الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique

Option : Energies solaire et Eolienne

THEME

Etude et modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque

Préparé et présenté par :

Mr .Salah Eddine Fekkane

Melle. Nacira Moussaoui

Proposé et dirigé par

Mr . HENINI Nour-Eddine

AnnéeUniversitaire 2016-2017

Remerciements

Nos sincères remerciements et sa gratitude à tous ceux qui m'a aidé de près ou de loin à la réalisation de ces travaux et de surmonter les difficultés que nous avons relevés, et du doigt ***Mr.Hannini*** *qu'il nous a donné ses conseils et directives valeur qui était de nous aider à l'achèvement de cette recherche.*

Je remercie aussi tous les enseignants de Département de Génie Electrique

Pour l'ensemble de ma plume est tombé de par inadvertance.

Dédicaces

A nos famille, nos parents

nos frères et sœurs et leurs enfants

A la famille fekkane

et moussaoui

A nos amis

Dedicace

A Mes Très Chers Parents Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

C'est à travers vos encouragements que j ai opté pour cette noble profession, et c'est à travers vos critiques que je me suis réalisée.

J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondé en moi.

Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour.

Vous résumez si bien le mot parents qu'il serait superflu d y ajouter quelque chose.

Que Dieu tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie pour que vous demeuriez le flambeau illuminant le chemin de vos enfants.

Salah

Dedicace

Je dédie ce modeste travail
A mes chers parents
A mes frères et mes soeurs
A tous ma famille

A mon encadreur Mr HENINI Nour-Eddine A tous mes collègues et mes amis partout
A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science
et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien
et la prospérité de l'humanité

Nacira

Résumé

L’utilisation de l’énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel quele pompage d’eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie dedéveloppement qui n’a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïquespossèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible est un coût élevé.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, la commande d’un système de pompage solaire.

Ce système est constitué d’un ensemble d’éléments se trouvant en interaction ; à savoir lespanneaux photovoltaïques, le convertisseur de tension, le moteur a courant continue la pompe centrifuge.

Mots-clés :

Energie solaire, Photovoltaïque, Modélisation et Simulation, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Pompe centrifuge.

Summary

The use of solar energy in isolated sites for different applications, such as pumping water, is of primary interest to the population of developing countries who do not have safe access to water drinking. But photovoltaic generators have two major disadvantages that are a low yield is a high cost.

The work presented in this paper concerns the modeling, simulation and control of a solar pumping system.

This system consists of a set of elements that interact; namely the photovoltaic panels, the voltage converter, the DC motor the centrifugal pump.

Keywords :

Solar Energy, Photovoltaics, Modeling and Simulation, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Centrifugal pump.

ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية من اهم الطاقات المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية البعيدة عن شبكة توزيع الطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة ,من بين المجالات التي تستعمل فيها الطاقة الشمسية نجد مجال ضخ المياه لكن توجد عدة عراقيل من بينها غلاء التكلفة والمردود الضعيف.

قمنا بإنجاز مذكرة نوضح من خلالها نمذجة و محاكاة وتحكم في نظام ضخ المياه ,هذا النظام يتكون من محول التوتر,محرك تيار مستمر ,مضخة .

كلمات مفتاحية خلية شمسية ,نموج ,لوح ,نقطة الاستطاعات الأعظمية .

Introduction général I

Chapitre I Généralités d'un pompage photovoltaïque.

I.1 INTRODUCTION 1

I.2 système de pompage photovoltaïque.....1

I.2.1 Pompage « au fil du soleil » 2

I.2.2 Pompage avec batteries 3

I.3 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque..... 4

I.3.1 Systèmes de petite puissance (50-400W) 4

I.3.2 Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W) 5

I.4 Les composants d'un système de pompage PV.....6

I.4.1 Générateur d'énergie 6

I.4.2 Le groupe électropompe 6

I.4.2.1 Pompe à énergie solaire 6

I.4.2.2 Principes généraux du pompage solaire 6

I.4.3 LES POMPES 7

I.4.3.1 Classifications des pompes 7

I.4.3.2 La Pompe centrifuge 8

I.4.3.3 Constitution d'une pompe centrifuge 9

I.4.3.4 Caractéristiques de la pompe centrifuge 10

I.4.3.5 Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges 10

I.4.3.6 comparaisons entre les pompes volumétriques et centrifuges 11

I.4.5 Les type installation des pompes à énergie solaire 12

I.4.6 Les moteurs électriques 13

I.4.7Le convertisseur 16

I.5 La partie stockage.....16

I.6 Conclusion 17

Chapitre II Modélisation d'un Système de Pompage PV.

II.1 Introduction 18

II.2 La modélisation du champ photovoltaïque 18

II.2.1 La modélisation d'une cellule solaire.....18

II.2.2 Caractéristique I=f (V) d'une cellule solaire.....19

II.2.3 Paramètres caractéristique d'une cellule solaire.....21

II.2.4 Groupement des cellules solaires.....22

II.3 Association des Modules.....23

II.3.1 Association en série.....23

II.3.2 Association en parallèle.....23

II.3.3 Association mixte des générateurs photovoltaïques.....23

II4. Les paramètres qui influent sur la caractéristique I(V) 24

II.5 Les convertisseurs.....28

II.5.1 Les convertisseurs d'énergie.....28

II.6 Modélisation du groupe motopompe.....30

II.6.1 Le Moteur.....31

II.6.1.1 La machine à courant continu..... 32

II.7 Modélisation de la pompe centrifuge.....33

II.7.1 Les pertes de charge.....34

II.7.1.1 Les pertes de charge linéaires.....34

II.7.1.2 Les pertes de charge singulières.....35

II.8 Conclusion.....35

Chapitre III Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque.

III.1 Introduction 36

III.2 Méthode simple de dimensionnement.....36

III.2.1 Evaluation des besoins en eau 36

III.2.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise.....36

III.2.3 Détermination de l'énergie solaire disponible.....37

III.3 Taille du générateur photovoltaïque.....37

III.3.1 Méthode analytique.....38

III.3.1.1 Calcul de la puissance, en watts crêtes, que doit avoir le champ.....39

III.3.2 Méthode graphique.....40

III.4 Dimensionnement de la pompe.....41

III.5 Dimensionnement des tuyauteries.....41

III.6 Dimensionnement des stations de pompage solaire.....42

III.7 Résultats numériques.....44

III.8 Conclusion.....45

Chapitre IV Résultat de simulation.

IV.1 Introduction 46

IV.2 Conception et simulation du système.....46

IV.3 modèle PV.....46

IV.4 Convertisseur DC-DC (Hacheur survolteur) 47

IV.5 Mise en œuvre de la commande de poursuite MPPT.....49

IV.5.1 La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O.....49

IV.5.2 Principe du contrôle MPPT.....50

IV.6 Simulation du système de pompage d'eau photovoltaïque avec régulateurs MPPT…...51

IV.6.1 Modèle Simulink de la machine à courant continu.....52

IV.6.2 Modèle de la pompe centrifuge.....52

IV.7 Résultats de simulation.....55

IV.8 Conclusion 58

Conclusion général……59

Liste des Figure

Figure I. 1 : Schéma synoptique simplifié de Pompage PV……2

Figure I. 2 : Structure d'un système de pompage Photovoltaïque……..3

Figure I. 3 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil…….3

Figure I. 4 : Structure d'un système de pompage Photovoltaïque avec batterie……...4

Figure I. 5: Caractéristiques du débit po le pompage avec batterie……..4

Figure I. 6 : Systèmes de petite puissance. ……5

Figure I. 7: systèmes de moyenne puissance……..6

Figure I. 8 : Pompes à centrifuges……..8

Figure I. 9: Schéma de principe d'une pompe centrifuge…….10

Figure I. 10 : Pompe centrifuge flottante……..10

Figure I. 11: Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés (tirée de Solar Pumping de IT Power)……..12

Figure I. 12: Schéma synoptique simplifié déférent mode installation des pompes énergie solaire……13

Figure II. 1: Cellule solaire idéale…….18

Figure II. 2: Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle……19

Figure II. 3: Caractéristique d'une cellule solaire…….20

Figure II. 4: Caractéristique résultante d'un groupement série de ns cellules identiques……23

Figure II. 5 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de cellules identique.....23

Figure II. 6: Association de mixte des cellules solaires photovoltaïques…….24

Figure II. 7 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques…..24

Figure II. 8: Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V……...25

Figure II. 9: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V……..25

Figure II. 10:Effet de Rs sur la caractéristique I-V……...26

Figure II. 11 : Effet de Rs sur la caractéristique P-V……26

Figure II. 12: Effet de température sur la caractéristique I-V……...28

Figure II. 13: Effet de température sur la caractéristique P-V……..28

Figure II. 14.a: Hacheur survolteur …….29

Figure II. 14. b: Hacheur dévolteur……...29

Figure II. 15 : Structure d'une station de pompage photovoltaïque…….31

Figure II. 16: Schéma d'un entraînement avec une MCC à excitation indépendante……32

Figure III 1: Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation…..41

Figure III 2: Les étapes du calcul de la taille du générateur…….43

Figure IV 1: Modèle SIMULINK du système photovoltaïque avec algorithme MPPT……...46

Figure IV 2: SIMULINK model PV…….47

Figure IV 3: Photo de PV module…….47

Figure IV 4: Hacheur survolteur……...48

Figure IV 5 Schéma Simulink d'hacheur…….48

Figure IV 6 : La tension de sortie de l'hacheur pour une tension d'entrée V=12v…….49

Figure IV 7: Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire……50

Figure IV 8: Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT…..51

Figure IV 9: Simulink model of the system……..52

Figure IV 10: Bloc de la MCC sous Simulink……..52

Figure IV 11: Bloc SIMULINK de la pompe centrifuge……..53

Figure IV 12: Puissance du GPV P(t)……...55

Figure IV 13: Vitesse du rotor ω(t)……...56

Figure IV 14: Débit de la pompe Q(t)……...56

Figure IV 15: Hauteur manométrique de la pompe H(t)……...57

Figure IV 16: Caractéristique Q=f (N) de la pompe…….57

Figure IV 17 : Caractéristique H=f (Q) de la pompe……58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III 1: Diagramme d'estimation des besoins en eau…….36

Tableau III 2 : Dimensionnement de la pompe…….44

Tableau III 3 : Caractéristiques du site……44

Tableau III 4 : Caractéristiques du Module……...44

Tableau III 5 : Taille du Générateur……..45

Tableau IV 1 : Paramètres de moteur……54

Tableau IV 2 : Paramètres de Pompe centrifuge……...54

Tableau IV 3 : Paramètres de PV model……...54

Tableau IV 4 : Paramètre de boost converter……55

Nomenclature.

E : Eclairement (W/m2).

RSe : Résistance série équivalente (Ω).

RPe : Résistance parallèle équivalente (Ω).

Iph : Le photo-courant (A).

I0 : Courant de saturation (A).

Rp : Résistances parallèle shunt. (Ω)

RS : Résistance série (Ω).

Tc : Température de jonction (°K).

G0 : L'éclairement de référence (1000 W/m2).

T0 : La température de référence (298 °K).

Icc : Le courant de court-circuit (A).

Vco : La tension de circuit ouvert (V).

FF : Facteur de forme.

Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.

Np : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

Pm : La puissance maximale produite PV (W).

Vm : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

Im : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

VCO : La tension à circuit ouvert de référence (V).

Vop : Tension optimale (V).

Iop : Courant optimum (A).

Vco : Tension à circuit ouvert (V).

Icc : Courant de court-circuit (A).

ω : Vitesse de rotation (rad /s).

Q : Débit de la pompe (m3/h).

HMT : Hauteur manométrique totale (m).

N : Vitesse de la pompe (rad /s).

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

FF : Facteur de forme.

MPP : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

MCC: Moteur à courant continu

Introduction général :

La nécessité de couvrir la demande mondiale d'énergie primaire par un autre que celui actuellement Les sources fossiles et nucléaires habituelles sont devenues un sujet d'intérêt public. Dans Vue des effets climatiques des émissions de CO2 des centrales à énergie fossile, l'utilisation de Sources d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie solaire, la chaleur solaire et l'énergie éolienne, Devient de plus en plus convaincant.

La poursuite de l'affluence dans les pays émergents est légitime. En général, cependant, il Implique une demande croissante d'énergie. Cela nécessite la création de L'infrastructure appropriée. Les pays les plus pauvres qui n'ont pas le capital requis demandent souvent Les pays industrialisés pour leur fournir - et payer - des centrales électriques adéquates et Technologie de l'énergie électrique. Dans ce contexte, tout groupe d'intérêt s'est engagé dans La coopération au développement doit s'efforcer d'introduire des sources d'énergie propres à éviter Dès le début, les problèmes environnementaux que la plupart des pays industrialisés Déjà, et pour permettre une grande indépendance vis-à-vis des importations de carburant.

Parmi les options d'énergie renouvelable, l'une des plus importantes est l'électricité Généré par des moyens photovoltaïques, c'est-à-dire par la conversion directe du rayonnement solaire e. Courant dans les cellules solaires. L'électricité est une forme d'énergie convertie (raffinée) qui est facile Pour transmettre (conduire) et peut être utilisé dans pratiquement n'importe quelle application. Photovoltaïque Les systèmes ont l'avantage de ne nécessiter aucune pièce mobile, donc ils ont une durée intrinsèque Le service vit. Contrairement aux générateurs de vent, les cellules solaires ne conviennent guère pour la fabrication Pays émergents, parce que ces pays n'ont ni le savoir-faire technique, ni L'équipement de production complexe qu'il faut pour fabriquer de tels produits de haute technologie.

La première étape vers le progrès économique dans les pays en développement est d'améliorer la Les conditions de vie des gens. Tout d'abord, cela signifie obtenir, fournir et éliminer L'eau comme condition préalable essentielle pour les établissements humains (approvisionnement en eau potable), l'agriculture (Irrigation) et le pâturage (points d'arrosage). Dans les régions semi-arides, les ressources en eau La gestion est souvent le facteur décisif du développement régional.

Une source d'énergie pour pomper de l'eau est également un gros problème dans de nombreux pays en développement. Le développement d'un système de grille est souvent trop coûteux car les villages ruraux sont souvent situés Trop loin des lignes de grille existantes. Selon un approvisionnement importé en carburant est difficile et risqué, Les taux de change fluctuent et l'économie de nombreux pays en développement peut Puis tomber en panne. Même si le carburant est disponible dans le pays, le transport de ce carburant vers la télécommande, Les villages ruraux peuvent être difficiles. Il n'y a pas de routes ou d'infrastructure de soutien dans de nombreuses régions éloignées. Villages où les transports par les animaux sont encore fréquents. Transport par limites d'animaux Les capacités de charge et certaines charges, les générateurs diesel, par exemple, peuvent être impossibles à apporter Ces emplacements.

L'utilisation des énergies renouvelables est attrayante pour les applications de pompage d'eau dans les zones rurales de nombreux pays en développement. Le transport des systèmes d'énergie renouvelable, comme le vent Les machines et les pompes photovoltaïques (PV), est beaucoup plus facile que d'autres types car elles peuvent être Transportés en morceaux et remontés sur place.

Dans ce travail de recherche, Dans le premier chapitre, nous avons donné des explications générales sur le pompage photovoltaïques, et le système composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des éléments du système de pompage photovoltaïque (champ photovoltaïque, hacheur, onduleur et groupe motos-pompe).

En exposant d'une manière détaillée la modélisation mathématique, le principe de fonctionnement et la caractéristique I=f (V) du générateur. Et les pompes qui peuvent être utilisés dans le pompage PV. Il présente aussi le modèle mathématique de chacun de ces composants.

Dans le troisième chapitre dimensionner les stations de pompage et l'étape de calcul la taille de générateur.

Dernier chapitre, dans le quatrième chapitre obtenir la résulta de simulation de model pompage PV sur MATLAB /SIMULINK.

I.1 INTRODUCTION :

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée « Pompe au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.

Dans ce dernier cas, l'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.

Toutefois, l'utilisation de batteries comporte davantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système. Les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent en outre un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables.

Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement.

I.2 système de pompage photovoltaïque:

Un système de pompage solaire est généralement constitué de

- le générateur photovoltaïque.
- le groupe électropompe.
- l'électronique de commande et de contrôle.
- la partie stockage [1].

Le mérite d'un système d'alimentation d'eau doit être jugé en se basant sur les critères suivants :

- Capacité de pompage.
- Fiabilité.
- Sécurité.
- Simplicité à l'utilisation.
- Simplicité à l'installation et à la maintenance.
- Qualité sanitaire de l'eau [2].

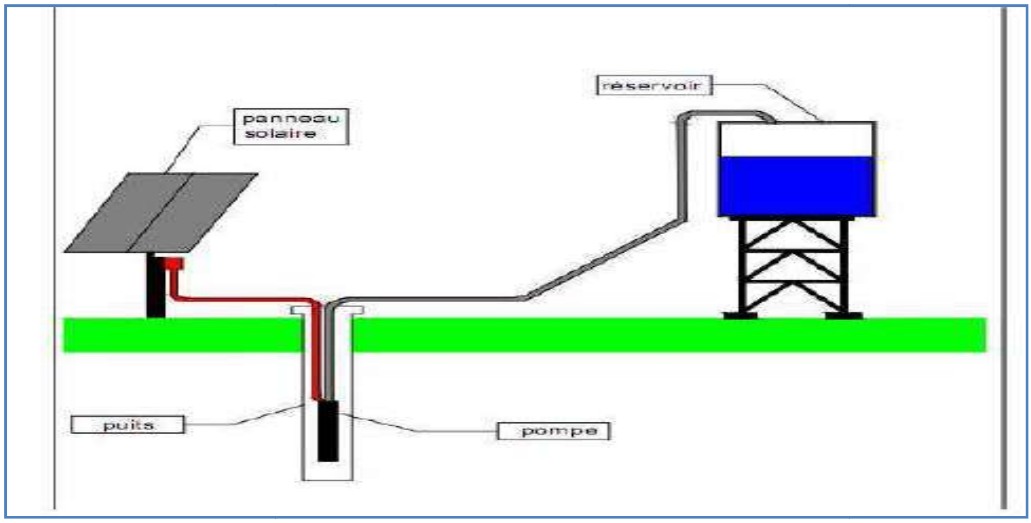


Figure I. 1 : *Schéma synoptique simplifié de Pompage PV.*

I.2.1 Pompage « au fil du soleil » :

Comme on va le constater, la méthode de pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système utilisant des batteries pour stocker de l'énergie d'abord. En effet, dans cette première technique, c'est l'eau elle-même qui est pompée et stockée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau est stockée dans un réservoir à une hauteur au-dessus du sol pour qu'elle soit, au besoin ensuite, distribuée par gravité. Il faut bien signaler ici que le réservoir d'eau peut souvent être construit localement. En plus, il ne requiert pas un entretien complexe et peut être réparé localement. La capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon les modèles [3].

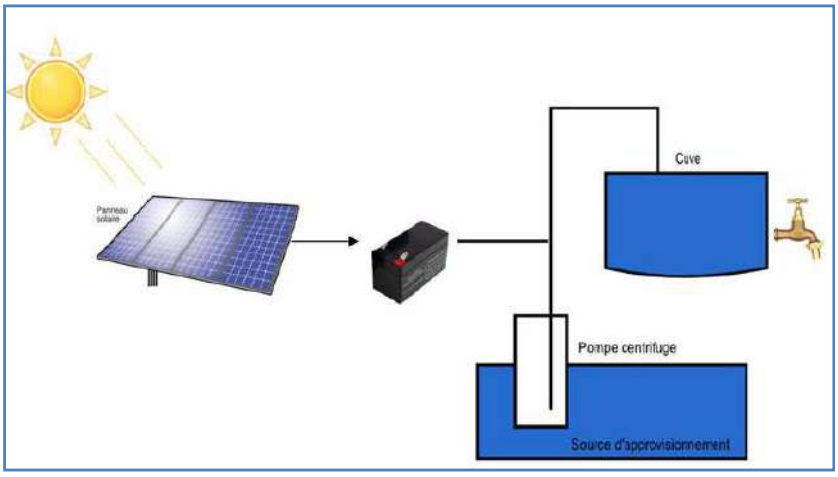


Figure I. 2 : *Structure d'un système de pompage Photovoltaïque.*

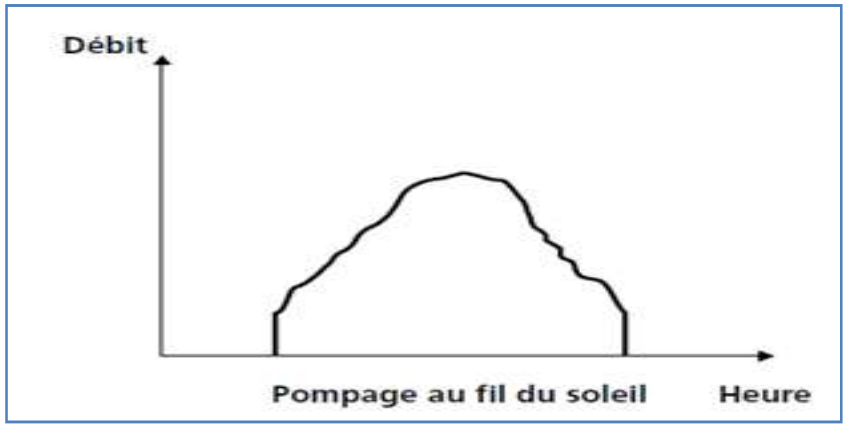


Figure I. 3 : *Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil.*

I.2.2 Pompage avec batteries :

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présent l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée pour être utilise aussi pour d'autres besoins ultérieures. L'inconvenant majeur voir handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les utilisés

pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables.

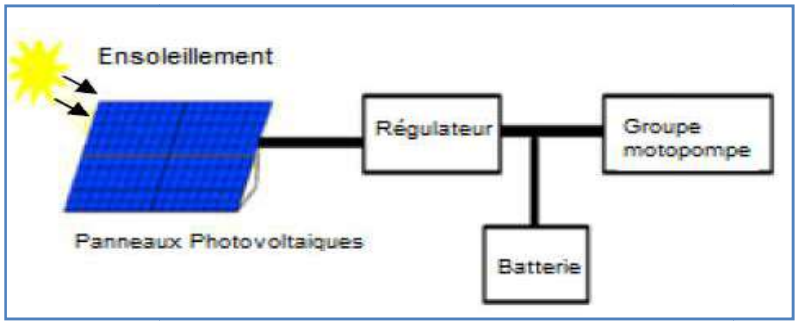


Figure I. 4 : *Structure d'un système de pompage Photovoltaïque avec batterie.*

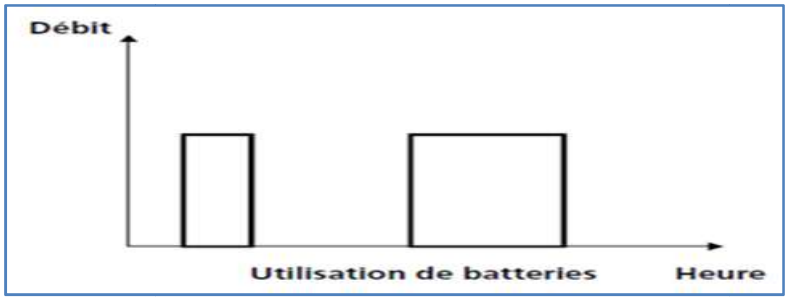


Figure I. 5: *Caractéristiques du débit po le pompage avec batterie.*

I.3 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque:

La configuration d'un système de pompage PV est déterminée par la définition du type de générateur photovoltaïque, le type de pompe et le type de moteur; ainsi que le type de conditionnement de puissance. On peut distinguer les types de systèmes de pompage photovoltaïques suivants:

I.3.1 Systèmes de petite puissance (50-400W) :

Dans ce type de systèmes, il est utilisé principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou à déplacement positif [4].

Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation [5].

Les applications de cette configuration est généralement destinée au pompage des volumes d'eau pouvant atteindre jusqu'à 150m^3/Jour .Les principaux constituants de ces systèmes sont:

- Le Générateur photovoltaïque.
- le convertisseur DC/DC (facultatif).
- Moteur à courant continu.
- Pompe.

- Entrepôt de stockage (facultatif) [6], [7].

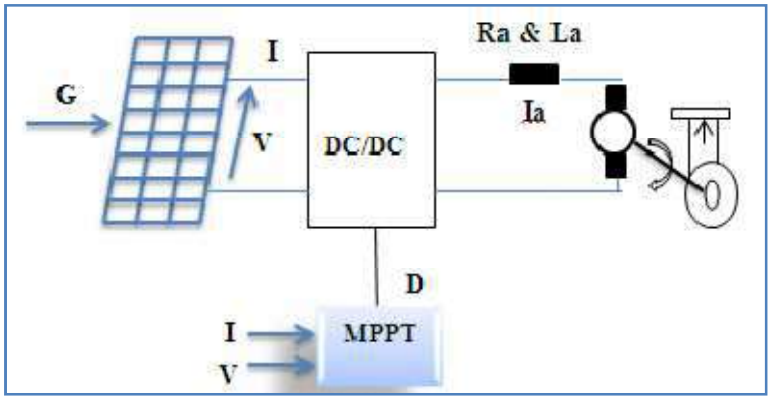


***Figure I. 6** : Systèmes de petite puissance.*

I.3.2 Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W) :

Composé essentiellement d'une pompe immergée centrifuge entraînée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable, comme le montre la figure ci-dessous. Un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT) [8].

Ces types de systèmes sont caractérisés par leur haute fiabilité ainsi que de leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque. Les volumes d'eau pouvant être pompés varie entre 150 jusqu'à 1500 m^3/Jour.

Les éléments clés de ces types de systèmes sont :

- Générateur photovoltaïque.
- Le convertisseur DC/DC (MPPT).
- Le convertisseur DC/ AC.
- Moteur AC.
- Pompe immergée.
- Entrepôt de stockage (facultatif) [9].
-

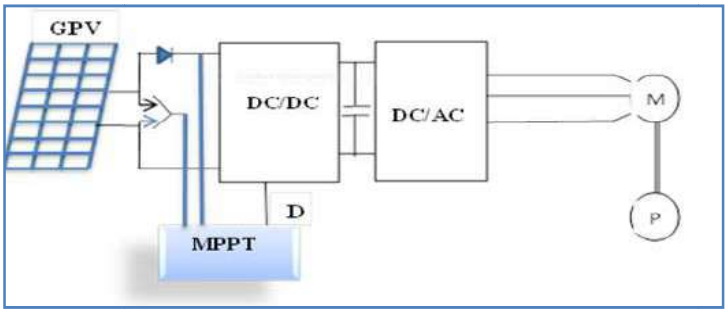


Figure I. 7: *systèmes de moyenne puissance.*

I.4 Les composants d'un système de pompage PV :

I.4.1 Générateur d'énergie :

Comme leur nom l'indique, les générateurs d'énergie génèrent et donc produisent de l'énergie électrique.

Sachant néanmoins que l'énergie ne nait pas spontanément mais résulte toujours d'une transformation ,certains diront qu'en théorie , le terme de générateur est impropre , mais il désigne dans la pratique une source d'énergie au sens de l'usage : un générateur est donc un composant qui fournit de l'énergie à un système, comme une batterie ou un photo générateur , et plus généralement une central électrique, un alternateur, une chute d'eau.

Les photos générateurs sont générateurs de courant continu(DC) par opposition aux générateur de courant alternatif (AC), insistons au passage sur le terme générateurs de courant .en effet, sous un éclairement donné , le photo générateur fournit un courant quasiment constante , c'est pourquoi c'est un générateur de tension.

I.4.2 Le groupe électropompe :

I.4.2.1 Pompe à énergie solaire :

Une pompe à énergie solaire est une pompe normale munie d'un moteur électrique, pour générer sur place l'électricité nécessaire au moteur, un panneau solaire convertit l'énergie du soleil en courant électrique continu, si la pompe possède un moteur à courant alternatif, il faut ajouter un convertisseur pour transformer le courant continu produit par le panneau solaire en courant alternatif [10].

I.4.2.2 Principes généraux du pompage solaire :

La caractéristique de l'énergie solaire est d'être périodique (jour/nuit), continuellement variable en fonction de l'ensoleillement au cours d'une journée. Aussi

faut-il en général un stockage tampon afin de pouvoir utiliser des récepteurs, consommateurs d'électricité, quel que soit le moment souhaité. Le pompage solaire est une exception, il est en effet relativement facile de stocker l'énergie potentielle de l'eau dans un réservoir surélevé, alternative largement moins onéreuse et plus fiable qu'un stockage par accumulateurs électriques, car les batteries ont une durée de vie limitée et nécessitent un entretien rigoureux. Par la variation de vitesse, et donc du débit, le pompage permet d'utiliser directe- ment une puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement: c'est ce que l'on appelle le pompage "au fil du soleil" Le débit maximum de la pompe, exprimé en m^3/h, obtenu généralement à midi est environ le sixième du débit journalier. Pour une pompe volumétrique, le couple est constant : la puissance absorbée sera proportionnelle à la vitesse de rotation. (Puissance= couple * vitesses) [11].

I.4.3 LES POMPES :

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou quelconque (pétrole, huile…) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression [12].
Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants:

- ✓ La nature du liquide pompé, viscosité, température, présence de corps solides.
- ✓ Le débit et la pression souhaités.
- ✓ L'énergie consommée [13].

I.4.3.1 Classifications des pompes :

Selon les applications et les différentes sources d'eau (puits, forage, pompage de rivière, etc.) plusieurs types de pompes peuvent être utilisés dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Parmi ces pompes on trouve, les turbos-pompes et les pompes volumétriques :

***1) La pompe volumétrique* :**

Une pompe volumétrique est une pompe dans laquelle l écoulement du liquide est en proportion constant avec le déplacement d un organe mobile du corps de la pompe. Les pompes volumétriques sont deux sortes:

- ➢ ***Les pompes volumétriques rotatives :***
- Pompes à engrenages.
- Pompes à palettes.

- Pompes à vis.

➢ ***Les pompes alternatives :***

- Pompes à piston.
- Pompes à membrane [14].

✓ ***Caractéristiques d'une pompe volumétrique* :**

Le couple de démarrage est pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la H_{MT} (3 à 5 fois le couple nominale). La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau inférieure à$5[m^3/h]$ [15].

2) Turbopompe :

Une turbopompe est un appareil dans lequel l'énergie transmise au liquide est une énergie principalement cinétique, qui lui est communiquée par l'intermédiaire d'un rotor, mais n'est pas en relation invariable avec le déplacement du rotor ; d'autre part, elle n'est pas distribuée uniformément dans tout le liquide [14].

Les différents types des turbopompes sont :

- **Pompes à hélice.**
- **Pompes hélico- centrifuges.**
- **Pompe centrifuge.**

I.4.3.2 La Pompe centrifuge :

Les principes des pompes centrifuges sont la technologie la plus utilisée dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et leur rendement en eau augmente avec la vitesse de rotation. Les pompes centrifuges sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit [16]. Dans la présente étude, le principe de base d'opération de la pompe centrifuge et le modèle mathématique sont développés pour décrire son comportement opérationnel.



Figure I. 8 *: Pompes à centrifuges.*

a) Principe de fonctionnement :

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

1) L'aspiration :

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

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

2) L'accélération :

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression [17].

I.4.3.3 Constitution d'une pompe centrifuge :

La pompe centrifuge se compose essentiellement de:

- ***Un distributeur fixe :*** Le plus souvent réduit à une simple tubulaire profilée, qui donne au fluide une vitesse et une direction convenables, et conduisant ce dernier depuis la section d'entrée de la machine jusqu'à l'entrée de la roue .Le distributeur est généralement constitue par un cône convergent qui permet de réaliser une meilleure disposition des filets liquides en améliorant le parallélisme et l'égalité des vitesses. Il est précédé par la canalisation d'aspiration.
- ***Une roue ou impulser*** : Placée sur l'arbre de la pompe appelée aussi rotor (mobile) qui est l'élément actif de la pompe, son rôle est de transformer l'énergie mécanique appliquée à l'arbre en énergie hydrodynamique (énergie de pression et énergie cinétique).
- ***Un diffuseur fixe :*** Qui transforme l'énergie cinétique du fluide à la sortie de la roue en énergie de pression (énergie potentielle). Pour pomper l'eau dans un forage ou alimenter un système d'irrigation, il faut disposer d'une forte pression de refoulement qui pourrait être provoquée par une pompe monocellulaire équipée d'une roue à grand diamètre.

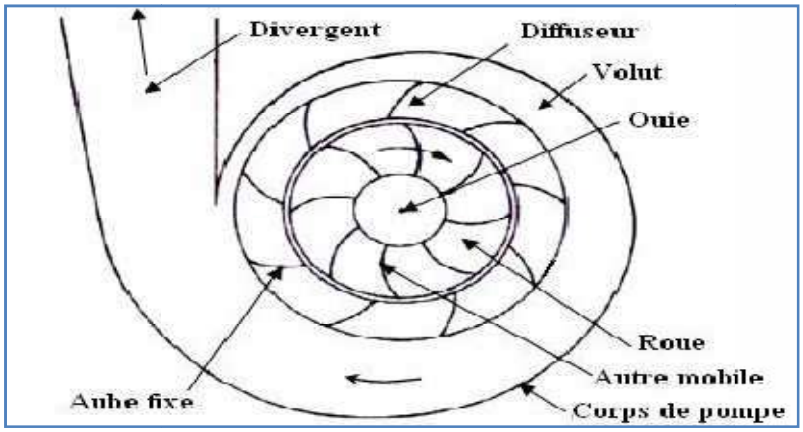


***Figure I. 9**: Schéma de principe d'une pompe centrifuge.*

I.4.3.4 Caractéristiques de la pompe centrifuge:

Les pompes centrifuges sont très utilisées pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le couple d'entrainement de la pompe est pratiquement nul au démarrage

- La pompe tourne par très faibles ensoleillement, le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante.
- Utiliser pour des débits importants [18].

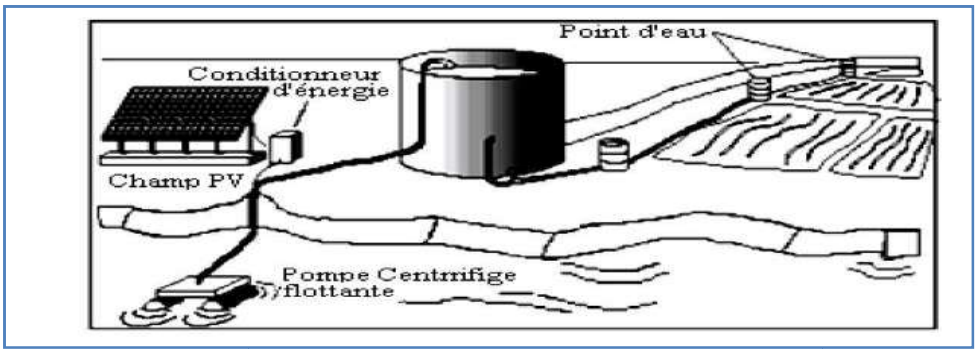


***Figure I. 10 :** Pompe centrifuge flottante.*

I.4.3.5 Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges :

- ***Avantage :***
- Construction simple en général, une seule pièce en mouvement « le rotor ».
- Prix peu élevé.
- Encombrement réduit.

- Jeu assez large, donc facilité de manipuler des liquides contenant des solides en suspension.
- Entretien en général peu coûteux.
- Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques.
- Très large gamme de qualités matières suivant le service requis.
- Grand flexibilité d'utilisation.
- Ajustement automatique du débit à la pression.
- Puissance absorbée limitée, donc sans danger.

❖ ***Inconvénients :***

- Limitation de la viscosité.
- En fait, la pompe centrifuge est limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de 100cSt (centistokes) et son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler le débit [14].

I.4.3.6 comparaisons entre les pompes volumétriques et centrifuges :

Pour de petites HMT et de faibles débits journaliers (HMT Q <25 m^3), les pompes à main peuvent s'avérer plus intéressantes. On utilisera alors un seau pour pomper l'eau. L'utilisation de pompes mécaniques sur cette plage d'utilisation se limitera principalement aux pompes volumétriques de faible puissance.

Pour les hauteurs de moins de 7 mètres, l'emploi de pompes à aspiration sera préféré. Cette pompe est généralement de type centrifuge à ailettes.

Pour de faibles débits et une puissance disponible variable (par exemple, couplage éolien), l'emploi d'une pompe à cavité (volumétrique) permet un débit plus constant.

Pour une HMT moyenne, comprise entre 10 et 50 mètres, la pompe immergée centrifuge est généralement la plus efficace. Mais son rendement est très étroitement lié à la HMT et son dimensionnement est critique.

Pour les HMT supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers (<20 m^3), la pompe volumétrique sera la plus utilisée, surtout si une forte variation du rabattement de la nappe (donc de la HMT) est constatée.

Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible.

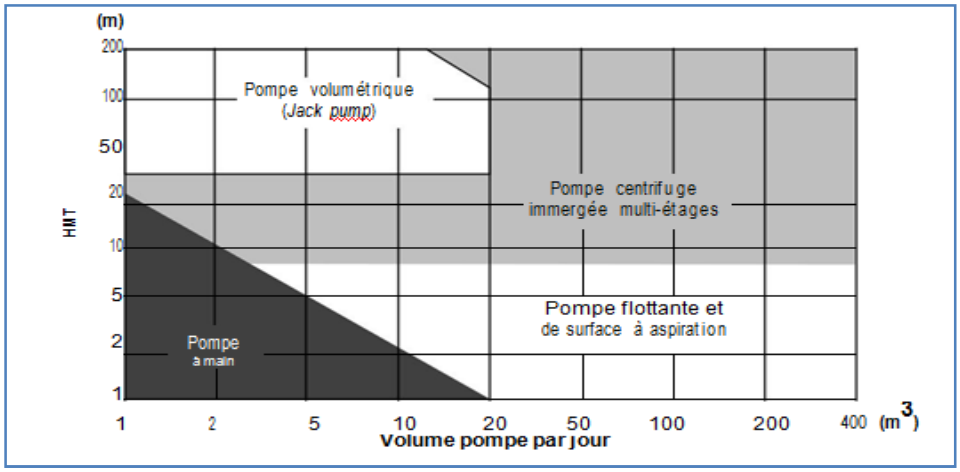


Figure I. 11: *Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés (tirée de Solar Pumping de IT Power).*

Le choix d'une pompe se portera également sur sa capacité à répondre aux conditions variables du site.

Nous avons vu que le débit d'une pompe volumétrique est moins affecté par la variation de la HMT alors que la pompe centrifuge verra son débit diminuer rapidement à mesure que la HMT augmente.

La hauteur de refoulement d'une pompe centrifuge est fonction du carré de la vitesse du moteur. À mesure que la HMT augmente, le rendement de la pompe diminue très rapidement ; le moteur devrait tourner beaucoup plus rapidement pour fournir un même débit [19].

I.4.5 Les type installation des pompes à énergie solaire :

On trouve une grande variété de pompes d'énergie solaire destinées à l'abreuvement du bétail .si la réserve d'eau est un étang réservoir, on peut y installer une pompe flottante dans les puits, on utilise souvent une pompe centrifuge submersible. Dans les étangs réservoirs, les ruisseaux et les puits peu profonds, on peux employer une pompe de surface centrifuge à amorçage automatique où une pompe volumique. Quel

que soit le type de pompe une application à basse tension comme l'énergie solaire exige qu'on veille à ce que la pompe corresponde aux exigence de prise et de décharge de l'application on trouve 4 mode :

- pompe à solaire immergée.
- pompe à solaire immerge et moteur a surface.
- pompe à solaire flotte.
- pompe à solaire de surface [20].

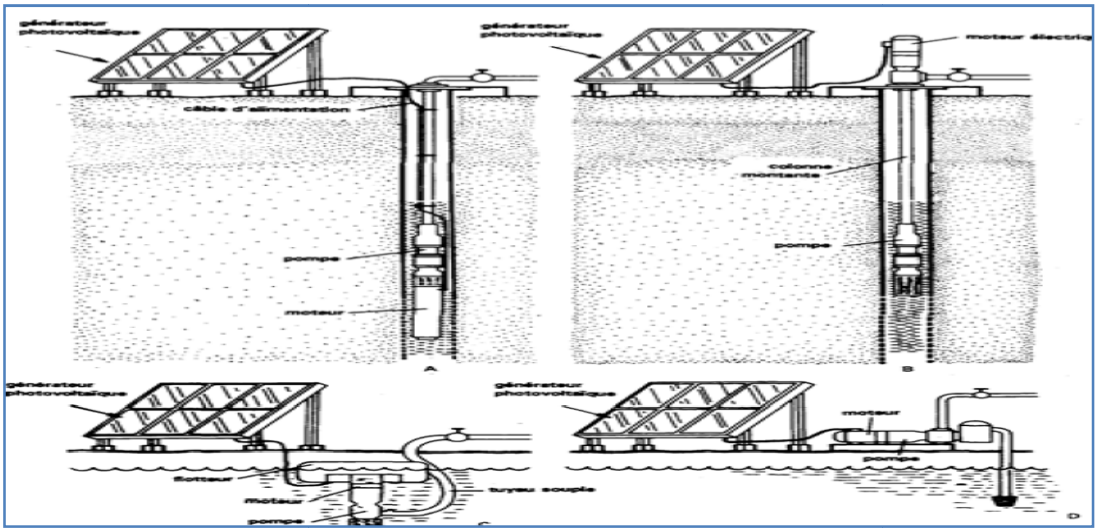


***Figure I. 12**: Schéma synoptique simplifié déférent mode installation des pompes énergie solaire.*

I.4.6 Les moteurs électriques :

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des machines électriques fonctionnent grâce au magnétisme, il existe deux types de moteurs : à courants continu et alternatif

a) Moteur a courant continu :

On rencontre encore régulièrement des moteurs à courant continu à excitation Indépendante dans les salles des machines des immeubles d'un certain âge. En général, ils Font partie d'un groupe Ward-Leonard qui permet d'aisément faire varier la vitesse de rotation.

Actuellement, du groupe Ward-Leonard, on ne conserve que le moteur à courant continu qui ,cette fois, est associé à un variateur de vitesse statique (variateur électronique) dont la technologie est plus simple et peu onéreuse tout en demandant peu

d'entretien et en offrant des performances élevées dans une plage de vitesse très large (de 1 à 100 %).

- **Principe fonctionnement :**

Le moteur à courant continu se compose :

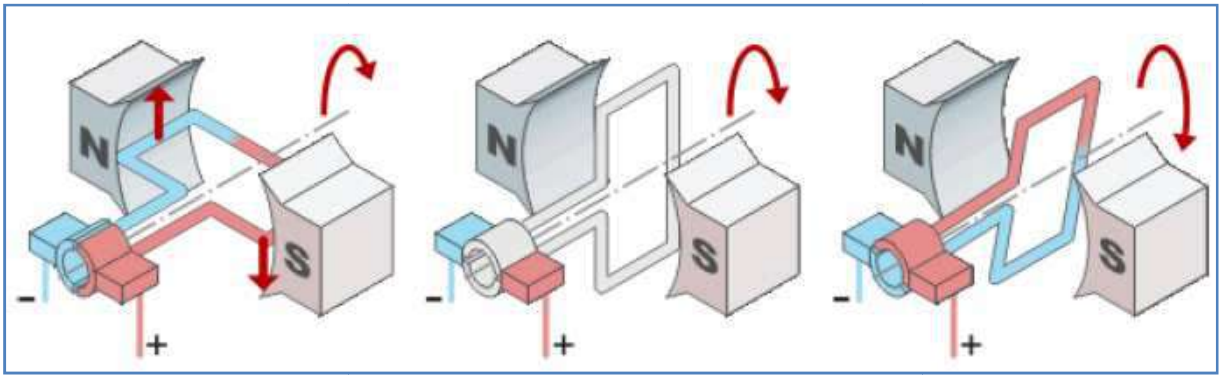
- de l'inducteur ou du stator.
- de l'induit ou du rotor.
- du collecteur et des balais.

Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme la figure ci-dessous), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud.

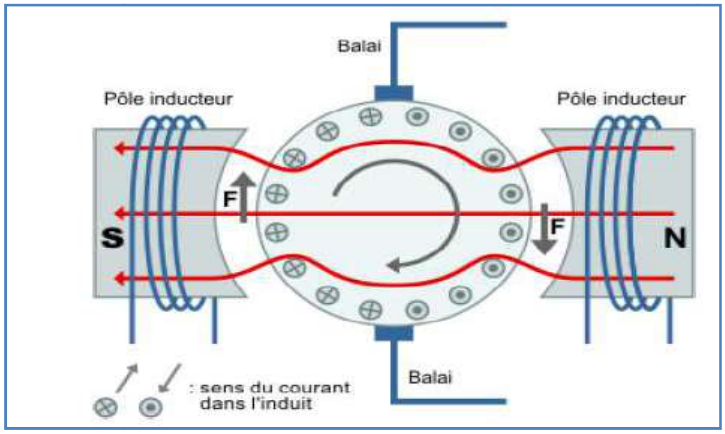
Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique.

De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteur.

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner !



Si le système balais-collecteurs n'était pas présent (simple spire alimentée en courant continu), la spire s'arrêterait de tourner en position verticale sur un axe appelé communément "Ligne neutre". Le système balais-collecteurs a pour rôle de faire commuter le sens du courant dans les deux conducteurs au passage de la ligne neutre. Le courant étant inversé, les forces motrices sur les conducteurs le sont aussi permettant ainsi de poursuivre la rotation de la spire.



Dans la pratique, la spire est remplacée par un induit (rotor) de conception très complexe sur lequel sont montés des enroulements (composés d'un grand nombre de spires) raccordés à un collecteur "calé" en bout d'arbre. Dans cette configuration, l'induit peut être considéré comme un seul et même enroulement semblable à une spire unique [21].

- **Les différents types de moteurs à courant continu**
  - Moteur à excitation indépendante.
  - Moteur à excitation en dérivation ou shunt).
  - Moteur à excitation en série.
  - Moteur à excitation composée.
  - Moteur à aimants permanents.

b) Moteur à courant alternatif :

Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés Pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permet l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste et moins cher (aussi faible besoin de maintenance) devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur PV [22].

I.4.7Le convertisseur :

1) Le convertisseur DC/DC (hacheur) :

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge (pompe alimentée par moteur à courant continu), la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.

2) Le convertisseur DC/AC (onduleur) :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par les panneaux solaires en un courant alternatif triphasé pour actionner le groupe moteur pompe.

L'onduleur fonctionne évidemment avec un circuit de génération des signaux PWM commandé par un circuit de régulation et de protection. Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe moteur pompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsque il n y a pas d'eau dans le puits. Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal.

I.5 La partie stockage :

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons: stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût, additionnel, des problèmes de maintenance de la batterie et de l'obligation de la remplacer après 3 à 5 ans d'usage. De plus, le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs.

Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement [23].

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les des différents composants du Système de pompage photovoltaïque et les deux méthodes de pompage avec et sans batterie.

II.1 Introduction :

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitue d'un générateur photovoltaïque, un hacheur, un onduleur et un groupe motopompe .les systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au fil du soleil, dans ce chapitre la modélisation de chaque composant est présentée.

II.2 La modélisation du champ photovoltaïque :

II.2.1 La modélisation d'une cellule solaire :

1) Cas idéal [24] :

La Figure ci-dessous présente un schéma simplifié d'une cellule solaire idéale :

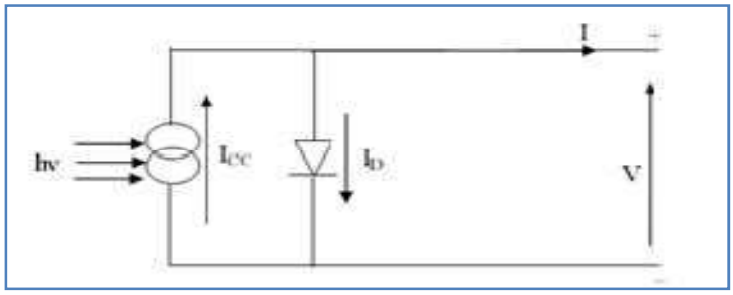


Figure II. 1: *Cellule solaire idéale.*

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

$$I = Icc - I\mathrm{d} = \mathrm{Icc} - \mathrm{Io}\left(\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{qv}}{\mathrm{kt}}} - 1\right) \qquad \text{(II. 1)}$$

I, V : Courant et tension fournis par la cellule. Id : Courant de diode donnée par:

$$Id = Io\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right) \qquad \text{(II. 2)}$$

2) Cas réel :

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (Rs et Rp) [25].

- **Rs :** Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contactes (Semi-conducteur, électrodes). Elle s'exprime par : [26]

$$Rs = \rho.\frac{L}{sg} + Rm \qquad (II.3)$$

Avec :

ρ : La résistivité de la grille.

L : La longueur de la grille.

Sg : Section des grilles collectrices.

Rm : Résistance propre du matériau, sa valeur est faible (< 2Ω pour les cellules au silicium)

- **Rp :** Résistance parallèle, dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

Rs et Rp modifient le courant de court-circuit de la cellule en photo- courant Iph, on aura donc le montage électrique équivalent suivant [25] :

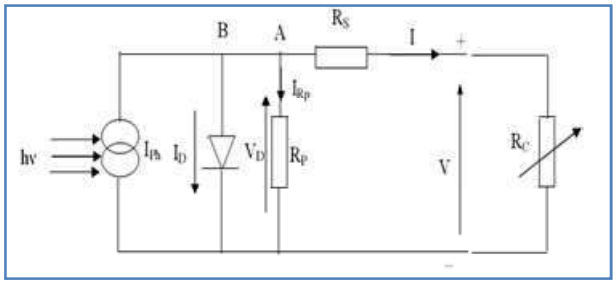


Figure II. 2: *Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.*

Appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B :

$$I = Iph - Id - Irp \qquad (II.4)$$

Le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

- $\boldsymbol{I_{ph}}$: Photo courant indépendant de V (ou de RS), il est proportionnel au flux incident (taux de génération-recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs [24]

$$Iph = qg(Ln + Lp) \qquad (II.5)$$

- $\boldsymbol{I_{Rp}}$: Courant traversant RP, si RP est très grande, il devient très faible est indépendant du tension [27]

$$I_{RP} = \frac{Vd}{Rp} = \frac{V + RsI}{R_P} \qquad (II.6)$$

Car :

$$V_d = R_P I_{RP} = V + R_S I \qquad (II.7)$$

- Id : Courant diode, il est de même ordre de grandeur que I_{RP} pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de VCO, il s'écrit sous la forme [8] :

$$Id = Io\left(e^{\frac{qV}{AkT}} - 1\right) \qquad (II.8)$$

Remplaçons dans (II.4) les équations (II.5), (II.6) et (II.8), l'équation caractéristique deviendra :

$$Id = Io\left(e^{\frac{qV}{AkT}} - 1\right) - \frac{V + RsI}{Rp} \qquad (II.9)$$

A : est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace.

Pour les cellules actuellement commercialisées au Silicium, on prend A=1.

La représentation graphique I = f (V) de l'équation (II.9) est illustrée dans la Figure II.3 **:**

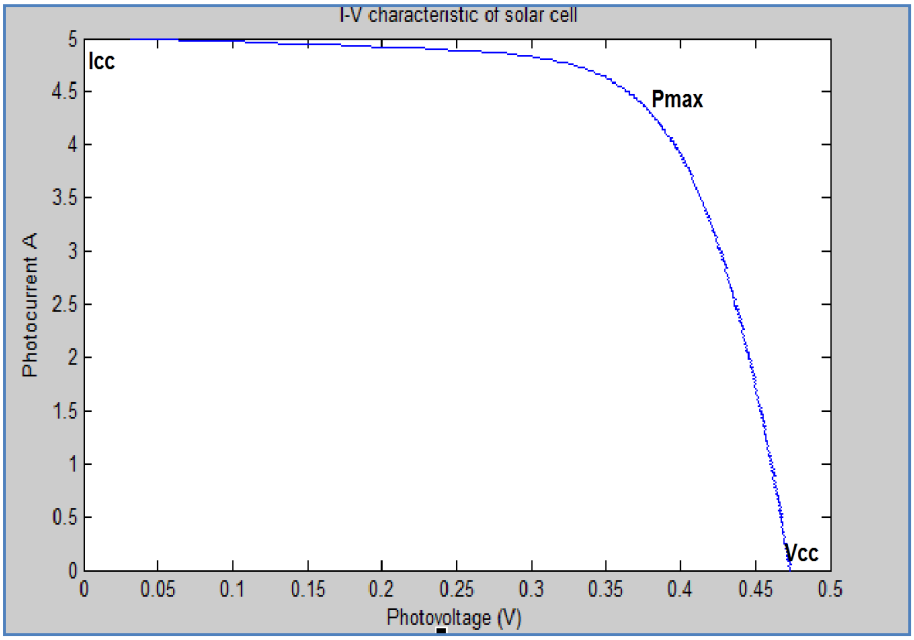


Figure II. 3*: Caractéristique d'une cellule solaire.*

II.2.2 Caractéristique I=f (V) d'une cellule solaire :

La caractéristique I= f (V) représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (II.9) et que la cellule fonctionne sous un éclairement fixe E et une température constante T.

Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones :

- Zone MN : Le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{CC}). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.
- Zone PS : Région correspondante aux valeurs élevées de RC. La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{CO}. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.
- Zone NP : Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

II.2.3 Paramètres caractéristique d'une cellule solaire :

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituants le champ PV :

- ***Courant de court-circuit I_{CC} :***

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (II.9) :

$$Icc = Iph - Io - \frac{RsIcc}{Rp} \qquad (II.10)$$

Dans le cas d'une cellule idéale (RS → 0 et RP → ∞)

$$Icc = Iph = qg(Ln + Lp) \qquad (II.11)$$

Tenant compte de l'effet des résistances RS et RP ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

- ***Tension en circuit ouvert :***

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (II.9)

$$I = Iph - Io\left(e^{\frac{qT}{AqT}} - 1\right) - \frac{\mathrm{V} + \mathrm{RsI}}{\mathrm{Rp}} \qquad (II.12)$$

Dans le cas d'une cellule idéale (RS → 0, RP → ∞, Iph = Icc et A =1)

$$Vco = \frac{nkT}{q} Log\left[1 + \frac{Icc}{Io}\right] \qquad (II.13)$$

- ***La Puissance maximale $Pmax$:***

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_m , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert $Vmax$ multipliée par le courant de court-circuit.

$$\mathrm{P_{max}} = \mathrm{V_{max}} \times \mathrm{I_{max}} \qquad (II.14)$$

Le produit ($\mathrm{V_{max}} \times \mathrm{I_{max}}$) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit $(V_{co}I_{sc})$.

- ***Facteur de forme FF :***

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{Pmax}{Popt} = \frac{ImVm}{IccVco} \qquad (II.15)$$

Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la). Caractéristique I = f (V)

- ***Rendement énergétique maximum ηm :***

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (Pi) :

$$\eta m = \frac{\mathrm{Pmax}}{\mathrm{pi}} = \frac{\mathrm{ImVm}}{\mathrm{E.S}} \qquad (II.16)$$

S : Surface de la cellule solaire.

E : Flux incident.

(Im,Vm) : Coordonnées du point de fonctionnement.

II.2.4 Groupement des cellules solaires :

a) Module photovoltaïque :

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante :

$$\mathrm{I}' = \mathrm{Iph} - \mathrm{Io}\left(\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{q}}{\mathrm{nAKT}}(\mathrm{V}'+\mathrm{RseI})} - 1\right) \qquad (II.17)$$

Avec I′: Le courant débité par le module photovoltaïque.

Et : Rse et Rpe résistance série et parallèle du module défini par :

$Rse = nRs$ et $Rpe = nRp$

b) Panneau photovoltaïque :

La modélisation d'un panneau composé de NS modules en série et NP modules en parallèle est [24]:

$$I' = NpIph - NpIo\left(e^{\frac{q}{nAkTNs}(V'+RsI)} - 1\right) - Nb\frac{V' + RseI'}{Rpe}) \qquad (II.18)$$

Avec : Rse et Rpe résistance série et parallèle du module défini par :

$$Rse = n\frac{Ns}{Np}.Rs \qquad \text{Et} \quad Rpe = n\frac{Ns}{Np}.Rp$$

II.3 Association des Modules :

Il existe trois types de l'association :

II.3.1 Association en série :

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

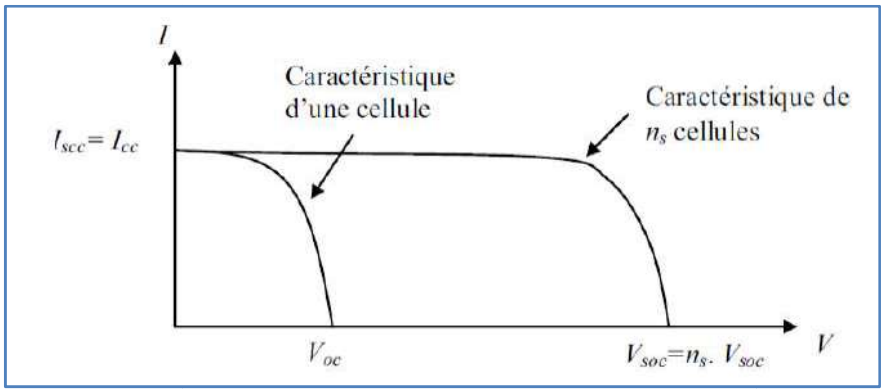


Figure II. 4: *Caractéristique résultante d'un groupement série de ns cellules identiques.*

II.3.2.Association en parallèle :

L'association en parallèle des photopiles délivre une courant égale à la somme des Courants individuelles et une tension égale à celui d'une seule cellule [28].

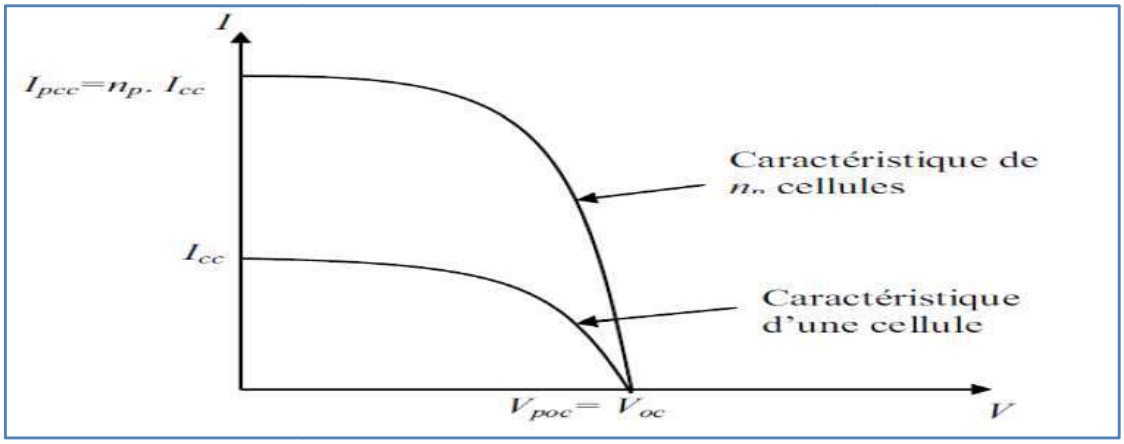


Figure II. 5 : *Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques.*

II.3.3. Association mixte des générateurs photovoltaïques :

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en Parallèle ; car une cellule ne suffit par pour alimenter une charge DC de la taille d'une station de pompage. Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion du générateur Photovoltaïque (GPV).

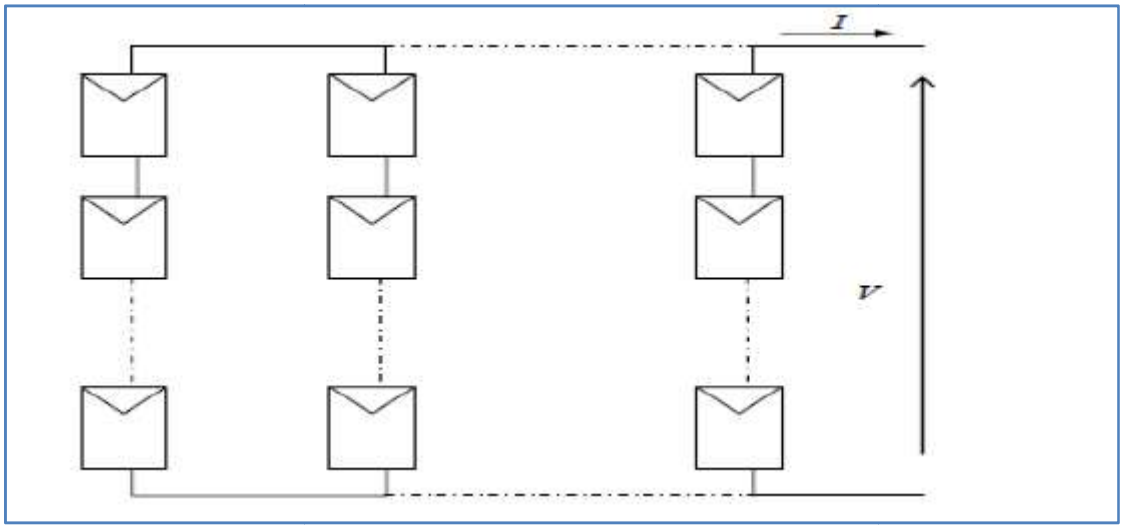


Figure II. 6: *Association de mixte des cellules solaires photovoltaïques.*

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série *Ns* cellules et *Np* parallèle est la suivante :

$$I' = NpIph - NpIo\left(e^{\frac{q}{nAkTNs}(V'+RsI)} - 1\right) - Nb\frac{V' + RseI'}{Rpe}) \qquad (II.19)$$

La figure (II.10) montre l'influence de groupement mixte sur la puissance et le courant d'un générateur Photovoltaïque.

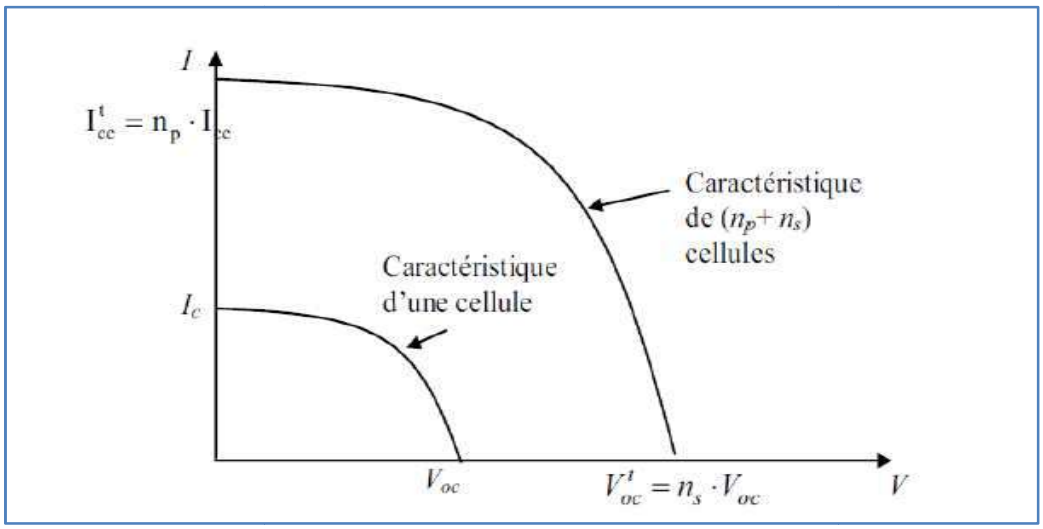


Figure II. 7 *: Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques.*

II4. Les paramètres qui influent sur la caractéristique I(V) :

- **Influence de l'éclairement :**

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique I= f (V) suivant l'axe des courants.

L'croissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [29].

L'influence du flux lumineux sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures (II.8), (II.9) à une température constante T= 25^0 C.

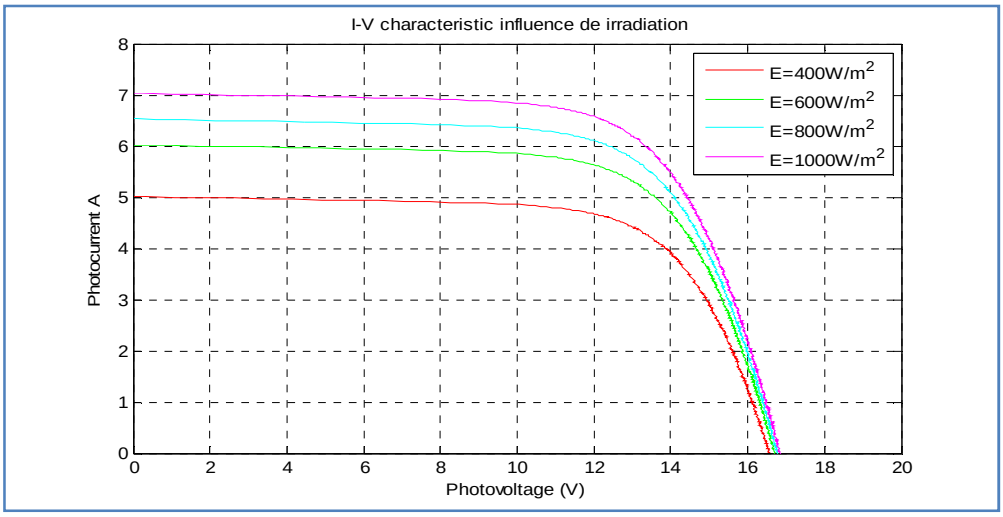


Figure II. 8: *Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V.*

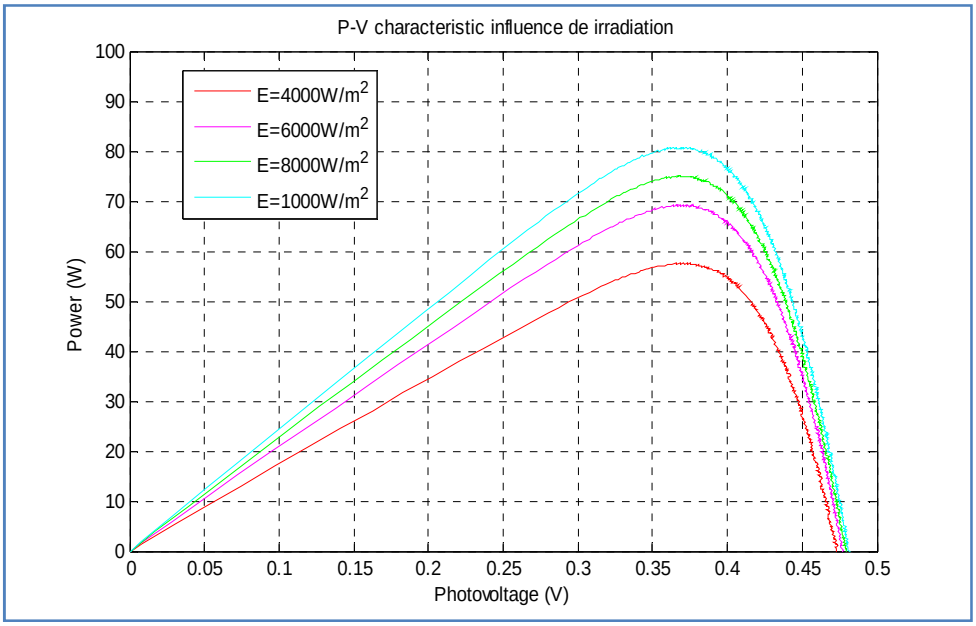


Figure II. 9: *Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V.*

➢ **Influence de la résistance série R_S :**

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contactes ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance

élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.

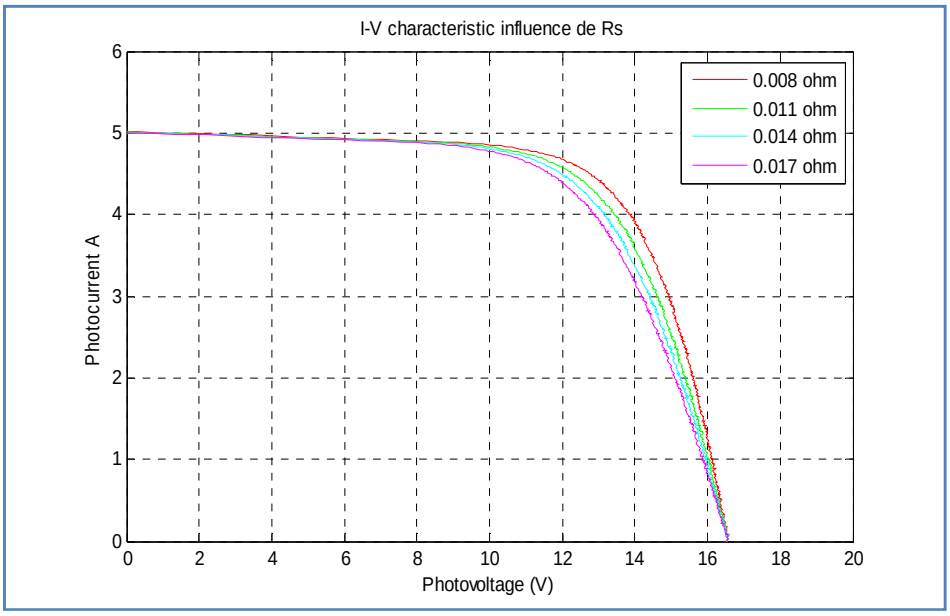


Figure II. 10:*Effet de Rs sur la caractéristique I-V.*

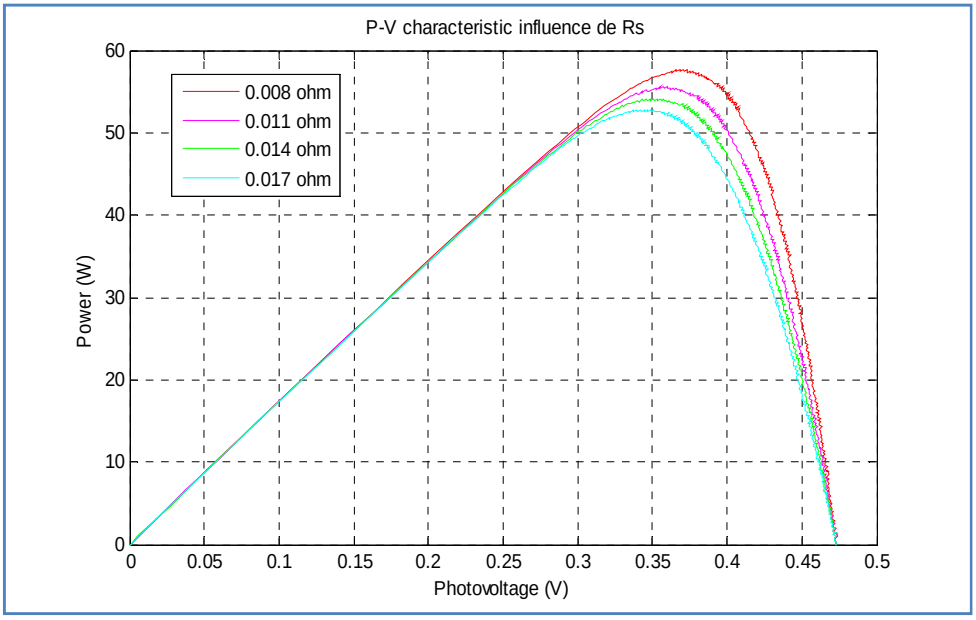


***Figure II. 11** : Effet de Rs sur la caractéristique P-V.*

- **Influence de la température :**

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant I_{ph} augmente également due principalement à la diminution du largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0,1% par degré ^{o}C. Le courant directe de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule [30].

La diminution de la puissance fournie est estimée environ de 0,5% par degré pour un module [31].

L'influence de la température sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures (II.12), (II.13) pour un éclairement fixe E =1000W/m^2.

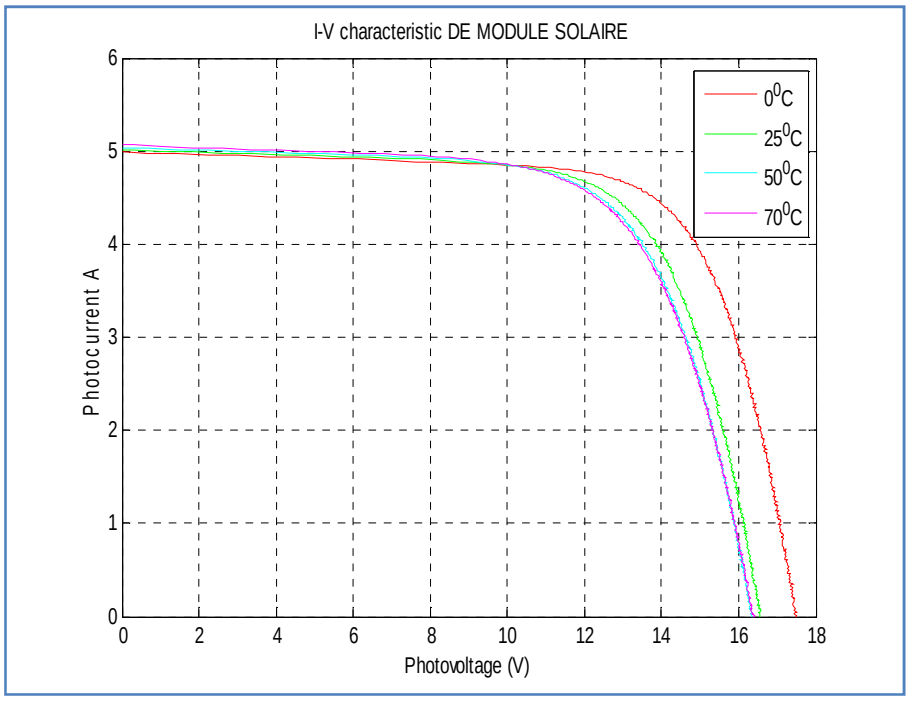


Figure II. 12: *Effet de température sur la caractéristique I-V.*

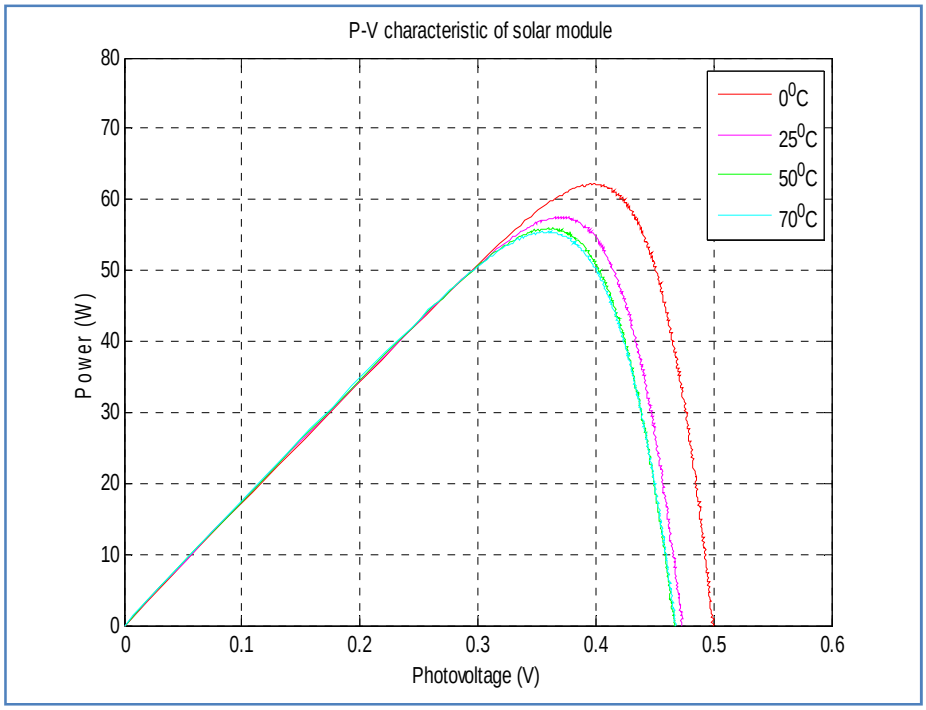


Figure II.13 : *Effet de température sur la caractéristique P-V.*

II.5 Les convertisseurs :

II.5.1 Les convertisseurs d'énergie :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge pour une charge continu (sans stockage avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (après stockage, il sera appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

Le convertisseur remplit les fonctions suivantes :

- Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.
- Sécurité.

1) Le convertisseur continu-continu (DC-DC) :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximale [32].

a) Hacheur dévolteur :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT…) et en série avec la source **Figure II.14.b** et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à DT, avec D: est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1.

Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de DT à T.

b) Hacheur survolteur

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, **Figure II.14.a**

Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance R pendant une durée t_f = DT bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.

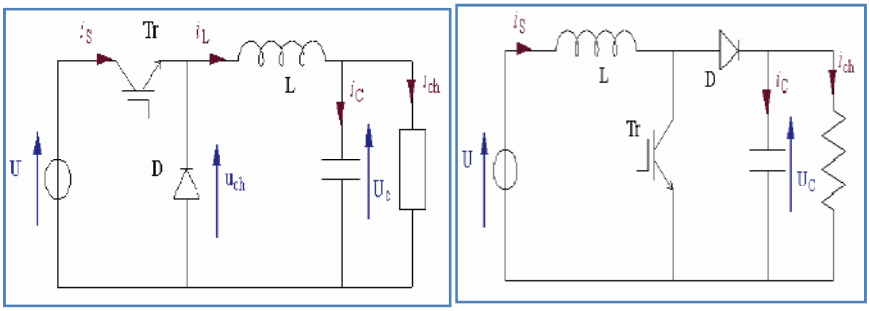


Figure II. 13.a: *Hacheur survolteur.* ***Figure II. 14. b:*** *Hacheur dévolteur.*

2) Le convertisseur continu-alternatif (DC-AC) :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif onduleurs autonomes La conception de l'ensemble du système photovoltaïque de façon à extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, quelles que soient les perturbations d'éclairement et de la température, l'alimentation sous la tension alternative des appareils à partir des panneaux solaires nécessitent l'utilisation d'un onduleur assurant la conversion DC/AC. Il Peut être conçu à base de transistors de puissance ou à thyristors utilisés comme commutateurs de puissance [33,34].

La fréquence de commutation de semi-conducteurs détermine la fréquence de la tension de sortie. L'onduleur autonome impose lui- même la forme et la fréquence de l'onde de sortie.

Dans le système de pompage photovoltaïque, la connexion entre le générateur photovoltaïque et la pompe entraînée par un moteur à courant alternatif est faite par un onduleur. Ce dernier permet de réaliser un transfert optimal de puissance entre le générateur et le groupe moto-pompe sous les conditions variables de la puissance produite et de la demande en puissance. Ce transfert est contrôlé par variation de fréquence.

Selon le mode de commutation, on peut distinguer :

- Onduleur à onde rectangulaire
- Onduleur à créneaux de largeur variable.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

  Le choix de l'une des solutions est tributaire des aspects suivants : coût, fiabilité, performances, disponibilité des composants, etc.

- **Différents types d'onduleurs**

Il existe deux types d'onduleurs qui se différentient par la nature de la fréquence de sortie, soit fixe

Ou soit variable, qui sont :

a) ***Onduleur à fréquence fixe :***

Son utilisation dans les systèmes de pompage nécessite l'interposition des batteries d'accumulateurs entre le générateur photovoltaïque et l'onduleur, ainsi la tension de fonctionnement du système est fixée par le système de stockage.

b) ***Onduleur à fréquence variable :***

Pour le fonctionnement au fil du soleil, assurant l'adaptation aux points de fonctionnement optimaux et utilisant des moteurs optimisés en rendement, cet onduleur s'adapte précisément aux systèmes de pompage photovoltaïques. Il délivre des signaux d'amplitude crête constante, mais de fréquence variable proportionnelle à la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque. La tension crête des impulsions est fixée par le circuit de contrôle de l'onduleur [35].

II.6 Modélisation du groupe motopompe :

Les systèmes de pompage photovoltaïques comportent nécessairement, outre le générateur, un "sous-système" constitué au moins d'un moteur électrique destiné à faire fonctionner une pompe. La figure (II.16) représente les différents éléments essentiels (et optionnels) d'un système de pompage solaire photovoltaïque. Comme un générateur photovoltaïque fournit un courant continu, il faut donc que le moteur électrique soit à courant continu.

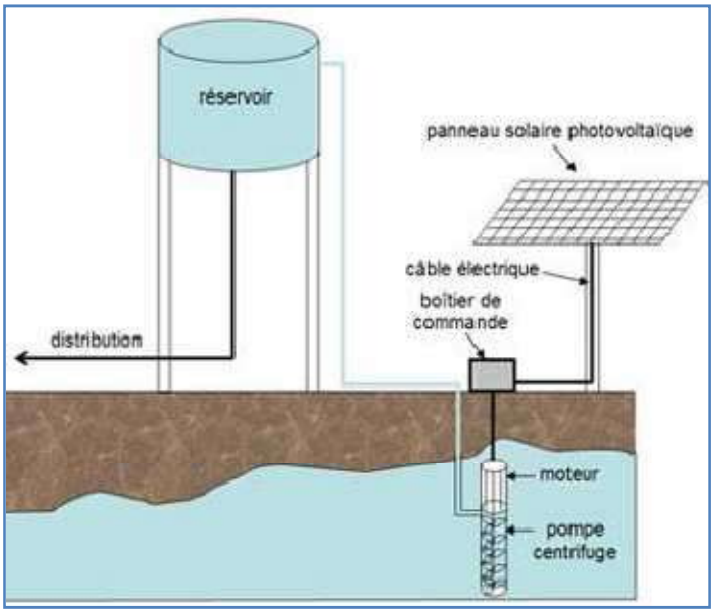


Figure II. 14 : *Structure d'une station de pompage photovoltaïque.*

II.6.1 Le Moteur :

Les pompes sont alimentées par un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils fonctionnent soit en alternatif, soit en continu. Parmi les moteurs à

Courant continu nous distinguons, trois types de moteurs qui sont utilisés dans les systèmes de pompage PV :

- Les moteurs à courant continu.
- Les moteurs à courant alternatif.
- Les moteurs à courant continu, sans balais, à commutation électronique (Brushless permanent magnétique DC Motors) [36]

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants

[37]:

- Bon rendement.
- Souplesse de fonctionnement.
- Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- Fiabilité et autonomie de l'installation.
- Faible puissance au démarrage.

II.6.1.1 La machine à courant continu :

La machine à courant continu peut être modélisée par le biais d'équations électrique, électromécanique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettrons de mieux appréhender la machine à courant continu dans son fonctionnement réel.

Du coté électrique nous pouvons dire que la machine à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit inducteur ; l'induit de la MCC peut être vu comme une résistance $R\alpha$ et une inductance L_α en série avec une source de tension commandée e_m (t) proportionnelle à la vitesse ω(t).

Du coté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée.

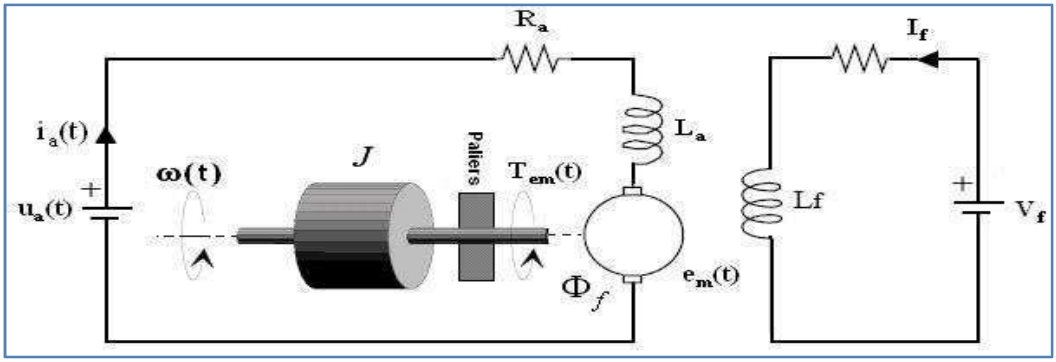


Figure II. 15: *Schéma d'un entraînement avec une MCC à excitation indépendante.*

❖ **Les signaux y intervenant sont les suivants:**

La tension aux bornes de l'induit ua (t) l'indice 'a' correspond à Anker , c'est à dire induit en langue allemande.

- Le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître :
- La résistance de l'induit $R\alpha$.
- L'inductance de l'induit L_α .
- Une tension $e_m(t)$ appelée f.é.m. (force électromotrice), proportionnelle à la vitesse angulaire ω(t).
- Le courant traversant le circuit d'induit (t).
- Le couple électromagnétique instantané Tem (t) produit.
- L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation φ_f .
- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie *J*, frottement visqueux,
- Élasticité de la transmission, etc.)

a) Equations électriques :

L'équation de tension induite s'écrit :

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + \mathrm{e_m(t)} \qquad \text{(II. 20)}$$

b) **Equations électromagnétiques**

La tension induit $e_m(t)$est donnée par :

$$e_m(t) = K_e . \omega(t) \qquad \text{(II. 21)}$$

k_e : Constants de tension

Le couple électromagnétique $T_{em}(t)$ développé a pour expression :

$$T_{em}(t) = K_t \cdot I_a \qquad \text{(II. 22)}$$

K_t *:* Constantes de couple de moteur.

c) Equations mécanique:

Le moteur en rotation est décrit par l'équation (de la dynamique) d'équilibre suivante :

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = \mathrm{T_{em}(t)} - \mathrm{B_m}.\omega(t) - T_r - T_f \qquad \text{(II. 23)}$$

Où:

J_t : Inertie totale entraînée (moteur J_m et charge J_{ch}).

B_m : Coefficient de frottement visqueux.

T_r : Couple résistant.

: Couple de frottement de coulomb.

II.7 Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [38] :

$$f(H, Q, W) = 0 \qquad \text{(II.32)}$$

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

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

$$H = H_s + H_d \qquad (II.33)$$

H : Hauteur totale du pompage.

Hs : Hauteur statique qui est la distance entre les niveaux statique de l'eau dans le puits jusqu'au

le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

Hd: Est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

II.7.1 Les pertes de charge :

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

II.7.1.1 Les pertes de charge linéaires :

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

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \qquad (II.33)$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

L : Longueur de la tuyauterie (m).

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

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

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

$$v = \frac{4Q}{\Pi D^2} \qquad (II.34)$$

Q : debit (m^3/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8Q^2}{\Pi^2 D^2 g}\right) \qquad (II.35)$$

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

II.7.1.2 Les pertes de charge singulières :

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

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\Pi^2 \Delta^4 g} \qquad \text{(II. 36)}$$

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$H_d = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon\right) . \frac{8Q^2}{\Pi^2 D^4} = k_{fr} Q^2 \qquad \text{(II. 37)}$$

Kfr : Constante de la canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H_{d=} H_s + k_{fr} Q^2$$

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, modélisation les composants du système de pompage d'eau PV proposé est discuté. Les composants sont: réseau photovoltaïque, dispositif d'interconnexion électronique de puissance (convertisseur DC-DC), moteur à courant continu et charge de la pompe centrifuge.

III.1 Introduction :

Ce chapitre pour déterminer les besoins en eau pour l'application donnée et d'évaluer les conditions locales d'exploitation de la pompe. Le lecteur sera ensuite en mesure de dimensionner les différents composants de la pompe solaire et de choisir les caractéristiques de ces éléments pour l'application donnée.

III.2 Méthode simple de dimensionnement :

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

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

III.2.1 Evaluation des besoins en eau :

Pour une région tropicale, les besoins en eau peuvent être définis en utilisant les valeurs du tableau suivant [39]:

Tableau III 1: Diagramme d'estimation des besoins en eau.

Humains
Par personne 5 à10 litres /jour minimum conditions de vie normale 30 litres/jour
Animaux
Moutons et chèvres 5 litres/jours Cheval 40 litres/jour Ane 20 litres/jour
Irrigation
Agriculture maraichère 60 m^3/hectare/jour Riz 100 m^3 / hectare/jour Sucre de canne 65 m3/ hectare/jour Coton 55 m^3/hectare/jour

III.2.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise :

Une fois les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits sont définis, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [39] :

$$E_h = C_h . Q . H_{MT} \qquad (III.1)$$

Avec :

E_h **:** Énergie hydraulique [kWh/j]

C_h: Constante hydraulique[kg.s.h/m^2]

Q : Volume d'eau [m^3/jour]

H_{MT} **:** Hauteur manométrique total [m]

Où :

C_h = g. ρ/3600

g **:** La gravité terrestre [9.81s/m^2]

ρ **:** Densité de l'eau [1000kg/m^3]

- ✓ **Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise :**

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP}} \qquad (III.2)$$

Où :

E_e : Energie électrique exprimé en [kwh/j]

η_{MP} : Le rendement du groupe motopompe, en général entre 30% et 60%.

III.2.3 Détermination de l'énergie solaire disponible **:**

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible à l'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal.

III.3 Taille du générateur photovoltaïque :

Deux méthodes sont utilisées pour le dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque : une méthode analytique et une méthode graphique. Ces méthodes permettent de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée.

III.3.1 Méthode analytique :

Une fois connus le volume journalier Q [m ^{3} /jour], la hauteur manométrique totale HMT et l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan du générateur, la puissance nominale correspondante du générateur photovoltaïque Pc est calculée par l'expression suivante [40] :

La puissance fournie par le générateur PV dans les conditions standards de mesure CSM, (éclairement de [1000w/ m^2]et la température 25°C).

$$P_c = \eta_g . A . G \qquad (III.3)$$

Avec :

Pc : La puissance de sortie du générateur (w) sous CSM (puissance crête).

η_g : Le rendement du générateur à la température de référence (25°C).

A : La surface active du générateur (m^2).

G : L'éclairement dans les conditions CSM.

L'énergie électrique journalière est donnée par l'équation :

$$E_e = \eta_{PV} . A . G_d(\beta) \qquad (III.4)$$

Où :

η_{PV} : Le rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$G_d(\beta)$: L'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β [kWh/m^2/j].

Le rendement η_{PV} est calculé par la formule suivante :

$$\eta_{PV} = F_m[1 - \gamma(T - T_r)]\eta_g \qquad (III.5)$$

Où :

Fm : Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximale.

γ : Coefficient de température des cellules. γ prend des valeurs entre 0,004 et 0.005 /°C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

III.3.1.1 Calcul de la puissance, en watts crêtes, que doit avoir le champ :

En substituant les équations (III.3), (III.4) et (III.5) dans (III.6), nous obtenons la puissance crête du générateur :

$$P_C = \frac{G}{F_m[1-\gamma(\mathrm{T}-\mathrm{T_r})]\mathrm{G_d}(\beta)} . \frac{E_h}{\eta_{MP}} \qquad (\mathrm{III.6})$$

Ou η_{MP} sont respectivement, lés rendements du groupe motopompe et F_m le facteur de couplage.

Après le calcul de la puissance du générateur PV, on détermine le nombre de modules constituants le générateur suivant la puissance du module PV choisie.

a) Nombres de modules :

Le nombre total de modules (N_M) constituant le générateur PV est calculé par la formule suivante :

$$\mathrm{N_M} = \mathrm{P_C}/\mathrm{P_M} \qquad (\mathrm{III.7})$$

Avec :

P_C : La puissance crête du générateur.

P_M : La puissance du module PV.

1) Nombre de modules en série :

Pour trouver la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en série de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l'expression suivante :

$$N_{MS} = \frac{V_{Ch}}{V_M} \qquad (\mathrm{III.8})$$

Avec :

V_{Ch} : La tension nominale de la charge.

V_M: La tension nominale du module.

2) *Nombre de modules en parallèle* :

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivante :

$$N_{MP} = \frac{N_M}{N_{MS}} \qquad \text{(III. 9)}$$

3) *Correction de la puissance crête* :

Dans la plus part des cas, les nombres de modules (en séries et/ou en parallèles) calculés ne sont pas des entiers ; il faux donc les arrondir pour trouver la nouvelle puissance corrigée.

III.3.2 Méthode graphique :

Le calcul de la puissance du générateur photovoltaïque peut être effectue de deux manières : soit par des expressions analytiques comme celle donnée si haut, ou bien en utilisant les abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur qui donne en fonction de l'irradiation globale la puissance nécessaire développée P_c par les panneaux pour faire fonctionner la pompe dans cette gamme de débit, et de HMT. Ces dernières sont assez pratique (voir Figure III.1) et résument les performances des différents pompes en fonction des conditions de leur utilisation [41].

- ✓ ***Les abaques :***

Ce sont des graphiques à lecture directe facilitant les calculs numériques. Graphiques servant à déterminer spontanément des résultats obtenus par des calculs dans un système de lignes prédéfinies et préparées d'avance. Les abaques s'exploitent par une lecture directe sans avoir à effectuer de tracés complémentaires en lisant directement les données se situant à l'intersection des droites correspondante par la lecture du point concourant en relation avec les besoins de l'intervenant.

Les constructeurs d'équipement élaborent de tels diagrammes sur la base des données calculées ou mesurées. Ce genre de graphes donne la configuration possible d'une électropompe. A titre d'exemple, la figure III.1 montre les caractéristiques de l'électropompe SP14A-3 donnée par le constructeur GRANDFOS.

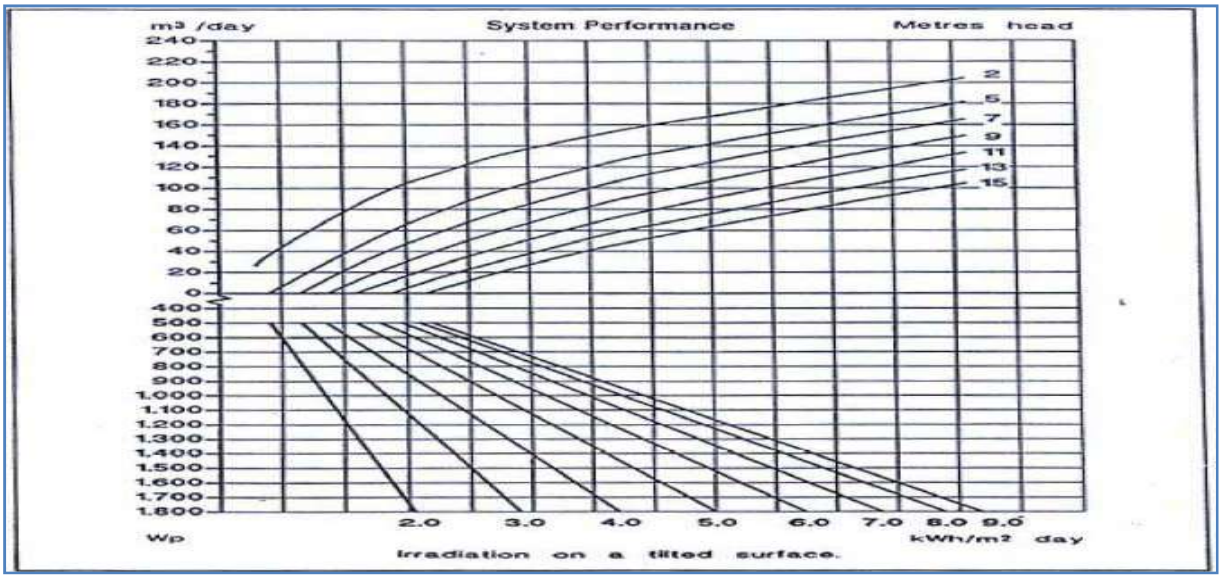


Figure III 1: *Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation.*

III.4 Dimensionnement de la pompe :

Le choix de la pompe est basé sur les deux facteurs suivants :

• La hauteur manométrique totale H_{MT}.

• Le débit horaire Q_h.

$$Q_h = \frac{Q[m^3/jour]}{h} \qquad (III.10)$$

h : est le nombre heures d'ensoleillement maximal à ($1000w/m^2$)

III.5 Dimensionnement des tuyauteries :

Le diamètre des tuyauteries peut être estimé en utilisant des tableaux ou des graphes qui

Expriment les pertes par frottements en fonction du débit pour chaque diamètre de la tuyauterie.

En pratique, il se présente le problème de fixer la hauteur dynamique hd pour des considérations économiques. En effet, si nous augmentons le diamètre D de la tuyauterie, hd diminue. Economiquement parlant, une augmentation de D suppose une augmentation des dépenses d'installation, mais en même temps une diminution des pertes d'énergie.

Le diamètre le plus économique sera celui qui réduit au minimum la somme des coûts de la tuyauterie et de l'énergie perdue par frottements [42].

Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui s'approximent à ceux qui minimisent les coûts des installations par la formule de Bresse [43] :

$$D = K\sqrt{Q} \qquad (\text{III.}11)$$

D : diamètre de la tuyauterie (m)

K : coefficient qui varie de 0,75 à 1,40

Q : débit crête de la pompe (m^3/s)

L'équation de continuité est :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V \qquad (\text{III.}12)$$

Choisir la valeur K équivaut à fixer la vitesse moyenne du fluide(v). Enfin en substituant dans l'équation de continuité la valeur de Q prise de la formule de Bresse, nous avons :

$$V = \frac{4}{\pi K^2} \qquad (III.13)$$

Quelque soit la formule employée, les diamètres obtenus diffèrent fréquemment des diamètres commerciaux. Il suffit de prendre la valeur du diamètre commercial le plus approche et d'ajouter les calculs en conséquence.

III.6 Dimensionnement des stations de pompage solaire :

Pour définir la puissance utile au fonctionnement de la pompe développée par les panneaux Solaires, les données minimums sont :

La situation géographique pour déterminer l'irradiation solaire globale.

Le débit pour déterminer les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.

La hauteur manométrique totale pour mesurer le niveau statique, le rabattement maximal, la hauteur du réservoir et les pertes de charge dues à la tuyauterie.

On procèdera comme suit :

1. Définir l'irradiation globale journalière mensuelle en [$Wh/m^2/j$] par rapport à la latitude de la zone de travail.

2. Choisir une pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale, (utiliser les abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur).

3. Déterminer la puissance crête P_c nécessaire au fonctionnement de la pompe par la méthode analytique ou graphique.

4. Choisir le type de panneau solaire (définir leur puissance nominale P_n).

5. Déterminer le nombre de panneaux par la relation P_c/P_n.

6 Vérifier la tension nominale pour le fonctionnement (selon les modèles).

7. Déterminer le nombre de module série / parallèle (la forme de connexion).

Le schéma ci-dessous explique les démarches à suivre pour la détermination de la taille du générateur PV.

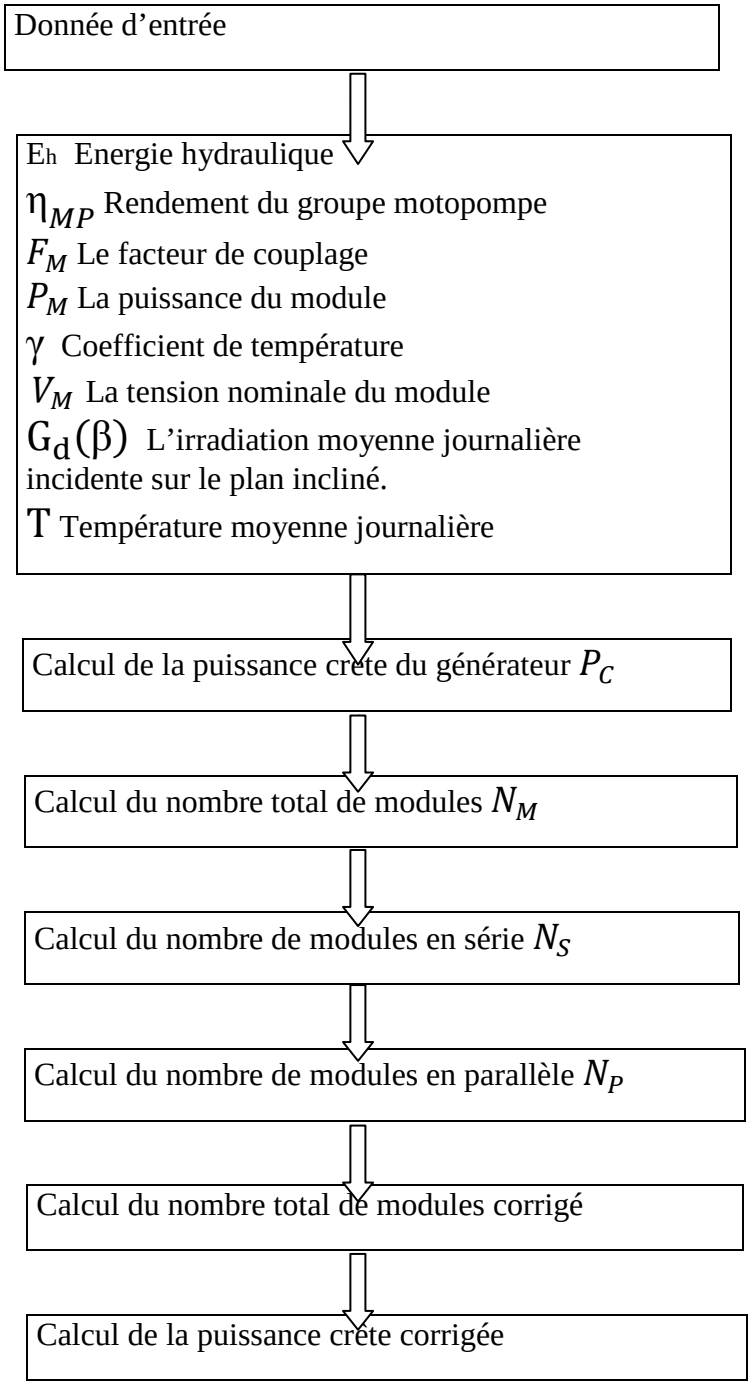


***Figure III 2**: Les étapes du calcul de la taille du générateur*

III.7 Résultats numériques :

Pour un éclairement : **E= 1000 w/m^2** et température T=25^{o}C

- La puissance de sortie du générateur PV : **P = 180 w.**
- Le débit maximal de la pompe : **Q = 13 m^3/h.**
- La hauteur maximale de la pompe : **H = 14 m.**

Tableau III 2 : *Dimensionnement de la pompe.*

Profondeur (m)	14
Besoins journalier (m^3)	13
Energie Hydraulique (Wh/j)	495.95
Energie Électrique (Wh/j)	991.9

Tableau III 3 : *Caractéristiques du site.*

Lieu du projet	Medea
Latitude du lieu °N	36.26
Rayonnement solaire (W/m^2)	1000
Température Moyenne (°C)	25

Tableau III 4 *: Caractéristiques du Module.*

Puissance nominale (W)	180
Tension nominale (V)	54.2
Température nominale (°C)	24
Coefficient de température	0.005

Tableau III 5 : *Taille du Générateur.*

Energie électrique (Wh/j)	991.9
Tension de sortie (V)	130
Puissance crête (W)	5941.7
Puissance du module (W)	180
Nombres de modules	433
Modules en série	2
Module en parallèle	16
Nombres de modules corrigés	32
Puissance crête corrigée (W)	5760

Comme nous pouvons constater à partir le tableur ci-dessus, en se basant sur la connaisse des conditions spécifiques du site (système de pompage), de l'énergie consommée et des caractéristiques des modules PV choisis, nous calculons la taille du générateur photovoltaïque destiné.

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre on 'a dimensionner les différents composants de la pompe solaire, et calculer la taille de générateur PV, Selon l'étude, le générateur photovoltaïque adéquat est constitué de 32 modules photovoltaïques d'une puissance crête de 180 W chacun. Ainsi, la puissance crête du générateur PV est de 5760 W.

IV.1 Introduction :

Ce chapitre décrit comment les modèles SIMULINK des systèmes d'alimentation PV proposés sont mis en place pour tester et vérifier la fonctionnalité des commandes MPPT proposées. Dans cette thèse, Système de pompage photovoltaïque est également simulé dans MATLAB.

IV.2 Conception et simulation du système :

Le système a été modélisé et simulé dans MATLAB / SIMULINK. Le modèle complet SIMULINK du système proposé est illustré à la Fig. IV.1. Le système modélisé se compose principalement du modèle de réseau photovoltaïque, du modèle de convertisseur DC / DC, utilisé pour interagir la sortie PV, avec la charge afin de suivre la puissance maximale du réseau photovoltaïque. Pour effectuer le suivi de la puissance maximale utile MPPT (Maximum power point tracker).

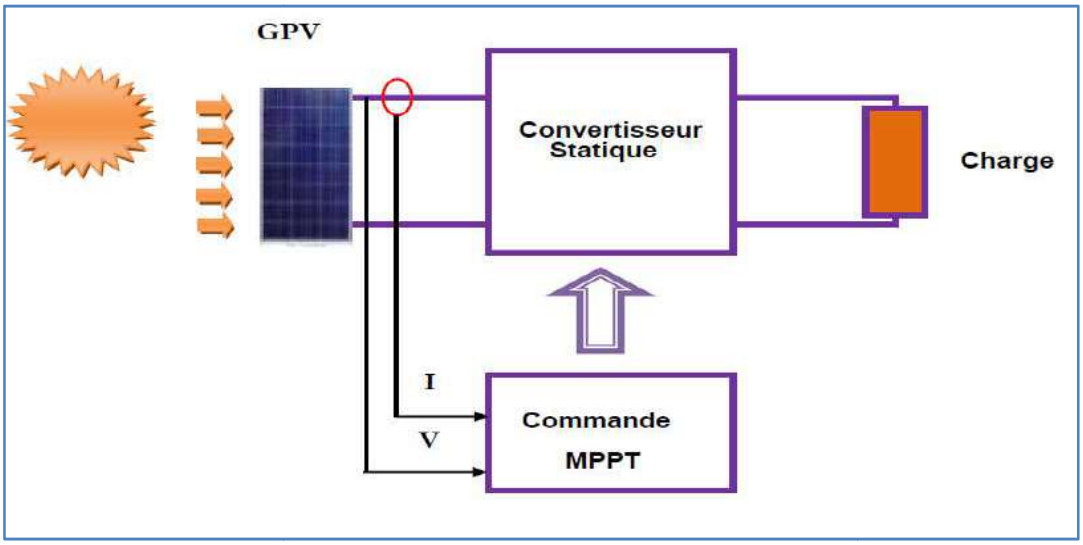


Figure IV 1: *Modèle SIMULINK du* système photovoltaïque avec algorithme MPPT.

IV.3 modèle PV :

Le simulateur de modèle PV a été implémenté dans MATLAB. Le code a été masqué dans Embedded MATLAB Fonction construit électriquement en tant que source de courant à tension contrôlée et le bloc global peut être vu dans la Fig. IV.2. La température T, l'isolation G et PV, la Tension V_{PV} sont alimentés à la fonction Embedded MATLAB et la sortie est le courant produit par le panneau.

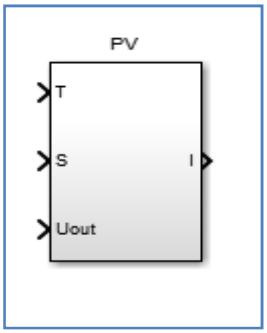


Figure IV 2: *SIMULINK model PV.*

Le panneau PV utilisé dans la simulation est illustré à la Fig. IV.3. Pour valider le modèle, habituellement des conditions standard spécifiées à l'irradiation de (G = 1000 W / m^2) et la température de (T = 25°C).



Figure IV 3: *Photo de PV module.*

La performance de base diffère d'un panneau PV à l'autre, donc les paramètres typiques sont généralement donnés dans une fiche technique. La fiche technique fournit des paramètres importants concernant la caractéristique et la performance du panneau PV dans des conditions de test standard.

IV.4 Convertisseur DC-DC (Hacheur survolteur) :

Le hacheur ou convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Le convertisseur dévolteur survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé

pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie [44].

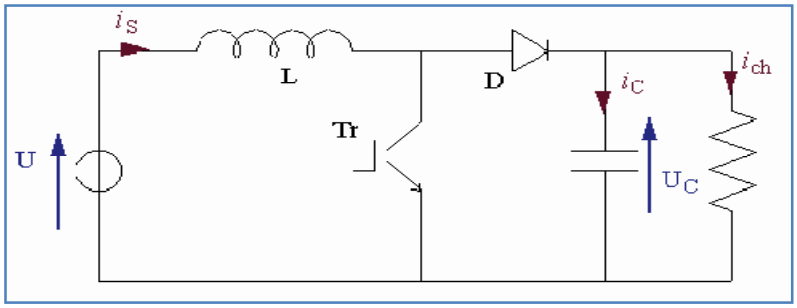


***Figure IV 4**: Hacheur survolteur.*

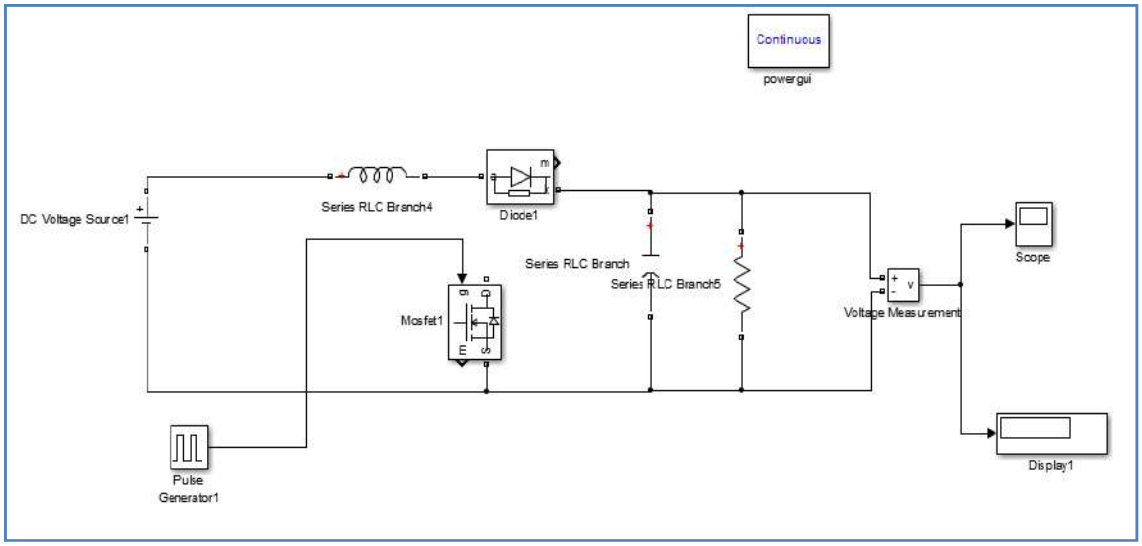


Figure IV 5 : *Schéma Simulink d'hacheur.*

Les convertisseurs DC-DC, convertisseur buck et convertisseur « boost », qui sont les plus généralement employés par la majorité des concepteurs du suiveur de puissance maximum.

Dans le travail actuel, le convertisseur « boost » est choisi puisqu'il a d'excellentes caractéristiques telles que les possibilités des tensions élevées et de rendement important, la petite taille et le bas prix.

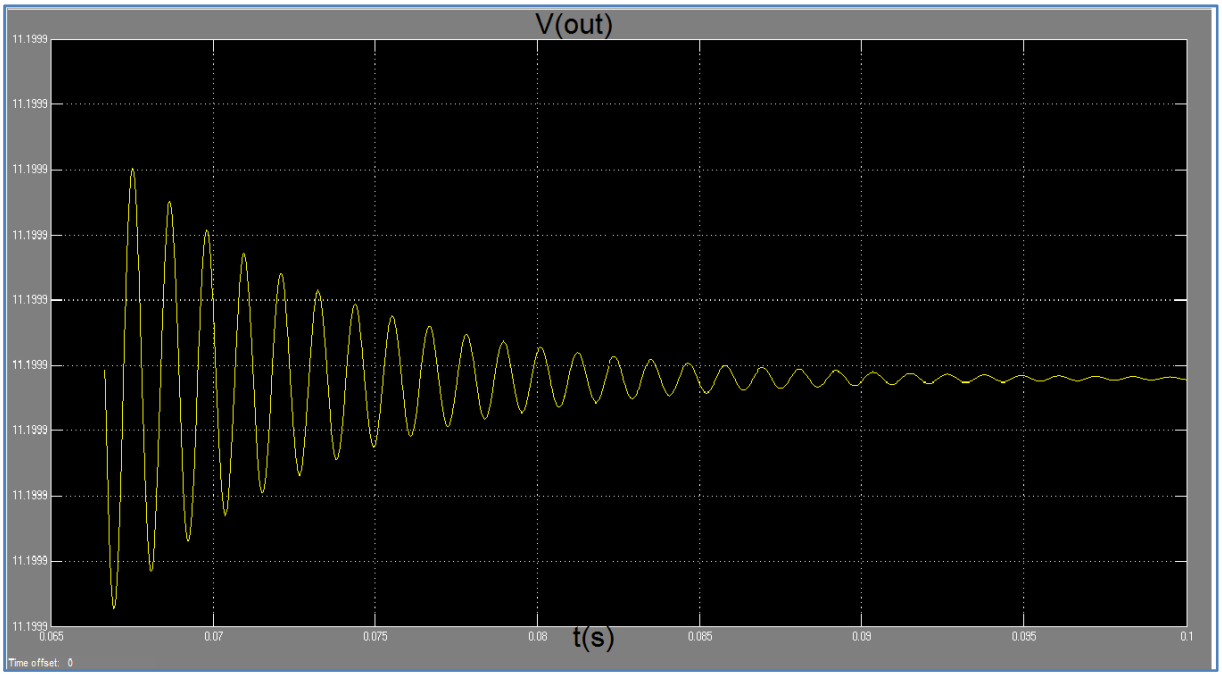


Figure IV 6 : *La tension de sortie de l'hacheur pour une tension d'entrée V=12v.*

IV.5 Mise en œuvre de la commande de poursuite MPPT :

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé.

Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique I-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [45].

IV.5.1 La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O :

La méthode P&O est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance PPM. En effet, dans le cas d'une application photovoltaïque, il s'agit concrètement d'un algorithme qui [46] :

- Pour une tension U(k) fixée va mesurer la puissance correspondante P(k) délivrée par le générateur
- Après un certain temps, l'algorithme impose une tension U (k+1) = U(k) + ΔU et mesure également la puissance correspondante P (k+1),

- Si P (k+1) est supérieure à P(k) : l'algorithme cherche à imposer une tension plus grande U (k+2) = U (k+1) + ΔU. Sinon l'algorithme cherchera au contraire à abaisser la tension U (k+2) = U (k+1) − ΔU

La trajectoire de la variation de ces points est représentée sur la figure IV.7.

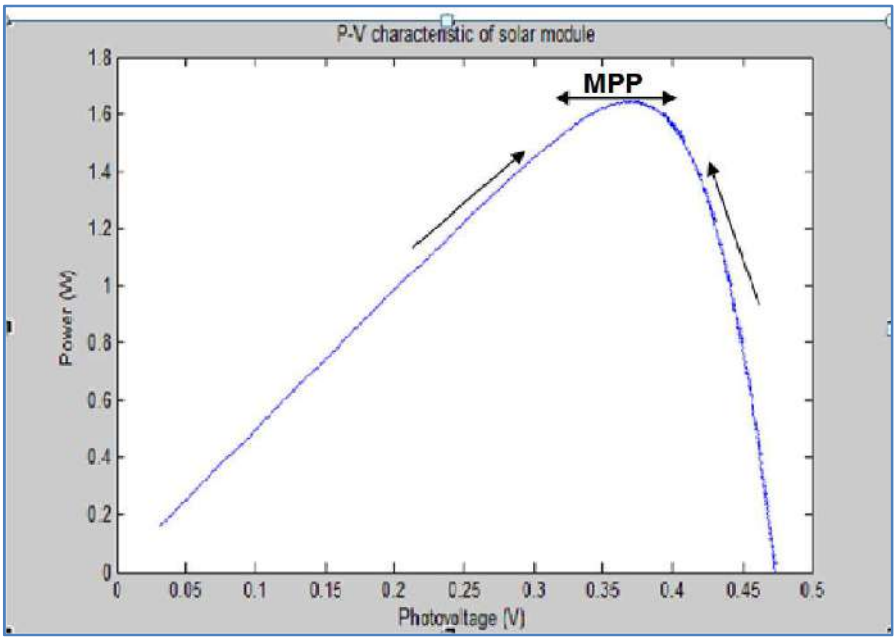


Figure IV 7: *Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau* solaire.

De cette manière, le système adapte en permanence la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin de se rapprocher du point de puissance maximum, mais sans jamais l'atteindre précisément. D'autres algorithmes différents existent aussi et des solutions entièrement analogiques parfois assez simples à mettre en œuvre.

IV.5.2 Principe du contrôle MPPT :

Le MPPT commande un étage d'adaptation qui permet de relier aisément un générateur photovoltaïque à une charge de type continue (DC) pour avoir un rendement de conversion très élevé. Pour utiliser le concept du transformateur DC avec rapport de transformation variable pour l'adaptation d'un générateur PV à une charge DC, il suffit de faire varier le rapport de transformation n(D) pour trouver le point d'adaptation optimal entre le générateur PV et la charge de manière à transférer le maximum de puissance du générateur. Etant donnée la caractéristique du générateur PV, cette variation doit suivre les ordres de commande délivrées par une commande de type MPPT. L'action de contrôle provenant de la commande MPPT va induire la variation de rapport de transformation qui va indirectement correspondre à une variation de rapport cyclique du convertisseur statique DC-DC [46].

$$V_S = n(D).V_e \qquad (IV.1)$$

Si on prend l'exemple du convertisseur DC-DC (SEPIC), la tension d'entrée du Convertisseur :

$$V_e = \frac{V_s(1-D)}{D} \qquad (IV.2)$$

V_e : La tension d'entrée.

V_s : La tension de sortie.

D: Le rapport cyclique du convertisseur.

L'impédance vue par le générateur PV estR_e.

$$R_e = R_{ch}(1-D)^2/D^2 \qquad (IV.3)$$

Si D augmente R_e diminue, la tension diminue aussi.

Si D diminue R_e augmente, la tension augmente aussi.

Le contrôle MPPT (figure IV.10) fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, qui influe sur le sens de la variation de tension de telle sorte que la puissance fournie par le générateur PV soit la puissance maximale disponible à ses bornes.

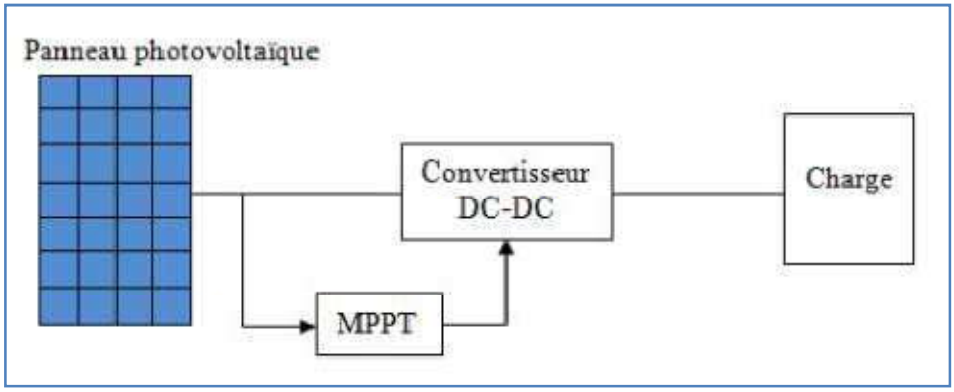


Figure IV 8: *Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT.*

IV.6 Simulation du système de pompage d'eau photovoltaïque avec régulateurs MPPT :

Le modèle Simulink du système proposé est illustré à la Fig. IV.9. Le système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur amplificateur et un ensemble de pompe et moteur à courant continu.

Dans ce type de systèmes, il est utilisé principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou à déplacement positif . Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation .

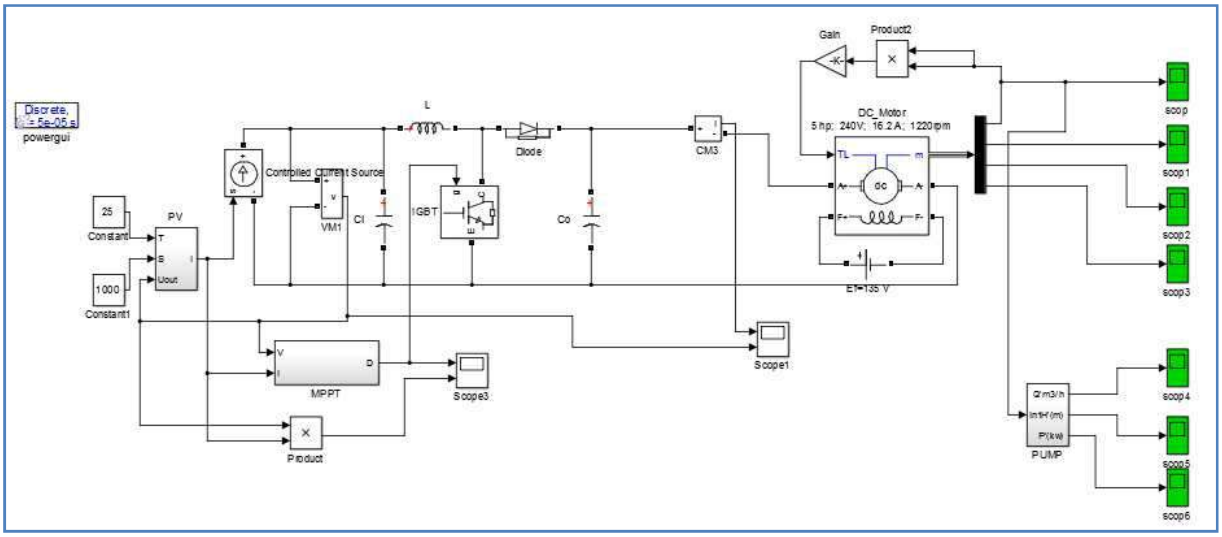


Figure IV 9: *Simulink model of the system.*

IV.6.1 Modèle Simulink de la machine à courant continu :

L'ensemble de ce qui précède nous permet de réaliser le modèle Simulink (c'est à dire le modèle utilisé en simulation dans MatLab/Simulink) de la machine à courant continu comme suit :

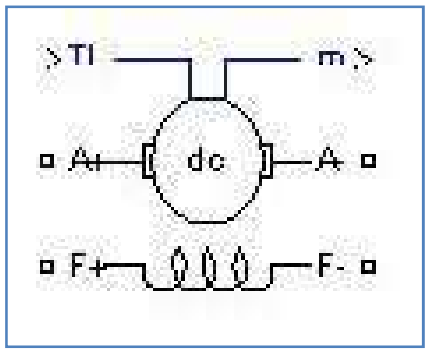


Figure IV 10*: Bloc de la MCC sous Simulink.*

IV.6.2 Modèle de la pompe centrifuge : [47]

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_r = K_{ch} * \omega^2 \qquad \text{(IV. 4)}$$

Avec K_{ch}: désigne la constante de proportionnalité et ω: la vitesse de rotation du moteur.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q, H et P) pour la vitesse **N**, les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q', H' et P') pour une vitesse **N'**en utilisant les relations suivantes

$$Q' = Q\frac{N}{N'} \qquad H' = H(\frac{N}{N'})^2 \qquad P' = P(\frac{N}{N'})^3$$

Avec Q et Q', les débits correspondants respectivement à la vitesse N et N; ' H et H' les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse N et N; et ' P et P' sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse N et N '.

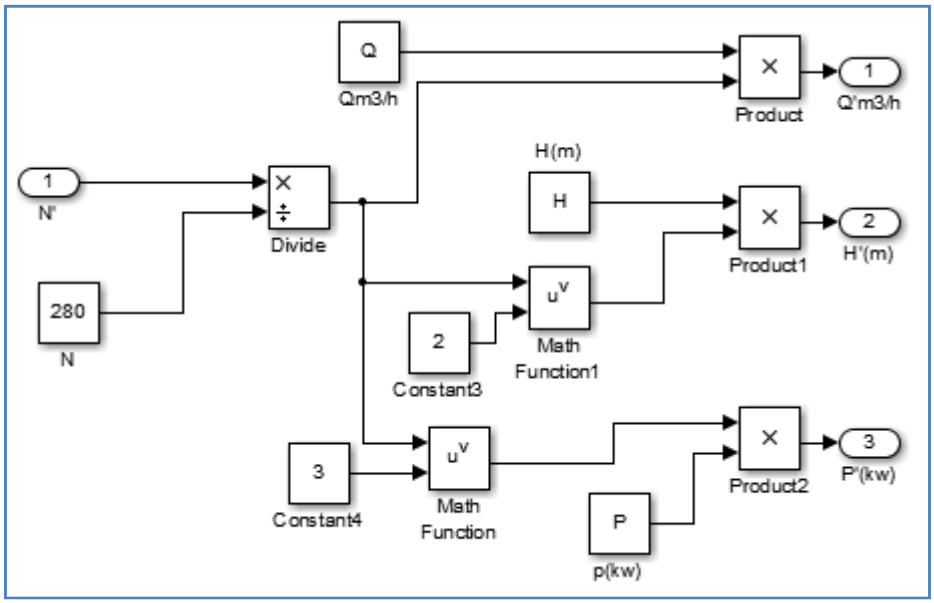


Figure IV 11: *Bloc SIMULINK de la pompe centrifuge.*

Le système de pompage d'eau photovoltaïque SIMULINK utilisé pour tester les techniques MPPT proposées est présenté à la Fig. IV.9 Les paramètres de chaque bloc utilisé dans ce système sont répertoriés dans Les Tableau suivant :

***Tableau IV 1** : Paramètres de moteur.*

Moteur	
Armature résistance(Ra)	1.5Ω
Armature inductance(La)	0.2 H
Viscous friction coefficient(B)	0.002387 N.m.s/rad
Moment of inertia(J)	0.02387 (kg/m^2)
Armature voltage (Va)	130 V

***Tableau IV 2 :** Paramètres de Pompe centrifuge.*

Pompe centrifuge	
Débit maximal (Qmax)	$30m^3/h$
Relevage maximal (Hr)	80m
Puissance moteur (Pm)	14kw

***Tableau IV 3 :** Caractéristiques électriques du module Photovoltaïque 96 SANYO HIT180-180W en condition de test standard .*

PV model	
Maximum power(Pmax)	180w
Maximum Power Voltage (*Vpm*)	54.2 V
Maximum Power Current (*Ipm*)	3.33 A
Open-Circuit Voltage (*Voc*)	66 V
Short-Circuit Current (*Isc*)	3.65 A
Series Resistance (*RS*)	0.3345 Ω

Tableau IV 4 : *Paramètre de boost converter.*

boost converter	
L	0.005 H
Ci	$9*10^{-4}$ F
Co	$9*10^{-4}$ F

IV.7 Résultats de simulation :

Les résultats de simulation illustrés par la Figure ci-dessous concernent le groupe motopompe (MCC + pompe) alimenté par un GPV un éclairement constant E=1000w/m^2 et T=25^{o}C.

A partir les Paramètre dans les tableaux ci- dessus Toutes les grandeurs (vitesse, puissance du GPV, débit et hateur) se stabilisent après un temps de réponse t = 2 s.

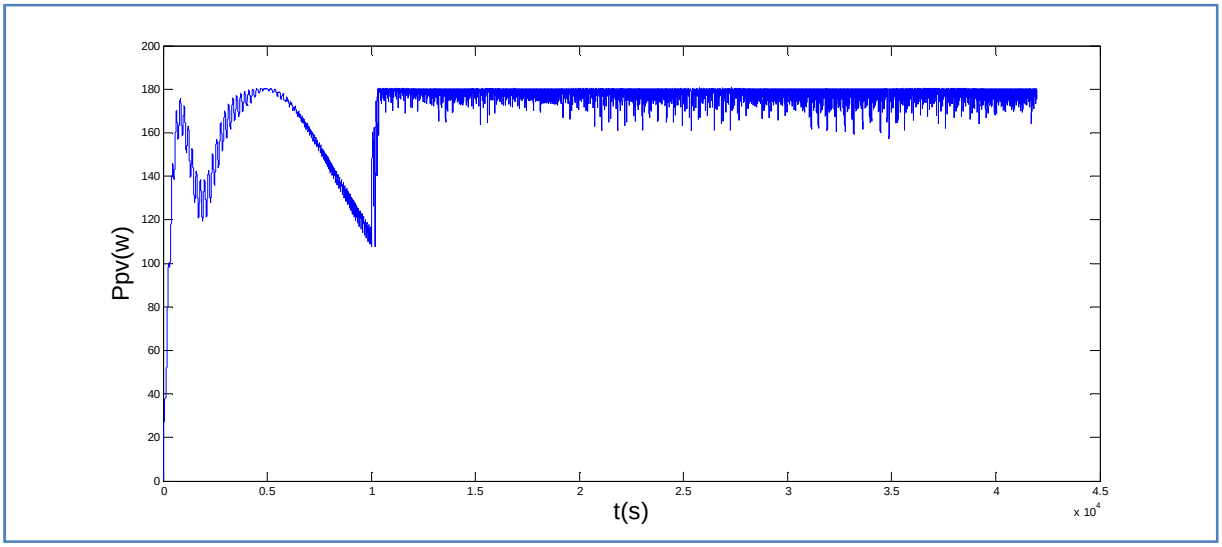


Figure IV 12: *Puissance du GPV P(t).*

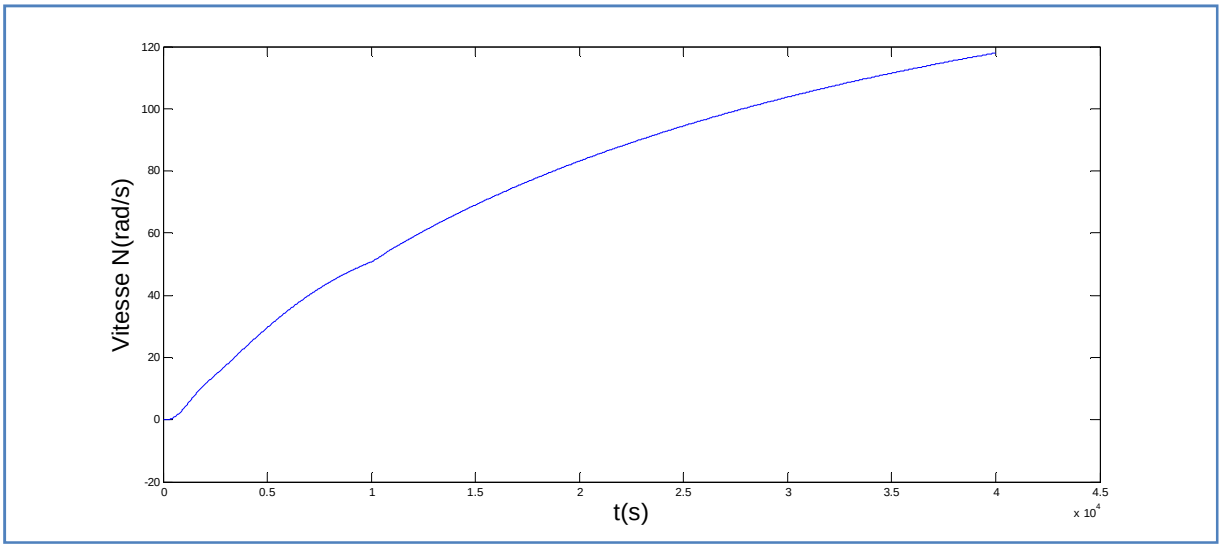


Figure IV 13: *Vitesse du rotor ω(t).*

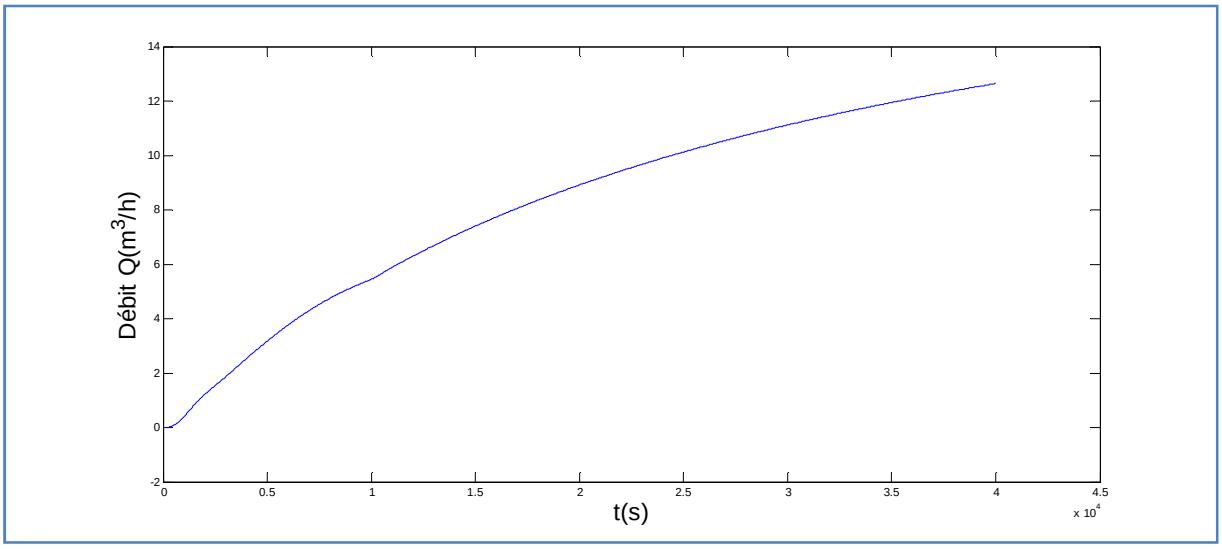


Figure IV 14: *Débit de la pompe Q(t).*

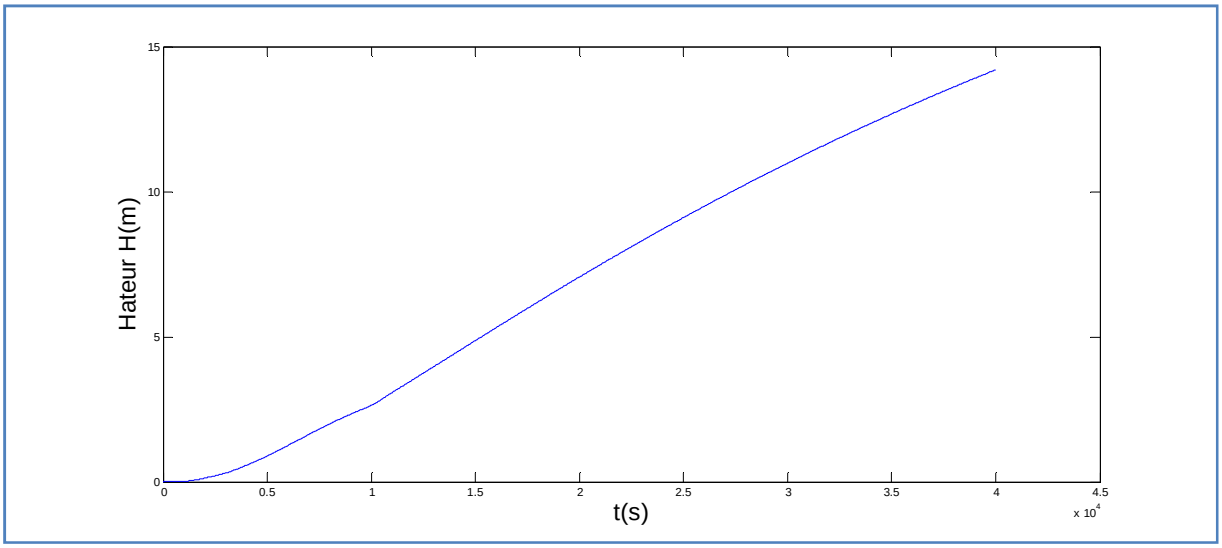


***Figure IV 15**: Hauteur manométrique de la pompe H(t).*

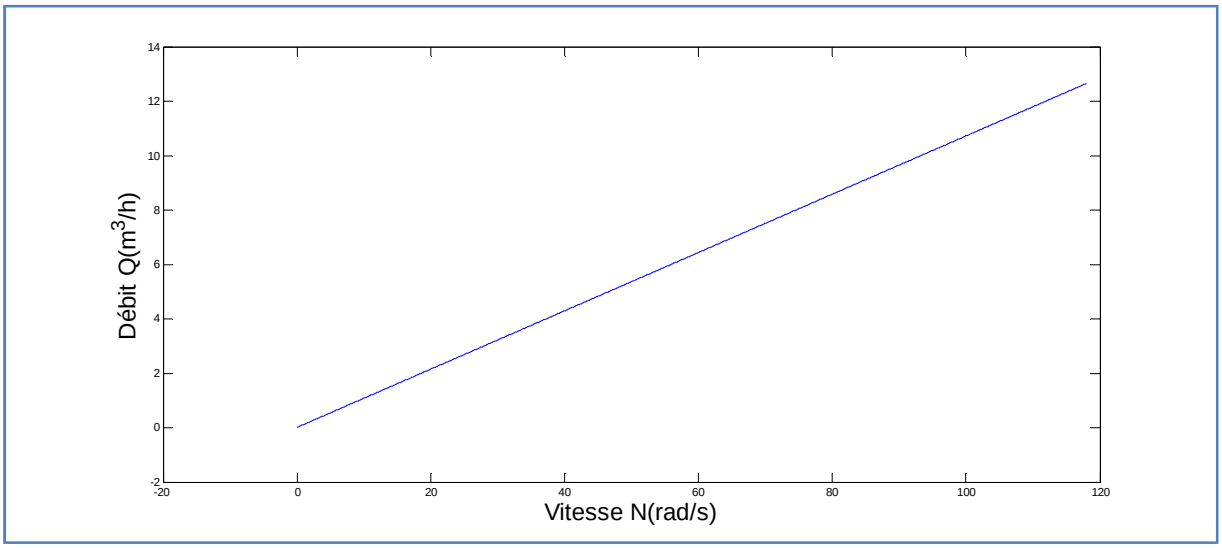


***Figure IV 16:** Caractéristique Q=f (N) de la pompe.*

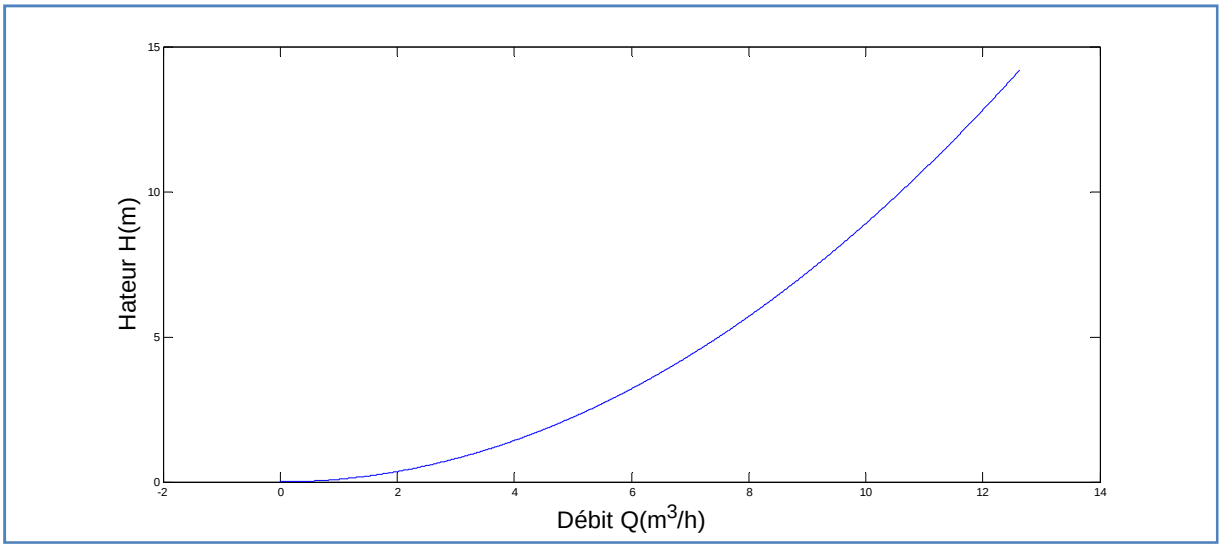


Figure IV 17 : *Caractéristique H=f (Q) de la pompe.*

- ✓ ***Résultats numériques :***

Pour un éclairement : **E= 1000 w/m^2** et température T=25^{o}C

- La puissance de sortie du générateur PV : **P = 180 w.**
- Le débit maximal de la pompe : **Q = 13 m^3/h.**
- La hauteur maximale de la pompe : **H = 14 m.**

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible.

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats d'une étude de simulation de model (pompage PV) et présenté les différents éléments de ce système photovoltaïque qui sont : un générateur photovoltaïque, une pompe et un convertisseur (boost), moteur accourant continue et après la simulation nous avons conclu la taille du générateur photovoltaïque destiné.

Conclusion général :

Ici, le système de pompage PV a été analysé avec son Portée et limites. Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement Conçus pour fournir de l'eau et de l'irrigation dans les zones où Il n'y a pas d'alimentation électrique. Les principaux avantages de Les pompes à main ou les pompes à moteur à combustion interne sont Maintenance pratiquement nul, leur longue durée de vie utile, qu'ils Ne nécessitent pas de carburant, qu'ils ne contaminent pas, et enfin Qu'ils sont simples à installer. Un autre élément important La caractéristique est que, comme ils utilisent le soleil comme énergie Source, les périodes de demande maximale d'eau coïncident Avec les périodes de rayonnement solaire maximal. Quand Par rapport aux systèmes de pompage diesel, le coût de Système de pompage d'eau photovoltaïque sans travaux de subvention Soit 64,2% du coût de la pompe diesel, au cours d'une vie Cycle de dix ans. Les pompes solaires sont disponibles pour pomper à partir de N'importe où dans la gamme allant jusqu'à 200 m de tête et avec des sorties Jusqu'à 250 m^3 / jour. En général, les pompes photovoltaïques sont Économiques par rapport aux pompes diesel jusqu'à environ 3kW pour l'approvisionnement en eau du village et environ 1kW pour irrigation. Les ensembles photovoltaïques solaires (SPV) représentent un Respectueux de l'environnement, peu entretenu et rentable Alternative aux ensembles de pompes d'irrigation qui fonctionnent sur la grille L'électricité ou le diesel.

Les travaux présentés dans cette thèse concernent l'étude et la commande d'une chaine de pompage photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale et énergétiquement autonome. Aujourd'hui, La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles diminuent à cause du développement démographique et du développement de l'industrie. Pour résoudre ce problème, les chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie solaire, qui se trouve dans la plupart des régions du monde. Cependant, cette énergie souffre encore du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de la puissance intermittente à cause de la variation des conditions météorologiques dans certaines régions. Ces problèmes doivent être pris en considération lors de la conception d'un système photovoltaïque.

L'ensemble de ces travaux présentés dans cette thèse nous a permis d'identifier plusieurs pistes de recherches pour nos prochains travaux. A court terme une validation expérimentale de la chaine de pompage étudiée est envisagée. D'autres perspectives peuvent être envisagées à moyen terme, il s'agit d'étudier la gestion rationnelle de l'énergie produite

par les panneaux photovoltaïque avec une éventuelle combinaison avec d'autres sources d'énergie renouvelable telle que l'énergie éolienne. Dans ce sens, un exemple intéressant à étudier consiste à l'arrosage sous serre agricole photovoltaïque.

Bibliographie :

[1] : Q. Kou, S.A. Klein, W.A. Beckman : « A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems », Solar Energy, Volume 64, Issues 1–3, September 1998, Pages 33–40

[2] :M. Akbaba, and al: « Matching Of Separately Excited Dc Motors To Photovoltaic Générateurs For Maximum Power Output», Solar Energie, Vol. 63, N0. 6, 1998, pp.: 375-385.

[3] : B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996.

[4] : M. Akbaba, and al: « Matching Of Separately Excited Dc Motors To Photovoltaic Generators For Maximum Power Output», Solar Energy, Vol. 63, N0. 6, 1998, pp.: 375-385

[5]: V. C. Mummadi: « Steady State And Dynamic Performances Analysis Of PV Supplied DC Motors Fed From Intermediate Power Converter», Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol-61, 2000, pp.: 365-381.

[6]: A.A. Ghoneim: « Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems». Energy Conversion and Management 47 (2006) 1449–1463.

[7] : M. A. Elgendy, B. Zahawi, Senior Member, IEEE, and D. J. Atkinson: « Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems». IEEE Transactions on sustainable energy VOL. 1, NO. 3, October 2010.

[8] : J. R. Potebaum : « Optimal Characteristics Of A Variable Frequency Centrifugal Pump Motor Drive», IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, N. 1, pp. 23-31, Feb. 1984

[9]: R. Chenni: « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.

[10]: www .Furuta –science.com

[11] : Anne labouret / énergie solaire photovoltaïque 4eme édition /avril 2010

[12] :. D.BOUKHERS « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage »,Mémoire de magister université de Constantine 2007

[13] : A. Saadi, «Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister ,Université de Biskra, 2000.

[14] : : Techniques de l'ingénieur, « Mécanique et chaleur, pompes, vide, air comprimé », NB4, Paris, 1988.

[15] : B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « Les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000

[16] : Hindmarsch J. Electrical machine and their applications, 4th ed. New York: Pergamon press; 1984

[17] : M.Masour niang & Souleymane Diop. « Les pompe solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher » Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT électrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation.2008.

[18] : :T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en développement », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME), 1982.

[19] : Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens

[20] : Anne labouret /cellule solaire /base de photovoltaïque/5eme édition /aout 2010

[21] : www.energieplus-lesite.be

[22] :www.maxicours.com

[23] : J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.

[24] : M.Rachid, « *Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzareah* », Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2005.

[25] : S.Bouazza, H.Bouchnafa, « *Estimation des énergies incidentes et fournies par module photovoltaïque* », Mémoire de DES, Université de Tlemcen, Juin 2001.
[26] :A. Hamidat, « *Etude et simulation des performances réelles sur une longue période des systèmes de pompage photovoltaïque au fil du soleil* », Thèse de magistère, CDER, 1989.

[27] **:** T. Fogelman, « *Système photovoltaïque pour les pays en développement* », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME), 1982.

[28] : M. Boudjemâa. « Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d‟énergie photovoltaïque».mémoire de magister ,université de Constantine.2007.
[29] : B.Azoui, « *Modelisation and experimentation of low power system aimed to electrification of mountainous and isolation region* », Thèse de Magister, Université de Batna, 1990.

[30] : A.Betka, « *Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil* », Thèse de Magister, Centre universitaire Biskra, 1997.
[31] : A.Benatiallah, « *Etude expérimentale et simulation des performances d'une installation photovoltaïque de faible puissance* », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 1998.
[32] : F.Benyarou « *Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation* », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen, Juillet 2004.
[33] : N.Ourabia, « *Développement d'un convertisseur triphasé* », Rapport Interne Labo. PV. CDER.
[34] : M. T. Boukadoum « *Contribution à l'étude et à la conception d'un convertisseur statique DC/AC triphasé destiné à un système de pompage photovoltaïque* », Thèse de Magister au CDER, 1990.
[35] : S.Diaf, « *Expérimentation d'un système de pompage photovoltaïque sur site saharien* », Thèse d'ingénier d'état, CDER, 1992.

[36] : Mr. MEFLAH AISSA. « Modélisation et commande d‟une chaine de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister. université ABOU BEKR BELKAID - Tlemcen. 2011

[37] : M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d‟un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation

photovoltaïque », Mémoire d‟ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[38] : D.BOUKHERS « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage »,Mémoire de magister université de Constantine 2007

[39] J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.

[40] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26.

[41] S. LABED. « Le pompage photovoltaïque et le développement des régions sahariennes », Colloque International sur les Ressources en Eau Souterraines dans le Sahara (CIRESS) Ouargla - 12 et 13 décembre 2005.Pompage Photovoltaïque ''Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19-26.

[42] C. Mataix, ''*Mecánica de Fluidos y Maquinas hidraulicas*'', Castillo, Madrid, 582 p., 1970.

[43] P. Silvestre, ''*Fundamentos de Hidráulica General*'', Limusa, Mexico, 381 p., 1983.

[44] : B.Mohammed, «*Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome*», Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2007.

[45] : F.Z Zerhouni, « *Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque* », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.

[46] M.S. Aït Cheikh et al. « Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme », Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie,2007.

[47]: N.Mansouri, N.Ghanmi « *Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal* » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008).