

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

AND SCIENTIFIC RESEARCH

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : électrotechnique

Spécialité : énergie et environnement

Présenté par :

BENMELOUKA Ahmida

CHARIF Mustapha

Thème

**Etude du convertisseur électronique
des systèmes de pompage
photovoltaïques**

Soutenu publiquement, le 04/07/2022 , devant le jury composé de :

Mme I.BOUSMAHA	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
M A.KERBOUA	MCB	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M F.BOUKLI-HACENE	Professeur	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M A.TAHOUR	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M A.CHEMIDI	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2021/2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ma chère mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et mon considération pour les sacrifices qu'elle nous a consenti, et pour tous ses efforts qu'elle nous a apporté.

Qu'Allah la protège et la Procure santé et longue vie.

À la mémoire de mon cher père, qu'il m'a toujours poussé et motivée dans mes études et qui m'a doté d'une éducation qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

À mon petit frère Yasser

À toute la famille Benmelouka et la famille Cerra Cheraka.

À mon chère amie Alya qui a partagé mes souvenirs et m'a soutenu durant ces années d'études

À tous mes amis et mes collègues

Dédicace

Je dédie cet humble travail

*À ma très chère mère, pour son soutien et ses encouragements et
tous les sacrifices qu'elle m'a enduré qu'Allah la protège pour
nous et la Procure santé et longue vie*

*À mon cher père, pour tous les efforts qu'il nous a apporté et
tous ses sacrifices qu'Allah lui fasse miséricorde*

À mes adorables sœurs

*À toute la famille Charif en particulier mon oncle Alél et la
famille Sbai, à tous mes amis et mes collègues*

À toutes personnes que j'apprécie

Et mes collègues spécialement les électrotechniciens

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de la patience, qu'il nous 'a donnée durant toutes ces années d'étude.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mr « KARBOU ABDELFEJAK » pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continué durant toute cette période. Qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre Co-encadreur Monsieur « BOUKLS HACENE FOUD » qui nous a bénéficié de ses compétences et disponibilité.

Nous remercions toute et tous les enseignants d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation par ailleurs, ainsi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin nous tenons à exprimer nos reconnaissances à tous nos amis pour le soutien moral et matériel.

RÉSUMÉ

Notre travail s'est penché sur la modélisation et la simulation le système de pompage photovoltaïque au fil de soleil. Ce dernier est considéré parmi les applications intéressantes de l'énergie solaire dans les zones isolées et éloignées du réseau électrique. Notre démarche s'est appuyée sur la conception sur toute la chaîne photovoltaïque du pompage solaire qui se compose d'un générateur PV ; les convertisseurs DC- DC et DC-AC, le moteur (à courant continu et synchrone) depuis la pompe centrifuge. A cet effet nous avons appliqué la commande MPPT P&O pour assurer une extraction d'énergie maximale et d'améliorer l'efficacité et le rendement du système, Une étude comparative entre le moteur à courant continu et le moteur synchrone dans le système Motopompe a été mise en exergue afin de choisir le système adéquat pour la mise en application.

Mots clés : Panneaux photovoltaïques, Énergie solaire, le moteur à courant continu et le moteur synchrone, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Pompe Centrifuge.

Abstract

Our work focused on the modeling and simulation of the photovoltaic pumping system over the sun. The latter is considered among the interesting applications of solar energy in isolated areas far from the electricity grid. Our approach was based on the design of the entire photovoltaic chain of solar pumping which consists of a PV generator; the DC-DC and DC-AC converters, the motor (direct current and synchronous) from the centrifugal pump. For this purpose, we have applied the MPPT P&O control to ensure maximum energy extraction and to improve the efficiency and performance of the system, a comparative study between the DC motor and the synchronous motor in the Motor pump system has been highlighting in order to for the choice of the appropriate system for the implementation.

Key words: Photovoltaic panels, solar energy, DC motor and synchronous motor, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Centrifugal Pump.

الملخص:

ركز عملنا على نمذجة ومحاكاة نظام الضخ الكهروضوئي فوق الشمس. يعتبر هذا الأخير من بين التطبيقات المثيرة للاهتمام للطاقة الشمسية في مناطق معزولة بعيدة عن شبكة الكهرباء. اعتمد نهجنا على تصميم السلسلة الكهروضوئية الكاملة للضخ بالطاقة الشمسية والتي تتكون من مولد الكهروضوئية؛ محولات DC-DC و DC-AC، المحرك (التيار المباشر والمتزامن) من مضخة الطرد المركزي. لهذا الغرض، قمنا بتطبيق التحكم MPPT P&O لضمان أقصى استخلاص للطاقة ولتحسين كفاءة وأداء النظام، وقد تم تسليط الضوء على دراسة مقارنة بين محرك التيار المستمر والمحرك المتزامن في نظام مضخة المحرك من أجل اختيار النظام المناسب للتنفيذ.

لكلمات المفتاحية: الألواح الكهروضوئية، الطاقة الشمسية، محرك التيار المستمر والمحرك المتزامن، تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، مضخة الطرد المركزي.

Liste des figures

Figure I. 1: Spectre du rayonnement solaire	3
Figure I. 2: les principaux méridiens	5
Figure I. 3: l'angle horaire	5
Figure I. 4: Trajectoire apparente du soleil	6
Figure I. 5: Potentiel énergétique solaire moyen annuel durant la période (1983-2012)	8
Figure I. 6: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I. 7: La chaîne de conversion photovoltaïque	9
Figure I. 8: Principe de fonctionnement du panneau solaire bifacial	11
Figure I. 9: Comparaison des pertes joules entre une demi-cellule et une cellule complète	12
Figure I. 10: Panneau standard à 60 cellules vs 120 cellules demi-coupées	12
Figure I. 11: Structure de la cellule	13
Figure I. 12: Cellule busbar	13
Figure I. 13: Connexion des fils au cœur de la cellule	14
Figure I. 14: Rayons descendant sur un onglet de busbars (à gauche) et sur un fil rond (à droite)	14
Figure I. 15: Caractéristique courant-tension d'une cellule PV réelle (I-V)	15
Figure I. 16: Caractéristique tension-puissance d'une cellule PV réelle (P-V)	15
Figure I. 17: Association en parallèle	16
Figure I. 18: Association en série	16
Figure II. 1: Groupe motopompe décrit	18
Figure II. 2: les différents éléments de la pompe	19
Figure II. 3: Pompe volumétrique	20
Figure II. 4: Roue et volute d'une pompe centrifuge	21
Figure II. 5: couplage du moteur	25
Figure III. 1: SCHEMA EQUIVALENT DE LA CELLULE SOLAIRE A UNE DIODE.....	27
Figure III. 2: Modèle Simulink de la cellule PV	28
Figure III. 3: LES CARACTERISTIQUES I-V ET P-V DU MODULE PV	29
Figure III. 4: EFFET DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE P(V) ET I(V).	30
Figure III. 5: EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA CARACTERISTIQUE P(V) ET I(V).	30
Figure III. 6: LE CIRCUIT D'HACHEUR BUCK	31
Figure III. 7: le hacheur Buck entre $[0, \alpha T]$	31
Figure III. 8: LE HACHEUR BUCK ENTRE $[0, \alpha T]$	32
Figure III. 9: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BUCK.....	32
Figure III. 10: le circuit d'hacheur boost	33
Figure III. 11: le hacheur Boost entre $[0, \alpha T]$	33
Figure III. 12: LE hacheur Boost entre $[\alpha T, T]$	34
Figure III. 13: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BOOST.....	35
Figure III. 14: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BUCK-BOOST	35
Figure III. 15: le hacheur Buck-Boost entre $[0, \alpha T]$	36
Figure III. 16: le hacheur Buck-Boost entre $[\alpha T, T]$	36
Figure III. 17: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BUCK-BOOST.....	37
Figure III. 18: CIRCUIT D'UN CONVERTISSEUR ABAISSEUR SOUS MATLAB SIMULINK	37

Figure III. 19: LA FORME D'ONDE DES TENSIONS ET COURANTS DU CONVERTISSEUR BUCK	38
Figure III. 20: LA FORME D'ONDE TENSIONS D'ENTRE ET DE SORTIE DU CONVERTISSEUR BUCK	38
Figure III. 21: COMPORTEMENT DU PANNEAU SOLAIRE INDIQUANT MPP ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT [25]	39
Figure III. 22: ORGANIGRAMME DU P&O [25].....	40
Figure III. 23: RESULTAT DE LA COMMANDE PLEINE ONDE DE L'ONDULEUR 3 PH Source.	41
Figure III. 24: SIMULATION ONDULEUR TRIPHASE COMMANDE PLEINE ONDE MATLAB/SIM POWER SYSTEM.....	41
Figure III. 25: Tension composée U	42
Figure III. 26: Tension simple V	42
Figure III. 27: modele d'une pompe centrifuge	43
Figure IV. 1: schéma de pompage photovoltaïque global à base de MCC.....	47
Figure IV. 2:Le débit de l'eau pompé en cas de MCC.	47
Figure IV. 3: Vitesse de rotation du MCC	48
Figure IV. 4: Le couple résistant de la pompe appliqué sur le moteur à courant continu	48
Figure IV. 5: La puissance issue des Générateurs PV est la MPPT en cas de MCC.....	49
Figure IV. 6: schéma de pompage photo voltaïque global à base de MS.....	49
Figure IV. 7: Le débit de l'eau pompé en cas de MS.	50
Figure IV. 8: Vitesse de rotation du MS.	51
Figure IV. 9: Le couple résistant de la pompe appliqué sur le moteur synchrone.	51
Figure IV. 10: La puissance issue des Générateurs PV est la MPPT.	52

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Quelques centrales photovoltaïques en exploitation en Algérie	8
Tableau I. 2: Les caractéristiques des différentes technologies des cellules PV	10
Tableau I. 3: Impact de la réflectance au sol	11
Tableau IV. 1: les caractéristiques du panneau PV	45
Tableau IV. 2: les caractéristiques des moteurs utilisés	46

Liste des abréviations :

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

DC : Courant continue.

AC : Courant alternatif.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

δ : Déclinaison.

TSV : Temps solaire vrai.

S_0 : La durée et le taux d'insolation.

Ψ : L'attitude du lieu.

TSM : Temps solaire moyen.

α : Azimut du soleil

H_0 : L'irradiation journalière.

ω_s : L'angle solaire.

G_{SC} : La constante solaire [w/m^2].

STC : Standard Test Conditions.

SPS : Série parallèle série.

PERC: Passivated Emitter Rear Cell.

V_{CO} : La tension à circuit ouvert en (V).

I_{CC} : Le courant de court-circuit en (A).

P_C :La puissance crête en (WC).

V_{OP} :Tension optimale en (V).

I_{OP} : Courant optimale en (A).

η : Rendement.

FF : Le facteur de forme.

N_p : Cellules en parallèle.

Q_v : Débit volumique en (m^3/s)

Q_m : Débit Massique en (kg/h)

V : La vitesse (m/s)

S : La section (m^2)

N : Vitesse de rotation (tr/min)

C : Le cycle de la cylindrée (cm^3/tr)

ρ : La masse volumique (kg/m^3).

p : La pression en (bar).

F : La force en (daN).

H : Hauteur totale du pompage.

H_s : Hauteur statique.

H_d : Les pertes linéaires et des pertes singulières.

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

d : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

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

ξ : Coefficient de pertes des charges locales.

HMT : La hauteur manométrique total.

T_r : Couple résistant de pompe
 K_r : Le coefficient de proportionnalité en $(\text{Nm}/(\text{rad. s}^{-1})^2)$
 Ω : La vitesse angulaire de la machine (rad. s^{-1})
MS : Moteur synchrone.
MAS : Moteur asynchrone.
MCC : Moteur à courant continue.
I : Le courant fourni par la cellule [A].
 I_{ph} : Photo-courant [A].
 I_0 : Courant de saturation
 I_{sh} : Courant à travers la résistance shunt
 K_i : Courant de court-circuit de cellule à 25°C et $1000\text{W}/\text{m}^2$
 T_n : Température nominale (K).
G : Irradiation solaire W/m^2
q : Charge électronique (C).
n : Le facteur d'idéalité de la diode
K : Constante de Boltzmann (J / K).
 E_{g0} : Energie de bande interdite du semi-conducteur (eV) (1.1eV)
 N_s : Nombre de cellules connectées en série
 R_s : Résistance série (Ω) ;
 R_{sh} : Résistance shunt (Ω) ;
 V_t : tension thermique de la diode (V)
 V_i : Tension d'entrée de convertisseur.
 V_0 : tension de sortie de convertisseur.
 V_L : Tension à la borne de l'inductance.
 i_L : Courant de l'inductance.
 i_0 : Courant de sortie de convertisseur.
(L) : L'inductance.
(C) : Condensateur.
(S) : Interrupteur.
(D) : Diode.
(R) : Résistance.
 α : Rapport cyclique.
T : Période.
f : Fréquence.
P&O : Perturber et Observer.
U : Tension composée.
 P_{ab} : La puissance absorbée

Table des matières

.....	1
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque solaire	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Gisement solaire.....	3
I.2.1 Position du soleil par rapport à la terre	4
I.2.1.2 Déclinaison.....	4
I.2.1.2 Inclinaison axial de la terre	4
I.2.1.3 Méridien.....	4
I.2.2 Rayonnement hors atmosphère	7
I.2.3 Le potentiel solaire en Algérie.....	7
I.3 Technologie des PV	8
I.3.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	8
I.3.2 Chaîne de conversion photovoltaïque.....	9
I.3.3 Silicium monocristallin.....	9
I.3.4 Silicium poly (ou multi-) cristallin	9
I.3.5 Silicium amorphe	10
I.3.6 Arséniure de gallium (GaAs).....	10
I.3.7 Tellure de cadmium (CdTe)	10
I.3.8 La technologie bifaciale.....	11
I.3.9 La technologie demi-cellule (Half cut-cell).....	11
I.3.10 La technologie PERC (Passivated Emitter Rear Cell).....	12
I.3.11 Les cellules multi-busbars	13
I.4 Les caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	14
I.5 Association du module photovoltaïque.....	15
I.5.1 Association en parallèle	15
I.5.2 Association en série	16
I.6 Conclusion	16
Chapitre II : Motopompe	18
II.1 Introduction.....	18
II.2 Le groupe motopompe	18
II.2.1 Définition.....	18
II.2.2 La partie hydraulique	19
II.2.2.1 Les pompes volumétriques	19
II.2.2.2 Les turbopompes.....	20
II.2.3 La partie moteur.....	24
II.2.3.1 Les moteurs à courant continu	24

II.2.3.2	Les moteurs asynchrones	25
II.2.3.3	Les moteurs synchrones	25
II.2.4	Fonctionnement d'un groupe motopompe	26
II.3	Conclusion	26
Chapitre III : Modélisation des éléments de la chaine de pompage photovoltaïque au fil du soleil		27
III.1	Introduction	27
III.2	Modélisation d'une cellule photovoltaïque	27
III.3	L'influence de la température et l'éclairement sur le module PV	29
III.3.1	L'influence de l'éclairement	29
III.3.2	L'influence de température	30
III.4	Les convertisseurs de l'énergie PV	30
III.4.1	Le convertisseur Buck	31
III.4.2	Le convertisseur Boost	33
III.4.3	Le convertisseur Buck-Boost.....	35
III.4.4	Simulation du comportement du convertisseur Buck	37
III.5	L'Algorithme d'Extraction du MPP	39
III.6	L'onduleur triphasé	40
III.7	La pompe centrifuge	42
III.8	Conclusion.....	43
Chapitre IV : Résultats et discussions		44
IV.1	Introduction.....	44
IV.2	Description et Dimensionnement de la chaine de pompage au fil du soleil	44
IV.2.1	Estimation des besoins en eau	44
IV.2.2	Puissance hydraulique	44
IV.2.3	Puissance mécanique	44
IV.2.4	Puissance électrique	44
IV.2.5	La puissance du générateur photovoltaïque	45
IV.2.6	Nombre de panneaux	45
IV.2.7	Durée de remplissage du réservoir	45
IV.3	Résultats de la Simulation de la chaine de pompage au fil du soleil	45
IV.3.1	Simulation de la chaine de pompage à base du MCC	46
IV.3.2	Simulation de la chaine de pompage à base du MS	49
VI.4	Conclusion.....	53
Conclusion générale.....		54
ANNEX A :		55
Bibliographie		57

Introduction générale

Les énergies renouvelables ne sont pas nouvelles pour l'humanité, car les humains les utilisent depuis l'Antiquité. En fait, les gens l'utilisent depuis le VIIe siècle avant JC. L'être humain utilisait l'énergie solaire pour allumer le feu à l'aide de lentilles grossissantes, et le plus grand exemple de cela sont les Grecs et les noyés qui allumaient les torches de cérémonie avec des miroirs, appelés les miroirs brûlants.

L'énergie est indispensable à l'espèce humaine. Sans énergie, pas de chaleur ni de lumière. Pas de transports ni de production. Cependant, la consommation d'énergie dans le monde a explosé ce dernier siècle. D'abord lancée en Europe et aux États-Unis lors de la 1re révolution industrielle, elle a augmenté de façon exponentielle avec les trentaines (1945-1975). Depuis, la croissance économique des grands pays émergents (Chine, Inde, Brésil et autres) a pris le relais. La croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie et des mobilités, les dynamiques de la mondialisation. Tout cela contribue à une dépense d'énergie énorme au détriment de l'environnement car les énergies fossiles sont encore majoritaires dans le mix de toutes les grandes régions du monde. Ces énergies s'épuiseront un jour et l'environnement sera détruit en raison de la grande quantité d'émissions de gaz à effet de serre.

Malgré l'énorme potentiel du Sud algérien qui dispose d'un ensoleillement annuel de 3000 heures en moyenne, le solaire ne représente que 3% de la production électrique du pays. Celle-ci est largement dévolue aux énergies fossiles – et en particulier au gaz – qui assurent 97% de la production. Mais pour répondre à une demande d'électricité en constante augmentation (+7% par an depuis 2010) et face à l'épuisement à terme de la ressource fossile, l'Algérie se devait exploiter des nouvelles sources énergétiques durable où l'énergie solaire est la plus prometteuse.

L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée dans l'Algérie en raison de l'existence d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond, et elle dispose un gisement solaire le plus élevé au monde telle que la durée d'ensoleillement peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara et la moyenne annuelle d'ensoleillement solaire quotidienne varie de 5 à 7 KWh/m² dans la mesure. Le pompage photovoltaïque est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse.

Notre domaine d'intérêt est le pompage solaire de l'eau pour irriguer les zones rurales isolées en l'absence de soleil. A cet effet ; nous allons installer une chaîne composée d'un générateur photovoltaïque et d'un convertisseur DC-DC fonctionnant en MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING). Cette opération sert à extraire un maximum de puissance pour alimenter un moteur à courant continu. On peut le combiner ainsi à un convertisseur DC-AC pour alimenter notre moteur à courant alternatif qui entraînera les hélices de la pompe pour remplir le réservoir d'eau et de le stocker sous forme d'énergie potentielle au lieu de batteries.

La différence entre un système solaire autonome classique et un système de pompage au fil de soleil. Ce dernier ne nécessite pas l'utilisation des batteries dans la chaîne photovoltaïque. Il suffit de remplacer le stockage électrique par le stockage hydraulique. Cette différence nous permet de réduire le coût initial d'installation sachant que le prix des batteries augmente le coût d'installation. De plus ; ces dernières ont une durée de vie limitée et qu'il faut les remplacer régulièrement, par contre un réservoir est construit en matériaux disponibles ; durable et beaucoup moins chers.

Notre objectif dans ce travail est d'étudier le comportement du convertisseur électronique d'un système de pompage au fil de soleil par la simulation sur MATLAB-Simulink. Le système de pompage au fil de soleil se compose d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur qui fonctionne en MPPT et un groupe motopompe. Dans ce travail, nous avons adopté la démarche suivante :

- Modélisation de chaque composant de la chaîne du pompage.

- Elaboration de la méthode MPPT pour extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

- La simulation du modèle complet de la chaîne de pompage photovoltaïque.

Le présent document est donc composé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre aborde une vue générale sur le gisement solaire et les différentes technologies des panneaux photovoltaïques.

- Le deuxième chapitre présente les différents types ainsi que les composants du groupe motopompe en générale.

- La modélisation des différents composants de la chaîne sont présentés dans le troisième chapitre. Partant du générateur photovoltaïque, puis les convertisseurs statiques (DC-DC et DC-AC), et enfin nous donnons un aperçu général sur les groupes Motopompes.

- Le dernier chapitre contient le dimensionnement du système de pompage de 1.5kW pour ensuite présenter et discuter les résultats de la simulation du modèle global implanté sur MATLAB/Simscape

Chapitre I : Généralités
sur l'énergie
photovoltaïque solaire

I.1 Introduction

A notre époque, l'énergie est devenue une chose indispensable, car elle est utilisée dans la plupart des domaines du quotidien (éclairage, climatisation, la cuisson, la réfrigération et la communication, pompage d'eau...) et notre besoin en consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Pour satisfaire ses besoins, l'homme a exploité des sources d'énergie fortement polluantes telles que le gaz et les hydrocarbures, ce qui a provoqué un taux élevé d'émissions de gaz à effet de serre. La concentration de ces gaz dans l'atmosphère terrestre est l'un des facteurs à l'origine du réchauffement climatique. Pour lutter contre la crise climatique à l'échelle mondiale, les gouvernements commencent à utiliser efficacement des sources d'énergie renouvelables et non polluantes.

Une des sources d'énergie renouvelable la plus importante est l'énergie solaire, qui est considérée comme une alternative viable puisque elle ne s'épuise pas et peut être utilisée dans tous les coins du monde.

I.2 Gisement solaire

Le soleil est situé à une distance d'environ 150 millions de kilomètres de la terre, libère d'énormes quantités d'énergies sous forme d'un rayonnement électromagnétique à celui d'un corps noir à une température de 5800°k. Ce rayonnement est responsable du climat et des phénomènes météorologiques terrestres. La figure I.1 illustre la distribution spectrale du rayonnement solaire [1] :

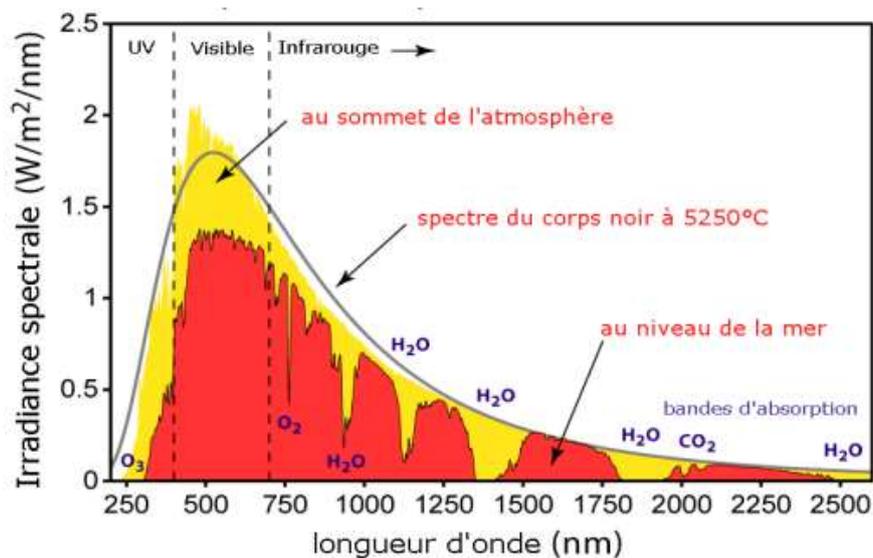


Figure I. 1: Spectre du rayonnement solaire [2].

I.2.1 Position du soleil par rapport à la terre

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

I.2.1.1 Latitude

Latitude est l'angle entre les perpendiculaires du lieu et le plan de l'équateur, calculé de 0 à 90 degrés vers le nord et de 0 à -90 vers le sud

I.2.1.2 Déclinaison

La déclinaison est l'angle compris entre les rayons du soleil le plan de l'équateur terrestre. Cet angle peut être calculé par l'équation de Cooper ci-dessous [3] :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(2\pi \frac{284+n}{365} \right) \quad (I. 1)$$

Avec n est le numéro de jour dans l'année.

I.2.1.2 Inclinaison axial de la terre

L'Inclinaison axial est l'angle compris entre l'axe de la terre et l'axe de rotation de la terre (l'axe perpendiculaire à l'orbite de la terre)

I.2.1.3 Méridien

Le méridien est un grand cercle imaginaire autour du globe qui passe par les pôles célestes, les méridiens de longitude qui passent par le nord/sud servent à déterminer les heures aussi appelées fuseaux horaires, par exemple, le méridien 0 est fixé par convention sur l'observatoire de Greenwich en le Royaume-Uni. Et pour la longitude nous avons l'équateur comme la montre la figure ci-dessous [4] :

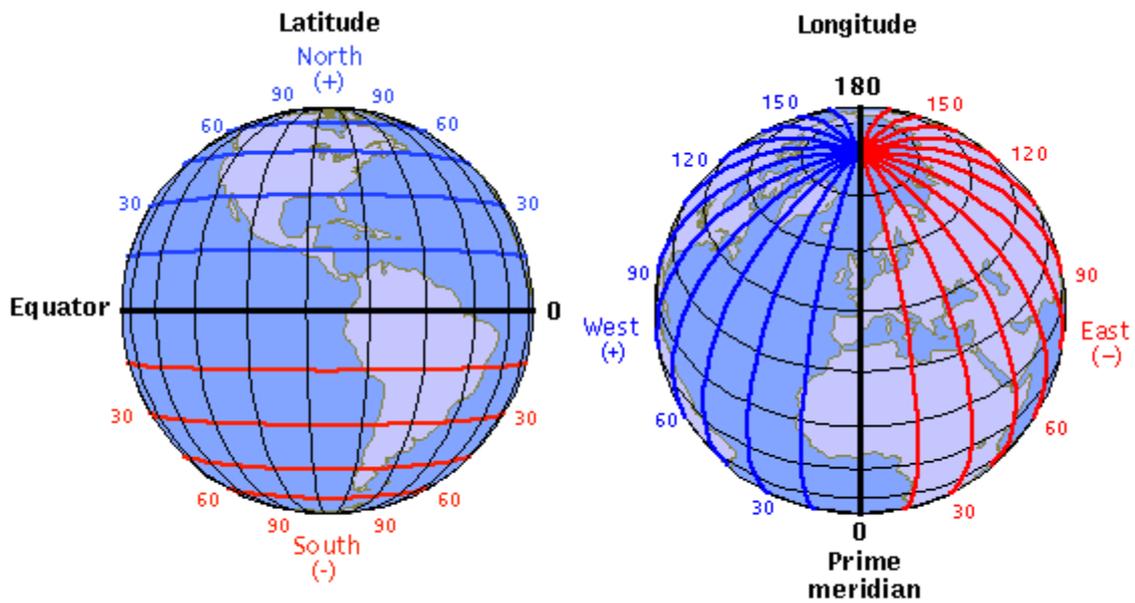


Figure I. 2: les principaux méridiens [4]

I.2.1.4 Le temps solaire vrai

Le temps solaire vrai est l'angle horaire du soleil en un lieu et à un instant donné. Il est lié à la rotation de la terre sur elle-même et son mouvement autour du soleil, il est défini par la formule ci-dessous :

$$TSV = 12 + \frac{w}{15} \quad (I. 2)$$

Avec w est l'angle horaire qui est une portion d'arc d'équateur comprise entre le plan du cercle horaire passant par le soleil et le plan du méridien céleste (et le plan méridien du lieu obtenu) comme la montre la figure ci-dessous [3] :



Figure I. 3: l'angle horaire [5].

La valeur de l'angle horaire :

- Nulle à midi
- Positive après midi
- Négative le matin
- Augmente de 15° chaque une heure (365° divisé par 24 heures).

I.2.1.5 La durée et le taux d'insolation

La durée maximale d'insolation est calculée par la formule suivante :

$$S_0 = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \Psi \tan \delta) \quad (\text{I. 3})$$

Avec :

Ψ : L'attitude du lieu

δ : La déclinaison

et le taux d'insolation est calculé par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (\text{I. 4})$$

I.2.1.6 Le temps solaire moyen

Le temps solaire moyen (en abrégé TSM) est la vitesse de la terre sur son orbite qui n'est pas constante mais il est défini 24 heures à la moyenne.

I.2.1.7 Position du soleil

On peut repérer la position de soleil en utilisant deux angles :

- La hauteur de soleil (h) : c'est l'angle compris entre la direction de soleil et la projection sur le plan horizontale, sa valeur est nulle au lever et au coucher du soleil elle atteint son max à midi. On peut le calculer avec la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(\Psi) \sin(\delta) + \cos(\Psi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (\text{I. 5})$$

- Azimut du soleil (α) : c'est l'angle compris entre la direction du soleil et la direction du sud on peut le déterminer avec la formule ci-dessous :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I. 6})$$

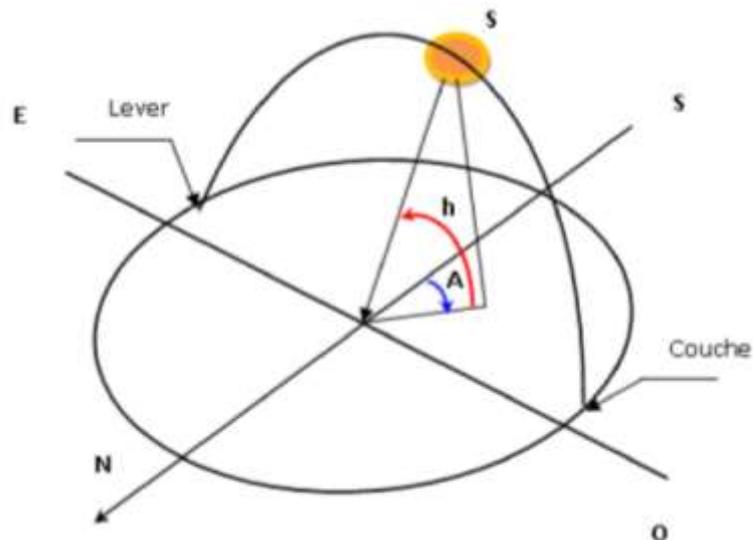


Figure I. 4: Trajectoire apparente du soleil [3]

I.2.2 Rayonnement hors atmosphère

La lumière parcourt 150 000 000 km pendant 8 minutes jusqu'à ce qu'elle atteigne la terre avec un éclairement de 1367[w/m²] appelé la constante solaire, il varie selon la variation de la distance entre le soleil et la terre pendant l'année.

I.2.2.1 L'éclairement :

L'éclairement extraterrestre est calculé défini suivant la formule ci-dessous :

$$I = G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\cos \Psi \cos \delta \cos \omega + \sin \Psi \sin \delta) \quad (I. 7)$$

Avec :

- **n** : Le numéro de jour de l'année (n=1 pour le premier janvier, ...etc.)
- **G_{sc}** :La constante solaire, G_{sc} =1367[w/m²]

I.2.2.2 L'irradiation horaire

En combinant avec la formule précédente l'irradiation horaire est calculée avec entre les deux angles horaires (ω₁ et ω₂) comme suit [3] :

$$I_0 = \frac{12.36}{\pi} G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\cos \Psi \cos \delta (\sin \omega_1 - \sin \omega_2) + (\omega_1 - \omega_2) \sin \Psi \sin \delta) \quad (I. 8)$$

I.2.2.3 L'irradiation journalière

C'est l'énergie reçu dans un jour n de lever au coucher du soleil sur une surface horizontale

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos 2\pi \frac{n}{365}\right) (\cos \Psi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \Psi \sin \delta) \quad (I. 9)$$

Avec l'angle solaire

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \Psi \tan \delta) \quad (I. 10)$$

- **G_{sc}** :La constante solaire [w/m²]
- **δ** : La déclinaison du soleil.
- **Ψ** : Latitude de lieu.
- **n** : Le numéro de jour de l'année compte à partir du le premier janvier.

I.2.2.4 L'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère

L'irradiation journalière moyenne mensuelle est calculée par la formule de l'irradiation journalière avec n est le numéro de jour type de moi.

I.2.3 Le potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède les gisements solaires les plus riches du monde, il dépasse 2000 heures par an et peut atteindre 3900 heures dans les hauts plateaux et les déserts. L'énergie atteint 5 kW/m² par heure, soit 1700kW/m² par an dans le nord du pays et 2263kW/m² dans le sud. L'Algérie est considérée comme le plus fort en termes de potentiel solaire dans la région méditerranéenne.

Dans le cadre de la recherche, il existe de nombreuses institutions en Algérie qui ont été créées dans le but de stimuler et d'accélérer le rythme de la technologie. Le gouvernement a pris des mesures concrètes par la

promulgation des lois pour développer et améliorer l'efficacité énergétique et couvrir les coûts résultant du système de tarification appliqué à l'électricité.

Tableau I. 1: Quelques centrales photovoltaïques en exploitation en Algérie [6] :

La wilaya	Capacité de la centrale (MW)	Date d'entrée en service
Ghardaïa	1.1	Juin 2014
ILIZI	03	Février 2015
Adrar	20	Octobre 2015
Tamanrasset	13	Novembre 2015
Adrar (Gare de Raggan)	05	Janvier 2016
Adrar (Gare Zawyate Kenta)	06	Janvier 2016
Djelfa	20	Avril 2016
Naama (Sedrat Gazelle)	20	Mai 2016
Saïda (Ain Sokhona)	30	Mai 2016

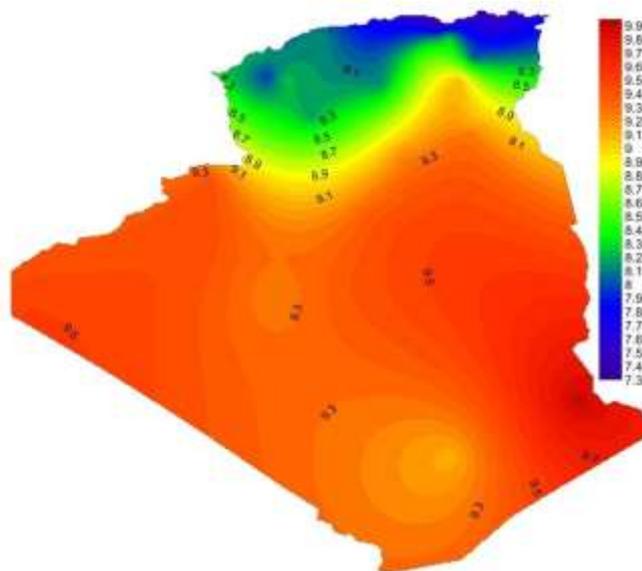


Figure I. 5: Potentiel énergétique solaire moyen annuel durant la période (1983-2012) [7].

I.3 Technologie des PV

I.3.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un semi-conducteur à base de silicium généralement, elle est constituée de deux zones, une zone dopée P et l'autre zone dopée N reliées entre elles ce qui nous donne une jonction PN.

Les photons émis par le soleil sont captés par le semi-conducteur ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN qui libèrent des électrons de charge N et par conséquent il y aura des trous de la charge P qui créent une différence de potentiel mesurable entre les bornes positive et négative de la cellule.

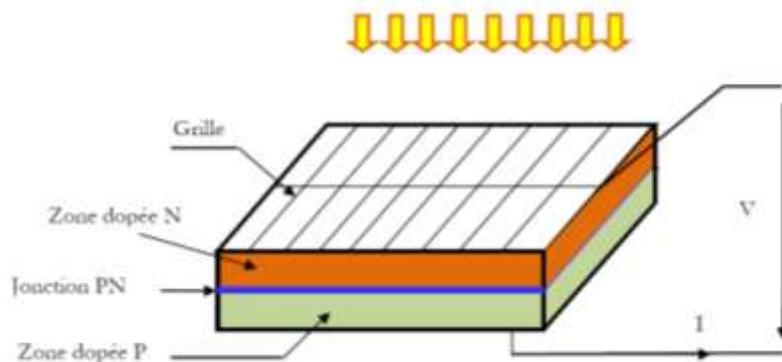


Figure I. 6: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [3].

I.3.2 Chaîne de conversion photovoltaïque

La chaîne de conversion solaire photovoltaïque commence par le panneau solaire, qui convertit les rayonnements solaires en énergie électrique (DC). Par la suite ; on fait l'adaptation de puissance par des convertisseurs statiques DC/DC ou DC/AC afin de calculer le point de puissance maximal du panneau puis l'alimentation de la charge (DC ou AC) ou le stockage d'électricité dans des batteries rechargeables généralement qui sont en lithium [1].

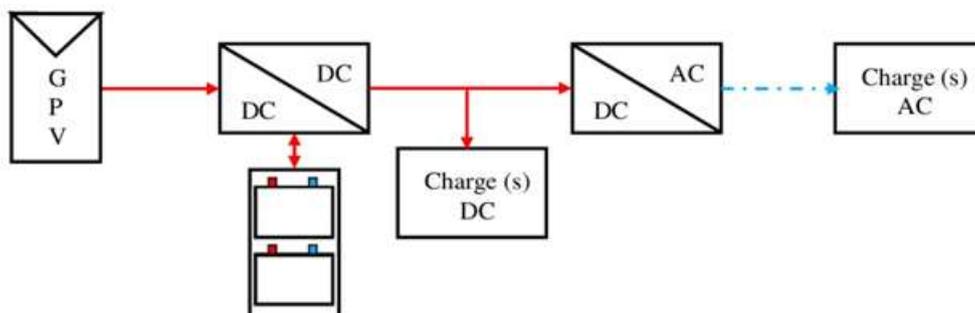


Figure I. 7: La chaîne de conversion photovoltaïque [1]

I.3.3 Silicium monocristallin

La cellule est fabriquée par un seul cristal de silicium, a un bon rendement, l'aspect de ces cellules est uniforme et couleur presque noir. Elle est applicable dans tous les domaines (les sites isolés, les appareils de puissance moyenne et faible, les toits et façades ...). La durée de vie de cette technologie est comprise entre 20 et 30 ans [8].

I.3.4 Silicium poly (ou multi-) cristallin

La cellule est fabriquée par plusieurs cristaux de silicium. Cette technologie est moins performance et moins chers para port à monocristalline. L'aspect de ces cellules est non uniforme et couleur bleu foncé et a même durée de vie que monocristalline [8].

I.3.5 Silicium amorphe

La cellule est fabriquée à partir de silicium en couche très mince. Cette technologie est moins efficace que les deux précédentes, mais elle peut fonctionner aussi bien en éclairage extérieur qu'en intérieur. On le trouve dans les montres et les calculatrices et vitrées semi-transparentes...etc [8].

I.3.6 Arséniure de gallium (GaAs)

Cette technologie est très chère et appliquée dans les satellites et les systèmes à concentration à cause du rendement très grand de 25-40 % [8].

I.3.7 Tellure de cadmium (CdTe)

Il est considéré comme le meilleur dans la technologie du couches minces (3^{ème} génération) et le prix de fabrication est en baisse, mais cette technologie souffre d'un manque de matières premières (le Tellure est un élément rare) et peut être interdite dans certains pays (le danger de cadmium à l'environnement). Le tableau 1.2 illustre les différentes technologies des cellules [8].

Tableau I. 2: Les caractéristiques des différentes technologies des cellules PV [8]

Type de technologie	Le rendement	La puissance des panneaux	Gamme d'éclairement
Silicium monocristallin	15 à 20 %	5 à 300 Wc	100 à 1 000 W/m ²
Silicium polycristallin	12 à 17 %	5 à 300 Wc	200 à 1 000 W/m ²
Silicium amorphe	5-7 % STC (jusqu'à 12 % pour les « multi-jonctions »).	0,5 à 90 Wc	20 lux (en intérieur) à 1000 W/m ² (en extérieur)
Arséniure de gallium (GaAs)	25-40 %.		
Tellure de cadmium (CdTe)	8 à 10 %	70 à 90 W	

De plus ; l'apparition des nouveaux modules innovants photovoltaïques dans le marché mondiale

Ce qui a conduit à l'émergence à de nombreuses nouvelles applications ; notamment ; technologie de PERC, technologie demi-cellule, technologie double vitrage et la technologie bifaciale [9].

I.3.8 La technologie bifaciale

La première apparition de la technologie des panneaux bifaciaux remonte à 1954, et elle a connu un grand développement. Les panneaux bifaciaux sont capables de convertir le rayonnement en énergie électrique à l'avant et à l'arrière suivant la figure I.8:

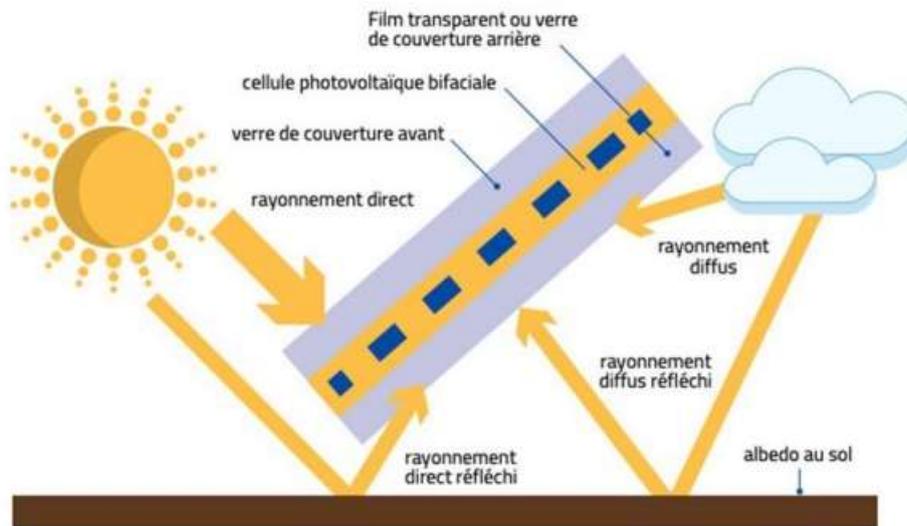


Figure I. 8: Principe de fonctionnement du panneau solaire bifacial [10].

Cette face arrière ajoutée permet d'augmenter la production de 5% à 30% par rapport aux panneaux traditionnels d'après la réflectance au sol comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau I. 3: Impact de la réflectance au sol [9]

La surface	ALBEDO	Gain de rendement attendu
L'eau	5-8%	4-6%
Sol nu	10-20%	6-8%
Prairie verte, Gravier	15-25%	7-9%
Sol en béton /Gravier blanc	25-35%	8-10%
Sable sec / dunaire	35-45%	10-15%
Toit réfléchissant: Revêtements	80-90%	23-25%
Neige fraîche	80-95%	25-30%

I.3.9 La technologie demi-cellule (Half cut-cell)

Les panneaux de cette technologie sont constitués de demi-cellules. Cette dernière a produit un courant qui égale à la moitié de la valeur de la cellule entière et cette coupure diminue les courants des pertes résistives de devenir plus petite qui a augmenté la puissance produite par demi-cellules d'environ 3%. Comme montre la figure ci-dessous [9]:

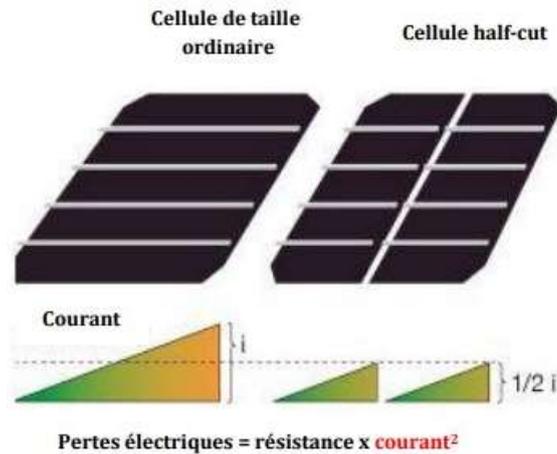


Figure I. 9: Comparaison des pertes joules entre une demi-cellule et une cellule complète [10].

Une autre caractéristique des demi-cellules est la plus faible probabilité de fissures causées par des contraintes mécaniques en raison de la plus petite surface par rapport à la cellule entière. Par conséquent, la probabilité d'apparition de points chauds diminue également. En atteignant des valeurs de puissance inférieures, l'espacement obligatoire entre la moitié des cellules est inférieur à l'espacement des cellules pleines.

Les modules demi-cellule utilisent généralement des connexions série parallèle série (SPS), comme illustré à la figure ci-dessous. Ce type de connexion permet aux modules demi-cellule d'avoir une meilleure réponse à l'ombrage, car une moitié du module n'est pas affectée par l'autre. De plus, le logiciel de contact SPS permet de maintenir des niveaux de tension et de courant similaires aux unités conventionnelles [9].

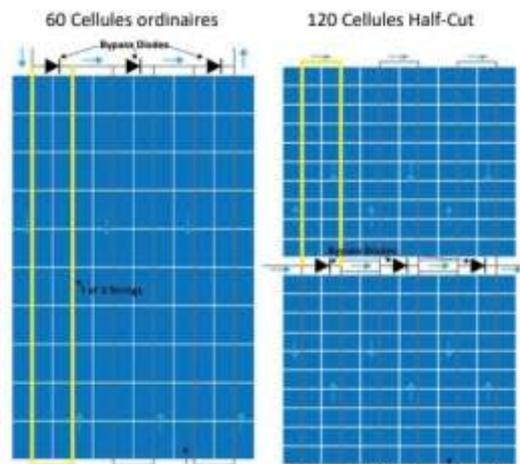


Figure I. 10: Panneau standard à 60 cellules vs 120 cellules demi-coupées [9].

I.3.10 La technologie PERC (Passivated Emitter Rear Cell)

Les cellules de silicium cristallin n'absorbent pas tout le spectre de la lumière visible du soleil qui atteint la surface du panneau. Certaines de ces ondes peuvent traverser les couches de silicium jusqu'à ce qu'elles atteignent l'arrière du métal, ce qui provoque un gaspillage d'énergie. Afin de résoudre ce problème, les cellules PERC sont encapsulées entre silicium et aluminium à la face arrière est à travers une couche diélectrique qui empêche le gaspillage d'énergie et en réfléchissant le rayonnement. Ce processus permet aux couches de silicone d'absorber certaines longueurs d'onde qui ne seraient pas perdues, comme le montre la figure I.11 [9];

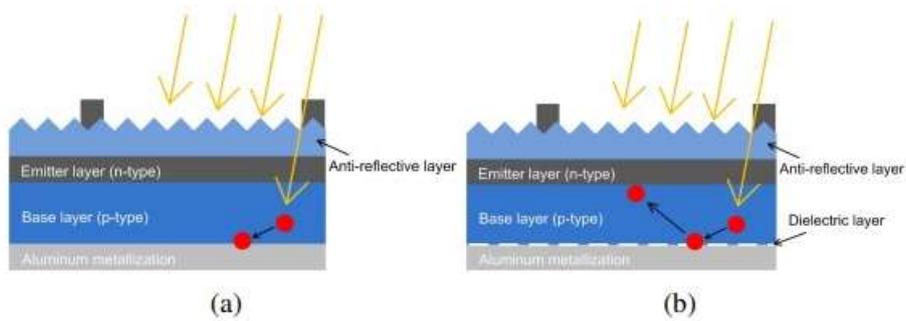


Figure I. 11: Structure de la cellule [11].

(a) une cellule conventionnelle ; (b) une cellule PERC [9]

Cette technologie fonctionne mieux dans des conditions de faible rayonnement et de faibles coefficients de température et actuellement les cellules PERC ont des rendements supérieurs à 22,5 % si elles sont monocristallines et 21 % si elles sont polycristallines [9].

I.3.11 Les cellules multi-busbars

Les cellules solaires au silicium sont métallisées avec de fines bandes rectangulaires imprimées sur les deux côtés de la cellule PV. Ils sont connus par jeu de barres qui sert à conduire le courant continu généré par la cellule photovoltaïque, les cellules multi-busbars ont plusieurs éléments :

- Les busbars des cellules solaires sont généralement fabriqués en cuivre recouverts par l'argent afin d'éviter l'oxydation et d'augmenter la conductivité du courant.
- Les doigts de cellules solaires sont imprimés via la technologie de sérigraphie. Ils sont placés perpendiculairement par rapport aux busbars afin qu'ils livrent le courant généré par les cellules.

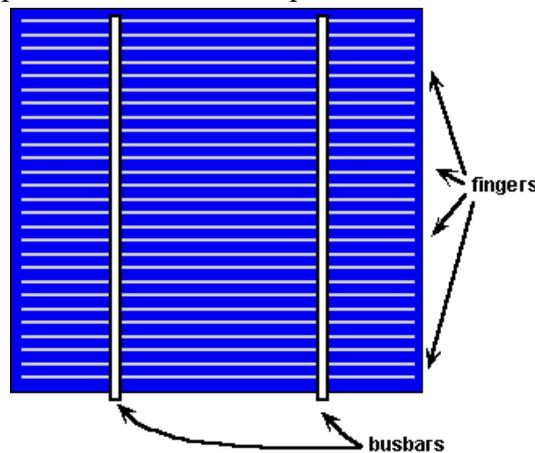


Figure I. 12: Cellule busbar [10]

- L'onglet est généralement construit avec un fil de cuivre rond, il est soudé sur le jeu de barres des cellules photovoltaïques afin qu'il connecte les cellules individuellement en série pour avoir une tension appropriée.
- Les fils de bus sont des groupes de chaînes de cellules connectés aux ongles liés en parallèle pour augmenter le courant de module photovoltaïque. Les éléments doivent respecter les dimensions afin qu'ils supportent le courant (plus de surface donne moins de résistivité) [9].

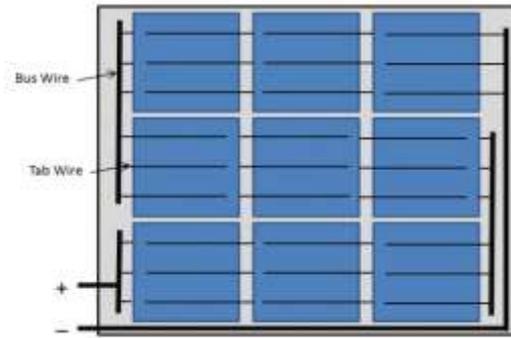


Figure I. 13: Connexion des fils au cœur de la cellule [10].

Développement de la conception de contact :

Afin d'améliorer l'efficacité et la fiabilité et de réduire le coût du matériau utilisé (pâte d'argent), il doit y avoir un équilibre entre les pertes de résistance du maillage largement espacé et la réflexion du revêtement de surface supérieure. Cette technologie protège le panneau solaire de l'effet d'ombre et répartit uniformément les contraintes mécaniques pour réduire les risques de point chaud.

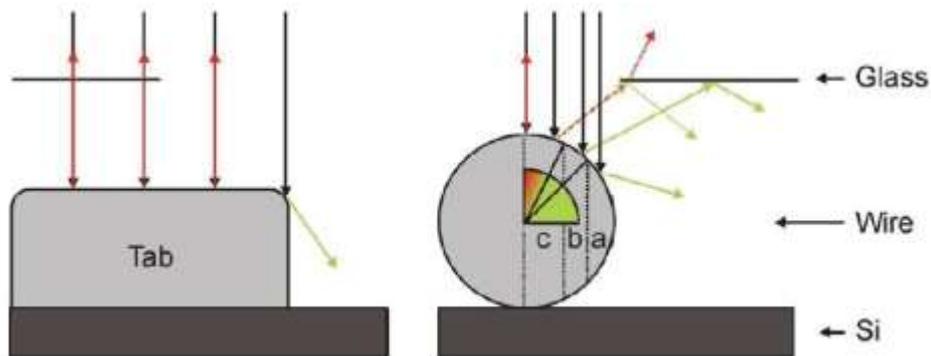


Figure I. 14: Rayons descendant sur un onglet de busbars (à gauche) et sur un fil rond (à droite) [10].

La figure ci-dessus montre les différents types de rayons descendant sur un onglet de busbars et sur un fil rond, pour le conducteur rond on a trois zones d'importance, ou dans la région (a) le faisceau est directement réfléchi sur la surface de la cellule et la partie ombrée est réduite à 70,1% de la zone réelle. Pour la zone (b), le conducteur réfléchit tous les rayons absorbés sur le verre de module photovoltaïque en réduisant la zone d'ombrage par 35,7%. Et finalement pour la zone (c), le conducteur réfléchit sur le verre par contre dans ce cas l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de réflexion totale. Donc le conducteur rond diminue la zone d'ombre effective du fil et peut conduire à des courants de court-circuit plus élevés [10].

I.4 Les caractéristiques d'un module photovoltaïque

Chaque module photovoltaïque a les caractéristiques suivantes :

- **La tension à vide V_{co}** en (V)
- **Le courant de court-circuit I_{cc}** en (A)
- **La puissance à crête P_c** en (Wc) (la puissance maximale fournie dans les conditions standards 25°C de température d'ambient et 1000W/m² d'éclairement).
- **Le point optimal (V_{OP}, I_{OP})** [35]

Ces caractéristiques sont illustrées dans les figures I.15 et I.16 :

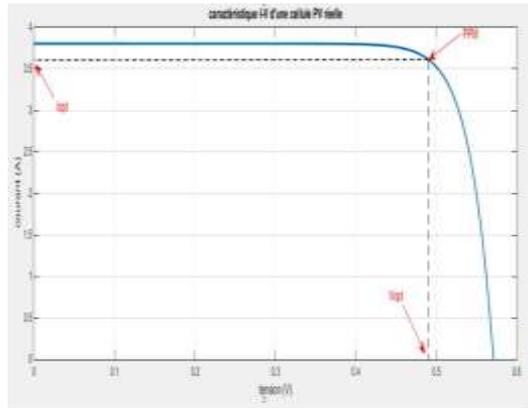


Figure I. 15: Caractéristique courant-tension d'une cellule PV réelle (I-V) [11]

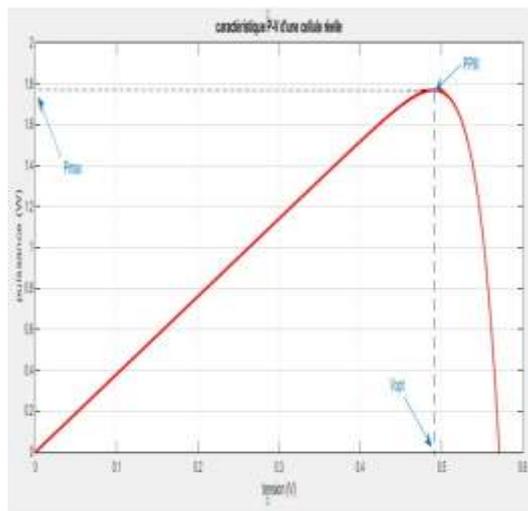


Figure I. 16: Caractéristique tension-puissance d'une cellule PV réelle (P-V) [11]

- **Le rendement η**

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{op} \times I_{op}}{G \times S} \quad (I. 11)$$

Avec G : L'éclairement en (W/m²) et S : Surface de module en (m²)

- **Le facteur de forme FF**

$$FF = \frac{V_{op} \times I_{op}}{V_{co} \times I_{co}} \quad (I. 12)$$

I.5 Association du module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est constitué à plusieurs cellules liées entre eux en séries ou en parallèles pour fournir la puissance requise

I.5.1 Association en parallèle

On utilise cette association pour augmenter le courant de telle sorte que les tensions des différentes branches sont égales et les courants s'additionnent [12].

$$I_{cc_{Np}} = N_p \times I_{cc} \text{ et } V_{co_{Np}} = V_{co} \quad (\text{I. 13})$$

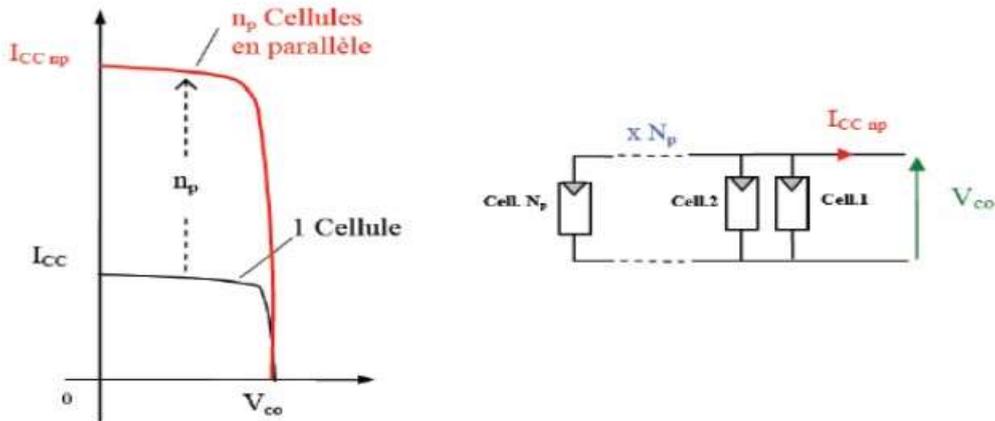


Figure I. 17: Association en parallèle [12]

I.5.2 Association en série

On utilise cette association pour augmenter la tension telle que le courant reste le même et les tensions s'additionnent [12].

$$V_{co_{Np}} = N_p \times V_{co} \quad (\text{I. 14})$$

$$I_{cc_{Np}} = I_{cc} \quad (\text{I. 15})$$

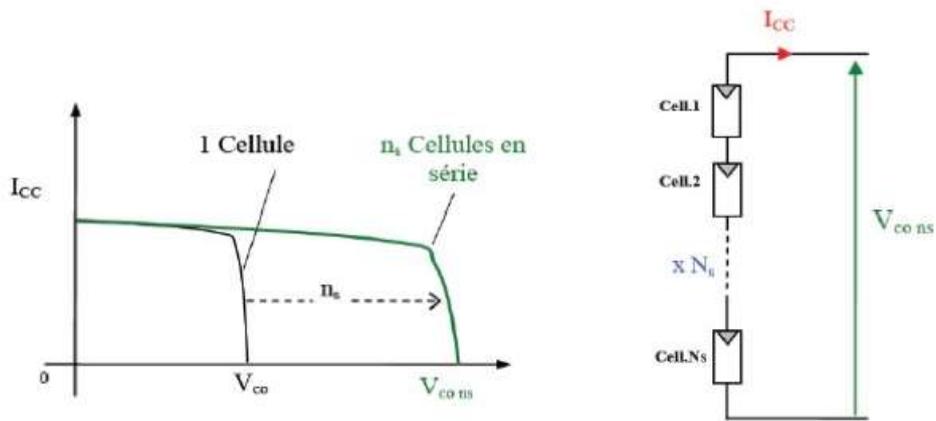


Figure I. 18: Association en série [12]

I.6 Conclusion

Les modules photovoltaïques utilisent les rayonnements directs du soleil pour produire de l'énergie électrique, grâce à l'effet photovoltaïque. L'efficacité du panneau photovoltaïque varie en fonction du matériau et de la méthode de fabrication, aussi bien qu'elle est affectée par le changement de l'éclairement et de la température d'ambiante

Chapitre II : Motopompe

II.1 Introduction

L'eau est un élément indispensable dans de nombreux domaines, notamment dans le domaine agricole. Habituellement, les terrains agricoles sont situés dans des endroits isolés ou difficiles d'accès, de sorte que les agriculteurs ont du mal à se relier au réseau électrique pour alimenter leurs pompes à eau. C'est pour cela, ils ont opté pour les systèmes de pompage solaire permettant un approvisionnement en eau à n'importe quel endroit même si aucune source d'énergie n'est présente sur le site.

Généralement, lorsqu'on veut alimenter un système à tout moment, jour ou nuit, ensoleillement ou non, avec un système photovoltaïque, on utilise des batteries pour le stockage d'énergie. Pour le pompage, c'est différent. En effet, il est plus facile et moins onéreux de stocker de l'eau que de l'énergie. De plus, on s'affranchit de la durée de vie de la batterie et de l'entretien. Dans ce cas, on pratique le pompage "au fil du soleil". La pompe est couplée directement au champ solaire photovoltaïque via un contrôleur qui va permettre, entre autres, d'optimiser le rendement journalier de la pompe. Le débit varie en fonction de la vitesse de rotation et donc de l'ensoleillement.

Le pompage au fil de soleil est plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie (on élimine le coût d'achats et le coût de renouvellement des batteries). Ce type de pompage est plus pratique car la pompe est alimentée par les panneaux photovoltaïques en présence du soleil pour remplir le réservoir. Ce dernier doit être construit à une hauteur et un volume adéquats. La hauteur au-dessus du sol doit être suffisante pour pouvoir utiliser l'eau stockée en temps voulu même la nuit (absence de soleil) par gravité. Le réservoir qui peut être construit localement (donc à un bas prix) doit avoir des dimensions s'étendant aux besoins pendant les jours nuageux. Dans ce chapitre, nous aborderons la partie liée au pompage et tout ce qui concerne la motopompe.

II.2 Le groupe motopompe

II.2.1 Définition

Un groupe motopompe est une combinaison d'un moteur électrique ou thermique avec une pompe hydraulique entraînée par ce dernier. Cet ensemble peut être fixe ou mobile (Par exemple, les pompes utilisées dans les camions de pompiers doivent être légères et transportables) [13].

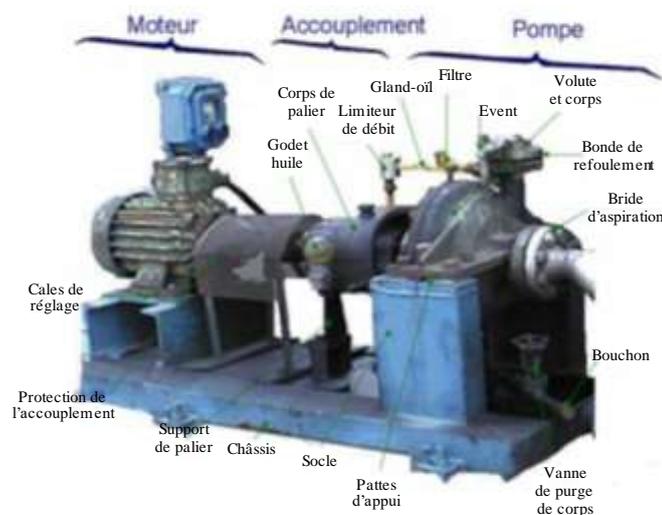


Figure II. 1: Groupe motopompe décrit [13]

II.2.2 La partie hydraulique

Le pompage est divisé en deux parties. La première partie contient un moteur qui est le créateur de couple (mouvement de rotation) et une deuxième partie qui est la pompe qui conduit le fluide dans une roue à aubes. Le fluide pompé est aspiré axialement dans la pompe puis accéléré radialement et enfin refoulé tangentiellement. En reliant entre les deux parties, on trouve l'arbre du moteur, le manchon d'accouplement et l'arbre de la pompe afin de transmettre le mouvement rotationnel du moteur à la pompe. Cette dernière se caractérise par le débit (m^3/h ou Litre/s) et la pression.

Les pompes sont utilisées pour véhiculer les fluides (eau, hydrocarbures, liquides plus ou moins visqueux produits chimiques ou toxiques), et les gaz pour les pompes rotatives à vide.

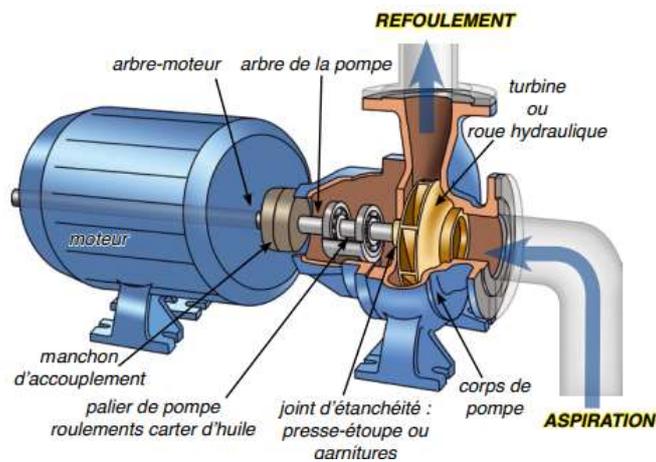


Figure II. 2: les différents éléments de la pompe [14]

Il existe principalement deux catégories dont on cite :

- Les pompes volumétriques
- Les turbopompes

II.2.2.1 Les pompes volumétriques

La pompe volumétrique se compose d'un corps parfaitement fermé, dont il y a un élément mobile ajusté son principe de fonctionnement est basé sur une création d'un mouvement cyclique pour refoulé le fluide pénétré dans le compartiment. On distingue généralement :

- Les pompes volumétriques rotatives
- Les pompes volumétriques alternatives



Figure II. 3: Pompe volumétrique [13]

Ce type de pompe ne peut pas être utilisé dans le domaine agricole car elle est utilisée pour le pompage à faible débit et à haute pression.

II.2.2.2 Les turbopompes

Les turbopompes sont les pompes les plus utilisées maintenant due à leurs caractéristiques. Elles possèdent les avantages suivants :

- Elles sont faciles à utiliser car elles sont entraînées par un moteur électrique ou à combustion interne.
- Elles occupent huit fois moins d'espace que les pompes volumétriques.
- Son faible volume et poids est avantageux dans les installations urbaines.
- Le coût de maintenance est inférieur à celui des autres.

Il existe trois types des turbopompes :

- Les pompes centrifuges.
- Les pompes hélices ou radiales.
- Les pompes hélico-centrifuges ou semi-axiales.

Les pompes centrifuges sont les plus fréquentes parmi ces trois et elles couvrent 80% des pompes utilisées. Elles sont très utilisées en irrigation maintenant. Elles utilisent le principe de l'élévation de pression par l'effet centrifuge. Due à la vitesse élevée de la roue (1500 à 3000 tr/min), l'eau est aspirée et piégée par les pales de la roue suivant un mouvement de rotation. Cela crée une pression pour que l'eau sorte vers le haut sous une pression et un débit donnés.

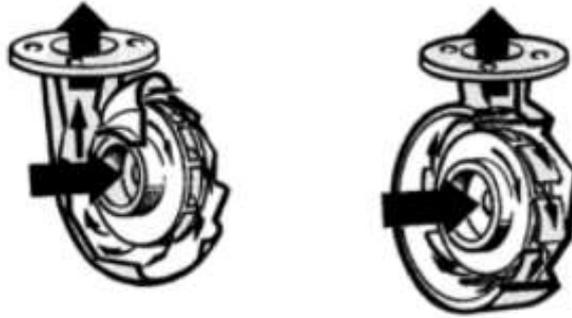


Figure II. 4: Roue et volute d'une pompe centrifuge [15]

La pompe centrifuge est la combinaison de plusieurs éléments :

- Une roue à aube qui fait un mouvement rotative sur son axe.
- Un stator situé au centre de distributeur des fluides.
- Un collecteur constitué à la sortie de la roue (appelé volute).
- Un diffuseur qui optimise le flux sortant et limiter les pertes d'énergie.
- Il faut choisir une pompe (diamètre et nombre de roue monté en serai) selon nos besoins afin d'atteindre la hauteur manométrique souhaitable.

On peut classifier les pompes selon :

- Le nombre de roue :
 - ✓ Une pompe monocellulaire : composée d'une seule roue, elle est utilisée pour les basses et moyennes pressions.
 - ✓ Une pompe multicellulaire : composée de plusieurs roues, elle est utilisée pour les moyennes et hautes pressions.
- L'accouplement :
 - ✓ Une pompe à accouplement directe : ou l'arbre de la pompe est commun avec celui du moteur par un accouplement rigide (monobloc) ou par un accouplement semi-élastique (à accouplement)
 - ✓ Une pompe à multiplicateur de vitesse : elles sont fabriquées pour les utilisations de secours ou pour être liée à la prise de force du tracteur.

La pompe centrifuge dépend des caractéristiques suivantes :

- Débit volumique (Q_v)
- Débit massique (Q_m)

Le débit volumique est la quantité de fluide circulant par une certaine vitesse V dans un tuyau d'une section S .

$$Q_v = V \times S \quad (\text{II. 1})$$

$$Q_v = C \times N \quad (\text{II. 2})$$

$$Q_m = Q_v \times \rho \quad (\text{II. 3})$$

- V : la vitesse (m/s)
- S : la section (m²)
- Q_v : Débit volumique (m³/s) ou (cm³/min) ou (m³/h)
- N : vitesse de rotation (tr/min)
- C : le cycle de la cylindrée (cm³/tr)
- Q_m : Le débit massique (kg/h)
- ρ : La masse volumique (kg/m³)

La pression est définie :

$$P = \frac{F}{S} \quad (\text{II. 4})$$

- p : la pression (bar)
- F : la force (daN)
- S : la section (cm²)

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

$$H = H_s + H_d \quad (\text{II. 5})$$

Avec

- H : Hauteur totale du pompage.
- H_s : hauteur statique ou la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel l'eau doit être pompée.
- H_d : somme des pertes linéaires et des pertes singulières. [16]

Les pertes linéaires sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante : [16]

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L V^2}{d 2g} = \lambda \frac{L 8 Q_v^2}{d^5 \pi g} \quad (\text{II. 6})$$

Avec

$$V = \frac{Q_v}{S} = \frac{4Q_v}{\pi d^2} \quad (\text{II. 7})$$

- λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.
- d : Diamètre de la tuyauterie (m).
- L : Longueur de la tuyauterie (m).
- g : Accélération de la pesanteur (m/s²).
- V : Vitesse moyenne du fluide (m/s).
- Q_v : Débit (m³/s)

Les pertes singulières (locales) sont dues aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante : [19]

$$\Delta H_s = \xi \frac{v^2}{2g} = \xi \frac{8Q_v^2}{d^4 \pi^2 g} \quad (\text{II. 8})$$

Avec

- ξ : Coefficient de pertes des charges locales.

La hauteur dynamique est la somme des pertes linéaires et des pertes singulières

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_s = \frac{8}{gd^4 \pi^2} \left(\lambda \frac{L}{d} + \xi \right) Q_v = k_{fr} Q_v^2 \quad (\text{II. 9})$$

Avec k_{fr} : constante de canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + k_{fr} Q_v^2 \quad (\text{II. 10})$$

On définit la hauteur manométrique H d'une pompe par l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse [17] :

$$HMT = H_a + H_r + P_c + P_r \quad (\text{II. 11})$$

Tels que:

- H_a : la hauteur manométrique d'aspiration
- H_r : la hauteur de refoulement
- P_c : les pertes de charges moyennes liées au débit ainsi qu'à la longueur et diamètre du tuyau
- P_r : la pression de refoulement souhaitée à l'ouverture du robinet

Dans le cas d'une pompe immergée ; on a :

$$HMT = \text{profondeur} + H_r + P_c + P_r \quad (\text{II. 12})$$

Il faut souligner que la pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur [16].

$$T_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II. 13})$$

Où

- K_r : le coefficient de proportionnalité $[\text{Nm} / (\text{rad. s}^{-1})^2]$
- Ω : la vitesse angulaire de la machine $[\text{rad. s}^{-1}]$

Avec :

$$K_r = \frac{P}{\Omega^2} \quad (\text{II. 14})$$

La pompe fournit de l'énergie au fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre.

La puissance utile hydraulique fournie par la pompe est exprimée par [16] :

$$P_H = \rho g Q_v H_m \quad (\text{II. 15})$$

Avec

- ρ : masse volumique, en kg/m^3 .
- Q_v : débit refoulé, en m^3/s .
- g : accélération de la pesanteur = $9,81 \text{ m/s}^2$,
- H_m : hauteur manométrique totale, en m.

La puissance absorbée sur l'arbre de la pompe est donnée par la formule

$$P_{ab} = \frac{P_H}{\eta_p} \quad (\text{II. 16})$$

- Avec η_p : Le rendement de la pompe

La puissance nécessaire mécanique délivrée par le moteur est supérieure à la puissance absorbée par la pompe, compte tenu des pertes d'accouplement entre le moteur et la pompe centrifuge.

II.2.3 La partie moteur

Un moteur est un appareil qui convertit toute énergie en énergie mécanique. Il en existe plusieurs types comme les moteurs à combustion, les moteurs chimiques sans combustion, les moteurs de terrain et dans notre cas nous nous intéressons plus aux moteurs électriques. [13]

II.2.3.1 Les moteurs à courant continu

Ils sont des dispositifs qui absorbent l'énergie électrique continue et la transforment en énergie mécanique. Ils sont faciles à piloter avec une correction de vitesse quasi instantanée. Ces moteurs nécessitent généralement l'utilisation de convertisseurs AC-DC puisque la majorité des installations sont alimentées en courant alternatif. Dans une chaîne de pompage solaire, l'énergie électrique issue des panneaux PV est continue, cela favorise l'utilisation des moteurs à courant continu et en plus le convertisseur à utiliser est DC-DC qui est plus facile à commander.

Ces moteurs ont beaucoup d'avantages tels que :

- Très utile dans les faibles puissances.
- Ils donnent des performances très élevées dans la variation de la vitesse.
- Ils permettent d'avoir une régulation précise de couple.
- La vitesse de rotation est adaptable à toutes les applications car ils ne sont pas liés à la fréquence du réseau.

En revanche ; ils présentent certains inconvénients :

- Ils sont moins robustes que les autres moteurs.
- Ils nécessitent beaucoup d'entretien

II.2.3.2 Les moteurs asynchrones

Le moteur asynchrone permet de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique, Il est le plus utilisé dans l'industrie, généralement le couplage d'un moteur asynchrone est triangle ou étoile selon le cahier de charge voulu. Il a une partie fixe qui comporte le bobinage triphasé qui s'appelle le stator, et une partie rotative qui est bobinée en cage d'écurie qui s'appelle le rotor. Le fonctionnement est basé sur la création d'un courant électrique induit dans chacun des barreaux de la cage d'écurie (conducteur) placé dans un champ magnétique tournant.



Figure II. 5: couplage du moteur

C'est un moteur sans balais qui présente certains avantages :

- Il est très robuste et très fiable
- Il est le moteur le moins cher dans le marché
- Il ne nécessite pas beaucoup d'entretien
- Il possède la puissance volumique et massique la plus faible

En revanche ; il présente certains inconvénients comme :

- Sa vitesse de rotation est liée à la fréquence du réseau
- Il nécessite un variateur de vitesse pour pouvoir tourner dans une large plage de variation

Il est utilisé dans plusieurs domaines d'application tels que :

- Traction électrique (Eurostar, TGV POS, TGV Duplex Dasye notamment)
- Propulsion des navires
- Propulsion électrique automobile (Tesla Roadster notamment)
- Machines-outils
- Ascenseurs
- Treuils
- Pompes
- Électroménager
- Chariots élévateurs

II.2.3.3 Les moteurs synchrones

La différence entre une machine synchrone et une machine asynchrone est qu'une machine synchrone n'a pas de glissement puisque la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Sa synchronisation est due à la localisation fixe des champs magnétiques générés par un aimant ou un circuit d'excitation par rapport au rotor, et est classé en deux catégories :

- Les machines synchrones à rotor bobiné :

- Les machines synchrones à aimants permanents

II.2.4 Fonctionnement d'un groupe motopompe

Le groupe motopompe contient deux parties principales à savoir la pompe (la pompe centrifuge pour notre cas) et le moteur. Le moteur crée une énergie mécanique à partir de l'énergie électrique qui a reçu. Cette énergie mécanique est transmise à la pompe via un arbre de transmission qui met cette dernière en rotation afin de générer une énergie cinétique sous l'effet de la force centrifuge (pomper le fluide). Finalement cette énergie est transformée en énergie de pression dans la volute. Ces transformations d'énergie sont munies des pertes. Afin de les minimiser en maximum, on utilise un diffuseur au bout de la roue (optimisateur de flux) [13].

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le dernier étage de la chaîne de pompage PV, où nous définissons de quoi il s'agit et de quel type d'unité de pompage il s'agit, ses pièces principales et son type. Nous avons également divisé le chapitre en trois parties, la première partie est constituée des pompes et de leur type, et nous nous sommes concentrés sur la pompe centrifuge qui nous intéresse le plus. Et puis nous avons abordé la partie responsable de la création d'énergie mécanique et enfin la relation entre ces deux parties principales et la façon dont elles s'influencent

Chapitre III :
Modélisation des
éléments de la chaîne de
pompage photovoltaïque
au fil du soleil

III.1 Introduction

La modélisation est une étape importante pour procéder à la simulation de tout système à base des équations mathématiques. Dans ce chapitre, nous allons modéliser le système de pompage photovoltaïque, en commençant par le générateur photovoltaïque, puis les convertisseurs statiques (DC-DC et DC-AC), et enfin le group Motopompe.

III.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

On trouve plusieurs modèles de la cellule solaire photovoltaïque dans la littérature à savoir le modèle à une seule diode, le modèle à deux diodes, le modèle de Bishop, etc. Nous nous intéressons dans notre étude au modèle le plus simple qui est le modèle à une seule diode. Le schéma électrique de la cellule est assimilé à un générateur de courant en parallèle avec une diode "D" et une résistance "R_p" comme il est représenté par la figure III.1. L'intensité "I_{ph}" du générateur de courant dépend de l'éclairement et de la température. Les pertes internes dues au passage du courant et interconnexion entre les cellules sont modélisés par une résistance série R_s.

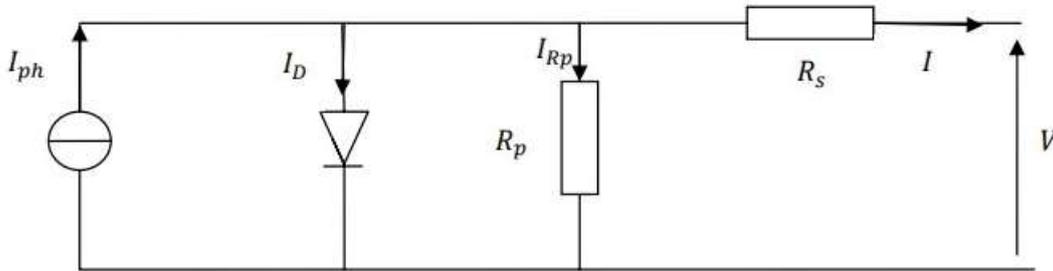


Figure III. 1: SCHEMA EQUIVALENT DE LA CELLULE SOLAIRE A UNE DIODE

Selon la loi des nœuds, on donne le courant "I" issue de la cellule par [18]:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (III. 1)$$

Tels que :

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (III. 2)$$

$$I_D = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left[\frac{q \cdot E_{go} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot k}\right] \quad (III. 3)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right)} - 1} \quad (III. 4)$$

$$I_{sh} = \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (III. 5)$$

Avec:

- I : Le courant fourni par la cellule [A].
- I_{ph} : Photo-courant [A].
- I_{sc} : Le courant de court-circuit de la cellule [A].
- I_D : courant de saturation
- I_{sh} : courant à travers la résistance shunt
- K_i : courant de court-circuit de cellule à 25°C et 1000W/m² (0.0032)

- T: Température de fonctionnement (K).
- T_n : Température nominale (K).
- G: Irradiation solaire W / m^2 (298)
- q: Charge électronique (C) (1.602×10^{-19} C).
- V_{oc} : Tension de circuit ouvert (V)
- n: le facteur d'idéalité de la diode (1.3)
- K: constante de Boltzmann (J / K) (1.381×10^{-23} J/k).
- E_{g0} : énergie de bande interdite du semi-conducteur (eV) (1.1eV)
- N_s : nombre de cellules connectées en série
- N_p : nombre de modules PV connectés en parallèle
- R_s : résistance série (Ω) ; (0.221)
- R_{sh} : résistance shunt (Ω) ; (415.405)
- V_t : tension thermique de la diode (V)

Le modèle Simulink de la cellule PV est représenté comme suit :

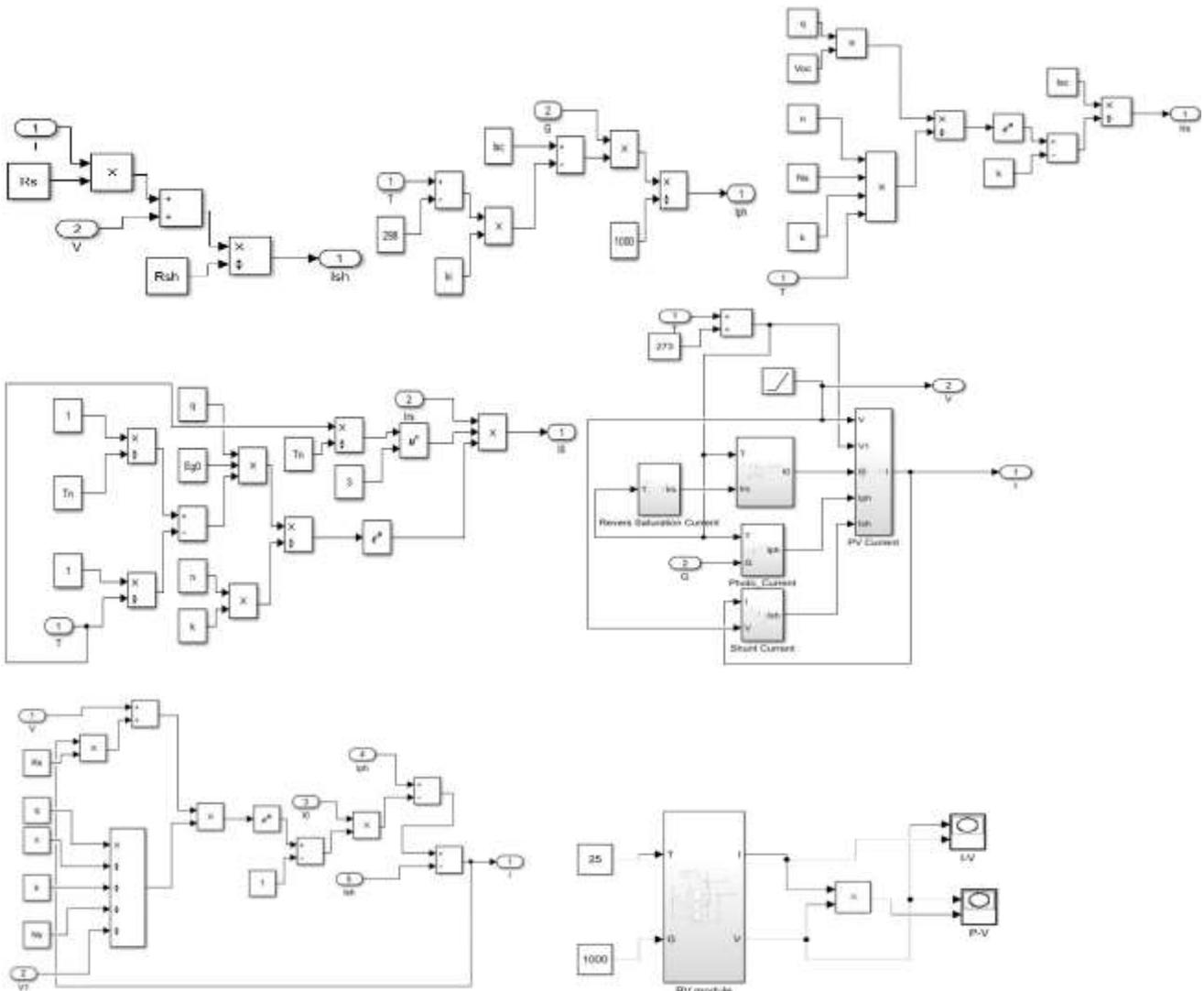


Figure III. 2: Modèle Simulink de la cellule PV

Afin de mieux représenter les caractéristiques électriques (I-V) et (P-V) d'un panneau solaire de 200Wc composé de 54 cellules PV, nous avons simulé sur la plateforme Matlab-Simulink le modèle représenté ci-dessus dont les paramètres sont donnés à l'annexe 1.

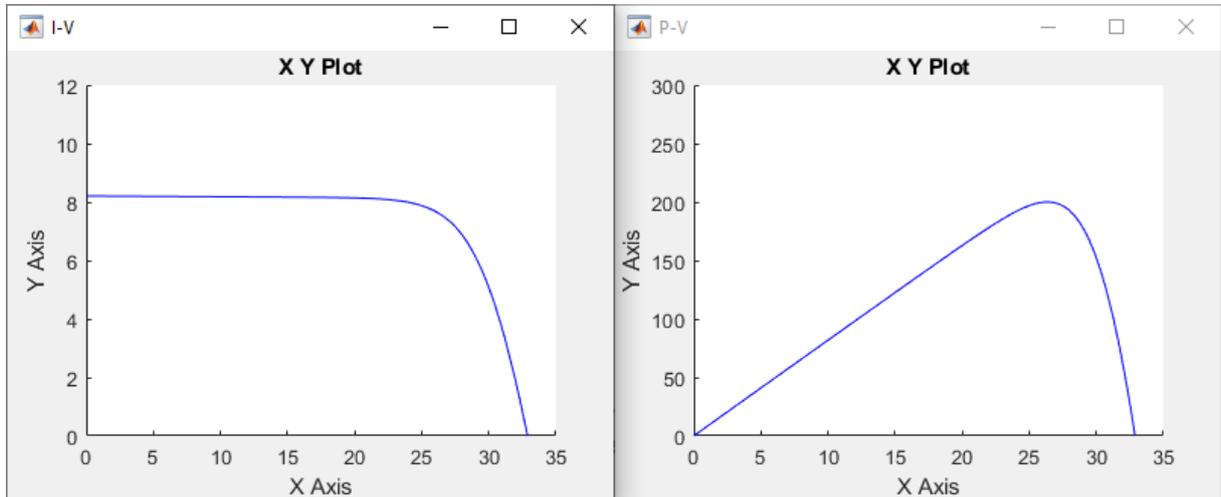


Figure III. 3: LES CARACTIRISTIQUES I-V ET P-V DU MODULE PV

Sous l'éclairement et la température standards, la caractéristique du panneau PV est similaire à celle de la cellule photovoltaïque qui est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- La tension générée par le panneau PV éclairée mais non raccordée à une charge (la tension à vide) $V_{co} = 32.9V$.
- Le courant généré par une cellule éclairée et court-circuitée sur elle-même (le courant court-circuit) $I_{cc} = 8.21A$.
- Le point de fonctionnement à puissance maximal que peut délivrer un panneau PV (en anglais : maximal power point). Ce point est caractérisé par un rendement optimal. C'est pour cette raison le courant et la tension à ce point sont dites les valeurs nominales et la puissance est dite la puissance crête (en anglais rated values).
 $I_N = 7.58A, V_N = 26.4V, P_{MPPT} = 200W$.

III.3 L'influence de la température et l'éclairement sur le module PV

L'effet photovoltaïque est fonction de deux grandeurs physiques à savoir l'éclairement et la température. Lorsque l'éclairement augmente, il en va de même pour le courant et la puissance produits par la cellule. Alors que lorsque la température de la cellule augmente, la tension de sortie diminue de manière significative, le courant augmente légèrement, de sorte que globalement la puissance de sortie diminue.

III.3.1 L'influence de l'éclairement

Pour étudier l'influence de l'éclairement sur le module PV, on doit fixer la température à 25°C et on change l'éclairement. D'après la figure III.4, on remarque que le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert et la puissance maximale sont directement liés à l'éclairement.

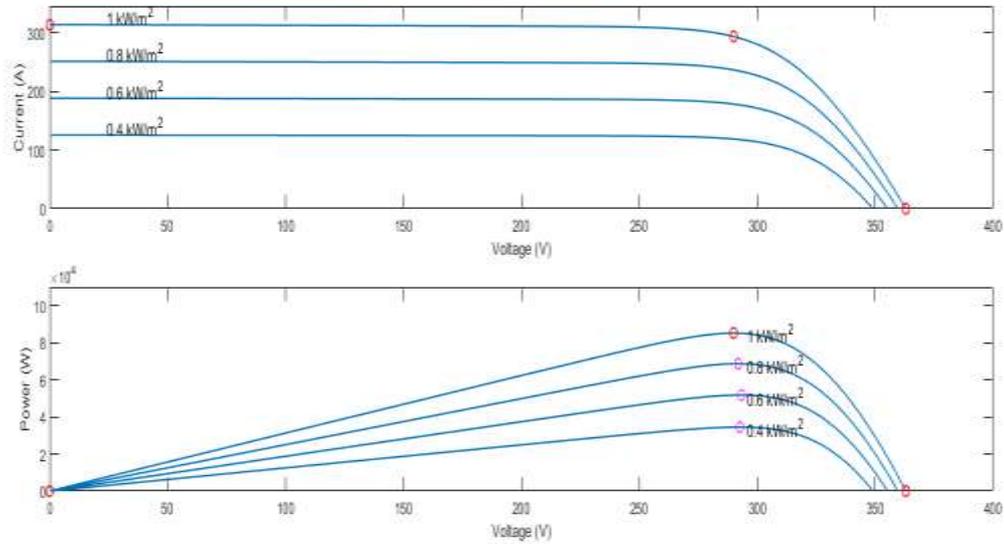


Figure III. 4: EFFET DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE P(V) ET I(V).

III.3.2 L'influence de température

Pour étudier l'influence de la température sur le module PV on fixe l'éclairement et on change la température. D'après la figure III.5, on remarque que la tension à circuit ouvert et la puissance maximale sont inversement liées à la température et le courant à court-circuit est très peu sensible aux variations des valeurs de la température.

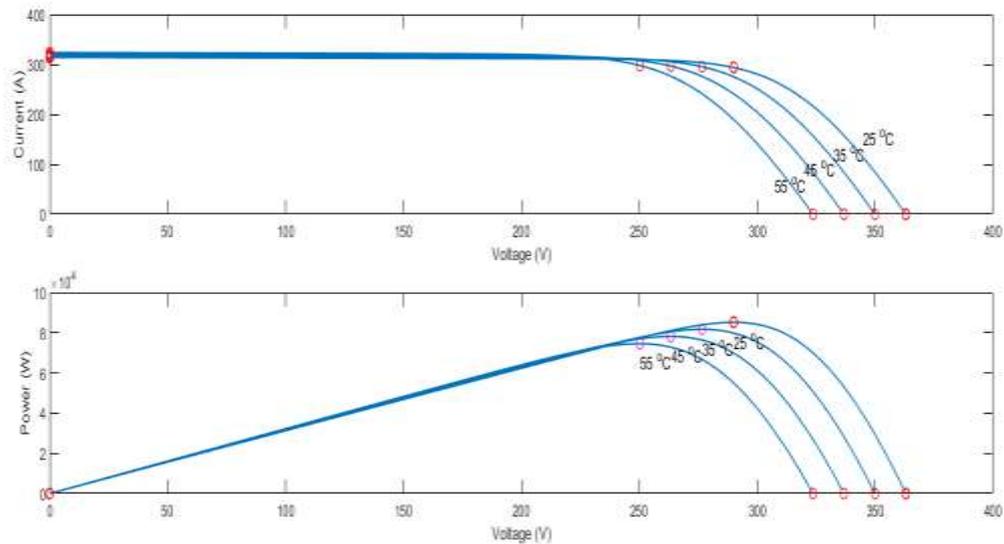


Figure III. 5: EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA CARACTERISTIQUE P(V) ET I(V).

III.4 Les convertisseurs de l'énergie PV

Dans le deuxième étage de la chaîne de conversion photovoltaïque, on fait l'adaptation de la puissance délivrée par les panneaux PV selon le type de la charge par des convertisseurs électroniques DC/DC ou

DC/AC. On trouve aussi des convertisseurs qui ont pour rôle de la recherche du point de fonctionnement optimal (MPPT). Il existe plusieurs structures des convertisseurs DC/DC dont les plus importants sont :

- Le convertisseur Buck,
- le convertisseur Boost
- le convertisseur Buck-Boost.

III.4.1 Le convertisseur Buck

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui transforme une tension continue à une autre tension continue inférieure à la tension d'entrée. Ce convertisseur est constitué d'un interrupteur (S) soit (transistor, transistor MOSFET, transistor IGBT ou ...etc.), une diode (D), une inductance (L) et un condensateur (C) comme le montre la figure suivante [19]:

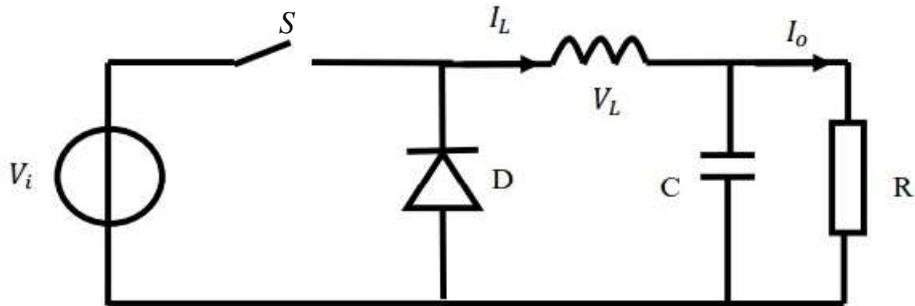


Figure III. 6: LE CIRCUIT D'HACHEUR BUCK [1].

Lorsque $t \in [0, \alpha T]$: l'interrupteur (S) est fermé et la diode est bloquée dans ce cas l'inductance se charge

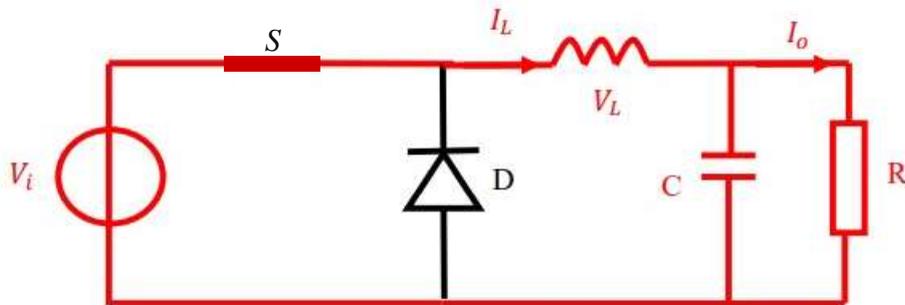


Figure III. 7: le hacheur Buck entre $[0, \alpha T]$ [1].

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = L \times \frac{dI_L}{dt} = V_i - V_o \quad (\text{III. 6})$$

$$I_c = I_L - I_o = I_L - \frac{V_o}{R} \quad (\text{III. 7})$$

L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (\text{III. 8})$$

Lorsque $t \in [\alpha T, T]$: l'interrupteur (S) est ouvert et la diode est passante dans cette période l'inductance se décharge à travers la diode.

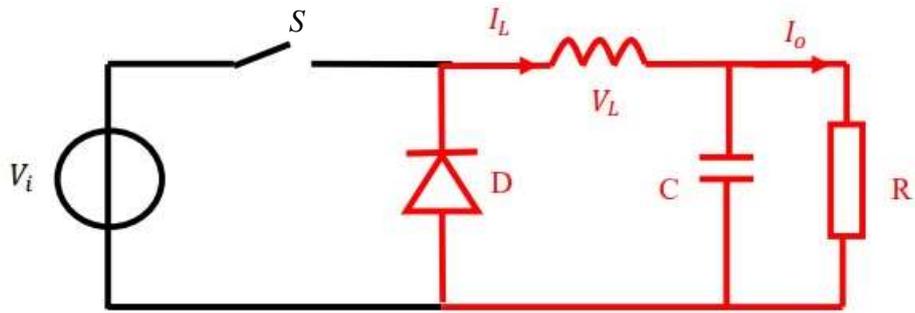


Figure III. 8: LE HACHEUR BUCK ENTRE $[\alpha T, T]$ [1].

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = -V_s \quad (\text{III. 9})$$

$$I_c = I_L - I_o = I_L - \frac{V_o}{R} \quad (\text{III. 10})$$

La valeur moyenne de la tension V_L est nulle donc :

$$\langle V_L \rangle = \int_0^T V_L dt = 0 \quad (\text{III. 11})$$

$$\langle V_L \rangle = \int_0^T V_L dt = \int_0^{\alpha T} V_L dt + \int_{\alpha T}^T V_L dt = (-V_o)\alpha T - V_o(T - \alpha T) = 0 \quad (\text{III. 12})$$

$$V_o(\alpha T + T - \alpha T) + \alpha T V_i = 0 \quad (\text{III. 13})$$

$$V_o = \alpha V_i \quad (\text{III. 14})$$

Alors

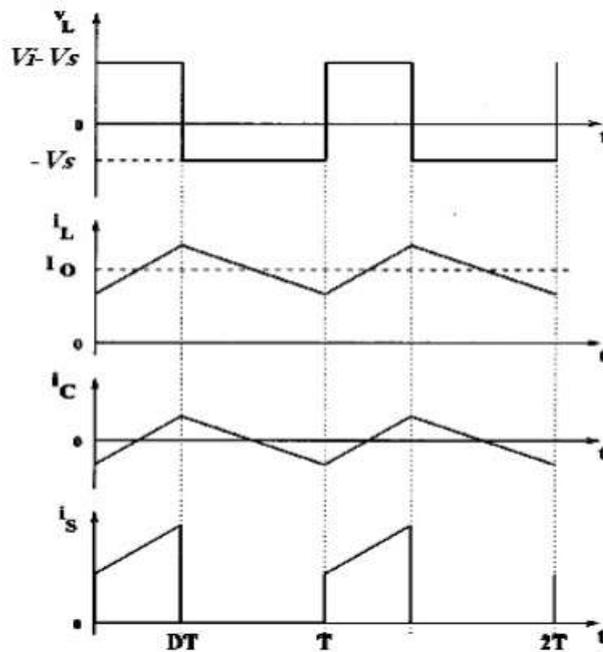


Figure III. 9: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BUCK [1].

III.4.2 Le convertisseur Boost

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui transforme une tension continue à une autre tension continue supérieure à la tension d'entrée. La structure de base de ce convertisseur est constitué par une inductance (L), un interrupteur (S) soit (transistor, transistor MOSFET, transistor IGBT ou ...etc.), une diode (D) et un condensateur (C) comme le montre la figure suivante [19] :

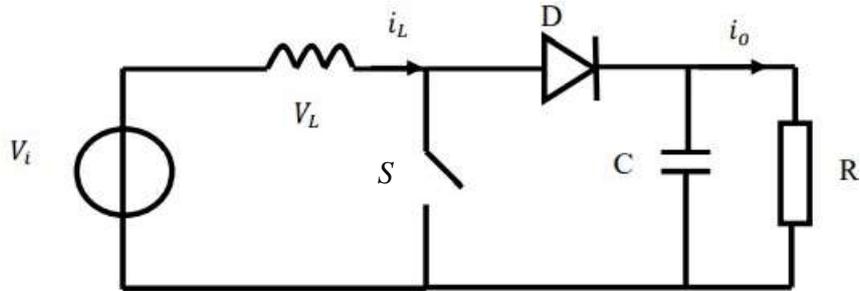


Figure III. 10: le circuit d'hacheur boost [1].

Lorsque $t \in [0, \alpha T]$: l'interrupteur (S) est fermé et la diode est bloquée dans ce cas, la bobine emmagasine une certaine énergie. Le parcours du courant est représenté en rouge par la figure suivante.

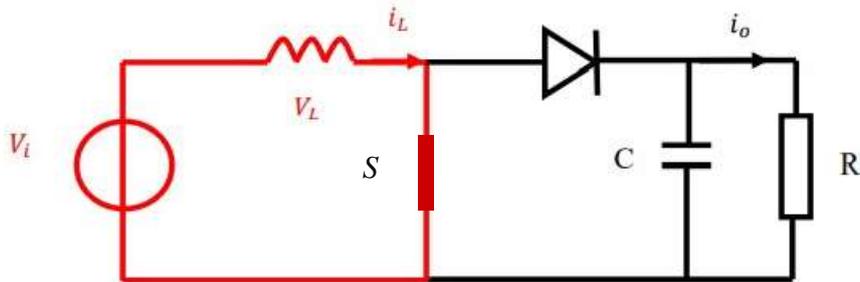


Figure III. 11: le hacheur Boost entre $[0, \alpha T]$ [1].

La tension aux bornes de l'inductance (L) est :

$$V_L = V_i \quad (\text{III. 15})$$

L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (\text{III. 16})$$

Lorsque $t \in [\alpha T, T]$: l'interrupteur (S) est ouvert et la diode est passante dans cette période la tension aux bornes de la bobine en plus de la tension de la source alimente la charge à travers la diode. Le parcours du courant est représenté en rouge par la figure suivante.

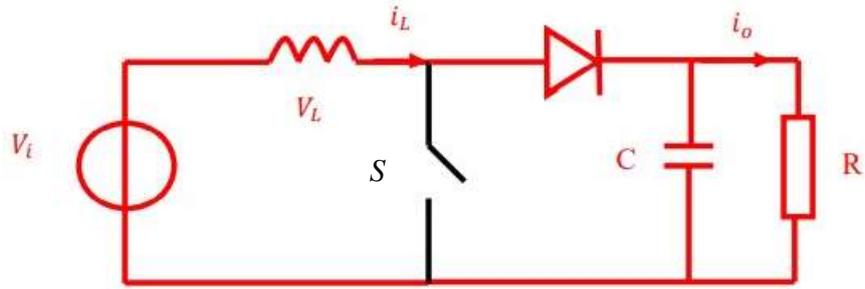


Figure III. 12: LE hacheur Boost entre $[\alpha T, T]$ [1].

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = V_i - V_o \quad (\text{III. 17})$$

L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (\text{III. 18})$$

Ce cycle de variation du courant de la bobine se reproduit chaque période "T", La valeur moyenne de la tension V_L est nulle donc :

$$\langle V_L \rangle = \int_0^T V_L dt = 0 \quad (\text{III. 19})$$

$$\langle V_L \rangle = \int_0^T V_L dt = \int_0^{\alpha T} V_L dt + \int_{\alpha T}^T V_L dt = V_i \alpha T + (-V_o)(T - \alpha T) = 0 \quad (\text{III. 20})$$

$$V_o(\alpha T - T) + (\alpha T - \alpha T + T)V_i = 0 \quad (\text{III. 21})$$

Alors

$$V_o = \frac{1}{1-\alpha} V_i \quad (\text{III. 22})$$

Avec :

$$I_o = (1 - \alpha) I_i \quad (\text{III. 23})$$

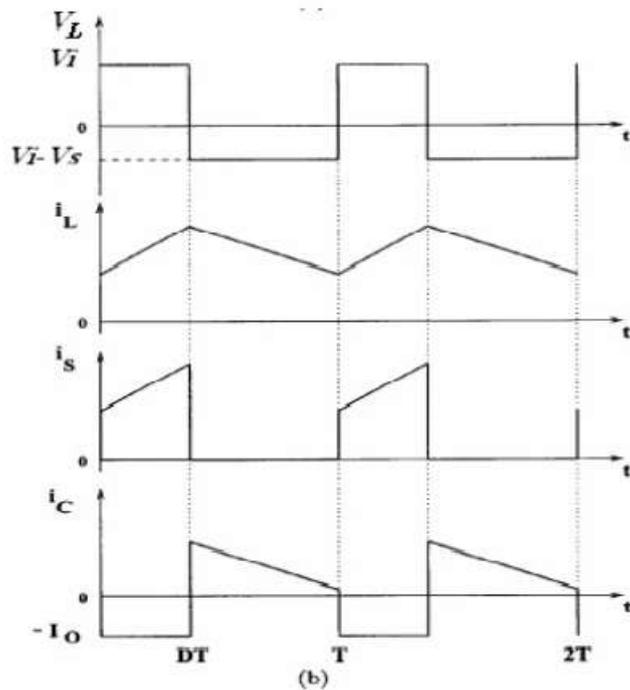


Figure III. 13: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BOOST [1].

III.4.3 Le convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost, est une alimentation à découpage qui transforme une tension continue à une autre tension continue soit supérieure ou inférieure à la tension d'entrée mais la tension de sortie est polarisée en inverse de la tension d'entrée. La structure de base de ce convertisseur est constitué d'un interrupteur (S) (soit transistor, transistor MOSFET, transistor IGBT ou ...etc.), une inductance (L), une diode (D) et un condensateur (C) comme le montre la figure suivante [19]:

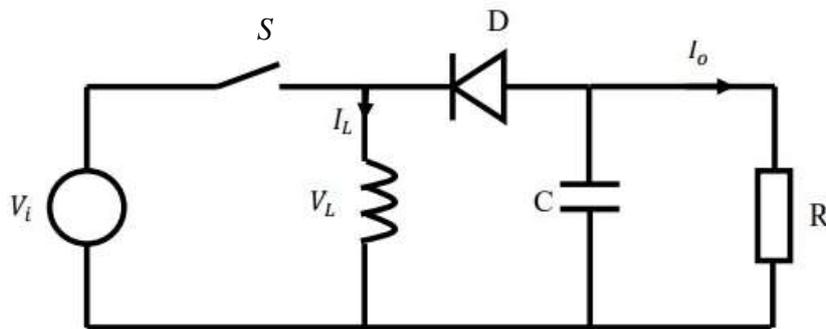


Figure III. 14: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BUCK-BOOST [1].

Lorsque $t \in [0, \alpha T]$: l'interrupteur (S) est fermé le courant traversant la bobine augmente progressivement et une certaine énergie sera stockée par la bobine.

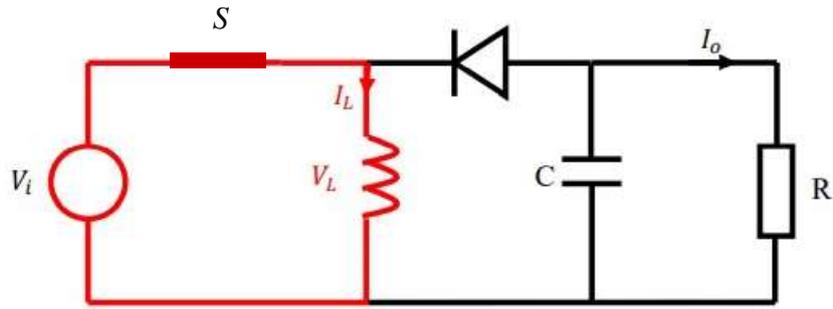


Figure III. 15: le hacheur Buck-Boost entre $[0, \alpha T]$ [1].

La tension aux bornes de l'inductance (L) est :

$$V_L = V_i \quad (\text{III. 24})$$

L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (\text{III. 25})$$

Lorsque $t \in [\alpha T, T]$: l'interrupteur (S) est ouvert, la bobine alimente la charge et le condensateur à travers la diode qui se met en état passante. Le parcours du courant est représenté en rouge par la figure suivante.

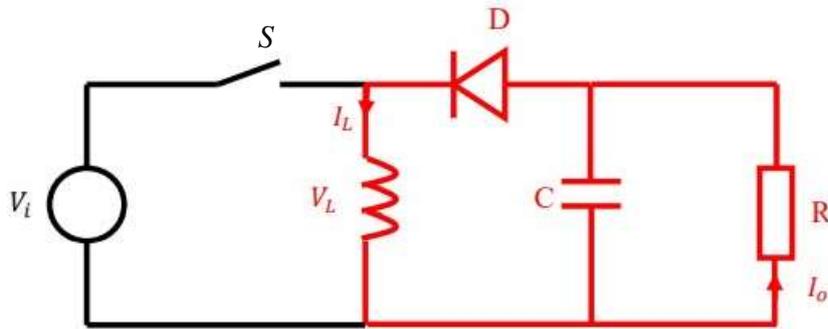


Figure III. 16: le hacheur Buck-Boost entre $[\alpha T, T]$ [1].

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = V_o \quad (\text{III. 26})$$

L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (\text{III. 27})$$

La valeur moyenne de la tension V_L est nulle donc :

$$\langle V_o \rangle = \int_0^T V_L dt = 0 \quad (\text{III. 28})$$

$$\langle V_o \rangle = \int_0^T V_L dt = \int_0^{\alpha T} V_L dt + \int_{\alpha T}^T V_L dt = V_i \alpha T + V_o (T - \alpha T) = 0 \quad (\text{III. 29})$$

Alors

$$V_o = \frac{\alpha}{\alpha-1} V_i \quad (\text{III. 30})$$

Avec :

$$I_o = \frac{\alpha-1}{\alpha} I_i \quad (\text{III. 31})$$

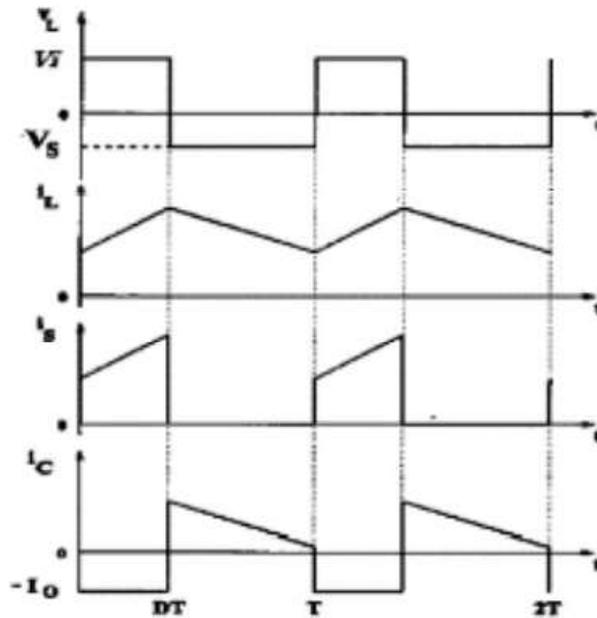


Figure III. 17: LES CARACTERISTIQUES DE LA TENSION ET DES COURANTS DANS LE CONVERTISSEUR BUCK-BOOST [1].

III.4.4 Simulation du comportement du convertisseur Buck

Afin de valider la modélisation mathématique du convertisseur DC/DC de type Buck, nous avons programmé sur la plateforme MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE (Figure III.18) pour ainsi simuler les grandeurs important d'entrée et de sortie de ce convertisseur.

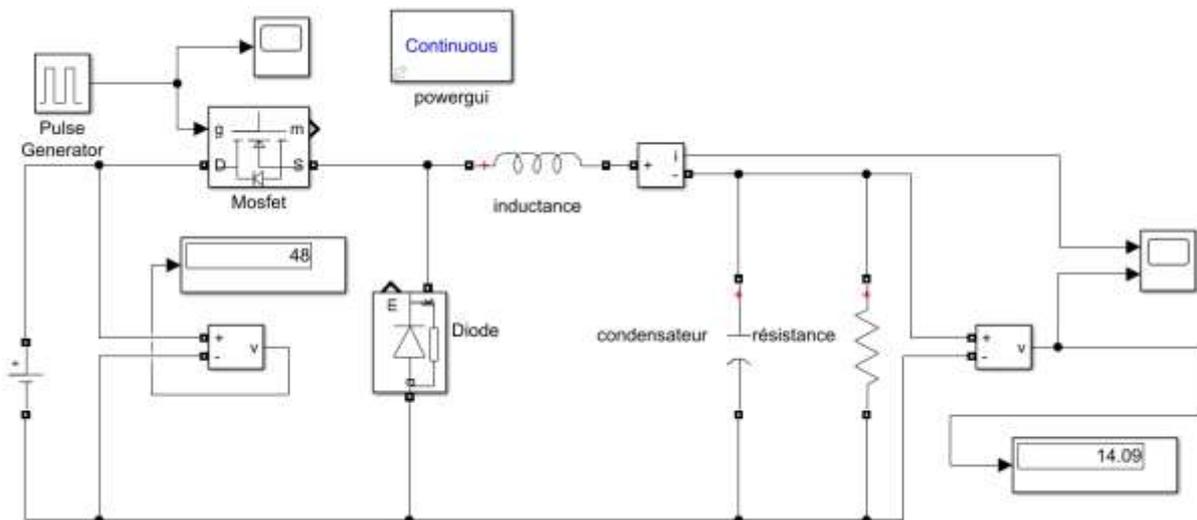


Figure III. 18: CIRCUIT D'UN CONVERTISSEUR ABAISSEUR SOUS MATLAB SIMULINK

Les paramètres utilisés sont trouvés par tâtonnement car nous n'avons pas un cahier de charge exigé pur procéder à un dimensionnement précis [1].

$$V_i = 48V$$

$$V_o = 14V$$

$$R = 10\Omega$$

$$f = 50000Hz$$

$$L = L_{\min} * 1.25 = 1.25 * \frac{(1-D)(R)}{2f} = 1.25 * \frac{(1-0.3)(10)}{2 * 50000} = 85.9340\mu H \quad (\text{III. 32})$$

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) f^2} = 125.01 \mu F \quad (\text{III. 33})$$

L'allure des grandeurs caractérisant le convertisseur Buck est représenté sur les deux figures suivantes :

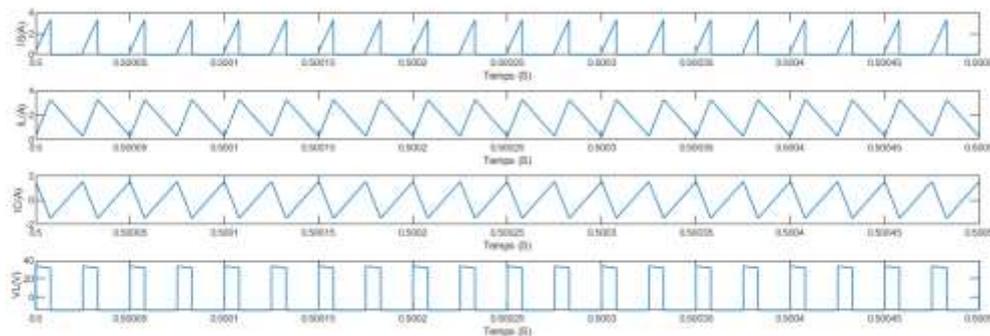


Figure III. 19: LA FORME D'ONDE DES TENSIONS ET COURANTS DU CONVERTISSEUR BUCK

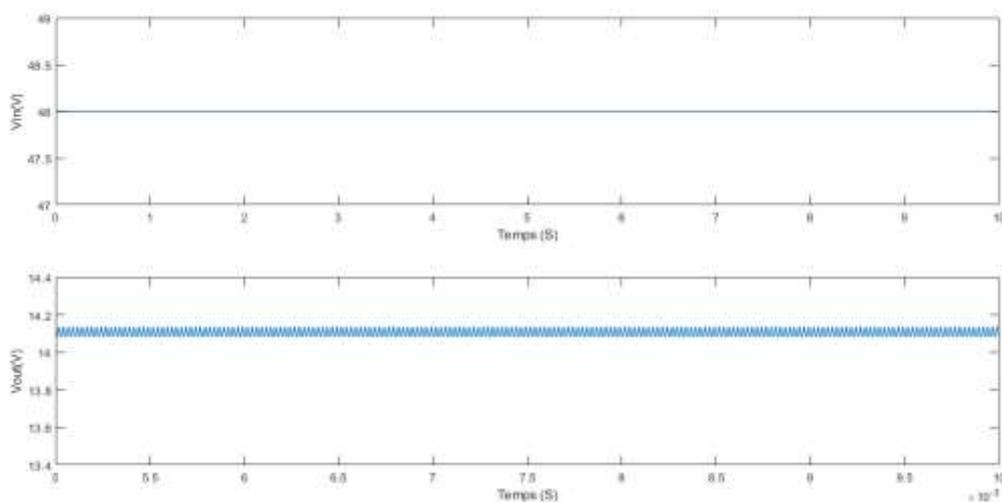


Figure III. 20: LA FORME D'ONDE TENSIONS D'ENTRE ET DE SORTIE DU CONVERTISSEUR BUCK

On remarque que la tension de sortie est réduite par rapport la tension d'entrée selon un rapport cyclique qui égale à 30%, avec des ondulations au signal de sortie due à l'effet de hachage.

III.5 L'Algorithme d'Extraction du MPP

La température du panneau et d'autres paramètres tels que l'ombre et la charge du système rendent la puissance fournie par le panneau variable et imprévisible. Le point à puissance maximale (MPP) varie si un des conditions météorologiques varie. A cet effet, nous utilisons donc un convertisseur d'électronique de puissance (Hacheur Buck) qui doit permettre le suivie du point à puissance maximale (MPPT) du panneau. Il s'agit d'intégrer un algorithme qui calcule pour n'importe quelles conditions de fonctionnement le rapport cyclique qui permet de fournir la tension optimale (V_{MPP}) et la puissance maximale (P_{MPP}).

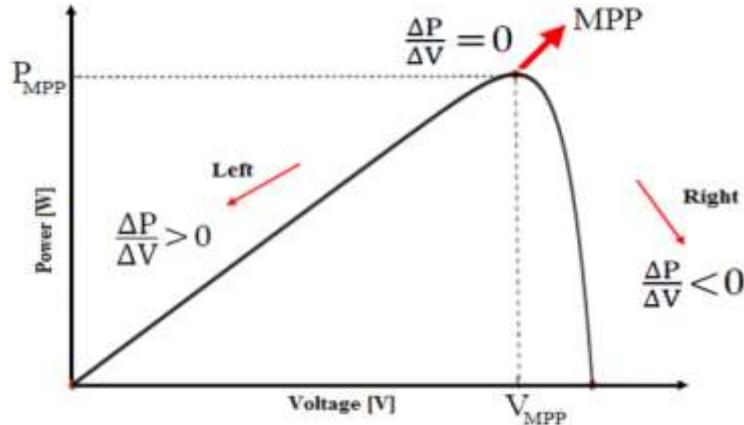


Figure III. 21: COMPORTEMENT DU PANNEAU SOLAIRE INDIQUANT MPP ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT [20]

En pratique, on peut trouver plusieurs algorithmes permettant la recherche du point MPPT dont on peut citer :

- Algorithme de Perturber et Observer (P&O).
- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction de la Tension V_{oc} .
- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{cc} .
- Algorithme de l'Incrémentation de la Conductance (INC).
- Algorithmes d'optimisation basés l'intelligence artificielles.

Vu sa simplicité, l'algorithme "P&O" (voir figure III.22) est le plus couramment utilisé dans le domaine des panneaux photovoltaïque, cet algorithme exige de perturber la tension de fonctionnement comme l'indique son nom et puis observer les conséquences de la perturbation pour revenir toujours à la puissance maximale. En effet, On interfère avec la tension du panneau photovoltaïque puis on calcule l'énergie produite par le panneau à l'instant "t" et on la compare à la puissance produite à l'instant "t - 1". Si la puissance augmente, le changement de rapport cyclique restera dans le même sens. Au contraire, si la puissance est réduite, nous devons inverser la direction du changement du rapport cyclique.

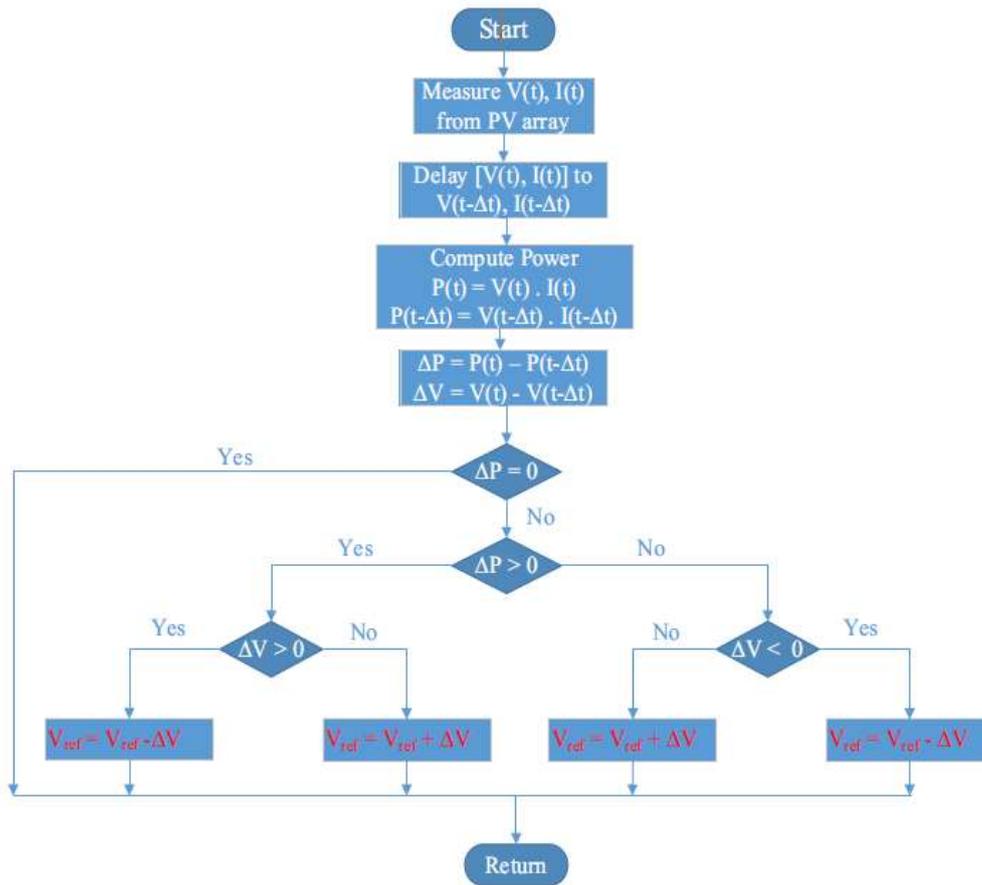


Figure III. 22: ORGANIGRAMME DU P&O [20]

III.6 L'onduleur triphasé

L'onduleur est un convertisseur statique qui transforme une tension continue vers une tension alternative. L'onduleur le plus simple qu'on peut utiliser en pratique est l'onduleur à commande "pleine onde". Dans ce type de commande, les interrupteurs d'un bras sont commandés alternativement ouverts et fermés pendant la moitié de la période. On suppose que la source est parfaite et fournit une tension continue E constante. Les commandes des deux autres bras sont décalées d'un tiers et deux tiers de la période successivement. Afin d'éviter le court-circuit du bus continu, la commande des trois interrupteurs inférieurs doit être complémentaire à la commande des trois interrupteurs supérieurs.

La figure III.23 montre les intervalles de conduction des trois interrupteurs supérieurs H_1 , H_2 et H_3 (les trois interrupteurs inférieurs sont bloqués) et les intervalles de conduction des trois interrupteurs inférieurs H'_1 , H'_2 et H'_3 (les trois interrupteurs supérieurs sont bloqués). Par cette méthode de commande, nous aboutissons à six états de conduction. Chaque état dure un sixième de la période. Par exemple durant le premier état de conduction, les interrupteurs supérieurs du bras 1 et 3 conduisent alors que l'interrupteur supérieur du bras 2 est bloqué (On rappelle que la commande des trois interrupteurs inférieurs doit être complémentaire à la commande des trois interrupteurs supérieurs). Les tensions composées s'obtiennent directement à partir de la loi de maille comme la montre la figure ci-dessous source spécifiée non valide :

$$U_{12} = E, \quad U_{23} = -E, \quad U_{31} = 0,$$

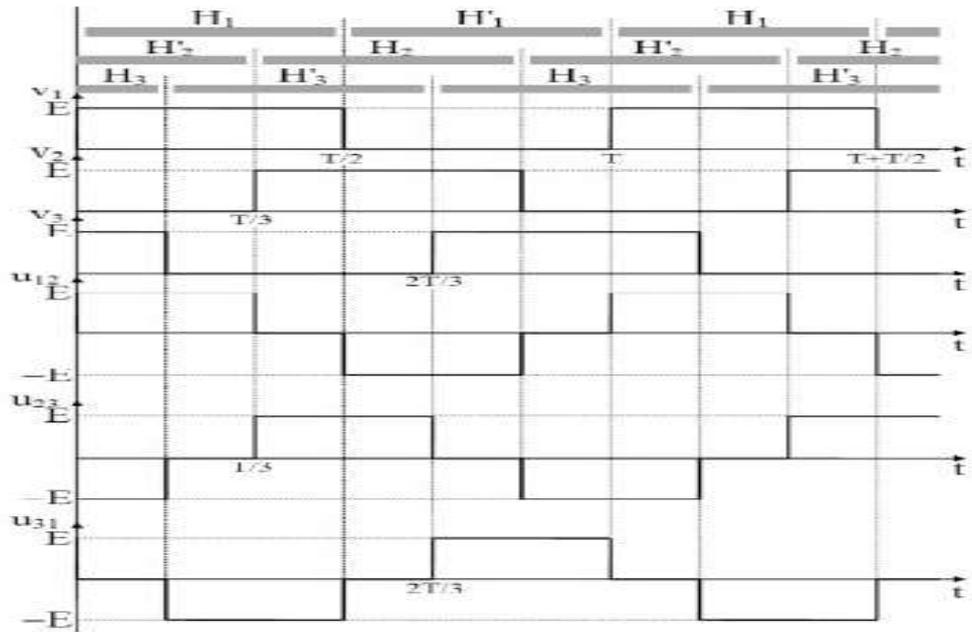


Figure III. 23: RESULTAT DE LA COMMANDE PLEINE ONDE DE L'ONDULEUR 3 PH Source.

Afin de montrer l'allure des tensions simples issues de tel onduleur, nous avons programmé sur la plateforme MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE (Figure III.24) pour ainsi simuler une tension composée et la tension de la phase 1.

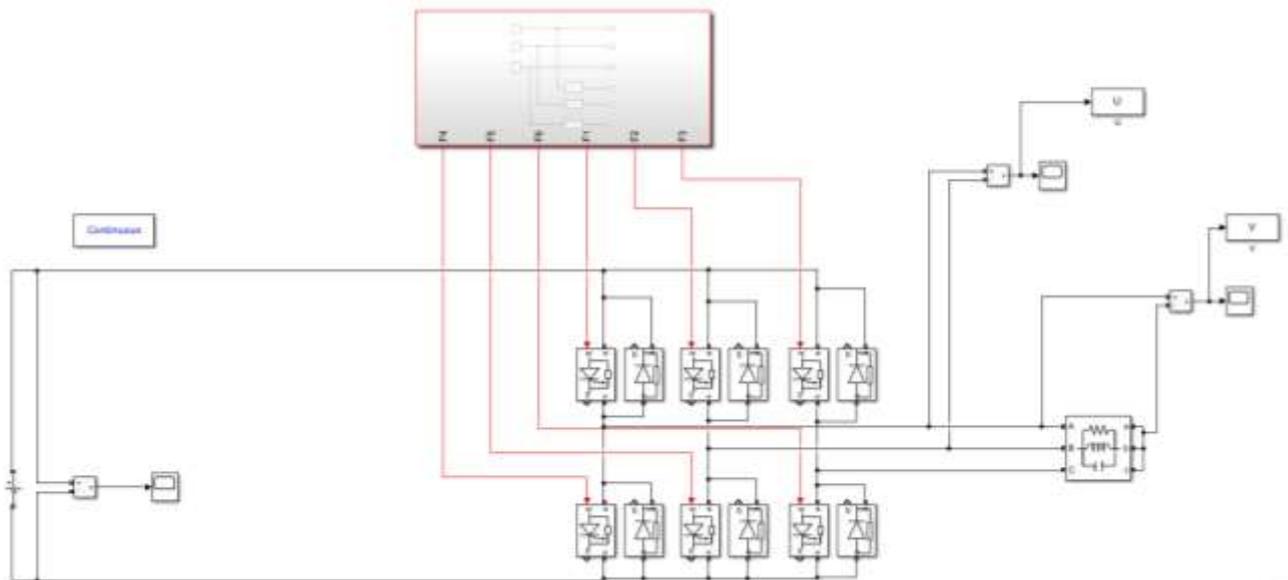


Figure III. 24: SIMULATION ONDULEUR TRIPHASE COMMANDE PLEINE ONDE MATLAB/SIM POWER SYSTEM

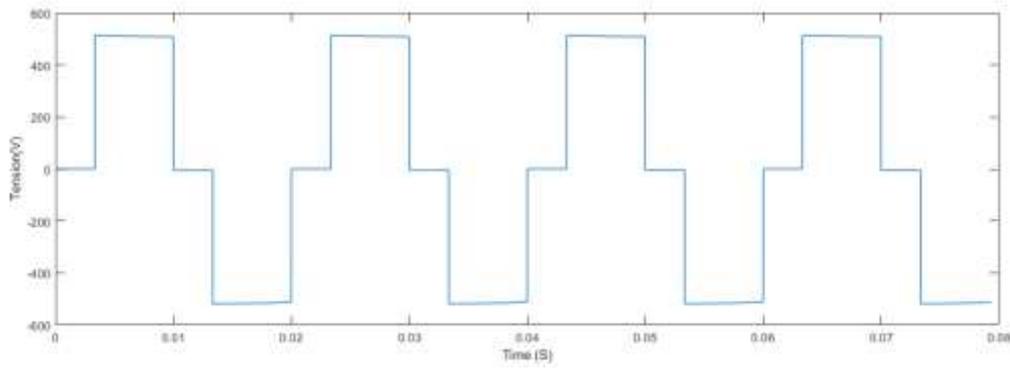


Figure III. 25: Tension composée U

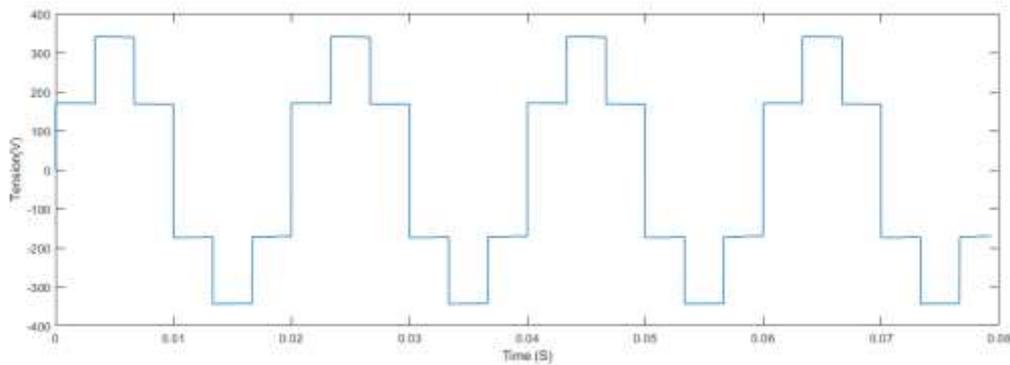


Figure III. 26: Tension simple V

Il est clair qu'on a abouti à des tensions composées conformément à ceux données à la figure III.23. Alors que les tensions simples peuvent être calculées pour les systèmes triphasés équilibrés par l'équation suivante :

$$\begin{cases} v_1 = \frac{2}{3}(2F_1 - F_2 - F_3)E \\ v_2 = \frac{2}{3}(2F_2 - F_1 - F_3)E \\ v_3 = \frac{2}{3}(2F_3 - F_1 - F_2)E \end{cases} \quad (\text{III. 34})$$

Avec

$F_1 = 1$ pendant l'intervalle H_1 et $F_1 = -1$ pendant l'intervalle H'_1

$F_2 = 1$ pendant l'intervalle H_2 et $F_2 = -1$ pendant l'intervalle H'_2

$F_3 = 1$ pendant l'intervalle H_3 et $F_3 = -1$ pendant l'intervalle H'_3

III.7 La pompe centrifuge

Pour une pompe centrifuge, ces performances (Q, H et P) sont connues à une vitesse Ω , les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q', H' et P') pour une vitesse Ω' en utilisant les relations suivantes :

- Débit :

$$Q' = Q \frac{\Omega'}{\Omega}$$

- La hauteur manométrique totale :

$$H' = H \left(\frac{\Omega'}{\Omega} \right)^2 \quad (\text{III. 35})$$

- La puissance du moteur :

$$P' = P \left(\frac{\Omega'}{\Omega} \right)^3 \quad (\text{III. 36})$$

- Le couple résistant :

$$T_r' = T_r \left(\frac{\Omega'}{\Omega} \right)^2 \quad (\text{III. 37})$$

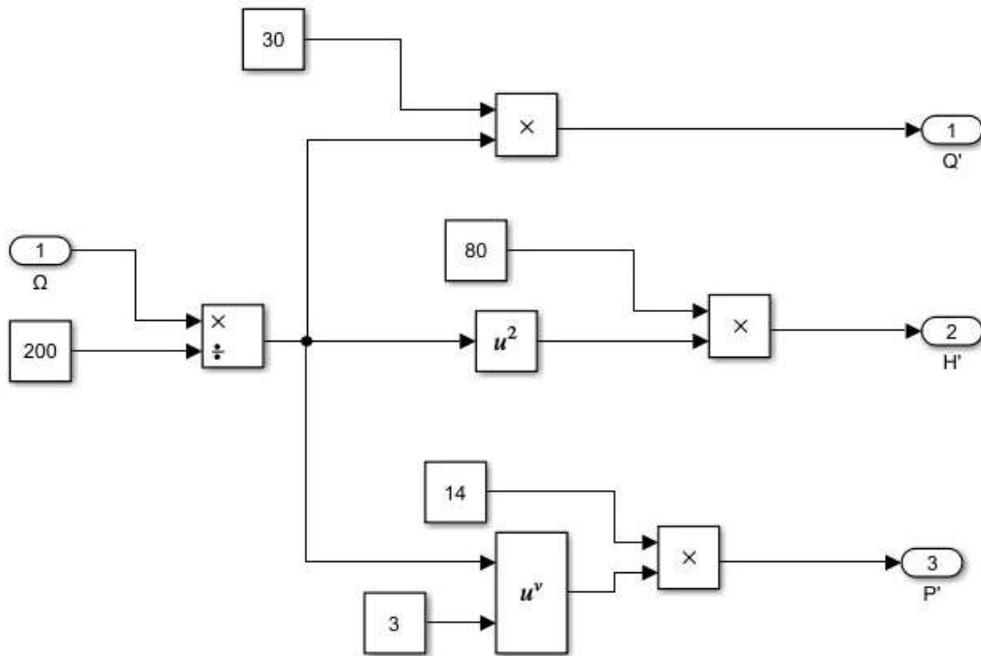


Figure III. 27: modele d'une pompe centrifuge

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le générateur photovoltaïque et nous avons simulé l'impact des facteurs naturels tels que l'éclairement et la température sur la tension et la puissance du panneau photovoltaïque. De plus, nous avons mis en exergue le principe de fonctionnement des convertisseurs qu'on peut trouver dans une chaîne de pompage photovoltaïque au fil du soleil.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Notre pays accorde des subventions énormes au secteur énergétique à tous les niveaux (subvention des prix d'électricité, gaz, carburants et dessalement d'eau de mer). Ces subventions restent le premier obstacle face au progrès et l'usage des énergies renouvelables en Algérie. Cependant, le pompage solaire en Algérie peut être une solution fascinante dans le domaine de l'irrigation ou de l'approvisionnement en eau potable dans les zones non raccordées au réseau électrique, où les coûts des équipements solaires photovoltaïques diminuent rapidement.

Le système de pompage au fil du soleil consiste à capter l'énergie solaire par les panneaux photovoltaïques qui alimente directement la motopompe par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance où l'énergie électrique n'as pas besoin d'être stockée. Ce système possède l'avantage d'avoir un coût très réduit car il ne comprend pas de batteries.

IV.2 Description et Dimensionnement de la chaine de pompage au fil du soleil

Cette étude de dimensionnement permet de savoir les caractéristiques nominales des composants nécessaires pour la réalisation du système de pompage solaire. Les étapes de dimensionnement sont organisées comme suit :

IV.2.1 Estimation des besoins en eau

L'estimation des besoins en eau constitue la base du dimensionnement de système de pompage solaire photovoltaïque. Pour la simulation nous prenons un exemple d'un réservoir d'eau de capacité de $200m^3$ et un débit de remplissage nominal $Q_n=0.25m^3/min$ et une hauteur manométrique totale $HMT =20m$. Ces calculs permettent de dimensionner le générateur photovoltaïque, le régulateur et le moteur envisageables à cette application.

IV.2.2 Puissance hydraulique

La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par :

$$P_h = \rho \times g \times HMT \times Q = 1000 \times 9.81 \times 20 \times 0.25/60 = \mathbf{817.5W} \quad (IV.1)$$

IV.2.3 Puissance mécanique

Si on néglige les pertes d'accouplement entre le moteur et la pompe centrifuge, donc la puissance mécanique délivrée par le moteur est égale à la puissance absorbée par la pompe. Le rendement de la pompe centrifuge est donné par le constructeur, pour pouvoir choisir le moteur d'entraînement nécessaire.

Le rendement est d'environ 50%. Donc, elle a besoin d'une puissance mécanique de :

$$P_{méc} = \frac{P_h}{\eta_{pompe}} = \frac{817.5}{0.50} = \mathbf{1635W} \quad (IV.2)$$

IV.2.4 Puissance électrique

Le rendement du moteur électrique est au voisinage de 80% . Ainsi, la puissance demandée par le moteur doit être :

$$P_{élec} = \frac{P_{méc}}{\eta_{moteur}} = \frac{1635}{0.80} = \mathbf{2043.8W} \quad (IV.3)$$

IV.2.5 La puissance du générateur photovoltaïque

Sachant les pertes de puissance du GPV+Régulateur attribuables à la température et à la poussière de notre endroit et pour pouvoir faire fonctionner notre chaîne de pompage même à éclairage réduit, nous supposons que la puissance du moteur électrique représente la moitié de la puissance nominale des modules.

La puissance électrique fournie par le générateur photovoltaïque est donnée par l'expression suivante :

$$P_{GPV} = \frac{P_{elec}}{0.5} = \frac{2043.8}{0.5} = \mathbf{4087.6W} \quad (IV.4)$$

IV.2.6 Nombre de panneaux

On a choisi des panneaux solaires ayant une puissance nominale de presque 300W.

$$\frac{P_{GPV}}{P_s} = \frac{4087.6}{300} = 13.6 \leq N = \mathbf{14} \quad (IV.5)$$

IV.2.7 Durée de remplissage du réservoir

L'énergie égale la quantité de la puissance à consommer par le système de pompage de l'eau nécessaire pour remplir le réservoir d'eau de capacité de $200m^3$.

La durée de pompage moyenne est :

$$T_{pompage} = \frac{V}{Q_n} = \frac{200}{0.25} = 800min = \mathbf{13 heures et 20 min} \quad (IV.6)$$

La durée d'ensoleillement exprimée en heures (dépend des différentes saisons) est estimée à 5 heures par jour en moyenne. Donc la durée de remplissage du réservoir s'étend à presque trois jours.

IV.3 Résultats de la Simulation de la chaîne de pompage au fil du soleil

Dans la chaîne de pompage photovoltaïque on a choisi le modèle réel de panneau PV Jinko Solar JKM300M-72 qui génère une puissance crête de 300.2W comme son nom l'indique. Nous utilisons donc 14 modules en série afin d'augmenter la tension du bus continu. Les autres caractéristiques du panneau sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau IV. 1: les caractéristiques du panneau PV

Puissance maximale (W)	300.2
Tension en circuit ouvert V_{CO} (V)	46.4
Courant de court-circuit I_{CC} (A)	8.67
Tension au point de puissance maximale V_{max} (V)	38
Cellules par module (N cellule)	72
Courant au point de puissance maximum I_{max} (A)	7.9

Nous avons utilisé aussi la commande MPPT P&O à partir d'un programme approprié pour contrôler le convertisseur abaisseur et pour obtenir en permanence la puissance optimale (MPPT) malgré les variations

des conditions climatiques. Afin de mieux tester les performances du moteur, nous utilisons deux cas de motopompes, une est à base de MCC et une autre à base de MS. Dans le deuxième cas, nous devons introduire en plus un onduleur triphasé à commande V/f constant.

Les deux moteurs choisis sont de puissances utiles nominales de 1500W. Les caractéristiques du MCC et MS dans le tableau suivant :

Tableau IV. 2: les caractéristiques des moteurs utilisés

	MCC	MS
Puissance nominale (kW)	1.5	1.5
Tension nominale (V)	240VDC	220VAC
Courant d'induit nominal (A)	9.6A	3.5A
Vitesse de rotation nominale (tr/min)	1500 tr/mn	1500 tr/mn
Couple nominale (N.m)	10Nm	10Nm

IV.3.1 Simulation de la chaîne de pompage à base du MCC

En vue de simuler le fonctionnement de la chaîne de pompage photovoltaïque globale à base du MCC dans différentes conditions météorologiques, nous avons implanté sur la plateforme MATLAB/Simulink/Simscape un programme comportant deux circuits. Le premier est le circuit de puissance regroupant les générateurs PV, le convertisseur de puissance et la machine à courant continu (Figure IV.1). Tous ces composants sont pris de la bibliothèque de Matlab/Simscape pour donner un caractère plus pratique à notre étude.

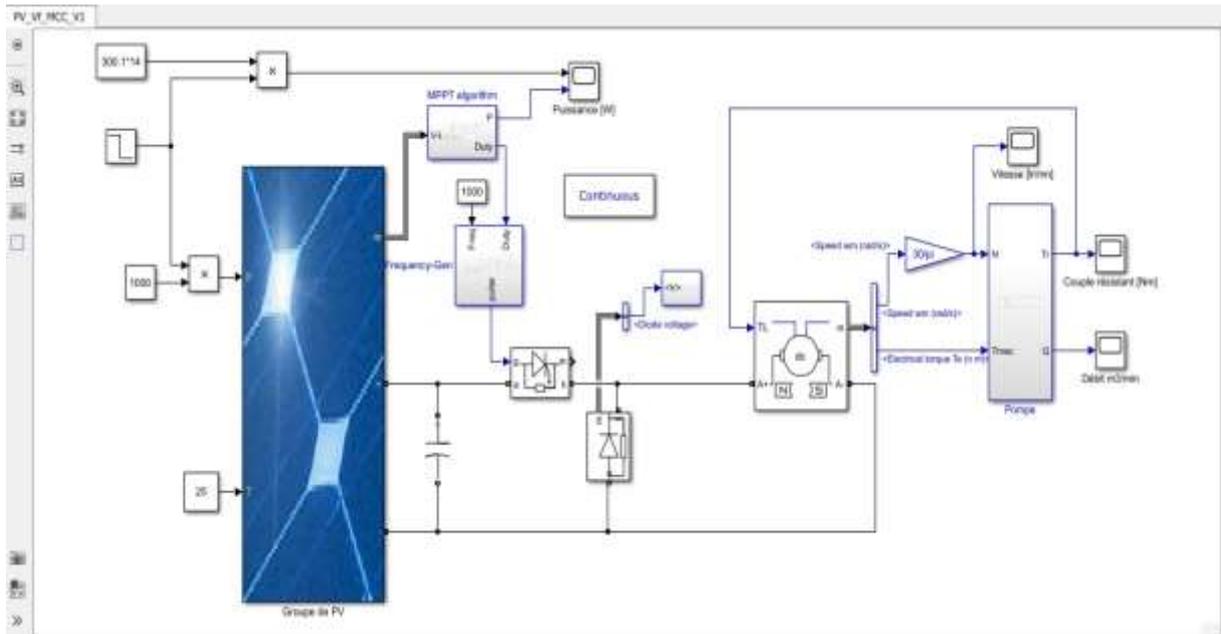


Figure IV. 1: schéma de pompage photovoltaïque global à base de MCC

Ce modèle a été simulé pour une durée de 4s lors d'un changement de l'ensoleillement de $G = 1000W/m^2$ à $G = 700W/m^2$ l'instant $t = 2s$ alors que la température est gardée constante à sa valeur standard ($T = 25^\circ C$).

L'allure du débit d'eau est l'image de la vitesse de rotation (figure IV.2 et figure IV.3 successivement). Il est clair que lorsque l'ensoleillement est de $1000W/m^2$, la vitesse et le débit tendent à presque ces valeurs nominales. Alors que lorsque l'ensoleillement est réduit à $700W/m^2$, la vitesse et le débit convergent à des valeurs réduites. Ceci est logique car la puissance délivrée par les panneaux dépend principalement par les conditions météorologiques.

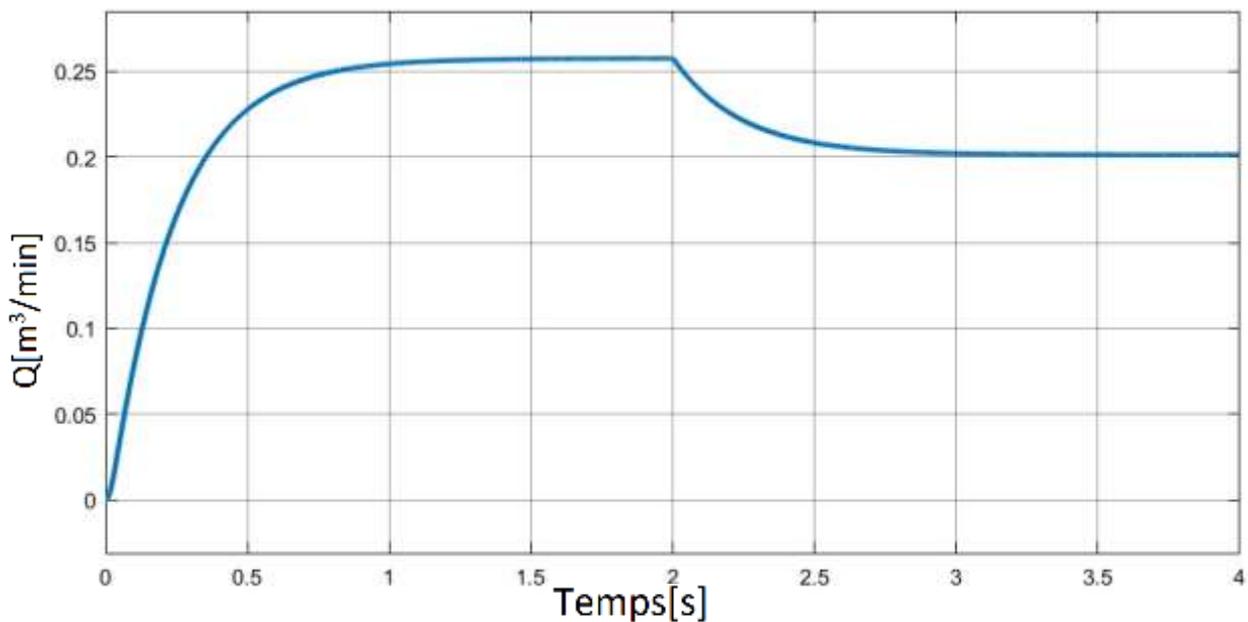


Figure IV. 2: Le débit de l'eau pompé en cas de MCC.

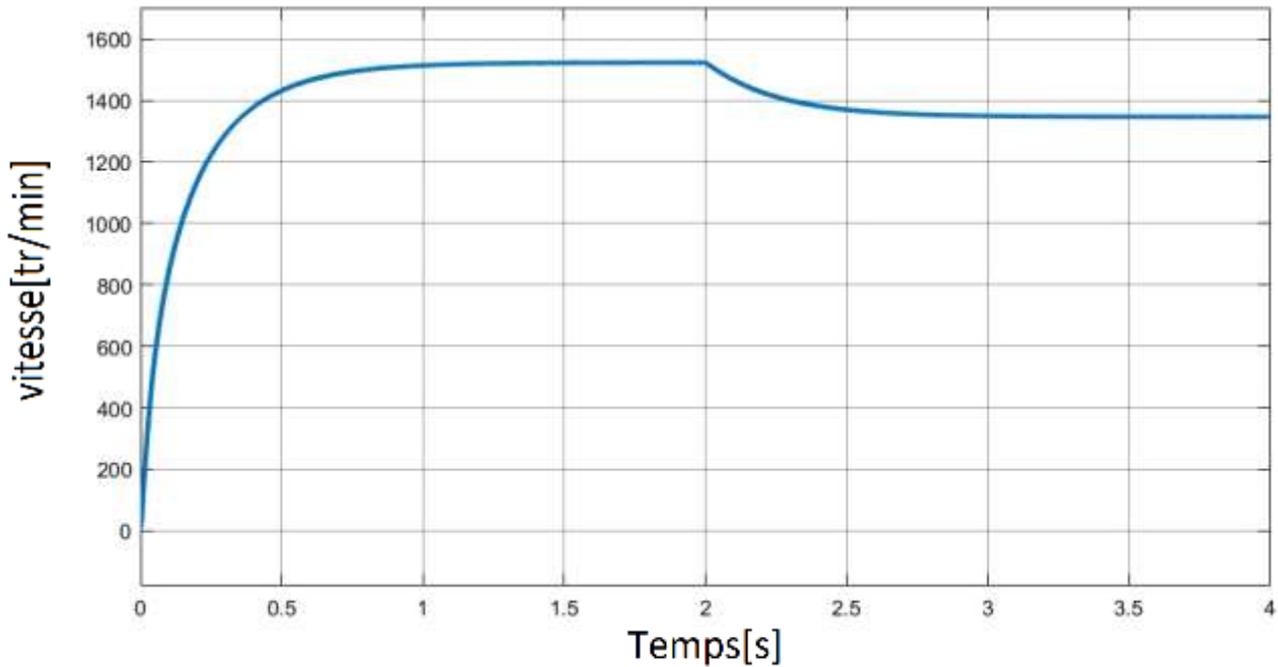


Figure IV. 3: Vitesse de rotation du MCC

Dans la figure suivante, nous avons simulé l'allure du couple résistant de la pompe centrifuge appliqué sur le moteur à courant continu. Le couple est entaché d'harmoniques dues à la forme de la tension aux bornes du moteur qui est hachée à une fréquence élevée. Le couple est une grandeur ayant une dynamique plus rapide que la vitesse donc il est plus affecté par les harmoniques.

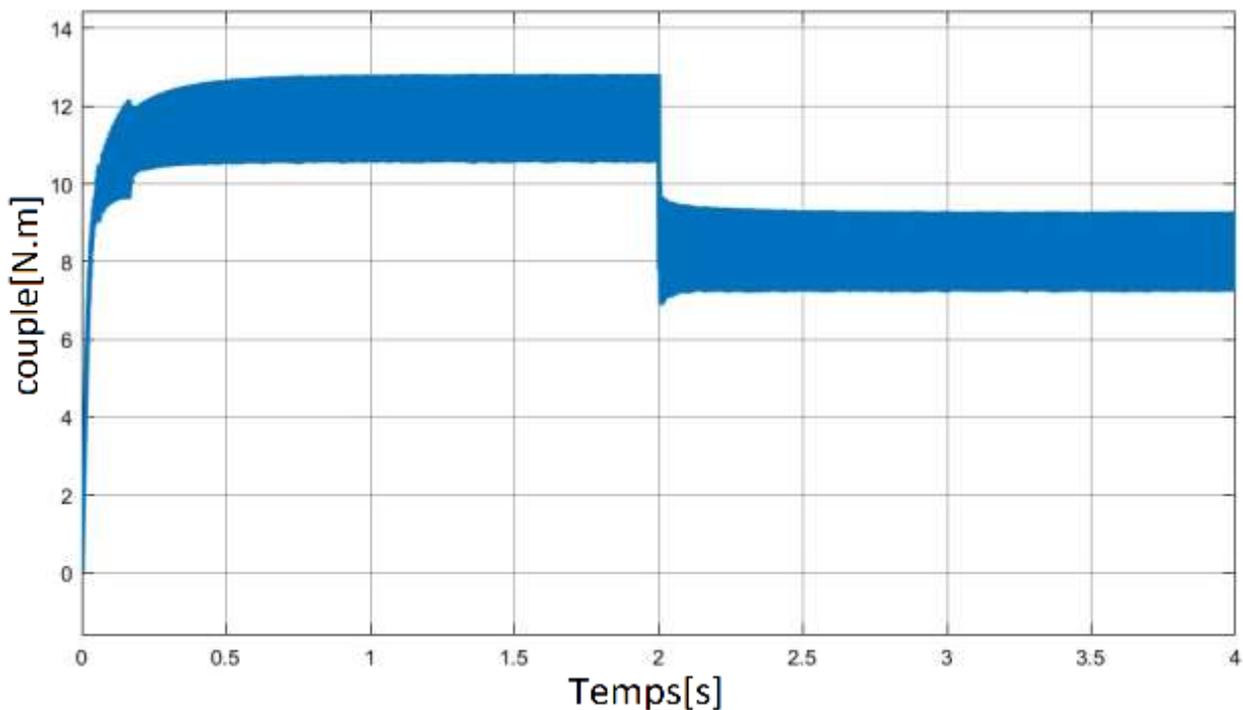


Figure IV. 4: Le couple résistant de la pompe appliqué sur le moteur à courant continu

Dans la figure IV.5, nous avons simulé l'allure de la puissance issue des panneaux PV (en bleu) et la puissance maximale que peuvent délivrer ces panneaux (en rouge). Il est clair que lorsque l'ensoleillement est de $1000W/m^2$, la puissance issue des panneaux PV part de zéro et s'établit à presque la MPPT

($14 \times 300W = 4200W$). Alors que lorsque l'ensoleillement est réduit à $700W/m^2$, la puissance issue des panneaux PV se réduit à presque 70% de sa valeur précédente (2940W). Ceci montre que notre commande MPPT (P&O) fonctionne de manière très satisfaisante.

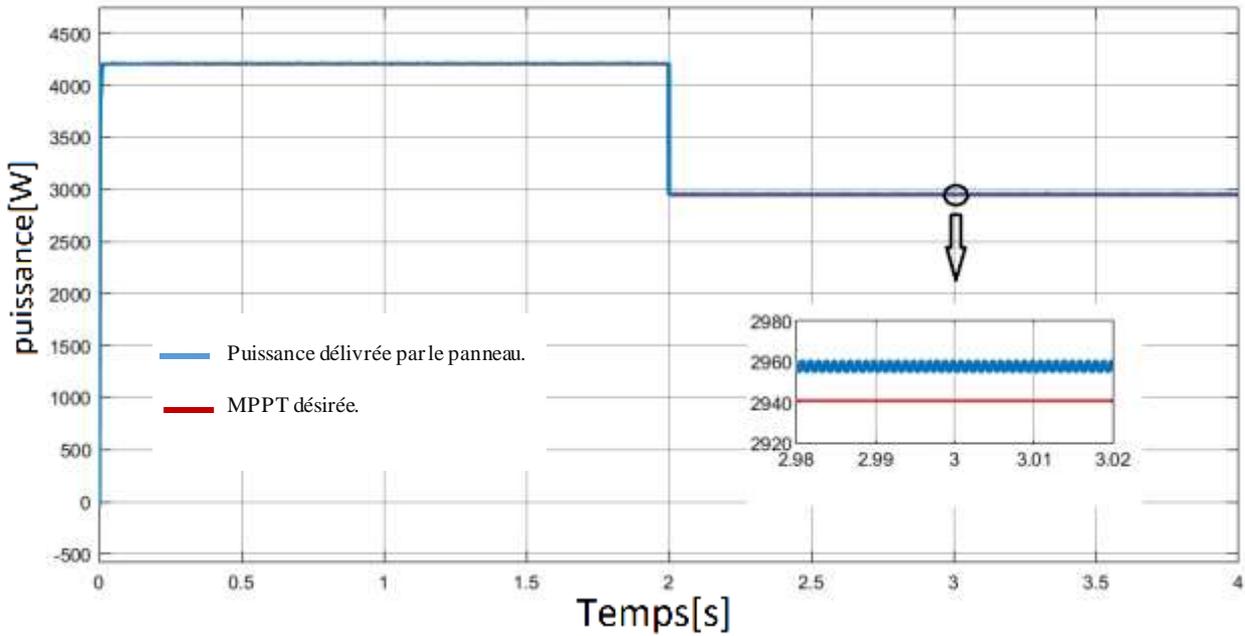


Figure IV. 5: La puissance issue des Générateurs PV est la MPPT en cas de MCC.

IV.3.2 Simulation de la chaîne de pompage à base du MS

En vue de simuler le fonctionnement de la chaîne de pompage photovoltaïque globale à base du moteur synchrone dans différentes conditions météorologiques, nous avons implanté sur la plateforme MATLAB/Simulink/Simscape le modèle donné par la figure IV.6. Tous les composants sont pris de la bibliothèque de Matlab pour donner un caractère plus pratique à notre étude. Le système de pompage dans ce cas est doté d'un onduleur commandé par la stratégie sinus-triangle et la commande V/f constant.

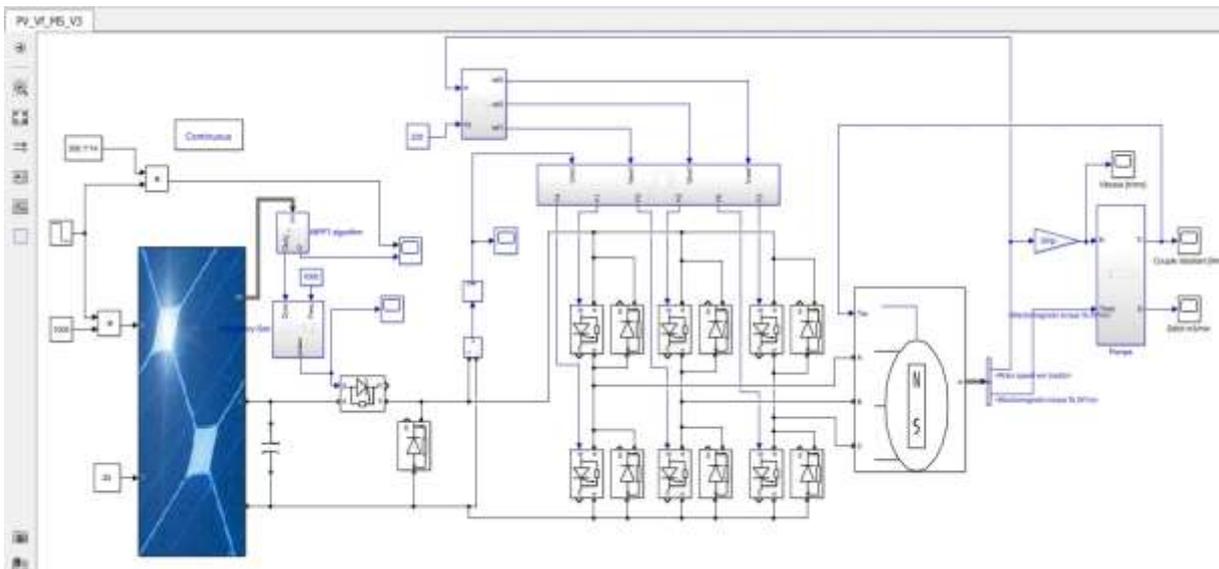


Figure IV. 6: schéma de pompage photovoltaïque global à base de MS.

Ce modèle a été simulé pour une durée de 4s lors d'un changement de l'ensoleillement de $G = 1000W/m^2$ à $G = 700W/m^2$ l'instant $t = 2s$ alors que la température est gardée constante à sa valeur standard ($T = 25^\circ C$).

L'allure du débit d'eau est l'image de la vitesse de rotation (figure IV.7 et figure IV.8 successivement). Il est clair que lorsque l'ensoleillement est de $1000W/m^2$, la vitesse et le débit s'établissent à presque ces valeurs nominales. Alors que lorsque l'ensoleillement est réduit à $700W/m^2$, la vitesse et le débit s'établissent à des valeurs réduites. Cette réduction est moins importante que celle enregistrée en cas du MCC. Cependant le MS exige la présence de l'onduleur ce qui a provoqué des pertes et ainsi une vitesse et un débit moins important par rapport au cas du MCC pour un ensoleillement de $1000W/m^2$.

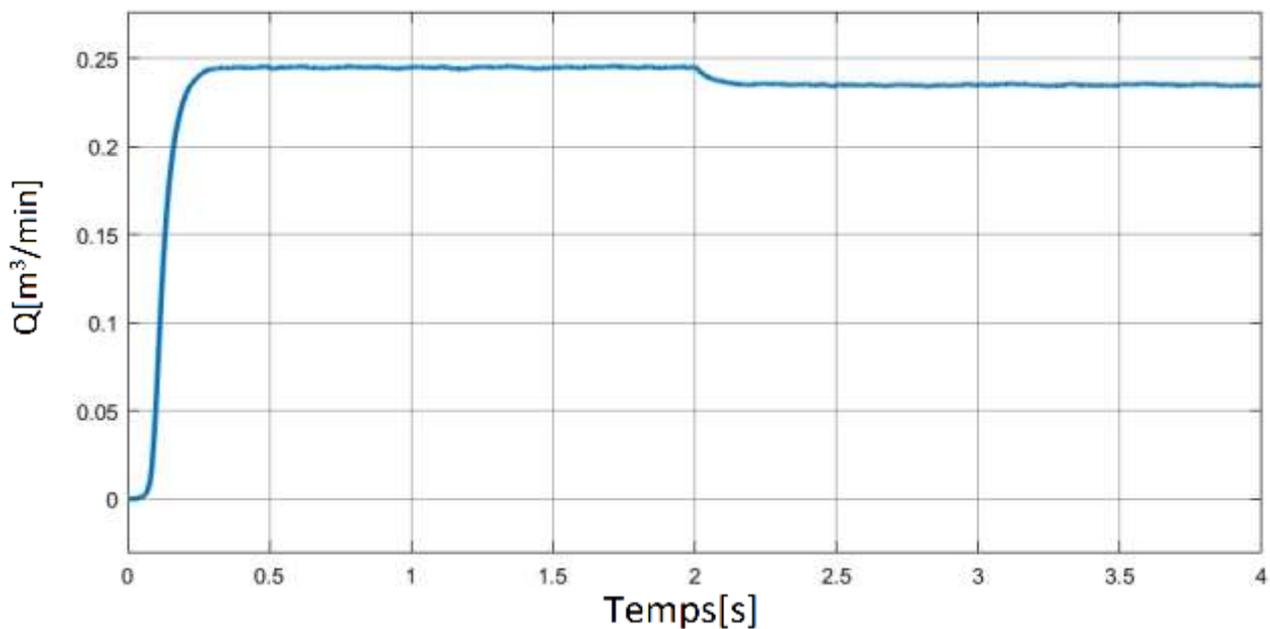


Figure IV. 7: Le débit de l'eau pompé en cas de MS.

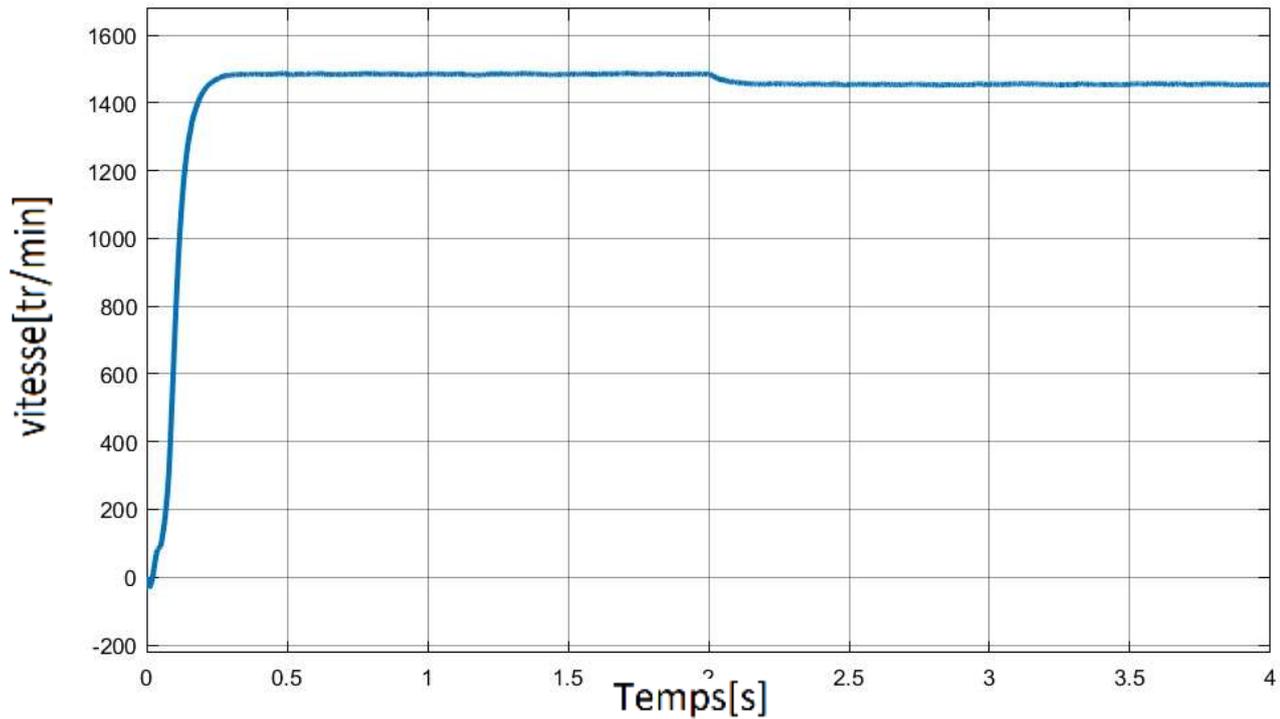


Figure IV. 8: Vitesse de rotation du MS.

Dans la figure suivante, nous avons simulé l'allure du couple résistant de la pompe centrifuge appliqué sur le moteur synchrone. Le couple est entaché d'harmoniques dues à la forme de la tension aux bornes du moteur qui est hachée à une fréquence élevée. Le couple est une grandeur ayant une dynamique plus rapide que la vitesse donc il est plus affecté par les harmoniques. Ces dernières sont plus importantes dans ce cas à cause de l'existence de deux convertisseurs électroniques (hacheur et onduleur)

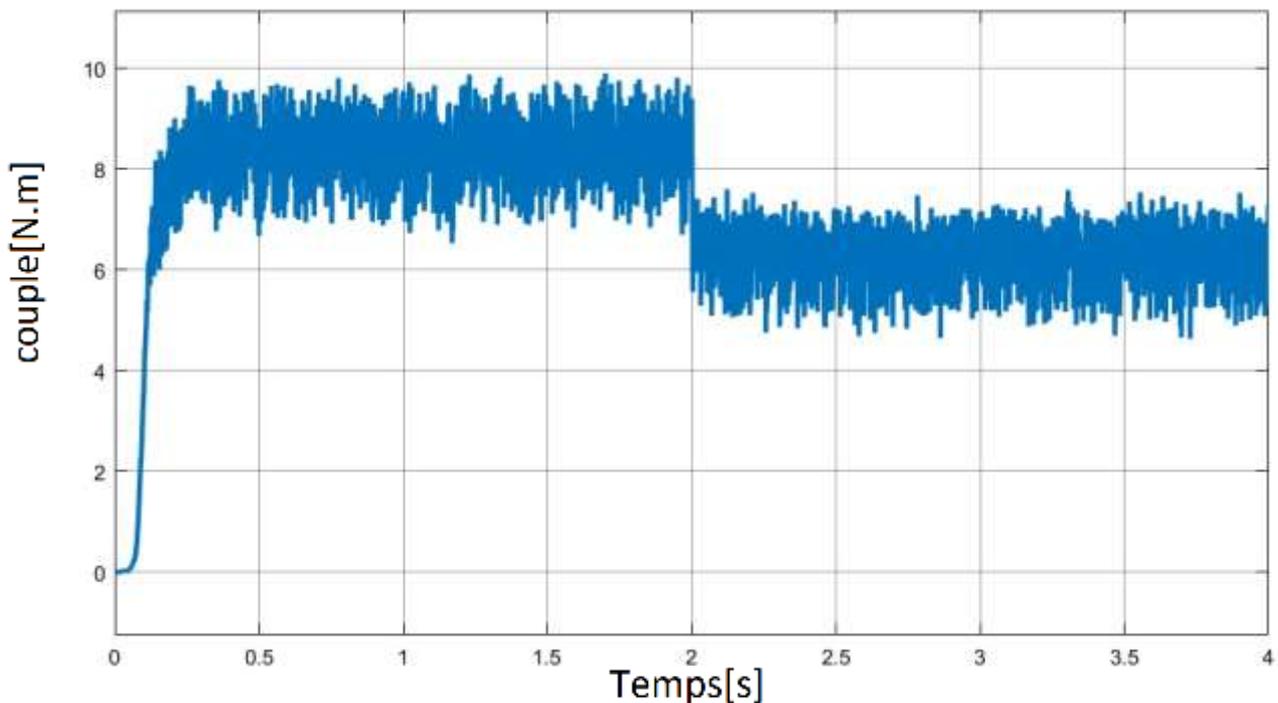


Figure IV. 9: Le couple résistant de la pompe appliqué sur le moteur synchrone.

Dans la figure IV.10, nous avons simulé l'allure de la puissance issue des panneaux PV (en bleu) et la puissance maximale que peuvent délivrer ces panneaux (en rouge). Il est clair que lorsque l'ensoleillement est de $1000\text{W}/\text{m}^2$, la puissance issue des panneaux PV part de zéro et s'établit à presque la MPPT ($14 \times 300\text{W} = 4200\text{W}$). L'établissement de la puissance dans ce cas est moins rapide que celle obtenue par un MCC. Ceci revient au caractère non linéaire du moteur synchrone. Lorsque l'ensoleillement est réduit à $700\text{W}/\text{m}^2$, la puissance issue des panneaux PV se réduit à presque 70% de sa valeur précédente (2940W). Ceci montre que notre commande MPPT (P&O) fonctionne de manière très satisfaisante.

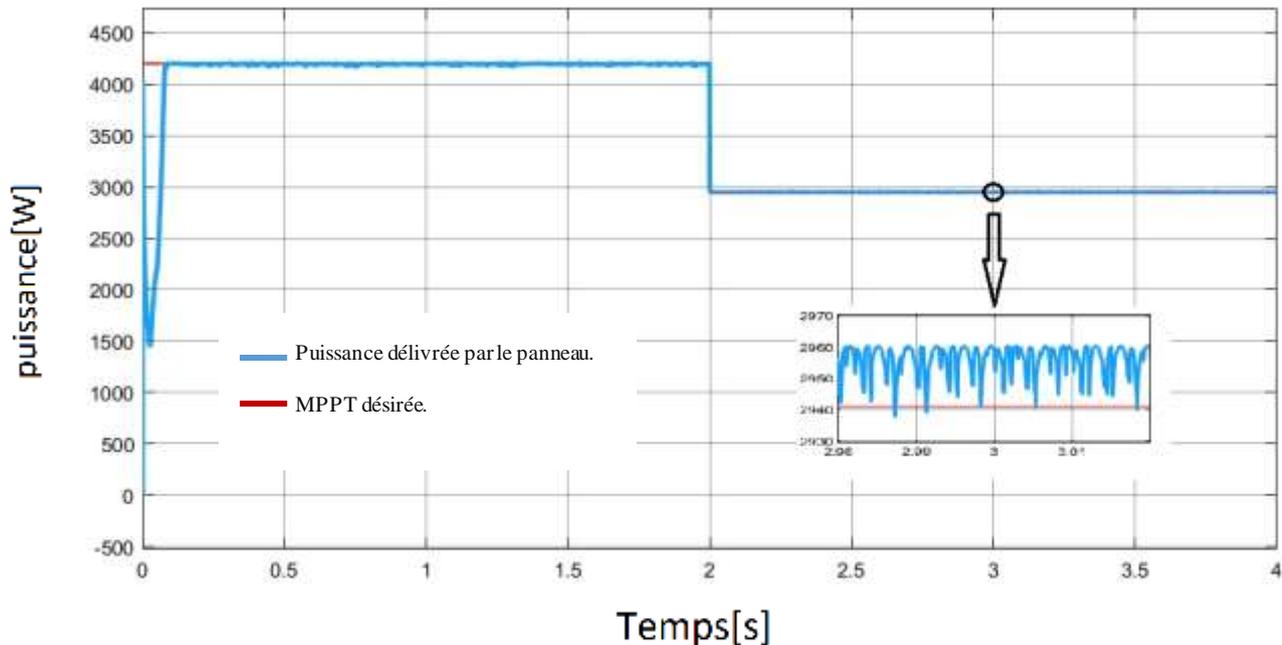


Figure IV. 10: La puissance issue des Générateurs PV est la MPPT en cas de MS.

D'après les résultats obtenus de la simulation des deux chaînes (à base de MCC et MS), on remarque :

- La puissance délivrée par le groupe de panneaux photovoltaïques suit la puissance maximale, ce qui indique que la commande MPPT fonctionne efficacement pour les systèmes à base du moteur à courant continu et à base du moteur synchrone, avec un petit retard de stabilisation pour ce dernier.
- On remarque que la puissance se réduit légèrement dans chaque étage, en commençant par la puissance à la sortie de la commande MPPT puis aux bornes du convertisseur Buck jusqu'à la puissance mesurée à la sortie de la pompe. Cette chute est due aux pertes de différents composants du système.
- Le système à base d'un moteur synchrone a plus d'ondulations que l'autre système due à la nature non linéaire de fonctionnement de la machine synchrone et les harmoniques de l'onduleur.
- On remarque que dans le démarrage du moteur à courant continu s'effectue avec un couple de démarrage important en raison du courant fort de démarrage du MCC, contrairement au moteur synchrone à commande V/f constant qui démarre avec un couple nul. Et nous avons également remarqué que le couple est influé directement par la puissance délivrée par le panneau PV.
- On remarque que le débit de la pompe dans les deux cas suit le comportement de vitesse de moteur et la puissance délivré par le panneau PV.

VI.4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons démontré les résultats de la simulation d'un système de pompage photovoltaïque en appliquant l'algorithme MPPT (Perturbation and Monitoring) et en utilisant une pompe cinétique basée sur MCC et MS.

A partir des résultats, on peut dire que la motopompe à base de moteur synchrone est la plus adaptée au système de pompage photovoltaïque en raison de sa disponibilité dans le marché et son prix bas et plus efficace que la MCC.

L'utilisation d'un réservoir en béton de grand volume dans le pompage solaire est une bonne alternative aux batteries en termes de prix et de durée de vie. Cela aide également à reposer le système si le réservoir est plein.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, ainsi que le dimensionnement de ce système en vue de la simulation du comportement de ce système. Le pompage au fil de soleil est plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie car on élimine le coût d'achats et le coût de renouvellement des batteries. Ce type de pompage est plus pratique car la pompe est alimentée par les panneaux photovoltaïques en présence du soleil pour remplir le réservoir.

La pompe est couplée directement au champ solaire photovoltaïque via un contrôleur qui va permettre, entre autres, d'optimiser le rendement journalier de la pompe. Le débit varie en fonction de la vitesse de rotation et donc de l'ensoleillement. Pour une optimisation de l'énergie délivrée par le générateur photovoltaïque. La technique de poursuite de puissance maximale MPPT est très utile.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu ce qui rend notre système de pompage très adaptable à l'approvisionnement en eau pour l'aquaculture (l'élevage de poissons ou d'autres d'espèces aquatiques) et la culture de végétaux hors-sol.

A travers nos résultats, nous pouvons dire que le convertisseur électronique en cas d'un moteur synchrone provoque plus d'ondulations que l'autre à base de MCC. Ceci est dû à la nature non linéaire du fonctionnement de la machine synchrone et les harmoniques de portées par l'onduleur.

La motopompe à base de MCC est plus adaptée au système de pompage photovoltaïque car le convertisseur nécessaire est plus simple. Cependant, en raison de la robustesse (sans balais) disponibilité dans le marché et le prix du MS par rapport à la MCC, on peut dire que le moteur synchrone est la plus adaptée aux systèmes de grande puissance.

L'utilisation d'un réservoir en béton de grand volume pour le pompage solaire est une bonne alternative aux batteries en termes de prix et de durée de vie. Cela aide également à mettre au repos le système si le réservoir est plein.

Ce travail est loin d'être achevé. Nous pouvons proposer comme pistes pour des projets à venir et comme perspectives suivantes :

- Introduire pour ce système de pompage des techniques de commande MPPT basée sur l'intelligence artificielle.
- Introduire pour ce système de pompage des techniques de commande modernes pour contrôler le débit ou la pression de l'eau pompée.

ANNEX A :

1. Les caractéristiques du panneau PV

Puissance maximale (W)	300.2
Tension en circuit ouvert V_{CO} (V)	46.4
Courant de court-circuit ICC (A)	8.67
Tension au point de puissance maximale V_{max} (V)	38
Cellules par module (N cellule)	72
Courant au point de puissance maximum I_{max} (A)	7.9

2. Les caractéristiques de moteur à courant continu

Puissance nominale (kW)	1.5
Tension nominale (V)	240 VDC
Courant d'induit nominal (A)	9.6
Vitesse de rotation nominale (tr/min)	1500
Couple nominale (N.m)	10
Resistance et inductance d'induit [R_a (Ω) L_a (H)]	[1.6 0.05]
Constant de couple (N.m/A)	1.8
Inertie totale J (Kg.m ²)	0.05
Coefficient de frottement visqueux B_m (N.m.S)	0.8
Vitesse initiale (rad/s)	1
Coefficient de frottement de coulomb T_f (N.m)	0

3. Les caractéristiques de moteur synchrone

Puissance nominale (kW)	1.5
Tension nominale (V)	220 VDC
Courant d'induit nominal (A)	3.5
Vitesse de rotation nominale (tr/min)	1500
Couple nominale (N.m)	10
Résistance de phase du stator R_s (Ω)	0.56
L'inductance d'induit (H)	0.0045
L'inertie J (Kg.m ²)	0.00208
Amortissement visqueux F (N.m.S)	0.0039
Paires de pôles	2

Coefficient de frottement de coulomb Tf (N.m)	0
Les conditions initiales : [ω_m (rad/S) thetam(deg) i_a (A) i_b (A)]	[0 0 0 0]

Bibliographie

- [1] Y. BENTOURA et A. ELHOR, «Etude de convertisseur de puissance d'un système de pompage au fil de soleil», Projet fin d'étude, école supérieur en science appliquée de Tlemcen, Algérie, 2020.
- [2] Futura sciences, «Corps noir : qu'est-ce que c'est ?» <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-corps-noir-1016/>, Date d'accès Juin 2022.
- [3] M. L. LOUAZENE, «Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla», Thèse de magister, Université de Batna 2, Algérie, 2008.
- [4] Therm exel, «Fuseau horaire heure locale ou scalaire», <https://www.thermexcel.com/french/program/bilanth1.htm>, publié en 2003, date d'accès Juin 2022.
- [5] méridien ,«association méridienne», <http://www.meridienne.org/atelier/glossaire/angle-horaire/>, date d'accès Juin 2022.
- [6] D. Boudia, «Centre de Développement des Energies Renouvelables», <https://www.cder.dz/spip.php?rubrique40>, Date d'accès. Juin 2022.
- [7] D. BENATIALLAH, «Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie» Thèse doctorat de l'université africaine AHMED DRAIA, Adrar, Algérie, 2019.
- [8] A. LABOURET, P. CUMUNEL, J. BRAUN, B. FARAGGI, «Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque», 5^{ème} édition, Eyrolles 2010.
- [9] D. MESQUITA, H. MOREIRA, J. L. S. SILVA, M. K. DA SILVA, MARCELO G. VILLALVA, «A review and analysis of technologies applied in PV modules», 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Brazil 2019.
- [10] R. SEBAA, Y. BENAMMAR, «Etude de faisabilité et dimensionnement d'un système hybride à base d'énergies renouvelables», Projet fin d'étude, Ecole supérieur en science appliquée de Tlemcen, Algérie, 2021.
- [11] D. BOUKHERS, «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage», Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2007.
- [12] N. GOAR, A. MAHMOUDI, «Réalisation d'un convertisseur DC-DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque» Projet fin d'étude de l'université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Algérie, 2017.
- [13] R. BOPILI, «Etude du fonctionnement d'un groupe motopompe dans une station de pompage», Prjet de fin de cycle, Université de kinshasa, 2015.
- [14] Ardepi, «L'eau fertile», <http://www.ardepi.fr/publications/toutes-les-publications/la-publication-en-detail/actualites/le-pompage/>, septembre 2013, Date d'accès May 2022.
- [15] «Les stations de pompage individuelle pour l'irrigation», Edition Quae, 1996.

- [16] M. S. BELHADJ, «Étude et réalisation d'un système de pompage photovoltaïque», Projet fin d'étude, Ecole supérieur en science appliquée de Tlemcen, Algérie, 2019.
- [17] A. BEN AICHA, T. DEFROUR, «Réglage des paramètres des pompes centrifuge à vitesse variable», Mémoire de master, Université KASDI MERBAH, Ouargla, Algérie, 2019.
- [18] S. DJERABA, N. MALFI, «Etude et contrôle d'un système énergétique hybride éolien-photovoltaïque», Projet de fin d'étude, Ecole supérieure de génie électrique et énergétique d'Oran, Algérie, 2020.
- [19] S. M. BENSAOUDI , S. E. ARAR, «Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque», Projet de fin d'étude, Ecole supérieur en science appliquée de Tlemcen, Algérie, 2020.
- [20] A. ELHOR, A. KERBOUA, F. BOUKLI HACENE, O. SOARES, «Development of a Photovoltaic MPPT Control based on Neural Network», 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources (IEMRE), IEEE 2021.