

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira-Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en électrotechnique

Option : Energies renouvelables

Thème

**Contribution à l'amélioration des performances
d'un système de pompage photovoltaïque**

Réalisé par :

M^r. GUERROUDJ FAROUK
M^r. GUERROUDJ NASSIM

Encadré par :

M^{me}. BELAID S
M^r. IDJDARENE K

Promotion : 2012/2013

REMERCIEMENTS

*Dieu merci de nous avoir permis d'atteindre ce stade de
connaissance et de réussir dans les études*

*Nous tenons à remercier nos familles d'abord pour leur
soutenance durant tous nos cursus d'étude*

Nous remercions nos amis intimes qui nous ont soutenus

*Nous remercions également notre promoteur et Co-promoteur
ainsi que toute la famille de l'électrotechnique de l'institut de
l'université de Bejaia.*

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail en guise d'amour, de respect et de reconnaissance :

Aux deux être les plus chers au monde, ma mère et mon père, pour leurs soutien, sacrifice, patience, ainsi pour leurs conseils dont ils ont fait preuves pour m'avoir a la première réussite dans ma vie, que dieu les protèges et les entoure de sa bénédiction.

A mes très chers frères et sœurs

votre soutien réserve et vos encouragements m'ont permis d'affronter beaucoup d'épreuves.

A mon très cher binôme Nassim et sa famille

A tous mes proches et mes amis sans exception

A ce que j'aime et qui m'aiment et qui me sont très chers.

Guerroudj Farouk

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail en guise d'amour, de respect et de reconnaissance :

Aux deux être les plus chers au monde, ma mère et mon père, pour leurs soutien, sacrifice, patience, ainsi pour leurs conseils dont ils ont fait preuves pour m'avoir a la première réussite dans ma vie, que dieu les protèges et les entoure de sa bénédiction.

*A mes très chers frères et sœurs
votre soutien réserve et vos encouragements m'ont permis d'affronter
beaucoup d'épreuves.*

A mon très cher binôme Farouk et sa famille

A tous mes proches et mes amis sans exception

A ce que j'aime et qui m'aiment et qui me sont très chers.

GuerroudjNassim

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

CHAPITRE I

I_{mpp}	Courant au point de puissance maximale (A).
P_{mpp}	Puissance au point de puissance maximale (w).
V_{mpp}	Tension au point de puissance maximale (V)
MPPT	Maximum power point tracking.
DC	Direct courant.
T	Température (°C).
E_s	Ensoleillement (W/m ²).
P&O	Perturbation et observation.
PPM	Point de puissance maximale.
CI	Conductance incrémentielle.
V_e	Tension d'entrée (V).
V_s	Tension de sortie (V).
AC	Alternatif courant.
GPV	Générateur photovoltaïque.
I	Courant délivré par le module (A).

CHAPITRE II

I_{ph}	Photo-courant (A).
I_d	Courant de la diode (A).
I_s	Courant de saturation (A).
V_d	Tension de la diode (V).
V_T	Potentiel thermodynamique (V).
K	Constante Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ j/k).
T_J	Température de jonction (°C).

I_{sh}	Courant shunt (A).
P_1, P_2, P_3	Paramètre constant du panneau photovoltaïque.
E_{ref}	Ensoleillement de référence (W/m^2).
T_a	température ambiante ($^{\circ}C$).
N_{oct}	Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule ($45^{\circ}C$).
R_s	Résistance série (Ohm).
R_{sh}	Résistance parallèle (ohm).
n_s	Nombre des cellule en série.
E_g	Energie de gap.
A	facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).
I_{cc}	Courant de court circuit (A).
V_{co}	Tension de court circuit (V).
E_{stc}	Ensoleillement standard ($1000W/m^2$).
T_{stc}	Température standard ($25^{\circ}C$).
ΔT_c	Variation de la température.
ΔI	Variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.
ΔV	Variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.
α_{cc}	Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{c c}(A/^{\circ}C)$.
β_{co}	Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{co}(V/^{\circ}C)$.
I_{pv}	Courant photovoltaïque (A).
V_{pv}	Tension photovoltaïque(V).
L	Inductance (H).
C	Capacité (F).
A	Rapport cyclique.
V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	Tensions à l'entrée de l'onduleur (V).
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Tensions de phase de la charge (V).

V_{no}	Tension du neutre (V).
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	Tension aux bornes des phases de l'onduleur (V).
R	Résistance du bobinage.
I_b	Courant de bobinage.
V	Tension de bobinage.
\emptyset	Flux du bobinage.
θ	Position rotorique.
Θ	pulsation mécanique l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique.
P	Nombre de paire de pole.
L_s	Inductance statorique.
l_s	Inductance de fuite statorique.
L_r	Inductance rotorique.
l_r	Inductance de fuite rotorique.
M	Mutuelle inductance.
ω_s	Pulsation des grandeurs statoriques.
ω_r	Pulsation des grandeurs rotorique.
Ω	Vitesse mécanique.
ω	Pulsation mécanique.
V_{sabc}, V_{rabc}	Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.
I_{sabc}, I_{rabc}	Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.
V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique directe et quadratique.
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique direct et quadratique.
HMT	Hauteur manométrique (m).
H_g	Hauteur géométrique (m).
P_c	Pertes de charge.
P_n	Puissance nominale (W).
Ω_n	Vitesse nominale (tr/mn).

Ω_{opt} Vitesse optimale (tr/mn).

CHAPITRE III

Q Débit (m^3/s).

N_s Niveau statique (m).

N_d Niveau dynamique (m).

g Constant de la gravité ($9.81 m/s^2$).

ρ La densité de l'eau ($1000 kg/m^3$).

E_{hyd} Energie hydraulique (wh).

R_p Rendement des groupes motopompes.

MS Machine synchrone.

MAS Machine asynchrone.

C_{em} Couple électromagnétique.

C_r Couple résistant.

T_r Constante de temps.

LISTE DES FIGURES

*CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUES*

Figure (II.1) : Système de pompage photovoltaïque d'une ferme.....	2
Figure (I.2) : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batteries	4
Figure (I.3) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.....	5
Figure (I.4) : Caractéristique courant PV en fonction de la tension PV.....	7
Figure (I.5) : Description d'un module photovoltaïque	7
Figure (I.6) : Cellules identiques en séries	8
Figure (I.7) : Cellules identiques en parallèles.....	8
Figure (I.8) : Système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT.....	9
Figure (I.9) : Structure d'un hacheur dévolteur.....	10
Figure (I.10) : Structure d'un hacheur survolteur.....	10
Figure (I.11) : Structure d'un onduleur	11
Figure (I.12) : Caractéristiques d'une pompe centrifuge	15

CHAPITRE II : MODÉLISATION DES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Figure (II.1) : Schéma équivalent d'un module photovoltaïque idéal.....	17
Figure (II.2) : Modèle d'un générateur photovoltaïque à deux diodes.....	18
Figure (II.3) : Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode	20
Figure (II.4) : Caractéristique courant/tension d'une cellule photovoltaïque	23
Figure (II.5) : Caractéristique puissance/tension d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure (II.6) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique courant/tension.....	24
Figure (II.7) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique puissance/tension	24
Figure (II.8) : Influence de la température sur la caractéristique courant/tension	25
Figure (II.9) : Influence de la température sur la caractéristique puissance/tension.....	25
Figure (II.10) : schéma d'un hacheur boost	26
Figure (II.11) : Schéma de l'onduleur triphasé a deux niveaux	27
Figure (II.12) : Les différents systèmes d'axes utilisés.....	31

CHAPITRE III : CONTRÔLE DU SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Figure (III.1) : donnée de base de la pompe.....	37
Figure (III.2) : Schéma de principe du convertisseur MPPT	41
Figure (III.3) : Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation	42
Figure (III.4) : Organigramme conventionnel d'algorithme de perturbation et d'observation, X est l'étape de la perturbation.....	43
Figure (III.5) : Algorithme type de la commande Hill Climbing.....	45
Figure (III.6) : Trajectoire par Incrémentation de Conductance	47
Figure (III.7) : Algorithme incrémentation de la conductance.....	48
Figure (III.8) : Montre le flux rotorique orienté sur l'axe d.....	51
Figure (III.9) : Illustration de la bande de courant à hystérésis.....	54

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTÈME GLOBALE

Figure (IV.1) : schéma bloc de l'ensemble panneaux photovoltaïques avec MPPT	55
Figure(IV.2) : Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$	56
Figure(IV.2.a) : Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire $V_{pv}=f(t)$	56
Figure(IV.2.b) : Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent $V_{pv}=f(t)$	57
Figure(IV.3) : Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$	57
Figure(IV.3.a) : Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire	57
Figure(IV.4) : Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}=f(t)$	58
Figure(IV.5) :Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide	59
Figure(IV.6) : Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$	59
Figure(IV.7) : Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$	59
Figure(IV.8) : Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}=f(t)$	60
Figure (IV.9) : Schéma globale du système photovoltaïque	61
Figure(IV.10) : Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide	61
Figure(IV.11) : Allure de la vitesse $\Omega=f(t)$	62
Figure(IV.12) : Allure du courant photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$	62
Figure(IV.13) : Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$	62
Figure(IV.14) : Allure du puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$	63
Figure (IV.15) : Allure du courant $I_{sq}=f(t)$	63
Figure (IV.16) : Allure du courant $I_{sd}=f(t)$	63
Figure (IV.17) : Allure du couple $C_{em}=f(t)$	64
Figure (IV.17.a) : Zoom de l'allure du couple $C_{em}=f(t)$	64

Figure (IV.18) : Allure du couple $C_r=f(t)$	64
Figure (IV.19) : Allure du courant $i_{abc}=f(t)$	65
Figure (IV.19.a) : Zoom sur l'Allure du courant $i_{abc}=f(t)$	65
Figure (IV.20) : Allure du débit $Q=f(t)$	65
Figure (IV.21) : Allure du flux $\varphi=f(t)$	66
Figure (IV.22) : Allure du profile aléatoire d'ensoleillement $E_s=f(t)$	66
Figure (IV.23) : Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}=f(t)$	66
Figure (IV.24) : Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$	67
Figure (IV.25) : Allure de la vitesse $\Omega=f(t)$	67
Figure (IV.26) : Allure du débit $Q=f(t)$	67
Figure (IV.27) : Allure du couple résistant $C_r=f(t)$	68
Figure (IV.28) : Allure du couple électromagnétique $C_{em}=f(t)$	68

SOMMAIRE

*CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUE*

Introduction	1
I.1 Description d'un système de pompage photovoltaïque	1
I.1.1 Energie solaire photovoltaïque	2
I.1.2 Avantages et inconvénients	2
I.1.3 Différents domaines d'application	3
I.2 Les types de pompage photovoltaïque	3
I.2.1 Pompage avec stockage électrochimique	3
I.2.2 Pompage au fil du soleil	3
I.3 Les différents éléments d'un système de pompage au fil du soleil [Ank 12].	4
I.3.1 Générateur photovoltaïque	4
I.3.1.1 Cellule photovoltaïque	5
I.3.1.2 Principe de fonctionnement	5
I.3.1.3 Technologies des cellules photovoltaïques	5
I.3.1.4 Paramètre d'une cellule photovoltaïque	6
I.3.1.5. Panneau photovoltaïque	7
I.3.1.5. 1. Association série	8
I.3.2. Les Convertisseurs	9
I.3.2.1. Convertisseur DC/DC (hacheur)	9
I.3.2.2. Convertisseur DC/AC (onduleur)	10
I.3.3. Les moteurs d'entraînement	11
I.3.3.1 Moteur a courant continu	11
I.3.3.2 Moteur a courant alternatif	11
I.3.4 Les pompes	13
I.3.4.1 Les pompes volumétriques	13
I.3.4.2 Les pompes centrifuges	14
I.3.5 Choix des éléments constituant le système de pompage a étudié	15
Conclusion	16

CHAPITRE II : MODÉLISATION DES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction	17
II.1 Modélisation électrique d'un générateur photovoltaïque	17
II.1.1 Module photovoltaïque idéal	17
II.1.2 Modèle à deux diodes	18
II.1.3 Modèle à une diode	20
II.2 Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ du GPV:.....	23
II.2.1 Caractéristique puissance-tension du GPV	24
II.2.2 Influence des conditions météorologiques sur les performances du GPV	24
II.2.2.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du GPV :	24
II.2.2.2 Influence de la température sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du GPV	25
II.3 Modélisation du hacheur survolteur	26
II.4 Modélisation de l'onduleur.....	27
II.5 Modélisation de la machine asynchrone.....	28
II.6 Modélisation de la pompe.....	33
Conclusion.....	34

CHAPITRE III : CONTRÔLE DU SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction	35
III.1 Dimensionnement de système photovoltaïque	36
II.1.1 Données de base.....	37
III.1.2 Evaluation des besoins en eau	37
III.1.3 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire	38
III.1.3.1 Calcul de l'énergie quotidienne requise.....	38
III.1.4 Détermination de l'énergie solaire disponible.....	39
III.1.4.1 Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques.....	39

III.1.4.2 Le mois de dimensionnement	39
III.1.5 Choix des composants.....	39
III.1.5.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge.....	39
III.2 Commande au point de puissance maximale (maximum power point tracking MPPT)..	41
III.2.1 Généralité.....	41
III.2.2 Les types des commandes MPPT.....	42
III.3 Commande des machines asynchrones	50
III.3.1 Principe de la commande vectorielle.....	50
III.3.2.1 Estimation de φ_r d ω s	52
III.4 Commande de l'onduleur :	53
III.4.1 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis	53
Conclusion.....	55

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTÈME GLOBALE

Introduction	55
IV.1 Optimisation du système photovoltaïque avec les différents algorithmes MPPT	55
IV.1.1 Simulation du système photovoltaïque avec MPPT.....	56
IV.1.2 Pour des conditions standard de fonctionnement (1000W/m ² , 25°C).....	56
IV.1.3 Fonctionnement sous les conditions variables	58
IV.2 Simulation du système globale de pompage photovoltaïque.....	60
IV.2.1 Pour des conditions des fonctionnements variables	61
IV.2.2 Pour une variation de l'ensoleillement aléatoire	66
Conclusion.....	69

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Suite à l'augmentation des prix de production de l'énergie électrique à partir de l'énergie fossile beaucoup de pays qui ne disposent pas des ressources naturelles mènent la voile à la recherche d'autres ressources énergétiques fiables, inépuisables, propres et surtout rentables tel que l'énergie renouvelable.

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les êtres humains. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité [Zid 11].

Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche.

Vu que les ressources solaires sont abondantes et facilement mobilisables, ces besoins énergétiques représentent un énorme marché potentiel pour la technologie solaire photovoltaïque. Cet enjeu restitue la problématique des énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque dans un cadre global d'amélioration à l'accès de ces populations à des services énergétiques dans l'optique de développement local [Inf 11].

L'irrigation par pompage à petite échelle est l'une des utilisations les plus intéressantes de l'énergie solaire. En effet, l'intensité maximale du rayonnement solaire correspond généralement à la période de besoins en eau de pompage les plus importants. D'autre part le fait que cette énergie est disponible juste au point

d'utilisation, l'agriculteur est libéré des problèmes liés à l'approvisionnement en carburant, ou bien à l'existence de lignes de transport de l'électricité facilement accessibles [Moh 10].

A l'heure actuelle, les principaux obstacles qui entravent l'utilisation des pompes solaires à plus grande échelle, sont leur coût élevé et le caractère trop récent de cette technologie. La mise au point d'une pompe solaire suffisamment fiable et d'un coût raisonnable - ce qui serait très probable d'ici quelques années - pourrait donner un coup de force à l'agriculture au Tiers Monde. Pour cela il est très important d'étudier les possibilités offertes par cette nouvelle technique prometteuse. Bien qu'à l'heure actuelle sa viabilité économique pour l'irrigation est encore contestée [Céd 08].

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet d'une recherche bibliographique sur l'énergie photovoltaïque. Nous allons présenter une description des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément constituant le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge.

Et pour le troisième chapitre, nous allons nous intéresser au dimensionnement et à l'optimisation du système de pompage photovoltaïque. En s'intéressant aussi dans cette partie au remplacement du régulateur linéaire de vitesse par des régulateurs non linéaires au sein de la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

Le quatrième chapitre nous allons nous intéresser à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Une étude comparative entre deux méthodes MPPT (P&O et CI) sur (matlab –simulink), en simulant le système globale.

Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et des perspectives.

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS SUR LE SYSTÈME DU
POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE

Introduction

L'énergie solaire disponible facilement, écologiquement non polluante, l'énergie émise par le soleil ne souffre guère de comparaison avec nos sources d'énergie actuellement prédominantes. Toutefois, l'énergie solaire qui nous arrive reste bel et bien la plus grande source d'énergie. En effet, l'énergie solaire est disponible partout sur terre. Notre planète reçoit 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme [Kha 08] [Hua 03].

L'exploitation de cette énergie peut se faire de trois manières: thermique, et photovoltaïque. L'énergie photovoltaïque sera certainement nécessaire Dans l'avenir suite à l'appauvrissement total de nos sources énergétiques traditionnelles.

Cette réalité est encore plus accentuée dans le cas d'applications au pompage d'eau dans les pays sahéliens, du fait de l'adéquation entre la demande maximale en eau, et la disponibilité optimale de la ressource solaire [Thi 07].

L'utilisation de l'énergie solaire est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés tel l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes.

L'ampleur de l'utilisation de l'énergie solaire nous amène à étudier un système de pompage photovoltaïque [SOL10].

I.1 Description d'un système de pompage photovoltaïque

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau.

Ces problèmes sont spécialement accentués dans des zones désertiques et semi-désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est une question vitale pour les populations.

L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent [Had 05].

Le pompage photovoltaïque se fait par l'intermédiaire d'un générateur photovoltaïque, des convertisseurs d'électronique de puissance, et un moteur, que ce soit à

courant continu ou alternatif, entraînant une pompe qui lui est directement couplée pour subvenir aux besoins en alimentation d'eau potable comme le montre la figure suivante.

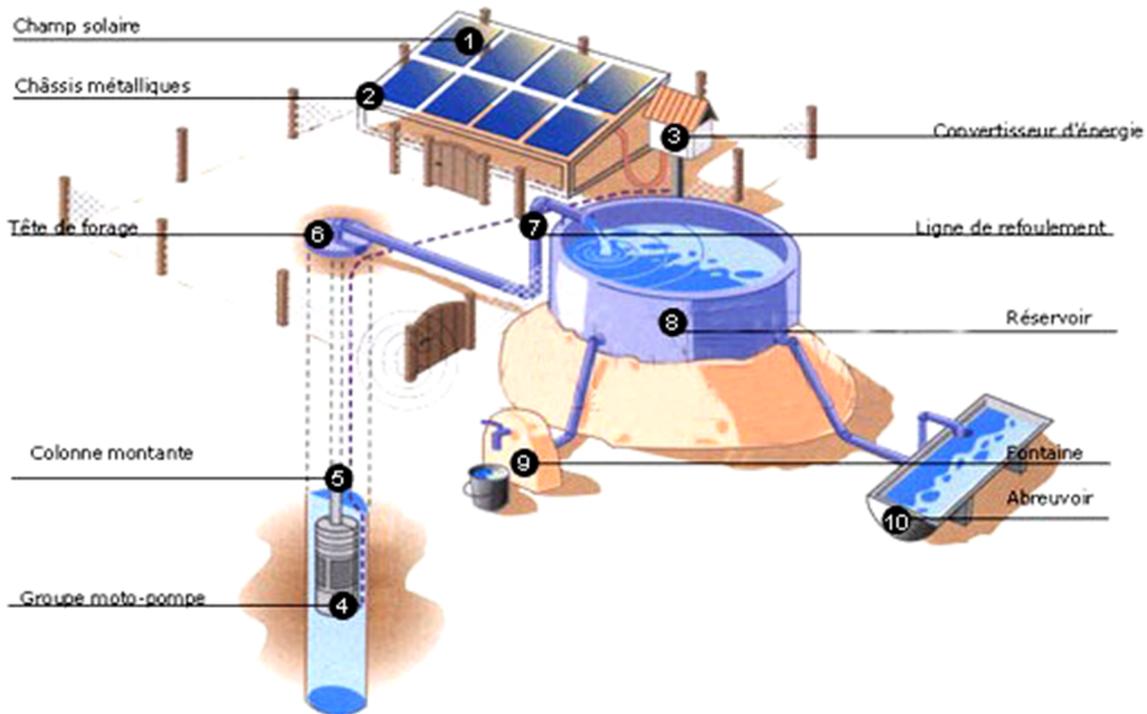


Figure (I.1) : Système de pompage photovoltaïque d'une ferme [Thi 06]

I.1.1 Energie solaire photovoltaïque

Aujourd'hui, l'industrie mondiale repose essentiellement sur des régions isolées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Pour cela, la meilleure solution est apportée par le photovoltaïque [Ank 12]. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire par l'intermédiaire des matériaux. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

I.1.2 Avantages et inconvénients

A. Avantages

- Il ne fait pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables ;
- Il peut être des systèmes autonome ;
- Il ne consomme aucun carburant, leur carburant est abondant et libre ;
- Il peut être combinés avec d'autres sources d'énergie ;
- Il n'exige aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant [Arr 07].

B. Inconvénients

- Le cout actuel de la technologie PV est beaucoup très élevé que celui de l'énergie traditionnelle ;
- Ils sont dépendants des conditions météorologiques ;
- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation [Zid 11].

I.1.3 Différents domaines d'application

- Domaine spatial
- Habitation isolée
- Industrie isolée
- Résidence urbaine

I.2 Les types de pompage photovoltaïque**I.2.1 Pompage avec stockage électrochimique**

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement ou nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage.

Ce type de pompage peut s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée [Roy 98].

I.2.2 Pompage au fil du soleil

Dans le pompage au fil du soleil, ce qui va être l'objet de notre étude l'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.

Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement [Roy 98].

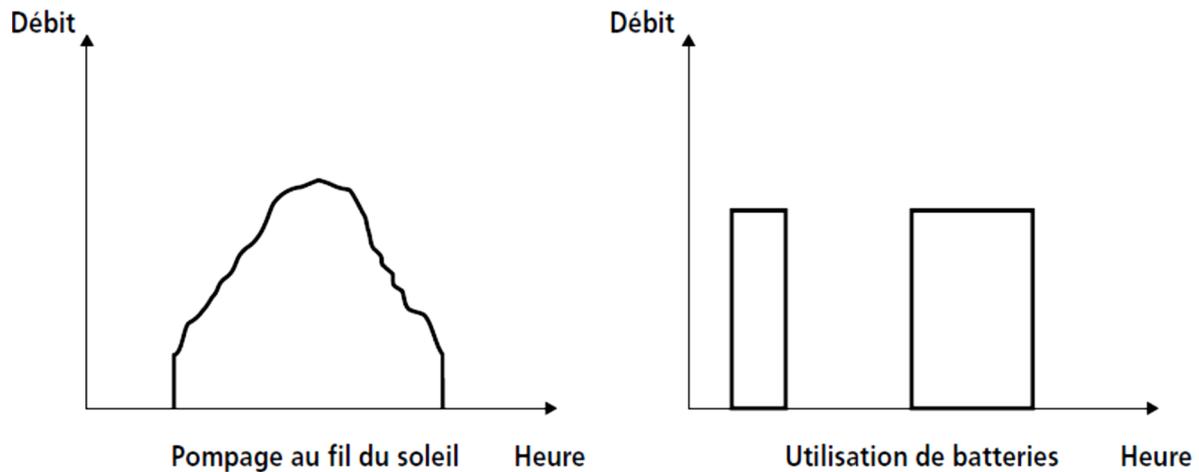


Figure (I.2) : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec Batterie [Roy 98]

I.3 Les différents éléments d'un système de pompage au fil du soleil [Ank 12].

Un système de pompage au fil du soleil est constitué de plusieurs composants :

- Un champ de modules photovoltaïques fournissant la puissance électrique nécessaire ;
- Un régulateur qui optimise la production et fournit une alimentation compatible avec la pompe ;
- Un groupe motopompe en fonction de l'application souhaitée ;
- Un réservoir d'eau.

I.3.1 Générateur photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique.

Le générateur photovoltaïque représente la source de l'énergie électrique actionnant le moteur pompe.

I.3.1.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque ou la photopile est un élément de base de la conversion photovoltaïque, elle est assimilable à une diode sensible aux photons, son fonctionnement est

basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs qui convertit la lumière en énergie électrique.

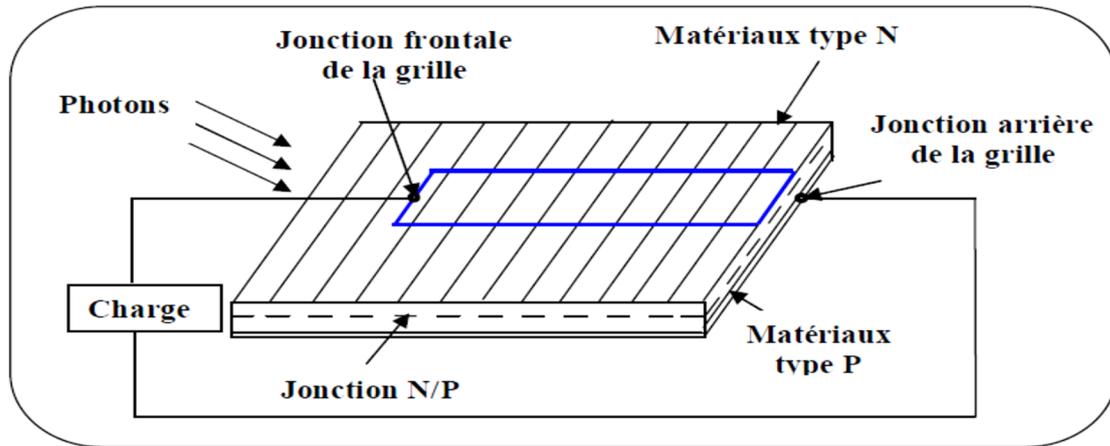


Figure (I. 3) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque [Bou 07]

I.3.1.2 Principe de fonctionnement

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée.

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaît une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile [Mor 05].

I.3.1.3 Technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- La première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.

- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.
- La troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium(CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes [Bou 07].

I.3.1.4 Paramètre d'une cellule photovoltaïque

A. La puissance de crête

Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

B. La tension à vide

Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

C. Le courant de court-circuit

Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

D. Le point de fonctionnement optimum

Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp}$.

E. Le rendement

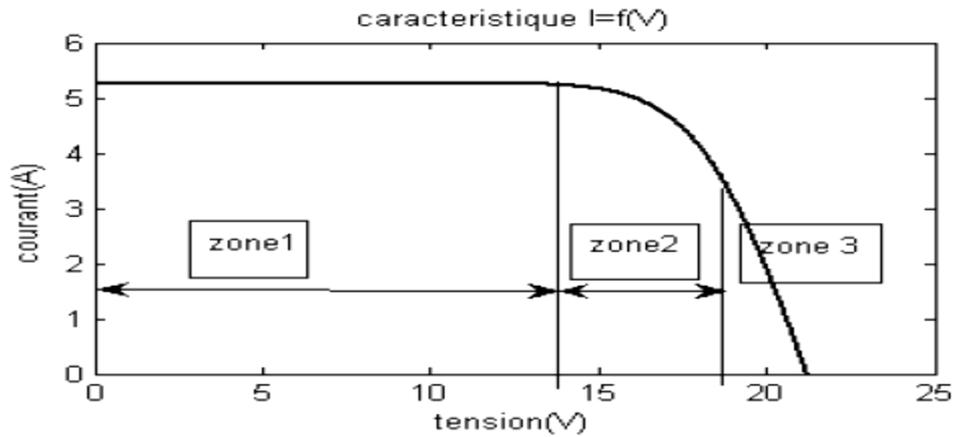
Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

F. Le facteur de forme

Rapport entre la puissance optimale P_{mpp} et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

La caractéristique courant tension

Courbe représentant le courant débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci. Comme le montre la figure (I.4)



Figure(I.4) : Caractéristique courant PV en fonction de la tension PV

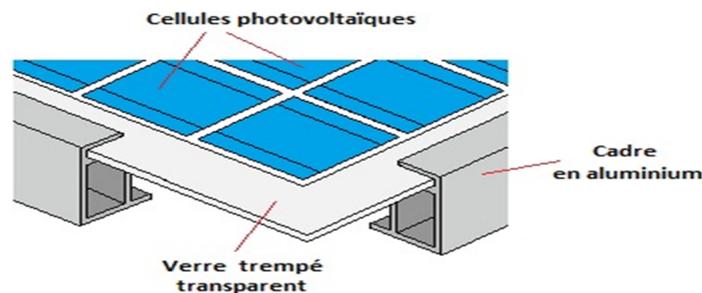
Zone (I) : La cellule se comporte comme un générateur de courant .

Zone (II) : La zone de fonctionnement optimale .

Zone (III) : la cellule se comporte comme un générateur de tension [Arr 07] .

I.3.1.5. Panneau photovoltaïque

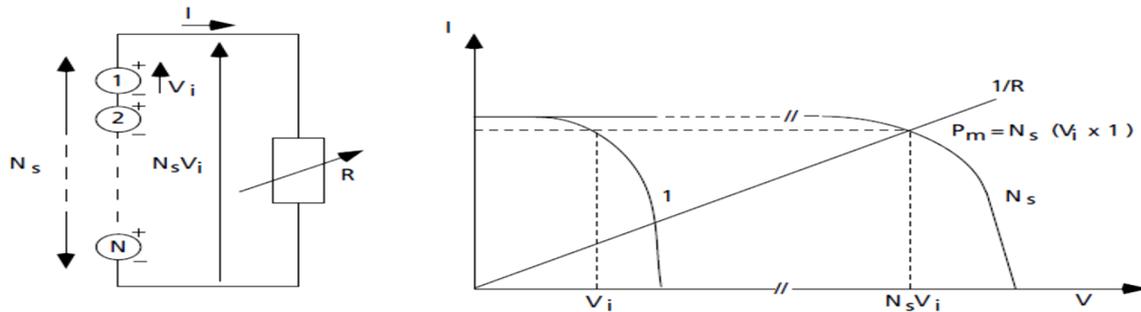
La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs cellules afin d'augmenter la puissance et de la rendre compatible avec l'équipement électrique usuel. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous composé. Le module est composé aussi d'un cadre rigide (plus souvent en aluminium) permettant la fixation [Céd 08].



Figure(I.5) : Description d'un module photovoltaïque [Wik]

I.3.1.5. 1. Association série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules en séries [Roy 98].



Figure(I.6) : Cellules identiques en séries [Roy 98]

I.3.1.5.2. Association parallèle

En additionnant des cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle dans la branche [Roy 98].

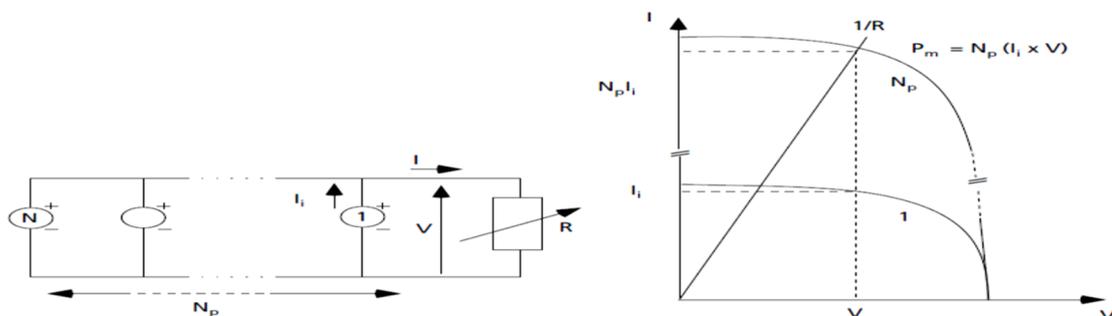


Figure (I.7) : Cellules identiques en parallèles [Roy 98]

I.3.1.5.3 Nécessité de fonctionnement optimale du générateur

Deux facteurs importants limitent l'implantation des systèmes photovoltaïques (le coût et le faible rendement de conversion d'énergie). En raison de ses facteurs il est nécessaire de faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximum [Yad 11].

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique $I=f(v)$ est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairage, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur

statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge [Max].

➤ Commandes MPPT

Une commande MPPT associée à un étage DC/DC permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance quelque soit les conditions météorologiques (E_s , T) [Hat 08].

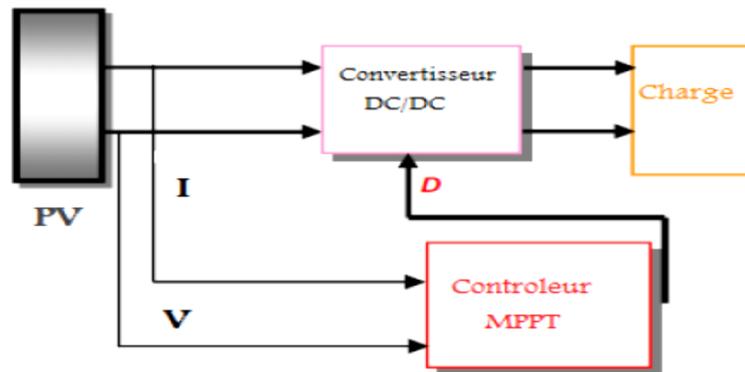


Figure (I.8) : Système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT [Aya 08]

I.3.1.5.3.1 Les différentes techniques de fonctionnement en PPM

- ✓ Méthode de perturbation et d'observation (P&O) [Moh 07] [Hat 08] ;
- ✓ Méthode de courbe d'ajustage (curve fitting Methode) [Lal 08] ;
- ✓ Méthode de la table de consultation (look-up table) [Lal 08] ;
- ✓ Méthode de tension en circuit ouvert de générateur photovoltaïque (open circuit voltage photovoltaic generator methode) [Lal 08] [Céd 08] ;
- ✓ Méthode de court-circuit du générateur photovoltaïque (short circuit current photovoltaic generator methode) [Lal 08] [Céd 08].
- ✓ La méthode de la conductance incrémentielle (CI) [Lal 08], [Céd 08].
- ✓ Méthode logique floue [Hat 08].
- ✓ Méthode de réseau de neurones [Tri 06].

I.3.2. Les Convertisseurs

Dans un système de pompage photovoltaïque, des convertisseurs sont utilisés pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de

convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [Sol 10].

I.3.2.1. Convertisseur DC/DC (hacheur)

Le hacheur est un convertisseur statique qui permet le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé [Ank 12].

Il existe deux types d'hacheur:

I.3.2.1.1. Hacheur dévolteur (ou série)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est inférieure à celle de l'entrée V_e .

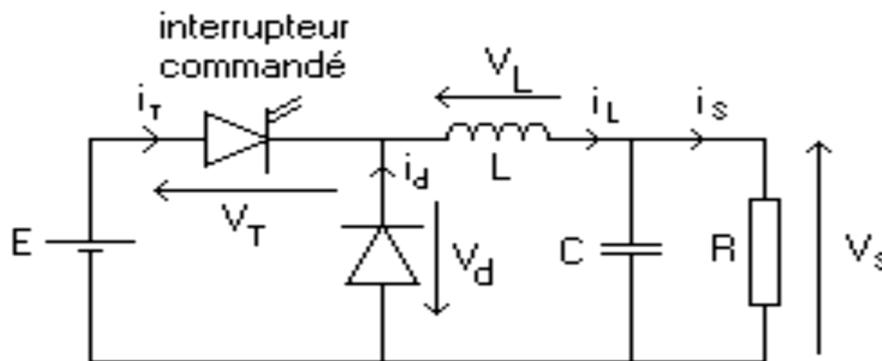


Figure (I.9) : Structure d'un hacheur dévolteur [Hac]

I.3.2.1.2. Hacheur survolteur (ou parallèle)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à celle de l'entrée V_e [Sol 10].

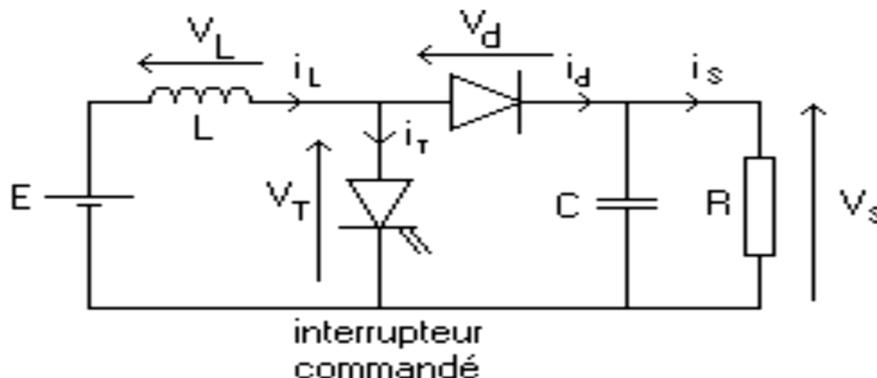
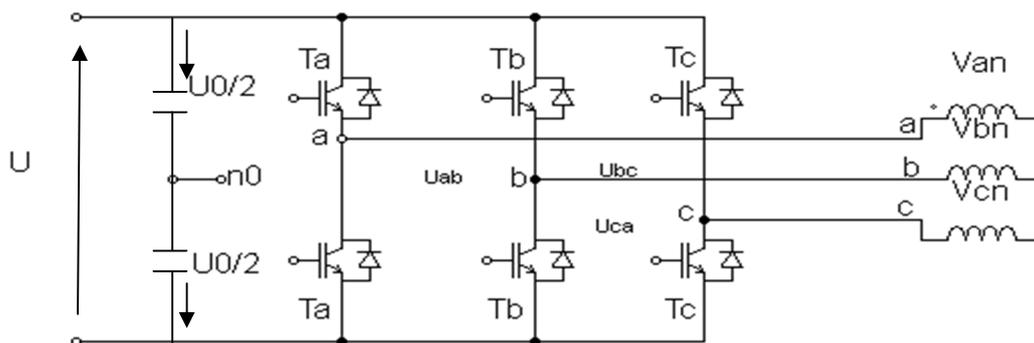


Figure (I.10) : Structure d'un hacheur survolteur [Hac]**I.3.2.2. Convertisseur DC/AC (onduleur)**

Un onduleur, appelé aussi convertisseur, est un dispositif de l'électronique de puissance, qui permet de transformer la tension continue fournie par les panneaux pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant, à une tension alternative de fréquence et d'amplitude standard [Ral 08].

**Figure (I.11) :** Structure d'un onduleur**I.3.3. Les moteurs d'entraînement**

Pour que les pompes photovoltaïques fonctionnent elles ont besoin d'une énergie mécanique qui est fournie par le biais d'un moteur qui fait convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, l'ensemble moteur et pompe se nomme motopompe, ces moteurs peuvent être à courant continu ou alternatif.

I.3.3.1 Moteur à courant continu

Une machine à courant continu est un convertisseur d'énergie électromécanique donc un moteur DC (direct current ou courant continu) transforme une énergie électrique en énergie mécanique.

Leurs larges possibilités de réglage de vitesse ont favorisé leur utilisation en moteur dans les applications où cette caractéristique est importante, surtout depuis le développement des semi-conducteurs de puissance (transistors et thyristors) l'emploi des moteurs à courant continu est sans équivalent dans le domaine [Bou 07].

Un moteur à courant continu est généralement plus efficace est plus facile à utiliser avec un système photovoltaïque (pas besoin d'onduleurs), par contre il est plus cher et plus difficile à trouver sur le marché [Bou 07].

I.3.3.2 Moteur a courant alternatif

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) [Roy 98].

Le moteur à courant alternatif est utilisé de plus en plus pour les systèmes de pompage photovoltaïque. Le cout peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance est l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour les systèmes de pompage plus importants.

Un moteur à courant alternatif est moins cher et plus facile à le trouver sur le marché, mais Il exige l'utilisation d'un onduleur pour fonctionner avec une alimentation photovoltaïque [Bou 07].

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs asynchrones ;
- Les moteurs synchrones.

I.3.3.2.1 Les moteurs synchrones

Le terme de moteur synchrone regroupe tout les moteurs dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale a la vitesse de rotation du champ tournant, ils ont des emplois spécifiques, par exemple la ou une rotation uniforme est primordiale. Il présente des caractéristiques remarquables, qui sont, la vitesse constante quelque soit la charge. Il peut fournir de la puissance réactive, ce qui le rend capable d'améliorer le facteur de puissance d'une installation. Il peut supporter des chutes de tension relativement importantes et ceci grâce aux possibilités de surexcitation sans décrocher.

Par contre l'inconvénient du moteur synchrone est la difficulté lors de son démarrage.

I.3.3.2.2 Les moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones sont très utilisés dans les applications de grande série car ils sont, a priori économiques (fabrication simple) pour une longue durée de vie, souvent limitée

par les paliers. Ils sont évidemment intéressants lorsqu'ils peuvent fonctionner directement à partir du réseau alternatif [Mul 00] [Kha 08].

A. Avantages

- Durée de vie très élevée; maintenance quasi inexistante ;
- Faible cout

B. Inconvénients

- Vitesse de rotation dépendant fortement de la charge appliquée sur l'axe.
- Contrôle électronique de vitesse et de couple complexe

I.3.4 Les pompes

Les pompes sont des appareils qui génèrent une différence de pression entre les tubulures d'entrée et de sortie.

Suivant les condition d'utilisations, ces machines communiquent au fluide, de l'énergie potentielle (par accroissement de la pression en aval), soit de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide. Ansi, on peut vouloir augmenter le débit (accroissement d'énergie cinétique)ou/et augmenter la pression (accroissement d'énergie potentielle) pour des fluide gazeux ,liquide,visqueux,très visqueux, c'est pourquoi la diversité des pompes est très grande [Roy 98].

Les pompes a eau sont fondamentalement classées selon leur principe de fonctionnement.

I.3.4.1 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques encore appelées pompes à cavité progressive utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume.

Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palettes et à engrenages [Thi 07].

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinée au faible débit (inférieur a $5\text{m}^3/\text{h}$) est aux grande hauteurs ;
- Elles ont de bon rendement, et les pompes de surface ont un amorçage automatique ;
- Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 a 5fois le couple nominale).

La figure (I.12) illustre les caractéristiques d'une pompe volumétrique, le couple en fonction de la vitesse et le débit en fonction de la vitesse.

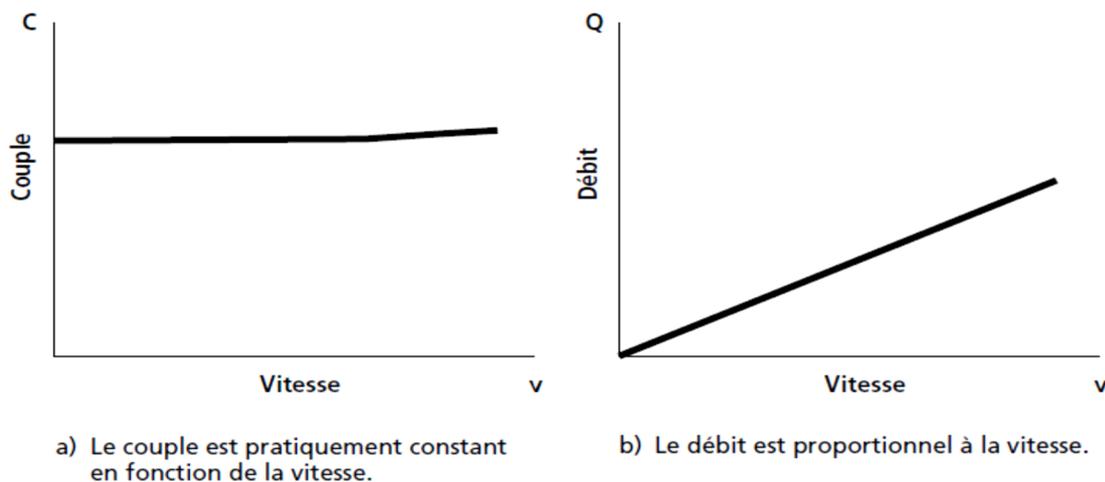


Figure (I.12) : Caractéristiques d'une pompe volumétrique [Roy 98]

I.3.4.2 Les pompes centrifuges

Les pompes centrifuge font partie de la famille des turbopompes, la principale caractéristique de la pompe centrifuge consiste a convertir l'énergie mécanique de moteur d'abord en energie cinétique puis en énergie de pression [Meh07], [Bou12].

➤ Principe de fonctionnement

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression.

L'énergie mécanique du moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va fournir une énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage ;
- Elles doivent être amorcées pour fonctionner de manière à éviter tout risque de destruction ;
- Peuvent être immergées ou de surface.

La figure (I.13) illustre les caractéristiques d'une pompe centrifuge, le couple en fonction de la vitesse et le débit en fonction de la vitesse.

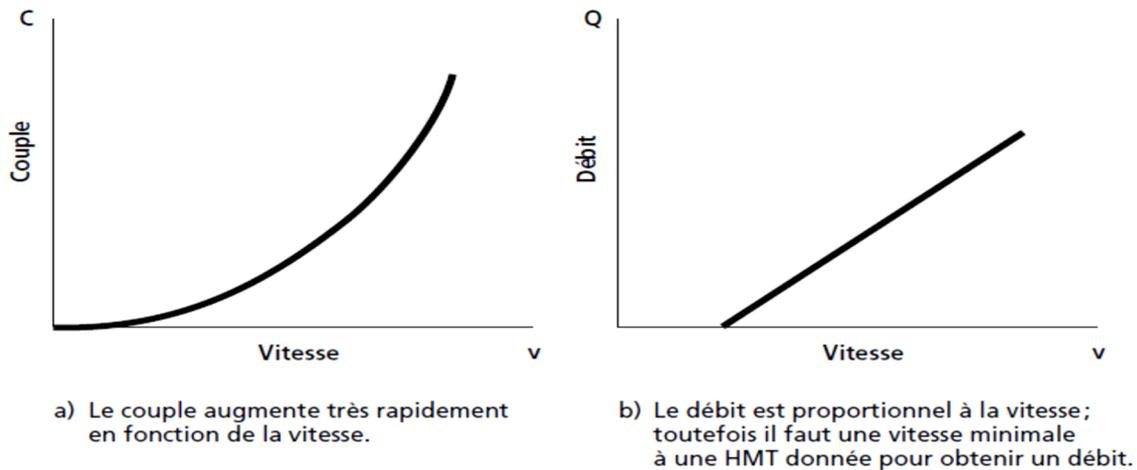


Figure (I.12) : Caractéristiques d'une pompe centrifuge [Roy 98]

Une pompe centrifuge est constituée de [Ait 11] :

- 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 volute.

I.3.5 Choix des éléments constituant le système de pompage à étudié

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable.

Le pompage photovoltaïque se fait par l'intermédiaire de plusieurs éléments, les plus essentiels : sont les panneaux photovoltaïques, le convertisseur, la motopompe et une source d'eau.

Pour subvenir aux besoins en alimentation d'eau potable particulièrement en milieu rural ou pour des sites isolés soit pour des besoins d'irrigation ou d'abreuvement pour le bétail [Ren 01]. Le choix de ces éléments se fera en fonction de leurs performances.

Pour un bon rendement le choix porter sur ces équipements est très important, pour cela, et pour notre étude, nous avons porté un choix et qui est le suivant :

Les systèmes alimentés par le photovoltaïque utilisent souvent plusieurs panneaux en série afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé, on opte pour un hacheur survolteur.

Pour les moteurs notre choix s'est porté sur Le moteur asynchrone car il est mieux adapter pour le système de pompage photovoltaïque bien qu'il est standard, qu'il a un cout faible et ne demande pas assez entretien [Ext 12], [Bou 12].

Les pompes centrifuges présentes d'innombrables avantages par rapport aux autres types de pompes, il a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre facile avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché. il s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides puisqu'en l'adaptant à la condition d'utilisations particulières, elles sont capables de répondre aux exigences spécifiques des installations [Roy 98], [Ext 12].

Conclusion

Cette recherche bibliographique a fait l'objet d'une prélude, ou nous avons indiqué des généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque. Nous avons présenté d'une manière générale les différents constituants de ces systèmes. Enfin, nous avons porté notre choix sur système à étudier et les éléments qui le constituent, afin de prévoir leur modélisation en vue d'une simulation dans les chapitres suivants.

Chapitre II

MODÉLISATION DES DIFFÉRENTES
PARTIES DU SYSTÈME
PHOTOVOLTAIQUE

Introduction

Après avoir défini les différents composants du système de pompage photovoltaïque, nous procédons à la modélisation de ces éléments dans ce chapitre. Cette modélisation consiste à établir les équations mathématiques qui régissent leur fonctionnement afin de les simuler sous logiciel (Matlab/simulink).

II.1 Modélisation électrique d'un générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque [Amr 08].

II.1.1 Module photovoltaïque idéal

C'est le modèle le plus simplifié. La valeur de la résistance R_{sh} étant généralement grande, elle est donc supposée infinie (et donc négligeable), la valeur de résistance R_s étant généralement petite et elle est supposée nulle ($R_s=0$) [Bou 12].

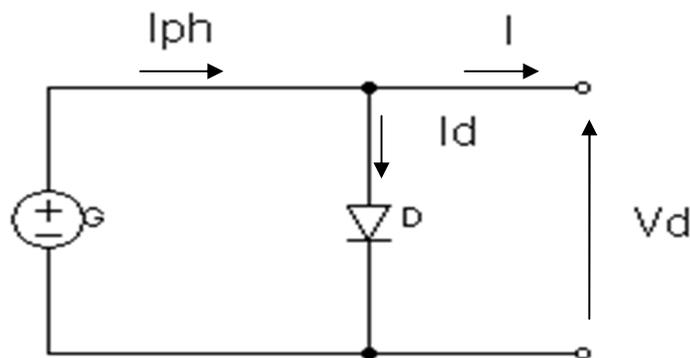


Figure (II.1) : Schéma équivalent d'un module photovoltaïque idéal

Le courant débité s'exprime comme suit :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

La diode étant un élément non linéaire, le courant I_d s'exprime suivant la relation suivante :

$$I_d = I_s * (e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$V_T = \frac{K \cdot T_j}{Q} \quad (\text{II.3})$$

L'expression du courant I devient donc :

$$I = I_{ph} - I_s * (e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

I_{ph} : Photo courant.

I_s : Courant de saturation.

V_d : Tension aux bornes de la diode.

V_T : Potentiel thermodynamique.

K : Constante de Boltzmann.

T_j : Température

Q : Charge de l'électron.

Ce modèle reste théorique et ne montre pas le comportement de la cellule PV dans des conditions réels, il reste toutefois valable pour certaines hypothèses (non prise en compte de pertes de tensions et de courant de fuite)

II.1.2 Modèle à deux diodes

Le module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (Fig. II.3) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt R_{sh} , une résistance série R_s et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires [Amr 08].

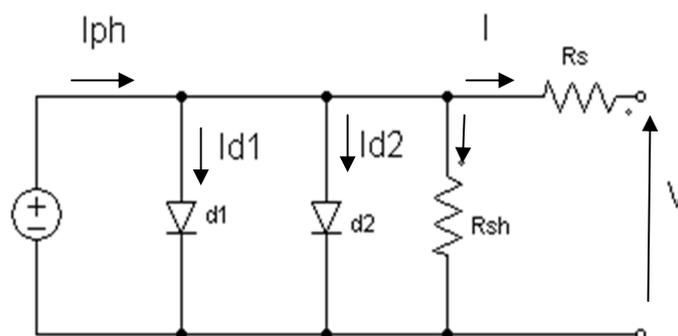


Figure (II.2) : Modèle d'un générateur photovoltaïque à deux diodes

Le courant généré par le module photovoltaïque est donné par la loi de Kirschoff :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (II.5)$$

Avec :

I: Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{re}) + P_3 \cdot (T_j - T_{re})] \quad (II.6)$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suite :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left(\frac{N_o \cdot c \cdot \tau \cdot 2}{800} \right) \quad (II.7)$$

Où :

T_a : Température ambiante.

T_{noct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

$$I_{d1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{e_0 \cdot (V + RI)}{A \cdot n \cdot s \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.8)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{e_0 \cdot (V + RI)}{2 \cdot A \cdot n \cdot s \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.9)$$

Où :

I_{d1} et I_{d2} sont les courant de saturation des diodes :

$$I_{01} = P_{04} T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \quad (II.10)$$

$$I_{02} = P_{14} T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{2 \cdot k \cdot T_j} \right) \quad (II.11)$$

Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{(V + RI)}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

Le courant du module I est donné par :

$$I = I_p(E_s, T_j) - I_d(V, I, T) - I_{sh}(V, I) \quad (II.13)$$

Nous aurons :

$$I = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{re}) + P_3 \cdot (T_j - T_{re})] \frac{(V+R_s \cdot I)}{R_{sh}} - P_0 \cdot T_j^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T_j}} \cdot \left[\exp\left(\frac{e_0 \cdot (V+R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] - P_1 \cdot T_j^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{2k \cdot T_j}} \cdot I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e_0 \cdot (V+R_s \cdot I)}{2A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right]$$

(II.14)

Avec :

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

Les paramètres à déterminer sont :

P_i : Paramètres.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

Les constantes sont:

E_{ref} : Irradiation de référence 1000 W/m².

T_{ref} : Température de référence 25°C.

n_s : Nombre de cellule en série.

e_0 : La charge d'électron 1,6.10-19C.

K : Constant de Boltzmann 1,38.10-23 J/K.

E_g : Energie de gap.

II.1.3 Modèle à une diode

C'est le modèle le plus cité dans la littérature [Amr 08], le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (Fig. II.2) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état de long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacte et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN [Amr 08].

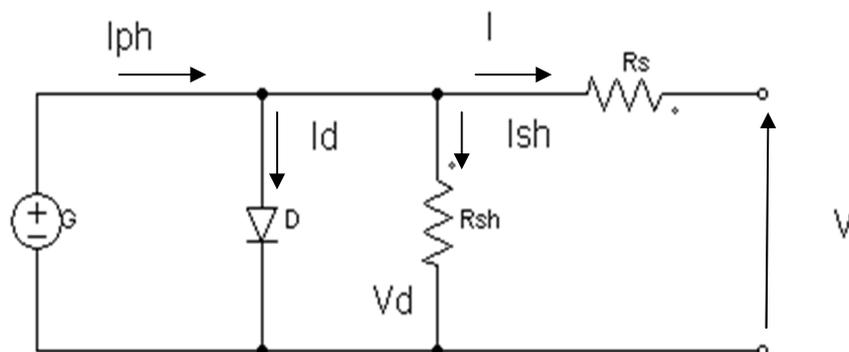


Figure (II.3) : Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode

Le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicités et précision [Ber 09], [Bou 12] il apparait très adapté pour notre étude.

Le modèle que nous avons choisit est utiliser dans [Nik 03] [Bou 12] [Lon 11], c'est un modèle simplifié a cinq paramètres ($I_{c o}$, $I_{m p p}$, $V_{c o}$, $V_{m p p}$, R_s), qui tient compte de variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatique.

$$I_p v = I_{c c} * [1 - K_1 (e^{K_2 * V_p^m v} - 1)] \quad (II.15)$$

Ou les coefficients K_1 , K_2 , et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{o c}^m} \quad (II.16)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_3}{K_1} \right] \quad (II.17)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{m p p}}{V_{c o}} \right]} \quad (II.18)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{c c} * (1 + K) + I_{m p p}}{K_1 * I_{c c}} \right] \quad (II.19)$$

K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , m représentes les paramètres de la diode.

$I_{m p p}$ Courant au point de puissance maximale.

$V_{m p p}$ Tension au point de puissance maximale.

$I_{c c}$ Courant de court-circuit.

$V_{c o}$ Tension de circuit ouvert.

Il est noté que l'équation (II -15) est applicable que pour un niveau d'insolation E_s et de température T particuliers ($E_{stc}=1000 \text{ w/m}^2$, $T_{stc}=25^\circ\text{C}$), relatif aux conditions standard de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque de tableau dans l'annexe changent suivant ces équations :

$$\Delta T_c = T_j - T_{s t c} \quad (II.20)$$

$$\Delta I = a_{c c} * \left(\frac{E}{E_{s t c}} \right) * \Delta T_c + \left(\frac{E}{E_{s t c}} - 1 \right) * I_{c , s t c} \quad (II.21)$$

$$\Delta V = -b_o c * \Delta T_c - R_s * \Delta I \quad (\text{II.22})$$

$E_{s t}$ et E : représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconque.

$E_{s t c}$ et T_j : représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconque.

ΔT_c : représente la variation de la température.

ΔI : représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

ΔV : représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

$a_{c c}$: Coefficient d'incrémentement du courant $I_{c c}$ quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^{\circ}C$).

$\beta_{c o}$: Coefficient d'incrémentement de la tension $V_{c o}$ quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^{\circ}C$).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont donnés par les formules suivantes :

$$V_{p v , n o u} = V_{s t c} + \Delta V \quad (\text{II.23})$$

$$I_{p v , n o u} = I_{s t c} + \Delta I \quad (\text{II.24})$$

Le tableau suivant représente les données d'un panneau solaire de type SIEMENS SM 110-24 qui est utilisé pour la simulation du panneau photovoltaïque :

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau $P_{m p}$	110W
Courant au point de puissance maximale $I_{m p}$	3.15A
Tension au point de puissance maximale $V_{m p}$	35V
Courant de court-circuit $I_{c c}$	3.45A
Tension en circuit ouvert $V_{c c}$	43.5V
Coefficient d'incrémentement du courant (α_{cc})	1.4mA/ $^{\circ}C$
Coefficient d'incrémentement de la tension (β_{co})	-152mV/ $^{\circ}C$

Tableau II-1 : Paramètres d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24

II.2 Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ du GPV

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module PV sont réalisées avec le logiciel MATLAB/Simulink aux conditions standards (STC) c'est-à-dire un ensoleillement de l'ordre de 1000w/m^2 et une température de 25°C . Les figures (II-4), (II.5) illustrent le tracé de la caractéristique courant-tension.

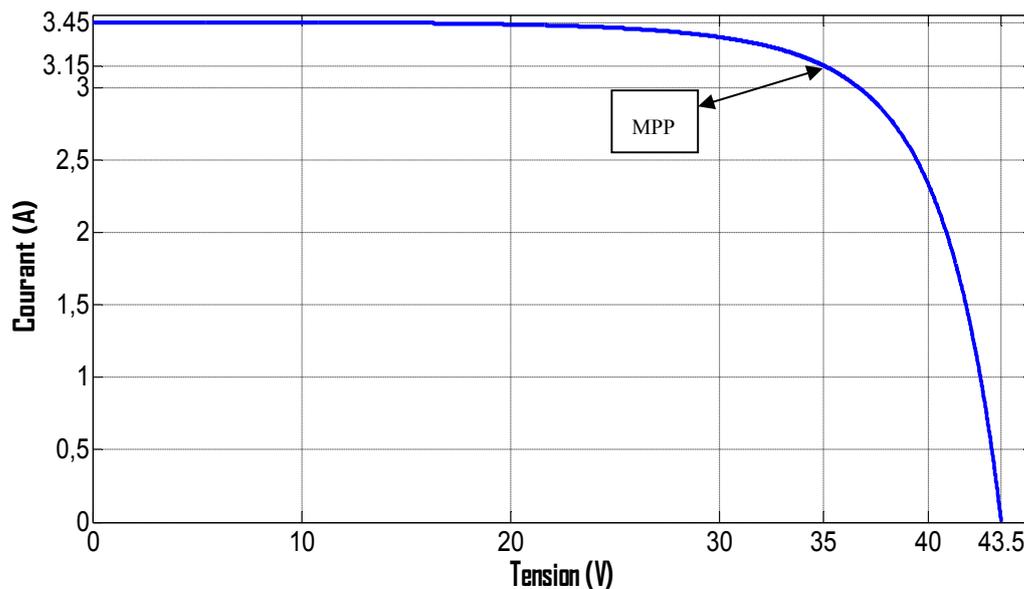


Figure (II.4) : Caractéristique courant/tension d'une cellule photovoltaïque

II.2.1 Caractéristique puissance-tension du GPV

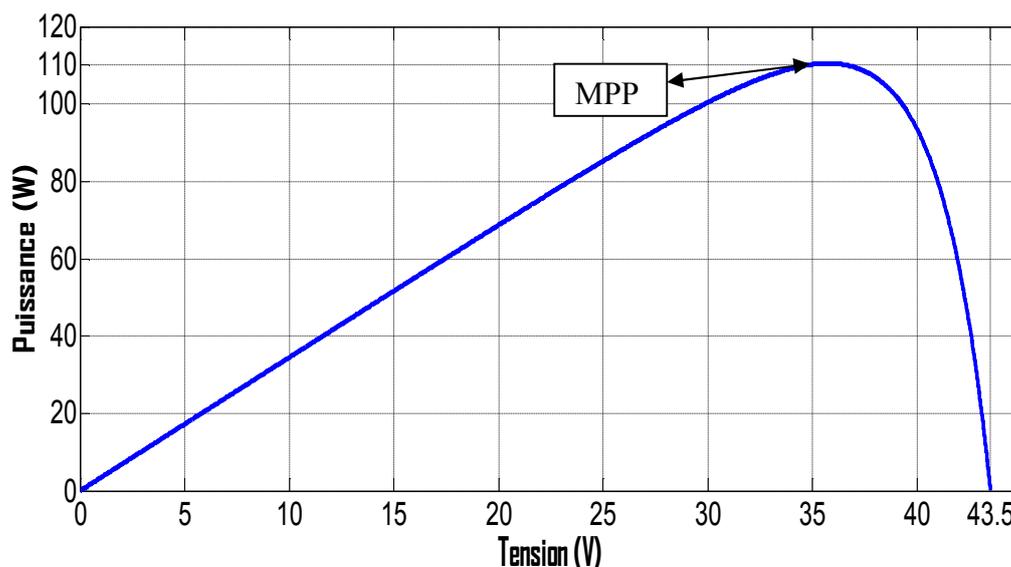


Figure (II.5) : Caractéristique puissance/tension d'une cellule photovoltaïque

II.2.2 Influence des conditions météorologiques sur les performances du GPV

A. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du GPV :

Les figures (II.6) et (II.7) présentent les caractéristiques (I_{pv} - V_{pv}) et (P_{pv} - V_{pv}) d'un module photovoltaïque pour différents ensoleillements à la température fixe (25°C).

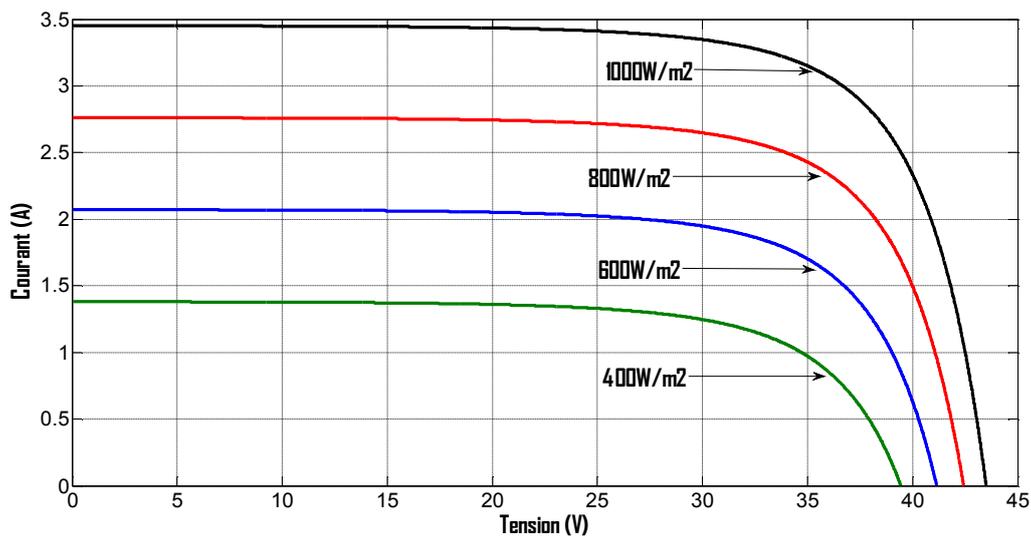


Figure (II.6) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique courant/tension

Comme on peut voir sur la figure, le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement.

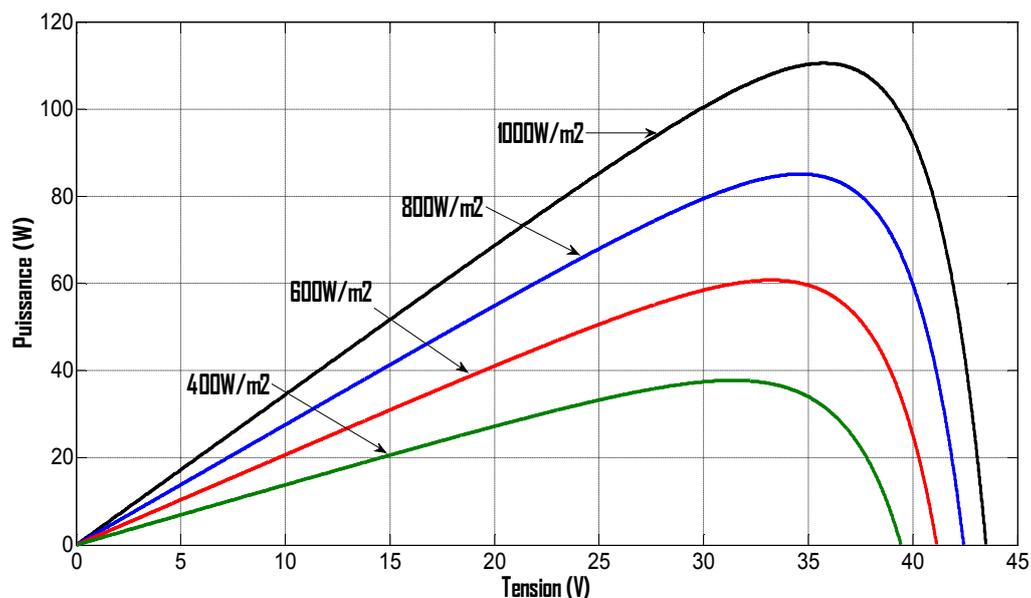


Figure (II.7) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique puissance/tension

Comme on peut voir sur la figure, la puissance du module est proportionnelle à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement.

B. Influence de la température sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du GPV

Les figures (II.8) et (II.9) présentent les caractéristiques (I_{pv} - V_{pv}) et (P_{pv} - V_{pv}) d'un module photovoltaïque pour différentes températures à ensoleillement fixe (1000w/m^2)

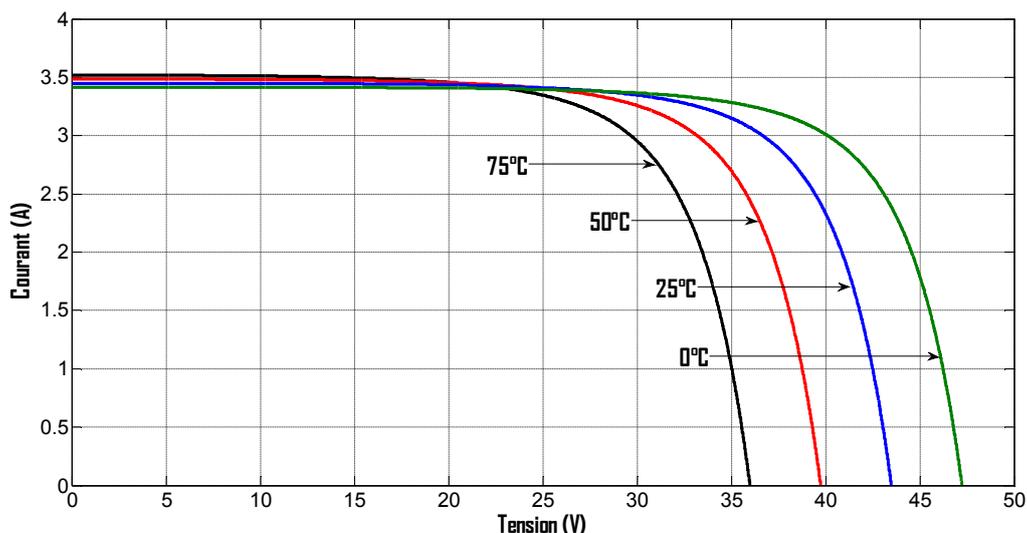


Figure (II.8) : Influence de la température sur la caractéristique courant/tension

La température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension de circuit ouvert.

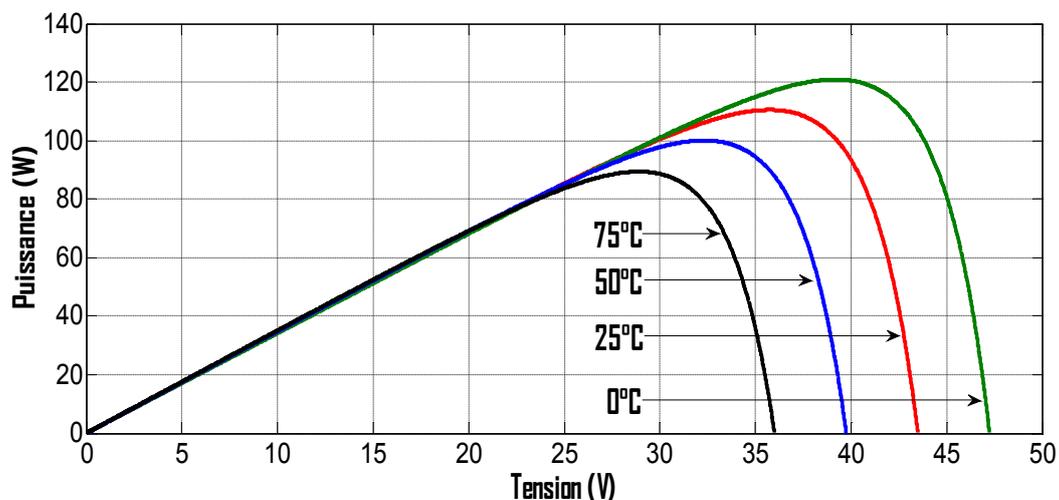


Figure (II.9) : Influence de la température sur la caractéristique puissance/tension

La température a effet sur la puissance, mais une augmentation de la température cause surtout une diminution apparente sur la tension de circuit ouvert.

II.3 Modélisation du hacheur survolteur

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixe. Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

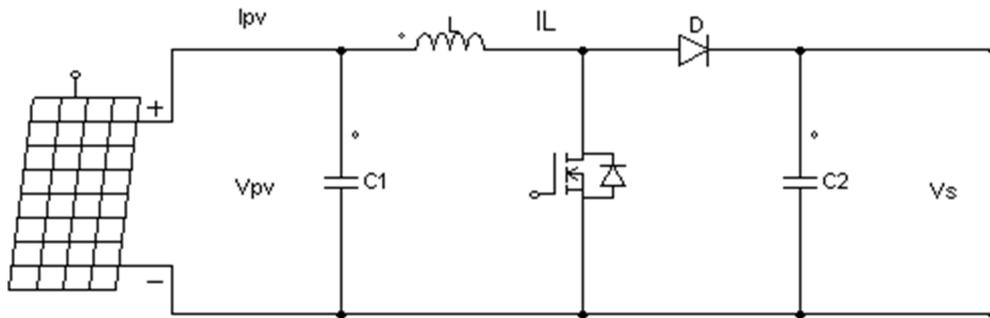


Figure (II.10) : schéma d'un hacheur boost

D'après les schémas du hacheur survolteur figure (II.10) :

Lorsque S est fermé :

$$V_{pv} = L \frac{d I_{pv}}{d t} \quad (II.25)$$

$$0 = C \frac{d V_{dc}}{d t} + I_{ch} \quad (II.26)$$

Lorsque S est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{d I_{pv}}{d t} + V_{dc} \quad (II.27)$$

$$I_{pv} = C \frac{d V_{dc}}{d t} + I_{ch} \quad (II.28)$$

En posant $u = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et ($u = 0$) lorsque S est ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équation unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{pv} = L \frac{d I_{pv}}{d t} + V_{dc} (1 - u) \quad (II.29)$$

$$(1 - u) I_{pv} = C \frac{d V_{dc}}{d t} + I_{ch} \quad (II.30)$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type simulink.

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produit entre commande u et les variables d'états V_{dc} et I_{pv} . Par ailleurs il convient de signaler qu'en remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de découpage $T_d = 1/f$, c'est-à-dire le rapport cyclique α ($\alpha = T_{on} / T_d$) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes.

$$\frac{d I_{pv}}{d t} = -(1 - \alpha) \frac{V_{dc}}{L} + \frac{V_{pv}}{L} \tag{II.31}$$

$$\frac{d V_{dc}}{d t} = -(1 - \alpha) \frac{I_{pv}}{C} + \frac{V_{dc}}{R C} \tag{II.32}$$

II.4 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur génère un système de tension triphasé, variable en amplitude et en fréquence qui fonctionne avec des charges variables. Le courant est modulé sinusoïdalement afin d'obtenir un grand rendement.

La tension de phase peut être exprimée comme suit :

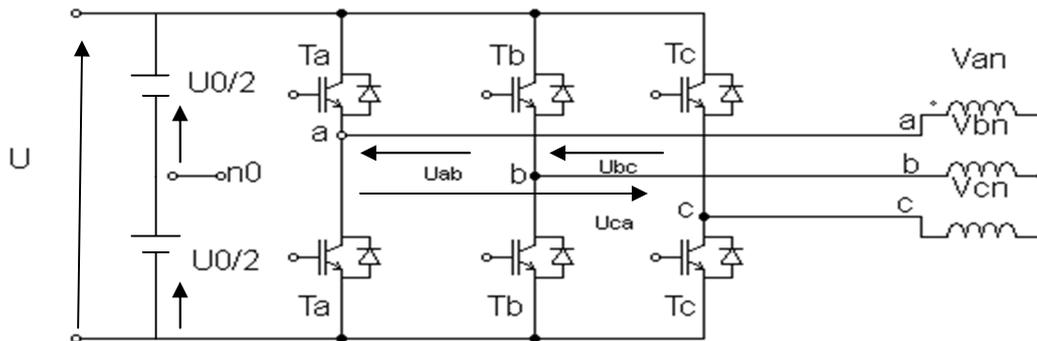


Figure (II.11) : Schéma de l'onduleur triphasé a deux niveaux

Les tensions composés V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues a partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} + V_{no} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{ao} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \tag{II.33}$$

Avec :

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions a l'entrés de l'onduleur (continues). On a pris le point «O» comme référence pour ces donnés par la relation de CHALE comme suit :

$$\begin{cases} V_{a o} = V_{a n} + V_{n o} \\ V_{b o} = V_{b n} + V_{n o} \\ V_{c o} = V_{c n} + V_{n o} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et V_{no} est la tension de neutre de la charge par rapport au point «O».

On a supposé que la charge est équilibrée c.à.d.

$$V_{a n} = V_{b n} + V_{c n} = 0 \quad (\text{II.35})$$

En remplaçant (II.) dans (II.) on aura :

$$V_{n o} = \frac{1}{3} \cdot (V_{a o} - V_{b o} - V_{c o}) \quad (\text{II.36})$$

En remplaçant (II.) dans (II.) on aura :

$$\begin{cases} V_{a n} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{a o} - V_{b o} - V_{c o}) \\ V_{b n} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{b o} - V_{a o} - V_{c o}) \\ V_{c n} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{c o} - V_{a o} - V_{b o}) \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Si on suppose que:

$$\begin{cases} V_{a o} = V_{D C} \cdot S_1 \\ V_{b o} = V_{D C} \cdot S_2 \\ V_{c o} = V_{D C} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

S_i est l'état de l'interrupteur K_i tel que : $\begin{cases} S_i = 1 & \text{Si } K_i \text{ fermé} \\ S_i = 0 & \text{Si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante [Raj 03].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{D C}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{D C} = S_1 \cdot i_{a c h} + S_2 \cdot i_{b c h} + S_3 \cdot i_{c c h} \quad (\text{II.40})$$

II.5 Modélisation de la machine asynchrone

Contrairement à la machine synchrone, la machine asynchrone ne possède pas d'inducteur séparé. Par conséquent, elle nécessite un apport de puissance réactive pour sa magnétisation. Lorsqu'elle est reliée au réseau, ce dernier fournit la puissance réactive requise.

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une modélisation analytique.

La modélisation analytique classique de la machine asynchrone se fait sous les hypothèses simplificatrices résumées ci-dessous :

- ✓ L'entrefer est supposé à épaisseur constante ;
- ✓ La machine n'est pas saturée ;
- ✓ L'effet des encoches est négligé ;
- ✓ L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale ;
- ✓ La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale ;
- ✓ Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courant de FOUCAULT ni d'hystérésis) ;
- ✓ Les pertes mécaniques sont négligées ;
- ✓ L'influence de l'effet de peau est négligée ;
- ✓ Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte ;
- ✓ La cage d'écurieil est remplacée par un bobinage triphasé rotorique équivalent.

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone on peut écrire pour chacun des six enroulements statoriques et rotorique l'équation électrique suivante [Del 00] :

$$V = R \cdot I_b + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.41})$$

R : Est la Résistance du bobinage, I_b , V, et ϕ représentent respectivement le courant dans le bobinage, la tension à ses bornes et le flux le traversant.

Les équations matricielles pour les bobinages statoriques et rotorique s'écrivent alors sous la forme suivante :

$$[V_{s \ a \ b}]_c = [R_s] \cdot [i_{s \ a \ b}]_c + \frac{d[\phi_{s \ a \ b}]_c}{dt} \quad (\text{II.42})$$

$$[V_{r \ a \ b}]_c = [R_r] \cdot [i_{r \ a \ b}]_c + \frac{d[\phi_{r \ a \ b}]_c}{dt} \quad (\text{II.43})$$

Avec:

$$[\mathbf{V}_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_s a \\ V_s b \\ V_s c \end{bmatrix} \quad [\mathbf{V}_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_r a \\ V_r b \\ V_r c \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[\mathbf{i}_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_s a \\ i_s b \\ i_s c \end{bmatrix} \quad [\mathbf{i}_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_r a \\ i_r b \\ i_r c \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\mathbf{\Phi}_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_s a \\ \Phi_s b \\ \Phi_s c \end{bmatrix} \quad [\mathbf{\Phi}_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_r a \\ \Phi_r b \\ \Phi_r c \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.43) devient :

$$[\mathbf{V}_{rabc}] = 0 = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{i}_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\mathbf{\Phi}_{rabc}] \quad (\text{II.47})$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [\mathbf{i}_{sabc}, \mathbf{i}_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} \cdot [\mathbf{\Phi}_{sabc}, \mathbf{\Phi}_{rabc}] \right) \quad (\text{II.48})$$

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$[\mathbf{\Phi}_{rabc}] = [\mathbf{L}_r] \cdot [\mathbf{i}_{rabc}] + [\mathbf{M}_{sr}(\theta)] \cdot [\mathbf{i}_{sabc}] \quad (\text{II.49})$$

$$[\mathbf{\Phi}_{sabc}] = [\mathbf{L}_s] \cdot [\mathbf{i}_{sabc}] + [\mathbf{M}_{sr}(\theta)] \cdot [\mathbf{i}_{rabc}] \quad (\text{II.50})$$

Où :

Seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de la position rotorique θ , l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$C_{em} = [i_{sabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) \cdot [i_{rabc}] \quad (\text{II.51})$$

Pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant «dqo». dans ce cas, on utilise la transformation de park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et «dqo».

En choisissant un repère dqo diphasé, l'axe d peut être repéré par :

θ_s : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase «a» du stator ;

θ_r : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase «a» du rotor.

A chaque instant, ces deux angles sont liés par la relation suivant :

$$\theta = P \cdot \Theta = \theta_s + \theta_r \quad (\text{II.52})$$

Ou :

Θ : Pulsation mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique,

P : Nombre de paires de pôles ;

θ : Étant l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

Les différents axes sont illustrés sur la figure(3).

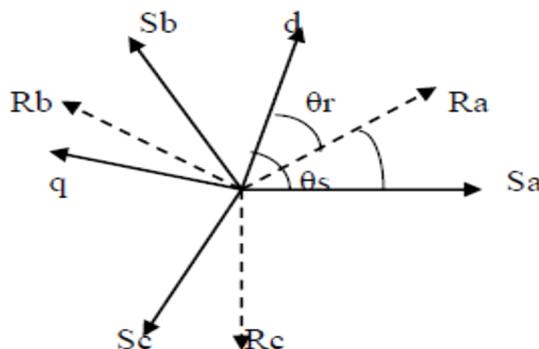


Figure (II.12) : Les différents systèmes d'axes utilisés

En appliquant alors la transformation de park aux équations statoriques avec un angle de rotation θ_s , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

$$V_{s d} = R_s \cdot i_{s d} - \frac{d \theta}{d t} \cdot \Phi_{s q} + \frac{d \Phi_{s d}}{d t} \quad (\text{II.53})$$

$$V_{s q} = R_s \cdot i_{s q} - \frac{d \theta}{d t} \cdot \Phi_{s d} + \frac{d \Phi_{s q}}{d t} \quad (\text{II.54})$$

$$V_{s o} = R_s \cdot i_{s o} + \frac{d \Phi_{s q}}{d t} \quad (\text{II.55})$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de θ_r on obtient les équations rotoriques dans le repère dq :

$$V_{r d} = 0 = R_r \cdot i_{r d} - \frac{d \theta}{d t} \cdot \Phi_{r q} + \frac{d \Phi_{r d}}{d t} \quad (\text{II.56})$$

$$V_{r q} = 0 = R_r \cdot i_{r q} - \frac{d \theta}{d t} \cdot \Phi_{r d} + \frac{d \Phi_{r q}}{d t} \quad (\text{II.57})$$

$$V_{r o} = R_r \cdot i_{r o} + \frac{d \Phi_{r q}}{d t} \quad (\text{II.58})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.55) et (II.58) qui correspondent homopolaires, sont identiquement nulles.

Suite a l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s d} \\ \Phi_{s q} \\ \Phi_{r d} \\ \Phi_{r q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{s d} \\ I_{s q} \\ I_{r d} \\ I_{r q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique .

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique .

l_s : Inductance de fuite statorique.

l_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Mutuelle inductance

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère «dq» par rapport aux repères triphasés. Dans le cadre de nos travaux , on se fixe les axes d et q solidaires du champ tournant de la machine[Del 00] ,[Idj 05].

Lors d'une alimentation sinusoïdale , il est possible d'écrire , en régime permanent :

$$\frac{d \theta_s}{d t} = \omega_s : \text{ pulsation des grandeurs statoriques}$$

$$\frac{d \theta_r}{d t} = \omega_r : \text{ pulsation des grandeurs rotoriques}$$

Par la suite,l'expression (II.52) peut se transformer, en régime permanent, sous la forme suivante :

$$\omega_s - \omega_r = p. \Omega = \omega \quad (\text{II.60})$$

Avec :

Ω : Vitesse mécanique.

ω : Pulsation mécanique.

Ainsi, en partant des équations (II.53) ,(II.54) ,(II.56),(II.57),et en utilisant la relation (II.59) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui globe les différentes équations électriques de la machine s'exprimées dans le repère dq lié au champ tournant :

$$\begin{bmatrix} V_{s d} \\ V_{s q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_s & 0 & -\omega M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_s & 0 & \omega L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s d} \\ i_{s q} \\ i_{r d} \\ i_{r q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & M \\ 0 & L & 0 \\ M & 0 & L \\ 0 & M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d i_{s d}}{d t} \\ \frac{d i_{s q}}{d t} \\ \frac{d i_{r d}}{d t} \\ \frac{d i_{r q}}{d t} \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

La transformation de park, appliquée a l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire ce dernier sous la forme suivante :

$$C_{em} = p \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.62})$$

L'équation mécanique de la machine asynchrone est donnée comme suite :

$$C_{em}-C_r=j\frac{d\Omega}{dt}+f\Omega_r \quad (II.63)$$

II.6 Modélisation de la pompe

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse [Bou 07], [Adj 10].

Pour résoudre ce système d'équation, on considère généralement la vitesse constante.

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

$$HMT=H_g(1 + P_c) \quad (II.64)$$

H_g = hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

P_c = pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites.

La pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r .

$$C_r=K_r\Omega^2 \quad (II.65)$$

Où :

Ω : vitesse du moteur asynchrone (rad/s).

Avec K_r un coefficient de proportionnalité [(Nm/rad.s⁻¹)²] qui donné par l'équation suivante :

$$K_r=\frac{p_n}{\Omega_n^3} \quad (II.66)$$

p_n : puissance nominale du moteur asynchrone (W).

Ω_n : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

La pompe est entraîné a une vitesse optimale donnée par :

$$\Omega_{opt}=\Omega_n\sqrt[3]{\frac{P_p v \eta}{p n}} \quad (II.67)$$

Où :

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (tr /m).

Ω_{opt} : Vitesse optimale du moteur asynchrone (tr /m).

η : Rendement de motopompe.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation des éléments constituant le système de pompage photovoltaïque (panneau, les deux convertisseurs DC/DC, DC/AC, et le groupe motopompe), élaborées à partir des modèles de la littérature. Cette modélisation consiste à établir les équations mathématiques qui régissent le fonctionnement des éléments du système afin de les simuler sous le logiciel (Matlab/simulink).

Chapitre III

CONTROL DU SYSTÈME DE
POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE

Introduction

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque, une étude dimensionnelle est nécessaire ainsi qu'une commande sont nécessaire pour son bon fonctionnement système.

Dans ce chapitre nous allons en premier lieu présenter brièvement les différentes étapes du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permette de définir les éléments du système et de choisir la pompe centrifuge à utiliser, son moteur d'entraînement, ainsi que le nombre de panneaux nécessaire et leurs connexions, pour satisfaire les besoins en eau demandés.

En suite on passe à la présentation de quelques méthodes rigoureuses de poursuite du maximum de puissance du générateur afin d'amener ce dernier à fonctionner à son point de puissance maximale.

Enfin nous allons présenter la commande vectorielle de la machine asynchrone basée sur l'orientation du flux rotorique qui nous permette d'améliorer les performances dynamiques.

III.1 Dimensionnement de système photovoltaïque

Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque sont :

- Evaluation de besoin en eau ;
- Calcul de l'énergie solaire disponible ;
- Détermination de l'énergie solaire disponible ;
- Choix des composants.

II.1.1 Données de base

A. Débit

Le débit (Q) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. En pompage, il est souvent exprimé en litre par heure (l/h) ou en mètre cube par jour (m^3/h) [Roy 98].

B. Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la différence de pression en mètres de la colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$\text{HMT} = \text{Hg}(1 + \text{Pc}) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

Hg = hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation.

Pc = pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont fonction de la distance des conduites (D), de leur diamètre (d_c) et du débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètres d'eau. Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10 % de la hauteur géométrique totale [Roy 98].

C. Niveau statique

Le niveau statique (N_s) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage [Roy 98].

D. Niveau dynamique

Le niveau dynamique (N_d) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement (R_m) [Roy 98] [Moh 10].

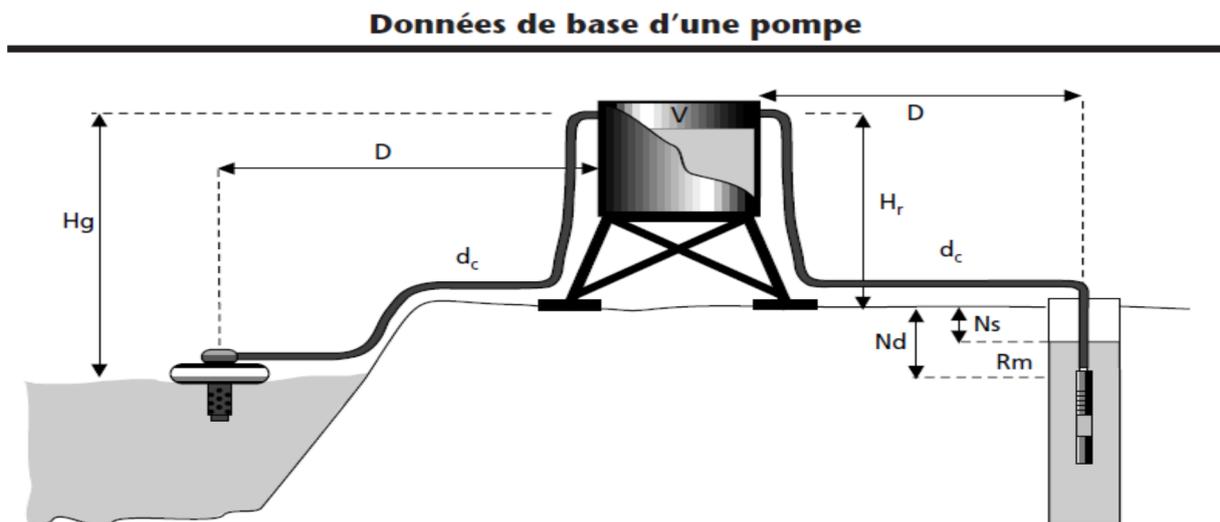


Figure III.1: Donnée de base de la pompe [Roy 98].

III.1.2 Evaluation des besoins en eau

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 [Moh 10] [Tho].

Les besoins en eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques, la méthode d'irrigation et la saison de l'année considérée pour cette application la capacité du réservoir sera déterminée selon le besoin en eau journalières et l'autonomie requise du système [Had 05] [Bou 12].

III.1.3 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

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

$$E_{h y d} = C_H \cdot Q \cdot HMT \quad (III.2)$$

$$C_H = \frac{g \cdot \vartheta}{3600} = 2.725 \quad (III.3)$$

Avec :

C_H : Constante hydraulique.

g : Constant de la gravité (9.81 m/s²).

ϑ : La densité de l'eau (1000 kg/m³).

E_{hyd} : Energie hydraulique (wh).

Q : débit journalier (m³/jour).

HMT : Hauteur manométrique.

III.1.3.1 Calcul de l'énergie quotidienne requise

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur pendant une journée est calculée à partir des données de débit et de HMT requises et est exprimée en (watt-heure). Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (CH) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé [Amo 08].

Énergie requise pour la pompe :

$$E_{e l e} = \frac{C_H \cdot Q \cdot H M T}{R_P} = \frac{E_{h y d}}{R_P} \quad (III.4)$$

Ou :

E_{ele} : habituellement exprimé en (wh).

R_p : en général le rendement des groupes motopompes est de 30% à 45%, selon le type de pompe et de moteur.

III.1.4 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 [Moh 10].

III.1.4.1 Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques

L'énergie fournie par les capteurs photovoltaïques est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation solaire il faut donc tenir compte de ce facteur, qui dépend à son tour du lieu de l'installation, d'orientation et d'inclinaison de ces capteur. Plus les rayons sont proches de la perpendiculaire au plan des panneaux plus la quantité d'énergie disponible est importante, idéalement, les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons du soleil, si non orientés en plein sud dans l'hémisphère Nord et en plein sud dans [Had 05] [Bou 12].

III.1.4.2 Le mois de dimensionnement

Le mois de dimensionnement est le mois le plus défavorable (le plus sauvent si le mois de janvier), son principe est de réaliser un bilan énergétique sous les conditions les plus défavorables pour le système. C'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum. Donc si le système fonctionne durant ce mois il fonctionnera durant les autres mois donc il nous garantit un fonctionnement annuel.

L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire correspondantes à ce mois, serviront pour des composantes du système [Moh 10] [Bou 12] [Had 05].

III.1.5 Choix des composants

III.1.5.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge

Dans notre cas le débit journalier demandé sera de $25 \text{ m}^3/\text{jour}$ et la HMT est estimée à 10 mètre. La pompe choisit à un rendement de 55%, et l'efficacité du moteur, d'environ 80%

au point de fonctionnement nominal. Le rendement du groupe motopompe (R_p) sera donc de 44%.

D'après l'équation (III.4) de l'énergie électrique requise par la pompe on aura :

$$E_{el} = \frac{2.725.25.10}{0.44}$$

$$E_{el} = 1548.29 \text{ (wh/jour)}.$$

III.1.5.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque

Le mois de décembre [Bou 12] est le mois le plus défavorable pour une inclinaison de 36.43° , c'est-à-dire un maximum de 2.2 heures d'ensoleillement par jour. En supposant des pertes de 20% attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur. Dans ce cas la puissance crête de champ photovoltaïque est calculer comme suite :

$$P_c = \frac{E_{el}}{E_n (1 - \text{pertes})} \quad (\text{III.5})$$

$$P_c = \frac{1548.29}{2.2. (1 - 0.2)} = 879.7 \text{ W}$$

Pour des panneaux SIEMENS110 W, $V_{opt}=35 \text{ V}$ et $I_{opt}=3.151 \text{ A}$.

Le nombre de panneaux utiliser peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq \left\lceil E N T \frac{P_c}{P_u} \right\rceil \quad (\text{III.6})$$

$$N_{pv} \geq \left\lceil E N T \frac{879.7}{110} \right\rceil = 8 \text{ P a n n e a u x .}$$

Pour huit (8) panneaux la puissance photovoltaïque totale sera égale :

$$P_{Pvtot} = 8.110 = 880 \text{ W}.$$

Vu que la caractéristique du moteur asynchrone utiliser ($P_n=746$, $I_n= 3.4 \text{ A}$), les panneaux doivent être branchés en séries.

$$V_{Pvtot} = N_{pv} V_{opt} \quad (\text{III.7})$$

$$V_{Pvtot} = 8.35 = 280$$

Pour la sortie de générateur photovoltaïque totale on a :

$$I_{pvtot} = \frac{P_c}{V_{max}} = \frac{880}{280} = 3.14 \text{ A}.$$

III.2 Commande au point de puissance maximale (maximum power point tracking MPPT)

III.2.1 Généralité

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant du sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulière du courant et de tension. La caractérisation $I_{pv}(V_{pv})$ du générateur dépend de l'éclairement solaire (l'irradiation) et de la température.

Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur. Le MPPT (Maximum Power Point Tracker) est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant de suivre ces changements et de rattraper a chaque fois le point de puissance maximale pour extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir [Ank 12] [Bou 11].

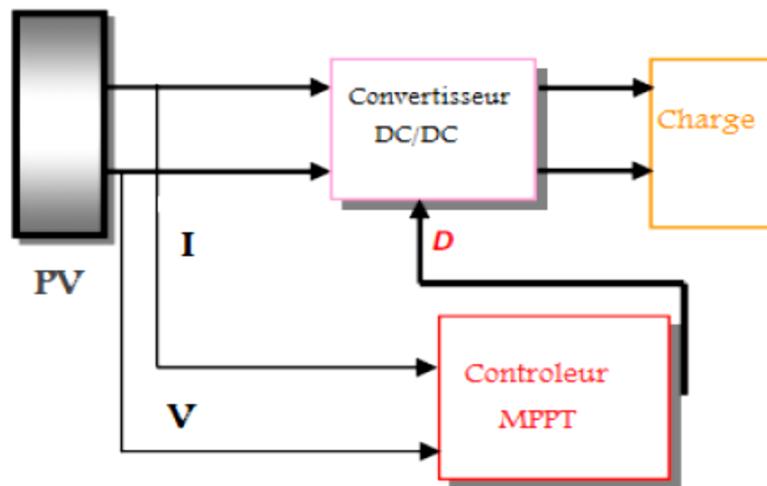


Figure (III.2) : Schéma de principe du convertisseur MPPT [Bou 11].

Les techniques de contrôle communément utilisées (MPPT) consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment [Bou 11].

III.2.2 Les types des commandes MPPT

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM [Esr 07] [Hoh 00] [Céd 08][Lal 09]. Les méthodes les plus rencontrées sont communément appelées respectivement Perturbation et observation (P&O) Hill Climbing, et l'incrément de conductance (IncCond), on retrouve aussi la méthode de mesure de I_{cc} (Fraction de I_{cc}), mesure de V_{co} (Fraction de V_{co}) et la méthode de la table de consultation [Lal 09].

Pour une meilleure compréhension des performances de ces commandes, nous rappelons brièvement leurs différents principes dans les paragraphes suivants .

A. La commandes perturbation et observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée [Sal 90], [Hua 98], [Jia 05], [Sal 06], [San 06] 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) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux 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.

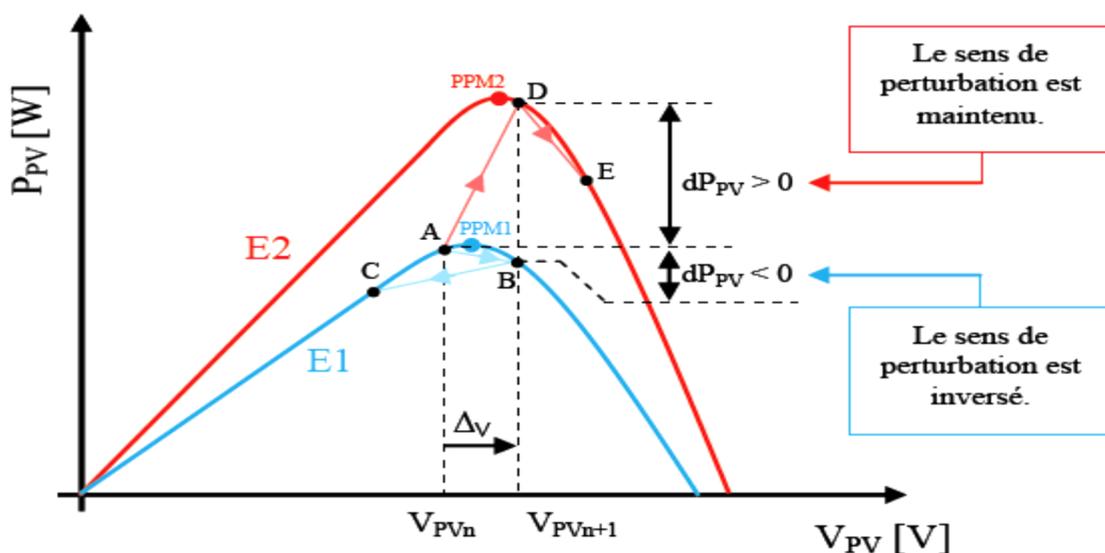


Figure (III.3) : Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation [Céd 08].

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle [Hat 08].

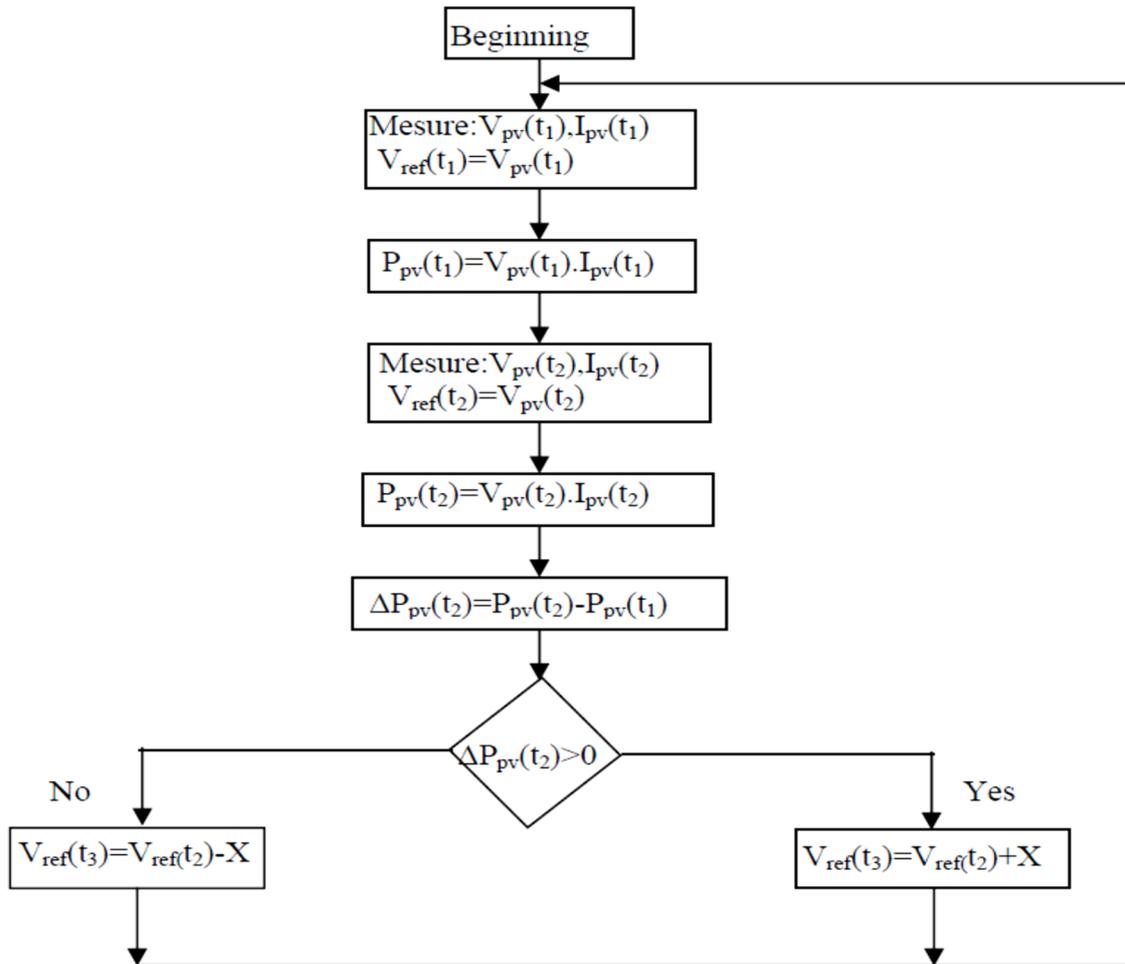


Figure (III.4) : Organigramme conventionnel d'algorithme de perturbation et d'observation, X est l'étape de la perturbation.

D'abord la tension $V_{pv}(t_1)$ et le courant $I_{pv}(t_1)$ sont mesurés pour calculer la puissance $P_{pv}(t_1)$. Cette valeur $P_{pv}(t_1)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P_{pv}(t_2)$. Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrément ou des incréments du rapport cyclique α continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur ΔP .

Si $\Delta P(t_2) > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté $V_{pv}(t_2)$ durant le dernier cycle c'est-à-dire

$$V_{pv}(t_3) = V_{pv}(t_2) + C \quad (III.8)$$

Si $\Delta P(t_2) < 0$ cela veut dire qu'on a décrémente $V_{pv}(t_2)$ durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre

$$V_{pv}(t_3) = V_{pv}(t_2) - C \quad (III.9)$$

Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrément ou la des incréments du rapport cyclique α sera en sens inverse par rapport au dernier cycle [Amr 08].

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint [Céd 08] [Bou 12]. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [Céd 08] [Bou 12].

B. Principe des commandes "Hill Climbing".

La technique de contrôle nommée Hill Climbing [Xia 04] consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque (dP_{pv} / dD) est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure (III.5).

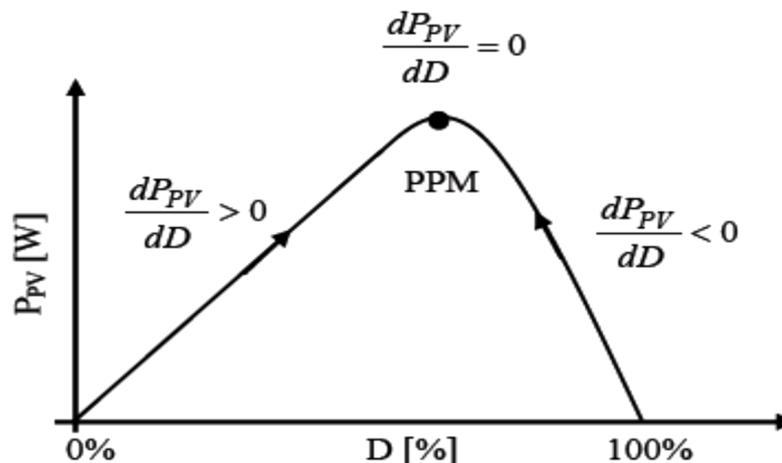


Figure (III.5) : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure (III.6). La variable Slope correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. α et PPV

représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, α symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance p_{pv} est comparée à la valeur déterminée précédemment $P_{pv_{n-1}}$, en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur Slope change ou reste identique.

Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique α . Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations [Céd 08] [Xia 04].

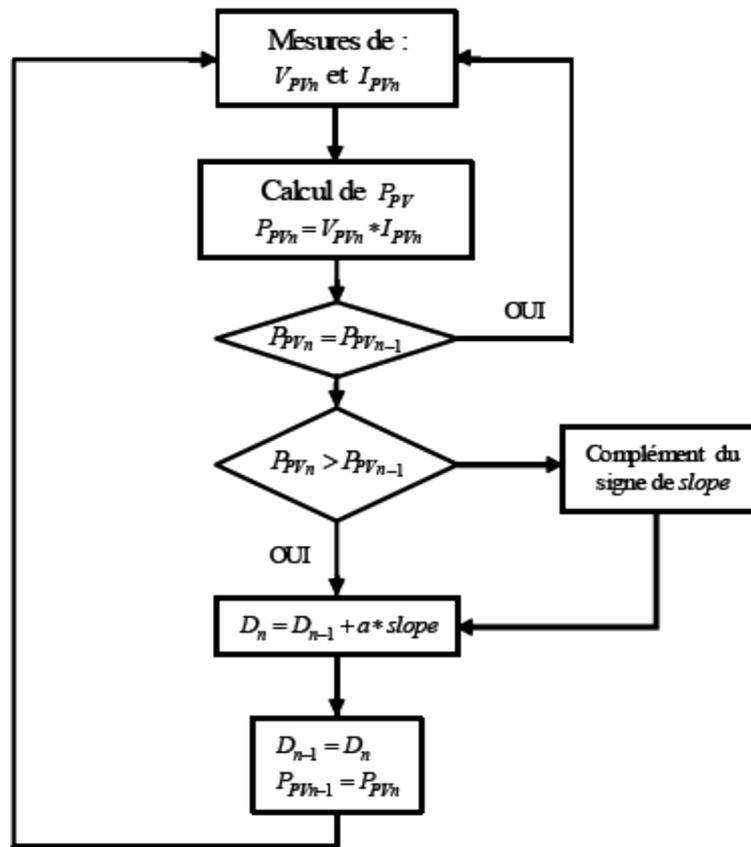


Figure (III.6) : Algorithme type de la commande Hill Climbing.

L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède les mêmes inconvénients que la méthode P&O concernant des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques.

C. Méthode de conductance incrémentielle [Amr 08] [Céd 08]

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension.

Le courant de sortie du panneau photovoltaïque et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle. Son principe consiste à comparer entre la conductance ($G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) et de sa dérivée ($\Delta G = \frac{d I_{pv}}{d V_{pv}}$) et de décider quand augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d'atteindre le MPP ou la dérivée de la puissance ($\frac{d P_{pv}}{d V_{pv}} = 0$). La méthode conductance incrémentielle est souvent jugé efficace de point de vu efficacité de recherche du point de puissance maximale [Vec 05], [Sal 06].

La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode conductance incrémentielle se prête parfaitement à la commande par microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

La puissance de sortie du panneau est donnée par :

$$\frac{d P_{pv}}{d V_{pv}} = I_p \frac{d V_{pv}}{d V_{pv}} + V_p \cdot \frac{d I_{pv}}{d V_{pv}} = I_p + V_p \cdot \frac{d I_{pv}}{d V_{pv}} \quad (\text{III.10})$$

$$\frac{1}{V_{pv}} \cdot \frac{d P_{pv}}{d V_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{d I_{pv}}{d V_{pv}} \quad (\text{III.11})$$

$$\frac{1}{V_{pv}} \cdot \frac{d P_{pv}}{d V_{pv}} = G + \Delta G \quad (\text{III.12})$$

En général, la tension de la source est positive, c'est pourquoi, nous pouvons déduire :

- $\frac{d P_{pv}}{d V_{pv}} > 0$ Si $G > -\Delta G$
- $\frac{d P_{pv}}{d V_{pv}} = 0$ Si $G = -\Delta G$
- $\frac{d P_{pv}}{d V_{pv}} < 0$ Si $G < -\Delta G$

Nous déduisons facilement les actions à faire dans les différents cas sur le schéma $P = f(V)$, figure (III.7).

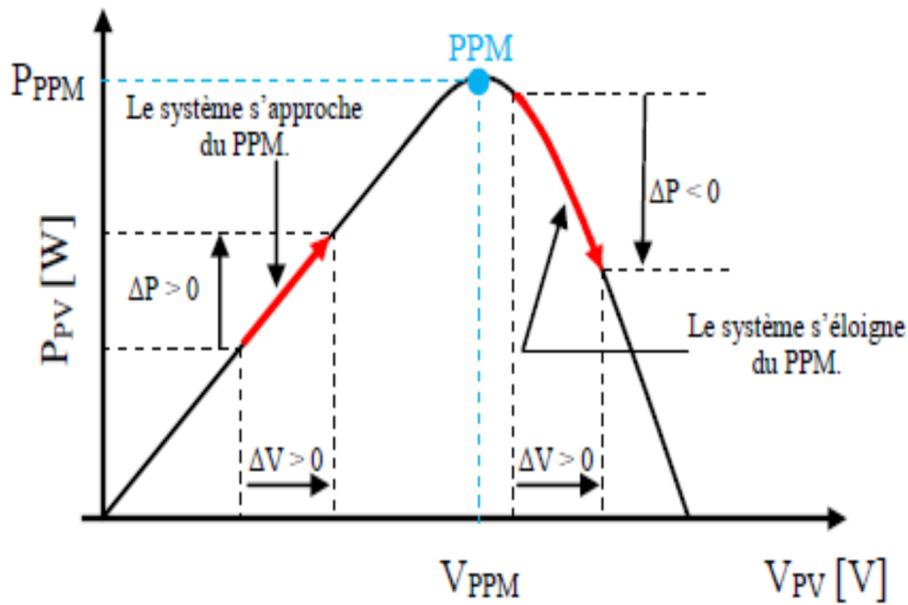


Figure (III.7) : Trajectoire par Incrémentation de Conductance [Céd 08].

- $\frac{d P_{p v}}{V_{p v}} > 0 \longrightarrow$ on augmente $V_{p v}$.
- $\frac{d P_{p v}}{V_{p v}} = 0 \longrightarrow$ on garde $V_{p v}$ constante.
- $\frac{d P}{V_{p v}} < 0 \longrightarrow$ on diminue $V_{p v}$.

Il existe un cas dans lequel on ne peut pas comparer les conductances : lorsque le système était effectivement au point MPPT à l'interaction précédente. En effet, dans ce cas, le rapport cyclique n'a pas été modifié et donc reste constante α ($dV_p = 0$). La conductance incrémentielle ΔG n'est alors pas définie (il faut diviser par 0 pour la calculer). Il suffit dans ce cas d'observer les variations de I_p . On déduit les variations de V_p à appliquer.

- $dI_{p v} > 0 \longrightarrow$ on augmente $V_{p v}$.
- $dI_{p v} = 0 \longrightarrow$ on garde $V_{p v}$ constante.
- $dI_{p v} < 0 \longrightarrow$ on diminue $V_{p v}$.

L'algorithme de la méthode de la conductance incrémentielle est illustré sur la figure suivante :

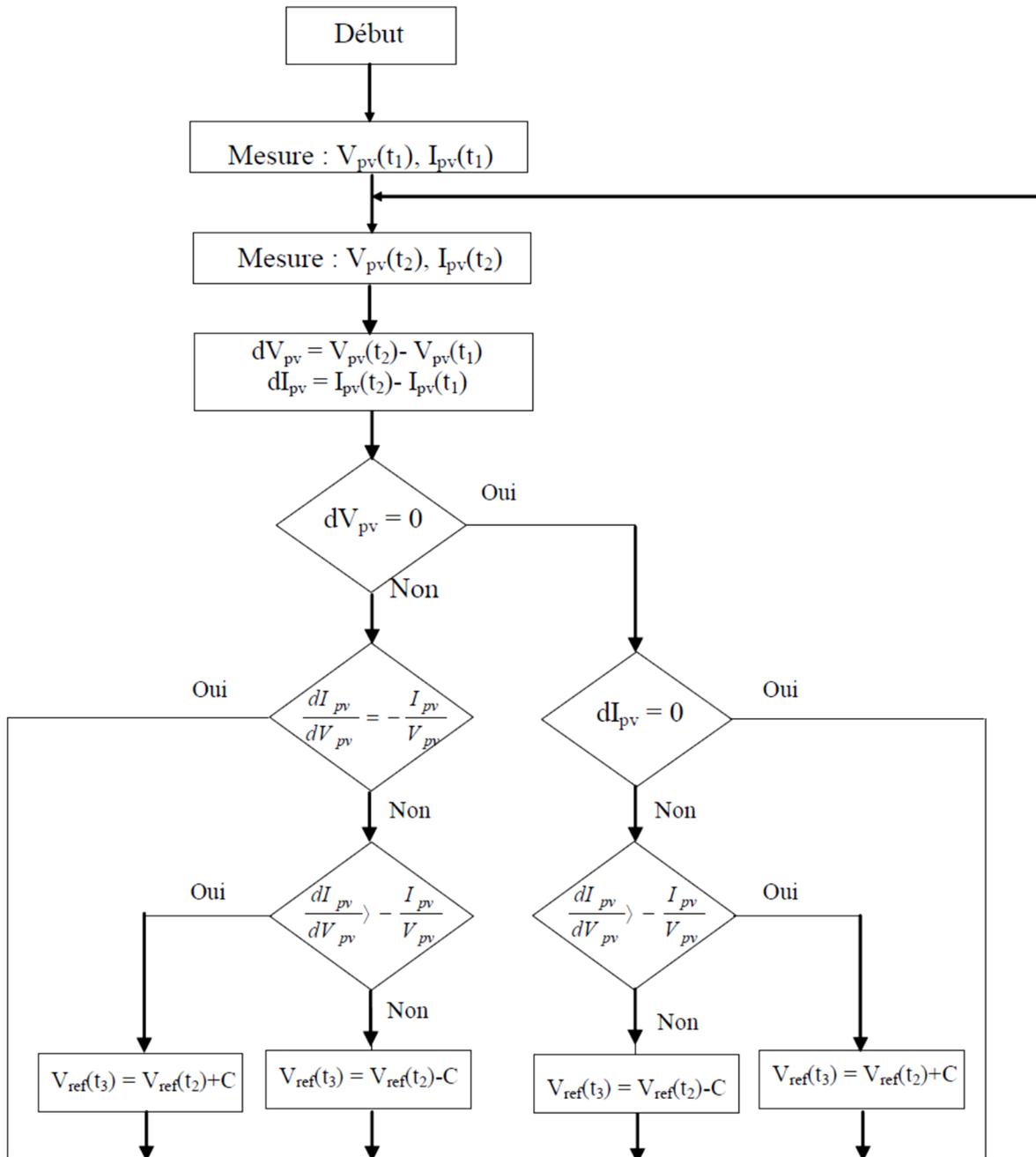


Figure (III.8) : Algorithme incrémentation de la conductance.

D. Méthode de court-circuit

Cette méthode est semblable à la précédente est employée dans la référence [Nog 00] elle est basé sur une dépendance linéaire entre le courant au point de puissance maximale (I_{popt}) et celui de court-circuit (I_{sc}).

$$I_{op} \bar{t} = K_2 \cdot I_{cc}$$

(III.13)

Avec : $K_2 < 1$

Un balayage de donnée photovoltaïque est effectué chaque plusieurs minute afin de calculer K_2 , après que K_2 soit obtenus, le système calcul I_{opt} jusqu'au prochaine calcul de K_2 .

La constante proportionnelle (k_2) dépend de la technologie de la cellule solaire et des conditions météorologiques. Pour les modules photovoltaïques poly-cristallins, la constante (k_2), peut être considérée autour de 0,85.

L'organigramme de la commande est alors, semblable à la méthode de tension de circuit ouvert. Par conséquent, cette méthode offre les mêmes avantages et inconvénients que la méthode ci-dessus [Lal 09]

E. Méthode de la tension en circuit ouvert

Dans cet algorithme, utilisé dans la référence [Mas 02] [Lal 09] est basé sur l'approximation linéaire de V_{opt} à V_{oc} . Cette dernière (V_{oc}) elle est mesurée par interruption de fonctionnement normale de système avec une certaine puissance de mesure. La référence [Sal 06] indique des valeurs de k_1 allant de 0.73 à 0.8 pour les modules photovoltaïques poly-cristallins, pour un intervalle d'échantillonnage de 15 ms.

$$V_{opt} = K_1 \cdot V_{co} \quad (III.14)$$

$$K_1 < 1$$

Avec :

(k_1) : une constante qui dépend de la technologie des cellules photovoltaïque et des conditions météorologiques E_s et T .

Et l'inconvénient de cette méthode est la difficulté de choisir d'une valeur optimale de K_1 bien que cette valeur soit simple [Lal 09].

F. Méthode de la table de consultation

Dans cette méthode I_{pv} , V_{pv} sont mesuré et comparer a ce stocker dans le système de commande (qui correspond à ce dans les condition optimale de fonctionnement) [Ibr 99], sous des conditions climatique réel.

Et l'inconvénient de cette méthode est la difficulté d'enregistrer et de stocker toutes les conditions possible de fonctionnement du système, et l'exécution doit être ajustée en fonction

du panneau photovoltaïque utilisé, et elle nécessite une grande capacité de mémoire pour le stockage des données [Lal 09].

G. Autres méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer :

- les algorithmes basés sur la logique floue [Tri 06] [Hat 08] [Aya] [Bou 10].
- les algorithmes à base de réseau de neurones [Tri 06] [Ank 12].

Dans le cas où la charge est une batterie, il existe un algorithme qui vise à maximiser uniquement le courant de charge puisque la tension en sortie est constante. Cet algorithme fait ainsi appel à un seul capteur ce qui réduit considérablement le coût.

- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance) [Nat 04].
- la méthode de l'oscillation forcée [Han 99] [Tod 04].

III.3 Commande des machines asynchrones

Dans la machine à courant continu à excitation séparée, le couple et le flux sont naturellement découplés, ce qui explique la simplicité de la commande de cette machine. Par contre pour la commande des machines à courant alternatif (MSAP, MAS) la difficulté majeure rencontrée, réside dans le fait que ces deux variables sont fortement couplées.

Pour aboutir à un contrôle de même type que celui de la machine à courant continu, BLASCHKE [Car 01] [Hab 00], avait donné naissance en 1971 aux bases de la nouvelle théorie de commande des machines à courant alternatif dites « commande vectorielle ».

III.3.1 Principe de la commande vectorielle

Pour réaliser ce découplage entre le flux et couple, il faut orienter le repère $\langle\langle dq \rangle\rangle$, c'est-à-dire fixer en permanence une contrainte telle que l'une des grandeurs de sortie intervenant dans l'expression du couple (II.62) soit imposée. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit le flux rotorique, le flux statorique ou le flux d'entrefer.

Dans notre étude, nous nous limitons à la technique de commande par orientation du flux rotorique qui fournit des performances dynamiques plus élevées notamment sur la maîtrise de la dynamique du couple électromagnétique via la maîtrise de la dynamique du flux rotorique.

Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que $\phi_{d r} = 0$ et par conséquent $\phi_{r d} = \phi_r$. Cela signifie que le flux ϕ_r est aligné en permanence avec l'axe $\langle\langle d \rangle\rangle$.

Sa composante quadratique et donc nulle et la commande est telle que le flux soit maintenu constant. Cette dernière supposition amène a une simplification importante dans le système d'équation pour l'élaboration de la commande [Laa 08].

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L} \Phi_r \cdot i_{sq} \quad (\text{III.15})$$

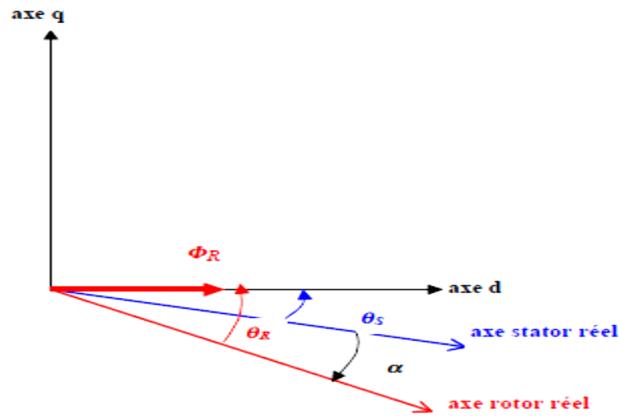


Figure (III.9) : Orientation du flux rotorique orienté sur l'axe **d**.

En supposant que la commande maintienne $\Phi_{rd} = \Phi_r = a$ une constante et $\Phi_{rq} = 0$, alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent $\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = 0$.

A partir de l'équation matricielle (II.59) il convient d'écrire :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

D'après l'équation matricielle (60) :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III.17})$$

Par ailleurs, l'équation (II.58) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\Phi_r = -\frac{R_r \cdot i_{rq}}{\omega_r} \quad (\text{III.18})$$

Avec $\omega_r \neq 0$ quelque soit $t \geq 0$

En fait à la condition de couplage du référentiel d'axes **d** et **q** dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir Φ_r en fonction de i_{rq} pour le flux rotorique reste orienté.

On peut exprimer le courant $i_{r d}$ comme suit :

$$i_{r d} = -\frac{M_r \cdot i_{s d}}{L_r} \quad (\text{III.19})$$

Comme $i_{r d} = 0$, on a alors : $\Phi_{r d} = \Phi_{m d} = \Phi_r = L_m i_{s d} = M \cdot i_{s d}$ par ailleurs, la relation (II.59) peut s'écrire de la manière suivante :

$$i_{r d} = -\frac{M \cdot i_{s d}}{L_r} \quad (\text{III.20})$$

Sachant que le coefficient de dispersion s'écrit : $\partial = 1 - \frac{M^2}{L_S \cdot L_R}$, les tensions statoriques peuvent s'écrire comme suite :

$$V_{s d} = R_S \cdot i_{s d} + \partial L_S \cdot \frac{d i_{s d}}{d t} - \omega_s \cdot \partial L_S \cdot i_{s q} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d \Phi}{d t} \quad (\text{III.21})$$

$$V_{s q} = R_S \cdot i_{s q} + \partial L_S \cdot \frac{d i_{s q}}{d t} - \omega_s \cdot \partial L_S \cdot i_{s d} + \omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \quad (\text{III.22})$$

Dans ce travail, nous avons choisi d'utiliser des correcteurs de courants par hystérésis.

De ce fait, il n'y pas de consignes de tension à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de moteur n'est nécessaire et on a pas besoin de prendre en considération les termes de compensation dans notre système de commande.

III.3.2.1 Estimation de Φ_r , ω_s , θ_s

Seul les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotorique, ne le sont pas ; il faut donc pouvoir les estimer a partir des grandeurs statoriques après de la transformation de Park.

$$\Phi_r = \frac{M \cdot i_{s d}}{1 + \gamma S} \quad (\text{III.23})$$

Tel que :

S : est l'opérateur de LAPLACE.

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{III.24})$$

La pulsation de glissement est estimée à base de la composante statorique quadrature I_{sq} .

Elle est exprimée par l'expression suivante :

$$\omega_r = \frac{M \dot{i}_q}{C_r \cdot \phi_r} \quad (\text{III.25})$$

En remplaçant la dernière relation dans l'équation $\omega_s - \omega_r = p \Omega$ on aura :

$$\omega_r = \frac{M \dot{i}_q}{C_r \cdot \phi_r} + P \Omega \quad (\text{III.26})$$

III.4 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension délivrée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Pour cela on utilise la commande par hystérésis car c'est une technique robuste et simple à établir [bou 12].

III.4.1 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis

Pour chaque bras de l'onduleur, les interrupteurs T_i et T'_i ($i = 1, 2, 3$) sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur. Où, le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet de l'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue en augmentant jusqu'à ce que ΔI soit égal à h (h est la largeur de la bande d'hystérésis). Le comparateur bascule ou l'autre interrupteur rentre en conduction à son tour tant que $\Delta I < h$.

Le contrôle des courants par régulateurs à hystérésis force le courant de phase à suivre le courant de référence. L'imposition des courants sinusoïdaux à la machine garantit un couple électromagnétique non fluctuant.

L'approche la plus simple qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesurée et le courant de référence est illustrée par la figure (III.9)

Les conditions de commutation des trois commutateurs statiques S_i ($i=1, 2,3$) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques S_i correspondants de la façon suivante :

$$S_i = -1 \quad \text{si} \quad i_i \geq i_{r_e f} + \Delta i$$

$$S_i = 1 \quad \text{si} \quad i_i \geq i_{r_e f} - \Delta i$$

$$S_i = S_{i-1} \quad \text{si} \quad i_i = i_{r_e f}$$

Tel que :

i ($i=1, 2,3$) : représentent les courants des phases statoriques (i_a, i_b, i_c).

$i_{r_e f}$ ($i=1, 2,3$) : représentent les courants de référence issus des circuits de commande des trois bras de l'onduleur [Laa 08] [Meh 07].

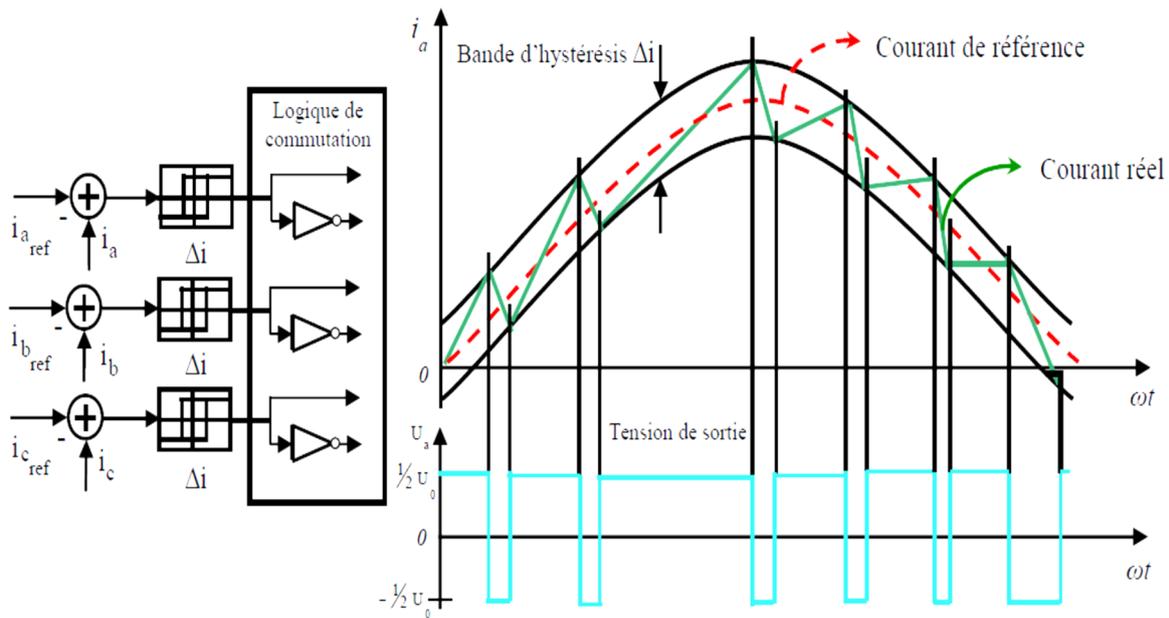


Figure (III.10) : Illustration de la bande de courant à hystérésis.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié une structure de commande utilisant à la fois le concept de la méthode du flux orienté pour la machine asynchrone et le fonctionnement en MPPT pour l'adaptateur de puissance. La stratégie de commande vectorielle par orientation du flux rotorique a servi ici comme une solution pour contrôler la vitesse de la machine.

La commande avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement. Ce qui a permis de faire fonctionner la station au point de fonctionnement optimal.

Pour un bon fonctionnement et dans le but d'avoir des meilleurs rendements, le dimensionnement de système de pompage photovoltaïque est indispensable.

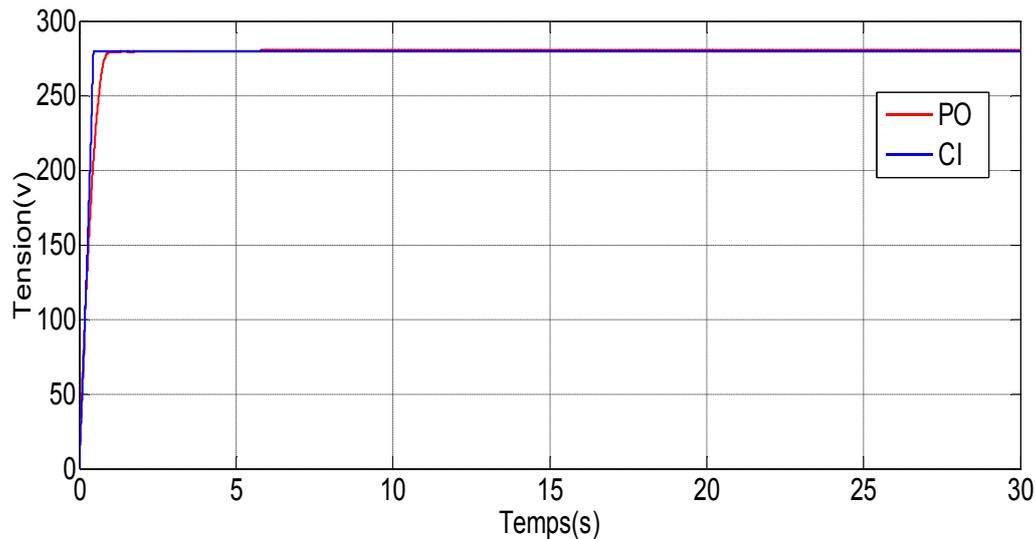
Chapitre IV

SIMULATION DE SYSTÈME
GLOBALE

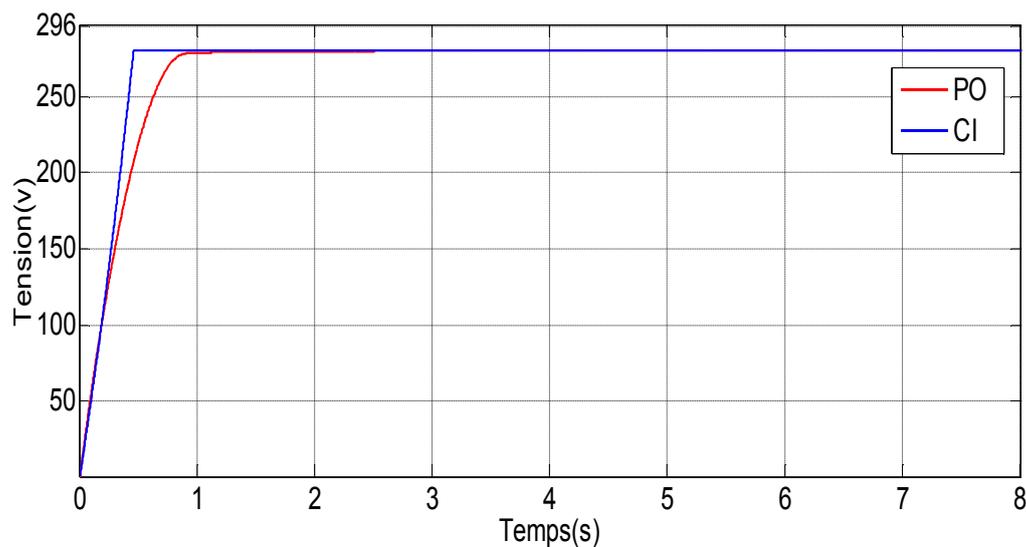
IV.1.1 Simulation du système photovoltaïque avec MPPT

Dans les simulations qui suivent on présente la puissance, la tension et le courant photovoltaïque pour les différentes méthodes d'optimisation MPPT [perturbation et observation et conductance incrémentielle], et nous analyserons les résultats obtenus.

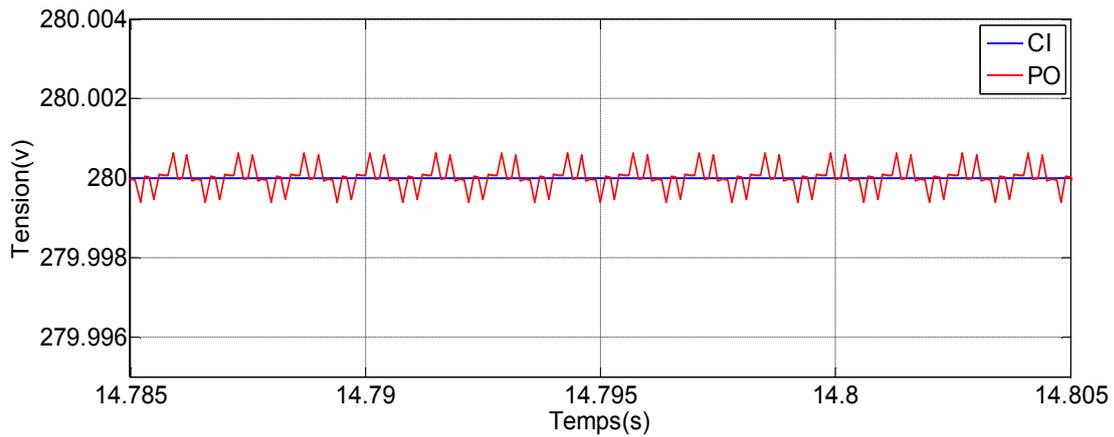
IV.1.2 Pour des conditions standard de fonctionnement (1000W/m², 25°C)



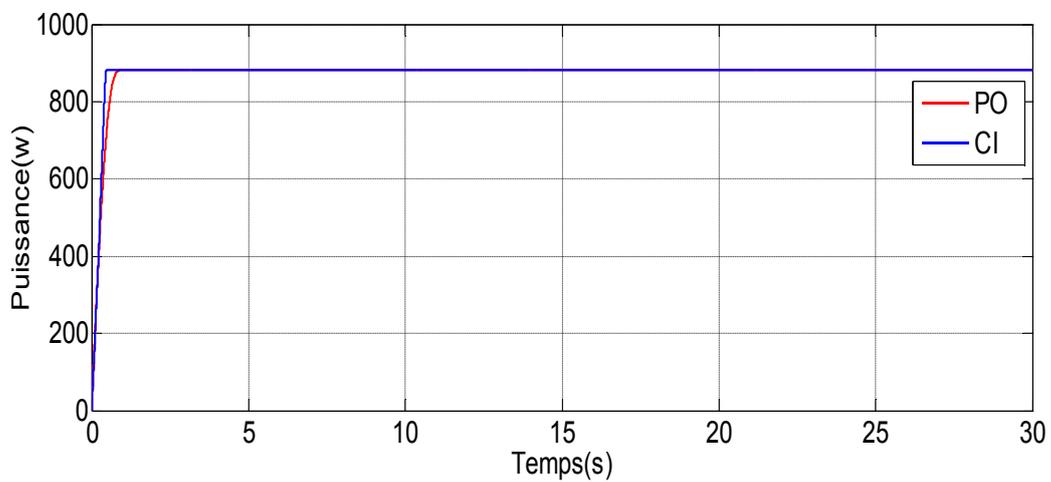
Figure(IV.2) : Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$



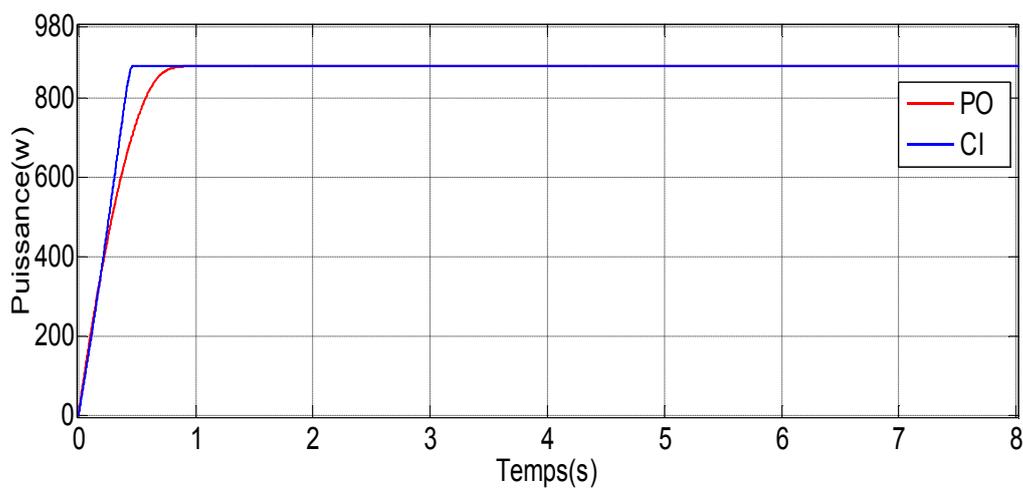
Figure(IV.2.a) : Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire $V_{pv}=f(t)$



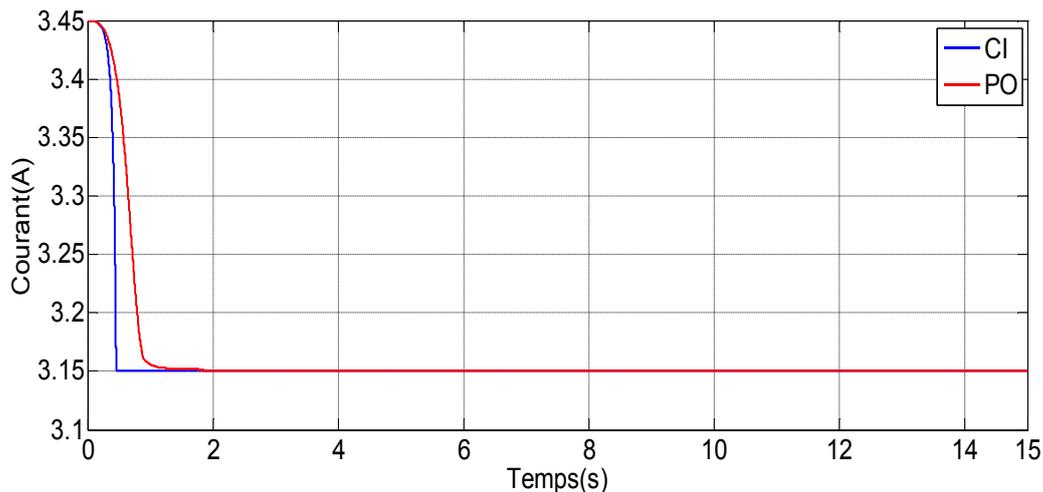
Figure(IV.2.b) : Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent $V_{pv}=f(t)$



Figure(IV.3) : Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$



Figure(IV.3.a) : Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire $P_{pv}=f(t)$

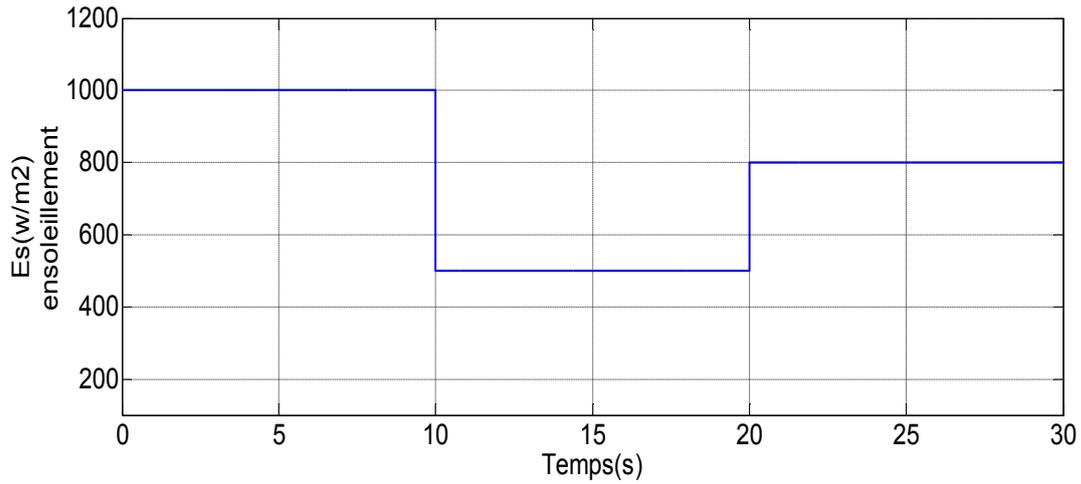


Figure(IV.4) : Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}=f(t)$

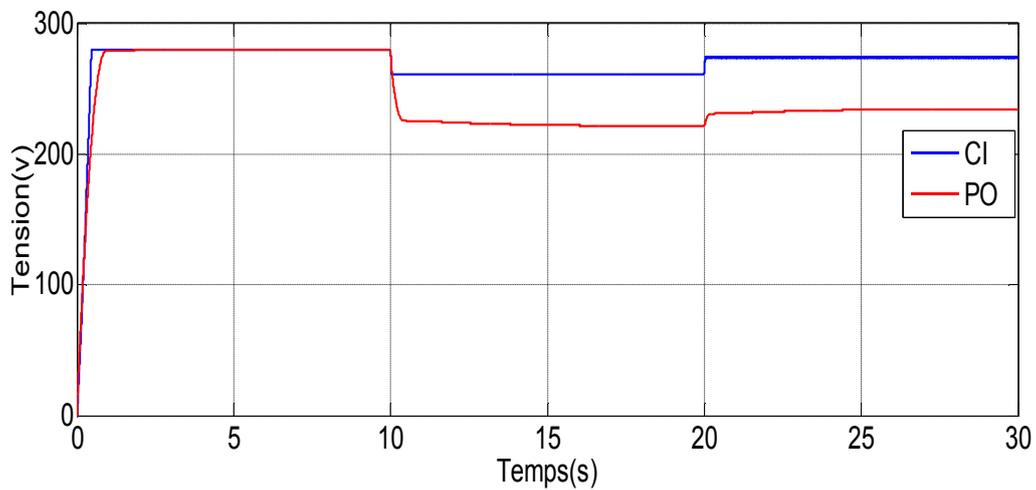
Les figures (IV.2), (IV.3), (IV.4) présentent la tension du générateur photovoltaïque (V_{pv}), la puissance (P_{pv}) et le courant (I_{pv}) pour les deux méthodes de control MPPT (perturbation et observation (P&O) et conductance incrémentielle (CI)). Pour les conditions STC On peut voir que le (CI) présente une réponse plus rapide, il atteint sa valeur optimale à (0.46s) comparé à la méthode (P&O) qui nécessite plus de temps pour extraire le point de puissance maximale (0.78s) qui présente aussi des oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent ce qui présente des perte de puissance. La conductance incrémentielle permet une réduction non seulement du temps de convergence pour extraire le MPP, mais aussi des fluctuations de puissance en régime établi, comme il est clairement présenté dans le zoom de la figure(IV.2.b).

IV.1.3 Fonctionnement sous les conditions variables

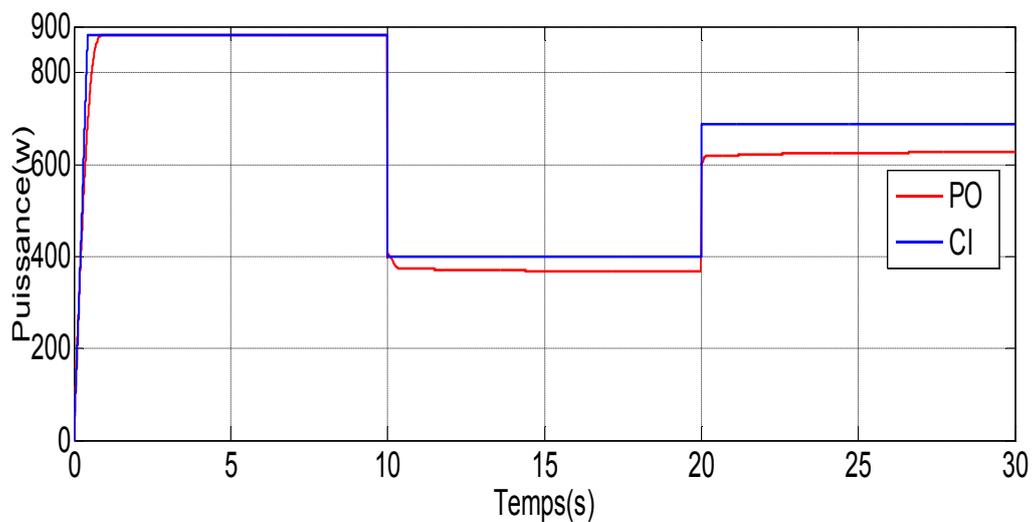
Pour comprendre le comportement du système face aux changements d'éclairement on va effectuer une diminution et augmentation rapide de l'ensoleillement à température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$). en commence par un ensoleillement de $1000\text{w}/\text{m}^2$ et à l'instant $t=10\text{s}$ en bascule à $E_s=500\text{w}/\text{m}^2$ ensuite dans l'instant $t=20\text{s}$ à $E_s=800\text{w}/\text{m}^2$, les résultats obtenus sont présentés en dessous :



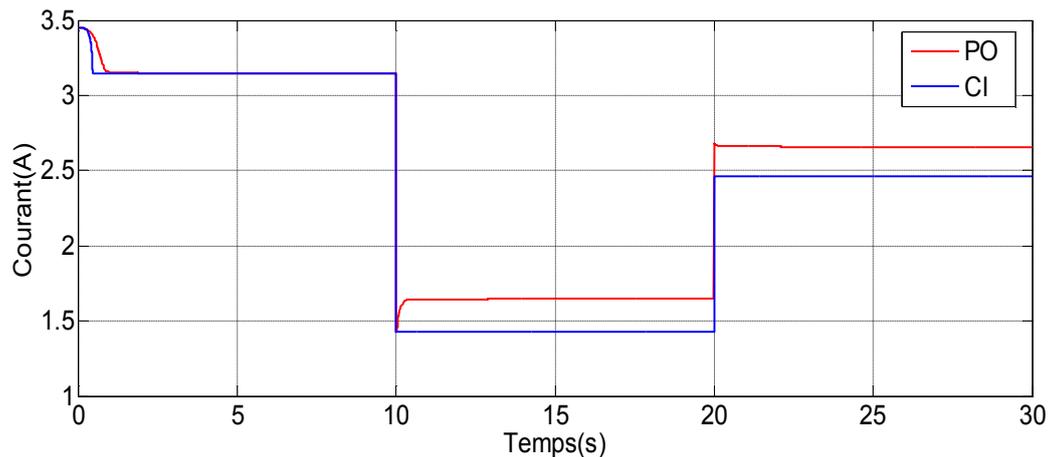
Figure(IV.5) : Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide



Figure(IV.6) : Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$



Figure(IV.7) : Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$



Figure(IV.8) : Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}=f(t)$

Pour une variation brusque d'ensoleillement ($1000-500-800W/m^2$, $25^{\circ}C$), on remarque que l'algorithme de la méthode P&O présente un temps de réponse plus lent par rapport à l'algorithme de la méthode CI et cela se justifie par sa sensibilité aux grandes variations d'ensoleillement elle rencontre des difficultés à discerner l'emplacement du MPP, et quand ce dernier est atteint le point de fonctionnement oscille autour de PPM ce qui cause des pertes de puissance.

Remarque

D'après les résultats obtenus on constate que la méthode de la conductance incrémentielle prouve des meilleures performances temps de réponse plus rapides, erreur à l'état permanente très faible, et une robustesse aux différentes variations des conditions atmosphériques que celle de la méthode perturbation et observation (PO) ce qui nous mène à choisir la CI comme une méthode d'optimisation de notre système global.

IV.2 Simulation du système global de pompage photovoltaïque

Après la première simulation nous avons constaté que la méthode qui présente les meilleures performances est la méthode de la conductance incrémentielle ce qui nous mène à continuer la simulation du système global de pompage photovoltaïque avec cette méthode.

Des différentes simulations ont été effectuées sur le système étudié qui est composé de huit (8) panneaux photovoltaïques de 110W, un hacheur boost, un onduleur, une pompe et un moteur asynchrone qui sera commandé par une commande vectorielle par orientation du flux.

rotorique qui est déjà présenté dans le chapitre précédent, les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

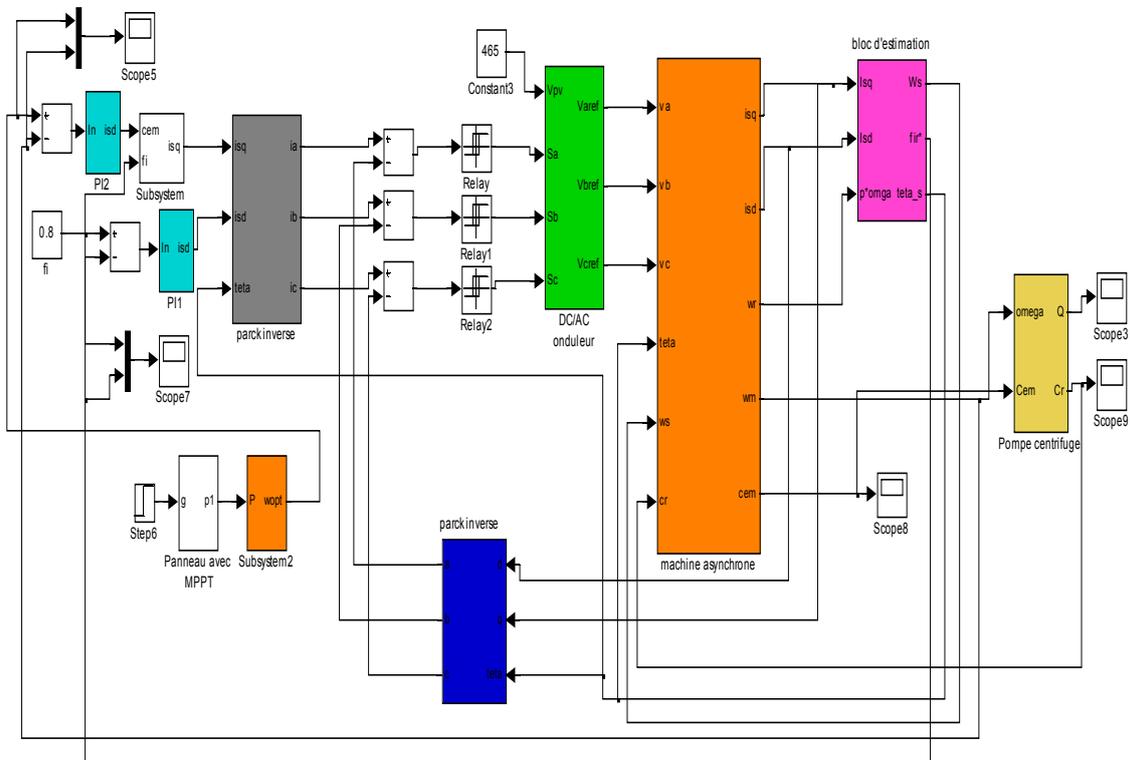
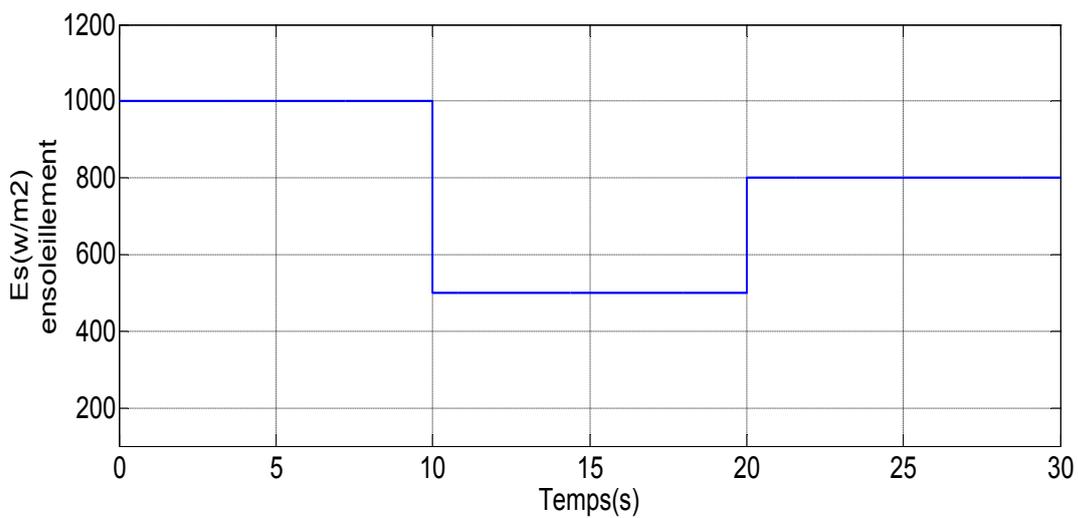
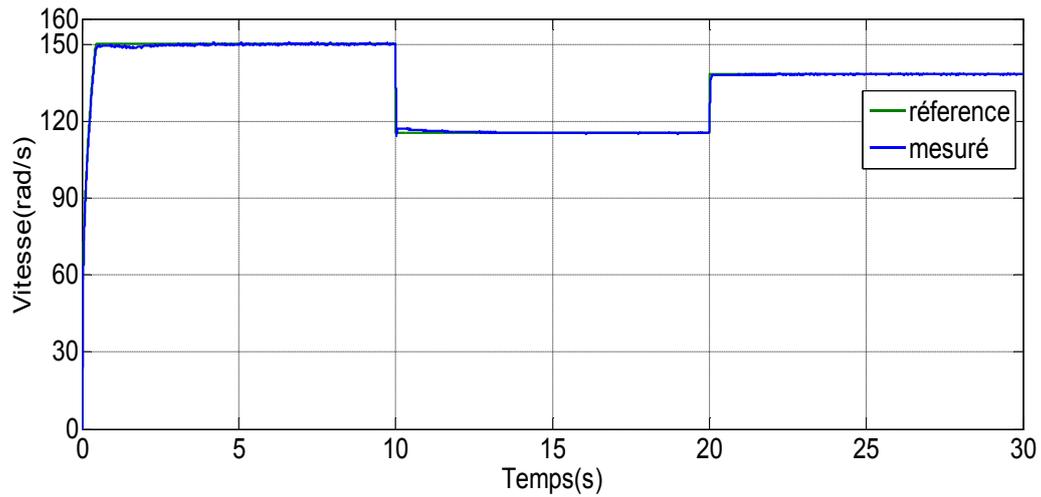


Figure (IV.9) : Schéma globale du système photovoltaïque

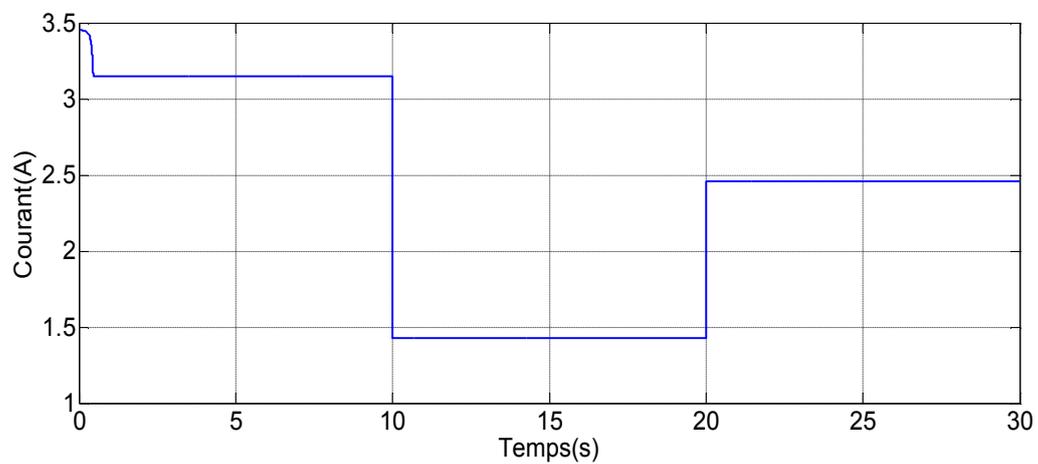
IV.2.1 Pour des conditions des fonctionnements variables



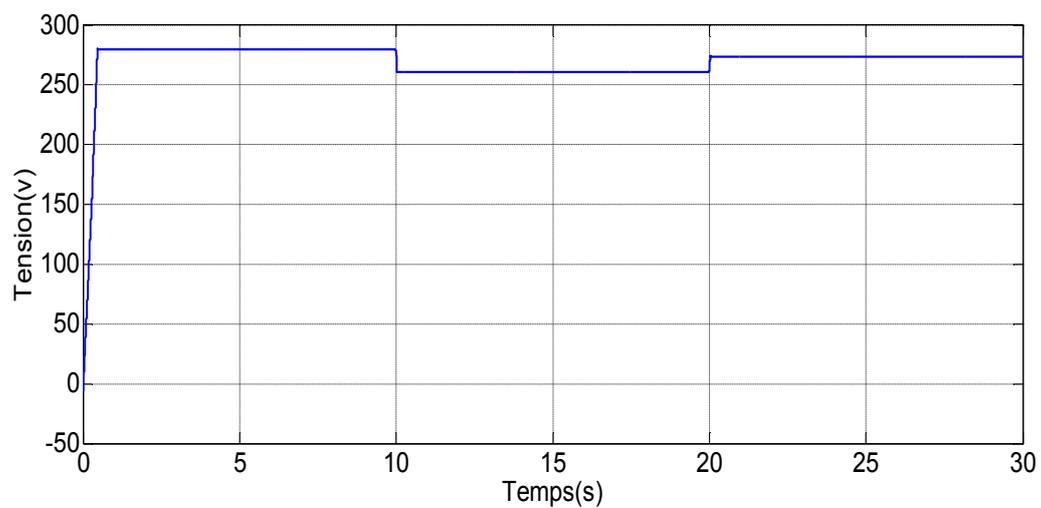
Figure(IV.10) : Allure de la consigne de l'insolation dans le cas d'un changement rapide



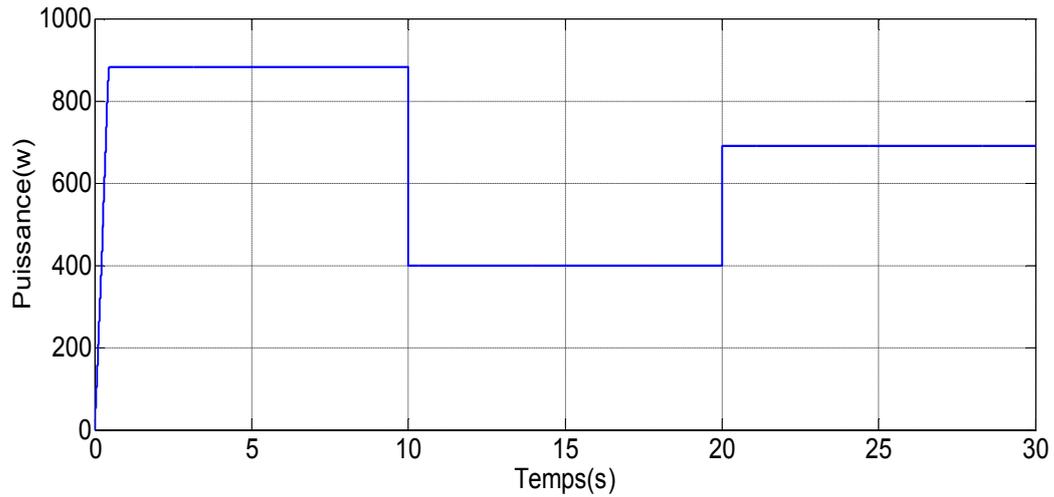
Figure(IV.11) : Allure de la vitesse $\Omega=f(t)$



Figure(IV.12) : Allure du courant photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$



Figure(IV.13) : Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}=f(t)$



Figure(IV.14) : Allure du puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$

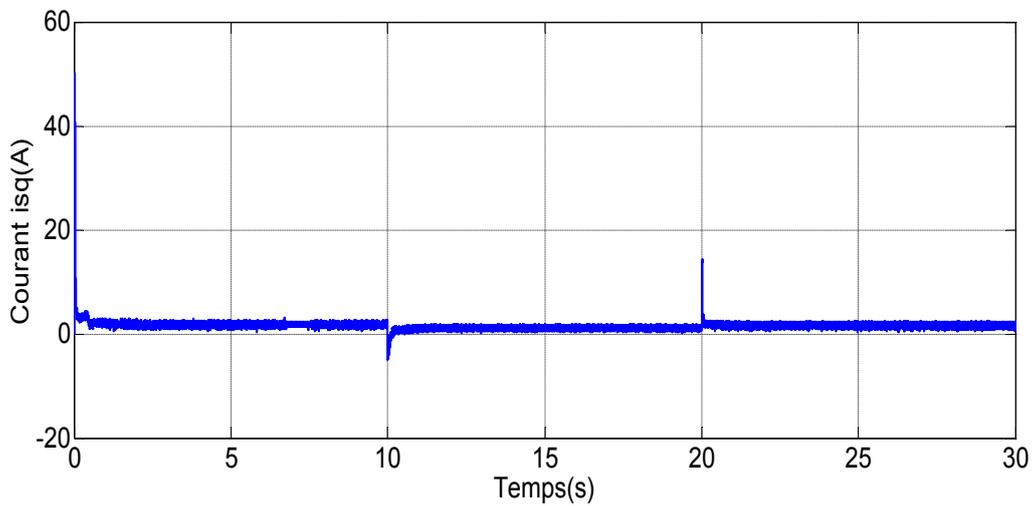


Figure (IV.15) : Allure du courant $I_{sq}=f(t)$

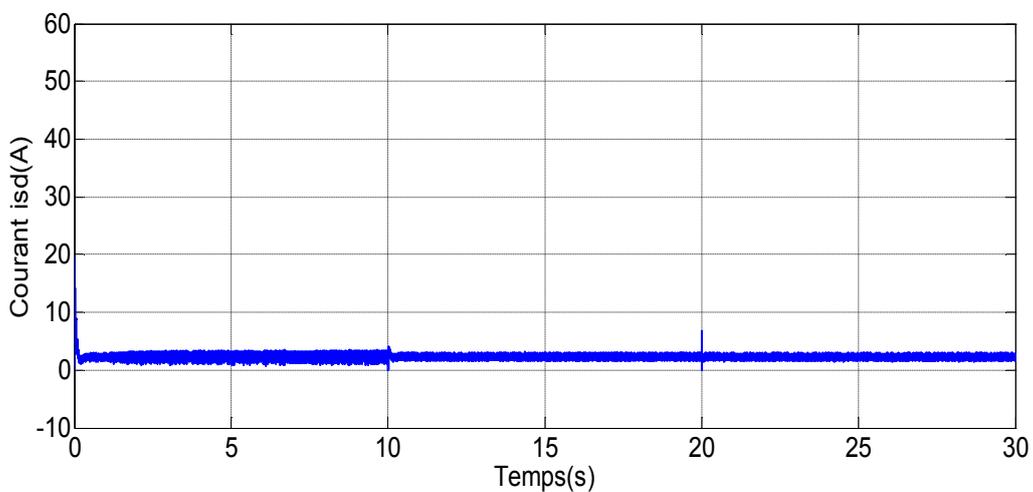


Figure (IV.16) : Allure du courant $I_{sd}=f(t)$

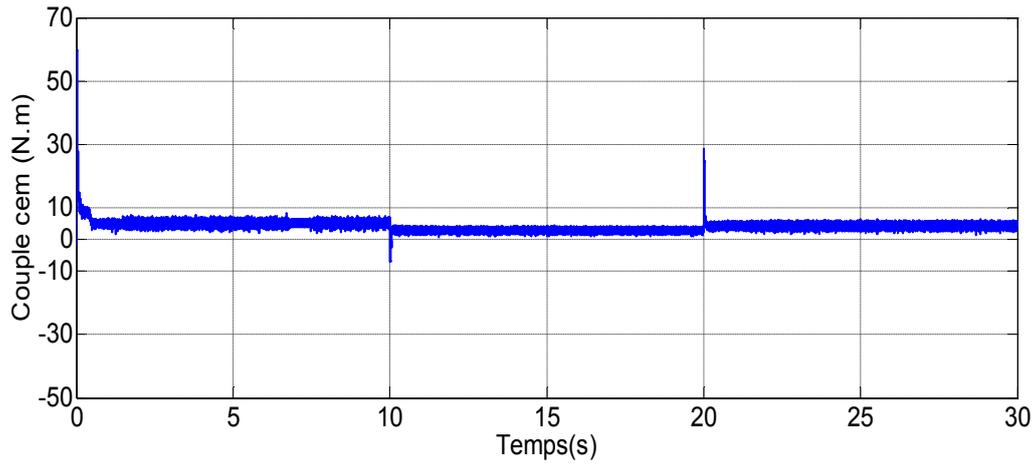


Figure (IV.17) : Allure du couple $C_{em}=f(t)$

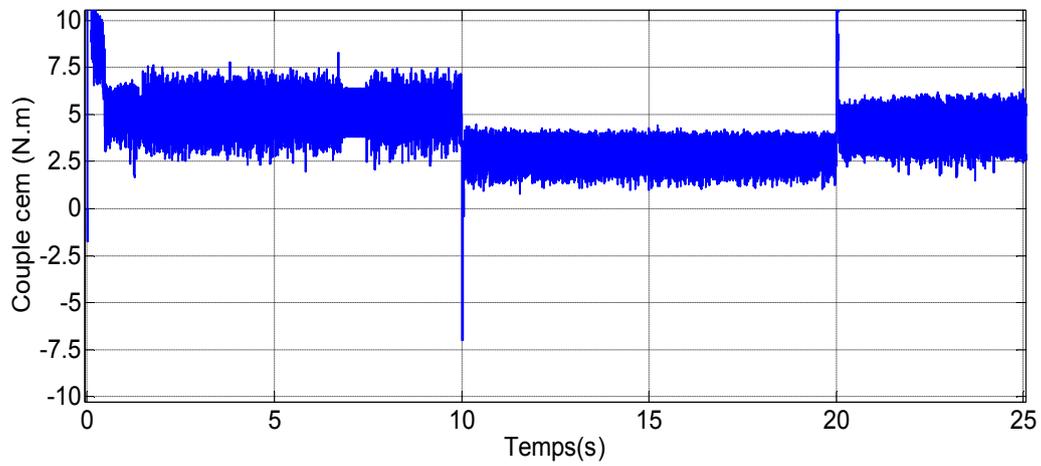


Figure (IV.17. a) : Zoom de l'allure du couple $C_{em}=f(t)$

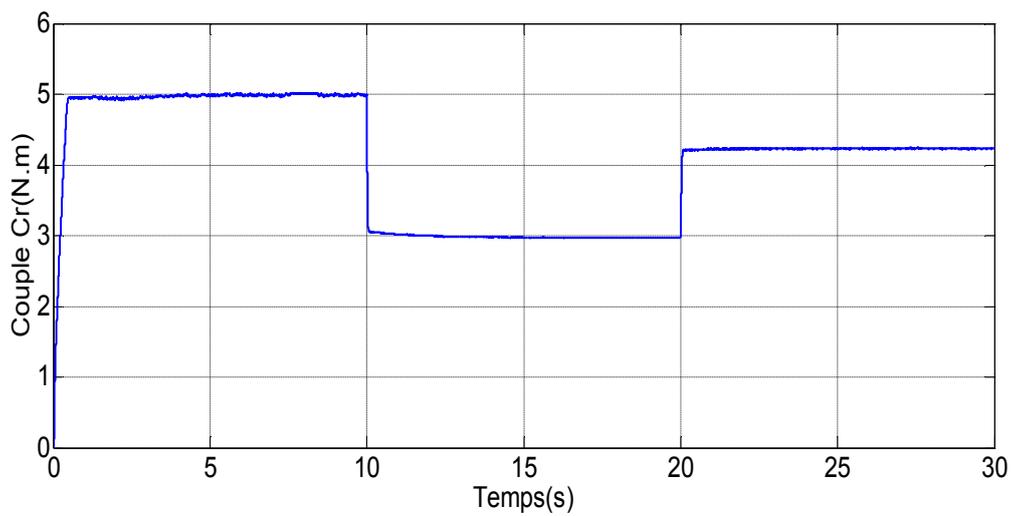


Figure (IV.18) : Allure du couple $C_r=f(t)$

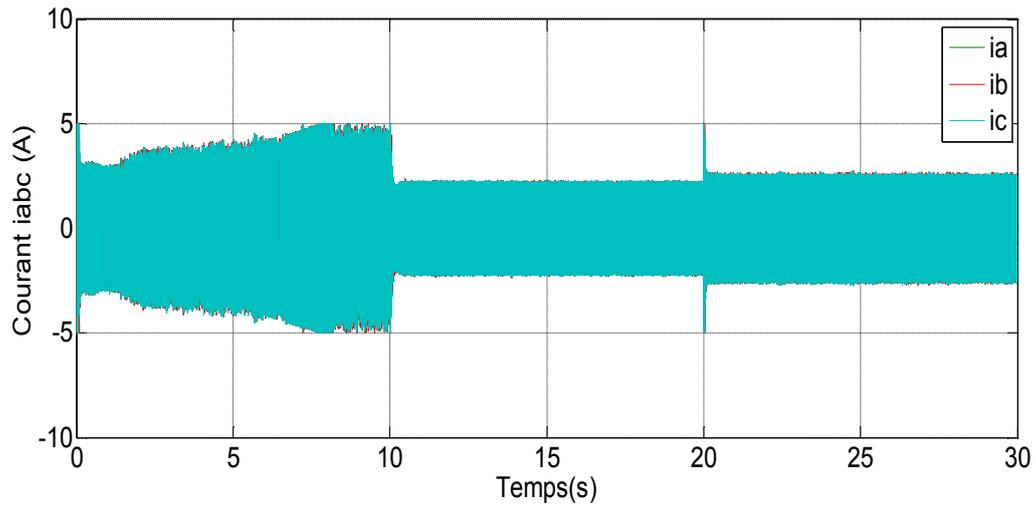


Figure (IV.19) : Allure du courant $i_{abc}=f(t)$

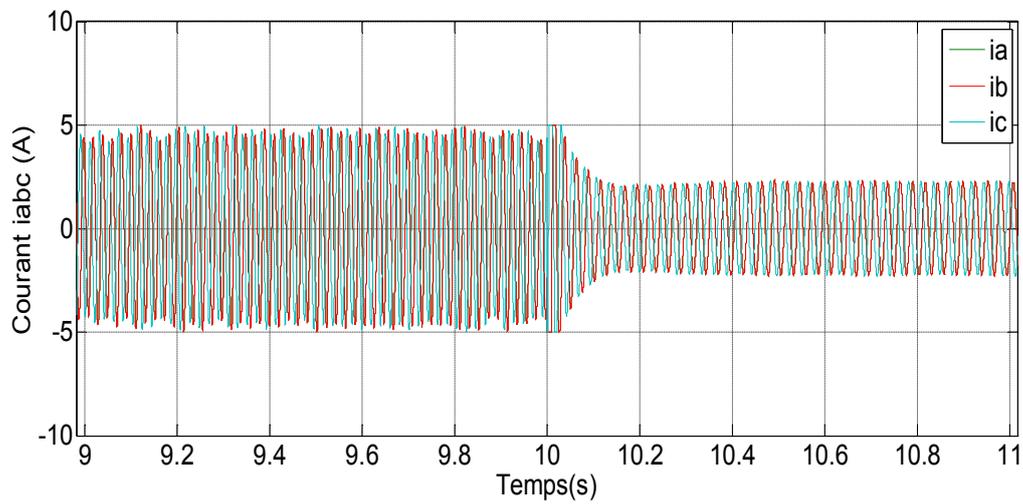


Figure (IV.19.a) : Zoom sur l'Allure du courant $i_{abc}=f(t)$

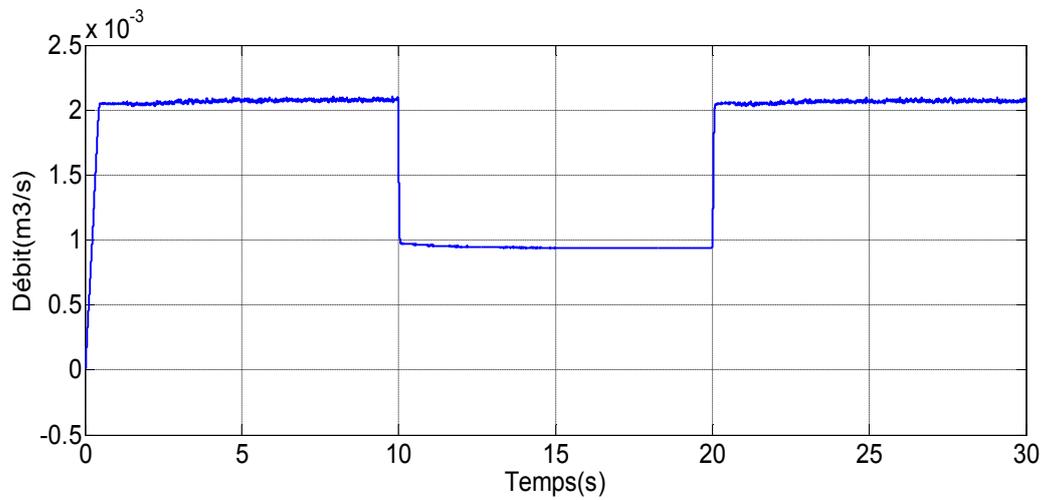


Figure (IV.20) : Allure du débit $Q=f(t)$

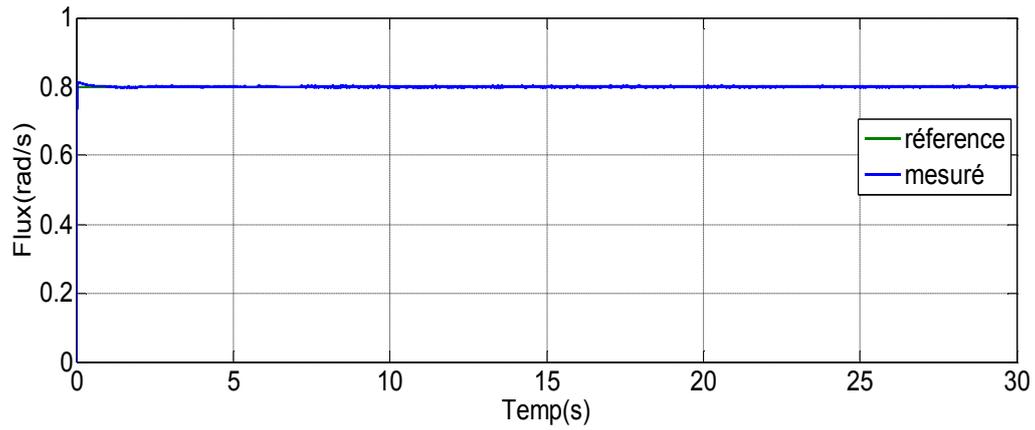


Figure (IV.21) : Allure du flux $\phi=f(t)$

IV.2.2 Pour une variation de l'ensoleillement aléatoire

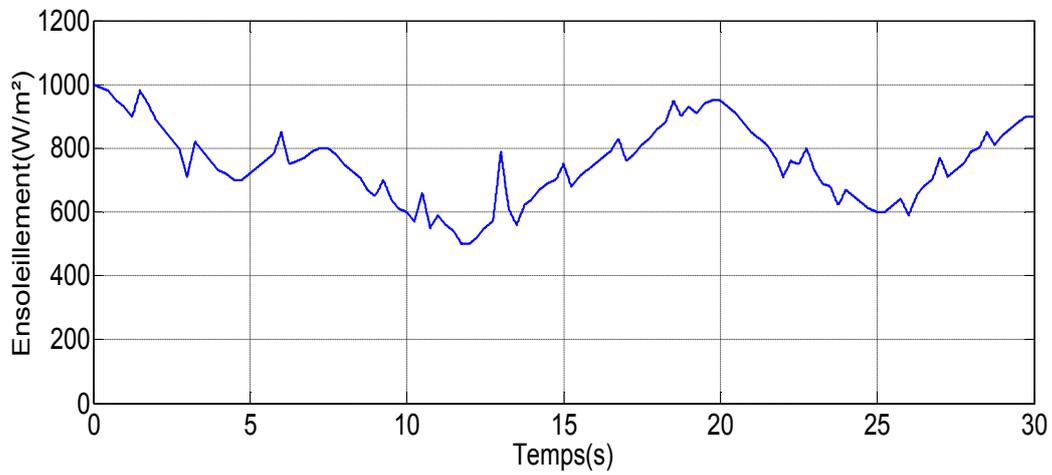


Figure (IV.22) : Allure du profile aléatoire d'ensoleillement $E_s=f(t)$

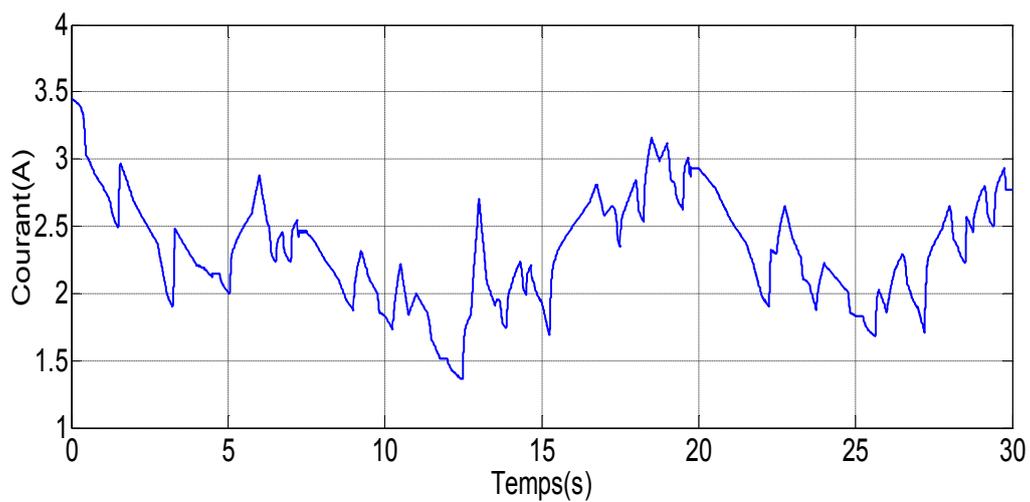


Figure (IV.23) : Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}=f(t)$

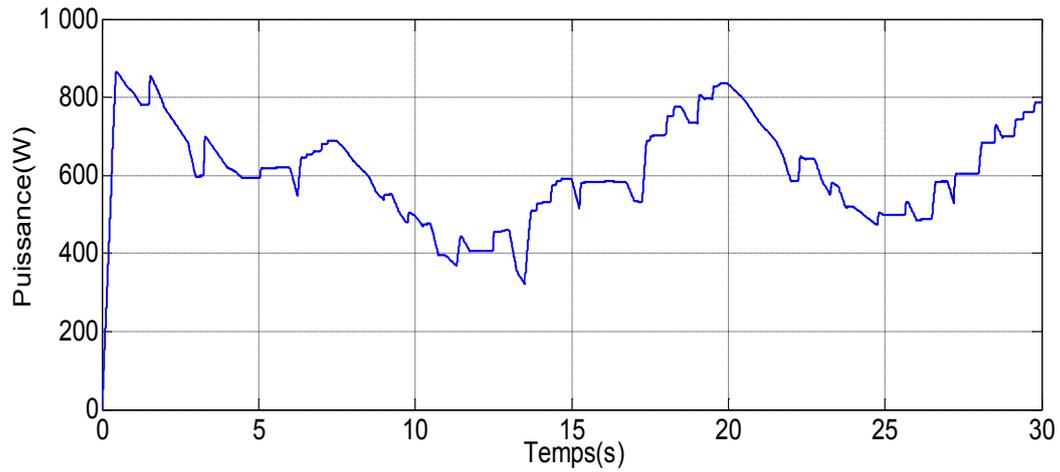


Figure (IV.24) : Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(t)$

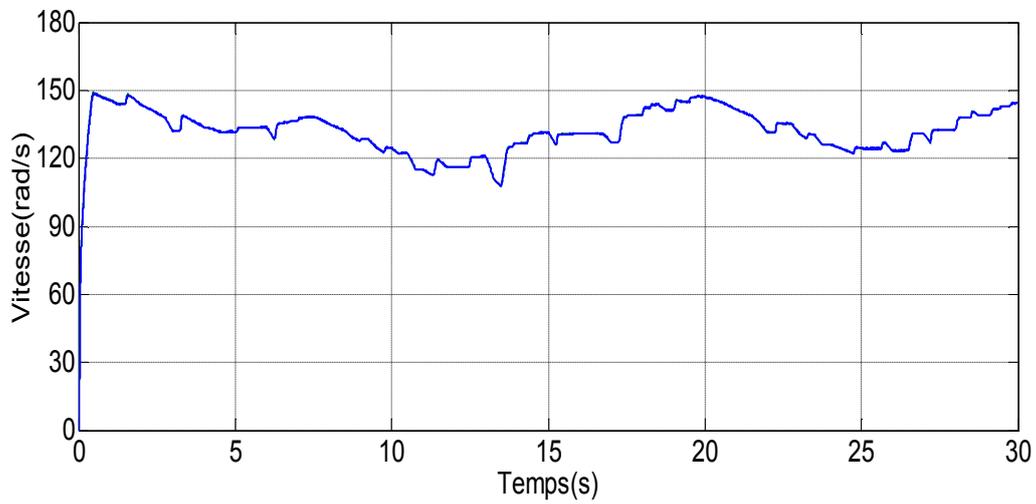


Figure (IV.25) : Allure de la vitesse $\Omega=f(t)$

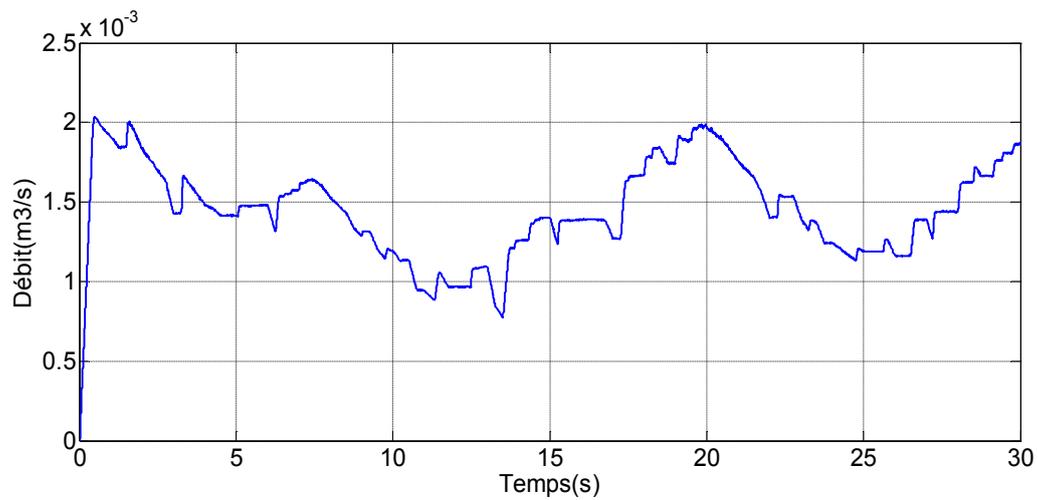


Figure (IV.26) : Allure du débit $Q=f(t)$

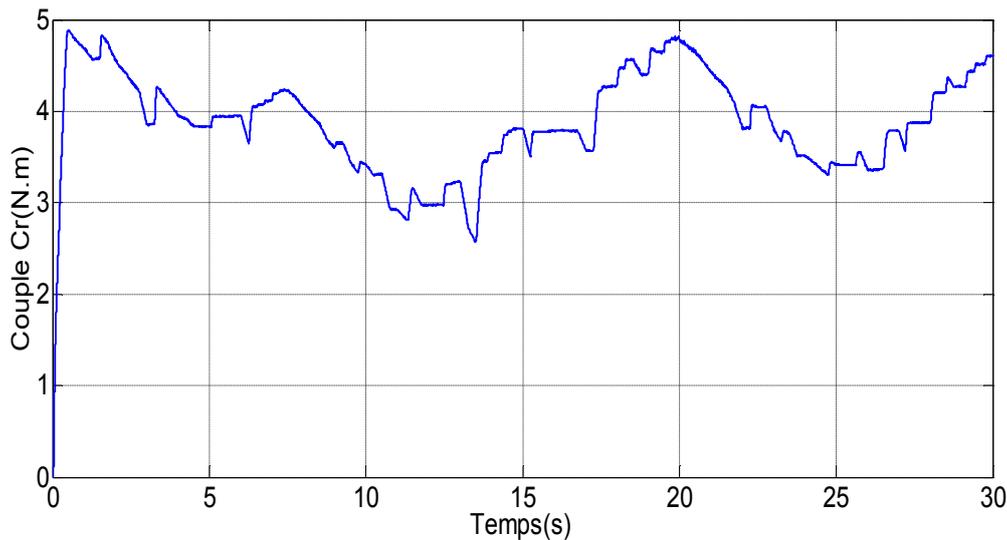


Figure (IV.27) : Allure du couple résistant $C_r=f(t)$

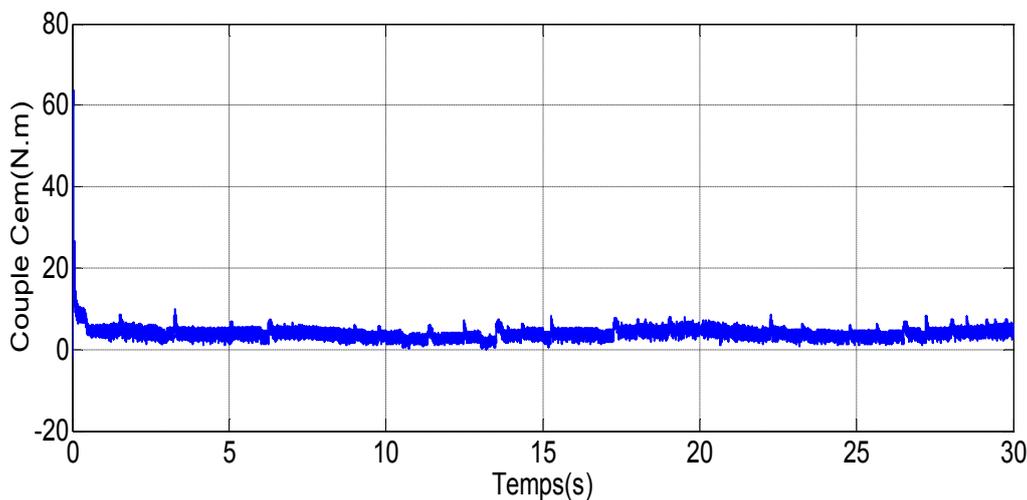


Figure (IV.28) : Allure du couple électromagnétique $C_{em}=f(t)$

- **Interprétation des résultats**

D'après les figures (IV.11), (IV.21), on voit clairement que la vitesse et le flux suivent les valeurs de référence, malgré la variation de l'éclairement.

On constate aussi que pour une variation de l'éclairement ($1000-500-800\text{W/m}^2$), les caractéristiques de $P_{pv}(t)$, $I_{sq}(t)$, $C_{em}(t)$, $I_{abc}(t)$ et $Q(t)$ subissent une variation instantanée. Alors que les valeurs du flux et du courant I_{sd} restent constante cela est dû au découplage entre le flux et le couple imposé par la commande vectorielle.

Les figures (IV.23), (IV.24), (IV.25), (IV.26), (IV.27), (IV.28) sont obtenues pour un profil d'ensoleillement aléatoire et cela montre que même pour un ensoleillement aléatoire les

allures du courant, puissance, vitesse, débit, couple résistant et le couple électromagnétique suivent les variations de l'éclairement.

Conclusion

Dans ce chapitre qui est consacré à la simulation (Matlab/Simulink), on a présenté une étude comparative entre deux méthodes pour la recherche de point de puissance maximale [Perturbation et observation et la conductance incrémentielle] sous des variations des conditions climatiques.

La méthode de la conductance incrémentielle présente des performances statique et dynamique bien meilleures que celle de la méthode perturbation et observation temps de réponse, l'erreur, et la robustesse aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Dans ce chapitre nous avons aussi établi la technique de la commande vectorielle ayant pour principe le découplage entre le couple et le flux les résultats de la simulation que nous avons présentés, montrent clairement la réalisation de ce découplage.

Cette commande, nous a permis de simplifier le modèle de la machine asynchrone et de rendre sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a été centrée sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. L'objectif principal était de trouver un algorithme de commande MPPT efficace et optimal permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque afin de répondre aux besoins en eau pour sites isolés.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque et les systèmes de pompage utilisant cette dernière comme source d'énergie et les différents types existant, tout on définissons chaque éléments de cette chaine. Nous avons aussi décrits les paramètres qui influent sur le fonctionnement de ces systèmes a la fin de ce chapitre nous avons porté notre choix sur le système a étudier et les composants qui le constitue.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différentes composantes du système de pompage photovoltaïque ou on a entamé une simulation d'un panneau photovoltaïque (a une diode) pour des différents ensoleillements et température a fin de tracé les différentes caractéristique.

L'optimisation et le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque à été le sujet du troisième chapitre, ou on présenté un dimensionnement de notre système afin d'avoir un bon fonctionnement de la chaine et de satisfaire la demande en eau.

Nous avons aussi décrit la nécessité une commande MPPT pour amené les générateurs photovoltaïques a fonctionné a leurs point maximal tout en présentons quelque différentes méthodes. Et dans le but d'améliorer les performances dynamique de la machine a synchrone, une commande vectorielle a flux rotorique orienté a été présenté.

La simulation du système de pompage photovoltaïque à été l'objet de quatrième chapitre ou nous avons effectué une étude comparative entre deux méthodes MPPT à savoir la méthode P&O et la méthode CI, par la comparaison de leurs performances statiques et dynamiques en simulons uniquement le système solaire. Les résultats obtenus ont montré que la méthode CI est meilleure que la P&O du point de vue temps de réponse, erreur, et robustesse aux variations climatique. Ce que nous à permis d'avoir un gain de puissance soit pour des conditions de fonctionnement stable ou variables.

En suite nous avons passé à la simulation du système globale on utilisons un profile d'éclairément variable et comme méthode d'optimisation la méthode la plus efficace qui est bien sur la CI, et pour la commande de la machine nous avons appliqué la commande vectorielle, ayant pour principe, le découplage entre le couple et le flux ce qui nous a permis de simplifier et d'offrir un certain découplage de la régulation du couple.

Et comme perspectives :

- ❖ Faire une des méthodes intelligentes comme le neuro-floue et logique floue
- ❖ Faire une comparaison entre ces méthodes et d'autres méthodes que celle que nous avons étudiée.

ANNEXE

ANNEXE

❖ Paramètres de la machine asynchrone [Bou 12]

La machine utilisée est une machine asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

Paramétrés	Valeurs
Puissance nominal P	746 W
Vitesse de rotation N	1433 tr/mn
Fréquence f	60Hz
Courant I	3.4 A
Couple électromagnétique Cem	5 N.m
Nombre de paire de pôles P	P=2
Inertie J	$3 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/m}^2$
Inductance mutuelle M	0.3439 H
Inductance cyclique statorique L_s	0.3676 H
Inductance cyclique rotorique L_r	0.3676 H
Résistance statorique R_s	4 Ω
Résistance rotorique R_r	1.143 Ω
Coefficient de frottement visqueux	0

❖ Paramètres de la pompe centrifuge [Bou 12]

Paramétrés	Valeurs
Constante C_1	$4.9234 \cdot 10^{-3} \text{ m/ (rad/sec)}^2$
Constante C_1	$1.5826 \cdot 10^{-5} \text{ m/ (rad/sec)}^2$
Constante C_1	$-18144 \text{ m/ (rad/sec)}^2$
Hauteur manométrique H	10 m
Coefficient des pertes de charge dans la canalisation	0.036 m
Coefficient des pertes de charge locales ou singulière	6.3 m
Diamètre de la canalisation d	0.06 m
Longueur de la canalisation L	7.4 m
La gravitation g	9
Vitesse nominale ω_n	150 rad/s

❖ Correcteur paramètres PI (vitesse, flux):

$$K_{iv} = 3.92$$

$$K_{pv} = 0.2$$

$$K_i \phi = 50$$

$$K_p \phi = 2.73$$

Résumé

Le processus étudié dans ce papier est un système de pompage au fil de soleil, tel que le stockage s'effectue indirectement sous forme d'eau dans un réservoir. La pompe centrifuge est entraînée par un moteur asynchrone à travers un onduleur de tension triphasé.

La technique de la Commande Vectorielle Indirecte par orientation de Flux Rotorique est utilisée afin de réaliser les régulations de vitesse et du courant statorique.

Pour améliorer le rendement énergétique de ce système, nous avons adopté la technique de la conductance incrémentielle, afin de maximiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque.

Abstract

The process studied in this paper is a pumping system in the course of the sun, such that the storage is carried out indirectly as a water reservoir. The centrifugal pump is driven by an asynchronous motor via a three-phase voltage inverter.

The technique of control orientation by Vector Indirect Flow rotor is used to achieve the regulation of speed and stator current.

To improve the efficiency of this system, we adopted the technique of incremental conductance, to maximize the power output of the PV generator.