

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



جامعة فرحات عباس سطيف

كلية التكنولوجيا

قسم: الالكتروتقنية

Mémoire de Master

No. Réf. :/...../2012

Présenté au Département d'Electrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Commande des Processus Industriels

Réalisé par :

M. MATI Chemseddine

Thème

***Simulation et commande optimale d'un système de
pompage d'énergie dans un système photovoltaïque***

Soutenu le /09/2012 devant la commission d'examen composée de :

M. MOKEDDEM Diab

M.KHEMLICHE Mabrouk

M. BOUROUBA Bachir

Mme. NAOUR Embarka

M.C.B à l'Université de Sétif

Prof. à l'Université de Sétif

M.A.A à l'Université de Sétif

M.A.A à l'Université de Sétif

Président

Directeur du Mémoire

Examineur

Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la personne qui est la cause de ma réussite dans mes études, malgré ton absence Mon père, tu va rester toujours dans mon cœur.

A ma chère mère qui m'a soutenu durant toute la durée de mes études.

A mon grand père malgré son absence il était toujours près de moi.

*A mes très chers frères **HABIB, FARES et GHILES** à ma chère et unique sœur **DEHIA**.*

*A ma chère tante **HANANE**, ma grande mère, mon oncle **NADJEB**, sa femme **FATIMA** et leurs enfants **YUVA** et **YANI**.*

*A mon oncle **EL ALMI** et sa femme **ANISSA***

*A mes tantes **FATMA, HAKIMA, RATIBA** et ma grande famille.*

*Au personne qui m'aiment beaucoup ma futur femme et que je l'aime beaucoup **SILARBI NASSIMA***

*A mon encadreur **KHEMLICHE Mabrouk** et tous mes enseignants de l'université Ferhat Abbas.*

A tous mes amis de Tizi-Ouzou, Alger, Boumerdes et Bejaia

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.

MATI Chemseddine.

Remerciements

Je tiens à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années d'étude.

Je tiens à remercier mon père malgré son absence dans notre vie (dieu le garde dans le paradis), j'ai été à la hauteur et je n'ai pas baissé les bras.

Je tiens à remercier vivement ma mère et toute ma famille

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur KHEMLICHE Mabrouk pour m'avoir d'abord proposé ce thème, et le suivre continuellement tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

M. MOKEDDEM Diab

MCB à l'Université de Sétif

M. BOUROUBA Bachir

MAA à l'Université de Sétif

Mme .NOUAR Embarka

MAA à l'Université de Sétif

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mes enseignants du département d'électrotechnique qui n'ont pas cessé de me guider et de me donner les conseils fructueux, et qui ont contribué à toute ma formation.

Mes remerciements vont à toute ma famille, je cite en particulier, ma très chère mère, mon cher frère HABIB qui m'a soutenu et m'a encouragé toujours et qui a remplacé mon père sans oublier mes autres frères et ma sœur, qui m'ont toujours comblé d'affection et de soutien moral sans oublier ma chère tante HANANE

Je tiens également à remercier très chaleureusement mes amis Hmimi, Khaled et Fouad sans oublier mes amis au sein de notre département.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont fourni, de près ou de loin, leur aide afin que je puisse mener ce travail à terme.

Je tiens à remercier tous mes amis les étudiants de Master, le personnel technique et administratif du département d'électrotechnique, université de FERHAT ABBAS Sétif.

Sétif, le 05/09 /2012

MATI Chemseddine

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	XIII
<i>Chapitre 01</i>	<i>1</i>
DESCRIPTION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.....	1
1.1. Introduction	1
1.2. Cellule photovoltaïque	2
1.2.1. Historique	2
1.2.2. L'effet photovoltaïque.....	2
1.2.3. Différentes technologies des cellules solaires	3
1.3. Module photovoltaïque.....	4
1.3.1. Association de cellules en série	4
1.3.2. Association de cellules en parallèle	5
1.3.3. Caractéristiques d'un module	5
1.4. Panneau photovoltaïque	5
1.5. Système photovoltaïque	6
1.5.1. Systèmes autonomes.....	6
1.5.2. Systèmes hybrides.....	7
1.5.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	7
1.6. Description d'un système de pompage photovoltaïque.....	7
1.6.1. Générateur photovoltaïque (PV).....	8
1.6.2. Convertisseurs DC/DC (Hacheur)	8
1.6.3. Convertisseurs DC/DA (Onduleur)	10
1.6.4. Moteurs.....	11
1.6.5. Groupe électromagnétique [20]	12
1.7. Conclusion	15
<i>Chapitre 02</i>	<i>16</i>
MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE.....	16
2.1. Introduction	16
2.2. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	16
2.3. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	16
2.3.1. Modèle à une diode.....	16
2.3.2. Détermination des paramètres du modèle	18

2.4. Modélisation du hacheur Buck-Boost	18
2.4.1. Principe de fonctionnement	19
2.4.2. Modèle moyen du hacheur Buck-Boost	20
2.5. Modélisation de l'onduleur	21
2.6. Modélisation de la machine asynchrone	22
2.7. Modélisation de la pompe	25
2.8. Conclusion.....	26

Chapitre 03..... 27

COMMANDE OPTIMAL ET COMMANDE MPPT.....

 27

3.1. Introduction	27
3.2. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)	27
3.3. Méthode de perturbation observation (P&O).....	28
3.4. Méthode de Conductance incrémentielle	29
3.5. La commande ESC.....	30
3.5.1. Introduction	30
3.5.2. Historique	31
3.5.3. Base de la commande d'Extremum -Seeking.....	31
3.5.4. Objectif de la commande sinusoïdale d'Extremum-Seeking.....	32
3.5.5. Principe sinusoïdale d'Extremum-Seeking	32
3.5.6. Etude analytique de la commande sinESC	33
3.5.7. Etude de la commande sinESC	34
3.6. Conclusion.....	35

Chapitre 04..... 36

COMPARAISON DES METHODES DE LA COMMANDE CLASSIQUE AVEC LA COMMANDE OPTIMALE.....

 36

4.1. Introduction	36
4.2. Etapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.....	36
4.2.1. Evaluation des besoins en eau	36
4.2.2. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire	37
4.2.3. Détermination de l'énergie solaire disponible	37
4.2.4. Modélisation du panneau solaire.....	37
4.2.5. Choix des composants	38
4.3. Simulation du système de pompage global.....	39
4.3.1. Générateur photovoltaïque	39

4.3.2. Commande MPPT (P&O) et commande optimale (sinESC)	42
4.3.3. Convertisseur DC-DC (hacheur)	43
4.3.4. Convertisseur DC-DA (Onduleur)	43
4.3.5. Groupe électropompe	44
4.4. Résultats de simulation et interprétation	45
4.4.1. Résultats de simulation de la méthode P&O	45
4.4.2. Résultats de simulation de la sinESC	48
4.5. Interprétation des résultats	51
4.6. Comparaison entre les deux techniques	51
4.7. Interprétation des résultats pour la comparaison	52
4.8. Conclusion	53
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	54

Liste des figures

Figure 1-1 Cellule photovoltaïque.....	3
Figure 1-2 A gauche caractéristique d'une photodiode, à droite Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	3
Figure 1-3 Différents type de silicium.	4
Figure 1-4 Module photovoltaïque.....	4
Figure 1-5 Panneau photovoltaïque.....	5
Figure 1-6 Structure d'un système photovoltaïque	6
Figure 1-7 Système photovoltaïque autonome avec batterie.....	6
Figure 1-8 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	7
Figure 1-9 Schéma synoptique simplifié de Pompage PV	8
Figure 1-10 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	8
Figure 1-11 Hacheur	9
Figure 1-12 Hacheur Buck	9
Figure 1-13 Hacheur Boost	10
Figure 1-14 Hacheur Buck-Boost	10
Figure 1-15 Schéma de l'onduleur	11
Figure 1-16 Schéma d'une pompe centrifuge	12
Figure 1-17: Réglage du débit d'une pompe centrifuge.	13
Figure 1-18.18: Caractéristiques d'une pompe centrifuge	13
Figure 1-19 Schéma d'une pompe volumétrique.....	13
Figure 1-20 Caractéristiques d'une pompe volumétrique	14
Figure 2-1 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	17
Figure 2-2 Schéma de l'hacheur Buck-Boost	19
Figure 2-3 Première séquence de fonctionnement.	19
Figure 2-4 Deuxième séquence de fonctionnement.	20
Figure 2-5 Chronogramme des signaux principaux du hacheur Buck-Boost.....	20
Figure 2-6 Schéma d'un onduleur de tension.....	21
Figure 2-7 Schéma d'une machine asynchrone triphasée	22
Figure 3-1 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT	27
Figure 3-2 Recherche du point de puissance maximale	27
Figure 3-3 Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.	29
Figure 3-4 Organigramme de l'algorithme Conductance incrémentielle.....	30
Figure 3-5 Schéma ESC	30
Figure 3-6 Schéma de base de la commande ESC	31

Figure 3-7 Fonctionnement d'un système sinusoïdal d'ESC.....	32
Figure 3-8 Principe de la commande sinESC.....	33
Figure 3-9 Schéma illustratif de la commande sinESC.....	34
Figure 3-10 Schéma électronique du contrôleur sinESC	34
Figure 4-1 Schéma bloc de Simulink du GPV	40
Figure 4-2 Caractéristiques : $I = fV$, avec $T_a=25^{\circ}\text{C}$	40
Figure 4-3 Caractéristiques : $P = fV$, avec $T_a=25^{\circ}\text{C}$	41
Figure 4-4 Caractéristiques : $I = fV$ avec $E=1000\text{W/m}^2$	41
Figure 4-5 Les caractéristiques : $V = fV$ avec $E=1000\text{W/m}^2$	42
Figure 4-6 Schéma bloc détaillé du MPPT (P&O).....	42
Figure 4-7 Structure de la commande sin ESC sous 'SIMULINK®'	43
Figure 4-8 Schéma fonctionnel de simulation d'un convertisseur Buck-Boost.....	43
Figure 4-9 L'onduleur et sa commande 180°	43
Figure 4-10 Moteur asynchrone.	44
Figure 4-11 Pompe centrifuge.....	44
Figure 4-12 Poursuite du point de puissance maximale par la méthode (P&O).	45
Figure 4-13 Puissance du générateur	45
Figure 4-14 Tension de la sortie.....	45
Figure 4-15 Courant de la sortie.....	46
Figure 4-16 Rapport cyclique D.....	46
Figure 4-17 Couple électromagnétique du moteur.....	46
Figure 4-18 Vitesse du moteur.	47
Figure 4-19 Courant statorique.	47
Figure 4-20 Débit de la pompe.....	47
Figure 4-21 Puissance du générateur	48
Figure 4-22 Rapport cyclique D.....	48
Figure 4-23 Courant de sortie	49
Figure 4-24 Tension de sortie	49
Figure 4-25 Couple électromagnétique	49
Figure 4-26 Courant statorique	50
Figure 4-27 Débit de la pompe.....	50
Figure 4-28 Vitesse du moteur.....	50
Figure 4-29 Puissance du générateur	51
Figure 4-30 Tension du générateur	52
Figure 4-31 Rapport cyclique.....	52
Figure 4-32 Courant de la sortie.....	52

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Paramètres obtenus du modèle à une diode.....	18
Tableau 4.1.Performance dynamique	52

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

PV : photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

MPP : Maximum Power Point.

DC/DC : courant continu-courant continu.

CC-CA courant continu- courant alternatif

Ns : nombre de cellules en série.

Np : nombre des cellules en parallèle.

P&O : perturbation et observation.

IncCond : conductance incrémentale

sinESC: sinusoidalextremum seeking control

STC : condition standardss

NOCT : Nominal operating cell temperature

Symboles

E_g : Energie du gap [W/m^2].

I_{ph} : Courant photo-généré ou photo-courant (A).

V : la tension aux bornes de la cellule (V).

I : le courant fourni par la cellule (A).

q : la charge d'électron ($q=1.602 \cdot 10^{-19}C$).

k : la constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} \text{ joules / kelvin}$).

m : facteur d'idéalité de la diode ($m \in [1, 2]$).

T_c : température absolue de fonctionnement de la jonction (K°).

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

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

I_D : Courant de la diode(A).

V_{th} : La tension thermique(V).

G_a : l'éclairement (W/m^2) .

T_a : la Température ($^\circ C$).

S : La surface active du module photovoltaïque (m^2).

P_{max} : La puissance maximale (W).

V_{max} : La tension maximale (V).

I_{max} : Le courant maximal (I).

η : Le rendement.

I_o : Courant de saturation de la diode (A).

V_i : Tension d'entrée de l'hacheur (V).

V_o : Tension de sortie de l'hacheur (V).

v_L : La tension de l'inductance (V).

i_L : Le courant de l'inductance (V).

v_C : La tension de condensateur (V).

i_C : Le courant de condensateur (V).

f : Coefficient de frottement visqueux.

Γ_e : Couple électromagnétique (N.m).

Γ_r : Couple résistant (N.m).

α :Rapport cyclique

Ω : Vitesse de rotation de la machine (rad/s).

J : Inertie de la machine (Kg.m²).

Q : Débit d'eau pompé (m³/s).

Les autres symboles utilisés sont définis dans le text

INTRODUCTION GENERALE

Malgré la disponibilité depuis des années déjà de systèmes photovoltaïques de grande qualité, l'expérience du terrain avec les systèmes de pompage photovoltaïque n'est pas toujours entièrement satisfaisante. Les procédures de contrôle de qualité sont toujours requises quand il s'agit de lancer de grands programmes de pompage photovoltaïque à cause des risques dérivant des novations techniques proposées sur le marché, mais surtout, du besoin d'étendre les bonnes pratiques de l'ingénierie à l'ensemble de la chaîne de l'eau : pompage, stockage et distribution

L'étude d'une station de pompage photovoltaïque fait appel à une contribution avant de prendre le chemin à la mise en marche de point de vue systématique et même stratégique, qui est liée d'une manière homogène à la variation d'ensoleillement, dont elle n'est pas commandable. Par ailleurs en faisant appel aussi à une maîtrise de variables technico-économiques, tel qu'on cite (la maintenabilité, la gestion, l'optimisation d'énergie et dimensionnement rigoureux), tout ça nous oriente dans la transpercussions dans les démarches afin d'avoir un système bien adapté à notre cahier de charge bien déterminé.

Dans ce contexte, le travail de recherche présenté dans ce mémoire est une contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque. Notre travail est partagé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on donnera les différents types des systèmes photovoltaïques et une description sur le système de pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à l'identification ainsi que la modélisation des différentes parties constituant le système de pompage.

Le troisième chapitre, est consacré la commande de poursuite de point de puissance maximale (P&O),(IncCond) et une commande optimale (sinESC) (.en expliquant le principe de fonctionnement de cette commande

Dans le quatrième chapitre, on s'intéresse au dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque et la simulation de système pompage commandé par la technique MPPT (P&O) et ensuite avec une commande optimale (sinESC).Une étude comparative entre les deux techniques.

Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

Chapitre 01

DESCRIPTION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1. Introduction

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [1].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays où les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon.
- L'énergie solaire passive est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage [1].

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. Devant la demande croissante de l'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses; les systèmes photovoltaïques et en particulier les systèmes de pompage d'eau qui commencent à trouver de grandes applications [2]. Ce chapitre présente les types de systèmes photovoltaïques et leurs différents blocs, ainsi que leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs inconvénients.

1.2. Cellule photovoltaïque

1.2.1. Historique [3]

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

Les premières applications pratiques de l'électricité photovoltaïque ont été faites sur véhicules spatiaux, permettant l'alimentation des équipements de commande, de mesure, ayant des applications terrestres domestiques. Bien qu'au début des années 1980 elles ont tout de même permis l'électrification de logements isolés.

1.2.2. L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [4]. La figure 1.1 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au Phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux

couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [3].

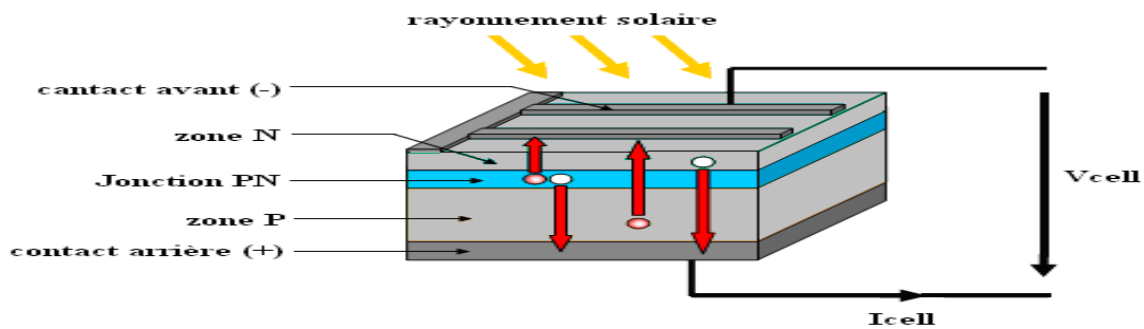


Figure 1-1 Cellule photovoltaïque

La figure ci-dessus présente les caractéristiques d'une photodiode et d'une cellule photovoltaïque mais en convention générateur

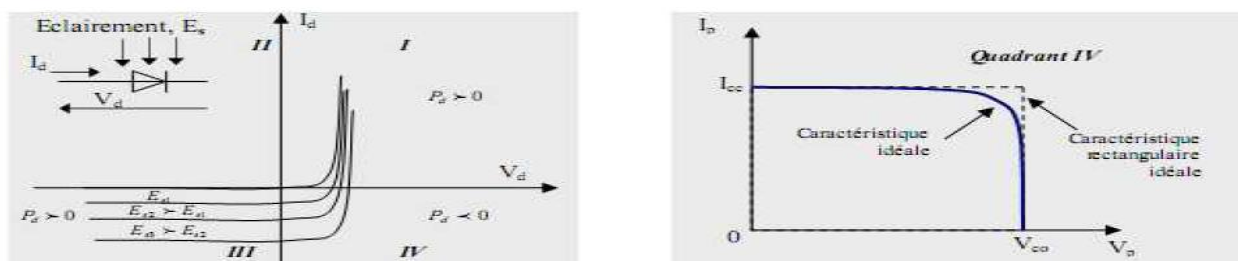


Figure 1-2 A gauche caractéristique d'une photodiode, à droite
Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

1.2.3. Différentes technologies des cellules solaires [5,6]

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

- Les cellules au silicium monocristallin

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

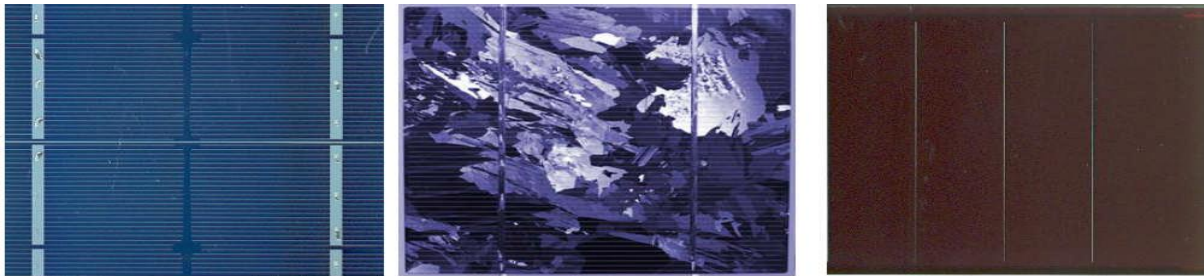
- Les cellules au silicium poly- cristallin

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible (11% -13%).

- Les cellules au silicium amorphe

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.

Voir la figure ci-dessous représentative de différentes technologies :



a) silicium monocristallin b) silicium poly- cristallin c) silicium amorphe

Figure 1-3 Différents type de silicium.

1.3. Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque se compose d'un certain nombre de cellules solaires il est installé en série et en parallèle dans une armature comme est représenté sur la figure I.3. Comme le module se compose de groupe de cellules, le modèle d'un module photovoltaïque est basé sur le modèle de la cellule solaire. Un nombre important de techniques a été employé pour simuler la cellule solaire et chaque technique a une certaine simplification et particularité d'applications. Dans cette étude, la technique de modélisation est basée sur les données des spécifications fournies dans les « datasheets » des fabricants [4]

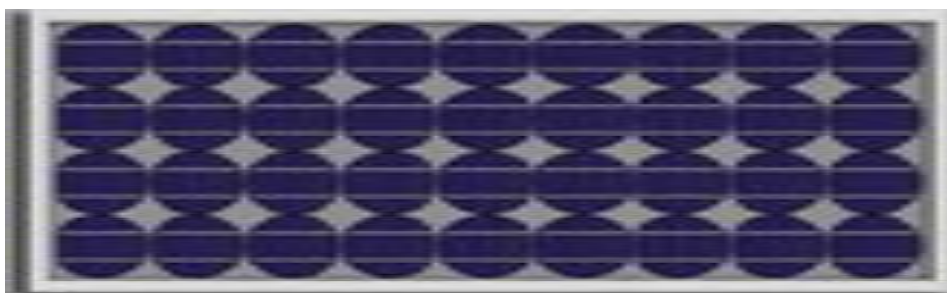


Figure 1-4 Module photovoltaïque.

1.3.1. Association de cellules en série

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [7].

1.3.2. Association de cellules en parallèle

L'association en parallèle des cellules délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [7].

1.3.3. Caractéristiques d'un module [8]

On distingue quelques caractéristiques d'un module :

- La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- La caractéristique $I=f(V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$: Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$
- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$

1.4. Panneau photovoltaïque [9]

Le panneau photovoltaïque ou champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure 1-5 Panneau photovoltaïque

1.5. Système photovoltaïque [10,11]

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, compose principalement d'un générateur photovoltaïque qui consiste d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif (Figure 1-6).

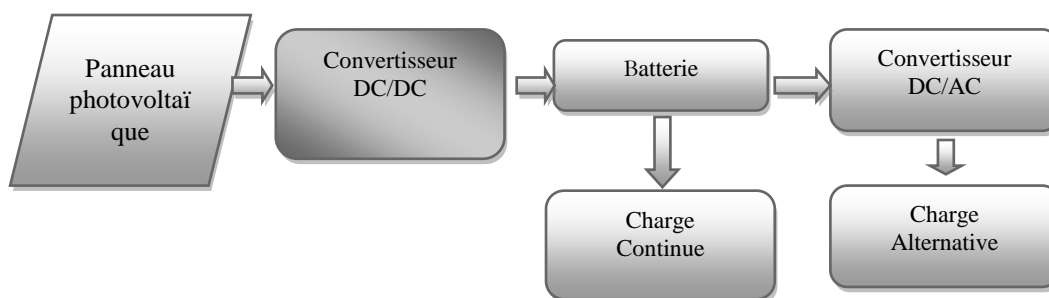


Figure 1-6 Structure d'un système photovoltaïque

Il y a trois types de systèmes PV : autonomes, hybrides et reliés au réseau

1.5.1. Systèmes autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

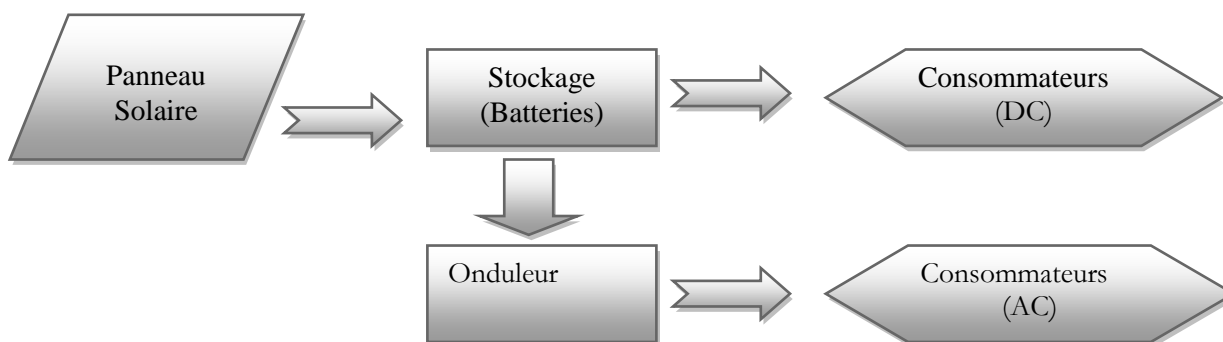


Figure 1-7 Système photovoltaïque autonome avec batterie

1.5.2. Systèmes hybrides

Le système hybride est un système qui contient une ou plusieurs sources d'énergie supplémentaires, qui sont indépendants des réseaux de distribution d'électricité.

En pratique, on trouve un générateur photovoltaïque qui relie un éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés.

1.5.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est relié directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu-courant alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil.

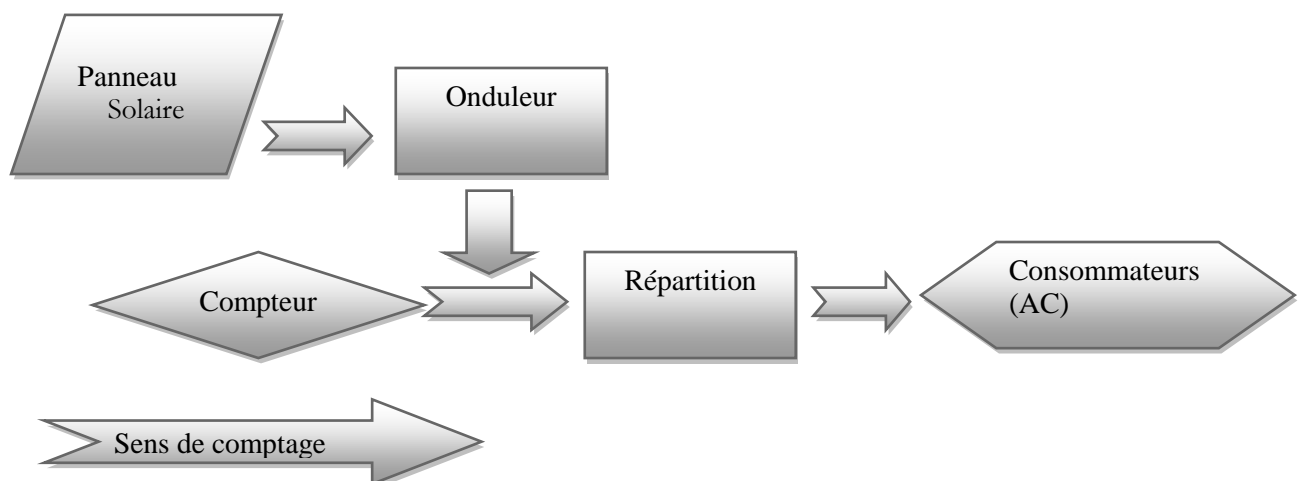


Figure 1-8 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

1.6. Description d'un système de pompage photovoltaïque

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est un système autonome constitué d'un générateur photovoltaïque, un sous- système de pompage, la tuyauterie et accessoires et enfin un réservoir d'eau comme est indiqué sur la (figure 1-9) [12].

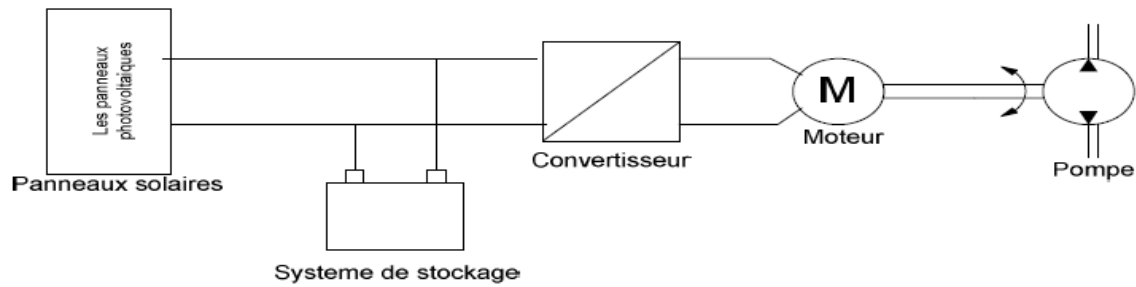


Figure 1-9 Schéma synoptique simplifié de Pompage PV

Un système de pompage photovoltaïque sans batterie contient les éléments suivants :

- Générateur photovoltaïque (PV)
- Convertisseur DC/DC et DC/AC
- Moteur synchrone
- Pompe

1.6.1. Générateur photovoltaïque (PV)

Un générateur photovoltaïque permet une conversion convenable d'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu, variable selon l'influence de l'éclairement et la température [13].

Le modèle du GPV à une diode est le modèle le plus classique de la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances (série et shunte) pour les pertes, le modèle d'une cellule est celui de la (figure 1-10) [14].

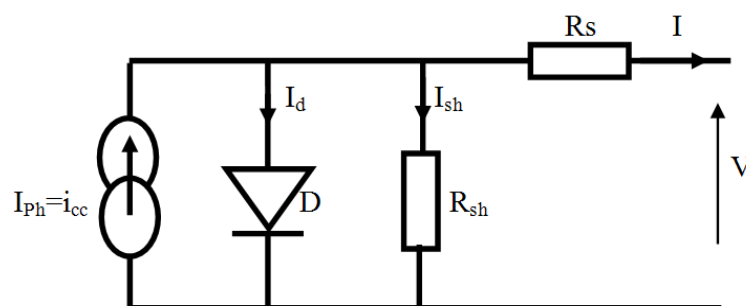


Figure 1-10 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

1.6.2. Convertisseurs DC/DC (Hacheur) [15,16]

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu. Ils contrôlent la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

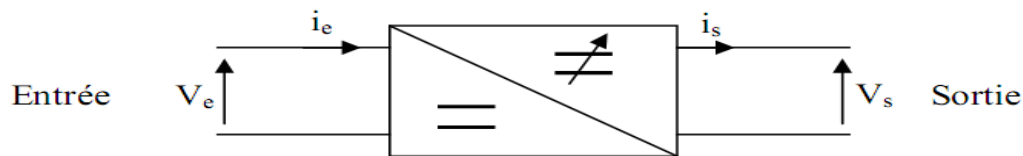


Figure 1-11 Hacheur

1.6.2.1. Type de convertisseurs DC-DC

On distingue trois types de convertisseurs DC-DC:

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_o > V_i$.
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_o < V_i$.

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, le FLYBACK, SEPIC, ĆUK, et le FORWARD...

1.6.2.2. Convertisseur Buck

Le convertisseur Buck (**figure 1-11**) peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. Ce dernier qui est un interrupteur ne peut relier que deux sources de type différent courant/tension ou l'inverse.

L'utilisation du buck dans les systèmes de conversion photovoltaïque est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu.

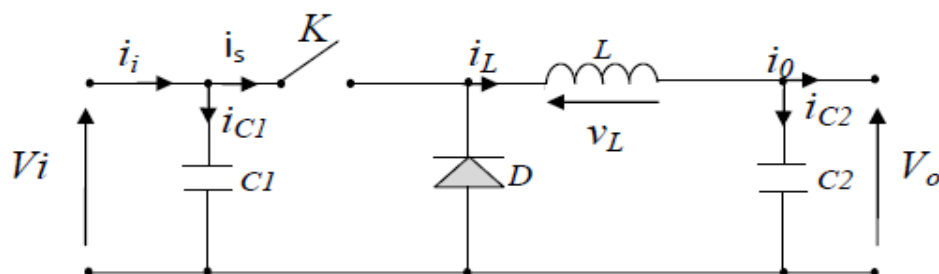


Figure 1-12 Hacheur Buck

1.6.2.3. Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la (**figure 1-13**) représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps DT_s , le transistor k est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor k s'ouvre et l'inductance L s'opposant à la diminution du courant i_L , génère une tension, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D .

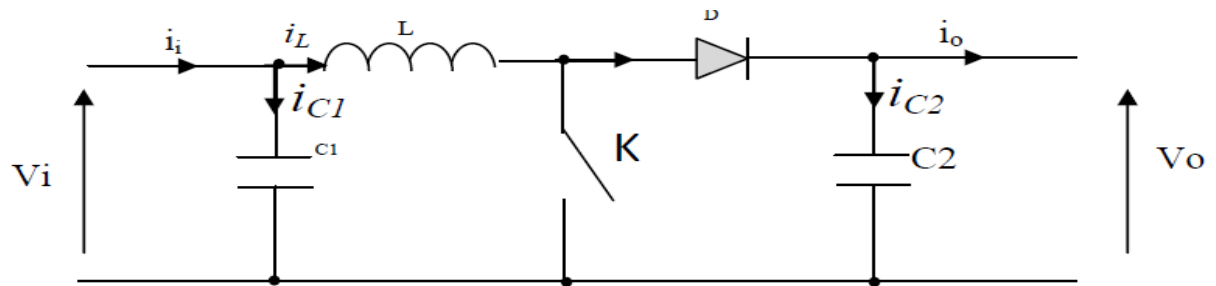


Figure 1-13 Hacheur Boost

1.6.2.4. Convertisseur Cuk

Le montage étudié est donnée à la (figure 1-14). Contrairement aux autres convertisseurs le hacheur Cuk utilise la capacité comme un moyen de transfert d'énergie, donc l'analyse est basé sur l'équilibre de courant du condensateur

La tension de sortie peut être inférieure ou supérieure à la tension d'entrée car la topologie du convertisseur Cuk est une topologie en cascade de deux convertisseurs un Buck et un Boost. À l'équilibre, la tension moyenne d'inductance est zéro, ainsi par l'application de la loi de Kirchhoff (KVL) autour de la boucle extérieure du circuit suivant :

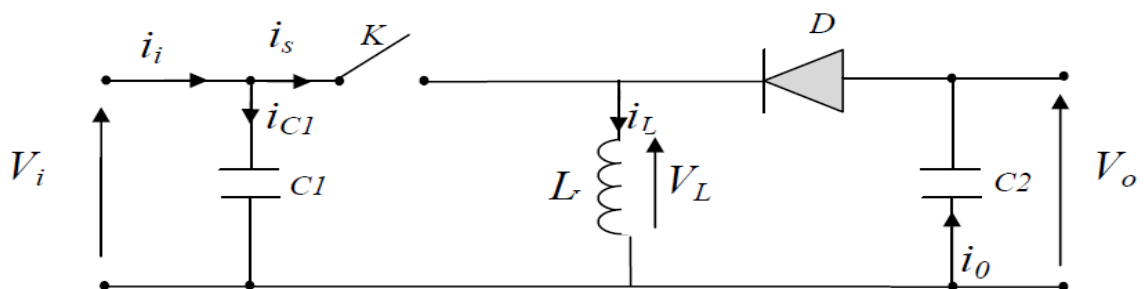


Figure 1-14 Hacheur Buck-Boost

Remarque : dans mon travail j'ai utilisé le convertisseur (Cuk).

1.6.3. Convertisseurs DC/DA (Onduleur) [17]

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.

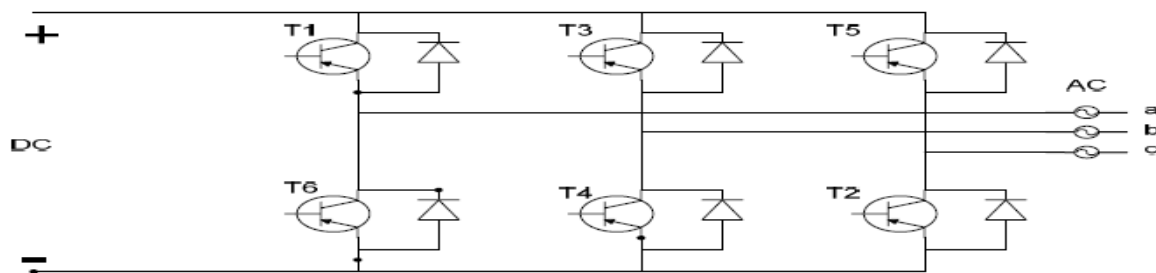


Figure 1-15 Schéma de l'onduleur

1.6.4. Moteurs

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

1.6.4.1. Moteur à courant continu [19]

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais. Les modalités d'utilisation d'un moteur à courant continu lui imposent deux contraintes majeures :

- Il doit être étanche, sinon il se produirait des courts circuits au niveau des charbons et des collecteurs. Les deux zones de vulnérabilité sont la sortie du câble d'alimentation et celle de l'arbre. Il ne faut pas oublier que ce moteur qui travaille sous l'eau, reçoit la pression d'immersion et chauffe en fonctionnement ; par conséquent, la pression de la poche d'air interne augmente en fonctionnement ; l'étanchéité constitue sa première vulnérabilité.

- Les charbons étant des pièces d'usure, ils doivent être changés régulièrement. Il faut donc prévoir, lors de la fabrication, de pouvoir ouvrir le moteur pour changer les charbons, nettoyer le collecteur et ensuite refaire son étanchéité d'une manière relativement simple.

Les moteurs peuvent être bobinés en 12 ou 24 volts pour quelques centaines de watts et tournent à environ 1500 tours/minute.

1.6.4.2. Moteur à courant alternatif [20]

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 permis 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.

1.6.5. Groupe électromagnétique [20]

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Il existe deux grands types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques. Ces dernières conviennent pour élever des faibles débits d'eau à des pressions élevées

1.6.5.1. Pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelée volute.

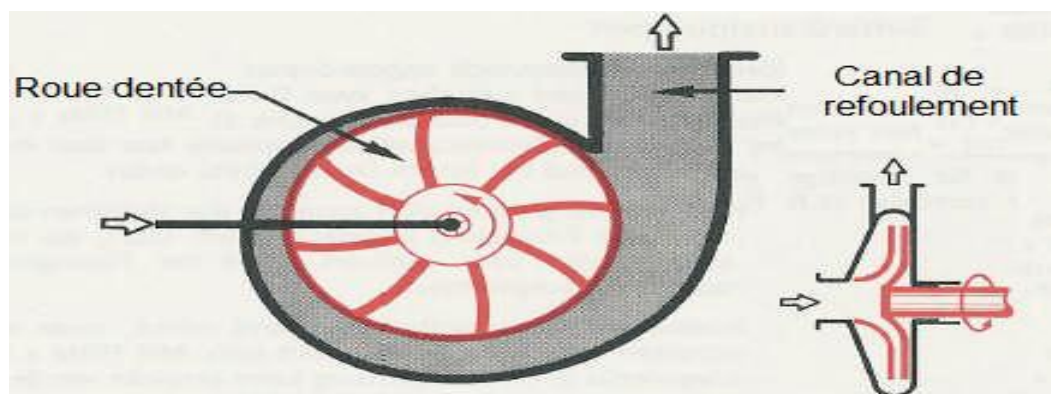


Figure 1-16 Schéma d'une pompe centrifuge

a. Principe de fonctionnement

Une pompe centrifuge est constituée par:

- une roue à aubes tournant autour de son axe
- un distributeur dans l'axe de la roue
- un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante. Et le rendement est entre de (60-70) %.

b. Réglage du débit

Trois moyens sont possibles:

- variation de la vitesse de rotation de la pompe par un dispositif électronique
- vanne de réglage située sur la canalisation de refoulement de la pompe pour éviter le risque de cavitation: suivant son degré d'ouverture, la perte de charge du réseau va augmenter ou diminuer ce qui va entraîner la variation du point de fonctionnement
- réglage en "canard" avec renvoi à l'aspiration d'une partie du débit.

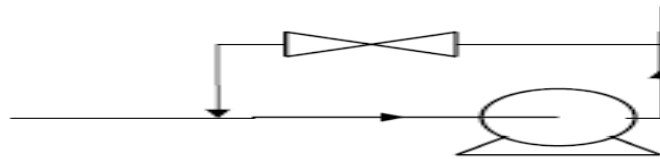


Figure 1-17: Réglage du débit d'une pompe centrifuge.

c. Caractéristiques d'une pompe centrifuge

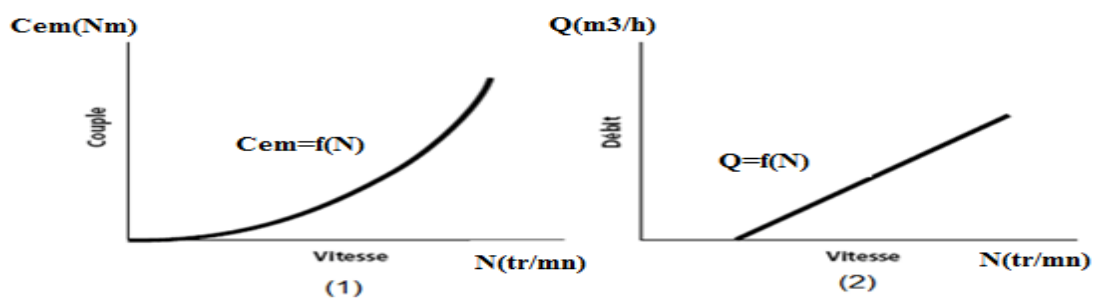


Figure 1-18.18: Caractéristiques d'une pompe centrifuge

1.6.5.2. Pompes volumétrique

Une pompe volumétrique comporte toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide en variant le volume contenu dans la pièce creuse.

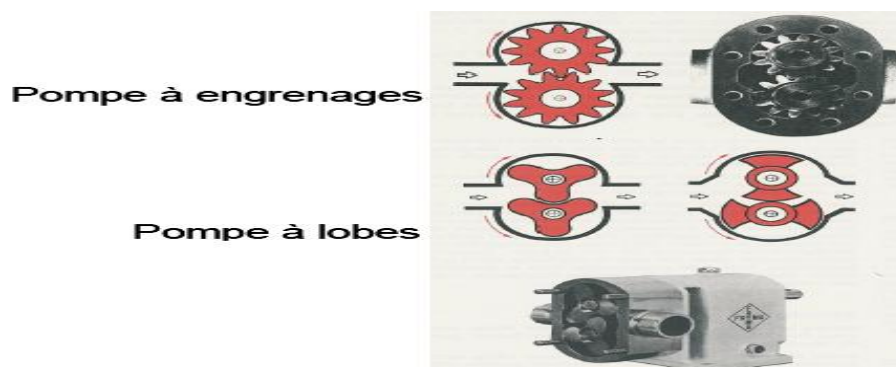


Figure 1-19 Schéma d'une pompe volumétrique.

a. Principe de fonctionnement et généralités

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant:

- Exécution d'un mouvement cyclique
- Pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement. On distingue généralement:

- Les pompes volumétriques rotatives : Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de la pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.
- Les pompes volumétriques alternatives: la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif.

Les pompes volumétriques sont généralement autoamorçantes. Dès leur mise en route elles provoquent une diminution de pression en amont qui permet l'aspiration du liquide. Il est nécessaire néanmoins d'examiner la notice du fabricant. Les pompes volumétriques permettent d'obtenir des hauteurs manométriques totales beaucoup plus élevées que les pompes centrifuges. La pression au refoulement est ainsi plus importante. Le débit est par contre généralement plus faible mais il ne dépend pratiquement pas des caractéristiques du réseau, le rendement est souvent voisin de 90 %.

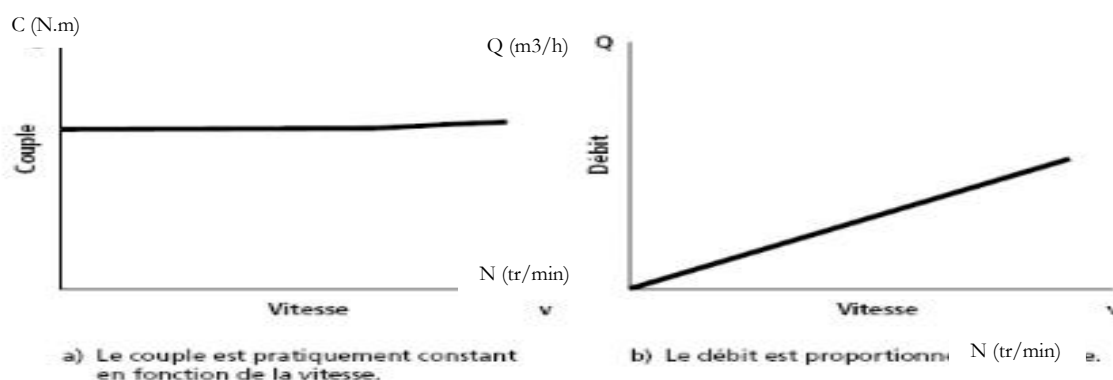


Figure 1-20 Caractéristiques d'une pompe volumétrique

Si la canalisation de refoulement est bouchée, Il faut arrêter immédiatement une pompe volumétrique dans cette situation pour éviter les risques d'une augmentation de pression très importante dans la pompe qui pourrait entraîner de graves détériorations. S'il y a possibilité de fermetures de vannes placées sur le circuit de refoulement, il faut prévoir un dispositif de sécurité à

la sortie de la pompe: une dérivation équipée d'une soupape de sûreté et reliée au réservoir d'aspiration constitue une bonne solution. Le réglage du débit s'effectue en agissant sur la vitesse de rotation du rotor pour les pompes rotatives et sur la fréquence ou la course du piston pour les pompes alternatives. L'utilisation d'une vanne de réglage sur le circuit de refoulement est bien entendu à proscrire.

1.6.5.3. Avantages et inconvénients des pompes centrifuges [21]

Les pompes centrifuges ont beaucoup d'avantages (simples, à faible coût de maintenance, disponible dans une large gamme de puissance...) ainsi que des inconvénients

a. Avantages

- 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 des matières suivant le service requis.
 - Grande flexibilité d'utilisation.
 - Ajustement automatique de la pression du débit.
 - Puissance absorbée limitée, donc sans danger.

b. Inconvénients

- Limitation de la viscosité. Limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de 100cSt (centistokes)
- Son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler le débit.

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le principe de l'effet photovoltaïque, les différents types de systèmes photovoltaïques, en fin on a étudié les différentes composantes des systèmes photovoltaïques. Le but principal de l'étude d'un système photovoltaïque est de simplifier et de comprendre le comportement de ce système. On verra dans le chapitre suivant la modélisation de ce système.

Chapitre 02

MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. Introduction

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

Ce chapitre présente la modélisation des différents éléments de ce système de pompage sans batterie.

2.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire I - V du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque [22].

2.3. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans la littérature ; il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque, parmi ces modèles nous avons utilisé le modèle à une diode

2.3.1. Modèle à une diode

Les modèles des modules PV sont habituellement tirés des circuits électriques équivalents. Ce modèle est le plus courant. Il est utilisé par de nombreux auteurs pour obtenir des valeurs de certains paramètres de la caractéristique courant - tension d'une cellule solaire par des méthodes d'approximations. A partir de la (**figure 2-1**) nous définissons le modèle à une diode du générateur [23].

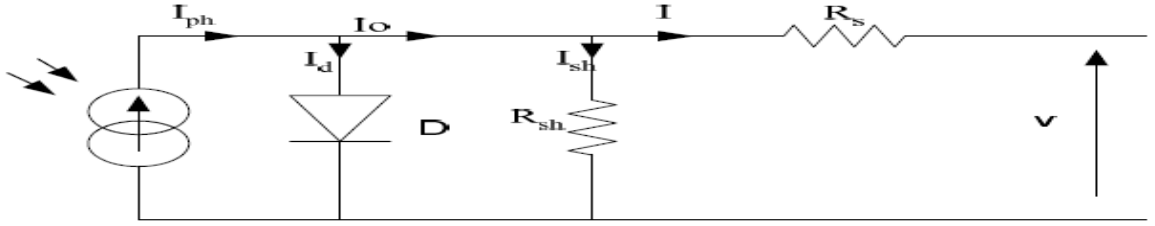


Figure 2-1 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

- **R_{sh}** : Résistance shunte qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.
- **R_s** : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).
- **D** : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

La loi des nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (2.1)$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref}) \right) \quad (2.2)$$

- **E_{sref}, T_{jref}** : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.
- **T_j** : température de jonction.
- **P₁, P₂, P₃** : paramètres constants.

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

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left(\frac{Noct-20}{800} \right) \quad (2.3)$$

Avec

NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) et T_a est la température ambiante.

$$I_d = I_{0d} \left[\exp \left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Avec :

- **I_{0d}** : courant de saturation de la diode (A).
- **q** : Charge élémentaire (1.6.10⁻¹⁹ C).
- **K** : constante de Boltzmann (1.38.10⁻²³(SI)).
- **A** : coefficient d'idéalité de la cellule.

➤ n_s : nombre de cellules connectées en série

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \quad (2.5)$$

➤ E_g : énergie de gap.

➤ P_4 : paramètre constant.

$$I_{Rsh} = \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

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

$$I = P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref})\right) - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j}(V + R_s I)\right) - 1\right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

2.3.2. Détermination des paramètres du modèle

Les paramètres suivants ont été obtenus par résolution numérique, ils sont donnés sur le **tableau (2-1)**

Tableau 2-1 : Paramètres obtenus du modèle à une diode

P_1	P_2	P_3	P_4	A	R_s	R_{sh}
0.00345	0.00005	-0.00003	31.2388	1	0.614	151.16

2.4. Modélisation du hacheur Buck-Boost [23].

Pour une bonne exploitation du photovoltaïque à une large bande de variation d'ensoleillement, le convertisseur statique (DC / DC) sera l'élément clé pour avoir un rendement énergétique acceptable. Le Hacheur Buck-Boost (dévolteur- élévateur) présente, par ses caractéristiques, une alternative assez intéressante pour extraire le maximum de puissance tel que :

- Pour des faibles ensoleillements, il est nécessaire d'imposer un voltage faible coté DC en augmentant le rapport cyclique, le Buck-Boost fonctionnera en **Boost** (élévateur).
- Pour des grands ensoleillements, il est nécessaire d'imposer un grand voltage coté DC en diminuant le rapport cyclique, le Buck-Boost fonctionnera en **Buck** (dévolteur).
- Le Buck-Boost est un régulateur présentant la particularité que la tension de sortie est régulée avec une polarité opposée à celle de la tension d'entrée. Ce hacheur est dit à stockage inductif car les charges sont alimentées pendant le temps d'ouverture de l'interrupteur (convertisseur à accumulation et restitution d'énergie électrique) par une inductance .

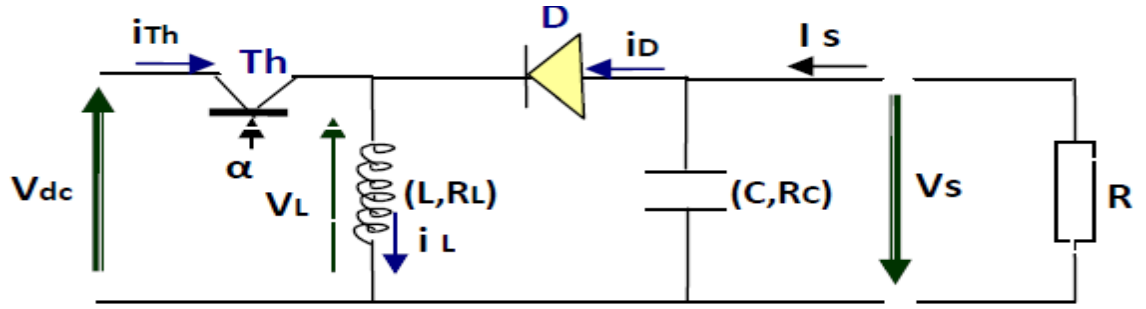


Figure 2-2 Schéma de l'hacheur Buck-Boost

2.4.1. Principe de fonctionnement [24]

Comme ce hacheur, comprend deux interrupteurs, dont l'un est commandé à l'amorçage et au blocage et l'autre est une diode, il présente deux séquences de fonctionnement illustrées par les figures suivantes (2.3, 2.4) :

➤ **Première phase** (de 0— αT) : ($T_h = 1$), ($D = 0$)

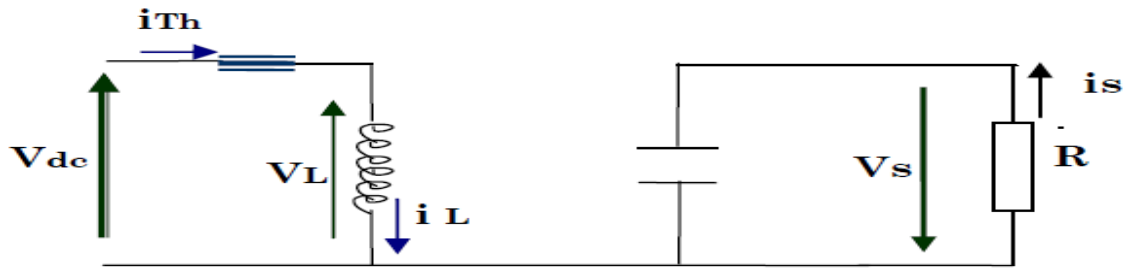


Figure 2-3 Première séquence de fonctionnement.

Pendant ce mode, le courant I_L circule à travers l'inductance qui emmagasine une certaine quantité d'énergie (chargement de l'inductance), et la diode D se bloque car la tension à ses bornes est négative.

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{dc}(t) \quad (2.8)$$

Le condensateur C supposé préalablement chargé, fournit à la charge l'énergie et un courant i_s circule dans cette dernière.

$$V_c = V_s = R \cdot i_s \quad (2.9)$$

Avec :

$$i_s = i_c \quad (2.10)$$

➤ **Deuxième phase** (de αT — T) : ($T_h = 0, D = 1$)

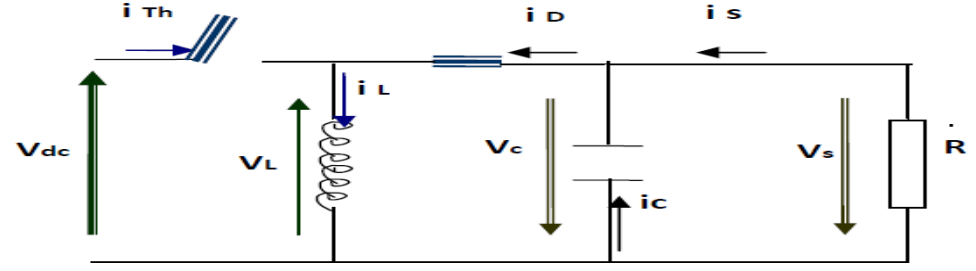


Figure 2-4 Deuxième séquence de fonctionnement.

Ce mode est appelé la phase de restitution d'énergie où le condensateur C et la charge reçoit l'énergie stockée dans la bobine L . La diode D conduit et l'interrupteur Th est ouvert.

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_C(t) \quad (2.11)$$

$$i_s = i_c = i_L \quad (2.12)$$

La figure (2-5) illustre un cycle de fonctionnement du hacheur.

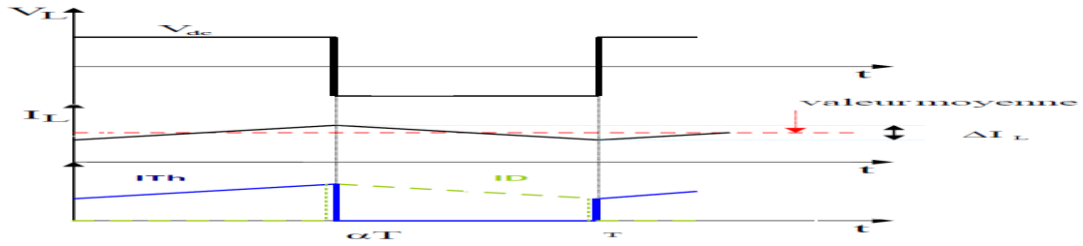


Figure 2-5 Chronogramme des signaux principaux du hacheur Buck-Boost.

2.4.2. Modèle moyen du hacheur Buck-Boost [24]

La tension de sortie est ajustée en agissant sur le rapport cyclique α . En régime de conduction continue, la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie est donnée par :

$$\frac{V_s}{V_{dc}} = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \alpha \in [0,1] \quad (2.13)$$

La tension de sortie est négative par rapport à celle d'entrée. Sa valeur moyenne peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon que le rapport cyclique soit supérieur ou inférieur à 0,5. La relation entre le courant d'entrée et celui de sortie est :

$$\frac{I_s}{I_{dc}} = -\frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (2.14)$$

En tenant compte des caractéristiques réelles du circuit, on aura la relation suivante :

$$V_s = -\frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \frac{V_{dc}}{\frac{R_L(1-\alpha)}{R}} \quad (2.15)$$

A partir des relations établies entre $0 - \alpha T$ et $\alpha T - T$ et en faisant intervenir le rapport cyclique, on obtient le modèle moyen du hacheur :

$$\begin{cases} R_L \cdot i_L + L \frac{di_L}{dt} = \alpha(V_{dc} + V_s) - V_s \\ i_c(t) = C \frac{d}{dt} V_c + \frac{V_s - V_c}{R_c} = (1-\alpha)i_L - \frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (2.16)$$

Et finalement, en appliquant la transformée de Laplace, on aura le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} (R_L + R_P)i_P(P) = \alpha(V_{dc} + V_s) - V_s \\ \left(C_P + \frac{1}{R_c}\right)V_c(P) = (1-\alpha)i_L - V_s \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_c}\right) \end{cases} \quad (2.17)$$

2.5. Modélisation de l'onduleur [25]

L'onduleur étudié dans ce système est un onduleur de tension, son but est de convertir la tension continue en tension alternative pour l'alimentation du moteur asynchrone et cette tension doit être variable pour assurer le bon rendement du système

Pour simplifier l'étude, on suppose que la commutation des interrupteurs est instantanée (interrupteurs parfaits), la chute de tension à leurs bornes est négligeable et la charge est équilibrée.

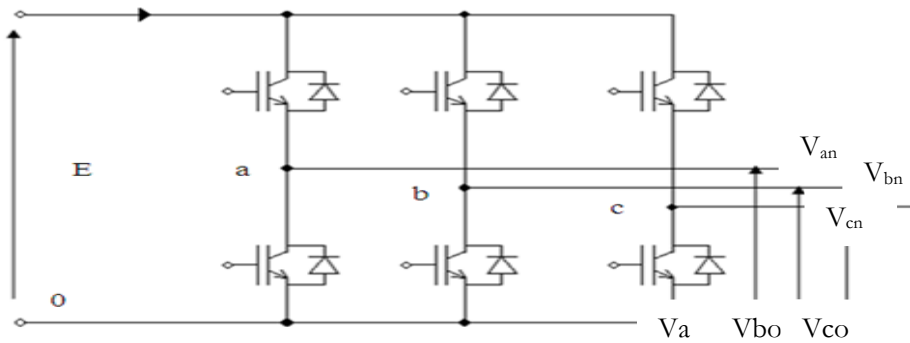


Figure 2-6 Schéma d'un onduleur de tension

On a suppose que la charge est équilibrée, donc :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2.18)$$

Avec V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions de phase de la charge ou de sortie de l'onduleur, tel que:

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} + V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} + V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases} \quad (2.19)$$

On remplaçant (2.18) dans (2.19) on obtient :

$$V_{on} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.20)$$

En introduisant (2.20) dans (2.19) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = \frac{2}{3}V_{co} - \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} \end{cases} \quad (2.21)$$

A partir de l'équation (2.21) on tire la matrice qui assure le passage du continu vers l'alternatif et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

On prend S_a , S_b et S_c les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un bras (égale à 1 si l'interrupteur est fermé et à 0 si l'interrupteur est ouvert).

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

2.6. Modélisation de la machine asynchrone [26]

Le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont coupés par le champ tournant. Cette interaction électromagnétique du stator et du rotor de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor.

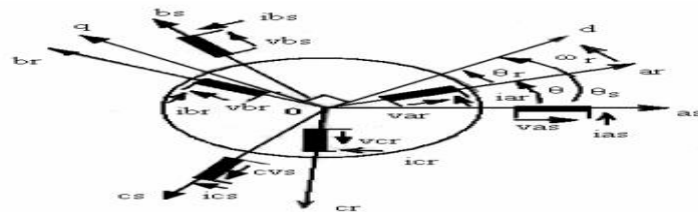


Figure 2-7 Schéma d'une machine asynchrone triphasée

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.24)$$

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad (2.25)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}, \quad R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ [V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}, \quad R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

- $[V_s], [V_r]$: vecteurs des tensions statorique et rotorique.
- $[I_s], [I_r]$: vecteurs des courants statorique et rotorique.
- $[\Phi_s], [\Phi_r]$: vecteurs des flux statorique et rotorique.
- $[R_s], [R_r]$: matrices des résistances statorique et rotorique.

Les flux totalisés Φ_s et Φ_r des phases statorique et rotorique s'expriment sous forme :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [l_s][I_s] + [m][I_r] \\ [\Phi_r] = [l_r][I_r] + [m][I_s] \end{cases} \quad (2.26)$$

La symétrie de la machine fait que les inductances propres des phases statorique sont égales et de même pour celles du rotor. Les matrices $[l_s]$ et $[l_r]$ deviennent :

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [l_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

- l_s, l_r : inductances propres statorique et rotorique.
- m_s : inductance mutuelle entre phases statorique.
- m_r : inductance mutuelle entre phases rotorique.

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne

(notion de flux/inductance propre).

Exemple de la phase statorique :

$$\phi_{as} = l_s i_{as} + m_s i_{bs} + m_s i_{cs} + m_1 i_{ar} + m_3 i_{br} + m_2 i_{cr} \quad (2.27)$$

En matriciel :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \\ \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$\begin{cases} m_1 = m_{sr} \cos \theta \\ m_2 = m_{sr} \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \\ m_3 = m_{sr} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (2.29)$$

m_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

On peut résumer les résultats obtenus après l'application de la transformation de Park pour les deux grandeurs flux et tension :

➤ **Les tensions :**

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} &= 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} &= 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{La pulsation statorique}).$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{La pulsation rotorique}).$$

➤ **Les flux :**

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.31)$$

Avec :

$$L_s = l_s - m_s \quad (2.32)$$

$$L_r = l_r - m_r \quad (2.33)$$

$$M = \frac{3}{2}m_{sr} \quad (2.34)$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$\Gamma_e = \frac{3}{2}P(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \quad (2.35)$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_r - f\Omega \quad (2.36)$$

Avec :

- Γ_e : couple électromagnétique.
- Γ_r : couple résistant.
- f : coefficient de frottement visqueux.
- Ω : vitesse de rotation de la machine.
- J : inertie de la machine.

2.7. Modélisation de la pompe [27]

Pour cette étape de modélisation, on utilise le modèle simplifié décrit par l'équation P(Q) simple qui représente la dépendance du débit en fonction de la puissance pour chaque hauteur :

$$P = aQ^3 + bQ^2 + cQ + d \quad (2.37)$$

Avec : $P > 0$ et $Q > 0$, où a, b, c et d sont des paramètres qui s'obtiennent à partir d'une méthode numérique (Newton – Raphson) et l'exploitation des résultats expérimentaux.

➤ Modèle général [27]

Les résultats obtenus avec le modèle simple que nous avons décrit donnent des résultats très ajustés aux valeurs expérimentales. Cependant, l'ensemble de valeurs obtenues est utile uniquement pour les hauteurs expérimentales données. Pour les hauteurs intermédiaires l'installateur ne possède pas d'informations pour le dimensionnement du système de pompage. La généralisation du modèle décrit pour le cas des hauteurs variables de n'importe quelle valeur, permettrait en plus de réduire énormément le nombre de mesures expérimentales nécessaires pour caractériser un modèle d'un sous système concret. Pour généraliser le modèle décrit par l'équation (2.37), il est nécessaire d'introduire la dépendance des paramètres a, b, c et d avec la hauteur.

Le modèle général que nous proposons ici décrit l'influence du débit Q en fonction de la puissance P et la hauteur h de la forme suivante :

$$P(Q, h) = a(h)Q^3 + b(h)Q^2 + c(h)Q + d(h) \quad (2.38)$$

Où les paramètres a , b , c et d sont reliés à la hauteur par :

$$\begin{cases} a(h) = a_0h^3 + a_1h^2 + a_2h + a_3 \\ b(h) = b_0h^3 + b_1h^2 + b_2h + b_3 \\ c(h) = c_0h^3 + c_1h^2 + c_2h + c_3 \\ d(h) = d_0h^3 + d_1h^2 + d_2h + d_3 \end{cases} \quad (2.39)$$

Les équations de $a(h)$, $b(h)$, $c(h)$ et $d(h)$ sont ajustées par une méthode numérique (Newton-Raphson).

Avec a_i , b_i , c_i et d_i : des constantes qui ne dépendent que du type de sous-système de pompage photovoltaïque.

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, la modélisation de différentes composantes des systèmes de pompes en général.

Dans ce qui suit, on va développer les méthodes de recherche de la puissance maximale et la commande optimale.

.

Chapitre 03

COMMANDE OPTIMAL ET COMMANDE MPPT

3.1. Introduction

Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque (PV) autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque ont été appliqués. Parmi ces techniques on trouve la technique de Poursuite du Point de Puissance Maximale, connue par Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Dans ce chapitre, on va élaborer les différentes techniques (MPPT) :

- Méthodes classiques : perturbation et d'observation et méthode de conductance incrémentée
- Methodes optimales (sinusoidal extremum seeking control (sin ESC)).

3.2. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) [28]

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.

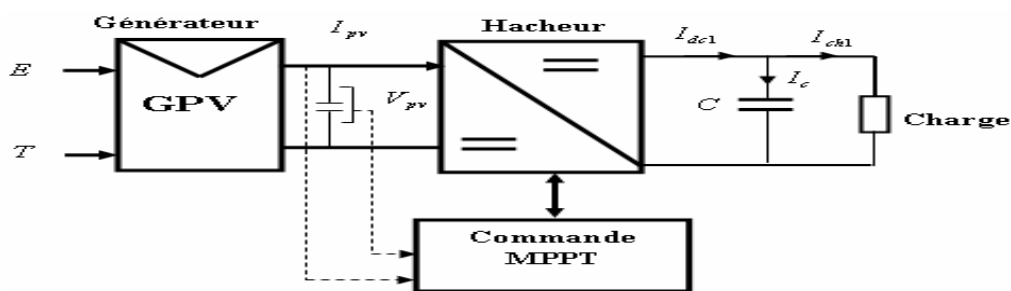


Figure 3-1 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT

3.2.1. Classification des commandes MPPT [29]

Le point de puissance maximale est habituellement contrôlé par deux variables de commande, la tension ou la puissance, qui sont à chaque fois mesurées et employées à nouveau dans une bouclé pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale. Parmi les méthodes

proposées pour la recherche de ce point il existe des méthodes classiques et des méthodes optimales :

➤ **Méthodes conventionnelles** (classiques):

- Méthodes à contre réaction de tension.
- Méthodes à contre réaction de courant.
- Méthodes à contre réaction de puissance :
 - ✓ Méthode 'perturbation observation (P&O).
 - ✓ Méthode de conductance incrémentée (IncCond).

➤ **Méthodes optimales** (sinusoidal extremum seeking control (sin ESC))

3.3. Méthode de perturbation observation (P&O)[30]

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant la perturbation. Si la puissance aux bornes du panneau est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé. Le schéma suivant montre bien que l'on se rapproche alors dans chaque cas du Point Maximum de Puissance (MPP).

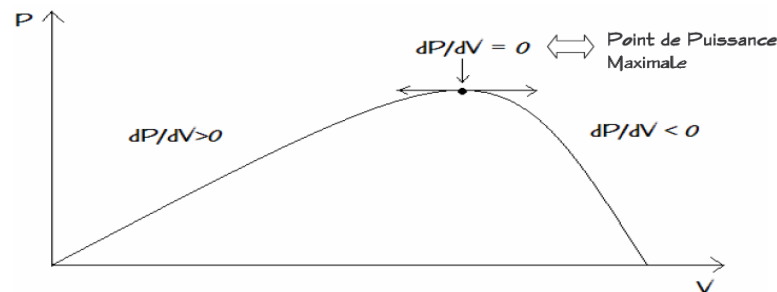


Figure 0-2 Recherche du point de puissance maximale

La figure 3.3 montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple mpV

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes.

- Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur pour la largeur idéale du pas D dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement. Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein et al. Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance (figure.2.3). Ces changements atmosphériques sont souvent produits dans les véhicules solaires lors de leurs passages dans une zone d'ombre tels que végétation ou bâtiments ainsi que le changement de l'angle d'incidence pour des véhicules en mouvement.

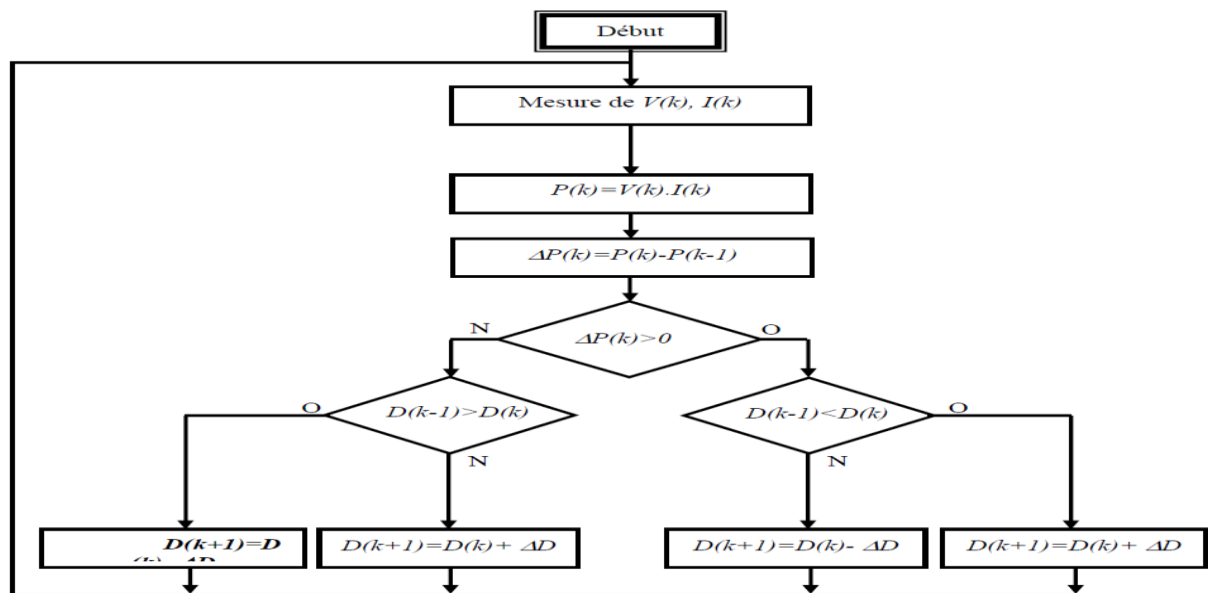


Figure 0-3 Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.

3.4. Méthode de Conductance incrémentielle [31]

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension, elle est plus efficace que la méthode Perturbations et Observations. Le courant de sortie du panneau et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du quotient de l'intensité du courant et de la tension ($G=I/V$). La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité de courant et celle de la tension

($\Delta G = dI / dV$). En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , nous allons chercher le maximum de la courbe $P=f(V)$ en cherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance ($G=\Delta G$).

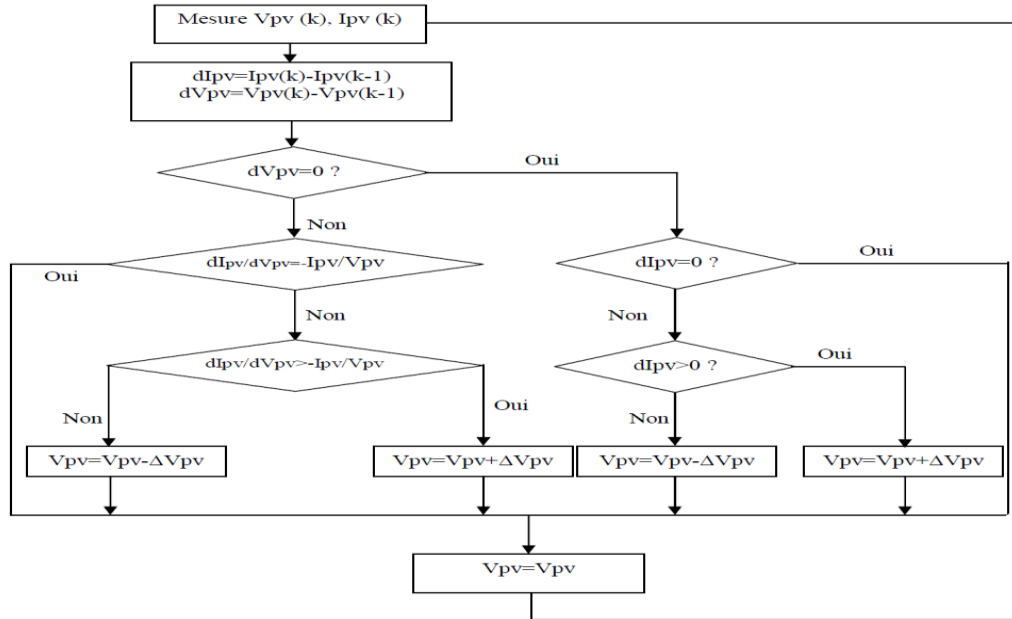


Figure 0-4 Organigramme de l'algorithme Conductance incrémentielle

3.5. La commande ESC

3.5.1. Introduction [32]

Les algorithmes de cheminement du point de puissance maximale (MPPT) permettent aux systèmes photovoltaïques de fonctionner efficacement. Pour un tel but, beaucoup d'auteurs ont proposé les différentes méthodes de MPPT. Ces méthodes ont mérité l'attention du champ de l'électronique de puissance mais également du domaine de contrôle automatique. Dans le domaine de la théorie de commande, la technique que les systèmes d'entraînements à leur opération optimale dirigent est appelée Commande d'Extremum Seeking (ESC). De telles techniques apparaissent pendant les années 50 et la plupart d'entre elles utilisent le schéma bloc montré par la figure ci-dessous :

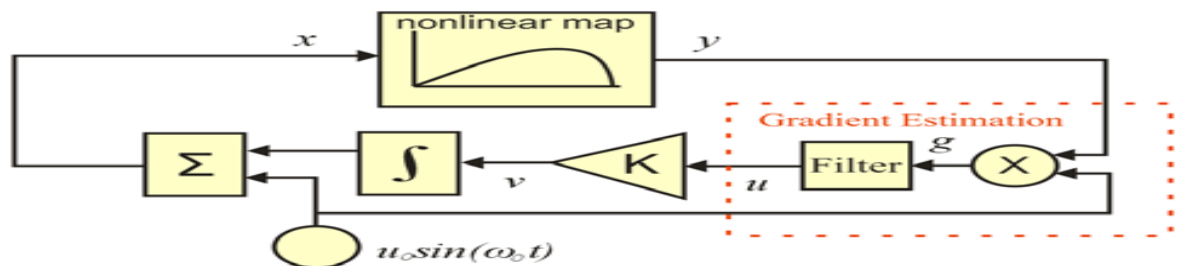


Figure 0-5 Schéma ESC

3.5.2. Historique [33]

- Appliqué pour l'électricité des chemins de fer par Leblanc (1922)
- Littérature Russe (années 40)
- Application à l'accord de synchronisation d'étincelle du moteur par de Drapper et Li (1951)
- Tsien (1954) : chapitre sur des cybernétiques de technologie
- Feldbaum (1959) : ordinateurs dans des systèmes automatiques de contrôle
- Blackman (1962) : présentation intuitive de l'ESC
- Wilde (1964) : un livre
- Chinaev (1969) : manuel sur autorégulateurs des systèmes empaquette [Morosanov] [Ostrovski], [Pervozvanski], [Kazakevich], [Frey], [Jacobs], [Korovin] :début des années 70
- Papiers de Meerov (1967, 1968) : usage du moyen de l'analyse.
- Enquête de Sternby (1980).
- Astrom et Wittenmark (1995) : les secteurs les plus prometteurs pour la commande adaptative

3.5.3. Base de la commande d'Extremum -Seeking

L'algorithme de sinESC a été développé par Morosanov. Cette méthode (sin ESC) a été appliquée avec succès dans la poursuite du point de puissance maximale des systèmes photovoltaïques. Elle utilise une perturbation sinusoïdale pour estimer le gradient de la caractéristique (puissance-tension).

La base de la commande de l'ESC est illustrée sur la figure ci-dessous :

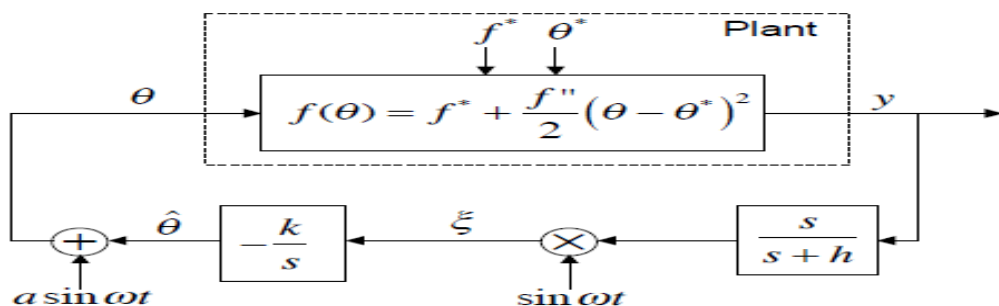


Figure 0-6 Schéma de base de la commande ESC

Avec :

Y : sortie à minimiser

f * : minimum

θ ^ : estimation de **θ ***

h : fréquence de coupure du filtre

ω : fréquence de signal

f '' :deuxième dérivée

θ * : paramètre inconnu

k : gain d'adaptation de l'intégrateur

a : amplitude du signal

3.5.4. Objectif de la commande sinusoïdale d'Extremun-Seeking[34]

L'objectif de ESC doit forcer le point de fonctionnement pour être aussi étroitement comme possible à l'optimum pour un système décrit par une carte non-linéaire inconnue avec un seul extremum (c.-à-d., un maximum ou un minimum).

3.5.5. Principe sinusoïdale d'Extremun-Seeking [35]

Un système applicable aux problèmes non-linéaires de commande. Un peu de perturbation est présenté dans un système stabilisé d'ESC, de ce fait affectant la dynamique du système global. Par conséquent, une perturbation sinusoïdale externe est ajoutée à la dynamique de PV de telle manière que le MPP puisse être situé comme prévu par l'intermédiaire des signaux filtrés. Supposant que là existe un extremum sur une fonction objective concave $y = f(x)$, alors le but du MPPT peut être réalisé avec une combinaison d'un intégrateur, d'un filtre, d'un multiplicateur, d'un additionneur et d'un générateur de vague de sinus.

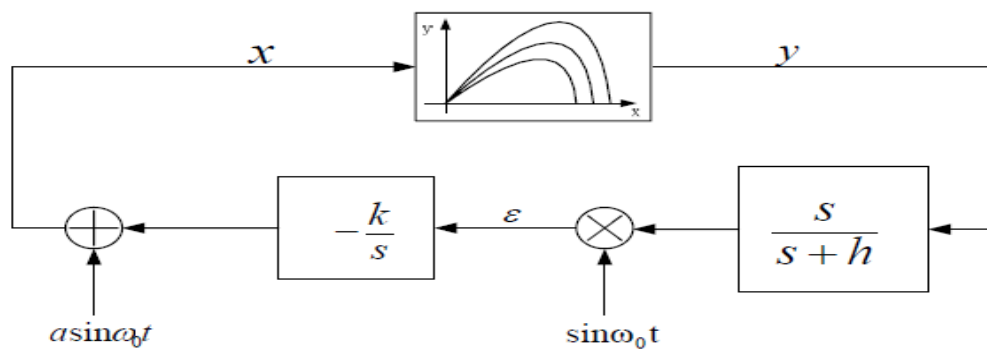


Figure 0-7 Fonctionnement d'un système sinusoïdal d'ESC

On peut décrire le principe de cette méthode comme suit :

Si un signal sinusoïdal de faible amplitude est injecté à l'entrée x , le signal de sortie y oscille autour de sa valeur moyenne, les deux signaux sinusoïdaux sont en phase. Si le signal d'entrée x est plus petit que le maximum du système non linéaire, la valeur instantanée du gradient (g) oscille autour d'une valeur positive, sinon la valeur instantanée du gradient (g) oscille autour d'une valeur négative comme il est montré sur la (figure 3.8).

On peut observer que quand le signal d'entrée x atteint le maximum, alors le signal de sortie y double sa fréquence ; également on peut constater que l'amplitude de l'ondulation du signal de sortie y dépend de la pente de la courbe $y = f(x)$.

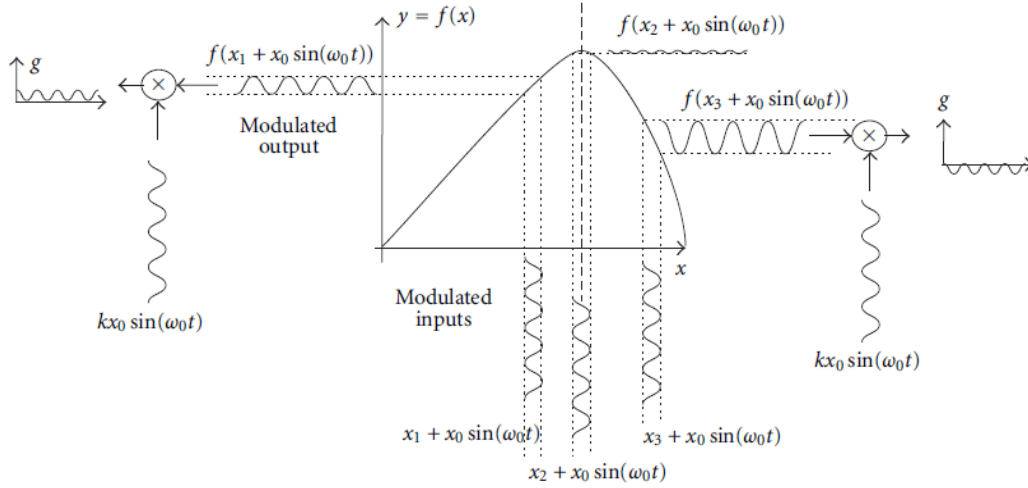


Figure 0-8 Principe de la commande sinESC

Un avantage important de l'ESC est qu'il n'exige pas un modèle du système, et est capable d'améliorer l'exécution du système. Là pourrait exister les extremums locaux pour une courbe caractéristique de P-V de rendement non-linéaire dans le cas d'une pile solaire ombragée.

3.5.6. Etude analytique de la commande sinESC [36]

La méthode peut être appliquée par le schéma de la (figure 3-9) qui comprend :

Un système non linéaire (caractéristique puissance-tension), un intégrateur et un bloc de détection, un filtre passe-haut, un filtre passe-bas et un signal sinusoïdal de faible amplitude qui est ajouté à l'entrée du système.

Bloc de détection : la fonction du bloc de détection est de démoduler le signal de sortie y . La sortie du bloc de détection (u) est proportionnelle au gradient du système non linéaire. La sortie du bloc intégrateur correspond à un signal x , la sortie y du système non linéaire correspond à :

$$y = f(x + x_0 \sin(\omega_0 t)) \quad (3.1)$$

En considérant que la perturbation sinusoïdale est petite, à savoir, donnant comme condition $x_0 \ll x$, alors l'expression (3.9) peut être approximée par le développement de Taylor comme suit :

$$y = f(x) + \frac{df(x)}{dx} x_0 \sin(\omega_0 t) \quad (3.2)$$

Ainsi, utilisant l'identité trigonométrique $2 \sin^2(\omega_0 t) = 1 - \cos(2\omega_0 t)$, le signal de sortie du bloc du multiplicateur peut être approximé par :

$$g = f(x) k x_0 \sin(\omega_0 t) + \frac{df(x)}{dx} k x_0 \sin^2(\omega_0 t) \quad (3.3)$$

$$g = \frac{1}{2} \frac{df(x)}{dx} kx_0^2 + f(x) kx_0 \sin(\omega_0 t) - \frac{1}{2} \frac{df(x)}{dx} kx_0^2 \cos(2\omega_0 t) \quad (3.3)$$

En supposant que :

- le filtre passe-haut élimine alors la composante continue (DC) de la puissance (P), et aura lieu en dehors de la perturbation ($x_0 \sin(\omega_0 t)$). Cette propriété est importante, parce que quand le signal de puissance est multiplié par une perturbation sinusoïdale, le signal résultant a une composante continue (DC).
- Le filtre passe-bas atténue complètement les premiers et les deuxièmes harmoniques, l'expression de sortie du filtre peut être écrite comme suit :

$$u = \frac{1}{2} \frac{df(x)}{dx} kx_0^2 * L^{-1} \left\{ \frac{a}{s+a} \right\} \quad (3.4)$$

Où $*$ est l'opérateur de convolution, L^{-1} représente la transformée inverse de Laplace, et $L^{-1}\left\{\frac{a}{s+a}\right\}$ représente la réponse impulsionnelle du filtre.

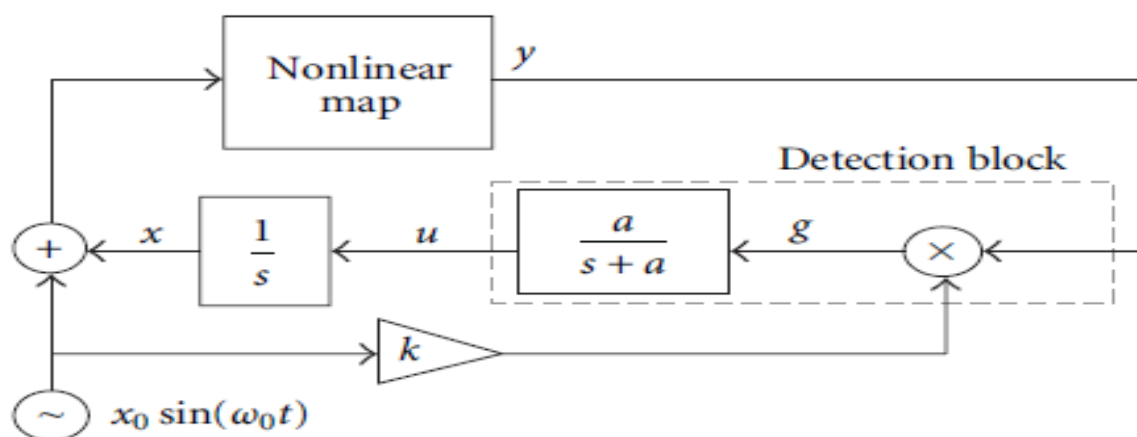


Figure 0-9 Schéma illustratif de la commande sinESC

3.5.7. Etude de la commande sinESC [34]

Le modèle du panneau solaire représenté par la fonction($\mathbf{P}_{SA=f_1(v_{SA})}$) où P_{SA} est la puissance de sortie d'un module solaire en fonction de la tension (v_{SA}) . La fonction est concave dans le cas d'un ensoleillement uniforme, à savoir ($\mathbf{d}^2\mathbf{f}_1(\mathbf{v}_{SA})/\mathbf{d}\mathbf{v}_{SA}^2 < 0$). Il signifie que la fonction $P_{SA=f_1(v_{SA})}$ a un unique maximum au point de puissance maximale (MPP).

Nous adaptons la tension de sortie du panneau photovoltaïque à la charge (dans notre cas une résistance) au moyen d'une commutation d'un convertisseur DC-DC (Buck-Boost), suivant les indications de la figure (3.10). En outre, la relation $\mathbf{v_{SA}} = \mathbf{f_2(D)}$ entre le rapport cyclique \mathbf{D} et la tension d'entrée $\mathbf{v_{SA}}$ dans le convertisseur Buck-Boost correspond à la relation suivante :

$$\frac{v_{SA}}{V_g} = -\frac{D}{(1-D)} \quad (3.5)$$

Pour $D \in [0, 1]$ dans une échelle de temps beaucoup plus grande que sa période de commutation et ses constantes de temps. On peut affirmer que d'après ($v_{SA} = f_2(D)$), dans le cas où $D \in [0.5, 1]$ le hacheur travaille comme un élévateur de tension; dans le cas où $D \in [0, 0.5]$ le hacheur travaille comme un abaisseur de tension, et la fonction composée devient comme suit:

$$P_{SA}(D) = f_1(f_2(D)) = f_1 f_2(D) \quad (3.6)$$

La fonction $P_{SA}(D)$ est une fonction concave, à savoir, ($d^2 f_1(D)/dD^2 < 0$). Par conséquent, les signaux de la figure (3.10) tendent à l'équilibre, correspond au point de puissance maximale, comme indiqué précédemment.

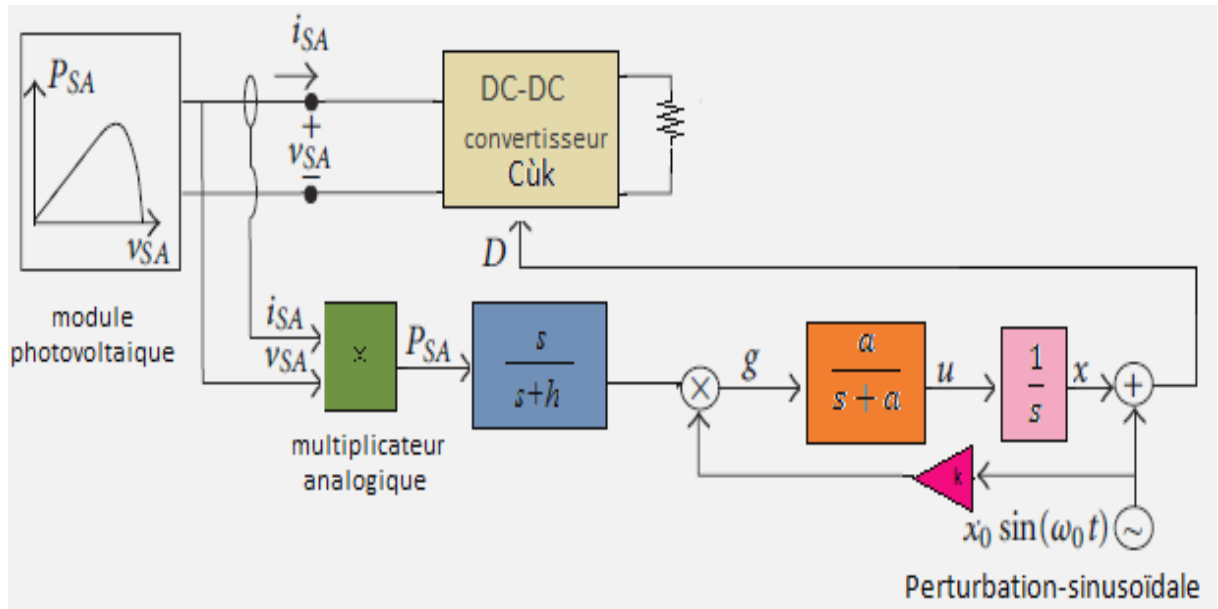


Figure 0-10 Schéma électronique du contrôleur sinESC

3.6. Conclusion

On a développé les différentes méthodes de la commande MPPT, méthodes classiques et méthode optimales (sinusoïdale d'Extremum-Seeking).

Dans le chapitre qui suit, on va simuler le système global avec la commande perturbation observation et la méthode sinusoïdale d'Extremum-Seeking avec l'évaluation des résultats pour chaque méthode.

Chapitre 04

COMPARAISON DES METHODES DE LA COMMANDE CLASSIQUE AVEC LA COMMANDE OPTIMALE

4.1. Introduction

La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variations et de choisir enfin la solution optimale.

Dans ce chapitre, on commence par étudier le système solaire sans régulateur par simulation avec l'outil de simulation (SIMULINK® 7.7) incluant le logiciel de Mathworks Matlab. Ensuite, deux méthodes de poursuite du MPP sont étudiées par simulation ; la méthode P&O et la commande optimale proposée.

4.2. Etapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

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.

4.2.1. Evaluation des besoins en eau [8]

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail.

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système Equations et formules mathématiques.

4.2.2. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire nous mène à dimensionner la pompe. Pour la dimensionner on doit tenir compte de deux facteurs suivants :

- La quantité d'eau requise.
- La hauteur que doit convaincre la pompe.

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

$$P_h = \rho g H q_v \quad (4.2)$$

Avec :

- **P_h** : puissance communiquée au fluide par la pompe (W).
- **g** : accélération de la pesanteur (9.81 m/s²).
- **H** : hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).
- **q_v** : débit volumique (m³/s).
- **ρ** : masse volumique d'eau (1000Kg/m³Exemple

4.2.3. Détermination de l'énergie solaire disponible

Les méthodes de dimensionnement sont basées sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

4.2.4. Modélisation du panneau solaire

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur pendant une journée est calculée à partir des données du débit et de la hauteur manométrique totale requise et s'exprime en watt heure (Wh).

Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (C_H) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé .

Énergie requise pour la pompe E_{ele} :

$$E_{ele} = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{R_{mp}} \quad (4.3)$$

E_{ele} Est habituellement exprimé en kWh.

Ou :

$$C_H = \frac{\rho \cdot g}{3600} \quad (4.4)$$

$$C_H = \frac{9.81 \cdot 10^3}{3600} = 2.725$$

- **g** : Constante de la gravité (9,81 m/s²).
- **ρ**: masse volumique d'eau (1000 kg/m³).
- **R_{mp}** : Rendement du groupe motopompe

4.2.5. Choix des composants

Nous allons dimensionner les différents éléments du système d'une manière générale ou les valeurs de la hauteur géométrique et du débit sont à fixer par l'utilisateur.

4.2.5.1. Dimensionnement du générateur photovoltaïque [12]

Pour dimensionner le générateur photovoltaïque on définit les données sur l'ensoleillement mensuel moyen selon une inclinaison du champ qui égale à Latitude de Bejaia (36.43°N) pour une année d'exploitation et une température de fonctionnement. La puissance de sortie délivrée par un système solaire varie en fonction de l'ensoleillement direct reçu à la surface des panneaux solaires. L'unité de mesure adoptée pour quantifier le flux d'irradiation solaire H_s journalière est le kWh/m²/jour. On peut le calculer par :

$$H_s(\text{Kwh/m}^2|\text{jours}) = E_s(\text{Kw/m}^2) \cdot \text{la durée de l'ensoleillement } E(\text{h/jour}) \quad (4.5)$$

Calculons la crête puissance (P_c) en supposant des pertes de 20% attribuable à la température et à la poussière. Le dimensionnement théorique du champ photovoltaïque devient :

$$P_c = E_{ele}/(E \cdot (1 - P_{ertes})) \quad (4.6)$$

$$\text{Et : } n_s = V_m/V \quad (4.7)$$

$$n_p = I_m/I \quad (4.8)$$

Avec :

- **ns** : nombre de module en série.
- **np** : nombre de module en parallèle.
- **I_m** et **I** sont les courants de fonctionnement du champ et du module photovoltaïque respectivement.
- **V_m** et **V** sont les tensions de fonctionnement du champ et du module photovoltaïque respectivement.

4.2.5.2. Dimensionnement du moteur

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

4.2.5.3. Dimensionnement du pompe

Comme on l'a déjà dit lors du calcul de la puissance hydraulique nécessaire, la connaissance de cette dernière nous suffit pour dimensionner la pompe avec un débit et une hauteur supposés connus. La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par l'équation (4.2). Tenons compte du rendement de la pompe, la puissance mécanique requise par la pompe sera :

$$P_{\text{mec}} = \frac{P_h}{\eta} \quad (4.9)$$

Où:

- P_h : la puissance hydraulique nécessaire.
- η : le rendement de la pompe.

4.3. Simulation du système de pompage global

Après avoir modélisé le système de pompage photovoltaïque, il est indispensable de simuler l'ensemble. Nous présentons les différentes parties qui constituent le système.

En général, un système de pompage se compose des éléments suivants :

- Le panneau solaire,
- Le hacheur,
- L'onduleur
- Le contrôleur MPPT (P&O et la commande optimale)
- Le moteur
- La pompe

4.3.1. Générateur photovoltaïque

A partir du modèle mathématique du générateur photovoltaïque développé dans le paragraphe (2.3.1) du chapitre2, le bloc de Simulink est montré sur la (**figure 4-1**) pour une insolation et une température données. Le même bloc peut être employé pour plusieurs insolation et températures. Pour cela, on a choisi un modèle de type (XB60)

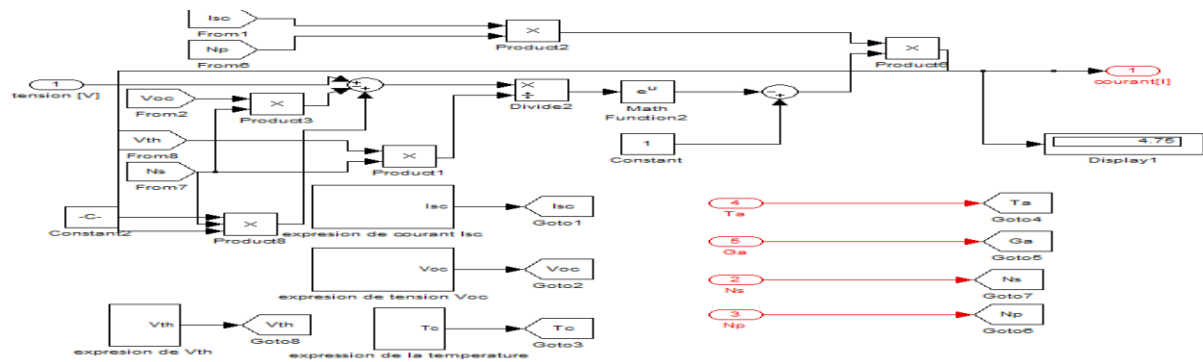
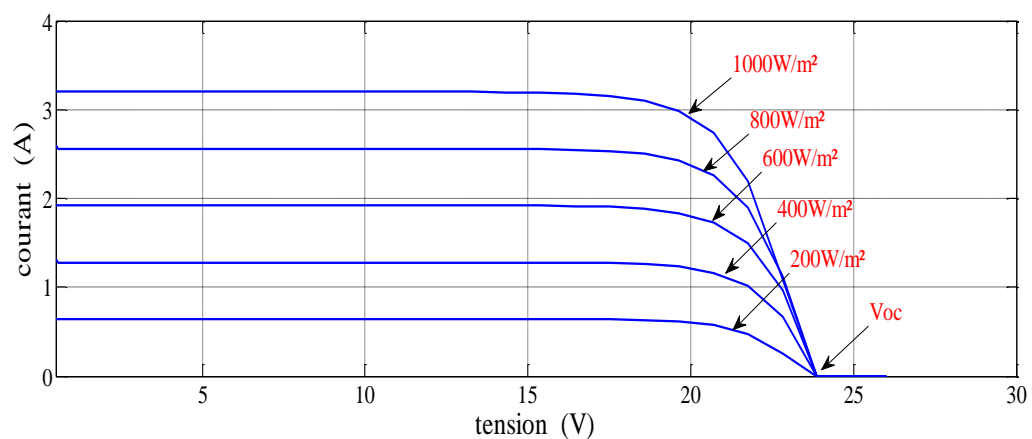


Figure 4-1 Schéma bloc de Simulink du GPV

4.3.1.1. Résultats de simulation du GPV

➤ Influence de l'ensoleillement

Pour voir l'influence de l'ensoleillement, nous avons tracé les caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs d'ensoleillements mais à une température constante $T_C=25^\circ\text{C}$

Figure 4-2 Caractéristiques : $I = f(V)$, avec $T_a=25^\circ\text{C}$

On remarque que le courant max est proportionnel à l'ensoleillement c.-à-d. le courant augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement

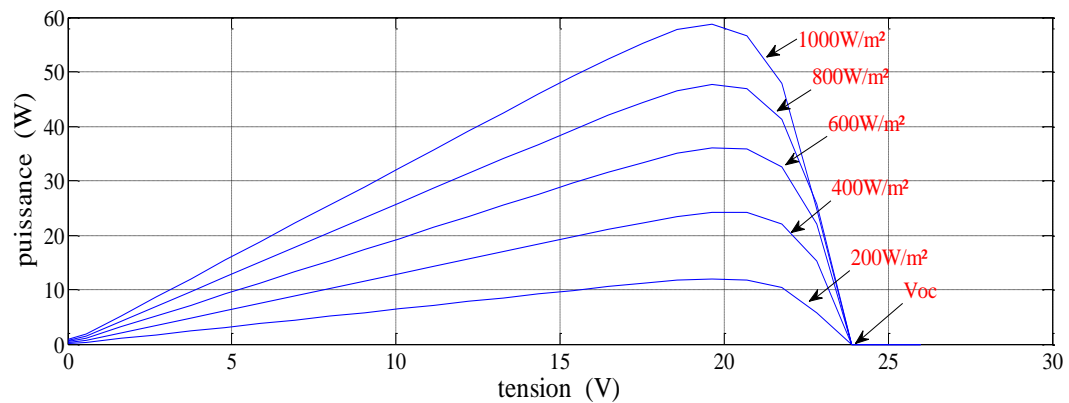


Figure 4-3 Caractéristiques : $P = f(V)$, avec $T_a=25^\circ\text{C}$

On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'ensoleillement.

➤ Influence de la température

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques I-V et P-V pour différents niveaux de température mais à un ensoleillement constant de $E=1000 \text{ W/m}^2$.

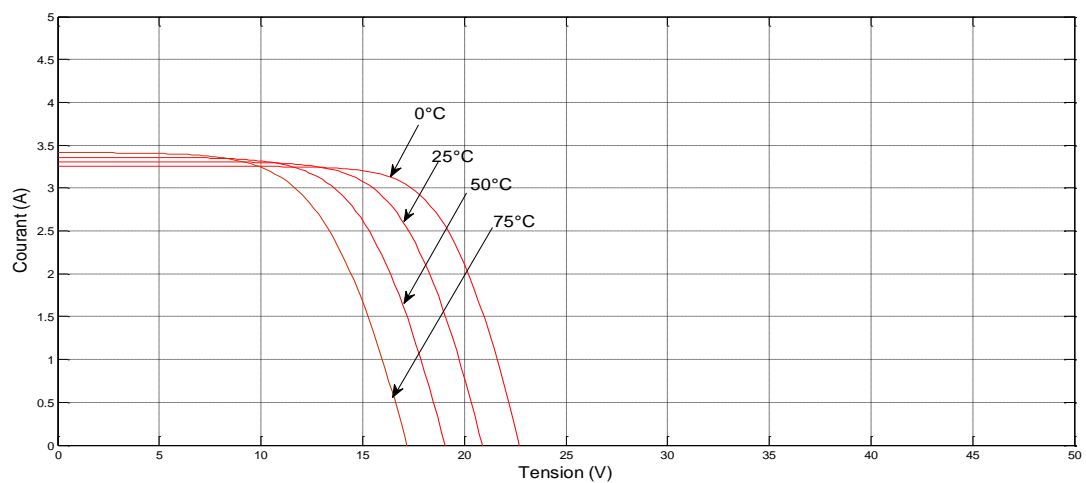


Figure 4-4 Caractéristiques : $I = f(V)$ avec $E=1000 \text{ W/m}^2$

La tension du module diminue avec l'augmentation de la température, par contre, le courant I varie très peu avec la température

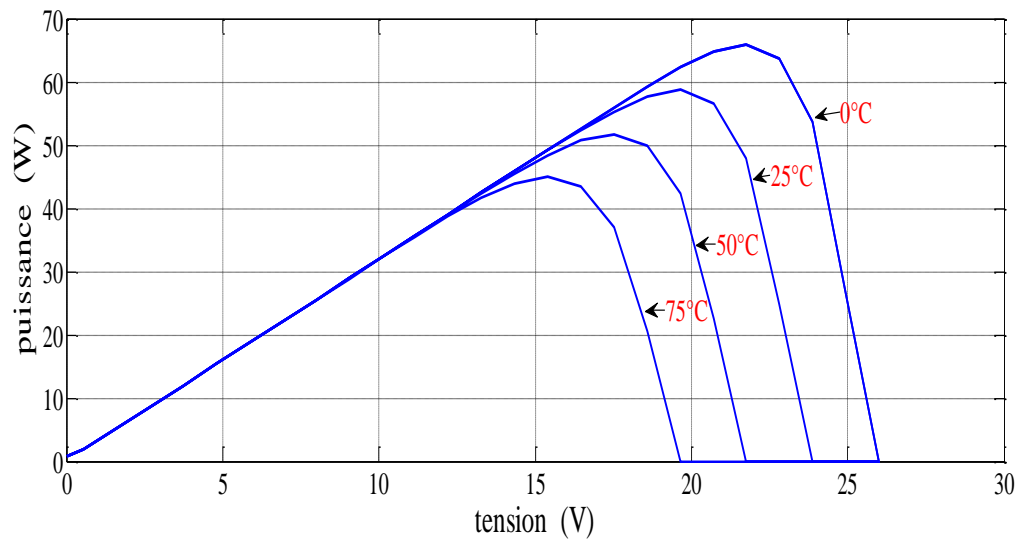


Figure 4-5 Les caractéristiques : $V = f(V)$ avec $E=1000W/m^2$

A partir de la figure (4-5), on remarque que la puissance optimale P_m diminue avec l'augmentation de la température et la tension du point de puissance optimale diminue également.

4.3.2. Commande MPPT (P&O) et commande optimale (sinESC)

4.3.2.1. Commande MPPT (P&O)

Le schéma bloc ci-dessous est développé à partir de l'organigramme présenté dans le paragraphe (3.3)

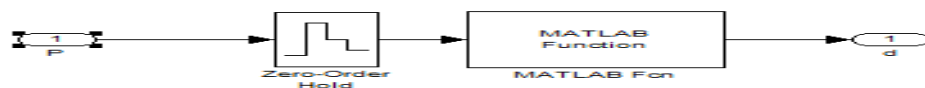


Figure 4-6 Schéma bloc détaillé du MPPT (P&O).

4.3.2.2. Commande optimale (sinESC)

La structure générale de la commande sin ESC sous 'SIMULINK®' est illustrée à la **Figure 4-7**.

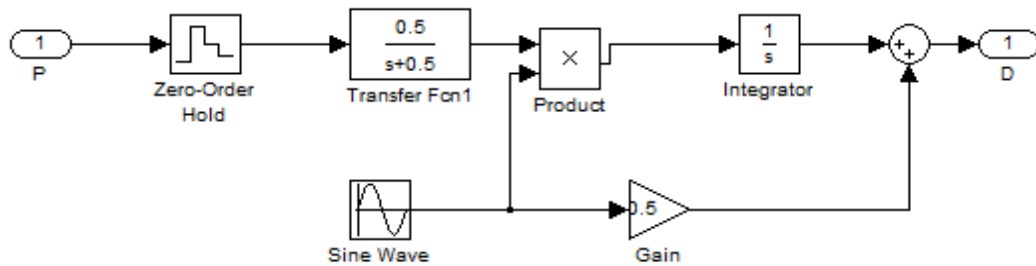


Figure 4-7 Structure de la commande sin ESC sous 'SIMULINK®'

4.3.3. Convertisseur DC-DC (hacheur)

Le schéma bloc ci-dessous est développé à partir des équations du hacheur Buck-Boost qui ont été présentées dans le paragraphe (2.4)

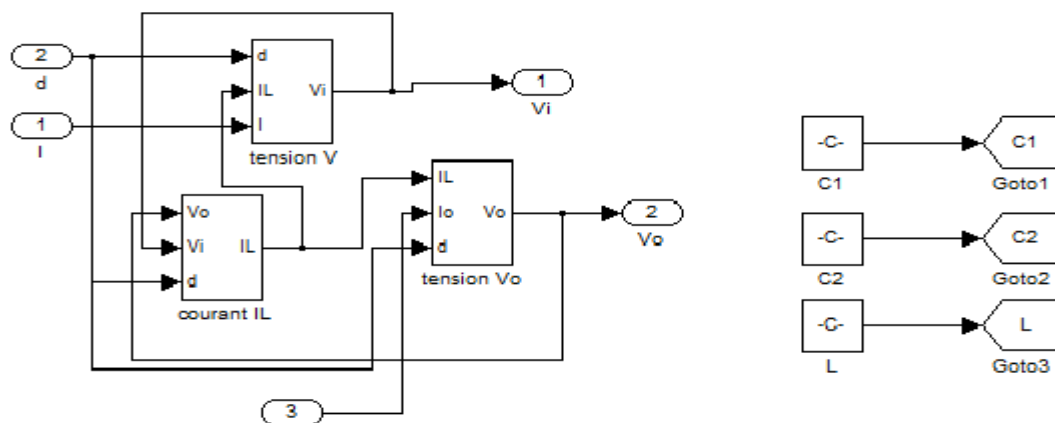


Figure 4-8 Schéma fonctionnel de simulation d'un convertisseur Buck-Boost

4.3.4. Convertisseur DC-DA (Onduleur)

La figure (4.9) présente le schéma bloc de l'onduleur commandé par la commande en pleine onde (180°). On le développe à partir des équations données dans le paragraphe (2.5).

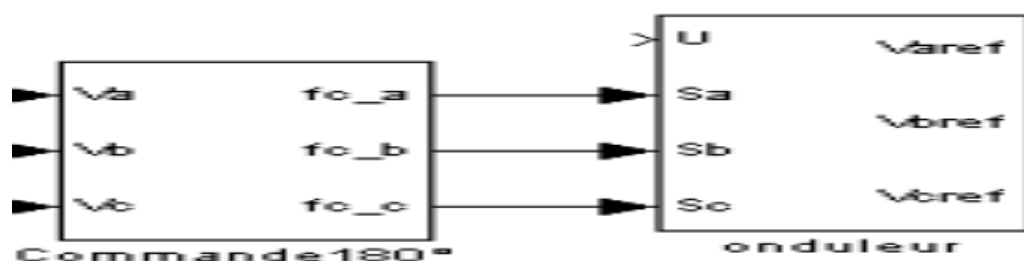


Figure 4-9 L'onduleur et sa commande 180°

4.3.5. Groupe électropompe

4.3.5.1. Moteur

A partir du modèle mathématique donné dans le paragraphe (II.6) , on a développé un schéma bloc sur Matlab simulink comme l'illustre la figure ci-dessous :



Figure 4-10 Moteur asynchrone.

4.3.5.2. Pompe centrifuge

Le schéma bloc ci-dessous est développé à partir des équations de la pompe centrifuge qui sont présentées dans le paragraphe (2.7).

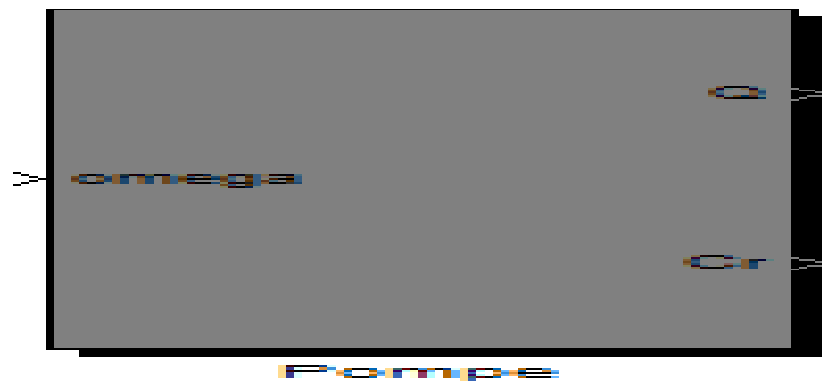


Figure 4-11 Pompe centrifuge

4.4. Résultats de simulation et interprétation

4.4.1. Résultats de simulation de la méthode P&O

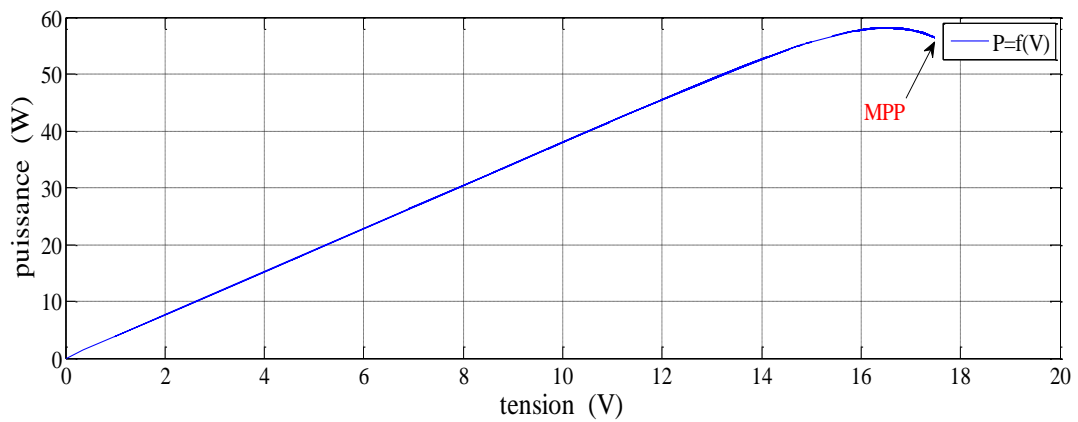


Figure 4-12 Poursuite du point de puissance maximale par la méthode (P&O).

a. Puissance du générateur

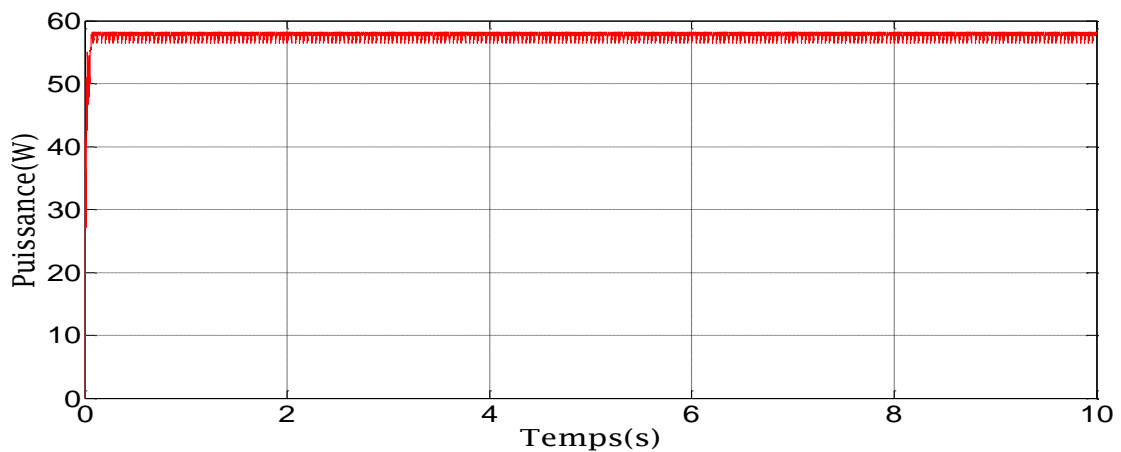


Figure 4-13 Puissance du générateur

b. Tension de la sortie

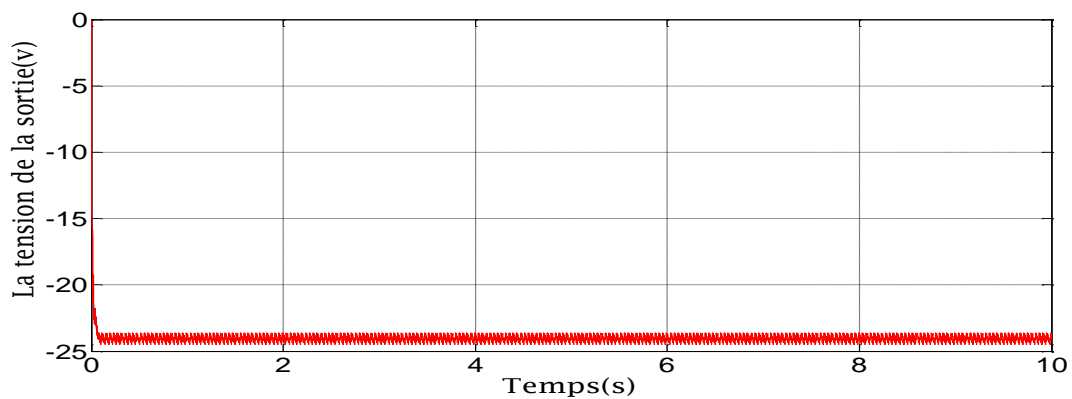
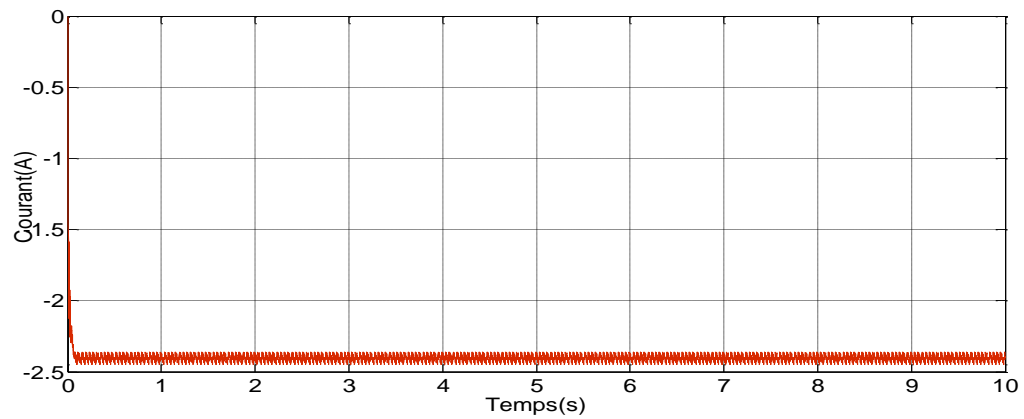
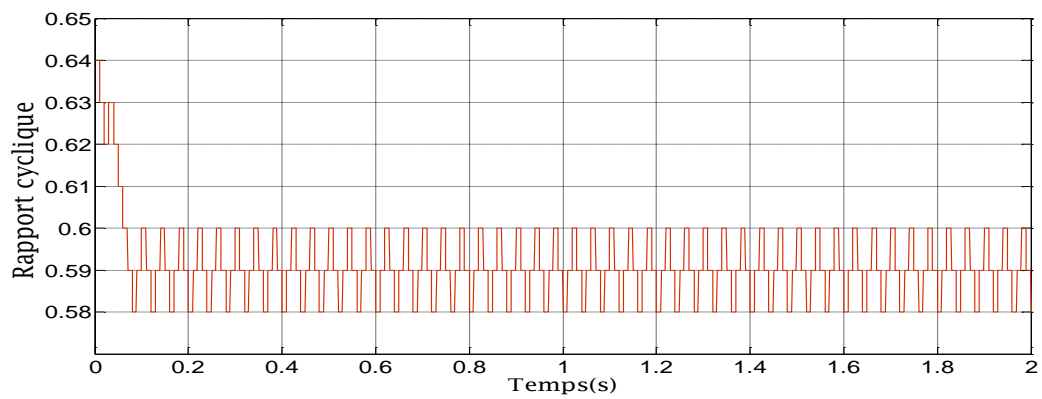
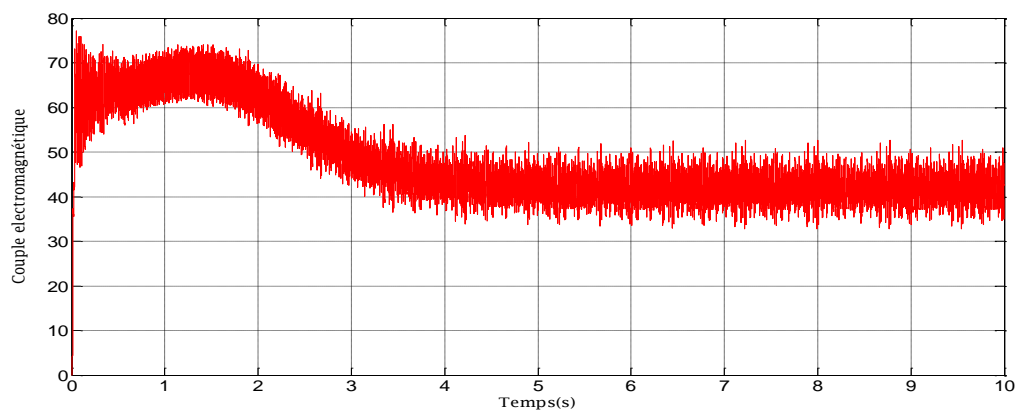
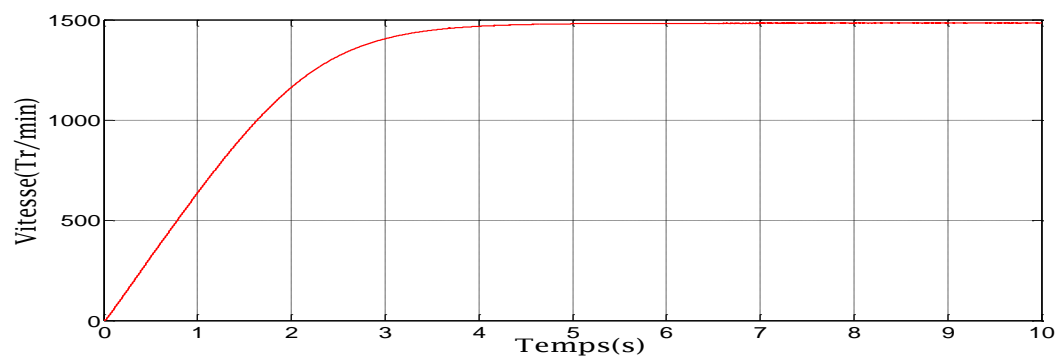
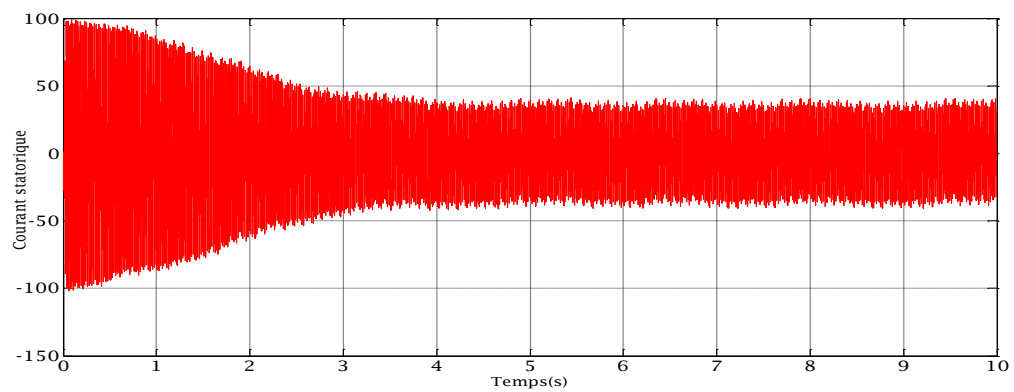
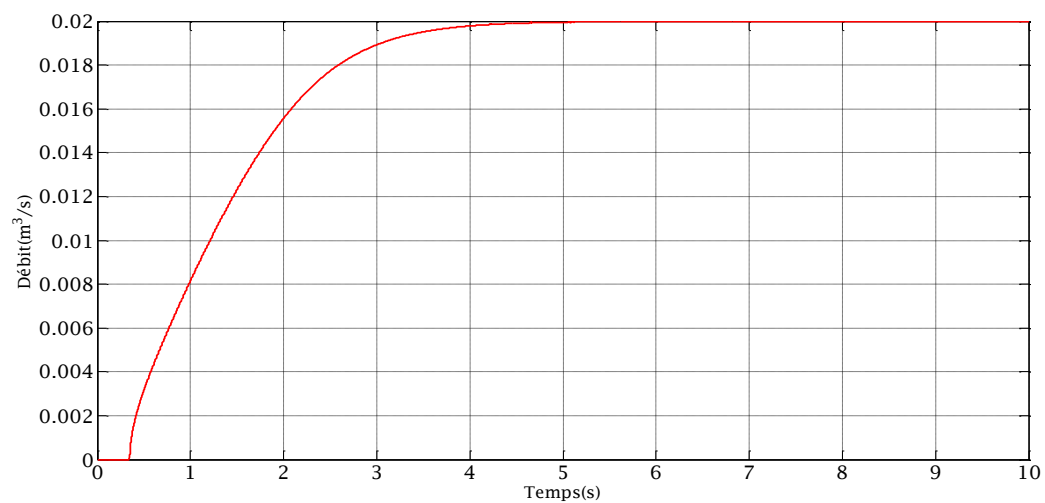


Figure 4-14 Tension de la sortie

c. Courant de la sortie**Figure 4-15 Courant de la sortie****d. Rapport cyclique****Figure 4-16 Rapport cyclique D****e. Couple électromagnétique du moteur****Figure 4-17 Couple électromagnétique du moteur.**

f. Vitesse du moteur**Figure 4-18** Vitesse du moteur.**g. Courant statorique****Figure 4-19** Courant statorique.**h. Débit de la pompe****Figure 4-20** Débit de la pompe

4.4.2. Résultats de simulation de la sinESC

Dans le but de visualiser la position du point de puissance maximale par la méthode de commande optimale, une simulation est effectuée pour une température et un ensoleillement constants, c'est-à-dire $T_a=25^\circ\text{C}$ et $G_a=1000\text{W}/\text{m}^2$

a. Puissance du générateur

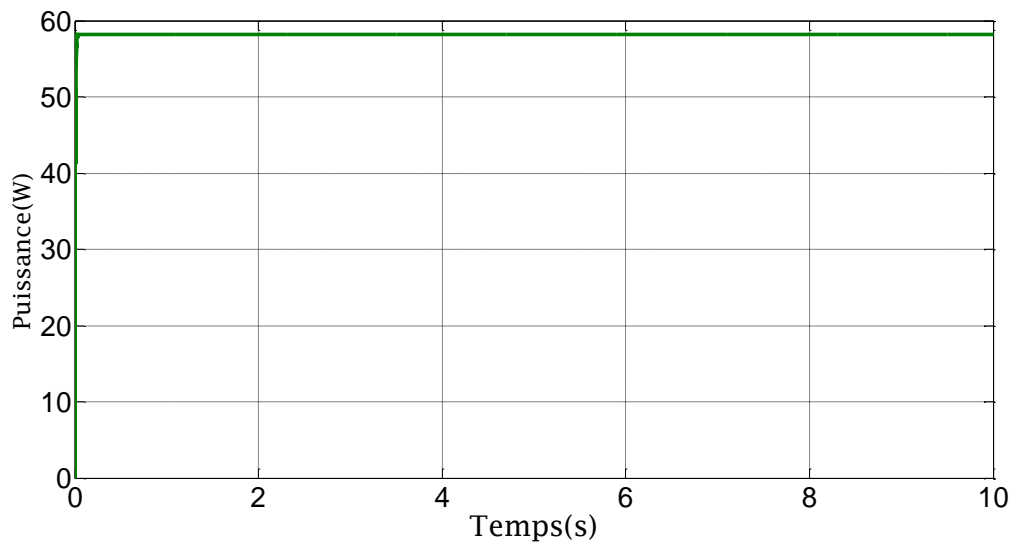


Figure 4-21 Puissance du générateur

b. Rapport cyclique

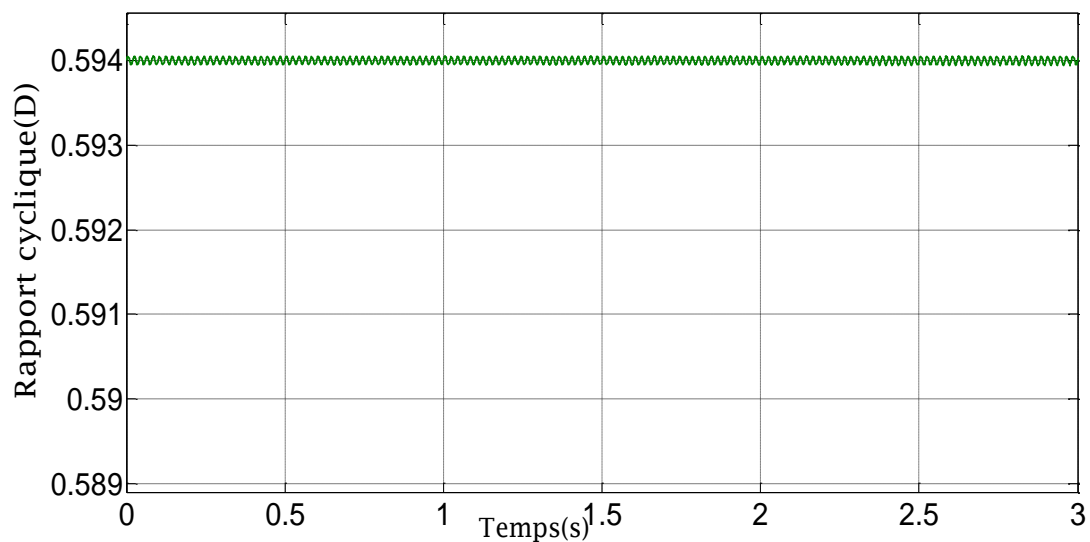
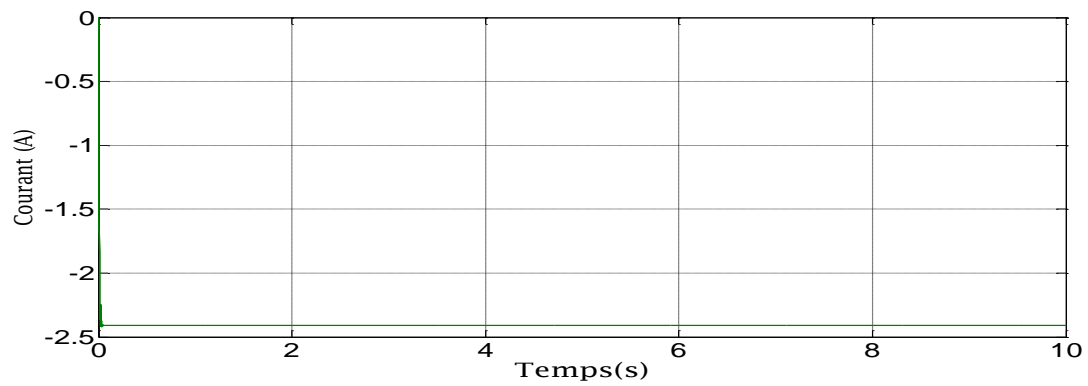
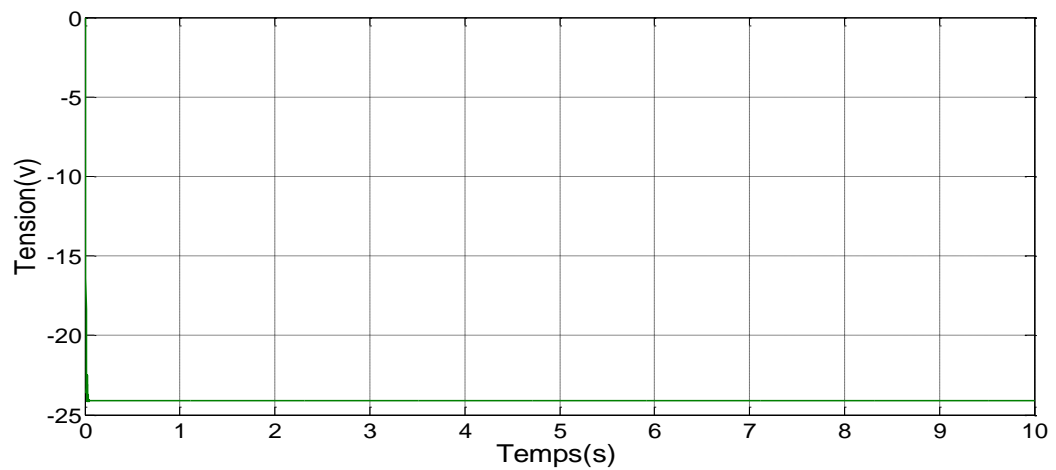
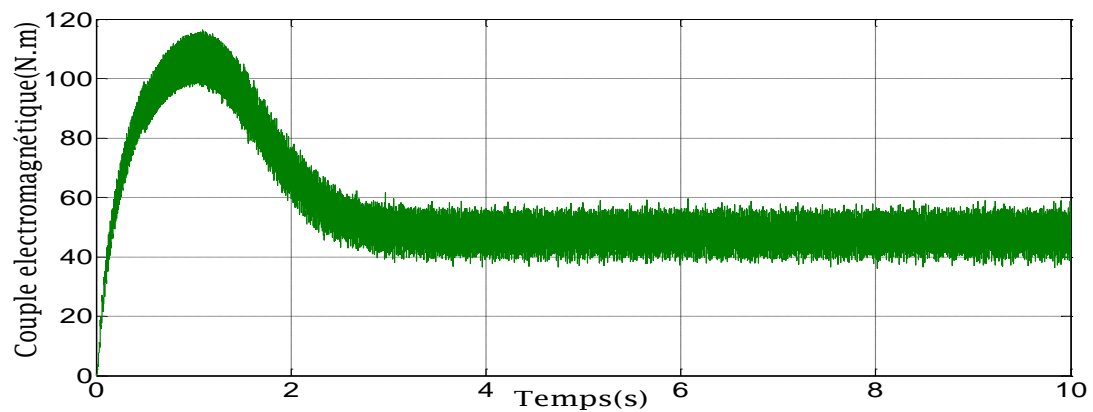
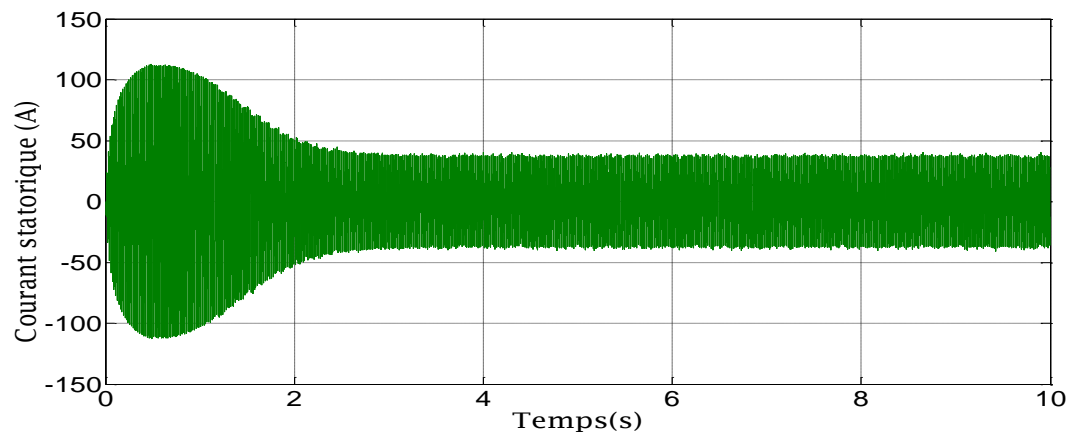
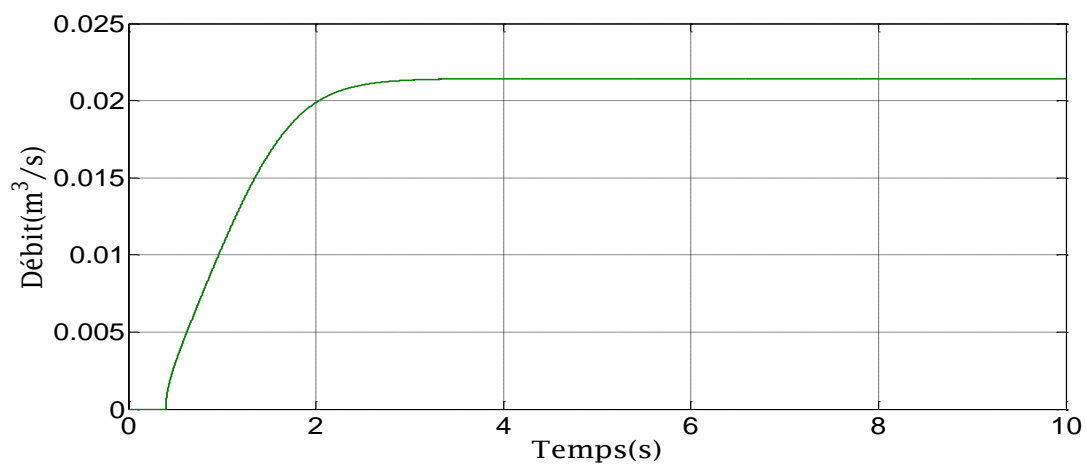
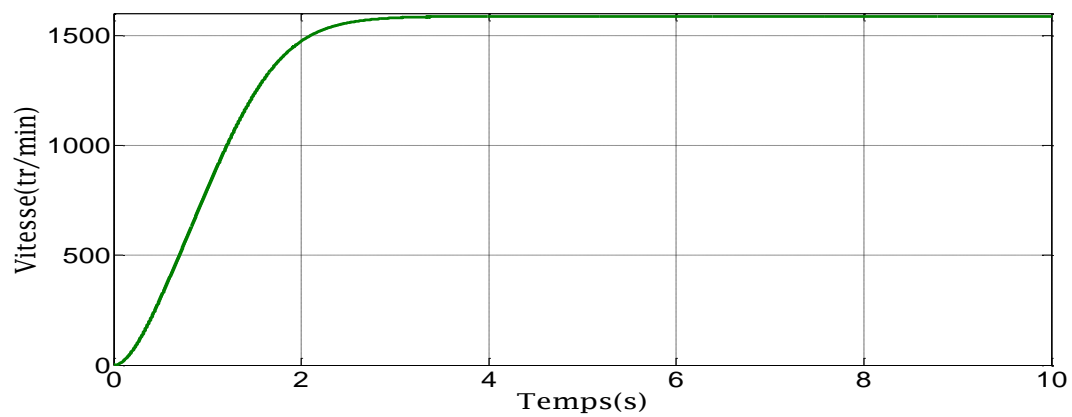


Figure 4-22 Rapport cyclique D

c. Courant de sortie**Figure 4-23** Courant de sortie**d. Tension de sortie V_o** **Figure 4-24** Tension de sortie**e. Couple électromagnétique****Figure 4-25** Couple électromagnétique

f. Courant statorique**Figure 4-26** Courant statorique**g. Débit de la pompe****Figure 4-27** Débit de la pompe.**h. Vitesse du moteur****Figure 4-28** Vitesse du moteur

4.5. Interprétation des résultats

Après la simulation du système de pompage photovoltaïque, on résume les résultats dans les points suivants :

- On constate que les courbes du débit de la pompe nous donne un débit constant pour une vitesse donnée, et il y a un seuil dans le quel le débit est nul pour une vitesse V_0 , car c'est la caractéristique des pompes centrifuges.
- Les courbes de la vitesse nous renseignent sur la vitesse de rotation du système, et cette vitesse est proportionnelle à la fréquence d'alimentation du moteur, qui est aussi proportionnelle à la tension aux bornes du panneau pour assurer V/f constant..
- Le couple développé par le moteur est proportionnel à la tension d'alimentation qui à son tour suit la tension délivrée par le panneau.
- On remarque que le courant de la machine est très grand au début ensuite il se stabilise cela est due aux forts appels de courant au démarrage.
- d'après les courbes obtenues nous avons constaté que le débit délivré par la pompe est en fonction de l'éclairement solaire, cela veut dire qu'une variation de l'éclairement engendre la variation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque qui va être ressentie par la machine par la variation du courant statorique.

4.6. Comparaison entre les deux techniques

Dans cette partie, nous allons effectuer une étude comparative des deux approches (P&O) et sinESC mettant ainsi en évidence l'efficacité de chaque technique pour permettre à la fin de montrer la meilleure solution à adopter.

a. Puissance du générateur

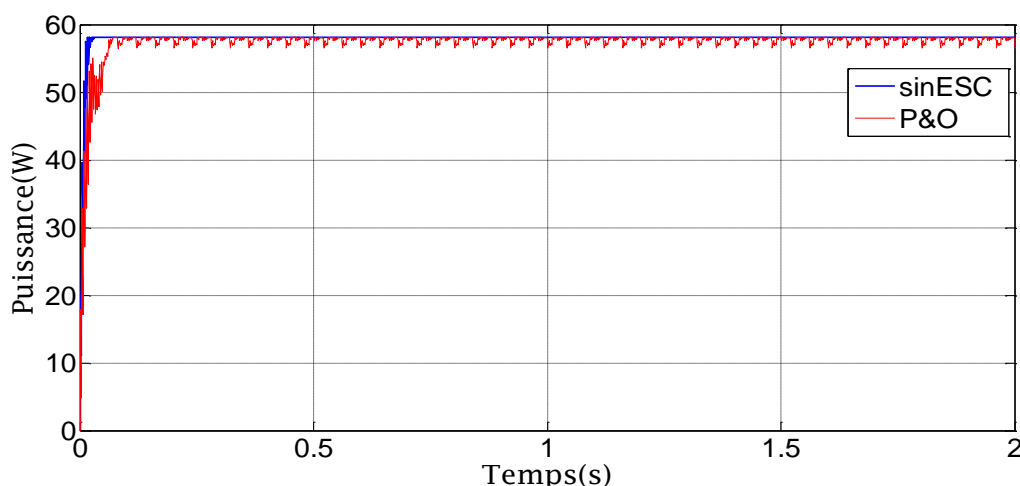


Figure 4-29 Puissance du générateur

b. Tension du générateur

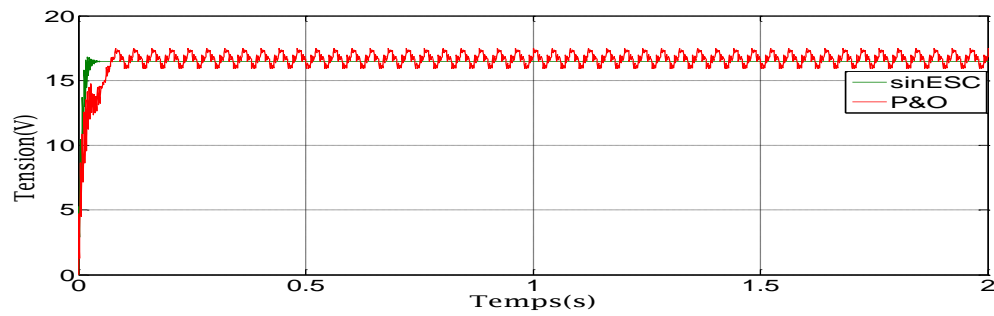


Figure 4-30 Tension du générateur

c. Rapport cyclique

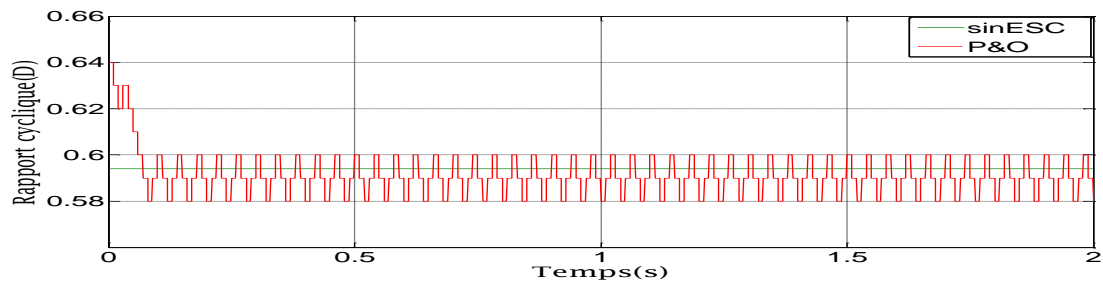


Figure 4-31 Rapport cyclique

Courant de la sortie

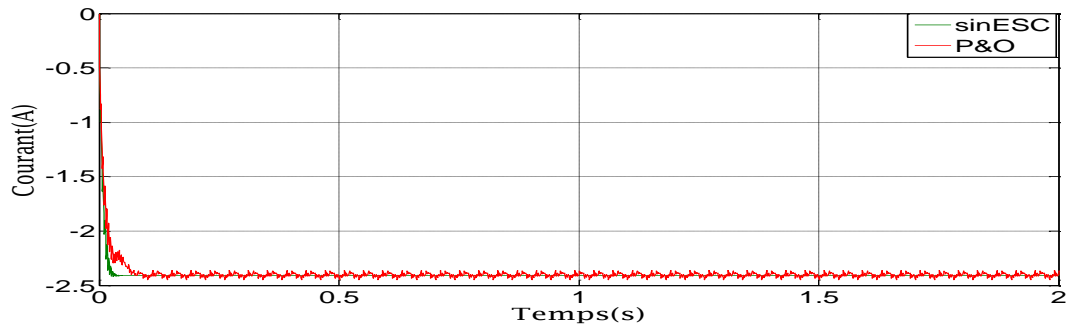


Figure 4-32 Courant de la sortie

4.7. Interprétation des résultats pour la comparaison

A partir des courbes de simulation, on peut résumer les résultats de simulation de la commande sinESC et P&O comme suit :

Tableau 4.1. Performance dynamique

/	P&O	sinESC
t_r	0.08	0.019

La commande P&O est une commande conventionnelle qui consiste à perturber le système afin d'atteindre le MPP, son efficacité dépend du pas de perturbation, elle nous donne de bons résultats ($P = 60 \pm 0.5$ Watt, $V = 17.1 \pm 0.4$ Volt), le temps de réponse de cette commande ($t_r = 0.08$ s), le dépassement n'existe pas dans cette commande (le système est premier ordre).

La deuxième commande sinESC est une commande optimale qui consiste à faire le développement de Taylor autour d'une valeur donnée (une perturbation sinusoïdale), cette commande donne de très bons résultats ($P=60 \pm 0.4$ Watt, $V=17.1 \pm 0.2$ Volt) le temps de repose de cette commande $t_r = 0.019$ s, le dépassement n'existe pas (le système est premier ordre).

On remarque d'une façon générale que les performances dynamiques de la commande sinESC sont meilleures que celles de la commande P&O. Ces commandes ont les inconvénients du pas de perturbation, le temps d'échantillonnage et la variation de la valeur de puissance et de la tension autour de ses valeurs maximales.

D'après les résultats de simulation on remarque que la commande sinESC a des performances statistiques mieux que la P&O. La commande sinESC nous a donné de bons résultats sur le débit et sur les systèmes parce qu'elle atteint le point de puissance maximale qui est le point de bon fonctionnement du système.

D'après les résultats de simulation on remarque que les deux commandes s'adaptent avec le changement de température et de l'ensoleillement. La plus performante commande est sinESC malgré le changement de l'ensoleillement la tension du GPV reste inchangée.

Malgré l'efficacité de la commande sinESC, cette dernière présente des inconvénients :

- Problème de calcul de la fréquence de coupure du filtre passe-haut, et passe-bas de telle sorte à filtrer la composante continue du développement de Taylor et de garder seulement le gradient sur lequel on fait le test.
- Problème de choix de la fréquence ainsi que l'amplitude de perturbation sinusoïdale

4.8. Conclusion

Pour le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque et dans le but d'avoir de meilleurs rendements, le dimensionnement et la simulation d'un tel système deviennent une étape indispensable. Pour cela ce chapitre a été consacré pour la description d'une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque ainsi qu'une simulation du système pompe à l'aide d'une commande sur le logiciel Matlab-Simulink a été faite afin de présenter un maximum possible d'information sur ce système.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, il serait intéressant de les valider pratiquement

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Ce mémoire a porté sur l'étude, la commande, la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque. Ces systèmes se présentent comme une solution idéale pour l'alimentation de l'eau pour les régions peu peuplées, isolées et enclavées.

Pour améliorer les performances d'un système de pompage photovoltaïque, on est amené à améliorer les performances de chaque élément de ce système. Dans cet esprit, nous avons introduit en premier lieu les contrôleurs MPPT et leur rôle important dans un système photovoltaïque. Nous avons ensuite donné un aperçu sur la commande optimale, devenue très utilisée ces dernières années. Cette dernière a été simulée et ses résultats ont été comparés à ceux obtenus avec un contrôleur MPPT P&O.

Le contrôleur P&O qui est basé mathématiquement sur la perturbation de la caractéristique P-V du panneau photovoltaïque, bien qu'il soit ancien, présente de bonnes performances mais il a encore quelques problèmes tels que :

- ✓ Le choix des paramètres du régulateur (le pas ΔD);
- ✓ Le choix de la période d'échantillonnage.

Concernant la commande proposée, elle est basée sur le développement de Taylor, utilise le gradient pour extraire le PPM. Il a donné de très bonnes performances, améliore les réponses du système photovoltaïque, réduit non seulement le temps de réponse pour poursuivre le point de puissance maximale mais il a aussi éliminé les fluctuations autour de ce point. Ce qui montre l'efficacité de la commande optimale pour les systèmes photovoltaïques dans des conditions d'environnement stables et changeantes.

En conséquent avec une base de données météorologique on peut prévoir le pompage photovoltaïque de l'eau quotidiennement, mensuellement et annuellement dans un emplacement choisis afin de bien choisir et dimensionner les différents éléments du système.

On peut conclure que notre but a été atteint, on a pu montrer, par voie de simulation, le fonctionnement des différentes parties du système de pompage.

Comme perspective à ce travail, on peut envisager de prévoir une installation au niveau de notre laboratoire.

Annexe A

Références Bibliographiques

- [1] A. Attar, « Les énergies renouvelables », ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau, 2000.
- [2] A. MOUSSI, A. SAADI, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage Photovoltaïque », LARHYSS Journal, N°.01, Mai 2002
- [3] M. Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [4] A. Labouret. M, Villos. « Energie solaire photovoltaïque » le manuel du professionnel. 3^{ème} édition Dunod, 2006.
- [5] Revue « les systèmes photovoltaïques » BRUXELLES ENVIRONNEMENT institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, avril 2008.
- [6] A. Labouret, M. Villos, « Energie solaire photovoltaïque » 3^{ème} édition DUNOD, Décembre 2007,
- [7] A. Hamidat, « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïques destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen 2004.
- [8] F Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation » thèse de doctorat Université de Tlemcen 2004
- [9] F. Zerhouni, and al. « Approche dans la modélisation d'un Générateur Photovoltaïque », ICEL, novembre 13-15, U.S.T.Oran, Algeria, 2000.
- [10] Apere, « Guide des énergies renouvelables », Ministère de Wallonie, Association de promotion des énergies renouvelables, 1999-2000.
- [11] P. Menanteau, « L'électricité photovoltaïque », IEPE, Grenoble, 1997
- [12] J. royer, T. djiako, E. schiller, B. sadasy. « Le pompage photovoltaïque » IEPF université d'Ottawa/EIER/CREPA. Éditions MultiMondes, 1998
- [13] M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique » thèse de doctorat en sciences, Université de Batna 2008
- [14] E. Michel, A. Deves. « Énergie photovoltaïque : application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en zones rurales » édition COSTIC, 2003
- [15] S. M. AIT-CHEIKH « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques 2 », thèse de doctorat d'état, Décembre 2007
- [16] D. Thévenard, and M. Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003
- [17] H, Bonneviot. M, Courillon. Y, Maigne, « Technologies européennes du pompage solaire photovoltaïque » fondation énergies pour le monde.
- [18] J. Le Chenadec, « Asservissement de vitesse et de couple d'une machine à courant continu ». (jy.lechenadec@libertysurf.fr)
- [19] S. Emmanuel, « Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts », Thèse de doctorat à l'université de Nantes école doctorale sciences pour l'ingénieur de Nantes année 1999
- [20] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. S. Sy, Sous la direction de E. Schiller, « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », Comprend des réf, bibliog, Publ. En collab. Avec: IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA. ISBN 2-89481-006-7 1998.

- [21] J. Debaene, Techniques de l'ingénieur, « mécanique et chaleur, pompes, vide, air comprimé », NoB4, Paris, 1988.
- [22] D. Weiner, «An optimal design of a photovoltaic D.C motor coupled water pumping system».IEEE, conference, 1990, pp 268-274.
- [23] J. P. Ferreux et F. Forest, « Alimentation à découpage ». Troisième édition, 2003
- [24] C. Chabert, A. Rufer « Optimisation des Convertisseurs de Puissance Embarqués : Adaptation des Cellules à Lien Alternatif mf et à Commutation Douce », 2002
- [25] N. Bouali, D. Rekioua, « Etude des performances d'un système de pompage photovoltaïque » colloque national sur l'énergie solaire ; CNESOL Béjaia 2006.
- [26] J.P. Caron, J.P. Hautier « Modélisation et commande de la machine asynchrone », 2^{ème} Edition 1995
- [27] A. Hamidat, B. Benyoucef. « Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems». Renewable Energy 33 (2008)
- [28] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10 N°4 (2007).
- [29] M. ARROUF, «optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque», thèse de doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [30] S.M. Ait Cheikh, «Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», thèse de doctorat, Ecole National Polytechnique, Algérie, Décembre 2007
- [31] A. Safari, S. Mekhilef «Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuck converter», IEEE Trans. On Indus. Electronics, vol. 58, NO. 4, APRIL 2011.
- [32] H. Zazo, R. Leyva and E. Del Castillo, « Analysis of Newton-Like Extremum Seeking Control in Photovoltaic Panels», University Rovira Virgili, 2012.
- [33] M. Krstic, « Extremum Seeking Feedback Tools for Real-Time Optimization», Large Scale Robust Optimization, Sandia, August 2005.
- [34] C. Olalla, M. I. Arteaga, R. Leyva, A. El Aroudi, « MPPT Based on Sinusoidal Extremum-Seeking Control in PV Generation », *Universitat Rovira i Virgili, Avinguda Paisos Catalans 26, 43007 Tarragona, Spain*, December 2011.
- [35] Z. Zhi-dan, H. Hai-bo, Z. Xin-jian, C. Guang-yi, R. Yuan, « Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants», article, Science Direct, p259- 269, Chine, 2008.
- [36] H. Yau, C. Wu, « Comparison of Extremum-Seeking Control Techniques for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems», article, Université Chin-Yi, p2180-2195, Taiwan, 2011.

ملخص:

يتم عادة تخزين الطاقة الناتجة من النظم الكهربية الضوئية في بطاريات. المولدات الكهروكيميائية القابلة لإعادة الشحن والتي هي أنظمة أكسدة قابلة للعكس. يجب عليها العمل كمولد ومتلقي.

المدخرات المدروسة في هذا البحث هي مدخرات من الرصاص وأخرى من الليثيوم أيون. تطبيق التحكم الأمثل لنظام تخزين الطاقة الضوئية يعمل على زيادة أداء التثبيت.

كلمات مفتاحية: نظام التخزين ، بطارية، طاقة شمسية، تحليل، تحكم أمثل

Résumé :

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques est en générale assuré par des batteries. Les générateurs électrochimiques rechargeables sont des dispositifs dont les systèmes d'oxydoréduction sont réversibles. Ils doivent pouvoir fonctionner en générateur et en récepteur.

Les accumulateurs étudiés dans ce mémoire sont les accumulateurs au Plomb et les accumulateurs au Lithium-ion. L'application de la commande optimale du système de stockage d'énergie photovoltaïque va augmenter les performances de l'installation.

Mots Clés : Système de stockage, Batterie, Energie photovoltaïque, Analyse, Commande optimale.

Abstract:

Energy storage in photovoltaic systems is generally provided by batteries. The rechargeable electrochemical generators are devices which are reversible redox systems. They need to operate as a generator and receiver.

The accumulators studied in this manuscript are the Lead accumulators and the accumulators with the Lithium-ion. The application of the optimal control of the storage system of photovoltaic energy will increase the performances of the installation.

Key Words : Storage system, Battery, Photovoltaic energy, Analysis, Optimal control.