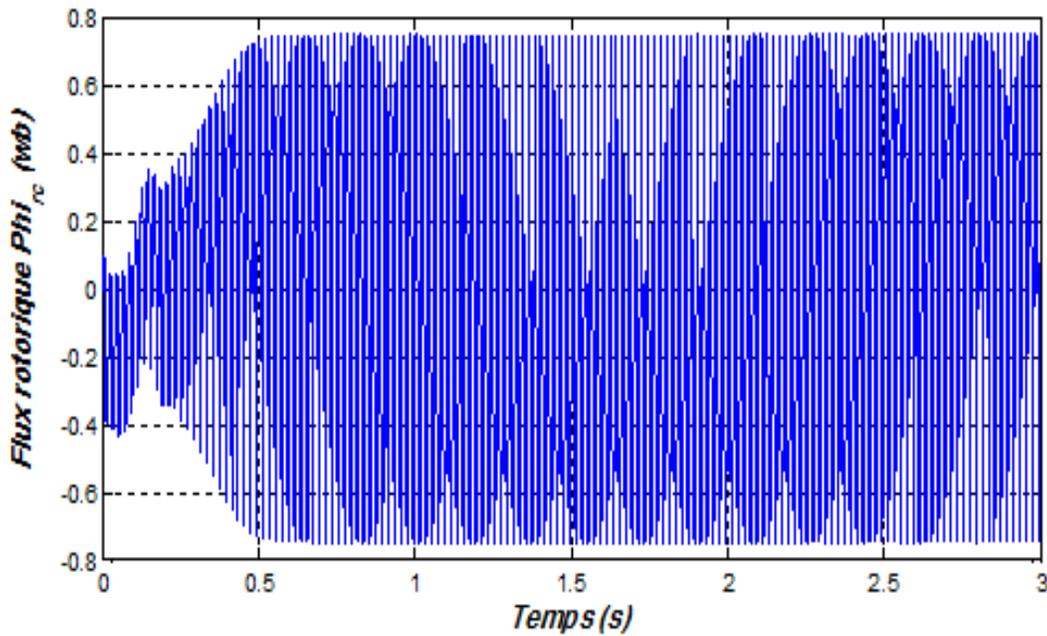


Figure III.8 Courant statorique I_{sb}

Figure III.9 Courant statorique I_{sc}

Les figures III.7, III.8 et III.9 représentent les courants statoriques I_{sa} , I_{sb} et I_{sc} , respectivement. On remarque une forte appel du courant au démarrage atteint la valeur **20 A**, mais elle diminue avec le temps jusqu'à ce qu'elle s'élimine à l'instant $t = 0.5$ s avec des oscillations de ± 5 A.

Figure III.10 Flux rotorique ϕ_{ra}

Figure III.11 Flux rotorique ϕ_{rb} Figure III.12 Flux rotorique ϕ_{rc}

Les figures III.10, III.11 et III.12 représentent les flux rotoriques Φ_{ra} , Φ_{rb} et Φ_{rc} , respectivement.

Au démarrage, on note que les flux des trois phases rotoriques présentent des oscillations jusqu'à $t = 0.5s$, après on remarque que les signaux des flux se stabilisent à une amplitude de $\pm 0.75 \text{ wb}$.

III.3 Pompe centrifuge

III.3.1 Généralité sur les pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont des machines hydrauliques qui transfèrent de l'énergie aux fluides (en particulier les liquides) grâce à la force centrifuge. Ce type de pompes a le même principe de fonctionnement malgré que leurs conceptions différentes et les propriétés dynamiques des fluides sont toujours les mêmes. L'objectif principal de la pompe centrifuge est d'assurer le transfert des fluides par l'augmentation de la pression.

Schématiquement, comme l'illustre la figure (III.13), les pompes centrifuges sont formées d'un rotor appelé turbine ou roue qui tourne à l'intérieur d'un corps. Le rotor à aubes comprend une série d'aubes, de préférence de conception radiale, qui transmet l'énergie cinétique au fluide pompé. Le corps de pompe est équipé de buses d'aspiration et de refoulement pour le fluide pompé. La buse d'aspiration à un axe qui correspond à l'axe de rotation du rotor, tandis que la buse de refoulement a un axe perpendiculaire à l'axe du rotor, mais se trouvant toujours sur le même plan que la turbine [55].

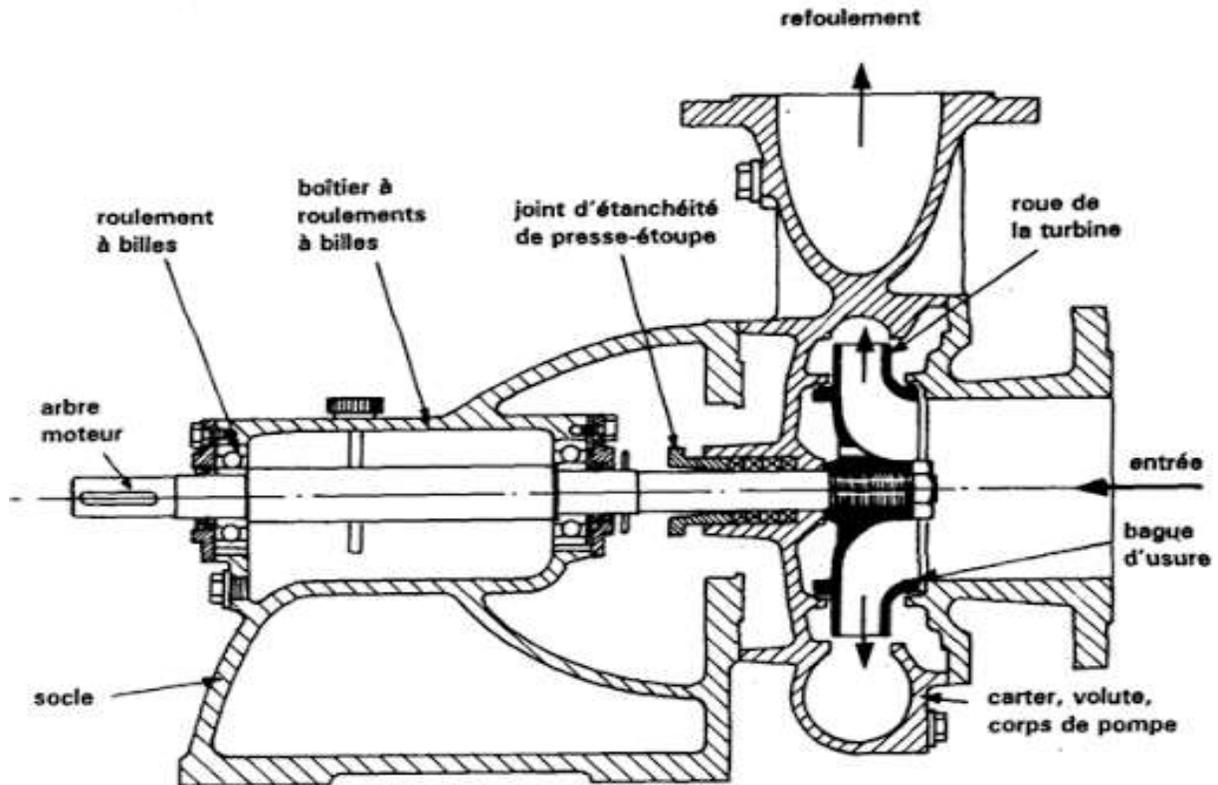


Figure III.13 Pompe centrifuge [55]

III.3.1.1 Présentation de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe. Le débit (Q) de la pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à Q et HMT , variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [56].

III.3.1.2 Constitution de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge est constituée essentiellement, en allant de l'entrée à la sortie par [56]:

- **Un Distributeur** : Sorte de tubulure profilée qui sert à conduire d'eau avec une vitesse et une direction convenable dans l'axe de la pompe (roue);
- **Une roue** : qui est l'élément essentiel de la pompe. La totalité de l'énergie est apportée au fluide sous deux formes distinctes:
 - ✓ **d'une part**, directement, sous la forme d'un accroissement de pression statique;
 - ✓ **d'autre part**, sous la forme d'un accroissement d'énergie cinétique, qui est lui-même transformé en pression dans les organes situés en aval de la roue.
- **Une volute** : qui a le rôle de recueillir le fluide sortant à grande vitesse de la roue, de le canaliser, puis de le ralentir, transformant ainsi en pression une part importante de son énergie cinétique.

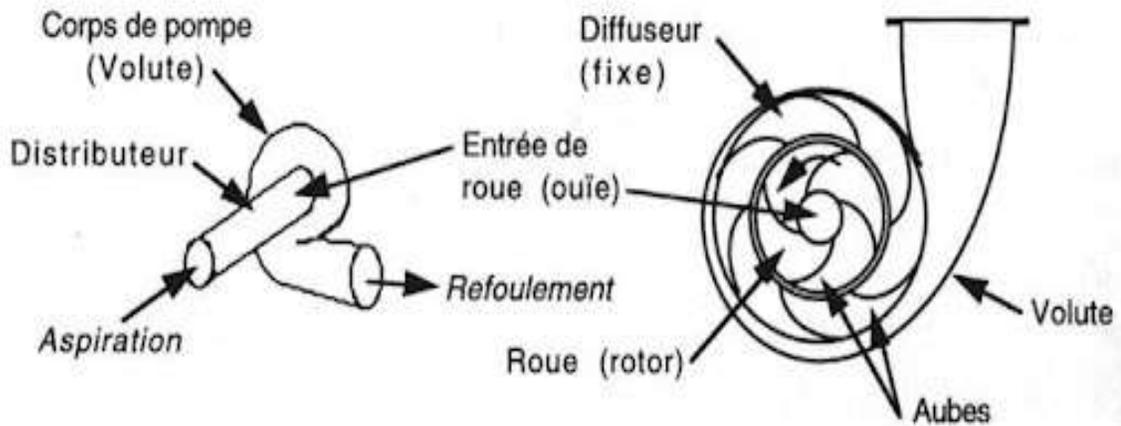


Figure III.14 Constitution de la pompe centrifuge [56]

III.3.1.3 Utilisation des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût.

Leur utilisation est infiniment diversifiée, on ne s'intéresse donc ici qu'aux principales d'entre elles. Les grands domaines d'utilisations peuvent être cités comme suit [57]:

- Hydro-électricité (barrage).
- Agriculture (irrigation des surfaces cultivées).

- Alimentation urbaine (réseau d'alimentation d'eau urbaine).
- Château d'eau.
- Industrie hydrocarbure (production du pétrole).
- Transport des hydrocarbures liquides.
- Industrie de traitement des hydrocarbures.

Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme:

- Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles;
- Utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait);
- Utilisation comme pompe doseuse, la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.

Ces types d'application nécessitent l'utilisation de pompes volumétriques. Par contre à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides.

III.3.2 Fonctionnement de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussé vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (**10 à 100 mètres**) [58].

III.3.3 Modélisation de la pompe centrifuge

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

$$f(H, Q, P) = 0 \quad \text{III.24}$$

III.3.3.1 Pertes de charges

Représentent les pertes de pression dues aux différents obstacles s'opposant au déplacement du fluide pompé, On distingue [59]:

- a) **Les pertes de charges linéaires:** Dans un circuit de forage l'eau, en mouvement, subit des pertes d'énergie dues aux frottements sur les parois de la canalisation (pertes de charge systématiques) ou sur les pièces spéciales (pertes de charge Singulières). Les pertes de charges régulières qui se calculent avec la fameuse formule de *Darcy* [59]:

$$\Delta H_1 = \lambda \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D} \quad \text{III.25}$$

Avec;

λ : Coefficient de pertes de charge linéaires;

D : Diamètre interne du tube [m];

V : Vitesse moyenne du fluide [m/s];

g : L'accélération de la pesanteur [m/s^2];

L : Longueur de la tuyauterie [m].

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

- b) **Les pertes de charges singuliers:** Ces pertes sont due essentiellement aux divers changements de section est donne par l'expression suivante [59]:

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\pi^2 D^2 g} \quad \text{III.26}$$

Où;

ε : Coefficient de pertes de charges locales;

Q :débit volume [m^3/h].

III.3.3.2 Hauteur manométriques

La hauteur manométrique totale (HMT) est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

Pour réaliser le model on utilise les équations de simulation qui sont comme suit [60]:

$$H(t) = H_m \cdot \left(\frac{N(t)}{N_m}\right)^2 \quad \text{III.27}$$

Avec ;

$H(t)$: La hauteur instantanée [m];

H_m : La hauteur maximale [m];

$N(t)$: La vitesse instantanée [tr/min];

N_m : La vitesse maximale [tr/min].

III.3.3.3 Débit volume

Le débit d'eau de la pompe est la quantité d'eau que la pompe peut fournirai durant un intervalle de temps donné. Le débit est donné en litre par heure [l/h] ou en mètre cube par second [m^3/s].

Pour réaliser le model on utilise les équations de simulation qui sont comme suit [60]:

$$Q(t) = Q_m \cdot \left(\frac{N(t)}{N_m}\right) \quad \text{III.28}$$

Avec;

$Q(t)$: Le débit instantané [m^3/s];

Q_m : Le débit maximal [m^3/s];

$H(t)$: La hauteur instantanée [m];

H_m : La hauteur maximale [m].

III.3.3.4 Puissance hydraulique

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 [60]:

$$P_H = \rho * g * Q * H \quad \text{III.29}$$

Avec;

P_H : La puissance communiquée au fluide par la pompe [W];

ρ : La masse volumique du liquide [kg/m^3];

g : L'accélération de la pesanteur [m/s^2];

H : est la hauteur manométrique totale atteinte par la pompe [m];

Q : est le débit volumique [m^3/s].

III.4 Validation des résultats de simulation

III.4.1 Simulation du système pompage photovoltaïque

Les paramètres de la pompe centrifuge que nous avons introduit de notre travail sont définis sur le tableau suivant:

Le débit maximal Q_m	0.001 m^3/s
La hauteur maximale H_m	35 m
La vitesse maximale N_m	2800 tr/min
La masse volumique du liquide ρ	1000 kg/m^3
L'accélération de la pesanteur g	10 m/s^2

Tableau III.2 Paramètres de la pompe centrifuge [60]

En utilisant les données de la pompe mentionnés sur le tableau paramétrique (III.2), on a lancé la simulation du modèle que nous avons développé dans la section précédente d'où, dans cette essai nous avons alimentée la machine entraînant la pompe par la tension générée par le système de photovoltaïque illustrée par la figure (III.15).

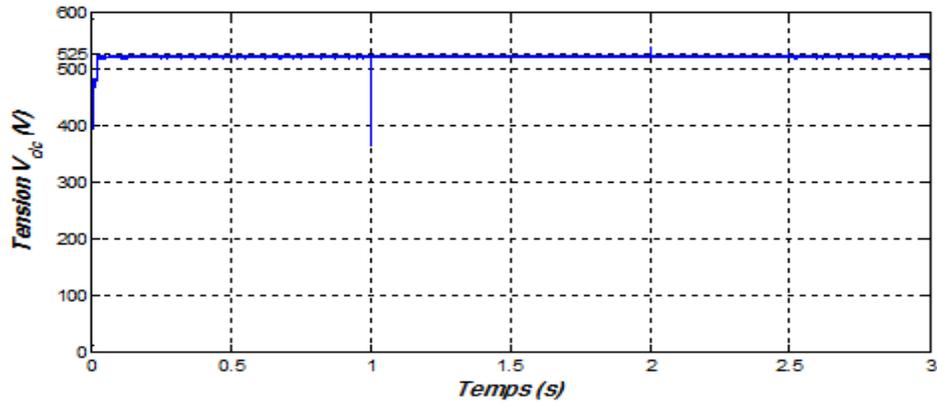


Figure III.15 Tension continue photovoltaïque V_{dc}

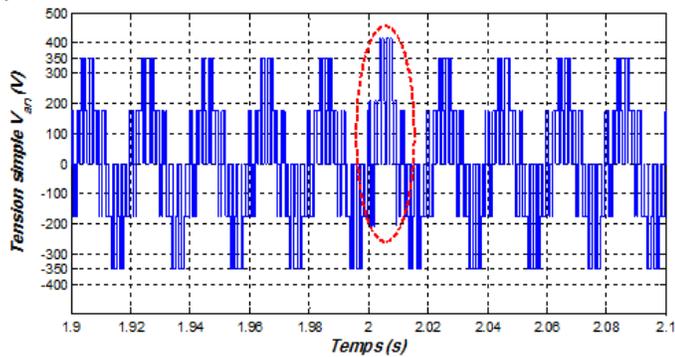
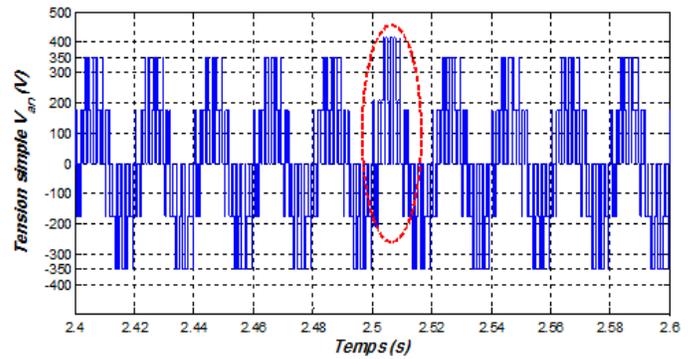
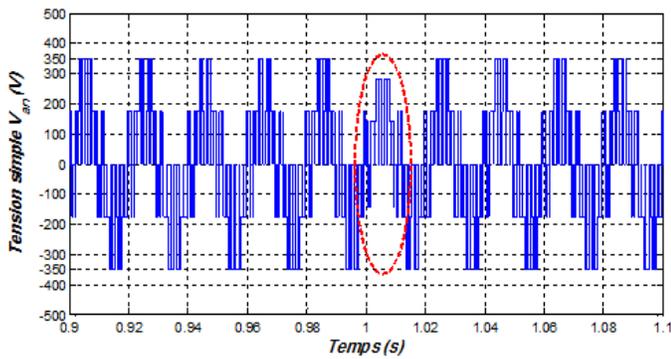
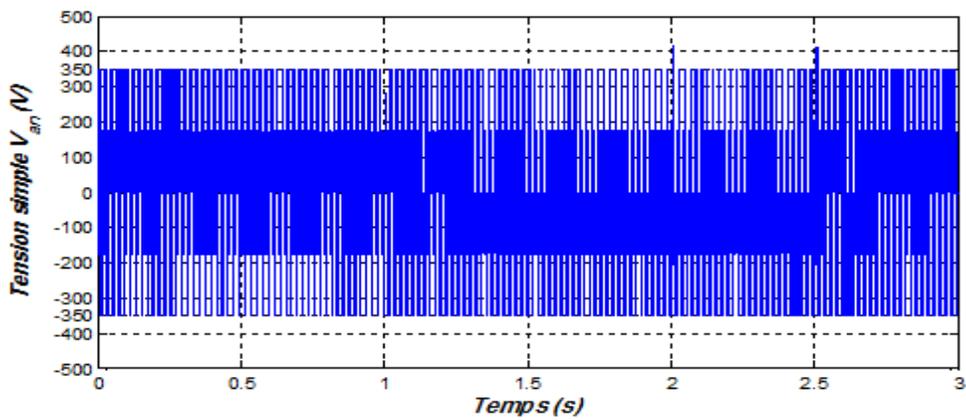


Figure III.16 Tensions simples V_{an} de l'onduleur

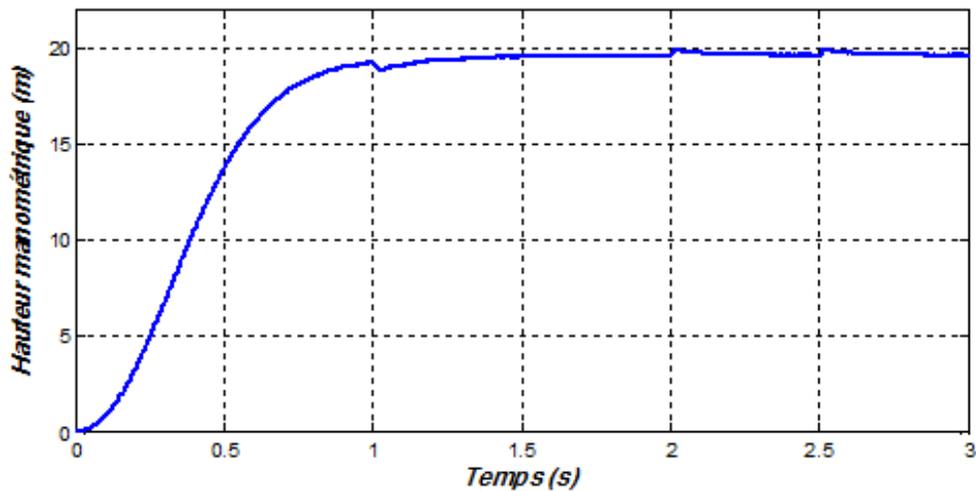


Figure III.17 Hauteur manométrique de la pompe centrifuge

La figure III.17 représente l'allure de la hauteur manométrique de la pompe centrifuge, on remarque que on a deux régime ; le régime transitoire au début (au démarrage) jusqu'à $t = 1.5s$ où la hauteur manométrique atteint une valeur de $H = 18.8m$. Pendant la deuxième phase qui présente le régime permanent, on constate deux oscillations instantanées de la hauteur manométrique aux instants $t = 2s$ et $t = 2.5s$ correspond au variations de l'éclairement solaire.

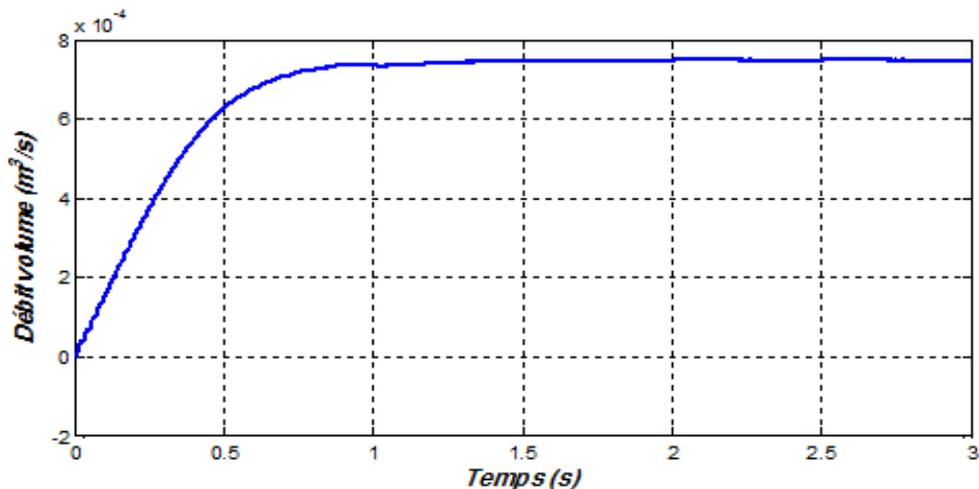


Figure III.18 Débit volume de la pompe centrifuge

La figure III.18 représente le débit volume développé par la pompe centrifuge. Comme la hauteur manométrique, le débit a aussi deux régimes comme il est illustré d'où on remarque que le débit se stabilise après une la phase transitoire de $t = 1s$ à une valeur de $Q =$

$7,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ équivalente à $2.8 \text{ m}^3/\text{h}$ et avec un effet négligeable de la variation de l'éclairement solaire.

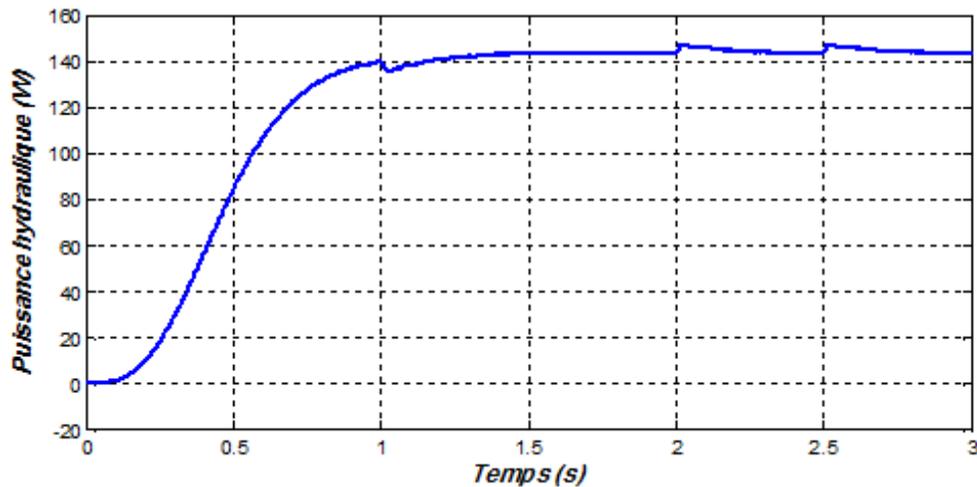


Figure III.19 Puissance hydraulique de la pompe centrifuge

La figure III.19 représente la puissance hydraulique communiquée par la pompe centrifuge, on constate que les variations de l'éclairement influe sur l'allure de la puissance hydraulique mais momentanément où elle est d'une valeur de $P_H = 145 \text{ W}$.

III.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, et après la modélisation et la simulation des parties essentielles dans notre système, nous avons maintenant la partie finale et c'est bien le groupe moto-pompe. Ce groupe se constitue d'un moteur asynchrone à cage et une pompe centrifuge.

D'abord, nous avons donné la structure des constituant du moteur asynchrone (Stator et Rotor), et expliqué le principe de fonctionnement de ce dernier, puis nous avons fait la modélisation de la machine asynchrone et mentionné les hypothèses simplificatrices, cette modélisation basée sur la théorie de **Park**, l'intérêt primordial de cette transformation est de simplifier le problème dans le modèle triphasé. Les résultats obtenus par simulation montrent la validité du modèle de **Park** de la machine asynchrone, cette dernière répond bien pour décrire l'évolution d'un démarrage direct sur un réseau standard.

Ensuite, on a introduit dans la deuxième partie la pompe centrifuge expliquons les généralités de ce dernier, après nous avons fait la modélisation de la pompe basée sur la hauteur manométrique,

le débit et la puissance hydraulique. Finalement, nous avons validée les résultats de pompage puis de système complet; nous avons donné aussi des commentaires explicatifs des résultats détaillées.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail c'est porté sur la modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose: d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme *MPPT* pour obtenir le point de puissance maximale, des convertisseurs statiques et un groupe motopompe. Les convertisseurs sont: un onduleur qui convertir le courant continu en un courant continu commandé par la commande *MLI* et un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe moto-pompe (pompe centrifuge alimentée par moteur asynchrone).

Le premier chapitre de ce travail a été consacré aux différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de pompage photovoltaïque et les principes de fonctionnement de chaque élément. Nous avons commencé par l'histoire de l'énergie électrique photovoltaïque, puis nous avons défini l'effet photovoltaïque et le rayonnement solaire et ses différentes partie: déclinaison du soleil et durée d'insolation, nous avons cité les types des rayonnements solaires: direct, diffus, réfléchi et global.

Dans notre système nous avons comme élément essentiel la cellule photovoltaïque, nous avons commencé par le principe de fonctionnement, puis nous nous sommes intéressés aux différentes technologies des éléments constitutifs d'un système photovoltaïque, En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques: le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché.

Une centrale solaire photovoltaïque est constituée d'un ensemble de modules solaires photovoltaïques. Il existe plusieurs sortes de mise en œuvre d'une centrale photovoltaïque: installation autonome, installation hybride et installation couplée au réseau et mentionné les avantages et les inconvénients de l'installation photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étape fondamentale dans notre travail qui est la modélisation. Nous avons modélisé une cellule photovoltaïque donnant ces équations constituant puis simuler utilisant MatLab/Simulink. Après avoir les graphs de cellules et ses différentes variations nous avons mentionné avec précision l'influence des conditions climatiques (la température et l'éclairement) sur les caractéristiques de la cellule.

En raison de la faible tension générée par une cellule photovoltaïque et de sa faible puissance, il est nécessaire de combiner plusieurs cellules. Cette combinaison appelé "le regroupement",

il existe trois regroupement: en série c'est la tension qui s'additionne, en parallèle c'est le courant qui s'additionne, et dans le regroupement mixte (série-parallèle) on peut modifier les deux paramètres courant et tension pour avoir la forme désiré, c'est un générateur photovoltaïque.

Les convertisseurs statiques sont très importants dans notre travail car on les utilise dans la conversion d'énergie dans le système. Dans ce chapitre, nous avons étudié l'hacheur comme convertisseur continu/continu et l'onduleur comme convertisseur continu/alternatif et sa commande en Modulation de Largeur d'Impulsion "*MLI*" avec simulation.

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de point de puissance maximum (*MPPT*) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules. Nous avons présenté aussi quelques méthodes de *MPPT* basées sur la réaction de la puissance, comme l'algorithme d'incrémentement de l'inductance et la méthode de perturbation et observation *P&O*.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la modélisation du groupe moto-pompe et simulation du pompage photovoltaïque. Nous avons d'abord définir le moteur asynchrone et la structure de ses paramètres, on remarque qu'il y a deux parties essentiel constituant le moteur: le stator et le rotor, par la suite, nous avons expliqué le principe de fonctionnement du moteur à cage.

La modélisation du moteur asynchrone à cage est une étape fondamental on l'utilise pour avoir des résultats voulu, nous avons donné le modèle mathématique de la machine asynchrone dans son référentiel triphasé puis on a transformé dans un autre référentiel biphasé cette fois, cette transformation appelle transformation de *PARK*, puis on a discuté les résultats obtenue ce qui explique l'efficacité de cette transformation. Ensuite nous avons donné les résultats de simulation avec commentaires après le développement des équations dans son référentiel.

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse. Dans cette partie nous avons d'abord mentionné les généralités (présentation, constitution, utilisation et fonctionnement) de la pompe, puis nous avons complété la modélisation de la pompe avec ses trois paramètres. Finalement nous avons validé les résultats de simulation de pompage.

Bibliographie

- [1] D. Boukhers, "Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage", *Mémoire de Magister*, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2007.
- [2] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", *Thèse de Doctorat*, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [3] A. Hammidat, A. Hadj Arab et M.T. Boukadoum, "Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 8, pp. 157-166, 2005.
- [4] A. Labouret, M. Viloz, "Energie solaire photovoltaïque", *Edition le Moniteur, Dunod, 2ème Edition*, 2005.
- [5] Fritts. "On a new form of selenium photocell", *American Journal of Science*, pp. 1883, 1997.
- [6] G. Gomard, "Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultramince", *Thèse de Doctorat*. Université de Lyon, 2012.
- [7] M. Urien, "Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible", *Thèse de Doctorat*, Université de Bordeaux 1, 2008.
- [8] M.A. Green, K. Emery, D.L. King, S. Igari et W. Warta, "Progress in Photovoltaics", *Research and Applications*, 2005.
- [9] <https://lejournal.cnrs.fr/articles/quel-futur-pour-lenergie-solaire>.
- [10] Othmane Benseddik, Fathi Djaloud, "Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", *Mémoire de Master*, Université Kasdi Marbah de Ouargala, 2012.
- [11] N. Touil et S. Ghenbazi, "Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque", *Mémoire de Master Académiques*, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [12] M. Capderou, "Atlas solaire de l'Algérie", *Office des publications universitaire Tome 1 et Tome 2*, Algérie, 1986.
- [13] M. Belhadj Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome", *Mémoire de Magister*, Centre Universitaire de Bechar, 2008.
- [14] F. Slama, "Modélisation d'un système multi-générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", *Mémoire de Magister*, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2018.
- [15] M. El-Metwally, "Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 67, No. 14, pp. 1331-1342, 2005.
- [16] M. Iqbal, "Une introduction au rayonnement solaire", *Academic Press*, New York, 1983.
- [17] F. Slama, "Modélisation d'un système multi-générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", *Mémoire de Magister*, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2018.

- [18] J.A. Duffie et W.A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", 3rd Edition. John Wiley and Sons, 2006.
- [19] A. T. Singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", *Thèse de Doctorat*, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2010.
- [20] F. Slama, "Modélisation d'un système multi-générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", *Mémoire de Magister*, Université Ferhat Abbas, Setif 1, 2018.
- [21] C. Lerouge, "Recherche & industrie photovoltaïque (pv) Etats-Unis", *Sciences physique*, États-Unis, 2006.
- [22] S. Vighetti, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion", *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble, 2010.
- [23] Loïc Bailly, "Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface", *Thèse de Doctorat*, Université de Bordeaux 1, 2010.
- [24] J. M. Navarro, "Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible", *Thèse de Doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse 3, 2008.
- [25] F. Bendjoudi et F. Lakhdari, "Etude et conception d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage électrochimique", *Mémoire de Master*, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2014.
- [26] A. Labouret et M. Viloz, "Energie solaire photovoltaïque", *le manuel du professionnel*, 3^{eme} édition Dunod, 2006.
- [27] Y. Soula, "optimisation et dimensionnement d'un système solaire de pompage d'eau", *Mémoire de Master*, Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Buaghi, 2016.
- [28] <https://conseils-thermiques.org/contenu/panneau-solaire-hybride.php#1>.
- [29] D.Turcotte, M. Ross et F.Sheriff, "Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools", *PV Horizon*, Canada, 2001.
- [30] O. Gergaud, B. Multon et H. Ben Ahmed, "Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models", 7th International Electrimacs Congress, Montréal, 2002.
- [31] A. MEFLAH, "Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque", *Mémoire de Magister*, Université Aboubekr Belkaid de Tlemcen, 2012.
- [32] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan et J. R. Philips, "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters", *Electronics Letters*, Col. 20, No. 10, pp.406-408, 1984
- [33] S. W. Angrist, "Direct Energy Conversion", *Allyn and Bacon, Inc.* 4th edition, pp. 177-227, 1982.
- [34] S. Abouda, "Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïque", *Thèse de Doctorat*, Université Champagne-ardenne de Reims, 2015.
- [35] K. Obeidi, "Commande des hacheurs MPPT par logique floue", *Mémoire de Magister*, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [36] A. Cheikh, S. Mohamed, "Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques", *Mémoire de Magister*, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.
- [37] N. Abouchabana, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT", *Mémoire de Magistère*, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2009.

- [38] V. Didier, B. Gaiddon, "Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des performances," *Relatório técnico, HESPUL*, 2007.
- [39] D. P. Hohm, M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms", *Progress in photovoltaic: Research and Applications*, Vol. 11, No. 1, pp. 47-62, 2003.
- [40] R. E. Katan, V. G. Agelidis, C. V. Nayar, "Performance analysis of a solar water pumping system", *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers, and Energy Systems for Industrial Growth*, pp. 81-87, 1996.
- [41] K. Ouabdelkader, H. Mersel, "Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau", *Mémoire de Master*, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2014.
- [42] C. Said, "Etude des stratégies de commande de l'onduleur", *Mémoire d'Ingéniorat*, université Mohamed Khaider de Biskra, 2008.
- [43] www.physique-appliquée.net/physique-appliquée/machine-a-Courant-alternatif
- [44] N. Khemchane, A. Tizzaoui, "Technique de diagnostic des défauts statorique d'un moteur asynchrone", *Mémoire de Master*, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2017.
- [45] S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique", *Thèse de Doctorat*, Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur, 2002.
- [46] H. Boukhalifa et R. Sid, "Commande direct du couple d'un moteur asynchrone", *Mémoire de Master*, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2015.
- [47] A. Meroufel, "Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique", *Thèse de Doctorat*, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2004.
- [48] M. Arrouf, "Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque", *Thèse de Doctorat*, Université Frères Mentouri de Constantine, 2007.
- [49] J. Hare, "Moteurs et génératrices électriques", 2005.
- [50] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. Sadasy, "Le pompage photovoltaïque", *Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*, Bibliothèque nationale du Canada, 1998.
- [51] K. Idjdarene, "Contribution à l'étude de la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome", *Thèse de Doctorat*, Abderrahmane Mira de Bejaia, 2010.
- [52] G. Sturtzer, et al, "Modélisation et commande des moteurs triphasés, commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs DSP", *Edition Ellipses*, Paris 2000.
- [53] M. B. Messai et M. M. Redouani, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone", *Thèse de Master*, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2014.
- [54] S. Zaidi, "Commande non linéaire du moteur à induction", *Mémoire de Magister*, Université Lhaj Lakhdar de Batna, 2006.
- [55] J. Poulain, "Pompes roto-dynamique", *Technique de l'ingénieur*, 1996.
- [56] A. Otmani, "Contribution à l'étude de rénovation de la station de pompage d'eau de mer Alzinc-Ghazaouet", *Mémoire de Master*, Université Aboubakeur Belkaid de Tlemcen, 2014

[57] A. Amor, "Contribution numérique de l'étude de l'influence de la géométrie de l'aubage en vue d'une optimisation des performances d'une pompe centrifuge par le logiciel cfx", *Mémoire de Magister*, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2010.

[58] P. Bigot, "Les pompes", *Cours CIRA*, 2000.

[59] N. Debili, "Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque", *Mémoire de Magister*, Université Constantine 1, 2015.

[60] F. Bendioudi et F. Lakhdari, "Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries", *Mémoire de Master*, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2014.