

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

BEGGARI Abdelmajid

BOUALLATI Aissa

Thème :

**Etude et simulation des techniques de poursuite du
point de puissance maximale dans un système de
pompage photovoltaïque**

Devant le jury :

REZOUG Med Redha

MCB

Président

UKM Ouargla

BELKBIR Amel

MAA

Examineur

UKM Ouargla

TAIBI Djamel

MAA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

REHOUMA Youssef

Doctorant

Co-Encadreur

UKM Ouargla

Année Universitaire :2020/2021

REMERCIEMENTS

Avant tout, Je remercie ALLAH, Tout-Puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de faire ce travail.

Nous remercions nos encadrateurs, Mr. Taïbi Djamel et Mr. Rehouma Youssef pour avoir proposé un sujet intéressant, nous font bénéficier de leurs connaissances et de leurs qualités professionnelles et humanitaires.

Nos remerciements respectables à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à nos travaux, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué à l'aide de près ou de loin pour le bon déroulement de ce travail pour en arriver là.

Enfin, nous remercions tous les professeurs et la direction qui ont contribué à notre formation universitaire.

Dédicace

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis,

B. A. Elmajid chère amie avant d'être mon binôme

A vous chers lecteurs

Dédicace

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis du quartier El mouallemine et

A. Maammar, A. Farouk et B. Farid

B. Aïssa chère amie avant d'être mon binôme

A vous chers lecteurs

Liste des figures	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralités sur le pompage Photovoltaïque à basé du moteur à courant continu		
Fig.I.1:	Principe de l'opération de pompage.	3
Fig.I.2:	Exemple de pompe à motricité Humaine	4
Fig.I.3:	Exemple de pompe à traction animale (utilisation beufs).	4
Fig.I.4:	Schéma d'une pompe centrifuge.	6
Fig.I.5:	Schéma de configuration de pompage.	7
Fig.I.6:	Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (présence d'une jonction PN).	8
Fig.I.7:	Panneau solaire photovoltaïque	8
Fig.I.8:	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	9
Fig.I.9:	Convertisseur DC/DC.	10
CHAPITRE II : Les techniques de suivi du point de puissance maximale MPPT		
Fig.II.1:	Structure du système de pompage photovoltaïque.	13
Fig.II.2:	Circuit électrique réel du module PV.	14
Fig.II.3:	Caractéristiques (I-V) et (P-V) à un éclairement 1000w/m ² et températures 25°C	17
Fig.II.4:	Caractéristiques (I-V) et (P-V) à un éclairement différents et température 25°C	17
Fig.II.5:	Caractéristiques (I-V) et (P-V) à un éclairement 1000w/m ² et différentes températures	18
Fig.II.6:	Schéma de base d'un hacheur série	18
Fig.II.7:	Schéma équivalent d'un hacheur série au temps de fermeture de l'interrupteur.	19
Fig.II.8:	Forme de d'onde de courant et de tension de la bobine en mode de conduction continue	19

Fig.II.9:	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT	20
Fig.II.10:	Recherche du PPM par la méthode P&O	21
Fig.II.11:	Organigramme de la méthode P&O	22
Fig.II.12:	Recherche du PPM par la méthode INC	24
Fig.II.13:	Organigramme de la méthode INC	25
Fig.II.14:	Modèle de circuit pour PMDC à courant continu avec charge de pompe	26
CHAPITRE III : Simulation des techniques suivi du point de puissance maximale pour le système de pompage photovoltaïque		
Fig.III.1:	Schéma block sous Simulink du système global	30
Fig.III.2:	Création d'un hacheur dévolteur sous MATLAB/SIMULINK	31
Fig.III.3:	Schéma de block, simulation du moteur	31
Fig.III.4:	Schéma de block, simulation du pompe	32
Fig.III.5:	Schéma de block de la commande MPPT (P&O).	33
Fig.III.6:	Schéma de block de la commande MPPT (INC).	33
Fig.III.7:	Structure de commande du régulateur PI	34
Fig.III.8:	Courbes des puissances de différentes valeur de Δw (P&O)	36
Fig.III.9:	Courbes des puissance de différentes valeur de Δw (INC)	37
Fig.III.10:	La variation de irradiation (W/m^2)	38
Fig.III.11:	Courbe de l'ensemble Pvp (P&O, INC)	38
Fig.III.12:	Courbe de l'ensemble Wm (P&O, INC)	39
Fig.III.13:	La variation de température °C	40
Fig.III.14:	Courbe de l'ensemble Pvp (P&O, INC)	40
Fig.III.15:	Courbe de l'ensemble Wm (P&O, INC)	51

Liste des tableaux		
Tableau	Titre	Page
CHAPITRE II :	Les techniques de suivi du point de puissance maximale MPPT	
Tab .II.1 :	Paramètres du panneau P-240W	16
CHAPITRE III :	Simulation des techniques suivi du point de puissance maximale pour le système de pompage photovoltaïque	
Tab .III.1:	Paramètre de convertisseur DC/DC Buck	31
Tab .III.2 :	Paramètres du moteur et pompe.	32
Tab .III.3 :	Comparaison entre les algorithmes (P&O, INC)	42

Liste des Symboles		
Symboles	Nomination	Unité
I	Courant	(A)
I _{ph}	Le photo-courant	(A)
I _{cc}	Le courant de court-circuit	(A)
I _D	Le courant de diode	(A)
I _{pv}	Le courant de panneau photovoltaïque	(A)
I _s	Courant de sortie du convertisseur	(A)
I _{MPP}	Courant au point de puissance maximale	(A)
I _a	Courant de l'induit	(A)
V	Tension	(V)
V _{PV}	Tension de panneau photovoltaïque	(V)
V _{ref}	Tension de référence	(V)
V _s	Tension de sortie du convertisseur	(V)
V _{MPP}	Tension au MPP	(V)
V _{co}	Tension de circuit ouvert	(V)
R _s	Résistance série	(Ω)
R _p	Résistance parallèle	(Ω)
Q	Charge électrique	(1.6 × 10 ⁻¹⁹ C)
K	Constante de BoltZman	1,381.10-23 j/K
α	Rapport cyclique	
L	Inductance de hacheur	(H)
C	Capacité de hacheur	(F)
P	Puissance	(W)
P _{MAX}	Puissance maximale d'un GPV	(W)
P _{MPP}	Puissance au point de puissance maximale	(W)
f _e	La fréquence	(Hz)
E	Eclairement	(W/m ²)
T	Température	(°C)

LISTE DES SYMBOLES

FF	Facteur de forme	
J	Inertie	(Kg/m ²)
Ce	Couple du moteur	(N)
Kp	Constante de proportionnalité	
Ki	Constante d'intégration ou gain intégral	
Wm	Vitesse du moteur	(Tr/min)
τ	Constant de temps	
C _p	Fonction de transfert du régulateur	
$\varepsilon(p)$	Erreur	
S(p)	Grandeur de sortie	
E(p)	Grandeur d'entrée	

Listes des abréviations	
Abréviation	Nomination
GPV	Générateur photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
PPM	Point de Puissance Maximale.
MPPT	Maximum power point tracking
DC	Courant continue
DC/DC	Continue / Continue
DC/AC	Continue / Alternatif
P&O	Perturbation et Observation.
INC	Incrémentation de conductance.
PMDC	Moteur à courant continu à aimant permanent.
E	Eclairage
MCC	Moteur à courant continu
ΔW	Le pas de variation de la vitesse de référence
K	Constante de proportionnalité
MOSFET	Insulated-gate bipolar transistor
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension

Sommaire

REMERCIEMENTS	
DEDICACE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES SYMBOLES	
LISTES DES ABREVIATIONS	
SOMMAIRE	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I :	2
INTRODUCTION	3
I.1. SYSTEME DE POMPAGE	3
I.1.1. Le pompage traditionnel.....	4
A) Pompe à motricité humaine	4
B) Pompe à motricité animale	4
I.1.2. Le pompage motorisé	5
A) Pompe volumétrique.....	5
B) Pompe centrifuge.....	6
I.2. POMPAGE SOLAIRE	6
I.2.1. Principe	6
I.2.2. Configuration générale	7
I.2.2.1. Les panneaux solaires photovoltaïques	7
I.2.2.2. Les convertisseurs statiques	9
I.3. MOTEUR A COURANT CONTINU.....	10
I.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU SYSTEME DU POMPAGE SOLAIRE	
[2]	10
I.5. CONCLUSION	11
CHAPITRE II :	12
INTRODUCTION	13
II.1. MODELISATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE	13
II.1.1. Modèles du module photovoltaïque	13
II.1.2. Modèle réel de cellule PV	14
II.2. PARAMETRES ELECTRIQUES DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	15
II.3. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU MODULE PV	16
II.3.1. Influence de l'éclairement	17
II.3. 2. Influence de la température	18
II.4. LE CONVERTISSEUR STATIQUE (DC-DC)	18
II.4.1. Hacheur série	18

II.5. COMMANDE MPPT	20
II.6. LES ALGORITHMES MPPT	21
II.6.1. Algorithme MPPT Perturbe & Observe (P&O)	21
II.6.2. Algorithme MPPT de l'incrémentation de la Conductance (INC)	22
II.7. MOTEUR A COURANT CONTINU ET POMPE :	25
II.7.1. Modélisation du moteur PMDC :	26
II.8. CONCLUSION	28
CHAPITRE III :	29
INTRODUCTION	30
III.1. SIMULATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE	30
III.1.2. Simulation du convertisseur dévolteur	30
III.1.3. Simulation du groupe moteur-pompe	31
III.1.4. Simulation des algorithmes MPPT	32
III.2. REGULATEUR DE VITESSE PI	33
III.2.1. Structure de la commande PI	33
III.2.2. La Méthode de placement des pôles [18]	34
III.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	35
III.3.1. Simulation des commandes MPPT	35
III.3.1.1. Algorithme P&O	35
III.3.1.2. Algorithme INC	36
III.3.1.3. Groupe moteur-pompe	37
III.3.2. Comparaison entre les algorithmes (P&O et INC)	41
III.4. CONCLUSION	42
CONCLUSION GENERALE	43
REFERENCES	
Résumé	

Introduction Générale

Aujourd'hui, l'utilisation des énergies renouvelables représente l'une des solutions les plus pertinentes dans divers secteurs, elles prennent de plus en plus d'importance tant dans l'action sociale que dans divers domaines de la vie humaine. Leur caractère inépuisable, varié et propre en fait une énergie remplacement durable. Contrairement aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), les énergies renouvelables sont écologiques et respectueuses de l'environnement. Son champ d'action s'élargit de jour en jour et intègre de plus en plus d'aspects différents de la vie humaine. [1]

L'énergie solaire semble l'énergie la plus accessible aux populations grâce à sa disponibilité partout sur terre même si c'est à des niveaux différents. Sa popularité vient de la facilité de transformation du rayonnement solaire en énergie électrique, du non complexité des systèmes à mettre en œuvre et de la souplesse dans le choix du niveau d'énergie à installer pour une grande gamme d'applications.[1]

L'une des meilleures utilisations de l'énergie solaire est dans l'agriculture. Non seulement sur le plan écologique, technique ou économique, mais aussi sur ce que cette technologie offre comme garantie pour l'approvisionnement énergétique d'un secteur vital de l'humanité.

Cet usage devient plus important lorsque l'on pense au monde rural et aux difficultés d'approvisionnement en électricité des réseaux publics, notamment en milieu rural.

Dans le travail que nous présentons dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la simulation d'un système de pompage solaire utilisant un groupe motopompe à courant continu de faible puissance.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons expose les généralités sur le pompage photovoltaïque à base du moteur à courant continu.
- Le second chapitre présente les techniques de suivi du point de puissance maximale MPPT.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons la simulation des techniques de suivi du point de puissance maximale pour le système de pompage photovoltaïque.
- Finalement, une conclusion générale clôture ce travail avec quelques propositions et perspectives future de ce travail.

CHAPITRE I :

Généralités sur le pompage photovoltaïque à base du moteur à courant continu

Introduction

Fonctionnant au “fil du soleil”, le pompage est sans doute l’une des plus pertinentes utilisations de l’énergie solaire photovoltaïque. L’évolution progressive, depuis 20 ans, du matériel et des gammes de performances permet aujourd’hui de considérer le pompage solaire comme une technologie mature. Dans le secteur agricole, cette technique a pu aider à dépasser certains problèmes surtout ceux liées à l’approvisionnement en carburant ou au raccordement avec un réseau électrique publique. [1]

L’action du pompage en elle-même, existe depuis l’antiquité avec des techniques diverses. Avec l’évolution du temps, Ces techniques se sont bien développées jusqu’à arriver à l’exploitation de l’énergie solaire à nos jours. Nous présentons dans ce qui suit quelques points de repère quant à cette évolution.

I.1. Système de pompage

Le pompage c’est faire couler un fluide d’un endroit à un autre par l’utilisation d’un système non manuel soit pour des raisons d’accessibilité ou pour des raisons de débit. La figure ci-dessous donne le principe de l’opération :

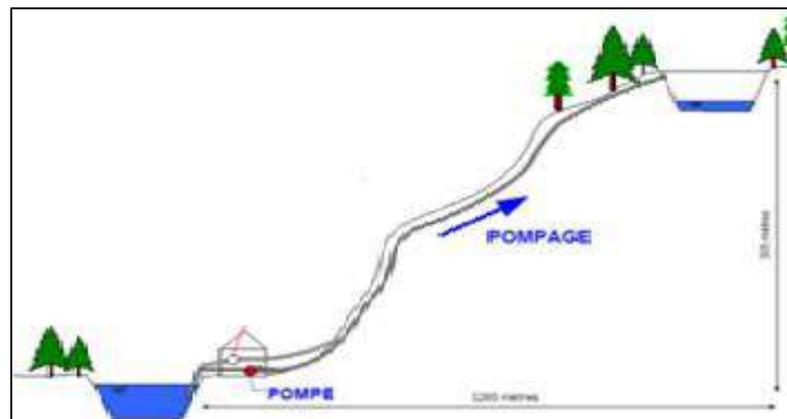


Figure I.1: Principe de l’opération de pompage

Globalement, on peut résumer l’action de pompage en deux catégories :

- Le pompage traditionnel.

- Le pompage motorisé.

I.1.1. Pompage traditionnel

Le pompage traditionnel se base souvent sur une motricité soit humaine, soit animale soit à force naturelle :

A) Pompe à motricité humaine

Il existe plusieurs types de pompes à main en fonction de la transmission hydraulique utilisée (Rotor, diaphragme, aspirante, refoulant), et de la partie commande (manuelle ou simple).

Le principal avantage des pompes à motricité humaine est que celles-ci constituent l'une des solutions les plus économiques et les plus simples pour assurer un approvisionnement en eau potable dans les zones rurales mais aussi dans les milieux périurbains.

Le principal inconvénient est qu'ils ont de faibles débits, difficile à entretenir et nécessitent un effort physique important pour pomper. [2]

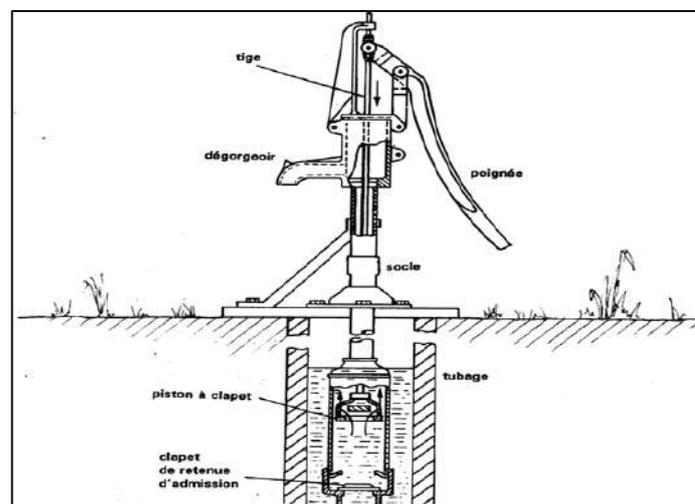


Figure I.2 : Pompe à motricité humaine

B) Pompe à motricité animale

Ce procédé est essentiellement orienté vers l'exploitation agricole qui a besoin de beaucoup d'eau. Pour se faire, l'agriculteur fait appel à la force que peuvent développer les animaux qu'il possède (chameaux, bœufs, mules, ...).

C'est une technique particulièrement utilisée dans les pays arides où l'eau pompée produite est souvent ne convient pas à la consommation humaine. [2]

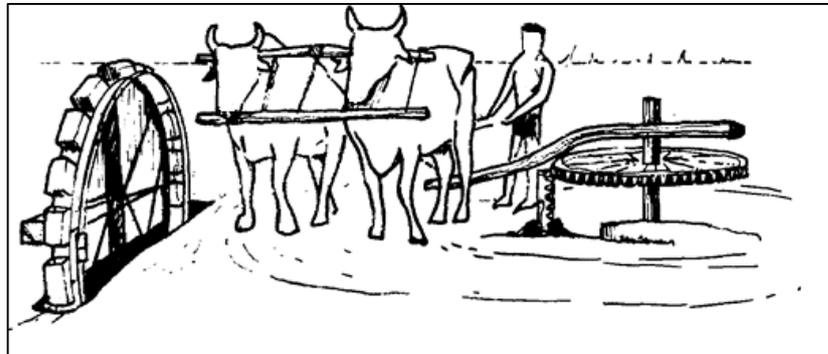


Figure I.3 : Pompe à traction animale (utilisation de bœufs)

I.1.2. Pompage motorisé

C'est le pompage qui fait appel aux techniques et procédés modernes où la pompe est entraînée par un moteur. L'action de pomper est obtenue par divers méthodes et les pompes sont appelées selon la méthode utilisée. On parle souvent de pompes volumétriques et de pompes centrifuges.

A) Pompe volumétrique

La pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe complètement fermé, dans lequel se déplace un élément mobile strictement réglé. Leur fonctionnement repose sur les principes suivants :

- Exécution d'un mouvement cyclique.
- Pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin. [3]

B) Pompe centrifuge

Une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe du liquide en le forçant à travers une roue à aubes ou une hélice appelée turbine (turbine). C'est le type de pompe industrielle le plus courant. Lorsque la roue tourne, le fluide est introduit axialement dans la pompe puis refoulé tangentiellement. [3]

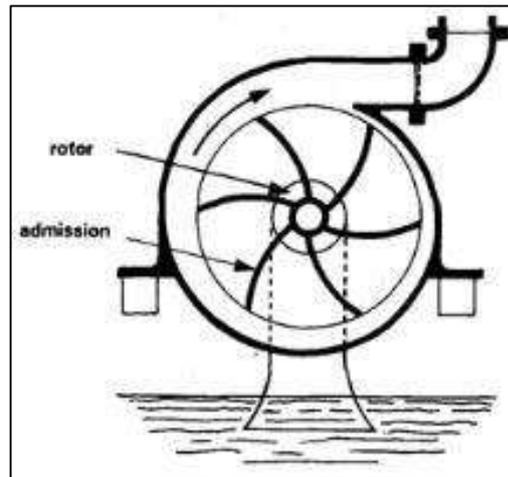


Figure I.4: Schéma d'une pompe centrifuge.

I.2. Pompes solaires

Les pompes solaires peuvent être composées de plusieurs technologies différentes, volumétriques (Shurflo), centrifuges ou à vis (Lorentz) et à des fins diverses, telles que le pompage de surface (étangs, lacs, rivières, réservoirs d'eau) et le pompage sous-marin (puits, forages). [3]

I.2.1. Principe

L'effet de pompage est toujours le même que dans tous les autres processus. Cependant, le pompage est classé comme solaire si la source d'énergie est allumée lorsque le système démarre. Conversion du rayonnement solaire en électricité. Cela nécessite évidemment une configuration très spéciale.

I.2.2. Configuration générale

Le système de pompage solaire, comme la montre la figure ci-dessous, comporte quatre parties :

- Les panneaux solaires photovoltaïques.
- Les convertisseurs statiques.
- Le groupe motopompe.
- Le réservoir.

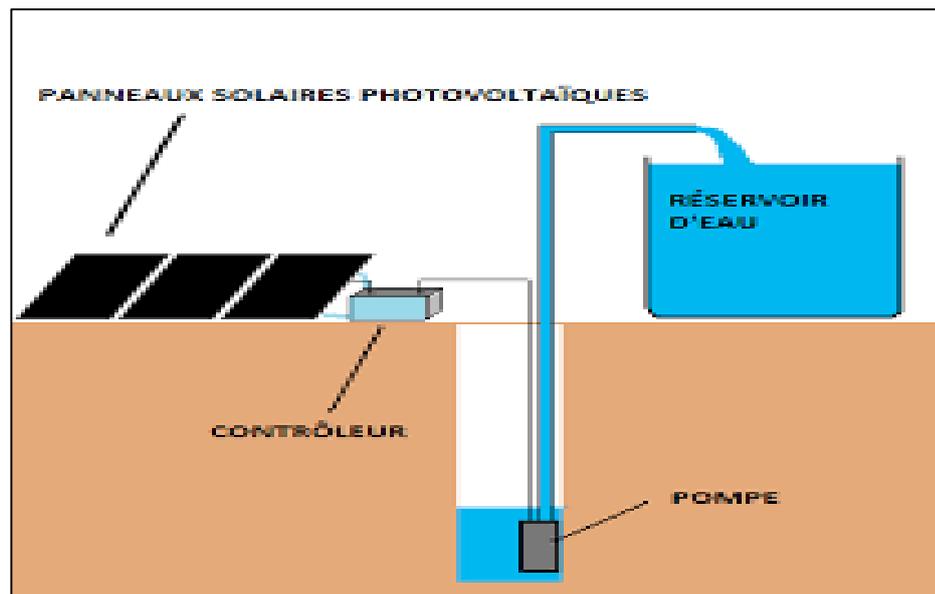


Figure I.5: Schéma de configuration de pompage. [3]

I.2.2.1. Les panneaux solaires photovoltaïques

A) Présentation

Les panneaux solaires photovoltaïques transforment le rayonnement solaire en électricité par effet photoélectrique. Ils sont donc les plus répandus mais aussi les plus complexes.

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur). Une couche dopée avec le Bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (dopage P).

Une couche dopée avec le phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (dopage N).

Lorsqu'un photon de la lumière arrive sur la cellule, son énergie permet de libérer des électrons de leur atome de silicium et c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

Les atomes chargés positivement vont alors dans la zone P et celles chargés négativement vont dans la zone N et une différence de potentiel est ainsi créée engendrant un courant électrique si le circuit est fermé. La figure (I.6) ci-dessous donne le principe de cette opération [4] :

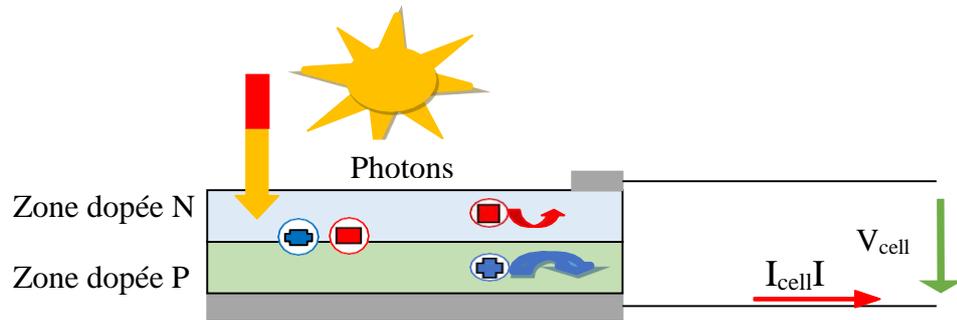


Figure I.6: Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (présence d'une jonction PN).

Selon la structure du semi-conducteur, il existe trois types des cellules photovoltaïques :

- Les cellules monocristallines : Ce type de cellule possède un rendement très bon (de 15 à 22%) mais son coût de fabrication est élevé.
- Les cellules poly cristallines : Elles sont moins chères à fabriquer mais leur rendement est un peu moins bon (10 à 13%).
- Les cellules amorphes : leur coût est très faible mais le rendement -l'a aussi (5 à 10%).



Figure I.7 : Panneau solaire photovoltaïque.

B) Caractéristique

Les caractéristiques de base du module photovoltaïque pour un certain éclairement et température ne déterminent pas le courant ou la tension de fonctionnement, seule la courbe I (V) est fixe. La valeur de la charge aux bornes du module détermine le point de fonctionnement de l'installation photovoltaïque. La figure (1.8) représente trois zones essentielles. [5]

- La zone (1) : Où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le module photovoltaïque fonctionne comme une source du courant.
- La zone (2) : Correspondant au coude de la caractéristique, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du module, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- La zone (3) : Qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le module est assimilable à une source de tension. [6]

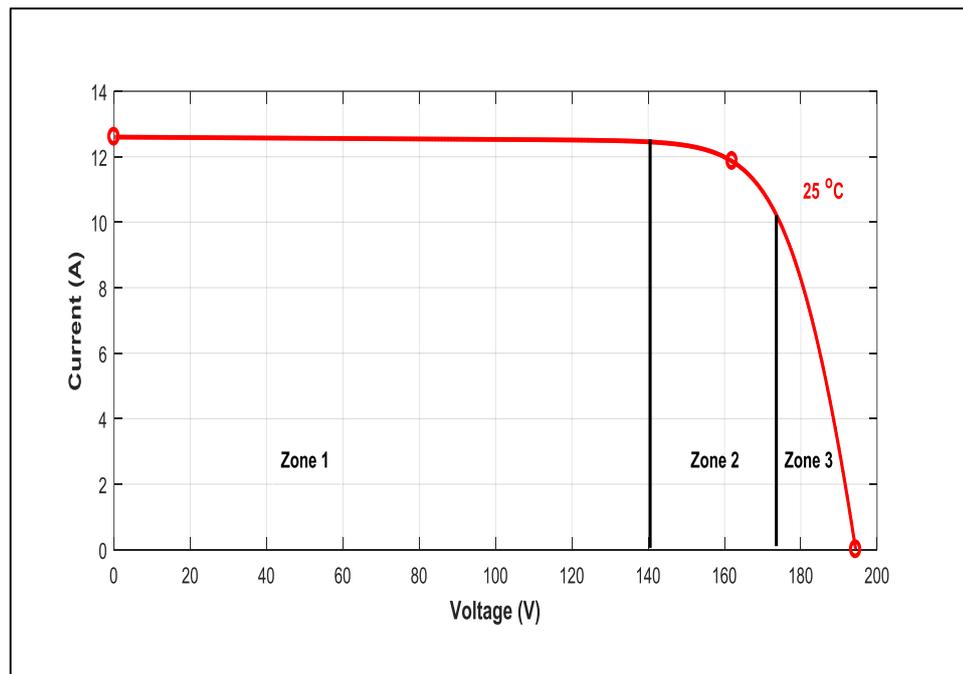


Figure I.8: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

I.2.2.2. Convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un montage qui utilise des commutateurs à semi-conducteurs. Permettant, par une commande appropriée de celui-ci, de réguler le transfert d'énergie entre une

source d'entrée et une source de sortie. Ils sont classés selon la forme des signaux d'entrées et de sorties. On distingue :

A) Hacheurs

Le convertisseur DC-DC (Hacheur) est un montage électronique pour contrôler et modifier la valeur de tension d'une source de tension continue.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (abaisseur ou Buck). Dans le cas contraire, il est un survolteur (élevateur ou Boost).

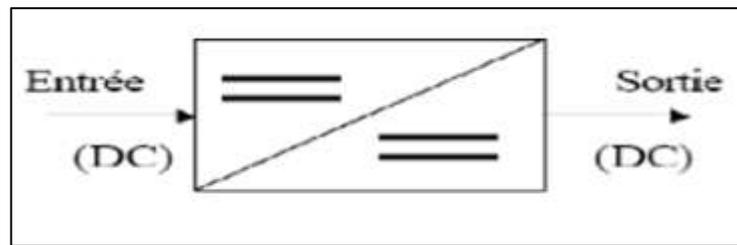


Figure I.9: Convertisseur DC/DC.

I.3. Moteur à courant continu

L'un des inconvénients majeurs des systèmes photovoltaïques réside dans les pénuries permanentes de l'énergie solaire, qui est dû aux diverses raisons. On dénote, l'apport périodique de l'énergie solaire (alternances jour/nuit, été/hiver) et l'effet météorologique aléatoire, la durée d'ensoleillement qui est subordonnée aux différentes saisons (position du soleil par rapport au zénith), ...etc. [6]

De nombreux types de moteur existent (moteur à cage, à rotor bobiner, à aimant permanent...), toutefois un des plus anciens et des plus couramment utilisés dans le système de pompage est le moteur à courant continu. Celui-ci subit des perfectionnements constants pour améliorer ses performances en vue de l'utilisation la mieux adaptée au photovoltaïque.

Dans notre travail on utilise un moteur à courant continu qui serve comme une charge électrique alimentée par un système photovoltaïque PV pour une application de pompage photovoltaïque.

I.4. Avantages et inconvénients du système du pompage solaire [2]

Le système de pompage solaire possède des avantages et des inconvénients.

✓ Avantages

Le système du pompage solaire a plusieurs avantages tels que :

- Les pompes fonctionnent grâce à une énergie renouvelable propre, abondante et gratuite.
- Le coût d'entretien des panneaux solaires d'une durée de vie d'au moins vingt ans est quasiment nul.
- L'installation de la totalité du système avec ces différentes configurations est facile.
- Les systèmes de pompage sont fiables et économiquement rentables sur le long terme.

✓ **Inconvénients**

Le système du pompage solaire a plusieurs inconvénients comme :

- Le coût de l'investissement est élevé (mais il aura probablement tendance à diminuer dans l'avenir).
- L'installation nécessite des recherches préalables précises et des experts.
- Le rendement de ces pompes varie en fonction de l'importance de l'ensoleillement, de l'angle d'exposition des panneaux et de la température ambiante.

I.5. Conclusion

Les systèmes du pompage solaire font actuellement une révolution technologique dans le monde entier puisqu' ils servent à dépasser plusieurs problèmes liés à la recherche des sources d'énergies, Au fil des énergies renouvelables comme le soleil, la population soit plus consciente de chercher à user des profils moins chers et plus performants à leurs quotidiens.

CHAPITRE II :

Les techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT)

Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système de pompage photovoltaïque, nous procédons à la modélisation du système. La modélisation nécessite une série d'équations qui caractérisent tous les éléments du système à étudié.

A ce niveau, les paramètres de chaque modèle doivent être déterminés afin d'arriver à des résultats qui se rapprochent du modèle réel. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur l'élaboration du modèle pour chacune des composantes du système.

Dans ce chapitre, nous présentons les modèles mathématiques des différents composants de notre système, qui comprend (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC et machine MCC et pompe centrifuge).

II.1. Modélisation du système de pompage photovoltaïque

Le système à modélisé est représenté sur la Figure II.1.

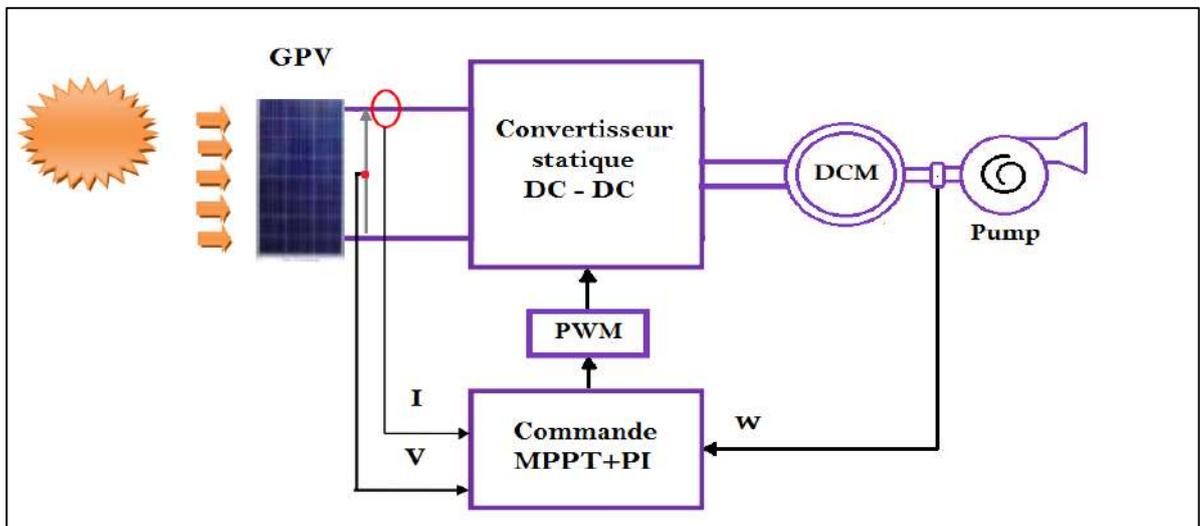


Figure II.1: Structure du système de pompage photovoltaïque.

II.1.1. Modèles du module photovoltaïque

Afin de développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire des choix judicieux des circuits électriques qui la composent et de comprendre la configuration physique et les propriétés électriques des éléments de la cellule. Pour cela, un modèle

mathématique réel est donné pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. [1]

II.1.2. Modèle réel de cellule PV

La figure (II.2) représente le schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque réel. Où R_s représente les pertes de contact entre les cellules et R_{sh} représente les courants de fuite par la résistance en parallèle. [8]

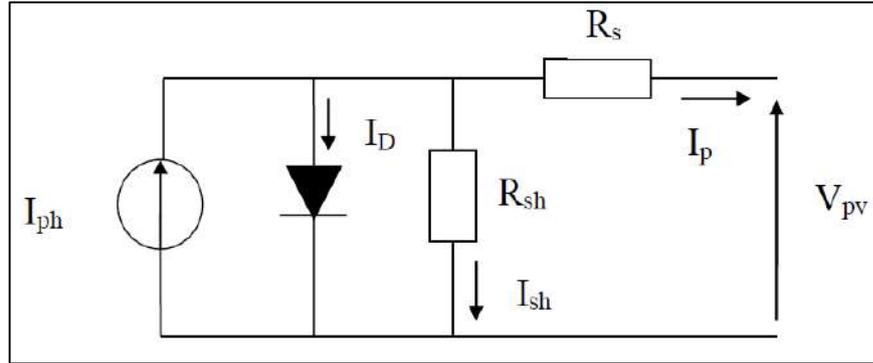


Fig.II.2 : Circuit électrique réel du module PV.

Le courant généré par le module PV est donné par la loi de Kirchoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (II.1)$$

$$I_{ph} = I_{cc}(1 + \alpha (T - T_0)) \quad (II.2)$$

$$I_D = I_0 \left(e^{q \frac{V_{pv} - R_s I}{A.K.T_c}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} - R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{q \frac{V_{pv} - R_s I}{A.K.T_c}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} - R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

Où :

I_{pv} est le courant fourni par le module PV,

K est la constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ joule/Kelvin),

q est la charge d'électron égale $1,602.10^{-19}$ C,

T est la température du module PV en kelvin

A est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).

II.2. Paramètres électriques du module photovoltaïque

Les différents paramètres caractérisant un module photovoltaïque sont la tension de circuit ouvert, courant de court-circuit, puissance maximale, facteur de forme et rendement. Ils sont extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différents modules éclairés dans des conditions identiques. [9]

❖ Tension de circuit ouvert (V_{oc})

Si on place un module sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant, on obtient à ses bornes une tension maximale continue, dite tension à circuit ouvert V_{oc} .

$$V_{oc} = N_s 0.6 \text{ v} \quad (\text{II.6})$$

Où 0.6 v est la tension pour une cellule PV élémentaire et N_s est le nombre de cellules en série. On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du module PV.

❖ Courant de court-circuit (I_{cc})

Lorsque le module PV est en court-circuit, il délivre son courant maximum à tension nulle. On dit courant de court-circuit I_{cc} . Sa valeur est déterminée en connectant un ampèremètre aux bornes du module.

❖ Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par un module photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes du module). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) de la courbe Courant-Tension.

$$P_{max} = I_{opt} V_{opt} \quad (\text{II.7})$$

❖ Facteur de forme

On appelle facteur de forme ff le rapport entre la puissance maximale fournie par le module PV P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{oc} .

$$ff = \frac{I_{opt}V_{opt}}{V_{oc}I_{cc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{cc}} \quad (II.8)$$

Le facteur de forme indique la qualité du module ; plus, il s'approche de l'unité plus le module est performant, Il est de l'ordre de 0.7 pour les modules performants ; et diminue avec la température. [10]

❖ Rendement

Le rendement énergétique d'un module PV est le rapport entre la puissance électrique Maximale fournie par le module P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \quad (II.9)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale du module Pv. Ce Paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.3. Caractéristiques électriques du module PV

À partir des notices techniques fournies par le constructeur, nous avons déterminé les paramètres du panneau choisi, lesquels nous avons reporté dans le Tableau (Tab.II.1).

Tab.II.1 : Paramètres du panneau P-240W

Puissance maximal	P_{max}	240	W
Tension à point maximal	V_{pm}	40.5	V
Courant à puissance maximal	I_{pm}	5.93	A
Tension en circuit ouvert	V_{co}	48.6	V
Courant de court-circuit	I_{cc}	6.30	A

Les caractéristiques Courant-Tension et Puissance- Tension Pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ de notre module sont données par la figure II.3.

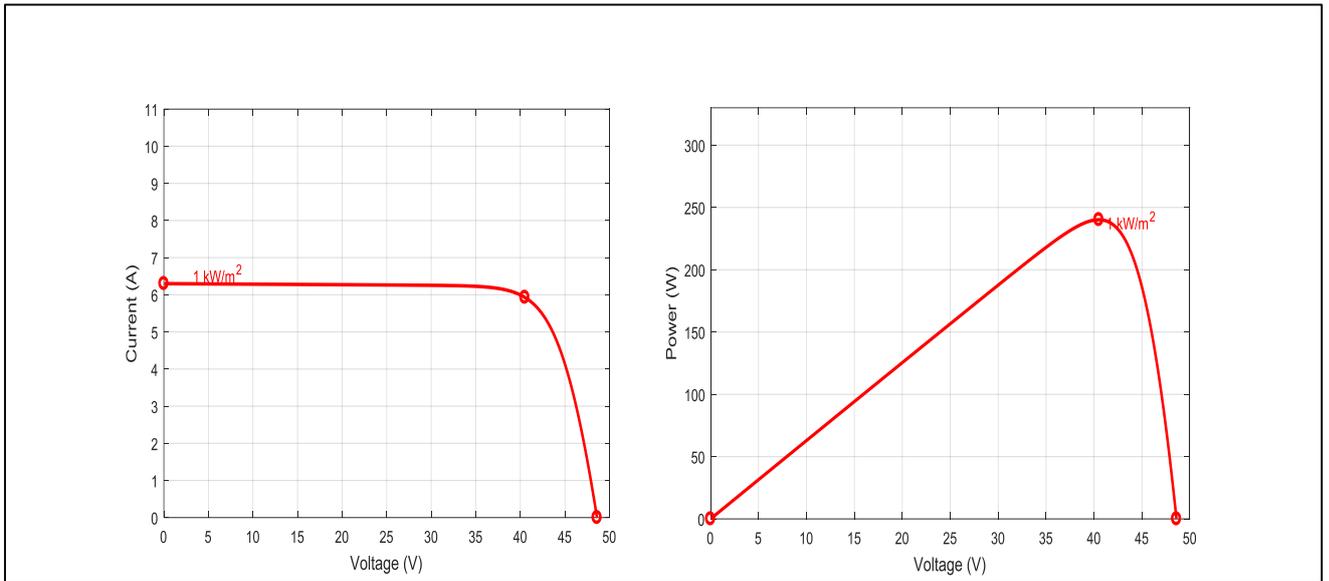


Figure II.3: Caractéristiques (I-V) et (P-V) à un éclairement $1000\text{w}/\text{m}^2$ et une temp 25°C .

II.3.1. Influence de l'éclairement

La figure (II.4) montre les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque, pour différentes valeurs d'éclairement, à une température constante de 25°C .

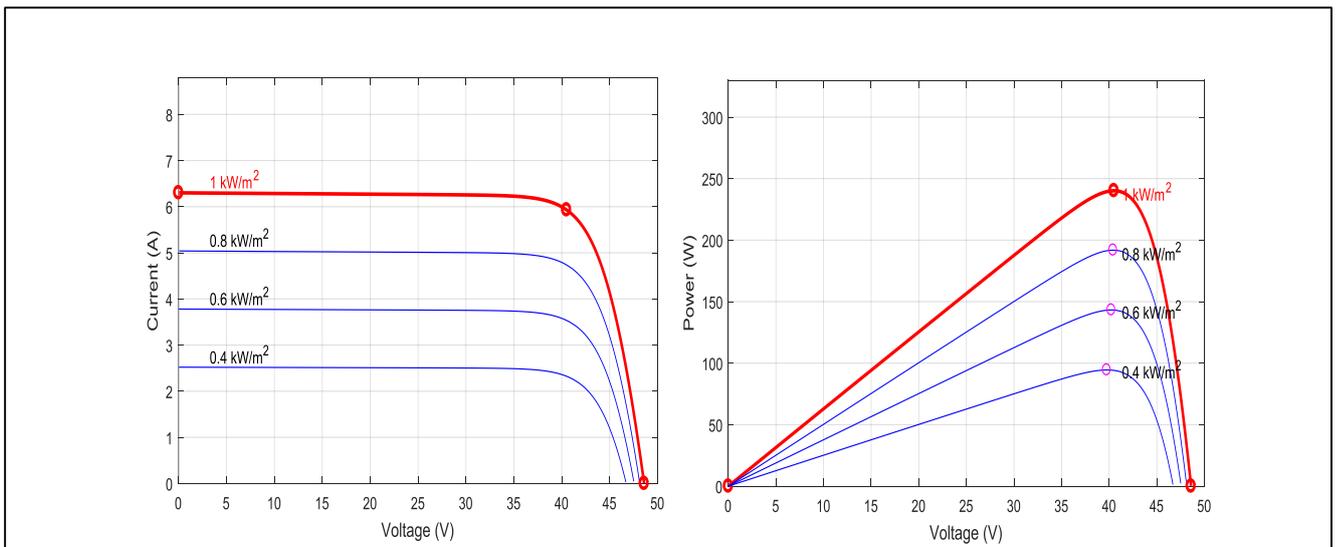


Figure II.4 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) à un éclairement différent et temp 25°C

II.3. 2. Influence de la température

La figure (II.5) montre les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque, à une valeur d'éclairement constante 1000w/m^2 pour différentes valeurs de température.

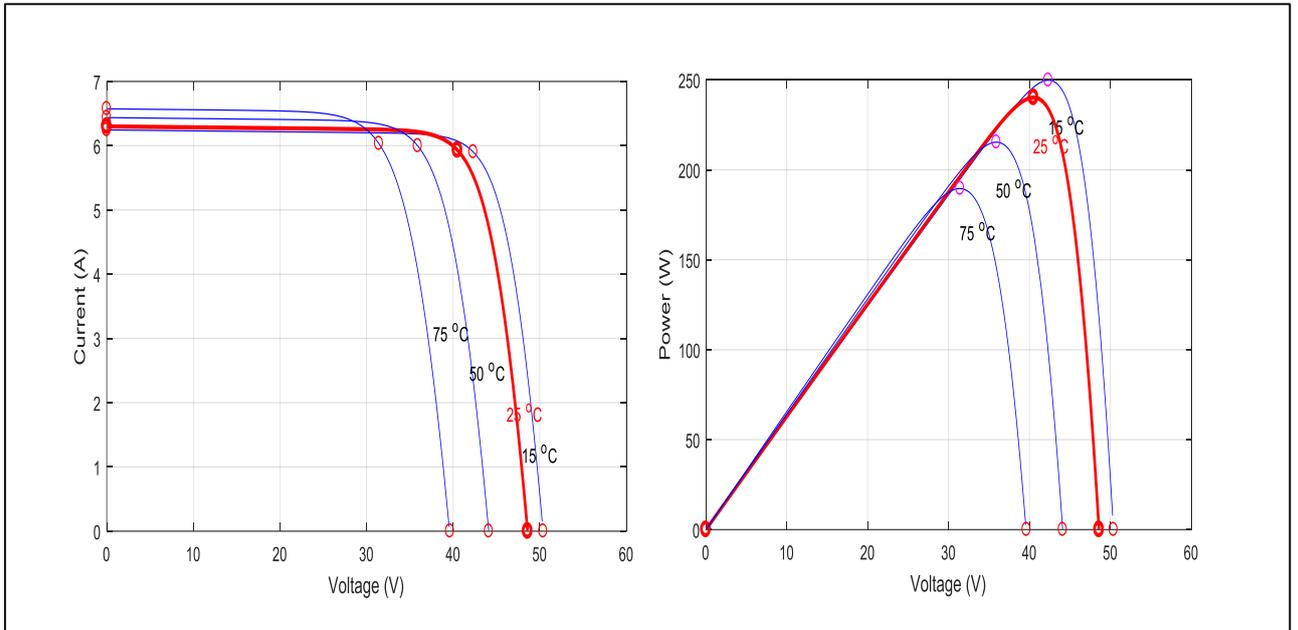


Figure.II.5 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) à un éclairement 1000w/m^2 et différentes températures.

II.4. Le convertisseur statique (DC-DC)

II.4.1. Hacheur série

Un convertisseur abaisseur ou hacheur série est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une tension continue de valeur plus faible. Le schéma de principe d'un convertisseur abaisseur est illustré sur la figure (Fig. II.6).

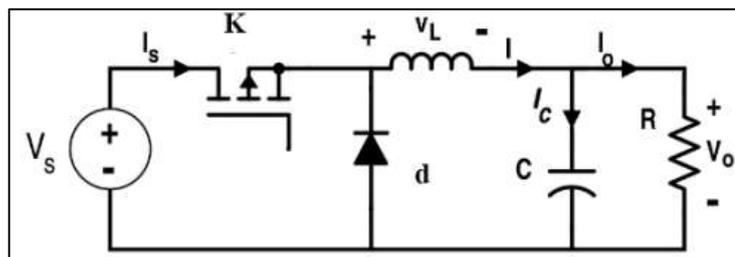


Figure II.6: Schéma de base d'un hacheur série.

Au moment où le commutateur K à l'état ON, la diode d est polarisée en inverse et la tension d'entrée V_s apparaît aux bornes de l'inductance, ce qui conduit à une augmentation linéaire du courant d'inductance L. De plus, le condensateur C est chargé dans le même cycle [11].

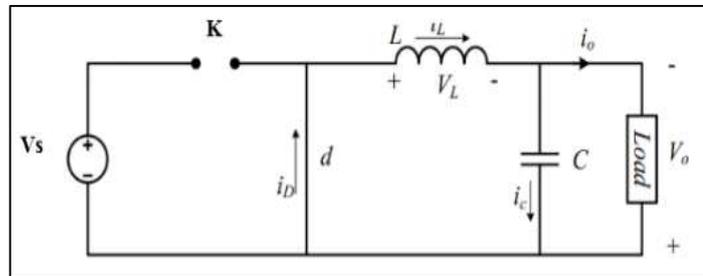


Figure II.7: Schéma équivalent d'un hacheur série à l'état ON de l'interrupteur K.

La forme d'onde du courant et de tension de l'inductance pendant le mode de conduction continu est montrée sur la Figure (fig.II.8).

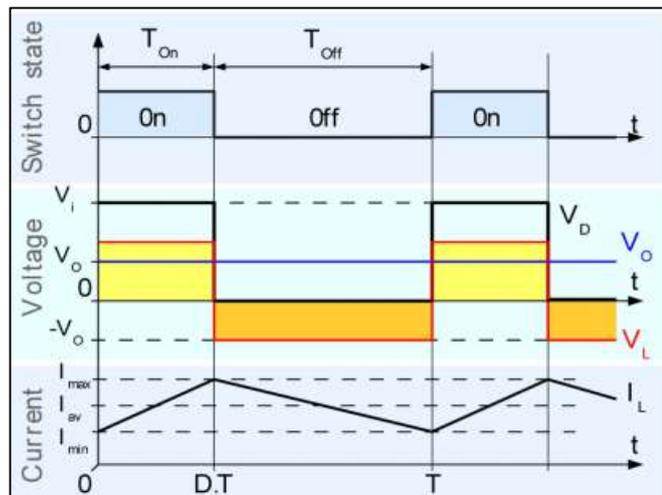


Figure II.8: Forme de d'onde de courant et de tension de la bobine en mode de conduction continue.

La forme d'onde doit être répétée d'une période à l'autre pendant le fonctionnement en régime permanent. La relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie, le courant d'entrée et de sortie et le rapport cyclique D peuvent être définis par les équations suivantes. [11]

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{t_{on}}{T} = D \quad (II.10)$$

$$\frac{I_o}{I_s} = \frac{1}{D} \quad (II.11)$$

Dans le changement du rapport cyclique du convertisseur. L'inductance de lissage et le condensateur pour faire fonctionner le convertisseur en mode de conduction continue peuvent être calculés par les équations suivantes. [11]

$$L = \frac{V_s D}{2\Delta I_L f_s} \quad (\text{II.12})$$

$$C = \frac{I_o D}{\Delta I_o f_s} \quad (\text{II.13})$$

II.5. Commande MPPT

Comme le nom indique, MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande qui permet de la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Elle est généralement associée à un étage intermédiaire de réglage qui permet à un générateur photovoltaïque de produire en continu le maximum de sa puissance en agissant sur le rapport cyclique. La commande du convertisseur amène le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) dans toutes les conditions météorologiques (température et éclairage). Par conséquent, un contrôleur (MPPT) permet le contrôle du convertisseur statique qui relie la charge au module photovoltaïque afin de fournir à la charge une puissance maximale à tout moment. [12]

Le système étudié est constitué par le GPV, le convertisseur DC\DC et un groupe moto-pompe à la sortie du système. Le convertisseur DC\DC est commandé par un signal à modulation de largeur impulsion (PWM) avec une stratégie de recherche du point de puissance maximale MPPT.

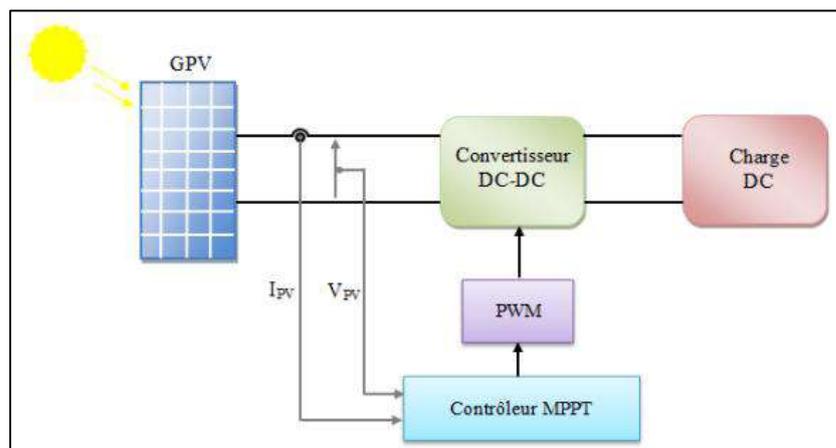


Figure II.9: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT. [13]

II.6. Les algorithmes MPPT

Il existe plusieurs techniques de commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [14]. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM est donnée dans cette partie :

II.6.1. Algorithme Perturbation & Observation (P&O)

L'algorithme (P&O) est largement utilisé dans la recherche MPPT car il est plus simple et nécessite moins de paramètres à mesurer. Son fonctionnement est basé sur la perturbation du système en augmentant ou diminuant (incrémentation ou décrémentation) du courant/tension ou en agissant directement sur le convertisseur (DC-DC), et l'observation de l'impact de cette perturbation sur la puissance de sortie du module photovoltaïque. [14]

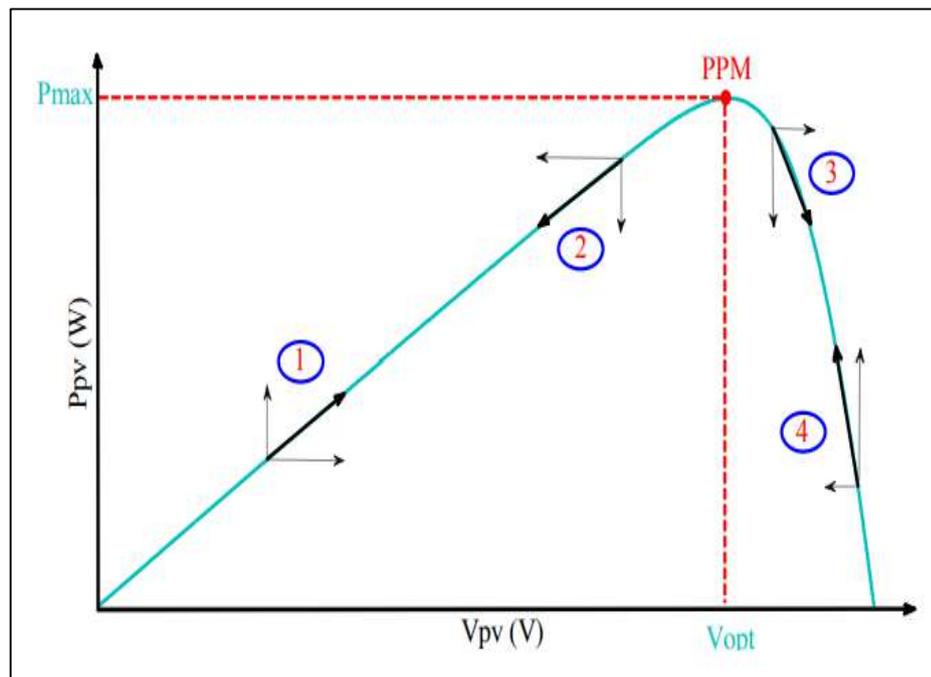


Figure II. 10 : Recherche du PPM par la méthode P&O.

Cette courbe montre que c'est la puissance augmente la perturbation sera continuer dans le même sens sinon la perturbation sera inversée :

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme P&O réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue

jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale.

L'organigramme de la technique MPPT basée sur P&O est représenté sur la figure II.11

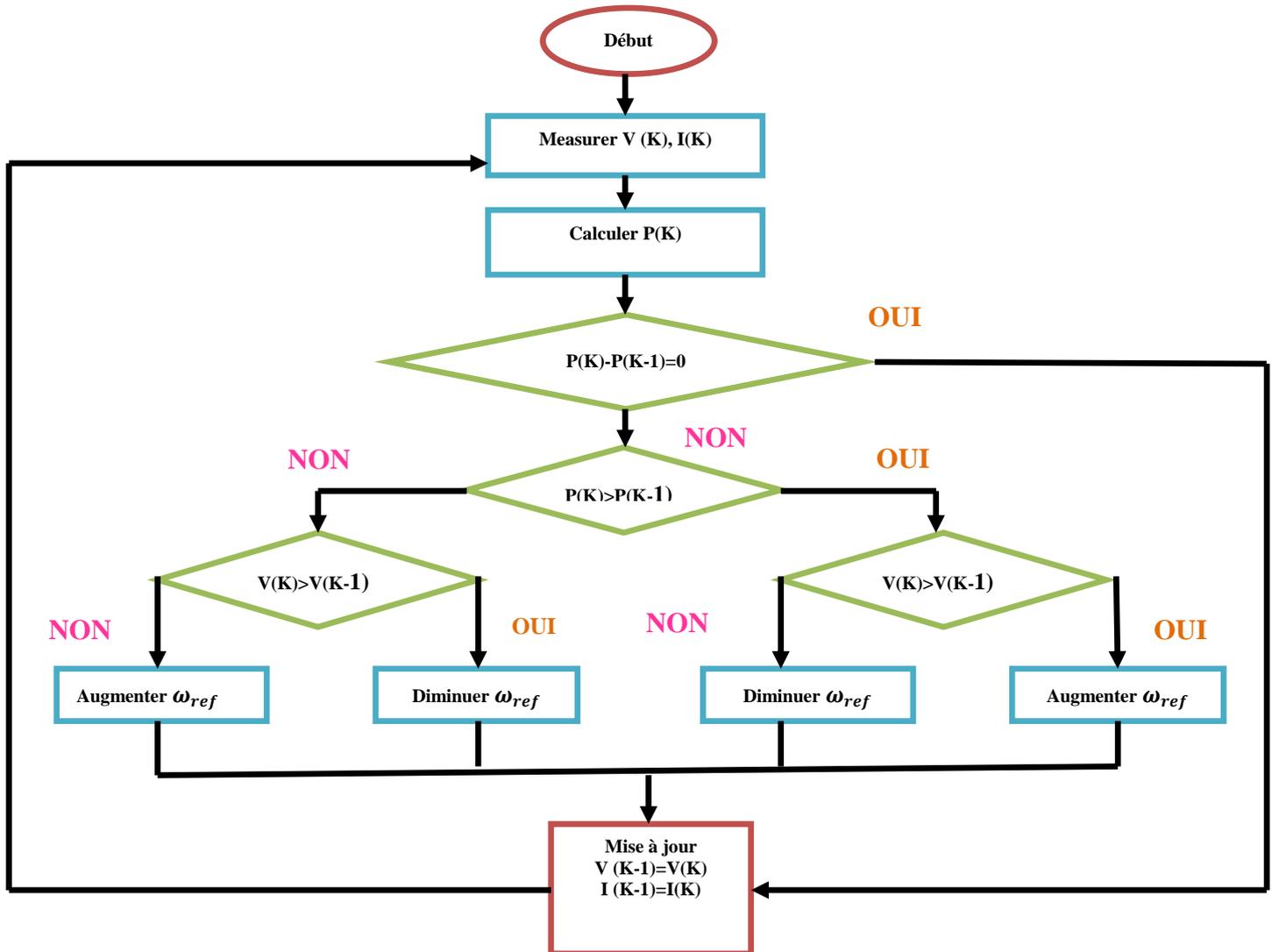


Figure II.11: Organigramme de la technique P&O.

Le principe de la méthode P&O consiste à perturber la tension V_{PV} du générateur d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et s'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte.

II.6.2. Algorithme MPPT de l'incrément de la Conductance (INC)

Cet algorithme s'intéresse directement à la dérivation de la puissance du module photovoltaïque par rapport à la tension. La conductance est une grandeur physique relativement

connue : c'est le rapport de l'intensité sur la tension ($G = I_{pv}/V_{pv}$). La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension ($\Delta G = dI_{pv}/dV_{pv}$). [8]

Cependant, l'algorithme à mettre en œuvre est généralement complexe et nécessite une puissance de calcul élevée, ce qui augmente le temps de contrôle du système. La puissance de sortie du champ photovoltaïque peut être spécifiée comme suit :

$$\begin{cases} P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \times I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + \left(V_{pv} \times \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \right) \\ \frac{1}{V_{pv}} \times \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \end{cases} \quad (II.14)$$

En définissant la conductance PV et la conductance incrémentielle, comme suit :

$$\begin{cases} G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \\ \Delta G = - \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \end{cases} \quad (II.15)$$

On obtient :

$$\frac{1}{V_{pv}} \times \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = G - \Delta G \quad (II.16)$$

$$G = \Delta G \rightarrow \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \rightarrow \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = - \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (II.17)$$

$$G > \Delta G \rightarrow \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \rightarrow \frac{I_{pv}}{V_{pv}} > - \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (II.18)$$

$$G < \Delta G \rightarrow \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \rightarrow \frac{I_{pv}}{V_{pv}} < - \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (II.19)$$

La méthode INC est basée sur la conductance incrémentielle et instantanée du module PV.

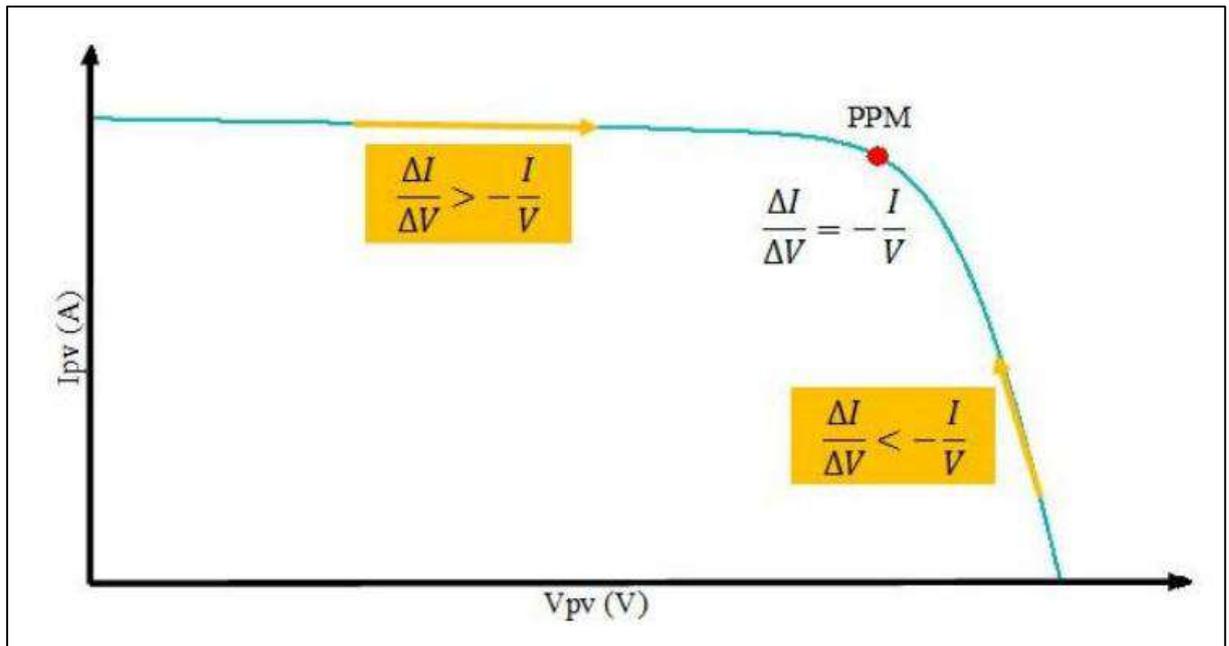


Figure II.12: Recherche du PPM par la méthode INC.

La figure II.12 nous permet de déduire facilement les actions à faire dans les différents cas.

- ✓ Si $dP(k)/dV(k) > 0$ alors augmenter $V(k)$
- ✓ Si $dP(k)/dV(k) < 0$ alors diminuer $V(k)$

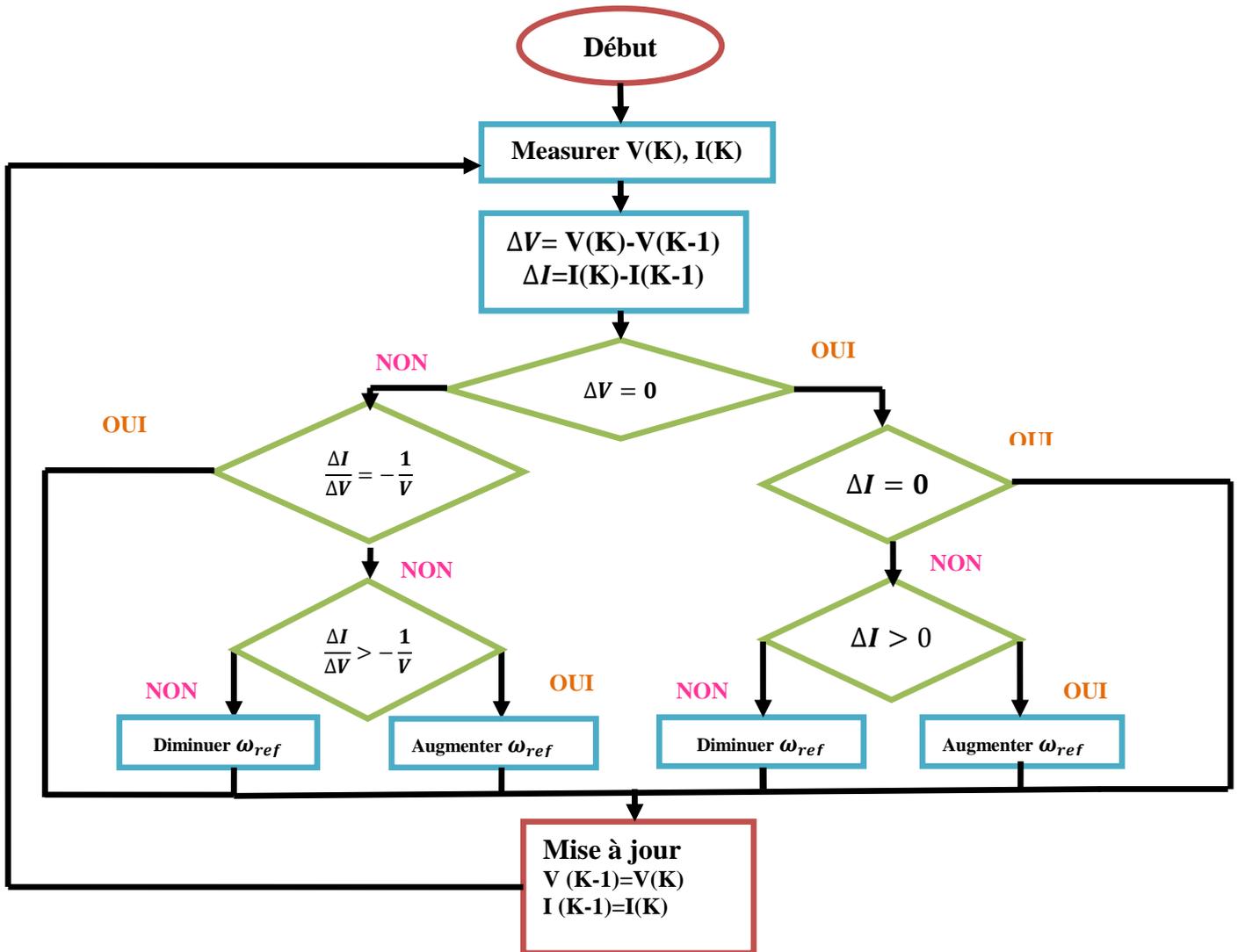


Figure II.13: Organigramme de la méthode INC.

Cet algorithme est une correction de l'algorithme P&O, puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle doit se trouver la perturbation du point de fonctionnement pour atteindre le point MPP. Figure II.13 : montre la structure de l'algorithme de conductance incrémentale. Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I > 0$, alors l'éclairement a augmenté. Cela nécessite que l'algorithme augmente la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP. Contrairement à $\Delta I < 0$, l'éclairement a diminué tandis que l'algorithme a dû réduire la tension de fonctionnement. Si le changement de tension n'est pas nul, les relations dans les équations précédentes peuvent être utilisées pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit changer pour atteindre le MPP.

II.7. Moteur à courant continu :

L'utilisation du moteur à courant continu pour les systèmes de pompage PV au lieu du moteur

à courant alternatif a fait l'objet de nombreuses études et il a été constaté que les moteurs à courant continu peuvent être couplés directement au générateur photovoltaïque. Par conséquent, le coût global et la complexité du système sont considérablement réduits. Dans ce travail, un moteur à courant continu à aimant permanent (PMDC) est utilisé et couplé à une centrifuge de faible couple de démarrage par rapport aux autres moteurs électriques.

II.7.1. Modélisation du moteur PMDC :

Le circuit équivalent du moteur à courant continu à aimant permanent est illustré sur la Fig (II.14), où R_a est la résistance d'enroulement d'induit (Ω), L_a est l'inductance d'induit (H), I_a est le courant d'induit du moteur (A) et V_a est la tension d'alimentation (V). [11]

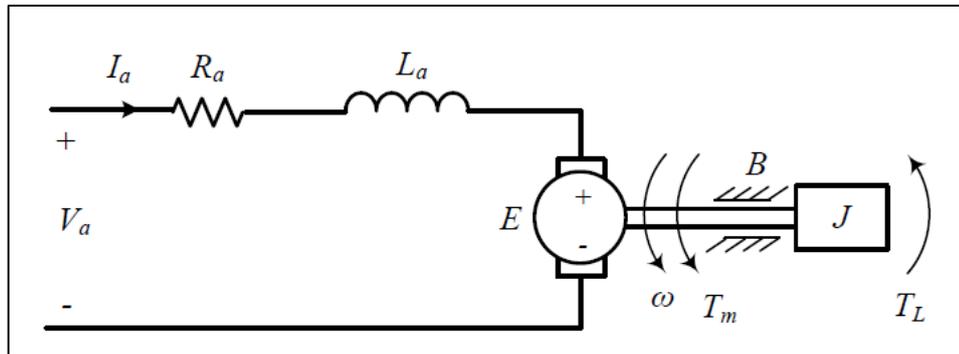


Figure II.14: Modèle de circuit pour PMDC à courant continu avec charge de pompe.

A partir du circuit équivalent illustré sur la Fig. (II.14), la tension continue d'induit peut être calculée en utilisant l'équation (II.22).

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + e \quad (II.22)$$

e est la tension induite du moteur qui appelé force contre-électromotrice. L_a tension induite e est proportionnelle à la vitesse du rotor ω_m , K , le constant du flux.

$$e = K \Phi \omega_m \quad (II.23)$$

Dans le cas du moteur à aimants permanent, le flux reste constant. Par conséquent l'équation (II.23) devient :

$$e = K_e \omega_m \quad (II.24)$$

L'équation (II.22) devient :

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_{pv}}{dt} + K_e w_m \quad (\text{II.25})$$

L'équation du couple est donnée par :

$$T_e = J \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + T_L \quad (\text{II.26})$$

Où **J** est le moment d'inertie, **B_m** est la constante de couple de frottement, **T_e** et **T_L** sont respectivement le couple électromagnétique et le couple résistant. Le couple électromagnétique **T_e** égal au produit de la constante de la courant traversant l'enroulement d'induit tel qu'il est donné par :

$$T_e = K_t \cdot I_a \quad (\text{II.27})$$

Par conséquent l'équation (II.26) peut être réécrite comme :

$$K_t I_a = J \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + T_L \quad (\text{II.28})$$

Pour une machine à flux constant, la constante de couple est égale à la constante de force contre-électromotrice (**K_e**). De plus, le couple développé par l'armature peut être écrit par l'équation (II.29)

$$T_e = \frac{P_e}{w_m} = \frac{e I_a}{w_m} = \frac{K_e w_m I_a}{w_m} = K_t I_a \quad (\text{II.29})$$

Où **P_e** est la puissance électrique du moteur.

En régime permanent, les équations (II.22) et (II.25) deviennent :

$$V_a = R_a I_a + E \quad (\text{II.30})$$

$$K_t I_a = B_m w_m + T_L \quad (\text{II.31})$$

II.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons expliqué brièvement la modélisation de panneau solaire, le MCC, les différentes méthodes de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).

Dans le chapitre suivant on va étudier la simulation à l'aide de Matlab/Simpowersystem de la méthode (P&O) et (INC) a fin de réalisé une comparaison entre les deux méthodes dans un système d pompage photovoltaïque.

Chapitre III :

**Simulation des techniques de
poursuite du point de
puissance maximale dans un
système de pompage
photovoltaïque**

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude par simulation des techniques de poursuites du point de puissance maximale dans un système de pompage photovoltaïque qui sont P&O et INC. Nous effectuerons des tests comparatifs entre les deux techniques. Le système de pompage PV est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur abaisseur, d'un contrôle MPPT et un moteur PMDC couplé à une pompe centrifuge.

III.1. Simulation du système de pompage photovoltaïque

La figure (III.1) illustre le schéma bloc de notre système de pompage photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés : GPV, convertisseur DC-DC, MPPT et le PMDC avec pompe.

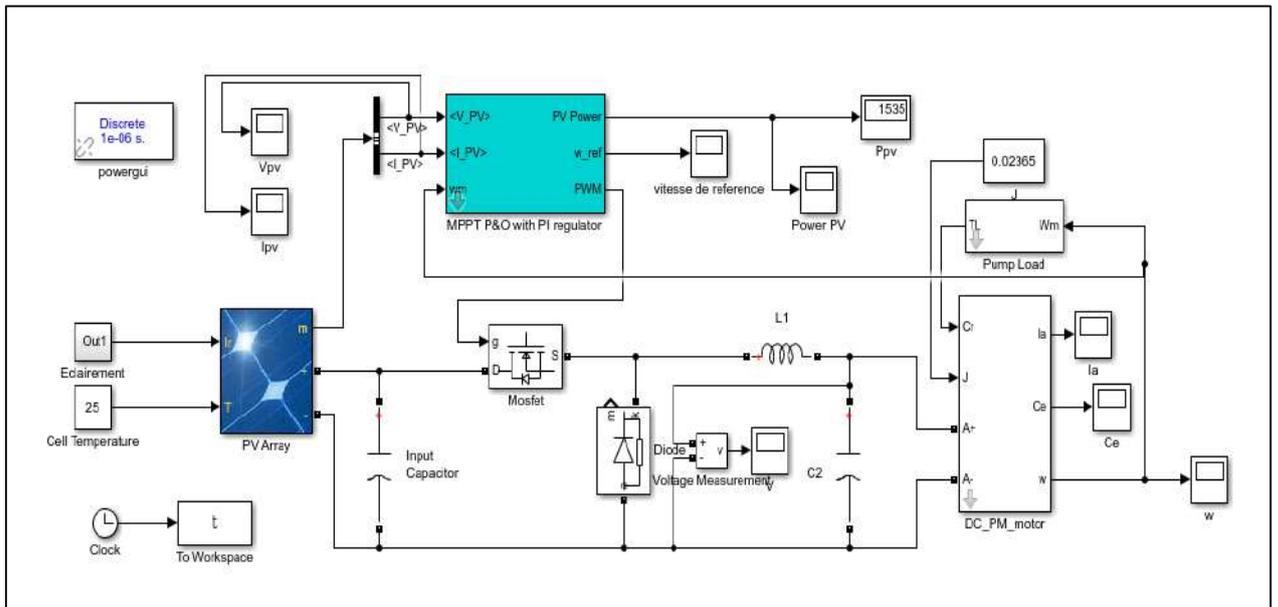


Figure. III.1: Schéma bloc sous Simpowersystem du système global.

III.1.2. Simulation du convertisseur dévolteur

De la même manière, nous avons modélisé le convertisseur DC-DC (dévolteur) sous l'environnement (MATLAB /Simpowersystem).

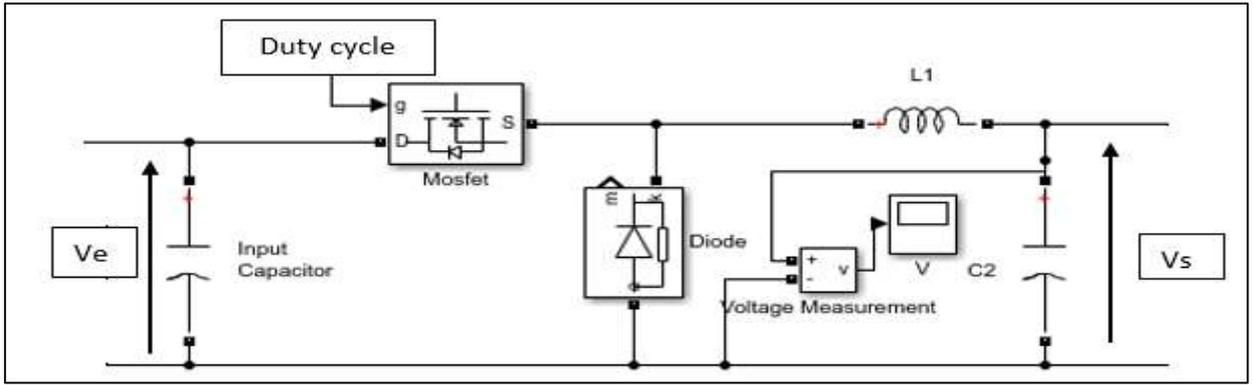


Figure. III.2: Convertisseur dévolteur sous MATLAB/Simpowersystem.

Le condensateur et la bobine sont calculées par les relations suivantes :

$$L = \frac{V_s D}{2 \Delta I_L f_s} \quad (III.1)$$

$$C = \frac{I_o D}{\Delta I_o f_s} \quad (III.2)$$

Tab. III.1: Paramètres du convertisseur DC-DC.

C ₁ (entrée)	C ₂ (sortie)	L1
1000e-6 F	1000e-6 F	0.1e-3H

III.1.3. Simulation du groupe moteur-pompe

Les figures III (3,4) ci-dessous présentent la simulation de groupe moteur-pompe.

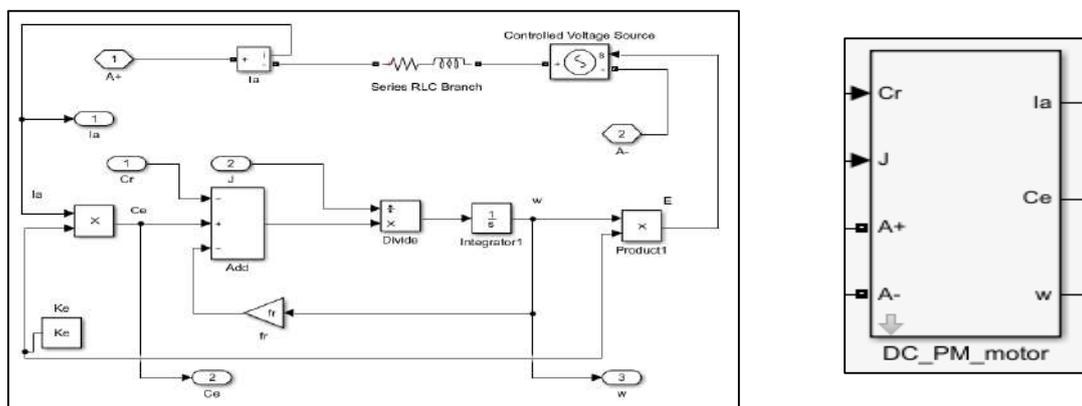


Figure. III.3: Schéma de bloc du moteur PMDC.

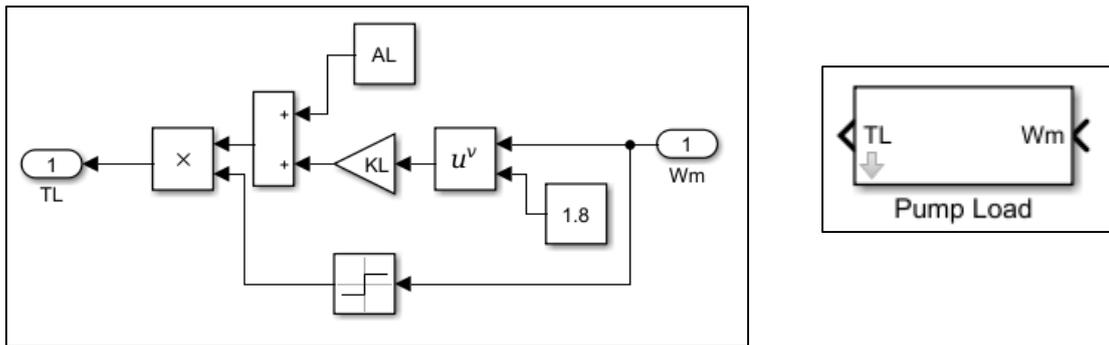


Figure. III.4: Schéma bloc de la pompe.

Tableau. III.2: les paramètres de moteur et la pompe. [11]

DC PM Motor data	
Rated motor voltage (V_a)	120V
Rated motor current (I_a)	9.2A
Rated motor speed (ω)	157.079 (rad/sec)
Armature resistance (R_a)	1.5 Ω
Armature inductance (L_a)	0.2H
Voltage constant (K_e)	0.67609 V/(rad/sec)
Torque constant (K_T)	0.67609 Nm/A
Motor friction (A_m)	0.2 Nm
Load pump data	
Moment of inertia (J)	0.02365 Kg.m ²
Viscous friction coefficient (B)	0.002387 Nm/(rad/sec)
Load torque constant (K_e)	0.00039 Nm/(rad/sec)
Load friction (A_L)	0.3 Nm

III.1.4. Simulation des algorithmes MPPT

Nous avons réalisé les schémas de simulation des deux algorithmes P&O et InCond illustrés dans les figures. (III.5.6).

A) Simulation de la technique MPPT basée sur P&O

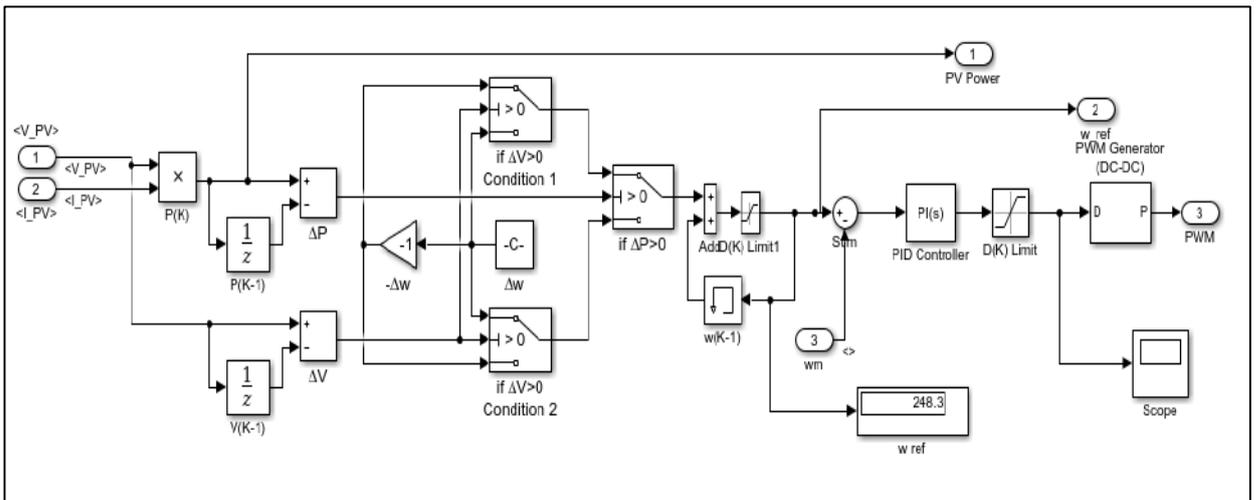


Figure. III.5: Schéma bloc de la technique P&O.

B) Simulation de la technique MPPT basée sur INC

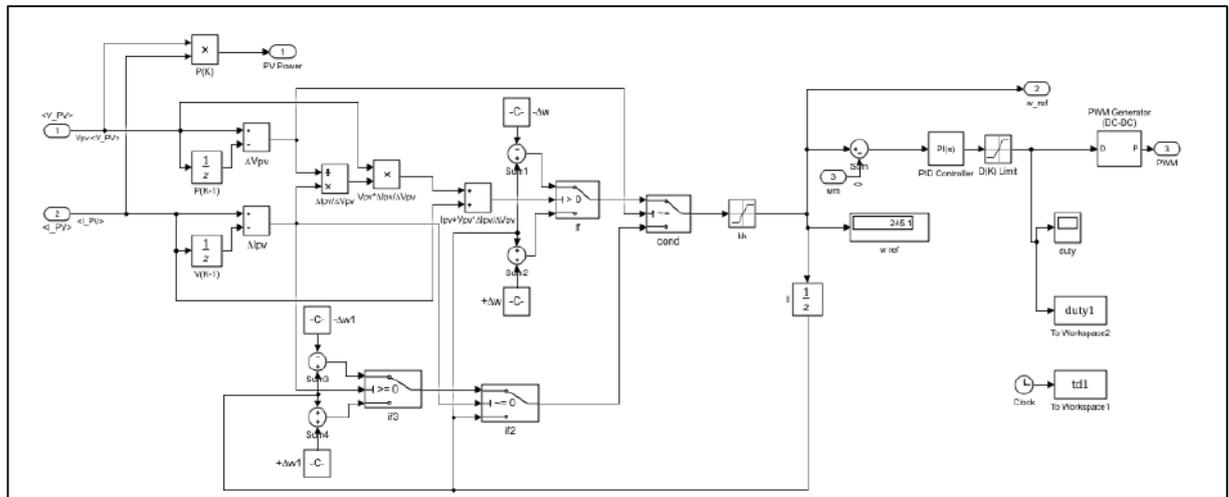


Figure. III.6: Schéma de bloc de la technique INC.

III.2. Régulateur de vitesse PI

III.2.1. Structure de régulateur PI

La vitesse du moteur est réglée par un régulateur proportionnel intégral PI classique, présenté sur la figure (III.7), il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité

avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne.

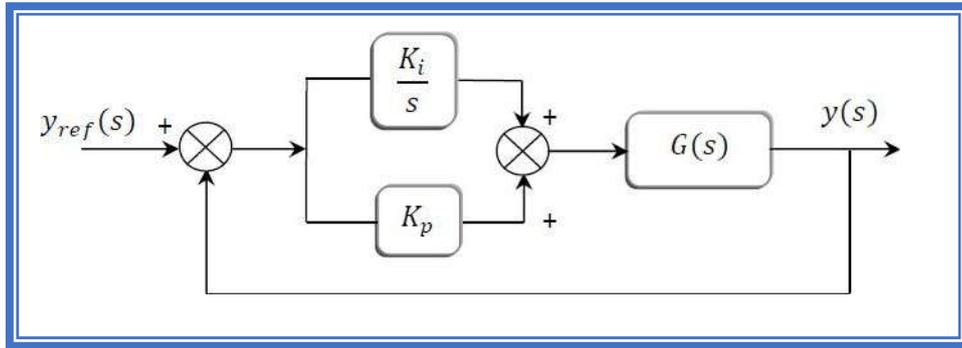


Figure III.7 : Schéma de commande utilisant un régulateur PI

Soit $G(s)$ un système de premier ordre peut être donné par une des fonctions suivantes :

$$\begin{cases} G(s) = \frac{G_1}{s+\tau_1} \\ G(s) = \frac{G_0}{1+\tau_s s} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec

$$\tau_1 = 1/\tau$$

La méthode de placement des pôles est utilisée pour déterminer les paramètres K_p et K_i du régulateur PI :

III.2.2. Méthode de placement des pôles [18]

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F(s) = \frac{G_1 K_p s + G_0 K_i}{s^2 + (\tau_1 + G_1 K_p) s + G_1 K_i} \quad (\text{III.4})$$

La fonction de transfert en boucle fermée, peut être mise sous la forme de celle d'un modèle de second ordre standard de l'équation suivante :

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{III.5})$$

A partir de l'équation (III.5), on impose les pôles du système en boucle fermée de sorte que le système soit sous-amorti ($0.7 \leq \varepsilon < 1$),

Les pôles de $H(s)$ sont :

$$\begin{cases} S_1 = \omega_n(-\varepsilon + j\sqrt{1 - \varepsilon^2}) = -\frac{1}{\tau_p} + j\omega_a \\ S_1 = \omega_n(-\varepsilon - j\sqrt{1 - \varepsilon^2}) = -\frac{1}{\tau_p} - j\omega_a \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Ou :

$$\tau_p = \frac{1}{\omega_n} \text{ et } \omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2}$$

La réponse transitoire est alors donnée par l'oscillation de pseudo-période $\frac{2\pi}{\omega_a}$ amortie par une exponentielle de constante de temps.

$$\begin{cases} \tau_1 + G_1 K_p = 2\varepsilon\omega_n \\ G_1 K_i = \omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} K_p = \frac{2\varepsilon\omega_n - \tau_1}{G_1} \\ K_i = \frac{\omega_n^2}{G_1} \end{cases}$$

III.3. Résultats et discussions

Afin d'évaluer les performances des deux algorithmes P&O et INC, des études par simulation ont été réalisées.

III.3.1. Simulation des techniques MPPT

Dans cette partie une analyse par simulation est effectuée pour montrer la performance des deux algorithmes. L'analyse prend en compte la rapidité de PPM et l'oscillation autour de point de fonctionnement.

III.3.1.1. Algorithme P&O

Les résultats de cette simulation est extrait en prenant une température constante de 25°C et éclairement (irradiation) constant 800 W/m² et de Δw de différentes valeurs (0.0005, 0.005, 0.05). La figure III.8 montre la puissance produite par PV pour différentes valeur de Δw .

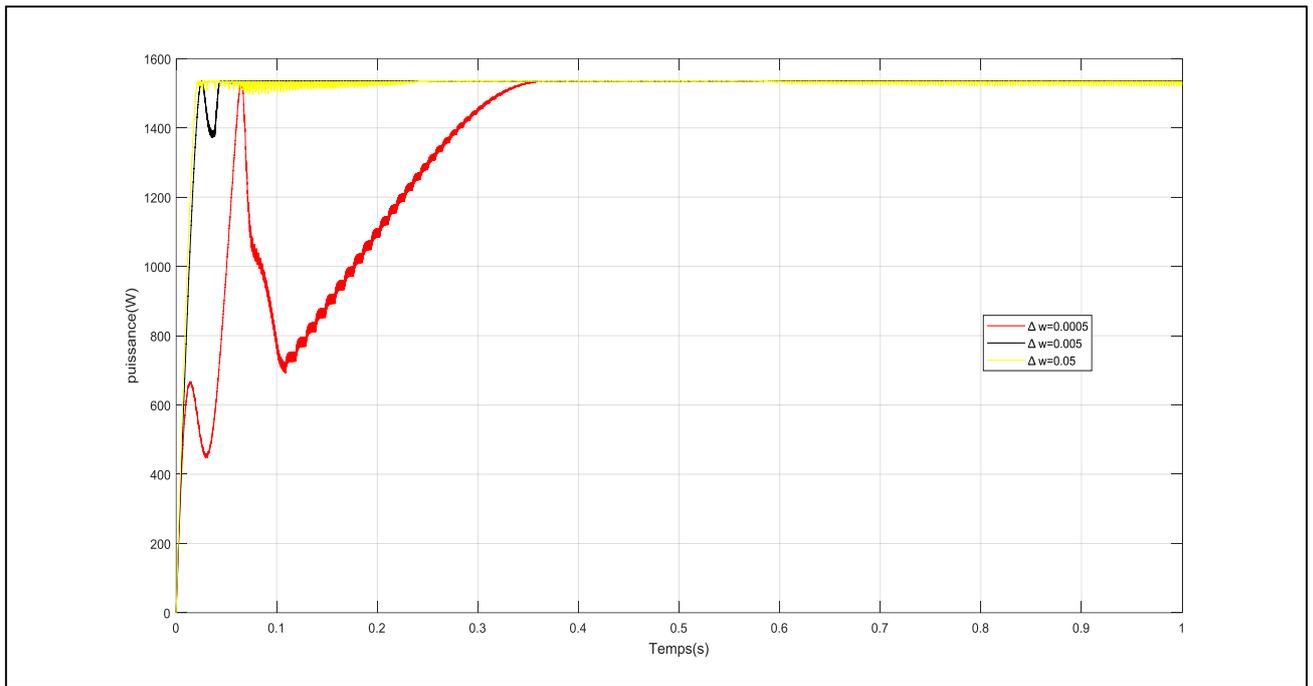


Figure. III.8: Courbes des puissances de différentes valeurs de Δw (P&O)

Interprétation

D'après la figure (III.8), on constate que l'algorithme P&O avec un pas de 0.05, montre une bonne performance dynamique par rapport au P&O de 0.0005, il peut converger plus rapidement vers l'état stationnaire mais l'oscillation en régime permanent est beaucoup plus élevée. Il prend 0.15 s pour atteindre le MPP, tandis que le P&O avec un pas de 0.0005 prend 1 s pour atteindre le MPP comme le montre la figure (III.8). La performance dynamique de l'algorithme P&O peut être encore améliorée par un pas plus grand. Cependant, cela aura un effet négatif sur la performance statique. Un algorithme P&O avec un pas variable peut éliminer la nécessité d'effectuer un compromis compliqué entre la performance en régime permanent et la performance dynamique. L'oscillation en régime permanent a été totalement éliminée dans le cas du P&O et que la puissance de sortie du générateur PV est au maximum.

III.3.1.2. Algorithme INC

Les résultats de cette simulation sont extraits en prenant une température constante à 25°C et un éclairement (irradiation) constant 800 W/m² et de Δw de différentes valeurs (0.0005, 0.005, 0.05). La figure III.9 montre la puissance produite par PV pour différentes valeurs de Δw .

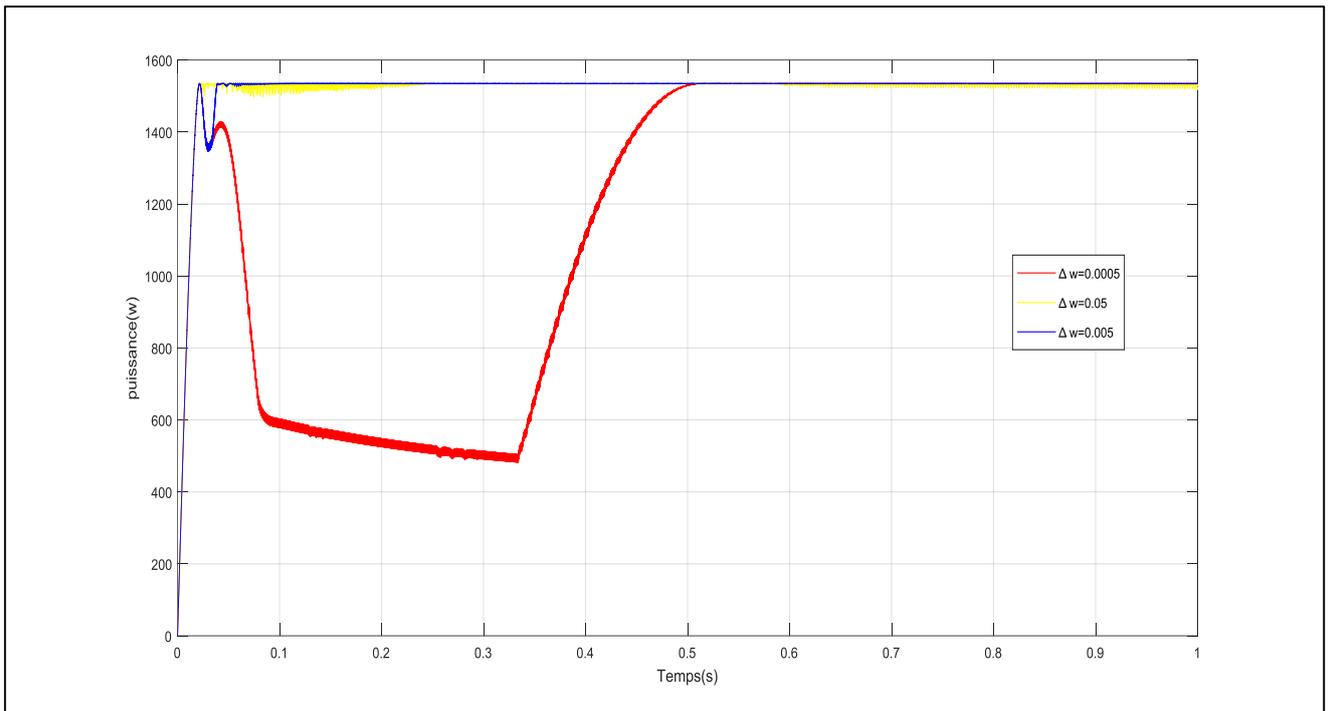


Figure. III.9: Courbes des puissances de différentes valeurs de Δw (INC)

Les résultats montrent clairement que la méthode d'incrément de la conductance atteint le MPP avec peu de fluctuation et un temps de réponse tout à fait indépendant aux valeurs d'éclairement.

III.3.1.3. Simulation du système global

Le système de pompage solaire raccordé au GPV est simulé dans les conditions de fonctionnement normales pour les deux techniques MPPT.

La simulation est réalisée en utilisant des blocs MATLAB / SimPowerSystem. Le moteur de la pompe ne fonctionne pas toujours à la vitesse maximale puisque la puissance du générateur photovoltaïque est affectée par l'irradiation et la température. Par conséquent, la vitesse de référence est calculée simultanément à l'aide de l'algorithme MPPT pour fonctionner au point de puissance maximale par les deux techniques P&O et INC.

III.3.1.4 Résultat de simulation :

➤ Température 25°C et radiation variable :

Dans le but d'étudier les performances du système, on a appliqué un éclairement variable (figure III.10) et une température fixée à 25°C. L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque (P_{pv}) est montrée dans la figure (III.11) pour les deux techniques P&O et INC. On constate que la diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance

photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette irradiation. L'algorithme INC détermine continuellement la tension optimale qui donne la puissance maximale.

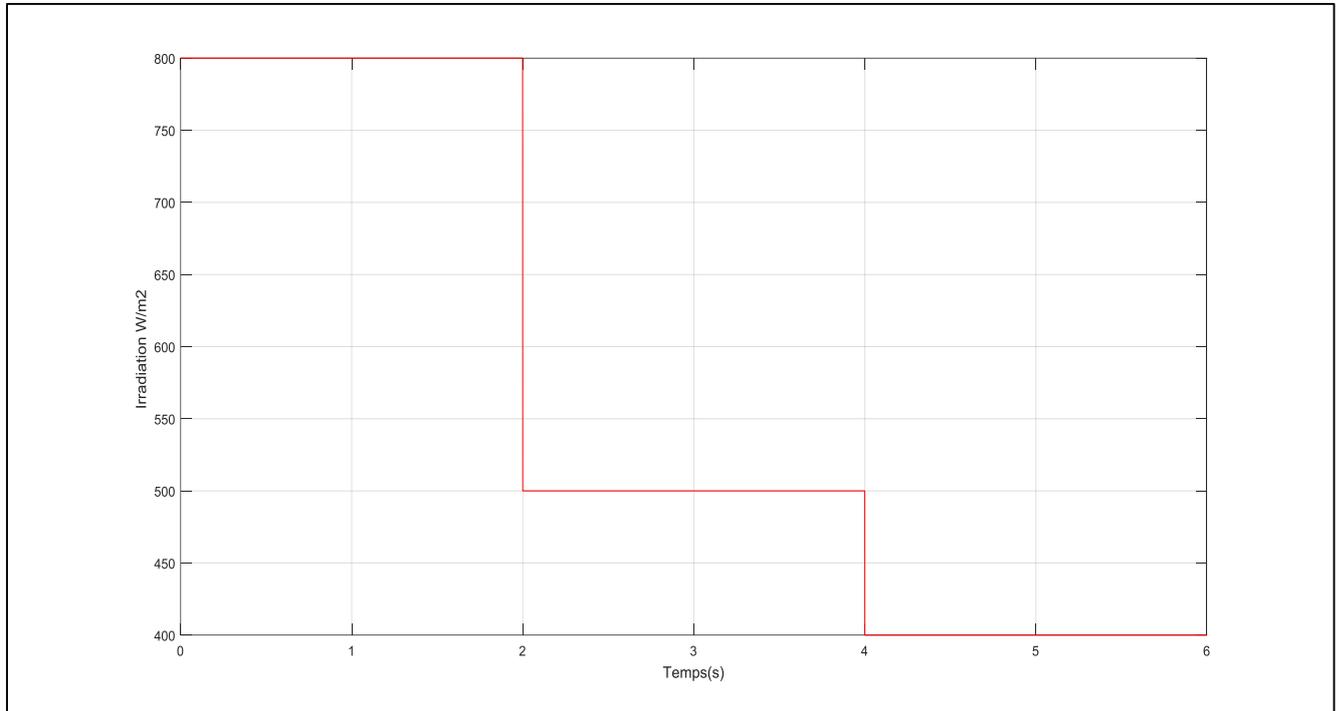


Figure. III.10: Profil de l'irradiation (W/m^2).

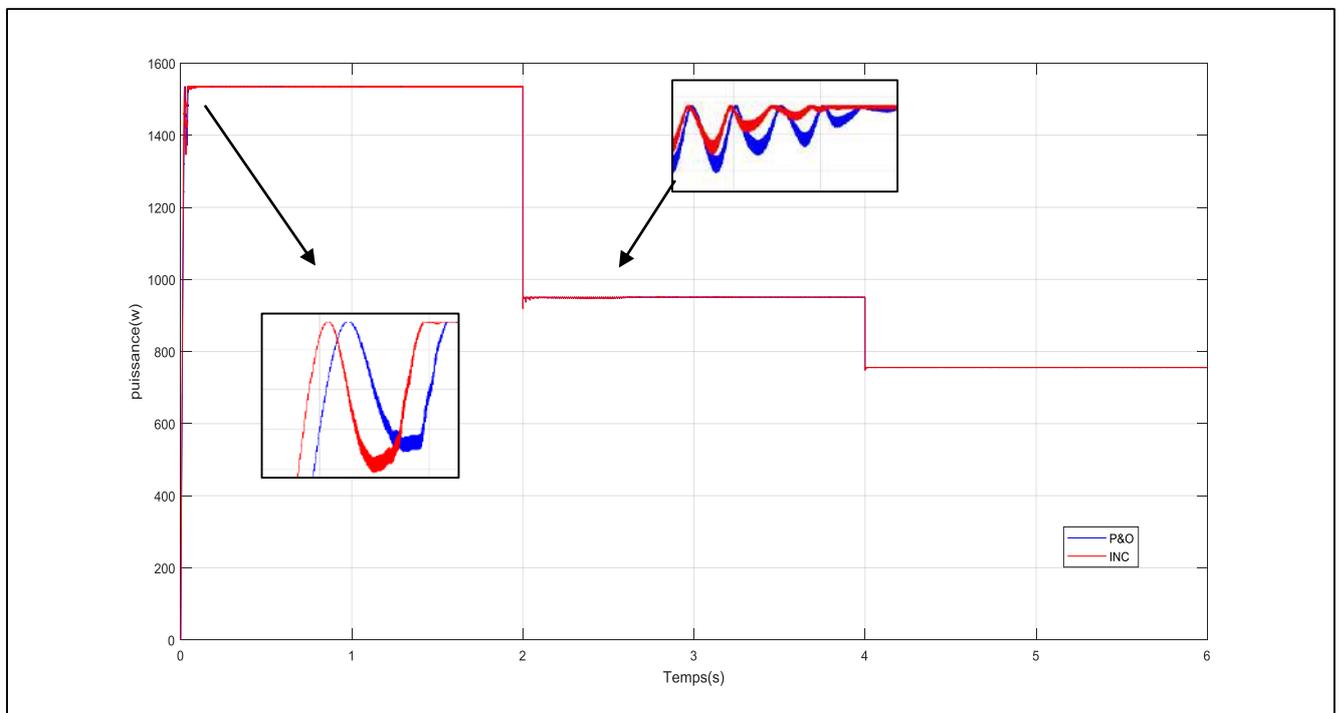


Figure. III.11: Puissance P_{vp} (P&O, INC).

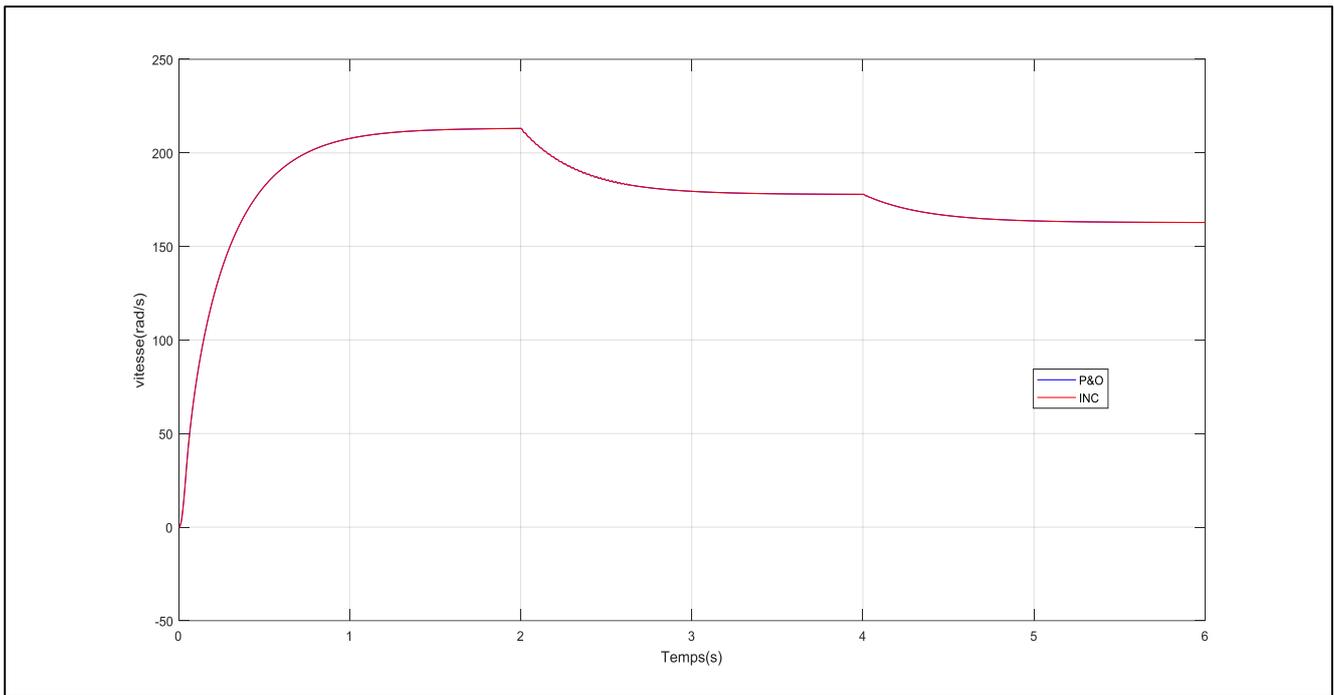


Figure. III.12: Vitesse de rotation W_m (P&O, INC).

On constate que la puissance diminue avec la diminution de l'éclairement, c'est –à-dire qu'elle lui est directement proportionnelle, car elle s'accompagne d'une diminution de la vitesse de rotation, donc la vitesse de pompage d'eau.

➤ **Radiation de 1000 W/m^2 et température variable :**

On applique une température variable (figure III.13) et un éclairement constant de 1000 W/m^2 , pour montrer le fonctionnement au point PPM de deux techniques MPPT. L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque et la vitesse de rotation du moteur sont représentés dans les figures (III.14 et III.15). La diminution de la température implique une légère augmentation de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.

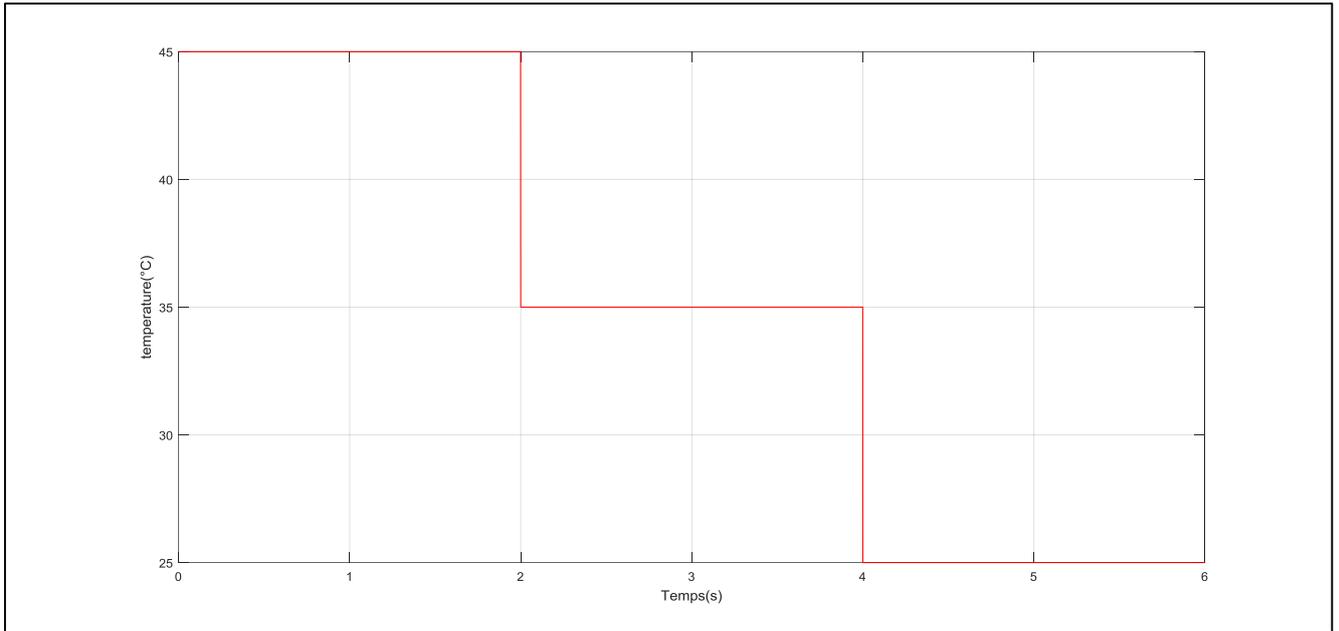


Figure. III.13: Profil de variation de température °C.

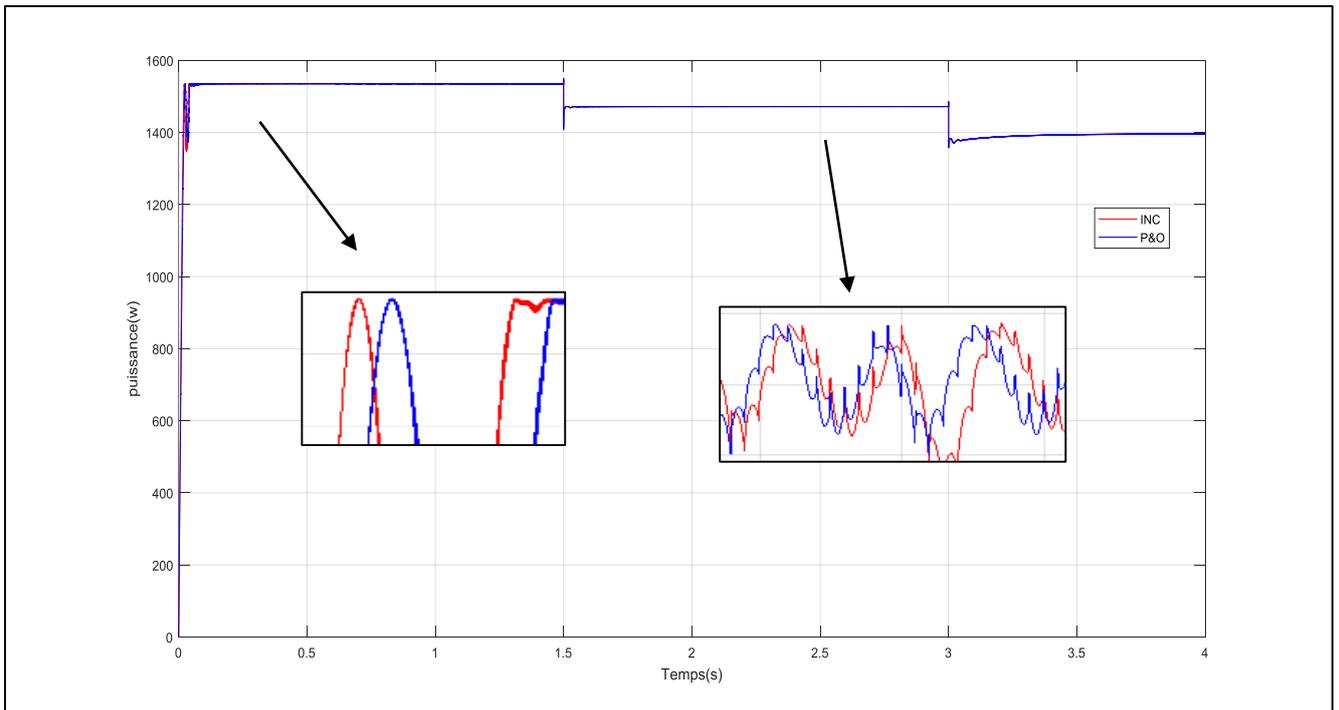


Figure. III.14: Puissance Pvp (P&O, INC).

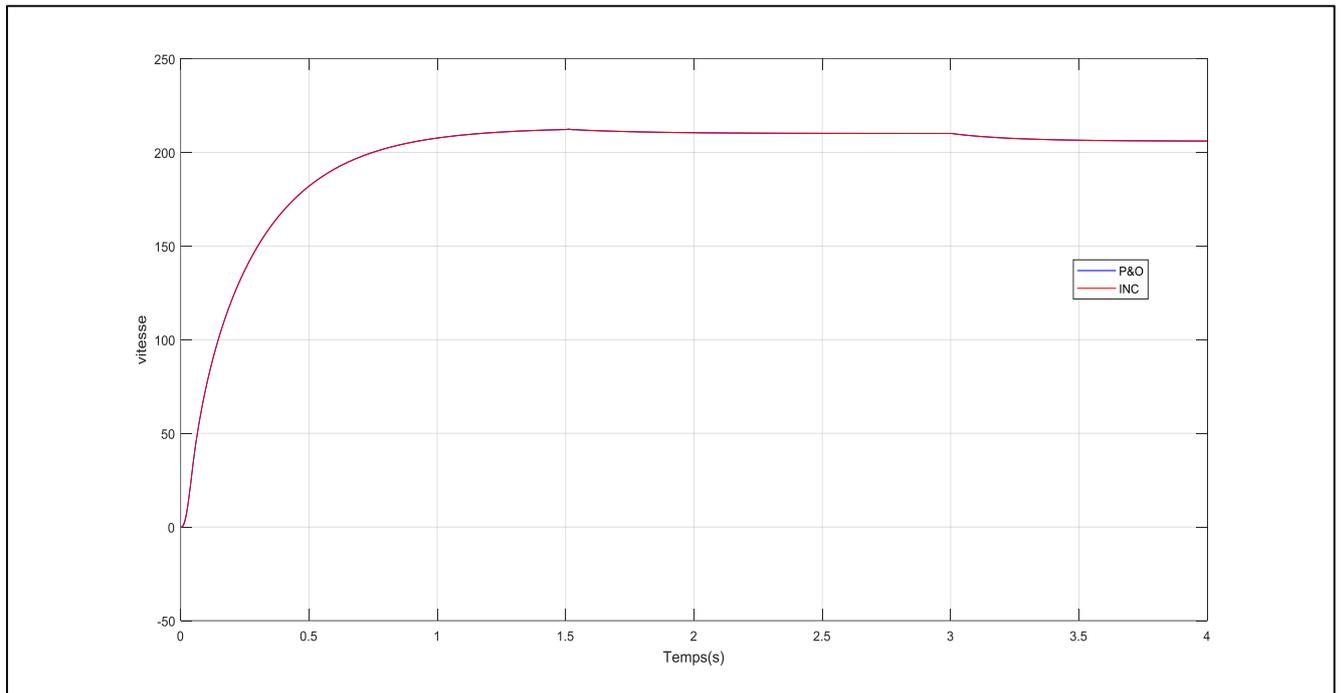


Figure. III.15: Vitesse d rotation W_m (P&O, INC).

III.3.2. Etude comparative entre les techniques P&O et INC

Cette étude est faite pour montrer la différence entre les deux techniques MPPT appliquées dans un système de pompage photovoltaïque. Ce système peut fonctionner au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries. Les résultats de comparaison sont résumés dans le tableau III.3.

Tableau III.3: Comparaison entre les techniques P&O et INC.

Irradiation	G (W/m ²)	800	500	400
	P_{max} (W)	1535	950	755.75
MPPT	P_{PV} (W)	1533	948	753.1
	Temps(s)	0.051	0.3	0.44
	L'oscillation	Haute	Haute	Haute
P&O	P_{PV} (W)	1534	949.1	755
	Temps(s)	0.05	0.25	0.415
	L'oscillation	Rien	Rien	Rien
INC	P_{PV} (W)	1534	949.1	755
	Temps(s)	0.05	0.25	0.415
	L'oscillation	Rien	Rien	Rien

Sur la base du tableau ci-dessus et des résultats obtenus précédemment, on peut dire que la puissance est affectée par l'éclairement que par la température.

Comme nous l'avons remarqué dans les résultats de l'algorithme (INC), le temps de réponse court et faible oscillations dans le régime statique par rapport l'algorithme (P&O).

III.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons analysé le fonctionnement d'un système de pompage PV, adapté par un convertisseur statique (hacheur dévolteurs). Les modèles SIMULINK sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque.

Les résultats de simulation montrent que l'algorithme 'INC' donne des résultats meilleurs que le 'P&O'.

CONCLUSION GENERALE

Dans notre travail, l'étude est basée sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque (PV) à base d'un moteur PMDC, adapté par un contrôleur MPPT, qui assure la poursuite de la puissance maximale du générateur PV.

Après avoir rappelé la chaîne photovoltaïque élémentaire et le problème d'optimisation énergétique, nous avons détaillé deux techniques de poursuite MPPT qui sont P&O et INC.

La performance du système global est analysée dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats de simulation obtenus ont montré la robustesse du système que ce soit en régime transitoire ou en régime établi. Pour une variation brusque de l'éclairement un meilleur temps de réponse et de faible oscillation ont été obtenu par INC. En ce qui concerne le régime permanent, les deux techniques MPPT donnent des résultats acceptables. Cependant l'étude comparative des résultats de simulation de la technique INC améliore les performances de notre système.

D'après ces résultats de simulation, on peut aussi conclure

- Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'éclairement.
- Le convertisseur dévolteur fournit une tension à sa sortie faible à celle fournie par le panneau PV.
- La commande MPPT adapte le point de fonctionnement du panneau PV à la demande de la charge.
- La technique MPPT utilisant l'algorithme "Incrément of Conductance" arrive à joindre rapidement le PPM avec moins des oscillations.

A travers ce travail, nous souhaitons contribuer à l'investigation des propriétés photovoltaïques de la cellule solaire, l'investigation des systèmes photovoltaïques autonomes et des commandes MPPT (P&O, INC).

Références

- [1] **SOLTANI MOHAMED**, « Réalisation d'un système de pompage solaire à moteur à courant continu », Projet de Fin D'étude, Université de Gabès, Juin 2015.
- [2] http://eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/typepomp.pdf
- [3] <http://tpepanneauxsolaires.fr/fonctionnement>.
- [4] <http://physiquenetappliquee.free.fr/hacheur>.
- [5] **Zneidi Aicha, Bouazizi Emna**, « Etude d'un système de pompage à moteur à courant continu à faible puissance », Projet de Fin d'étude, 2013.
- [6] <https://harmonicdrive.de/fr/glossaire/le-moteur-dc>
- [7] **S. ABOUDA**, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage », Thèse de Doctorat, l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, avril 2015.
- [8] **BITEUR Yousef et BEN CHEIKH Othman**, « Étude et réalisation d'un système de poursuite du point de puissance maximale en utilisant les réseaux de neurones artificiels », Mémoire master, Université Kasdi Merbah. Ouargla. 2018.
- [9] **S. Issaadi**, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de Neurones », Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, Algérie, 2006
- [10] **A. BELBOULA**, « Commande MPPT avancée d'un système de conversion d'énergie solaire : photovoltaïque et thermoélectrique », Mémoire magister, UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI DE CHLEF, septembre 2014.
- [11] **Fathi A O Aashoor**, « Maximum power point tracking techniques for photovoltaic water pumping system », thèse de doctorat, Université de BATH, Mai 2015.
- [12] **BAHRI Ahmed, ABDELKRIM Thameur, MORDJAOUI Mourad, BECAR Belgasem, BOURAGHDA Skander**, « Etude comparative des algorithmes d'optimisation MPPT pour un système photovoltaïque », The national conference on Energy Systems, Environment, Plasma and Materials "ESEPM2020", MESTEL Laboratory, University of Ghardaia
- [13] **A. MEFLAH**, « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magistere, Université de Tlemcen, 2011
- [14] **BELKAID Abdelhakim**, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », these doctorat université ferhat abbas - setif 1 2015

- [15] **BENADEL Faiza**, « *Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour SystèmePV* », Mémoire de master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2015.
- [16] **AKIHIRO Oi**, « *design and simulation of photovoltaic water pumping system* », faculty of cali- fornia polytechnic state university, 2005
- [17] Emmanuel Gdoy, 2014, Régulation industrielle « Outils de modélisation, méthodes et architectures de commande », 2^{ème} EDITION.
- [18] K.J. A, ström, T. Hägglund, C.C. Hang, W.K. Ho, 1993, « AUTOMATIC TUNING AND ADAPTATION FOR PID CONTROLLERS - A SURVEY», Control Eng. Practice, Vol. 1, No.4, pp. 699-714.

Etude et simulation des techniques de poursuite du point de puissance maximale dans un système de pompage photovoltaïque

الملخص:

نظرًا للخصائص الكهربائية للاختطية للخلايا الكهروضوئية، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية من خلال الحلول القائمة على تقنيات MPPT وذلك باتباع نقطة الاستطاعة الاعظمية التي ينتجها المولد الكهروضوئي، من بين هذه الطرق و اكثرها استعمالا تقنية الاضطراب والمراقبة وتقنية زيادة التوصيل. في هذه المذكرة نقدم مقارنة بين هاتين التقنيتين في نظام الضخ الكهروضوئي الذي يعتمد على محرك PMDC، من أجل تحليل ومحاكاة وتقييم النظام ككل في ظل ظروف تشغيل مختلفة. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج Matlab / Simpowersystem بشكل عام أن أداء تقنية INC أفضل بكثير من أداء وحدة التحكم MPPT-P & O.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي، محول خافض مستمر، تقنيات MPPT، الضخ الكهروضوئي.

Résumé :

En raison des caractéristiques électriques non linéaires des cellules photovoltaïques, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions basées sur les méthodes MPPT. Il existe des techniques MPPT conventionnelles qui sont largement utilisées, à savoir la méthode de perturbation et observation (P&O) et la méthode Incrémentation de la conductance. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces deux techniques MPPT dans un système de pompage photovoltaïque basé sur un moteur à courant continu afin d'analyser, simuler et évaluer le système dans son ensemble dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats de simulation obtenus avec l'outil Matlab / Simpowersystem ont généralement montré que les performances de la technique INC sont bien meilleures que celles du contrôleur MPPT-P&O.

Mots clés : Système PV, Convertisseur DC/DC, Techniques MPPT, Pompage photovoltaïque.

Abstract:

Due to the non-linear electrical characteristics of photovoltaic cells, the efficiency of PV systems can be improved by solutions based on MPPT methods. There are conventional MPPT techniques, which are widely used, namely the perturbation and observation (P&O) and the incremental conductance methods. This report presents a comparative study between these two MPPT techniques in a photovoltaic pumping system based on a DC motor in order to analyze, simulate and evaluate the system as a whole under different operating conditions. The simulation results obtained with the Matlab / Simpowersystem tool generally showed that the performance of the INC technique is much better than that of the MPPT-P & O controller.

Keywords: PV system, DC/DC converter, MPPT technics, Photovoltaic pumping