

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur de la recherche scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia
Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique
Option : Energies renouvelables

Thème

*Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'un Système
de Pompage Photovoltaïque*

Réalisé par :

- ◆ *ANKI Massinissa*
- ◆ *BOVALLAG Arezki*

Encadré par :

- ◆ *M^{me} S. BELAID*
- ◆ *M^{me} D. REKIOUA*

Examiné par :

- *Mr. K. IDJDARENE*
- *Mme. K. RAHRAH*

Promotion Juin 2012

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Nous exprimons nous vifs remerciements en particulier à nos promotrices M^{me} S. BELAID et M^{me} D. RIKIOUA qui ont acceptés de nous encadrer et pour leurs orientations et soutien.

Nous remercions profondément tous les enseignants du département de génie électriques qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre cursus.

Nous tenons aussi à remercier le président et les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.

Toute l'estime à M^r MELAHI pour son aide précieuse et son orientation.

Dédicace

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail

*A mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours
soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont
toujours porté pour mes études, je ne les remercierai jamais
assez, pour tout ce qu'ils m'ont fait.*

Que Dieu me les protège.

A mes chers grands parents

A mes chères sœurs: Maya et Wassíla

A toute ma famille.

*A mes amis : Akli, Toufik, Ali, Smail, Lamine, Djillali, Faouzi
Cherif, Lyakout, Fayrouz, Ounissa, Lydia, Souad, Kaissa,
Nassima.*

A mon collègue Bouallag Arezki

Massí

DEDICACE

*Au nom de Dieu le Miséricordieux, Et la prière soient sur Sa création,
Muhammad paix soit sur lui.*

*Je dédie ce travail à mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé.
Ils ont sacrifié tout pour nous leurs santés et leurs vie tout juste pour notre réussite que Dieu
vous bénisse, vous apporte de santé et vous garde pour nous.*

*A ma très chère amie et sœur Nedjma, qui a toujours été à mes cotés, et m'a beaucoup aidé
et encourager (merci beaucoup ma très chère amie) et à toute sa famille.*

A ma grande mère et mes Oncles et Tantes

A mes sœurs Linda, Wahiba, Soraya et Hakïma.

A mes frères Makhlouf, Nabil et Salah

A mes beaux frères Karim et Azdine

A ma nièce Imane et neveu Amine

A mes cousins et cousines

A toutes les familles qui portent le nom BOUALLAG et YAICI

*A mes frères et amis : Faouzi, Hamza, Said, Malek, Tahar L, Tahar A, Abbas, Mounir L,
Mounir, Djahid, Lyakout, Fayrouz, Cherif, Yassine, Houssine et Nassim*

A mon collègue de travail ANKI MASSINISSA qui je remercie profondément.

A tous mes camarades et amis (es) de la promo de génie électriques.

Et à tout ceux que je cannais

Arezki

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I : Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque</i>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Description d'un système de pompage photovoltaïque	4
I.2.1. Introduction.....	4
I.2.2. Les différents types de pompage photovoltaïque	5
I.2.3. Les différents éléments d'un système de pompage au fil de soleil.....	5
I.3. Énergie solaire photovoltaïque	6
I.3.1. Introduction.....	6
I.3.2. La cellule photovoltaïque	7
I.3.2.1. Définition de la cellule photovoltaïque	7
I.3.2.2. Histoire de la cellule photovoltaïque	7
I.3.2.3. Principe de conversion photovoltaïque.....	7
I.3.2.4. Technologies des cellules photovoltaïques.....	8
I.3.2.5. Paramètre de la cellule photovoltaïque.....	9
I.3.2.6. Association des cellules photovoltaïque.....	10
I.3.3. Module photovoltaïque.....	11
I.3.3.1. Introduction	11
I.3.3.2. Protection des modules photovoltaïques	12
I.3.3.3. Caractéristique du module photovoltaïque	13
I.3.3.4. Nécessité de fonctionnement optimal du générateur	15
I.4. Convertisseurs d'énergie.....	16
I.4.1. Convertisseur continu – continu	16
I.4.2. Convertisseur continu – alternatif.....	17
I.5. Moteur.....	17
I.5.1. Moteur à courant continu.....	17
I.5.2. Moteur à courant alternatif	18

I.6.	Pompe	20
I.6.1.	Introduction.....	20
I.6.2.	Les pompes centrifuges	20
I.6.3.	Les pompes volumétriques	21
I.7.	Conclusion	22

Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

II.1.	Introduction.....	23
II.2.	Modélisation de générateur photovoltaïque.....	23
II.2.1.	Modèles du générateur photovoltaïque.....	23
II.2.1.1.	Modèle idéal	23
II.2.1.2.	Modèle à une diode (implicite).....	25
II.2.1.3.	Modèle explicite	26
II.2.1.4.	Modèle simplifié à une diode	28
II.2.2.	Résultat et interprétation des courbes	29
II.3.	Convertisseur continu-continu (hacheur survolteur)	30
II.4.	Modélisation du convertisseur DC-AC (Onduleur).....	30
II.5.	Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	32
II.5.1.	Introduction.....	32
II.5.2.	Equations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil	32
II.5.2.1.	Equations des tensions et des flux	32
II.5.2.2.	Modèle de Park de la Machine Asynchrone	35
II.5.2.3.	Commande vectorielle de moteur asynchrone.....	37
II.5.2.4.	Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique.....	39
II.6.	Modélisation de la pompe centrifuge	39
II.7.	Conclusion	41

Chapitre III : Description des méthodes d'optimisation MPPT

III.1.	Introduction	42
III.2.	Techniques de poursuite du point de puissance maximale	43
III.2.1.	Introduction	43
III.2.2.	Algorithme perturbation et observation P&O.....	44
III.2.3.	Algorithme logique floue	46
III.2.3.1.	Introduction.....	46

III.2.3.2.	Principe et définition	46
III.2.3.3.	Définition d'un ensemble flou	47
III.2.3.4.	Operateurs sur les ensembles flous	48
III.2.3.5.	Variables linguistiques	48
III.2.3.6.	Fonctions d'appartenance	48
III.2.3.7.	Commande MPPT flou	49
III.2.4.	Algorithme neuro-flou	50
III.2.4.1.	Introduction aux réseaux de neurones.....	50
III.2.4.2.	Le neurone biologique	50
III.2.4.3.	Modélisation mathématique du neurone biologique.....	51
III.2.4.4.	Fonction d'activation	52
III.2.4.5.	Architecture des réseaux du neurone	53
III.2.4.6.	Processus d'apprentissage.....	54
III.2.4.7.	Retro-propagation du gradient	55
III.2.4.8.	Synthèses neuro-flou	55
III.2.4.9.	Principe de fonctionnement de l'algorithme neuro-flou	56
III.2.4.10.	Déférent système neuro-flou intégrés	56
III.2.4.11.	Commande MPPT neuro-flou	57
III.3.	Conclusion	57

Chapitre IV : Applications des différentes MPPT sur le système de pompage photovoltaïque

IV.1.	Introduction	58
IV.2.	Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque	58
IV.3.	Etude du système solaire avec les algorithmes MPPT.....	59
IV.2.1.	Fonctionnement sous les conditions constantes	59
IV.2.2.	Fonctionnement sous les conditions variables	72
IV.2.3.	Fonctionnement pour une journée d'été d'ensoleillement	74
IV.4.	Simulation du système de pompage photovoltaïque.....	76
IV.5.	Conclusion	83
	<i>Conclusion générale</i>	84

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les systèmes de pompage photovoltaïque

Figure (I.1) : Système de pompage photovoltaïque d'une ferme.....	4
Figure (I.2) : Principaux composants de pompage photovoltaïque au fil de soleil.....	6
Figure (I.3) Carte des irradiances solaires de l'Algérie	6
Figure (I.4) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
Figure (I.5) caractéristique I/V	10
Figure (I.6) Association de cellules identiques en série.....	10
Figure (I.7) Association de cellules identiques en parallèle.....	11
Figure (I.8) Association de cellules identiques en série parallèle	11
Figure (I.9) : Module photovoltaïque.....	12
Figure (I.10) Protection des modules photovoltaïques.....	12
Figure (I.11) Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque.....	13
Figure (I.12) Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque.....	14
Figure (I.13) Influence de la résistance série sur les caractéristiques du module Photovoltaïque	14
Figure (I.14) Caractéristiques électriques et courbes de puissance d'un module photovoltaïque pour deux conditions différentes en éclairage et en température.....	15
Figure (I.15) : Schéma d'un Hacheur parallèle (BOOST)	16

Figure (I.16) : Schéma d'un Hacheur série (BUCK)	16
Figure (I.17) : Schéma d'un Onduleur	17
Figure (I.18) Moteur à courant continu	18
Figure (I.19) : Moteur synchrone	19
Figure (I.20) : Moteur asynchrone	19
Figure (I.21) : Pompe centrifuge	21
Figure (I.22) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe centrifuge	21
Figure (I.23) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe centrifuge	21
Figure (I.24) : Pompe volumétrique	22
Figure (I.25) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe volumétrique	22
Figure (I.26) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe volumétrique.....	22

Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

Figure (II.1) Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque idéal	26
Figure (II.2) Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle à une diode (implicite).....	27
Figure (II.3) Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode	30
Figure (II.4) Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ pour les modèles avec l'expérimentale	31
Figure (II.5) Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ pour les modèles avec l'expérimentale.....	32
Figure (II.6) Circuit de l'onduleur relié à la machine	33
Figure (II.7) Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	35
Figure (II.8) Modèle de Park de moteur asynchrone	37

Chapitre III : Description des méthodes d'optimisation MPPT

Figure (III.1) Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec la commande MPPT	43
Figure (III.2) Organigramme de l'algorithme P&O (C_P est la largeur du pas de perturbation).....	44
Figure (III.3) Déviation de la méthode de perturbation et observation du point MPP.	45

Figure (III.4) Degrés d'appartenance à la classe « jeune ».....	47
Figure (III.5) Structure de base du contrôleur flou	49
Figure (III.6) Le neurone biologique.....	51
Figure (III.7) Modèle mathématique d'un neurone artificiel	52
Figure (III.8) Réseau Monocouche	53
Figure (III.9) Réseau Multicouche	53
Figure (III.10) Principe du système neuro-floue.....	56

Chapitre IV : Applications des différentes MPPPT sur le système de pompage photovoltaïque

Figure (IV.1) Allure de la tension photovoltaïque sous conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$).....	59
Figure (IV.1-a) Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)	60
Figure (IV.1-b) Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)	60
Figure (IV.2) Allure du courant photovoltaïque sous conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$).....	60
Figure (IV.3) Allure de la puissance photovoltaïque sous conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$)	61
Figure (IV.3-a) Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)	61
Figure (IV.3-b) Allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)	61
Figure (IV.4) Allure de la tension photovoltaïque sous conditions ($E_s=800\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$).....	62
Figure (IV.4.a) Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	62
Figure (IV.4.b) Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	62
Figure (IV.5) Allure du courant photovoltaïque sous conditions ($E_s=800\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$).....	63
Figure (IV.6) Allure de la puissance photovoltaïque sous conditions ($E_s=800\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$). 63	
Figure (IV.6.a) Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	63
Figure (IV.6.b) Allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	64
Figure (IV.7) Allure de la tension photovoltaïque sous conditions ($E_s=400\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$).....	64
Figure (IV.7.a) Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	65
Figure (IV.7.b) Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	65

Figure (IV.8) Allure du courant photovoltaïque sous conditions ($E_s=400\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$).....	65
Figure (IV.9) Allure de la puissance photovoltaïque sous conditions ($E_s=400\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$).....	66
Figure (IV.9.a) Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	66
Figure (IV.9.b) Allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	66
Figure (IV.10) Allure de la tension photovoltaïque sous conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=15^\circ\text{C}$)	67
Figure (IV.10.a) Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	67
Figure (IV.10.b) Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	68
Figure (IV.11) Allure de la puissance photovoltaïque sous conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=15^\circ\text{C}$)	68
Figure (IV.11.a) Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	68
Figure (IV.11.b) Allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	69
Figure (IV.12) Allure de la tension photovoltaïque sous conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=45^\circ\text{C}$)	69
Figure (IV.12.a) Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	69
Figure (IV.12.b) Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	70
Figure (IV.13) Allure de la puissance photovoltaïque sous conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=45^\circ\text{C}$)	70
Figure (IV.13.a) Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1).....	71
Figure (IV.13.b) Allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2).....	71
Figure (IV.14) Allure de la consigne de l'insolation dans le cas d'un changement rapide..	72
Figure (IV.15) Allure de la tension photovoltaïque dans le cas d'un changement rapide de l'insolation	72
Figure (IV.16) Allure du courant photovoltaïque dans le cas d'un changement rapide de l'insolation	73
Figure (IV.17) Allure de la puissance photovoltaïque dans le cas d'un changement rapide de l'insolation	73

Figure (IV.18) Allure de la tension pour un profil d'une journée d'été.....	74
Figure (IV.19) Allure du courant pour un profil d'une journée d'été.....	74
Figure (IV.20) Allure de la puissance pour un profil d'une journée d'été.....	74
Figure (IV.21) Allure de vitesse pour le profil d'une journée	75
Figure (IV.22) Allure de débit pour le profil d'une journée	75
Figure (IV.23) Caractéristique $Q=f(E_s)$	75
Figure (IV.24) Schéma global de système de pompage photovoltaïque.....	76
Figure (IV.25) Caractéristique $P_{pv}=f(t)$	77
Figure (IV.26) Caractéristique $\Omega=f(t)$	77
Figure (IV.27) Caractéristique $I_{sq}=f(t)$	78
Figure (IV.28) Caractéristique $I_{sd}=f(t)$	78
Figure (IV.29) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode P&O.....	78
Figure (IV.30) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode NF.....	79
Figure (IV.31) Caractéristique $\phi=f(t)$	79
Figure (IV.32) Caractéristique $C_m=f(t)$	79
Figure (IV.33) Caractéristique $Q=f(t)$	80
Figure (IV.34) Caractéristique $P_{pv}=f(t)$	80
Figure (IV.35) Caractéristique $\Omega=f(t)$	80
Figure (IV.36) Caractéristique $I_{sq}=f(t)$	81
Figure (IV.37) Caractéristique $I_{sd}=f(t)$	81
Figure (IV.38) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode P&O.....	81
Figure (IV.39) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode NF.....	82
Figure (IV.40) Caractéristique $\phi=f(t)$	82
Figure (IV.41) Caractéristique $C_m=f(t)$	82
Figure (IV.42) Caractéristique $Q=f(t)$	83

Nomenclatureur

C_{em}	Couple électromagnétique (N.m)
E_g	Energie de gap (eV)
E_{ref}	Ensoleillement de référence. ($E_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$)
E_s	Ensoleillement (W/m^2)
H_g	Hauteur géométrique (m)
I_{Rsh}	Courant passant par la résistance shunt. (A)
I_D	Courant de la diode. (A)
I_{mpp}	Courant optimum (au point de puissance maximale) (A)
I_{ph}	Courant produit par la photopile. (A)
$I_{PV,nouv}$	Représente la nouvelle valeur de la tension après la correction. (A)
I_{PV}	Courant photovoltaïque. (A)
I_{rd}, I_{rq}	Courant statorique direct et quadratique. (A)
I_s	Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation. (A)
I_{sabc}, I_{rabc}	Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique. (A)
$I_{sc,stc}$	Représente le courant photovoltaïque dans les conditions standard. (A)
I_{sc}	Le courant de court-circuit. (A)
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique direct et quadratique. (A)

L_r, M_r	Les inductances propres et mutuelles rotorique (H)
L_s, L_r	Inductance cyclique statorique et rotorique. (H)
l_s, l_r	Inductance de fuite statorique et rotorique. (H)
L_s, M_s	Les inductances propres et mutuelles statorique. (H)
M_{sr}	L'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor. (H)
$O_{m,i}^L$	Composante de la sortie réelle du nœud (L, m) pour l'exemple (i)
P_1, P_2, P_3, P_4	Paramètres constants
P_c	Les pertes de charges dans les canalisations (w)
P_n	Puissance nominale du moteur asynchrone(W).
P_n	Vitesse du moteur asynchrone (rad/s)
R_s	Résistance série est due aux pertes joule (Ω)
R_s, R_r	Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique. (Ω)
R_{sh}	Résistance shunt est due à courant de fuite (Ω)
T_a	Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)
T_j	Température de jonction (K).
$T_{m,i}$	Composante de la sortie désirée du nœud (L, m) pour l'exemple (i)
T_{ref}	Température de référence des panneaux ($T_{jref} = 25^{\circ}\text{C}$)
V_{co}	La tension en circuit ouvert. (V)
V_{mpp}	Tension optimale (au point de puissance maximale). (V)
V_{PV}	Tension photovoltaïque. (V)
V_{sabc}, V_{rabc}	Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique. (V)

V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique direct et quadratique. (V)
$W_{i,j}$	Représente les poids du neurone
α_{sc}	Représente un coefficient d'incrémentatation du courant I_{sc} (mA/°C)
β_{oc}	Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension V_{oc} (mV/°C)
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Flux rotorique direct et quadratique. (Wb)
Φ_{sabc}, Φ_{rabc}	Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique. (Wb)
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Flux rotorique direct et quadratique. (Wb)
ω_n	Vitesse nominale du moteur asynchrone. (rad /s)
ω_s, ω_r	Vitesse statorique rotorique. (rad /s)
n_{k-1}	Nombre de nœuds dans la couche ($k-1$)
μ_A	Fonction d'appartenance
A	Facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).
AC	Alternatif courant
ANFIS	Adaptive Network Fuzzy Inference System
CFL	Contrôleur fuzzy logique
D et d_c	Longueur et diamètre de la canalisation. (m)
DC	Direct courant
FF	Le facteur de forme
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2)
HMT	Hauteur manométrique totale. (m)
K	Constante de Boltzmann. $K = 1,38. 10^{-23} J/k$
M	Inductance mutuelle. (H)

MPP	Point de puissance maximum
MPPT	Maximum power point tracking
NF	Neuro-floue
P	Nombres d'exemples à apprendre
P&O	Perturbation et observation
PV	Panneau photovoltaïque
q	Charge d'un électron. $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$
S	Surface génératrice en m^2
ΔI	Représente la variation du courant. (A)
ΔT	Représente la variation de la température. ($^{\circ}\text{C}$)
ΔV	Représente la variation de la tension. (V)
η	Le rendement de conversion d'énergie
λ	Coefficient de régulation de la pression dans la canalisation
ξ	Coefficient des pertes de pression locales dans les différentes connexions de la canalisation
Ω	Vitesse mécanique. (rad/s)

Introduction générale

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles, qui mènent à leurs épuisements et leur détérioration tant que la demande d'énergie est en plus croissance. Pour ce là les énergies renouvelables prend leur place pour assurer la continuité de la production d'énergie. L'énergie solaire photovoltaïque avait dessiné l'intérêt croissant ces dernières années comme une importante alternative des sources d'énergie à l'avenir. [PET09]

Initialement, le développement de cette technologie s'est développé avec la volonté des entreprises des télécommunications d'installer des systèmes fonctionnant dans des endroits éloignés des centres urbains (et donc des réseaux électriques). Le deuxième booster a été la « course à l'espace ». La cellule solaire a été et reste le meilleur moyen (à moindre coût et le poids) de fournir la quantité d'énergie requise pendant de longues périodes de séjour dans l'espace, et la crise énergétique de 1973 a renouvelé et a élargi l'intérêt pour les applications terrestres. Enfin, ces dernières années, on s'intéresse à l'approvisionnement en eau potable, car beaucoup des 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. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque représente la solution idéale, qui permet également l'approvisionnement de l'eau potable des communautés et des troupeaux, à partir de puits ou de nappes d'eau éloignés d'une source électrique. [BEN08]

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par Edmond Becquerel en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière.

Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque, autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque étaient appliqués, et des techniques étaient suivies pour avoir une bonne adaptation et un rendement élevé.

En effet, du fait du caractère non linéaire de la caractéristique des panneaux photovoltaïques, leur tension dépend fortement de la charge connectée. Pour corriger ce problème, des dispositifs MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettent aux panneaux de fonctionner dans des conditions optimales et ainsi d'extraire le maximum de puissance. La comparaison entre ces techniques est fixée comme objectif en première étape, ensuite une contribution d'amélioration est proposée.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du système de pompage photovoltaïque. On présente d'une manière brève le système et le principe de conversion photovoltaïque, et l'influence des différents paramètres climatiques. Puis une brève définition des deux convertisseurs (DC-DC et DC-AC), et le groupe motopompe. A la fin de ce chapitre on n'a fait le choix des éléments utilisés pour notre étude.

Ensuite, la modélisation des différents éléments de la chaîne de pompage. On a commencé par le générateur photovoltaïque puis l'hacheur élévateur et l'onduleur, enfin on a modélisé le groupe motopompe.

Dans le troisième chapitre on va opter aux descriptions des méthodes d'optimisation MPPT, ici on représente trois méthodes d'optimisation on commence par l'algorithme perturbation et observation (P&O), la logique floue et l'algorithme neuro-floue.

Dans le dernier chapitre sera consacré au dimensionnement du système de pompage et l'interprétation des résultats de simulation.

On termine notre par une conclusion générale, dans laquelle nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque

I.1. Introduction

Aujourd'hui, l'industrie mondiale repose essentiellement sur les besoins des régions isolées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Pour cela la meilleure solution est apportée par le photovoltaïque. [ZAR10]

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables. Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en trois catégories: autonome, raccordé au réseau et systèmes hybrides. Pour les endroits qui sont loin du système de production d'électricité conventionnel, des systèmes autonomes d'alimentation en énergie photovoltaïque ont été considérés comme une meilleure alternative. [CAR93]

Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques :

- **Les avantages : [LAL05]**
 - ✓ Energie indépendante.
 - ✓ Le combustible est gratuit (le rayonnement solaire).
 - ✓ Entretien minimal.
 - ✓ Génère l'énergie requise.
 - ✓ Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
 - ✓ Aucun bruit.
 - ✓ Non polluant.
 - ✓ L'extension des systèmes est facile.

➤ **Les inconvénients : [ZID11]**

- ✓ Le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle.
- ✓ Ils sont dépendants des conditions météorologiques.
- ✓ Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation.

I.2. Description d'un système de pompage photovoltaïque

I.2.1. Introduction

Parmi ces avantages importants de la conversion photovoltaïque, nous pouvons citer, la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées comme le prouve déjà les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie de fonctionnement.

Un des systèmes photovoltaïques les plus intéressants du point de vue facilité d'installation et utilité et d'autre part autonomie et fiabilité est le système de pompage photovoltaïque comme le montre la Figure (I.1). Ce système là est très utilisé dans les zones rurales et les sites isolés pour le pompage de l'eau.

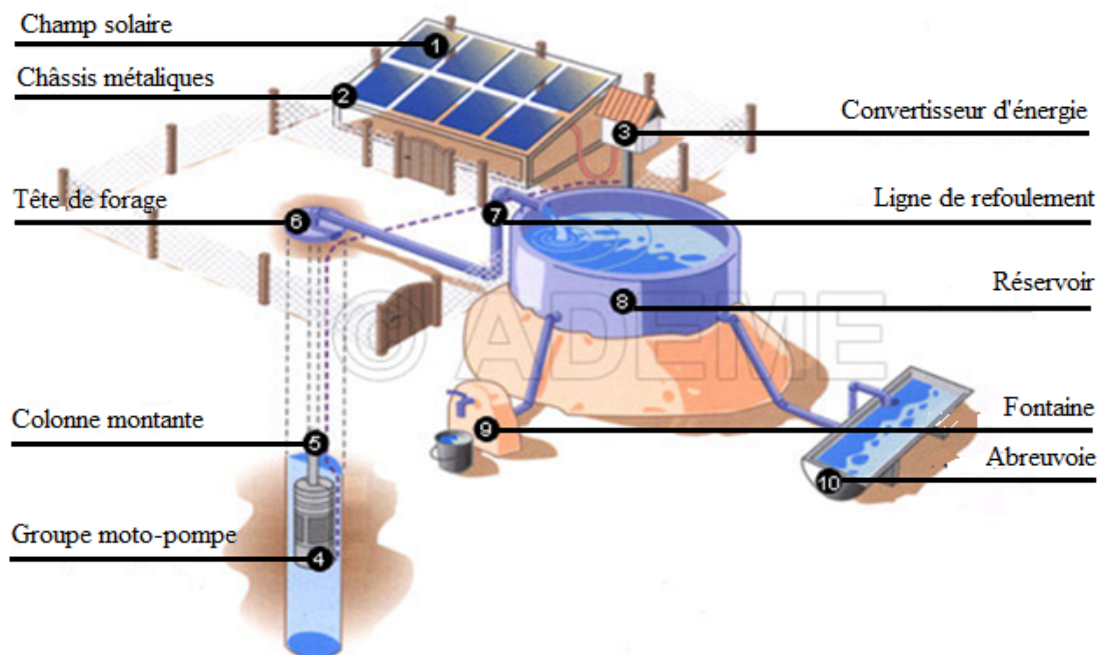


Figure (I.1) : Système de pompage photovoltaïque d'une ferme. [SPO]

I.2.2. Les différents types de pompage photovoltaïque [HAD04]

Les différences entre les types de pompage photovoltaïque résident dans la source d'où provient l'eau (rivière, puits, fourrage...) et dans le mode de fonctionnement de l'installation (sur batteries ou au fil du soleil).

A. Le pompage au fil de soleil :

Le pompage au fil du soleil, ce qui va être l'objet de notre travail, consiste à alimenter une pompe directement par des modules photovoltaïques :

- ✓ Quand le rayonnement solaire est suffisant, la pompe est mise en route,
- ✓ La nuit ou quand le rayonnement devient trop faible, la pompe s'arrête.

B. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

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

- ✓ Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement;
- ✓ La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique ;

I.2.3. Les différents éléments d'un système de pompage au fil de soleil [BOU02]

Un système de pompage au fil du soleil nécessite plusieurs composants comme le montre la figure (I.2) :

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

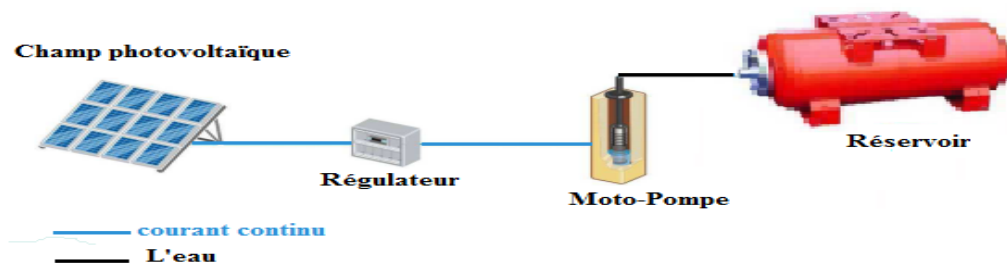


Figure (I.2) : Principaux composants de pompage photovoltaïque au fil de soleil. [BOU02]

I.3. Énergie solaire photovoltaïque

I.3.1. Introduction

Depuis la nuit des temps, l'être humain a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface de la terre malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère. La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à 90.10^{15} GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que 180.10^6 GW. Cette énergie est de l'ordre de 1000 W/m^2 dans les zones tempérées, et atteint 1400 W/m^2 dans les zones où l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en chargée d'eau. [ZAR10]

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires.

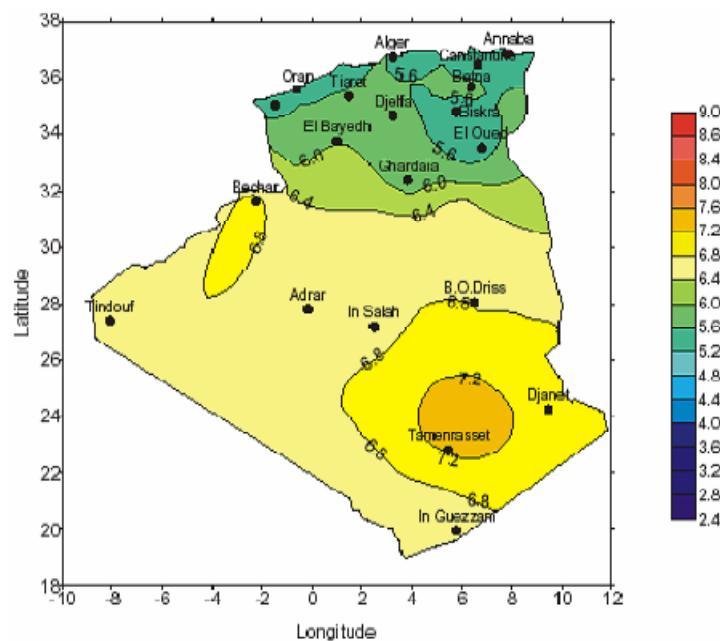


Figure (I.3) Carte des irradiations solaires de l'Algérie. [ZAR10]

I.3.2. La cellule photovoltaïque

I.3.2.1. Définition de la cellule photovoltaïque [MOH10]

Une cellule photovoltaïque ou la photopile est l'élément de base de la conversion photovoltaïque, elle est assimilable à une diode sensible aux photons de la lumière, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs qui convertit la lumière en énergie électrique.

I.3.2.2. Histoire de la cellule photovoltaïque [MOH10]

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **1839** : Le physicien français EDMOND BECQUEREL découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875** : WERNER VON SIEMENS expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954** : Trois chercheurs américains, CHAPIN, PEARSON et PRINCE, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

I.3.2.3. Principe de conversion photovoltaïque [LEA06]

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique, basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite arrache un électron, qui passe de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou. Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se reposer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée, engendrant ainsi une paire électron-trou. 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 apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **n** rejoignent les trous de la zone **p** via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.

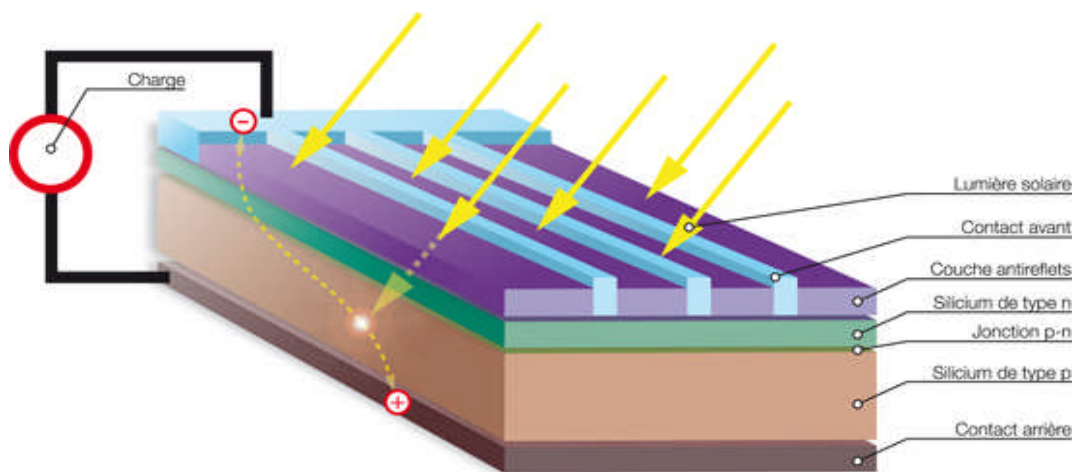


Figure (I.4) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [PHOT]

I.3.2.4. Technologies des cellules photovoltaïques [BOU10]

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et de développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

- **Cellules photovoltaïques monocristallines** sont les photopiles de la première génération. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.

- **Cellules photovoltaïques poly-cristallines** sont élaborées à partir d'un silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.
- **Cellules photovoltaïques amorphes** ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

I.3.2.5. Paramètre de la cellule photovoltaïque [BEN07]

La cellule photovoltaïque est caractérisée par les paramètres suivants

- **Le courant de court-circuit I_{sc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **La tension en circuit ouvert V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Le facteur de forme FF** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{co}} \quad (I.1)$$

- **Le rendement de conversion d'énergie η** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

$$\eta = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{E_s \cdot S} \quad (I.2)$$

Avec :

- I_{mpp} Courant optimum (au point de puissance maximale) (A)
- V_{mpp} Tension optimale (au point de puissance maximale) (V)
- E_s Ensoleillement en W/m^2
- S Surface génératrice en m^2

- **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.5)

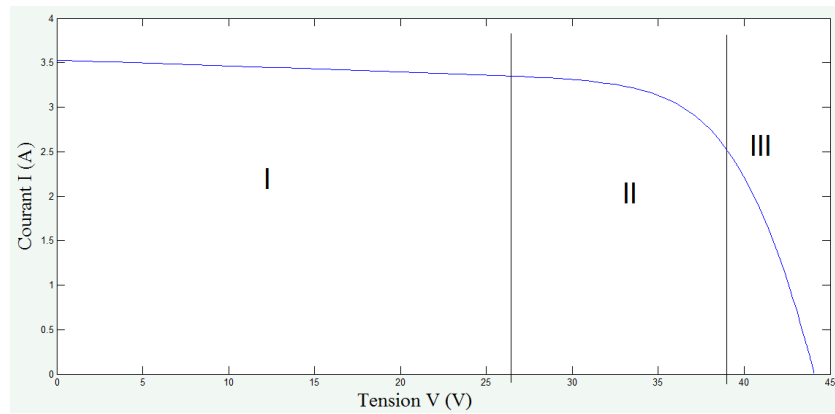
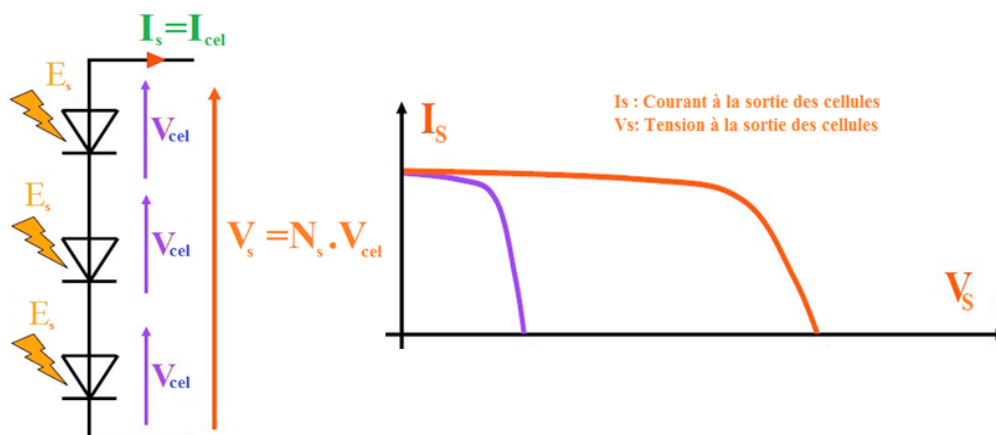


Figure (I.5) caractéristique I/V

- Zone (I) : La cellule se comporte comme un générateur de courant.
- Zone (II) : La zone de fonctionnement optimal.
- Zone (III) : La cellule se comporte comme un générateur de tension.

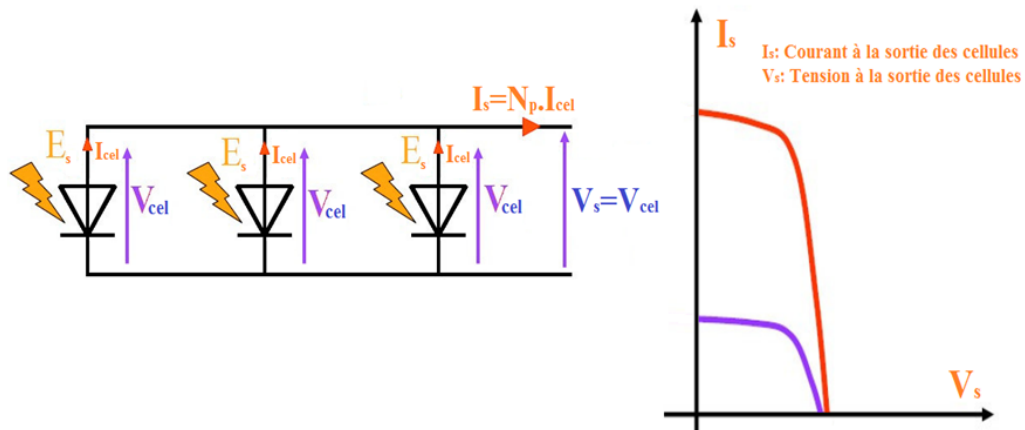
I.3.2.6. Association des cellules photovoltaïques [KAT06]

Il est possible de relier des cellules en série pour augmenter la tension, en parallèle pour augmenter le courant et en série parallèle pour augmenter les deux paramètres simultanément. Dans tous les cas, la puissance électrique augmente avec le nombre de cellules qui sont généralement identiques pour faciliter les processus industriels et optimiser le rendement des capteurs.



Assemblage en série : un courant unique limité par la diode la moins éclairée

Figure (I.6) Association de cellules identiques en série.



Assemblage en parallèle : une tension unique limité par la diode la moins éclairée

Figure (I.7) Association de cellules identiques en parallèle

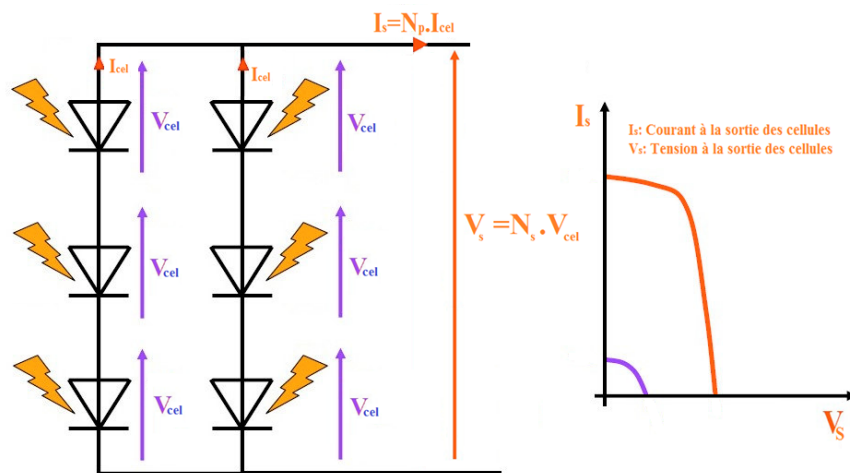


Figure (I.8) Association de cellules identiques en série parallèle

I.3.3. Module photovoltaïque

I.3.3.1. Introduction [BEL08]

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (ETHYLENE-VYNIL- ACETATE) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

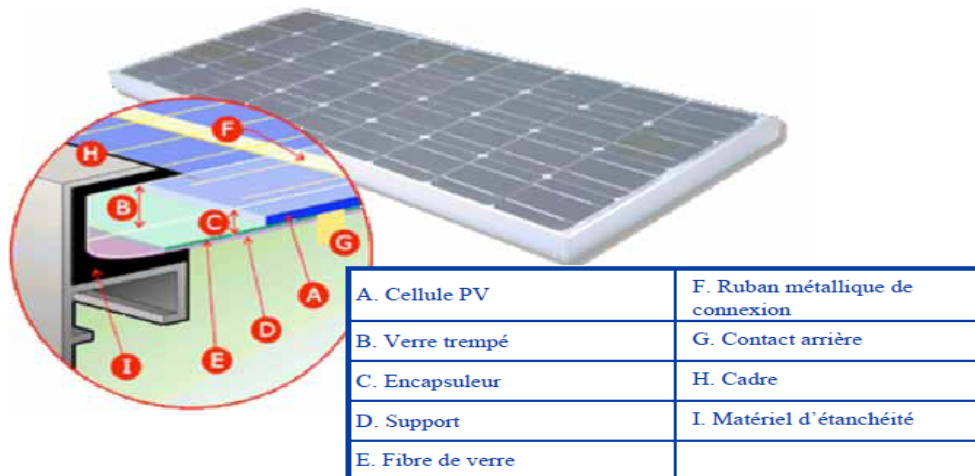


Figure (I.9) : Module photovoltaïque. [BEL08]

I.3.3.2. Protection des modules photovoltaïques [BOU10]

Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défailante.

Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode by-pass qui se place en dérivation de la cellule pour ne pas limiter le courant en situation de déséquilibre.

De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure des photodiodes quasiment incapables de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui. Les diodes anti-retour et by-pass provoquent une chute de potentiel de 0,6V environ qu'il faut prendre en compte dans le rendement des modules.

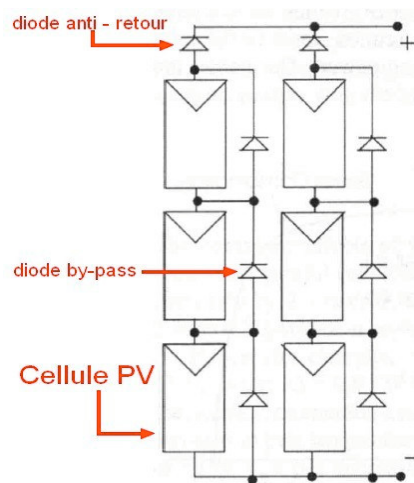


Figure (I.10) Protection des modules photovoltaïques

I.3.3.3. Caractéristique du module photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque dépend des conditions d'ensoleillement et de la température. Les courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque représentent la variation du courant qu'elle produise en fonction de la tension à ces bornes, depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

A. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

La figure (I.11) montre l'influence de la température sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension.

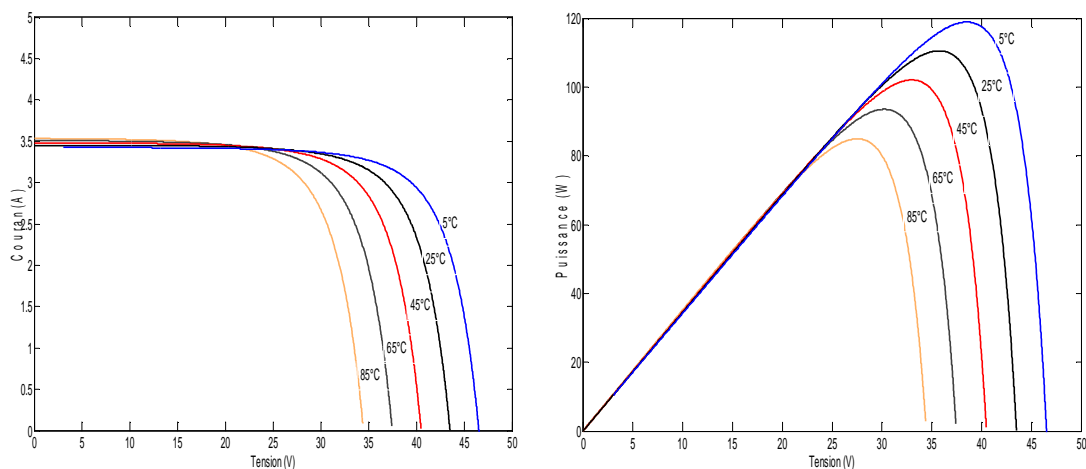


Figure (I.11) Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur. Lorsque la température augmente, la tension de circuit ouvert diminue. Par contre le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température.

Cela se traduit par une baisse de puissance. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

B. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

La figure (I.12) montre l'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension.

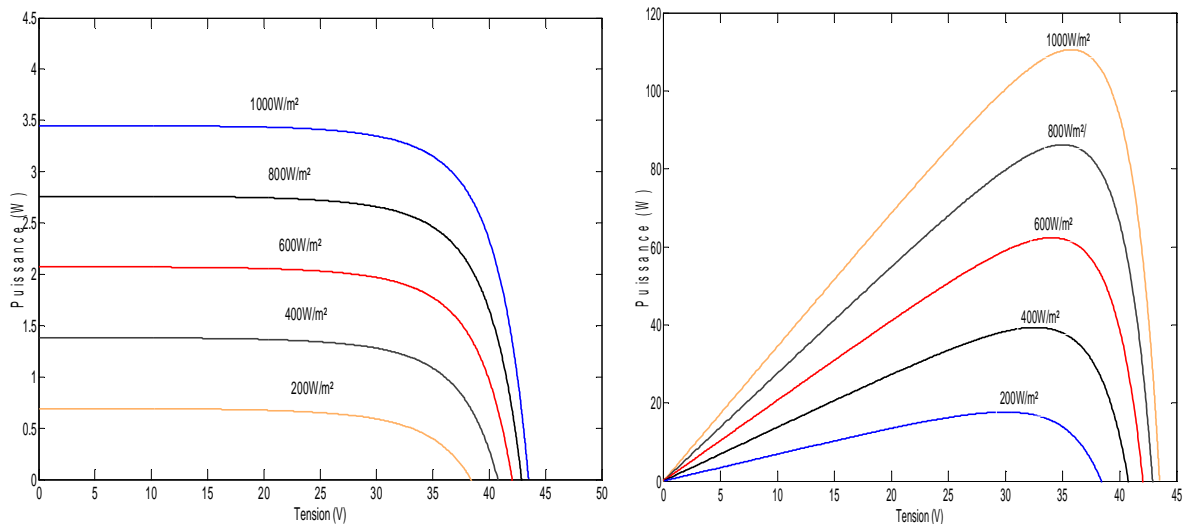


Figure (I.12) Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Contrairement à la variation de la température, la variation de l'ensoleillement influe sur le courant de court-circuit qui diminue quand l'ensoleillement diminue, par contre la tension à circuit ouvert est peu sensible à cette variation, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

C. Influence de la résistance série

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que R_s est grande. La figure (I.13) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où le panneau fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par le panneau.

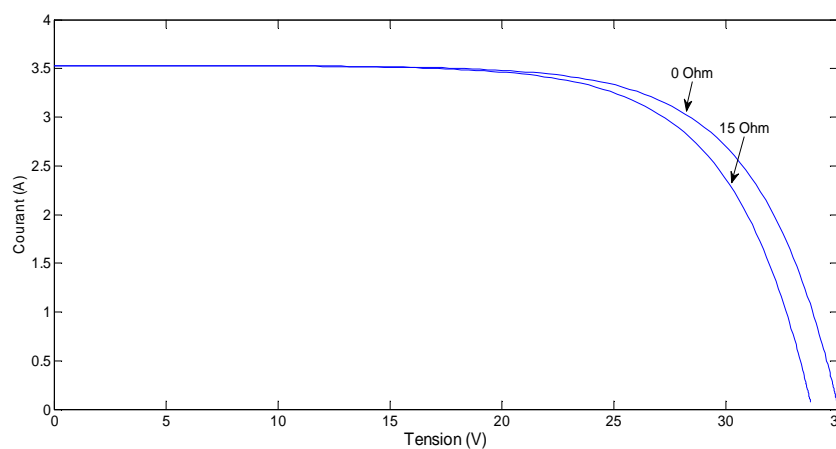


Figure (I.13) Influence de la résistance série sur les caractéristiques du module photovoltaïque

I.3.4. Nécessité de fonctionnement optimal du générateur [BOU08]

La génération d'énergie photovoltaïque prend l'importance accrue comme source renouvelable due aux avantages tels que l'absence du coût du carburant, minimum d'entretien et l'absence des pièces mobiles. Cependant deux facteurs importants limitent l'implantation des systèmes photovoltaïques (le coût et le faible rendement de conversion d'énergie). En raison du coût élevé des cellules solaires, il est nécessaire de faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximum (MPP).

Etant donné que le générateur photovoltaïque est une source d'énergie non linéaire, la puissance de sortie dépend de la tension de charge et des conditions atmosphériques, qui sont imprévisibles. Afin d'optimiser le rapport entre la puissance de sortie et le coût d'installation, les systèmes photovoltaïques sont censés d'utiliser le maximum de puissance du générateur photovoltaïque et d'une manière continue, indépendamment des conditions atmosphériques ou de la tension de charge. Les suiveurs de point de puissance maximale des systèmes font fonctionner le générateur photovoltaïque de sorte que la puissance maximum puisse être obtenue.

La recherche du point de puissance maximum est le travail essentiel dans l'optimisation des systèmes photovoltaïques car il y a un problème d'adaptation entre les caractéristiques de charge et le point de puissance maximum du générateur photovoltaïque. L'optimisation traite les paramètres électriques de fonctionnement du générateur solaire.

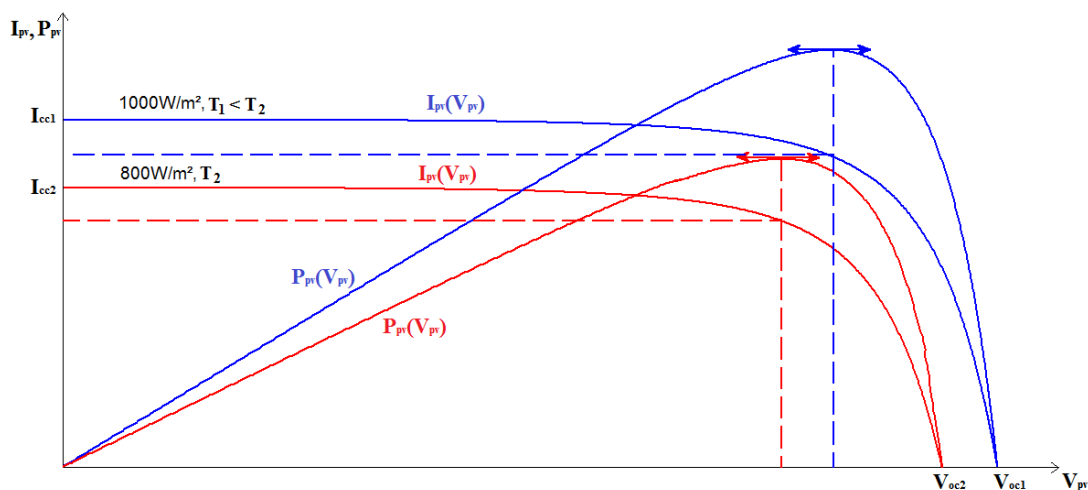


Figure (I.14) Caractéristiques électriques et courbes de puissance d'un module photovoltaïque pour deux conditions différentes en éclairement et en température

I.4. Convertisseurs d'énergie

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement entre le champ PV et la charge.

I.4.1. Convertisseur continu - continu

Le **HACHEUR** ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence élevée. C'est l'analogue, pour les sources de tensions continues, du transformateur utilisé en régime alternatif. [LOU09]

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (BUCK). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (BOOST).

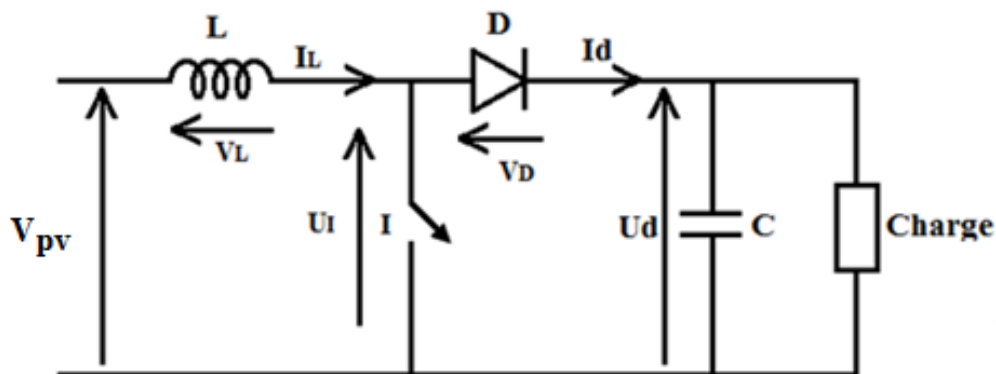


Figure (I.15) : Schéma d'un Hacheur parallèle (BOOST). [LOU09]

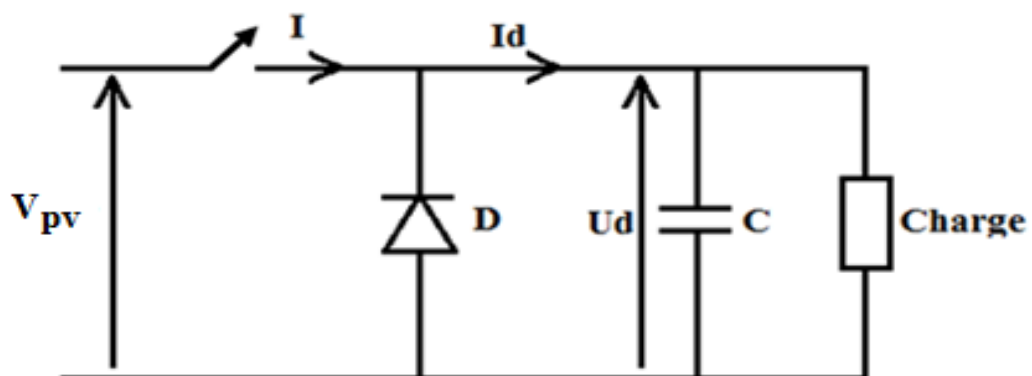


Figure (I.16) : Schéma d'un Hacheur série (BUCK). [LOU09]

I.4.2. Convertisseur continu - alternatif

Un **ONDULEUR** est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur de type continu/alternatif.

- ✓ Onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner.
- ✓ Onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de GRAËTZ) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé.

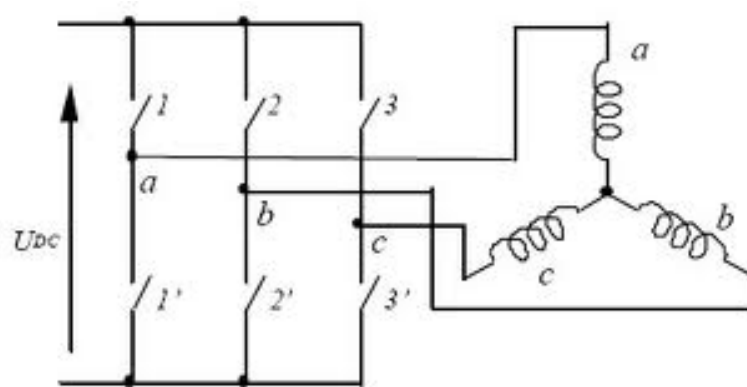


Figure (I.17) : Schéma d'un Onduleur. [SFU]

I.5. Moteur

Une machine électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en travail ou énergie mécanique. La plupart des machines électriques fonctionnent grâce au magnétisme. Les machines électriques produisant une énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont appelées dynamos, alternateurs ou générateurs suivant la technologie utilisée. Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont appelées des moteurs. Toutes les machines électriques étant réversibles, la distinction moteur/générateur ne se fait que sur l'usage final de la machine.

I.5.1. Moteur à courant continu [WIKMCC]

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. Ils présentent l'avantage d'être très facilement commandés en régime de vitesse variable et se rencontrent dans la plupart des servomoteurs utilisés pour des fonctionnements de faible puissance (inférieure à 5 kW).

Les moteurs à courant continu comportent un induit et un inducteur. Si l'induit est généralement constitué de bobinages en cuivre, l'inducteur peut être réalisé soit avec des bobinages en cuivre, soit avec des aimants permanents.

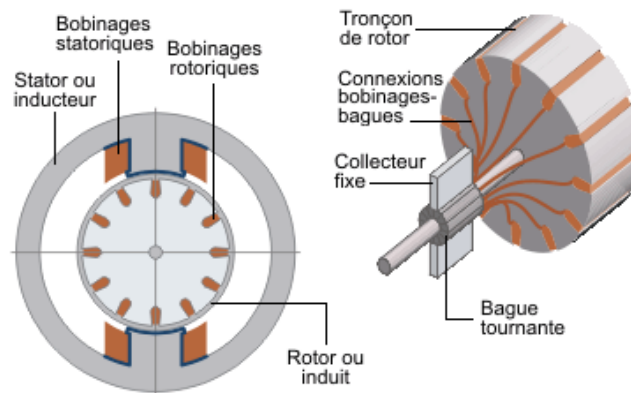


Figure (I.18) Moteur à courant continu. [EPL]

I.5.2. Moteur à courant alternatif [WICME]

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilowatts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs alternatifs sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en trois types :

A. Les moteurs universels [WIKME]

Un moteur universel est un moteur électrique fonctionnant sur le même principe qu'une machine à courant continu à excitation série : le rotor est connecté en série avec l'enroulement inducteur. Le couple de cette machine indépendant du sens de circulation du courant est proportionnel au carré de son intensité. Il peut donc être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, d'où son nom. Pour limiter les courants de Foucault qui apparaissent systématiquement dans toutes les zones métalliques massives soumises à des champs magnétiques alternatifs, son stator et son rotor sont feuilletés.

Dans la pratique, ces moteurs ont un mauvais rendement, mais un coût de fabrication très réduit. Leur couple est faible, mais leur vitesse de rotation est importante. Quand ils sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple important, ils sont associés à un réducteur mécanique.

B. Les moteurs synchrones [WIKMS]

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors alternateur. Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation.

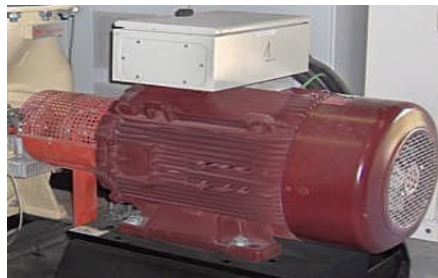


Figure (I.19) : Moteur synchrone. [HEL]

C. Les moteurs asynchrones [WIKMAS]

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), de l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.



Figure (I.20) : Moteur asynchrone. [DIME]

I.6. Pompe

I.6.1. Introduction

Une pompe est un dispositif mécanique permettant d'aspirer et de refouler un fluide. On peut classer les pompes de plusieurs façons : [BOU08]

- Les mouvements retransmis aux organes des pompes sont comme tous les mouvements mécaniques de deux grands types :
 - Rotatif
 - Rectiligne (alternatif)
- Le mode de déplacement du fluide au travers des pièces en mouvement de la pompe et leur fonction permet de classer les pompes en plusieurs familles :
 - Pompes de transfert
 - ✓ Pompe rotative - axiale.
 - ✓ Pompe rotative - centrifuge.
 - Pompes de dosage
 - ✓ Pompe rotative - volumétrique.
 - ✓ Pompe alternative - volumétrique.
 - ✓ Pompes à queue.

I.6.2. Les pompes centrifuges : [THI07]

A. Définition

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 si fonctionnement à sec.
- Peuvent être immergées ou de surface.

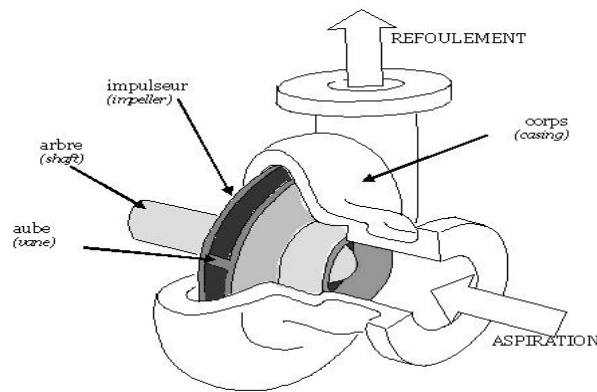


Figure (I.21) : Pompe centrifuge. [WIK]

B. La caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse

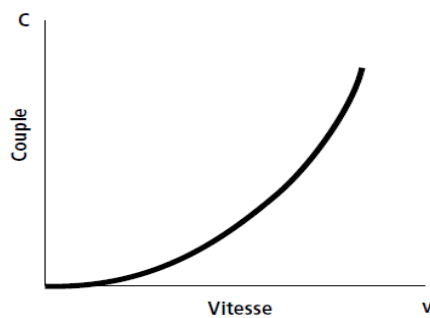


Figure (I.22) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe centrifuge

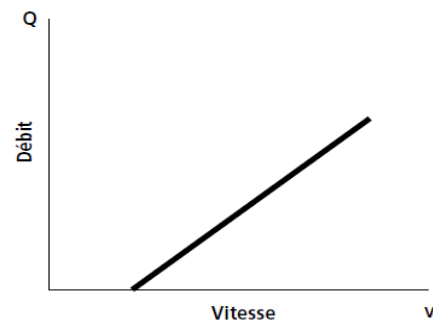


Figure (I.23) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe centrifuge

- Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse. [ROY98]
- Le débit est proportionnel à la vitesse ; toutefois il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit. [ROY98]

I.6.3. Les pompes volumétriques : [THI07]

A. Définition :

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. Leurs principaux atouts sont les suivants :

- ✓ Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes 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 à 5 fois le couple nominal).

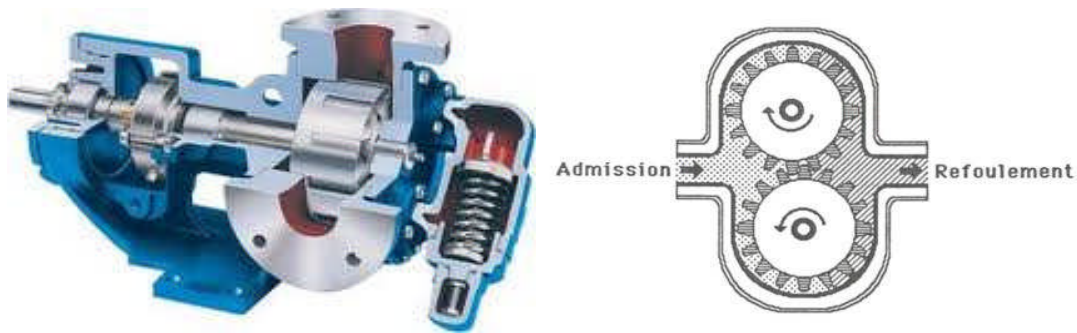


Figure (I.24) : Pompe volumétrique. [BOU08].

B. La caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :

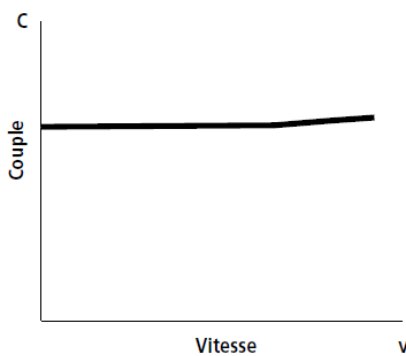


Figure (I.25) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe volumétrique

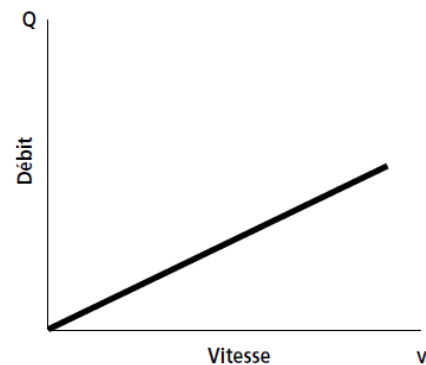


Figure (I.26) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe volumétrique

- Le couple est pratiquement constant en fonction de la vitesse. [ROY98]
- Le débit est proportionnel à la vitesse. [ROY98]

I.7. Conclusion

Précédemment, on a vu que pour avoir un système de pompage photovoltaïque, il nous faut plusieurs éléments. Les plus essentiels sont : les panneaux photovoltaïques, le convertisseur, la motopompe et une source d'eau, et notre choix se porte sur :

- Des panneaux photovoltaïques;
- Un moteur asynchrone car il est moins cher sur le marché et plus robuste ;
- Une pompe centrifuge car elle est conçue pour une HMT relativement fixe. Le débit de cette pompe varie proportionnellement par rapport à la vitesse de rotation du moteur;
- Un étage d'adaptation continu/continu pour assurer un fonctionnement au point de puissance maximale;
- Un onduleur pour faire la conversion de courant continu vers le courant alternatif ;

Chapitre II

Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, il sera présenté les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques bien détaillés qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque, afin de prévoir son comportement. En représentant en premier lieu les modèles électriques d'un générateur PV et sa modélisation, le modèle de l'hacheur BOOST et de l'onduleur, la modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil et de la pompe centrifuge.

II.2. Modélisation de générateur photovoltaïque : [LOU09]

Nous rencontrons 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 final du générateur photovoltaïque.

II.2.1. Modèles du générateur photovoltaïque

II.2.1.1. Modèle idéal

Ce modèle ne tient pas compte des pertes ohmiques et des courants parasites, ce modèle se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. Comme le montre la figure (II.1)

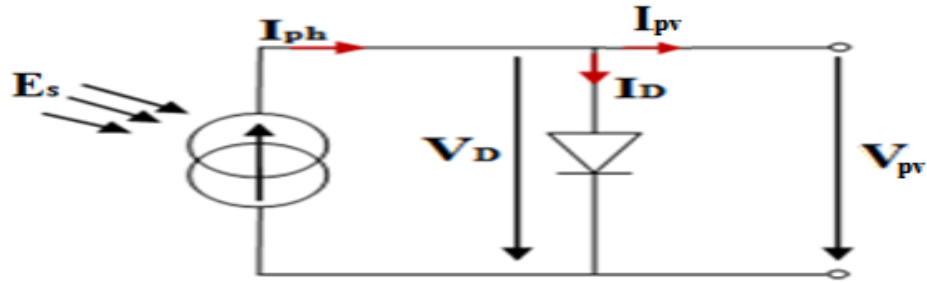


Figure (II.1) Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque idéal.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par la loi de KIRCHHOFF :

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

Avec :

$$I_D = I_s \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot V_{PV}}{A k T_j} \right)} - 1 \right) \quad (II.2)$$

Donc :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot V_{PV}}{A k T_j} \right)} - 1 \right) \quad (II.3)$$

Avec :

I_{PV}	Courant photovoltaïque. (A)
I_{ph}	Courant produit par la photopile. (A)
I_D	Courant de la diode. (A)
V_{PV}	Tension photovoltaïque. (V)
I_s	Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation. (A)
K	Constante de Boltzmann. $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/k}$
T_j	Température de jonction (K).
q	Charge d'un électron. $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$
A	Facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).

➤ **Tension de circuit ouvert V_{co} :**

$$I = 0 = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot V_{co}}{A k T_j} \right)} - 1 \right)$$

$$V_{co} = \frac{A k T_j}{q} \cdot \text{Ln} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (II.4)$$

II.2.1.2. Modèle à une diode (implicite) : [LOU09]

Le modèle le plus simple d'un générateur photovoltaïque est représenté comme un circuit équivalent qui se compose d'une source de courant idéale en parallèle avec une diode idéale. La source de courant représentant le courant généré par les photons, et sa sortie est constante à une température constante et le rayonnement incident de la lumière constante.

Le circuit équivalent de modèle (figure II.2) est constitué d'une diode unique pour les phénomènes de polarisation de cellules et deux résistances en série et shunt pour les pertes.

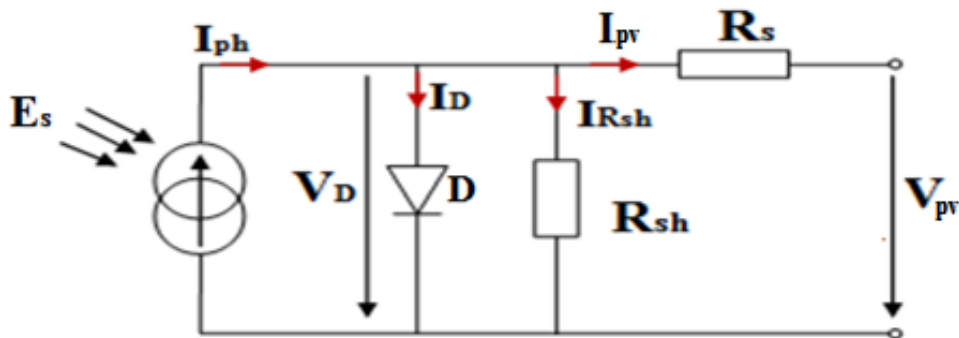


Figure (II.2) Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle à une diode (implicite).

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par la loi de KIRCHHOFF :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \tag{II.5}$$

Avec :

$$I_D = I_s \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{A k T_j} \right)} - 1 \right) \tag{II.6}$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \tag{II.7}$$

Donc :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{A k T_j} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \tag{II.8}$$

Avec :

- I_{Rsh} Courant passant par la résistance shunt. (A)
- R_s Résistance série est due aux pertes joule (Ω)
- R_{sh} Résistance shunt est due à courant de fuite (Ω)

Le courant I_{ph} est dépend des rayonnements solaires E_s et de la température de la cellule T_j , est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 - P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] \quad (II.9)$$

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left(\frac{N_{oct}-20}{800}\right) \quad (II.10)$$

Le courant de saturation est donné par l'expression suivante :

$$I_s = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right)} \quad (II.11)$$

Donc :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 - P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right)} \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{A k T_j}\right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

Avec :

P_1, P_2, P_3, P_4	Paramètres constants
E_g	Energie de gap
E_{ref}	Ensoleillement de référence. ($E_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$)
E_s	Ensoleillement. (W/m^2)
T_a	Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ref}	Température de référence des panneaux ($T_{jref} = 25^{\circ}\text{C}$)

Les paramètres pour un panneau de puissance $P_{PV} = 110W_c$ sont donnés dans **le tableau 1 l'annexe 1**

II.2.1.3. Modèle explicite : [LOU09]

Ce modèle nécessite les données de quatre paramètres (I_{sc}, V_{oc}, I_m, V_m), la relation entre le courant I_{PV} et la tension V_{PV} est donné par l'équation :

$$I_{PV} = I_{sc} \cdot [1 - C_1 \cdot (e^{\frac{V_{PV}}{C_2 \cdot V_{oc}}} - 1)] \quad (II.13)$$

Où :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}}\right) \cdot e^{\left(\frac{V_{PV}}{C_2 \cdot V_{oc}}\right)} \quad (II.14)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mpp}-1}{V_{oc}}}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)} \quad (II.15)$$

$$\Delta T = T_j - T_{ref} \quad (II.16)$$

La température de jonction de la cellule est donnée par la relation (II.10).

La courbe I-V est essentiellement affectée par la variation de deux entrées (le rayonnement solaire et la température). L'adaptation de l'équation (II.13) pour différents niveaux de l'insolation et la température peuvent être traitée par les équations suivantes :

$$\Delta I = \alpha_{sc} \cdot \left(\frac{E_s}{E_{ref}}\right) \cdot \Delta T + \left(\frac{E_s}{E_{ref}} - 1\right) \cdot I_{sc} \quad (II.17)$$

$$\Delta V = -\beta_{oc} \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (II.18)$$

Les nouvelles valeurs de la tension et de courant photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{pv,nouv} = V_{PV} + \Delta V \quad (II.19)$$

$$I_{pv,nouv} = I_{PV} + \Delta I \quad (II.20)$$

Avec :

I_{mpp}	Courant maximal. (A)
$I_{PV,nouv}$	Représente la nouvelle valeur de la tension après la correction. (A)
$I_{sc,sc}$	Représente le courant photovoltaïque dans les conditions standard.
V_{mpp}	Tension maximale. (V)
$V_{PV,nouv}$	Représente la nouvelle valeur de la tension après la correction. (V)
α_{sc}	Représente un coefficient d'incrémentatation du courant I_{sc}
β_{oc}	Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension V_{oc}
ΔI	Représente la variation du courant. (A)
ΔT	Représente la variation de la température. (°C)
ΔV	Représente la variation de la tension. (V)

II.2.1.4. Modèle simplifié à une diode :

On peut simplifier les modèles précédents en un modèle de cinq paramètres (I_{sc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp} , R_s), qu'on peut modéliser comme suite : [BEN12]

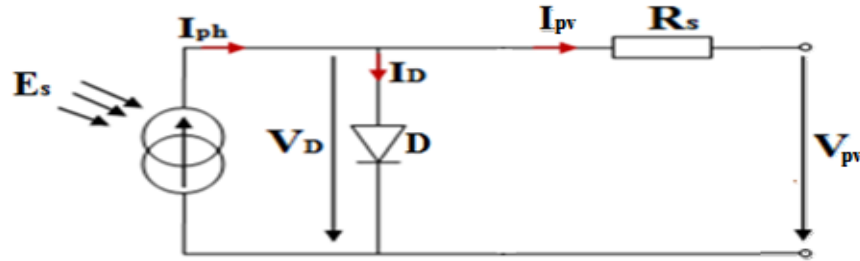


Figure (II.3) Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par :

$$I_{PV} = I_{sc} \cdot [1 - k_1 \cdot (e^{k_2 \cdot V_{PV}^m} - 1)] \quad (II.21)$$

Où les coefficients k_1 , k_2 et m sont donnés par :

$$k_1 = 0,01175 \quad (II.22)$$

$$k_2 = \frac{k_4}{V_{oc}^m} \quad (II.23)$$

$$k_3 = \ln \left[\frac{I_{sc} \cdot (1 + k_1) - I_m}{k_1 \cdot I_{sc}} \right] \quad (II.24)$$

$$k_4 = \ln \left[\frac{1 + k_1}{k_1} \right] \quad (II.25)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{k_3}{k_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_m}{V_{oc}} \right]} \quad (II.26)$$

Il est à noter que l'équation (II.21) est applicable que pour un niveau d'insolation E_s et de la température particuliers ($E_s = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_a = 25^\circ \text{C}$), relatifs aux conditions standard de fonctionnement. Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres de tableau (II.2) changent suivant les équations (II.16), (II.17) et (II.18). [REK10]

Les nouvelles valeurs de la tension et de courant photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{PV,nouv} = V_{PV,stc} + \Delta V \quad (II.27)$$

$$I_{PV,nouv} = I_{PV,stc} + \Delta I \quad (II.28)$$

Les constructeurs des panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau ($I_{sc}, I_{mpp}, V_{oc}, V_{mpp}, R_s$) sous les conditions standard de fonctionnement ($E_s = 1000W/m^2$, $T_a = 25^\circ C$), sont donné dans le **tableau 2 l'annexe 1**

II.2.2. Résultat et interprétation des courbes

Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ et $P_{PV}(V_{PV})$ pour la journée de 23/05/2012 ($E_s = 820w/m^2 ; T_c = 28^\circ C$)

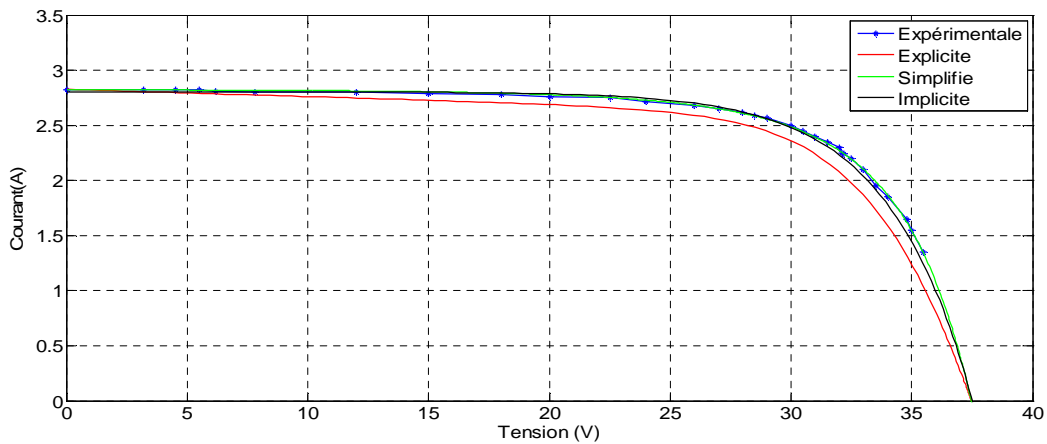


Figure (II.4) Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ pour les modèles avec l'expérimentale

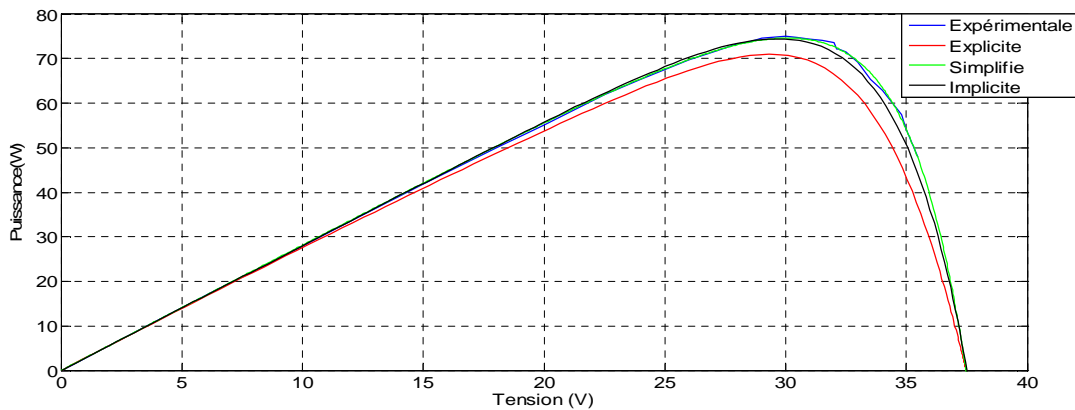


Figure (II.5) Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ pour les modèles avec l'expérimentale

Pour le calcul d'erreur pour les différents modèles, par les formules suivantes :

$$\begin{cases} e_v = \left| \frac{V_{pv,pratique} - V_{pv,modèle}}{V_{pv,exp}} \right| \cdot 100\% \\ e_i = \left| \frac{I_{pv,pratique} - I_{pv,modèle}}{I_{pv,exp}} \right| \cdot 100\% \\ e_p = \left| \frac{P_{pv,pratique} - P_{pv,modèle}}{P_{pv,exp}} \right| \cdot 100\% \end{cases} \quad (II.29)$$

Avec :

e_v, e_i, e_p	L'erreur de la tension, courant et de la puissance
$V_{pv,pratique}, I_{pv,pratique}, P_{pv,pratique}$	Tension, courant et puissance mesurer en pratique
$V_{pv,modèle}, I_{pv,modèle}, P_{pv,modèle}$	Tension, courant et puissance des modèles

On remarque bien que le modèle simplifié à une diode est plus proche des valeurs expérimentales. Donc notre choix se porte sur ce modèle. (Voir tableau 3 l'annexe 1)

II.3. Convertisseur continu-continu (hacheur survolteur)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de BOOST ou hacheur parallèle; Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée. Son circuit de base est celui de la figure (I.15).

$$\begin{cases} V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_e \\ I_R = (1 - \alpha) \cdot I_L \end{cases} \quad (II.30)$$

II.4. Modélisation du convertisseur DC-AC (Onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. [LOU09]

Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable. [LOU09]

Le schéma de cet onduleur est donné dans la figure (II.9)

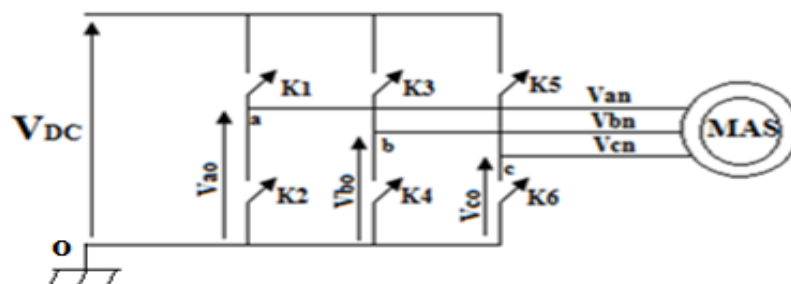


Figure (II.6) Circuit de l'onduleur relié à la machine. [LOU09]

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations : [LOU09]

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Avec : V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point « O » comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de CHARLE comme suit : [LOU09]

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

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 du neutre de la charge par rapport au point « O ». [LOU09]

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

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.33})$$

En remplaçant (II.33) dans (II.32) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.34})$$

En remplaçant (II.34) dans (II.31) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{DC} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{DC} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{DC} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

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

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{v_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par : [LOU09]

$$I_{DC} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad (\text{II.38})$$

II.5. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil

II.5.1. Introduction [BEN12]

Le moteur asynchrone est le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants. Ainsi, il a une structure simple, robuste et facile à construire.

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

II.5.2. Equations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

II.5.2.1. Equations des tensions et des flux [IDJ10]

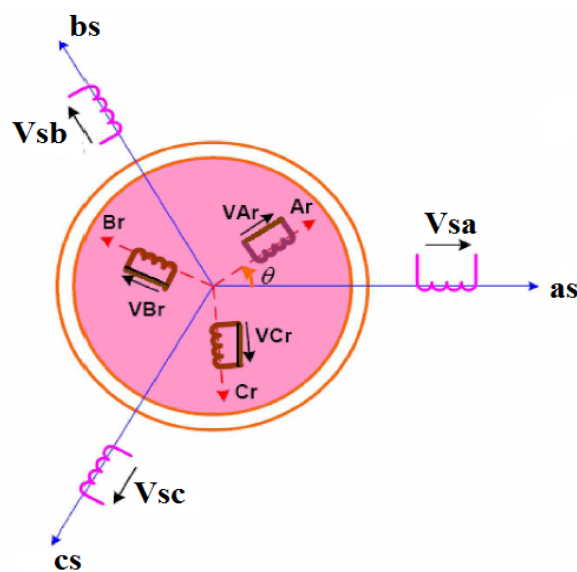


Figure (II.7) Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on trouve les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone et elles s'écrivent sous forme matricielle :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.39})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.40) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.41})$$

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

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.42})$$

Les flux totalisés Φ_{sabc} et Φ_{rabc} des phases statorique et rotorique s'expriment en fonction des inductances sous la forme suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.43})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (\text{II.44})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Les inductances propres et mutuelles statorique (L_s, M_s) et rotorique (L_r, M_r) sont constantes, seules les inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases de rotor qui varient. Elles dépendent de l'angle θ telle que :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

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

Finalement on peut écrire les équations électriques de moteur asynchrone :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \} \quad (\text{II.46})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \} \quad (\text{II.47})$$

Les équations (II.46), (II.47) aboutissent à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors plus difficile pour cela on fait appel au modèle de Park.

II.5.2.2. Modèle de Park de la Machine Asynchrone [IDJ10]

La théorie de la machine asynchrone est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statorique et rotorique à des axes électriquement perpendiculaires appelés **d** pour l'axe direct, et **q** pour celui en quadrature. Par raison de simplicité, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ La distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale,
- ✓ Les effets des pertes ferromagnétiques et de la saturation sont négligés,
- ✓ Les composantes homopolaires sont nulles.

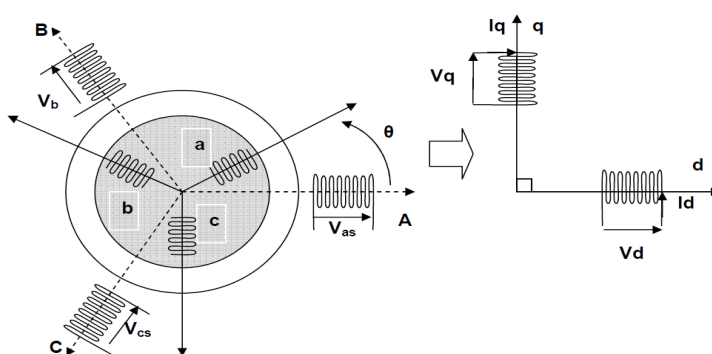


Figure (II.8) Modèle de Park de moteur asynchrone

Les amplitudes directes (d) et en quadrature (q) des grandeurs statorique et rotorique sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

Ces deux équations peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux.

Les équations de la machine asynchrone dans le système biphasé (d, q) lié au champ tournant, sont obtenues en utilisant la transformée de Park.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \\ V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d\Phi_{s0}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rd} \\ V_{r0} = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d\Phi_{r0}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} :	Tension statorique direct et quadratique.
I_{sd}, I_{sq} :	Courant statorique direct et quadratique.
Φ_{sd}, Φ_{sq} :	Flux rotorique direct et quadratique.
I_{rd}, I_{rq} :	Courant rotorique direct et quadratique.
Φ_{rd}, Φ_{rq} :	Flux statorique direct et quadratique.
ω_s, ω_r :	Vitesse statorique rotorique.
$\omega = p \cdot \Omega = \omega_s - \omega_r$:	Vitesse mécanique

Les flux statorique et rotorique s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

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	Inductance mutuelle

Finalement on obtient la matrice suivante qui rassemble toute les équations de moteur asynchrone :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II.53})$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II.54})$$

II.5.2.3. Commande vectorielle de moteur asynchrone [IDJ10]

Pour commander une machine alternative, on rencontre des difficultés dans le fait qu'il existe un couplage fort entre les variables d'entrées, sortie et internes.

Afin d'obtenir les performances souhaitées, la stratégie de commande des machines à courant alternatif consiste souvent à rendre le comportement électromécanique similaire à celui d'une machine à courant continu. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit :

- Le flux statorique ;
- Le flux rotorique ;
- Le flux d'entre fer.

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [IDJ10]. Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

On remplace dans (II.50), on obtient :

➤ Les équations de tension :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \quad (\text{II.56})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \quad (\text{II.57})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (\text{II.58})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \cdot \Phi_r \quad (\text{II.59})$$

➤ Les équations de flux :

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \quad (\text{II.60})$$

$$\phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \quad (\text{II.61})$$

$$\phi_r = M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.62})$$

$$0 = M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \quad (\text{II.63})$$

En supposant que la commande maintienne : $\phi_{rd} = \phi_r = \text{constante}$.

A partir de l'équation (II.58), on obtient :

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -R_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.64})$$

Le flux s'exprime en fonction du courant et de la pulsation rotorique à partir de l'équation (II.59) sous forme suivante :

$$\Phi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot I_{rq} \quad (\text{II.65})$$

La relation (II.65) correspond en fait à la condition de calage 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} (avec $\frac{d\Phi_r}{dt} = 0$ et $I_{rd} = 0$) pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir de la relation (II.62), exprimer le courant I_{rd} comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\phi_r - M \cdot I_{sd}}{L_r} \quad (\text{II.66})$$

Par ailleurs, la relation (II.63) peut s'écrire de la manière suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{II.67})$$

L'expression de couple électromagnétique donné par la relation :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot I_{qs} \quad (\text{II.68})$$

II.5.2.4. Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Dans la relation (II.64), on remplace I_{rd} par sa valeur exprimée en (II.66), il vient :

$$\Phi_r = \frac{M.I_{sd}}{1+T_r.s} \quad (\text{II.69})$$

Avec :

T_r	Constante de temps rotorique
s	Opérateur de dérivation

La connaissance de ω_s permet d'assurer la validité des équations car le référentiel « d q » doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + p.\Omega$. La vitesse de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique. Dans l'équation (II.65), on remplace I_{rq} par sa valeur donnée en (II.67). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M.I_{sq}}{T_r.\Phi_r} \quad (\text{II.70})$$

On obtient finalement :

$$\omega_s = \frac{M.I_{sq}}{T_r.\Phi_r} + p.\Omega \quad (\text{II.71})$$

Cette dernière relation correspond à un autopilotage de la machine. C'est cette relation qui force à zéro une des grandeurs de sortie, et permet ainsi le découplage entre les deux grandeurs restantes dans l'expression du couple.

II.6. Modélisation de la pompe centrifuge [BEN12]

L'expression de la hauteur manométrique totale est donnée par le modèle PLEIDER-PETERMAN.

$$\text{HMT} = \alpha_0\omega_r^2 - \alpha_1\omega_r Q - \alpha_2 Q^2 \quad (\text{II.72})$$

Avec : $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ des constantes.

On peut écrire l'équation de la hauteur manométrique totale (HMT) en fonction de la hauteur géométrique et les pertes de charges par l'équation :

$$\text{HMT} = H_g + P_c \quad (\text{II.73})$$

Avec :

H_g Hauteur géométrique

P_c Les pertes de charges dans les canalisations

$$P_c = \left(\lambda \cdot \frac{D}{d_c} + \xi \right) \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d_c^4 \cdot g} \quad (\text{II.74})$$

Où :

λ Coefficient de régulation de la pression dans la canalisation

D et d_c Longueur et diamètre de la canalisation

ξ Coefficient des pertes de pression locales dans les différentes connexions de la canalisation

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

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 \quad (\text{II.75})$$

Avec :

$$K_r = \frac{P_n}{\omega_n^3} \quad (\text{II.76})$$

Où :

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 :

$$\Omega_{\text{opt}} = \Omega_n \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{PV} \cdot \eta}{P_n}} \quad (\text{II.77})$$

Où :

Ω_n Vitesse nominale du moteur asynchrone (tr/mn).

Ω_{opt} Vitesse optimale du moteur asynchrone (tr /mn)

η Rendement de motopompe

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons présenté les modèles électriques de chaque composant du système de pompage photovoltaïque (panneau, les deux convertisseurs DC/DC et DC/AC et le groupe motopompe) élaborées à partir des modèles de la littérature ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituant ce système.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres. L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système pour des cas d'applications définis dans les chapitres suivants.

Chapitre III

Description des méthodes d'optimisation MPPT

III.1. Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. La caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ du générateur dépend de l'éclairement solaire (l'irradiation) et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur DC/DC permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale.

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « **RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMUM** » ou bien « **MAXIMUM POWER POINT TRACKING** » en anglo-saxon (**MPPT**). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure (III.1) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

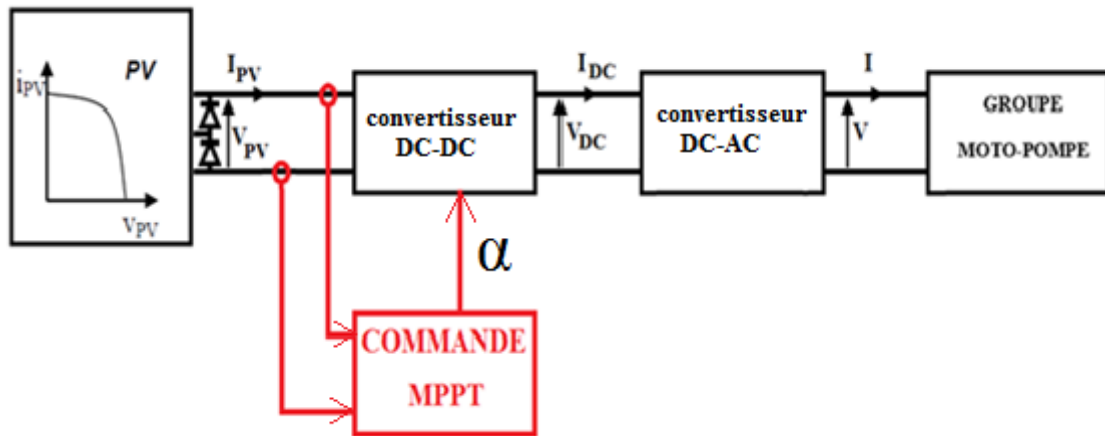


Figure (III.1) Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec la commande MPPT.

III.2. Techniques de poursuite du point de puissance maximale [ISS06]

III.2.1. Introduction

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement en MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du générateur photovoltaïque.

- Méthode de courbe d'ajustage (CUVE-FITTING METHOD) ;
- Méthode de la table de consultation (LOOK-UP TABLE) ;
- Méthode de tension en circuit-ouvert (OPEN-CIRCUIT VOLTAGE)
- Méthode de courant de court circuit (SHORT CIRCUIT CURRENT)
- Méthode de perturbation et observation (P&O) ;
- Méthode d'incrément de conductance ;
- Méthode de la logique floue ;
- Méthode du neuro-floue.

Notre étude se portera sur ces trois méthodes :

- Algorithme perturbation et observation P&O ;
- Algorithme logique floue ;
- Algorithme neuro-floue.

III.2.2. Algorithme perturbation et observation P&O [ZAR10]

L'algorithme Perturbation et observation "P&O" est souvent le plus utilisé dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du panneau V_{PV} et son courant de sortie I_{PV} et elle peut donc tout de suite dépister le point de puissance maximum en générant à sa sortie une tension $V_{PV,ref}$. Comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de V_{PV} et l'observation de son impact sur le changement de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La figure (III.2) est un organigramme de l'algorithme P&O. Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un ordinateur et donc à chaque cycle de l'algorithme, V_{PV} et I_{PV} sont mesurés pour calculer $P_{PV}(k)$. Cette valeur de $P_{PV}(k)$ est comparée avec celle de $P_{PV}(k-1)$ déjà calculée à l'itération précédente. Si maintenant la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle.

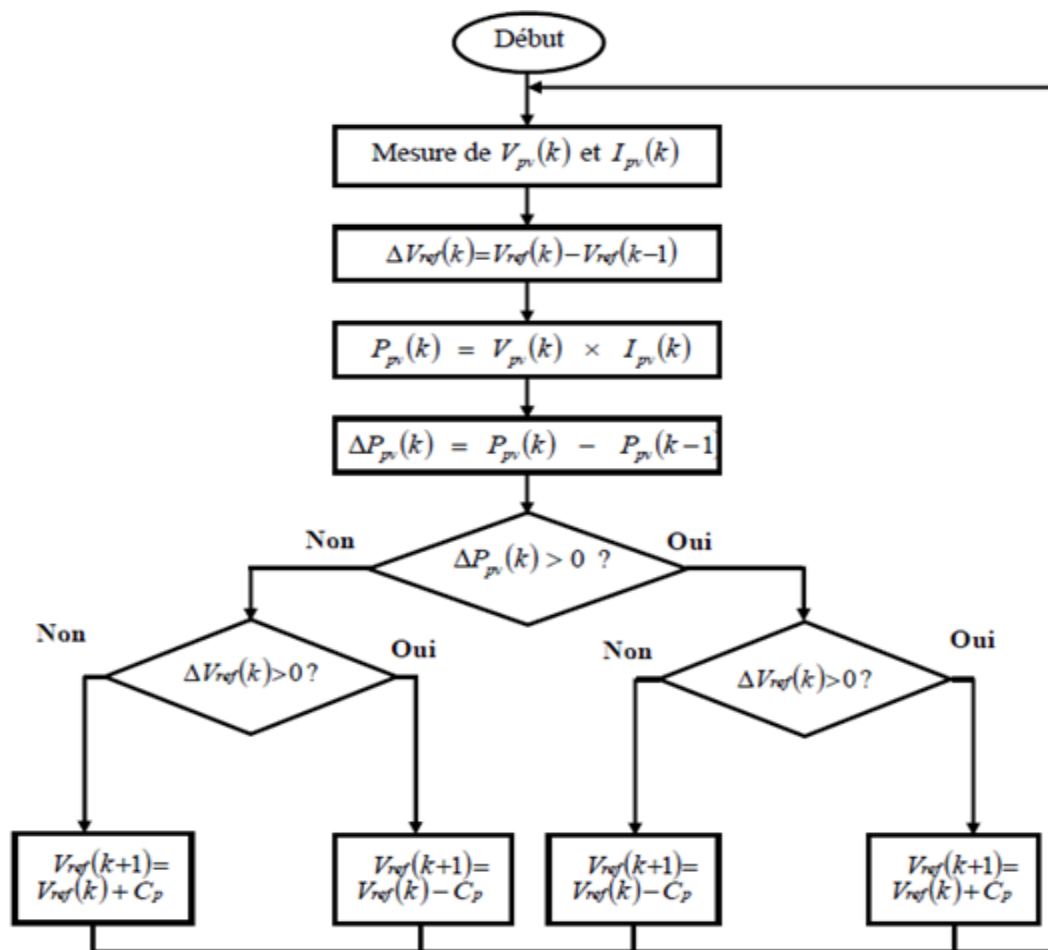


Figure (III.2) Organigramme de l'algorithme P&O (C_p est la largeur du pas de perturbation).

Si la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, V_{PV} est perturbée dans la direction opposée de celle de l'itération précédente. V_{PV} est ainsi perturbée à chaque cycle MPPT. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{PV} oscille autour de la valeur optimale V_{opt} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec la taille du pas de la perturbation. Si cette largeur de pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes en puissance seront importantes lorsque les conditions de fonctionnement sont stables ou lentement changeantes. En d'autres termes, si la taille du pas est petite, les pertes de puissance sous des conditions de fonctionnement stables ou lentement changeantes seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'ensoleillement.

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité, car elle est sensible aux grandes variations de l'ensoleillement, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du MPP. Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" quand il atteint le point MPP, le point de fonctionnement oscille autour de ce dernier.

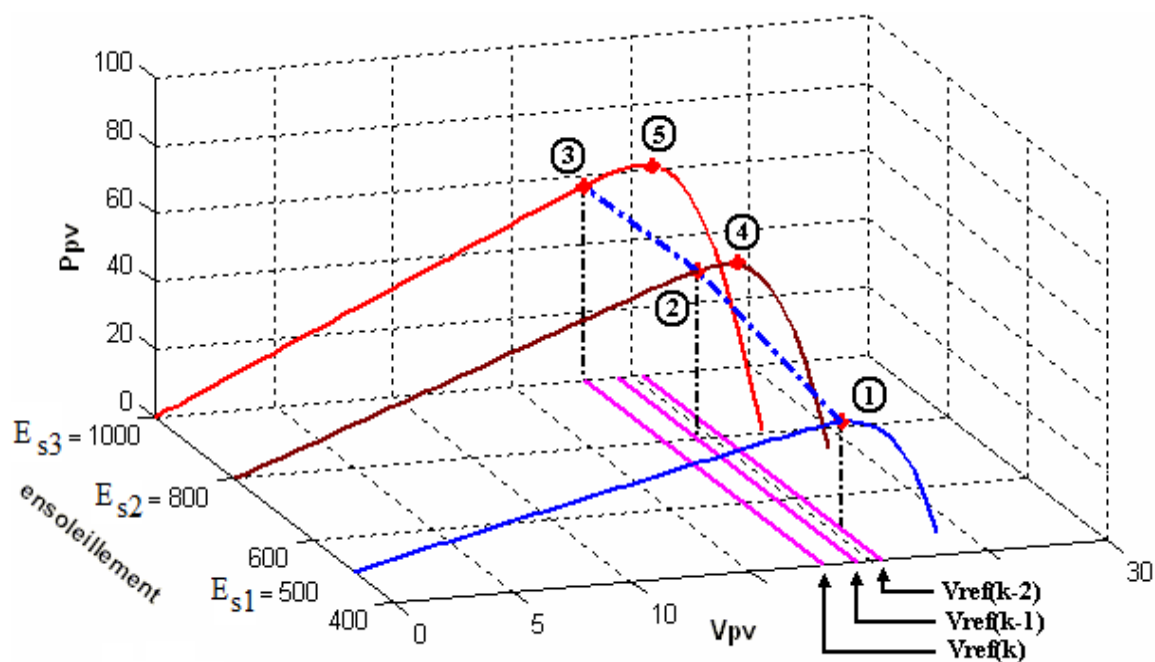


Figure (III.3) Déviation de la méthode de perturbation et observation du point MPP.

Au début, la tension de fonctionnement du convertisseur est au point 1, qui est le point de puissance maximale. Supposons qu'une perturbation (ex. changement d'éclairement) déplace le point de fonctionnement vers le point 2. Durant cette période de perturbation, l'ensoleillement a augmenté de E_{s1} à E_{s2} . Ceci mène à une augmentation de la puissance mesurée à la sortie du

convertisseur de P_{PV1} vers P_{PV2} . Cependant le point de puissance maximum à cette valeur d'ensoleillement est au point 4, qui correspond à la puissance maximale P_{max} , E_{s2} . Dans la perturbation suivante, l'algorithme de P&O décrémentera la tension de fonctionnement du convertisseur beaucoup plus à gauche à $V_{ref}(k-1)$. Et encore une augmentation de puissance sera mesurée si l'ensoleillement augmente de E_{s2} vers E_{s3} avec un nouveau point de puissance maximale au point 5. De cette façon l'algorithme de P&O continuera à déplacer le point de fonctionnement du convertisseur plus loin du point de puissance maximum réel vers $V_{ref}(k)$, et donc plus de puissance sera perdue. Cette mauvaise correction du MPP continuera jusqu'à ce que le changement de l'ensoleillement ralentisse ou se fixe.

III.2.3. Algorithme logique floue

III.2.3.1. Introduction

Commander ou optimiser un processus par des méthodes classiques exige la connaissance des différents paramètres qui peuvent influencer sur celui-ci et, agir en conséquence afin de contraindre le système à atteindre l'objectif fixé. Seulement cette connaissance est souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation du processus. De plus, le couplage existant entre les variables du système rend la commande d'optimisation plus difficile. [ISS06]

Il est possible de résoudre ce problème en utilisant des méthodes dites robustes telle que la logique floue. Le réglage par la logique floue traite les problèmes de commande mais avec une philosophie différente. En effet, ce type de régulateurs flous ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences de plusieurs règles floues se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue. [ISS06]

III.2.3.2. Principe et définition [KHE09]

La modélisation mathématique des concepts flous a été faite pour la première fois par le professeur LOTFI ZADEH en 1965, pour décrire mathématiquement la classe des objets qui ne possèdent pas des critères exacts d'appartenance. Son affirmation est, que le « sens » est une affaire de degrés d'appartenance. Par exemple si on considère le mot « jeune » il est difficile de distinguer le seuil au delà duquel un homme peut être considéré comme totalement jeune, et au delà duquel ne sera pas du tout considéré comme jeune.

L'idée c'est qu'au lieu de chercher un seuil unique de décision pour l'appartenance à la classe des âges « jeune », il semble logique de considérer deux seuils $S_1 < S_2$ tels que le terme jeune s'applique parfaitement aux âges plus petits que S_1 (20 ans) et ne s'applique plus du tout au dessus de S_2 (40 ans). Entre S_1 et S_2 l'appartenance est graduelle. Mathématiquement, si on associe une fonction $\mu_A(x)$ qui exprime le degré d'appartenance de l'élément x à la classe A ou :

« A » est un sous ensemble défini sur un référentiel « U » (ici, l'échelle des âges humains, $U = [0,100]$), tel que :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq x < S_1 \\ 0 & \text{pour } x > S_2 \\ a & \text{pour } S_1 \leq x \leq S_2 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Ou : $0 < a < 1$

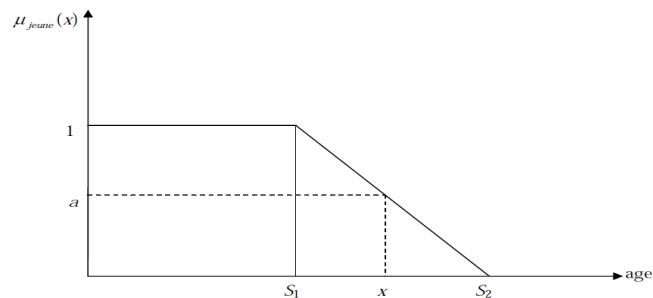


Figure (III.4) Degrés d'appartenance à la classe « jeune ».

Un tel sous-ensemble est appelé un sous ensemble flou et $\mu_A(x)$ est appelé la fonction d'appartenance.

III.2.3.3. Définition d'un ensemble flou

Un ensemble flou A d'un ensemble X sur un univers de discours U est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui prend ses valeurs sur l'intervalle $[0,1]$. Un ensemble flou est une généralisation d'un sous ensemble ordinaire ayant une fonction d'appartenance qui prend que les deux valeurs 0 ou 1. La fonction d'appartenance fournit une mesure du degré qu'un élément de U soit un élément d'un sous ensemble flou. [KHE09]

En logique floue un élément peut résider dans plusieurs ensembles avec des degrés d'appartenances différents. Ceci ne peut se produire dans la théorie des ensembles ordinaires. Un ensemble flou A dans U peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées de l'élément générique x et son niveau (degré) d'appartenance : [OBE06]

$$A = \{(x, \mu_A(x))/x \in U\} \quad (\text{III.2})$$

Quand l'univers de discours U est un ensemble continu (nombres réels), le sous ensemble flou A est écrit comme suit :

$$A = \int_U \mu_A(x)/x \quad (\text{III.3})$$

Quand U est discret, A s'est écrit comme suit :

$$A = \sum_U \mu_A(x)/x \quad (\text{III.4})$$

III.2.3.4. Opérateurs sur les ensembles floue [OBE06]

La logique floue fait souvent appel aux opérateurs ET, OU, et NON qui sont généralement réalisés respectivement par MIN et MAX. Il est techniquement possible de représenter toutes les opérations binaires de base en se basant sur la logique floue.

➤ Exemple :

- ✓ L'union OU (OR) : $\mu_{A \cup B}(u) = \max \{\mu_A(u), \mu_B(u)\}$
- ✓ L'intersection ET (AND) : $\mu_{A \cap B}(u) = \min \{\mu_A(u), \mu_B(u)\}$;
- ✓ Complémentation ou négation : $\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$;

III.2.3.5. Variables linguistiques [KHE09]

Une variable linguistique est un triplet (x, U, μ_A) dans lequel x est une variable définie sur un ensemble de référence U . L'ensemble $\mu_A = \{A1, A2, \dots\}$ fini ou infini, contient des sous ensembles flous de U , utilisable pour caractériser x .

III.2.3.6. Fonctions d'appartenance [BER09]

Une définition des variables linguistiques à l'aide des fonctions d'appartenance est nécessaire dans le but de traiter des déductions floues par ordinateur. Dans ce contexte, est attribuée à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance μ , dont la valeur varie entre 0 et 1.

On utilise souvent des fonctions d'appartenances de formes suivantes :

- Fonction triangulaire ;
- Fonction trapézoïdal ;
- Fonction Gaussienne ;
- Fonction sigmoïdale ;

III.2.3.7. Commande MPPT floue

Dans un but de poursuivre le point de puissance maximum, comme pour toutes les méthodes de poursuite MPPT, le contrôleur flou fonctionne aussi suivant la même philosophie. Et se compose de trois blocs qui sont :

- Fuzzification,
- Inférence,
- Défuzzification.

La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la figure (III.5)

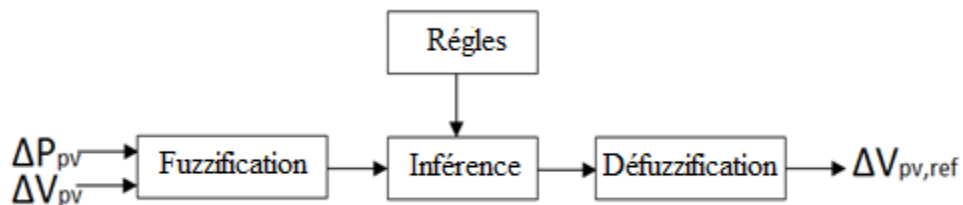


Figure (III.5) Structure de base du contrôleur flou.

A. Fuzzification

On définit pour chaque entrée du système un univers de discours et un partitionnement de cet univers en ensembles flous. La fuzzification consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps t , sa fonction d'appartenance à chacune des ensembles flous définies préalablement, et donc transformer l'entrée réelle en un sous ensemble flou. [ABD07]

On suppose que le contrôle se fait par la satisfaction de deux critères relatifs à deux variables d'entrées du contrôleur flou ΔP_{PV} et ΔV_{PV} telle que :

$$\Delta P_{PV} = P_{PV}(k) - P_{PV}(k - 1) \quad (III.5)$$

$$\Delta V_{PV} = V_{PV}(k) - V_{PV}(k - 1) \quad (III.6)$$

B. Inférence

A partir de la base de règles donnée par l'expert et des sous ensembles flous correspondants à la fuzzification des entrées, le mécanisme d'inférence calcule le sous ensemble flou Y relatif à la commande du système. [ABD07]

- **Méthode de MAMDANI :** cette méthode réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "ET" par la formulation du produit. La conclusion dans chaque règle, introduite par "ALORS", est réalisée par la formation du produit. L'opérateur "OU", qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.
- **Méthode de SUGENO :** L'opérateur "ET", est réalisé par la formulation du minimum, la conclusion de chaque règle floue à une forme polynomiale. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle

La table des règles du contrôleur flou, appliquées pour le fonctionnement en MPPT du notre système photovoltaïque est donnée dans **le tableau 1 l'annexe 3**

C. Défuzzification

La défuzzification a pour objectif de transformer le sous ensemble flou défini par le mécanisme d'inférence en une valeur non floue permettant ainsi la commande effective du système. [ABD07]

On a utilisé la défuzzification par centre de gravité donnée par la relation suivante :

$$\Delta V_{PV,ref} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(V_{PV}(k)) - V_{PV}(k)}{\sum_{j=1}^n \mu(V_{PV}(k))} \quad (III.7)$$

III.2.4. Algorithme neuro-floue

III.2.4.1. Introduction aux réseaux de neurones

Les réseaux de neurones ont d'abord été développés pour résoudre des problèmes de contrôle, de reconnaissance de formes ou de mots, de décision, de mémorisation comme une alternative à l'intelligence artificielle, et en relation plus ou moins étroite avec la modélisation de processus cognitifs (capable de connaître ou faire connaître) réels et des réseaux de neurones biologiques. [KHE09]

III.2.4.2. Le neurone biologique [ZAR10]

Le neurone biologique est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques.

Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ces axones

conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone.

Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie. (Figure III.6)

La structure d'un neurone se compose de trois parties :

- **La somma** : ou cellule d'activité nerveuse, au centre du neurone.
- **L'axone** : attaché au somma qui est électriquement actif, ce dernier conduit l'impulsion conduite par le neurone.
- **Dendrites** : électriquement passives, elles reçoivent les impulsions d'autres neurones.
- **Synapse** : zone de contact fonctionnelle qui s'établit entre deux neurones

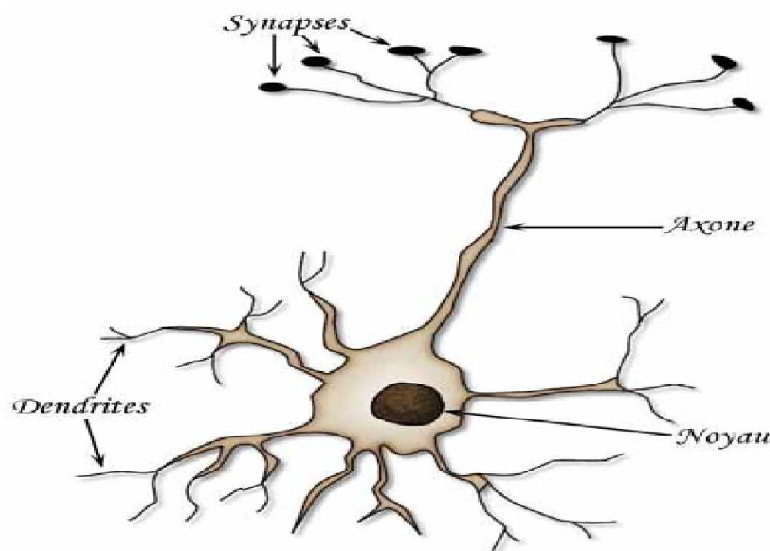


Figure (III.6) Le neurone biologique

III.2.4.3. Modélisation mathématique du neurone biologique [ZAR10]

La première modélisation d'un neurone date des années quarante. Elle a été présentée par MAC CULLOCH et PITTS. S'inspirant de leurs travaux sur les neurones biologiques, ils ont proposé le modèle suivant :

- Un neurone formel fait une somme pondérée des potentiels d'action qui lui parviennent (chacun des potentiels est une valeur numérique qui représente l'état du neurone qui l'a émis) ;
- Puis s'active suivant la valeur de cette sommation pondérée.

- Si cette somme dépasse un certain seuil le neurone est activé et transmet une réponse (sous forme de potentiel d'action) dont la valeur est celle de son activation ;
- Si le neurone n'est pas activé il ne transmet rien.

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré par la figure (III.7). Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat « n » de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert « f » qui produit la sortie « D » du neurone. Les entrées du neurone correspondent au vecteur $P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_r]$, alors que $W = [W_{1,1} \ W_{1,2} \ \dots \ W_{1,r}]$ représente le vecteur des poids du neurone. La sortie « n » de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante : [BER09]

$$n = (\sum_{j=1}^r W_{1,j} \cdot P_j) - b \quad (\text{III.8})$$

$$D = f\{(\sum_{j=1}^r W_{1,j} \cdot P_j) - b\} \quad (\text{III.9})$$

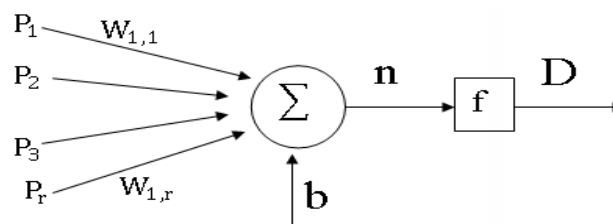


Figure (III.7) Modèle mathématique d'un neurone artificiel

On pourra résumer cette modélisation dans un tableau (voir l'annexe 3), qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel :

III.2.4.4. Fonction d'activation [BER09]

La fonction d'activation définit l'état du neurone en fonction de son entrée totale. Elle présente la relation qui lie l'ensemble des potentiels d'activation et décision du neurone. Les fonctions d'activations les plus utilisées sont :

- Seuil ;
- Sigmoidé ;
- Linéaire ;
- Seuil symétrique ;
- Tangente hyperbolique ;
- Fonction gaussienne ;

III.2.4.5. Architectures des réseaux du neurone [ZAR10]

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité (réseau à connexion complète)

A. Réseau monocouche

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids.

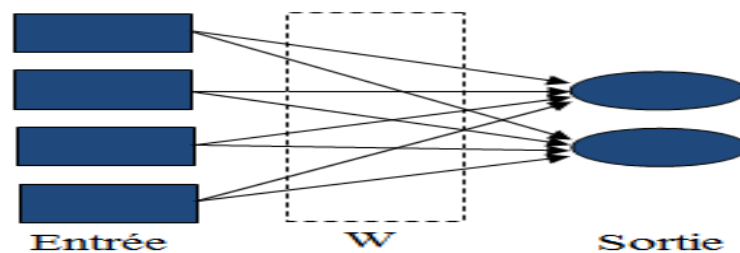


Figure (III.8) Réseau Monocouche

B. Réseau multicouche

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées.

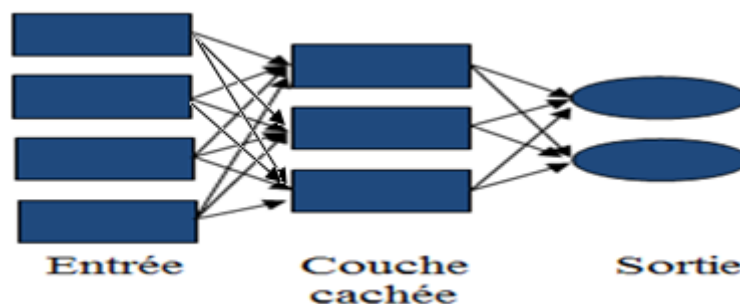


Figure (III.9) Réseau Multicouche

III.2.4.6. Processus d'apprentissage [KHE09]

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés. L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Il fait appel à des exemples de comportement.

Durant cette phase de fonctionnement, le réseau adapte sa structure (le plus souvent, les poids des connexions) afin de fournir sur ses neurones de sortie les valeurs désirées. Il nécessite des exemples désignés aussi sous l'appellation d'échantillon d'apprentissage ainsi qu'un algorithme d'apprentissage.

Après initialisation des poids du réseau (en général des valeurs aléatoires), il y a présentation des exemples au réseau et calcul des sorties correspondantes. Une valeur d'erreur ou de correction est calculée et une correction des poids est appliquée.

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé.

- **Apprentissage supervisé :** L'apprentissage est dit supervisé lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée).
- **Apprentissage non supervisé :** L'apprentissage est qualifié de non supervisé lorsque seules les valeurs d'entrée sont disponibles. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto-adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sortie qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrée similaires (de même nature).

L'apprentissage à partir d'un ensemble de données concerne l'identification des paramètres des prémisses et des conséquences, la structure du réseau étant fixée. L'algorithme d'apprentissage commence par construire un réseau initial, ensuite on applique une méthode d'apprentissage par rétro propagation de l'erreur. [Bou11]

JANG a proposé d'utiliser une règle hybride d'apprentissage qui combine un algorithme de descente de gradient avec une estimation par moindres carrées.

Pour un réseau de neurone avec « L » couches et n_k nœuds dans la couche « k ». Chaque nœud applique une fonction sur ses signaux d'entrées. La sortie O_i^k du nœud i de la couche k (appelée nœud (i, k)) dépend des signaux provenant de la couche « $k-1$ » et des paramètres du nœud (i, k) , c'est-à-dire : [BOU11]

$$O_i^k = f_i^{k-1}(O_i^{k-1}, \dots, O_{n_{k-1}}^{k-1}, a, b, c, \dots) \quad (\text{III.10})$$

Avec :

- a, b, c, \dots Paramètre du nœud $(k-1)$
- n_{k-1} Nombre de nœuds dans la couche $(k-1)$

L'apprentissage ce fait par l'algorithme de BACK-PROPAGATION (TBP)

$$E = \sum_{i=1}^P E_i \quad (\text{III.11})$$

$$E_i = \sum_{m=1}^{n_L} (T_{m,i} - O_{m,i}^L)^2, \quad 1 \leq i \leq P \quad (\text{III.12})$$

Avec :

- P Nombres d'exemples à apprendre
- $T_{m,i}$ Composante de la sortie désirée du nœud (L, m) pour l'exemple (i)
- $O_{m,i}^L$ Composante de la sortie réelle du nœud (L, m) pour l'exemple (i)

III.2.4.7. Retro-propagation du gradient [ZAR10]

L'algorithme de rétro-propagation a été développé en particulier par RUMELHART et PARKENET LE CUN en 1985. Cet algorithme repose sur la minimisation de l'erreur quadratique entre les sorties calculées et celles souhaitées.

Le terme rétro-propagation du gradient provient du fait que l'erreur calculée en sortie est transmise en sens inverse vers l'entrée.

III.2.4.8. Synthèses neuro-floue [BOU11]

Diverses combinaisons entre les réseaux de neurones et la logique floue ont été développées depuis 1988. Elles ont donné naissance aux systèmes neuro-floue, qui sont le plus souvent orientées vers la commande des systèmes complexes et des problèmes de classifications.

Les systèmes neuro-floue sont des systèmes floues formés par un algorithme d'apprentissage inspiré de la théorie des réseaux de neurones. La technique d'apprentissage opère en fonction de l'information locale et produit uniquement des changements locaux dans le système flou d'origine. Les règles floues codées dans le système neuro-floue représentent les échantillons imprécis et peuvent être vues en tant que prototypes imprécis des données d'apprentissage.

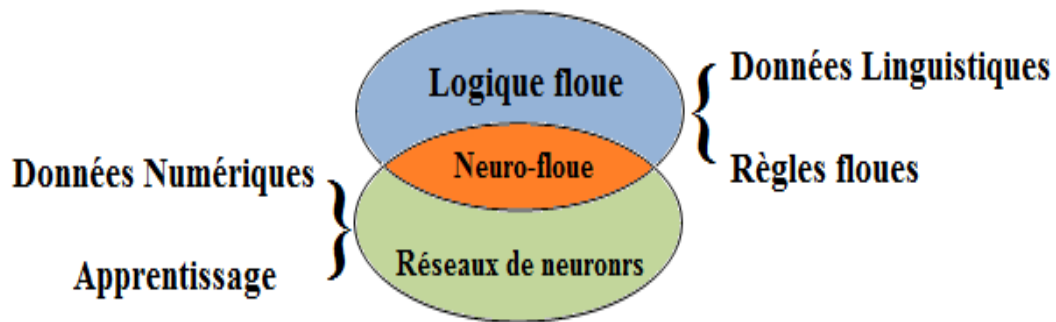


Figure (III.10) Principe du système neuro-floue [BOU11]

III.2.4.9. Principe de fonctionnement de l'algorithme neuro-floue [BOU11]

Pour illustrer l'utilisation des réseaux de neurones pour l'inférence floue, nous présentons certains réseaux de neurones adaptatifs réussis des systèmes d'inférence floue, en utilisant un algorithme d'apprentissage supervisé qui examine les données dans un ensemble de formation qui consiste en exemples d'entrées et leurs sorties associées. Pendant la phase d'apprentissage, un réseau neuro-floue hybride modifie sa structure interne pour refléter le rapport entre les entrées et les sorties dans l'ensemble de la formation (base de connaissance).

L'exactitude d'un réseau neuro-floue est vérifiée après que le cycle d'apprentissage soit complet en utilisant un ensemble séparé d'entrées et de sorties appelés l'ensemble de la validation.

III.2.4.10. Différent système neuro-floue intégrés [BOU11]

A. Systèmes neuro-floue de type MAMDANI

Les systèmes neuro-floue, de type MAMDANI utilisent la technique d'apprentissage par rétro-propagation pour apprendre les paramètres des fonctions d'appartenance.

B. Systèmes neuro-floue de type TAKAGI-SUGENO

Les systèmes neuro-floue, de type TAKAGI-SUGENO, utilise une combinaison de l'algorithme de rétro-propagation pour apprendre les fonctions d'appartenance et la méthode d'estimation par moindres carrés pour déterminer les coefficients des combinaisons linéaires dans les conclusions de règles.

C. Systèmes neuro-floue de type ANFIS

Le système ANFIS (Adaptive Network Fuzzy Inference System), est une classe de réseau adaptatif proposé par JANG. Il peut être vu comme un réseau de neurones non bouclé pour lequel chaque couche est un composant d'un système neuro-floue. Le modèle ANFIS est le modèle le plus utilisé en pratique. Des applications dans le traitement du signal et le filtrage adaptatif ont été réalisées avec cette architecture.

III.2.3.8. Commande MPPT neuro-floue [BEL07]

Le contrôleur MPPT neuro-flou développé dans cette partie comprend deux entrées ΔP_{PV} et ΔV_{PV} et une seule sortie $\Delta V_{PV,ref}$ qui représentent respectivement la variation de la puissance photovoltaïque, la variation de la tension photovoltaïque, et la commande. Les deux variables d'entrées génèrent l'action de contrôle $\Delta V_{PV,ref}$ qui sera appliquée au hacheur, afin d'ajuster la tension d'entrée de ce dernier de telle manière à assurer l'adaptation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, on a défini les différentes méthodes de MPPT, [perturbation et d'observation (PO), logique floue et neuro-floue] pour accélérer la procédure de recherche du point précis de puissance maximale sous des variations des conditions environnementales.

D'après cette étude on peut conclure que pour avoir la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge et produire une puissance maximale, la méthode de la poursuite de la puissance maximale doit être utilisée.

Chapitre IV

Applications des différentes MPPT sur le système de pompage photovoltaïque

IV.1. Introduction

Dans le chapitre précédant nous avons défini et modélisé les différents algorithmes de la poursuite du point de puissance maximale (MPP). Dans ce chapitre on va présenter la simulation de système photovoltaïque, on travail avec le modèle a une diode simplifié. Afin de justifier la validation des différentes méthodes de MPPT étudiées [perturbation et observation (PO), contrôleur logique flou (CFL) et neuro-floue], on appliquant les différentes méthodes MPPT. Une étude comparative sera présentée dans les conditions suivantes :

- Fonctionnement sous des conditions constantes (ensoleillement et température);
- Fonctionnement sous des conditions variables (ensoleillement et température);
- Fonctionnement durant une journée (profil journalier).

IV.2. Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque

Nous avons :

- Un moteur asynchrone ($P = 880\text{W}$, $I = 3\text{A}$).
- Des panneaux photovoltaïques de ($P_{PV} = 110\text{W/m}^2$, $I_{PV} = 3.15\text{A}$, $V_{PV} = 35\text{V}$)

On calcule le nombre de panneau n_{pv} nécessaire :

$$n_{pv} = \frac{P}{P_{PV}} = \frac{880}{110} = 8 \quad (\text{IV.1})$$

Il nous faut 8 panneaux photovoltaïques.

Nombre de panneaux en parallèle :

$$n_{pv,p} = \frac{I}{I_{pv}} = \frac{3}{3.15} \approx 1 \quad (IV.2)$$

Alors nous avons un panneau en parallèle.

Donc on déduit que les 8 panneaux seront disposés en série.

IV.3. Etude du système solaire avec les algorithmes MPPT

Des différentes simulations ont été effectuées sur le système étudié qui est composé de huit (8) panneaux photovoltaïque de 110W, un hacheur BOOST, un onduleur et un groupe motopompe. Dans un premier temps, on simule la partie panneau avec MPPT pour faire une étude comparative entre les trois méthodes (perturbation et observation (P&O), logique floue (CFL) et neuro-floue).

IV.2.1. Fonctionnement sous les conditions constantes (température et ensoleillement)

La simulation réalisée pour tester la stratégie des algorithmes de poursuite de point de puissance maximale. Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend la température (25°C, 15°C, 45°C) et l'ensoleillement (1000W/m², 800W/m², 400W/m²). Le but de ces simulations est d'évaluer le temps de réponse de chaque MPPT ainsi que visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point puissance maximale, les résultats obtenus sont donnés au dessous :

➤ Pour un ensoleillement de 1000W/m² et température T_c=25°C

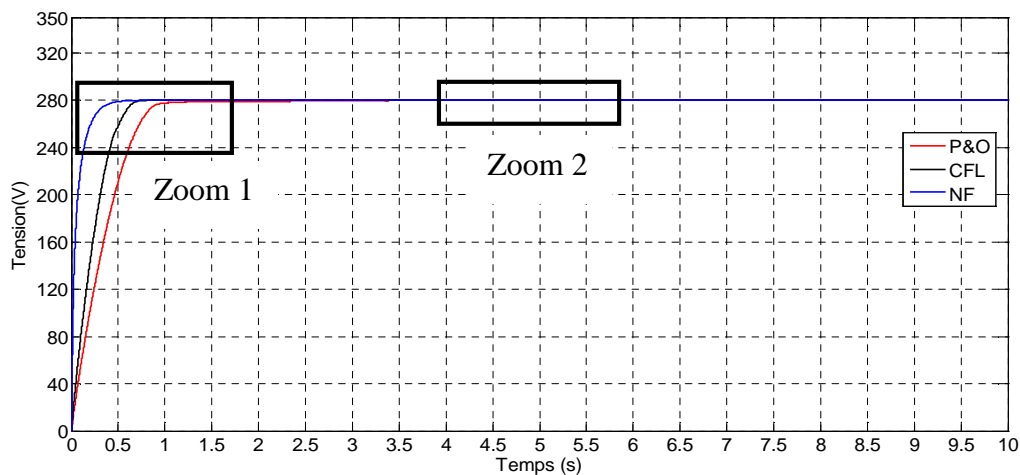


Figure (IV.1) Allure de la tension photovoltaïque sous les conditions ($E_s=1000W/m^2$, $T_c=25^\circ C$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur les figures (IV.1.a et IV.1.b)

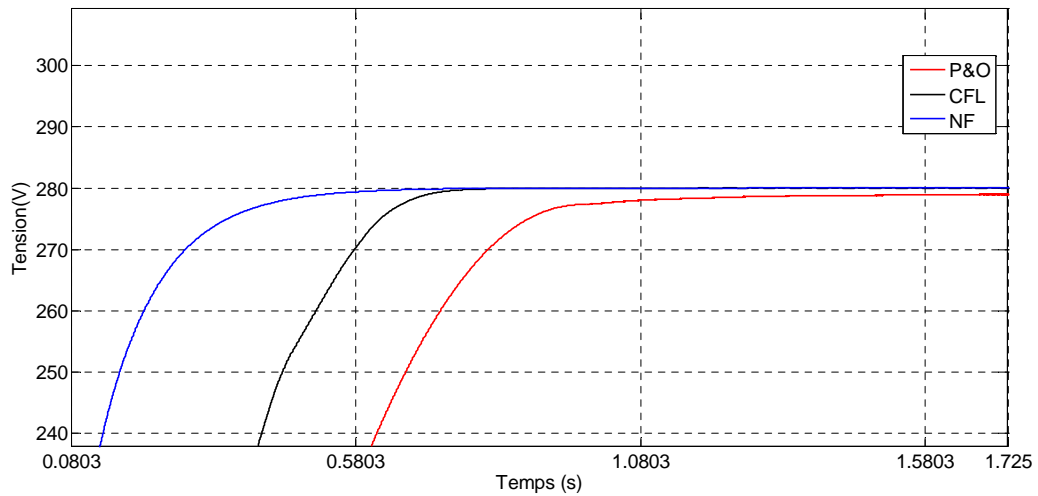


Figure (IV.1.a) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

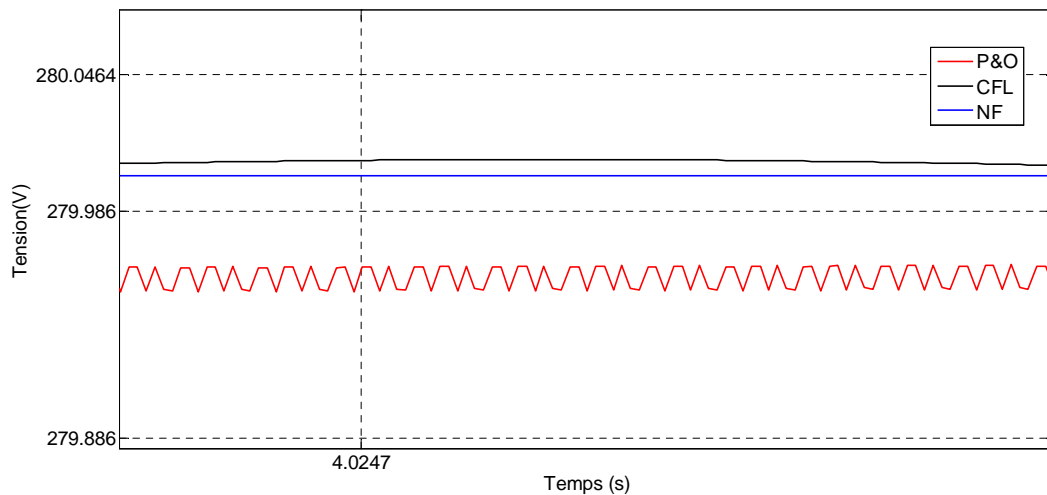


Figure (IV.1.b) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)

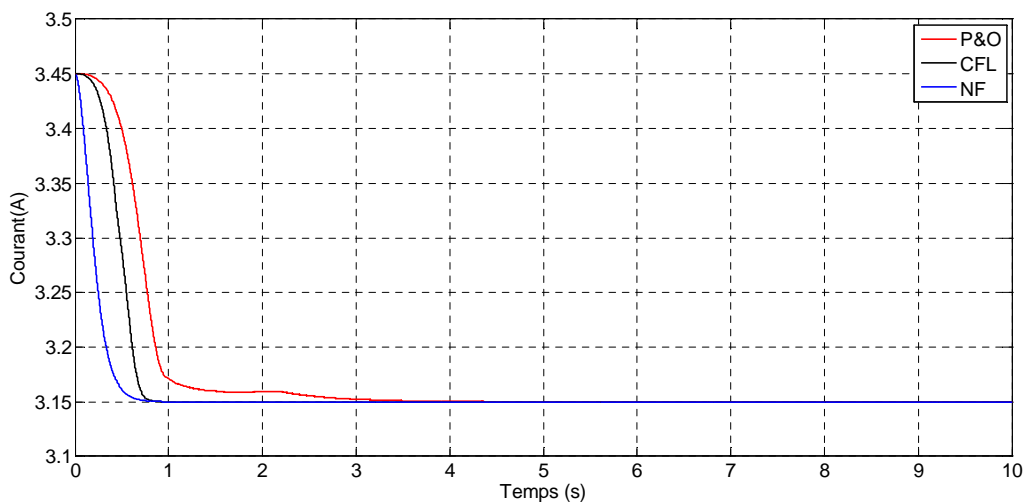


Figure (IV.2) Allure du courant photovoltaïque sous les conditions ($E_s=1000W/m^2$, $T_c=25^\circ C$)

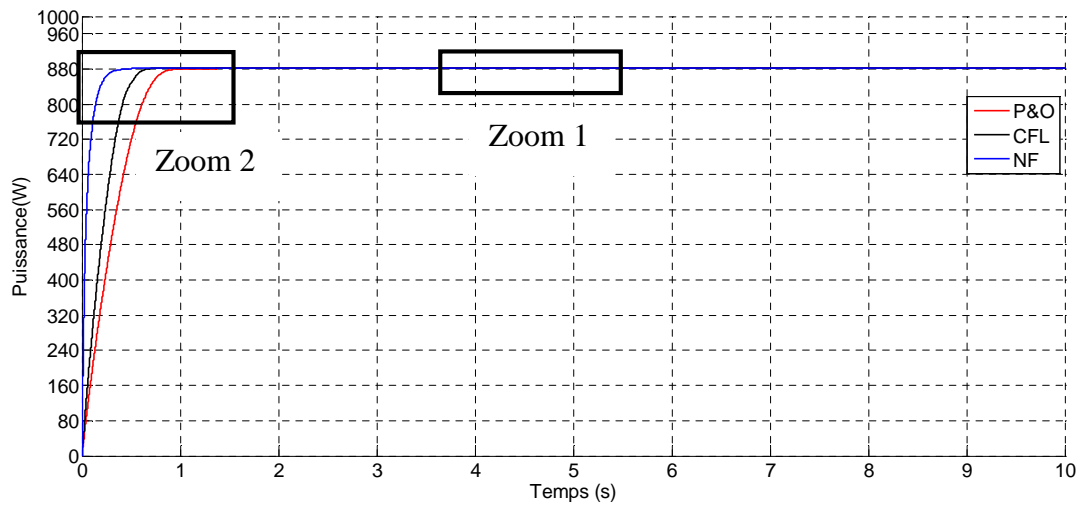


Figure (IV.3) Allure de la puissance photovoltaïque sous les conditions ($E_s=1000W/m^2$, $T_c=25^\circ C$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur les figures (IV.3.a et IV.3.b)

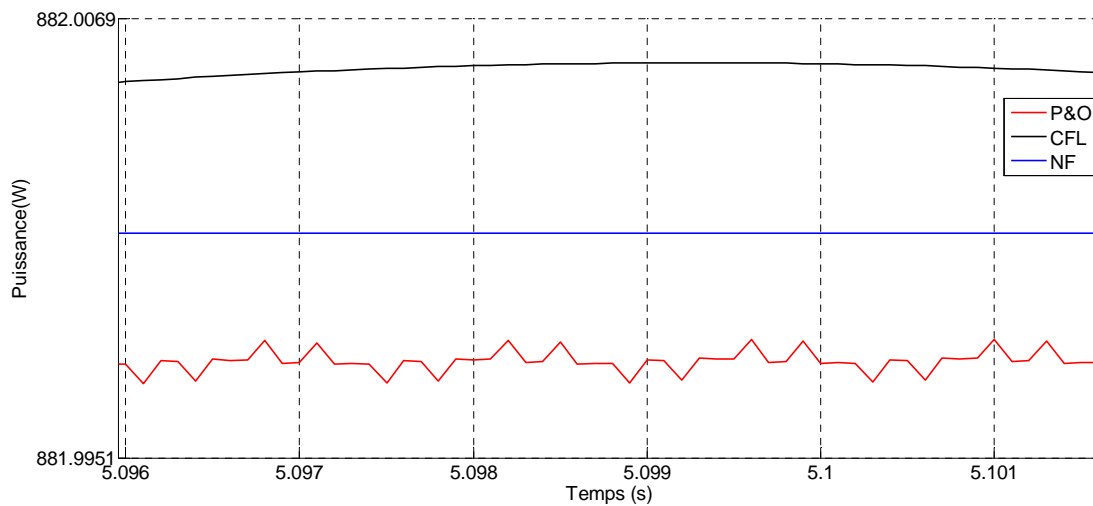


Figure (IV.3-a) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

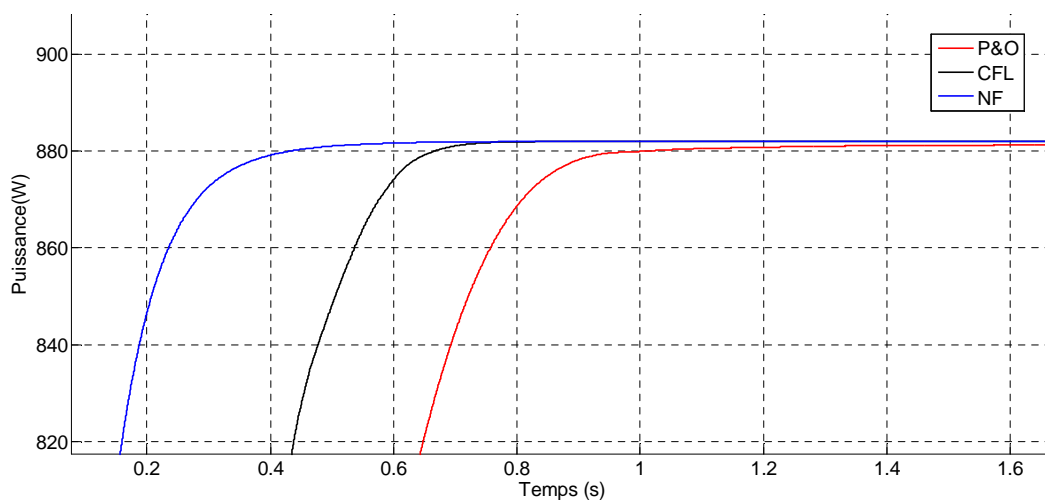


Figure (IV.3-b) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)

➤ Pour un ensoleillement de 800W/m^2 et température $T_c=25^\circ\text{C}$

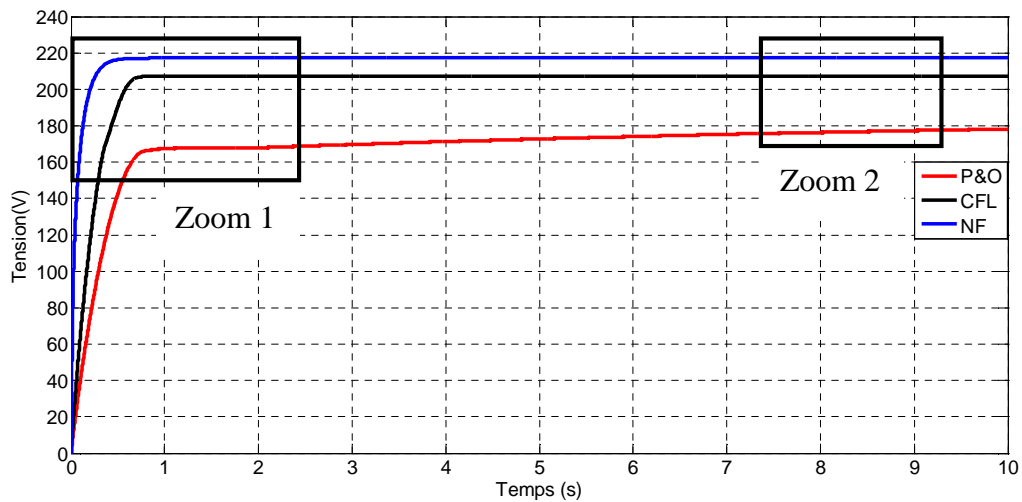


Figure (IV.4) Allure de la tension photovoltaïque sous les conditions ($E_s=800\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur la figure (IV.4.a et IV.4.b)

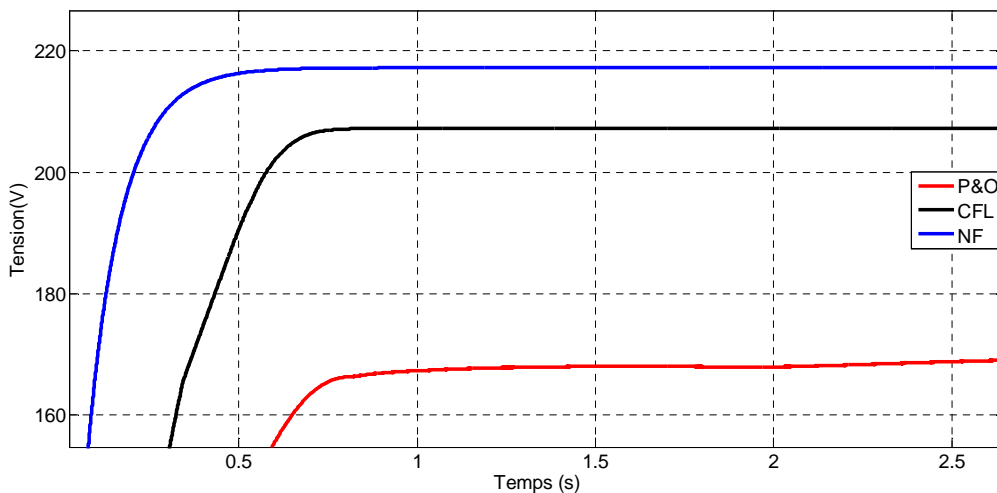


Figure (IV.4.a) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

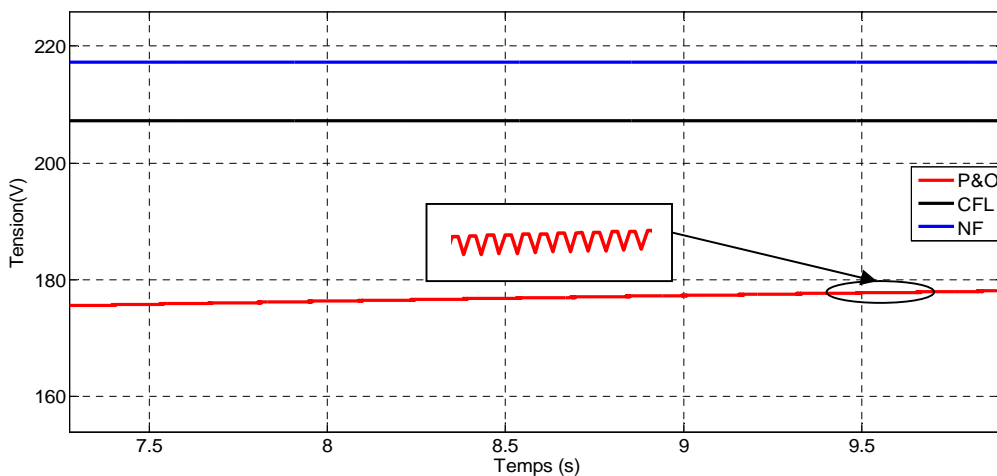


Figure (IV.4.b) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 2)

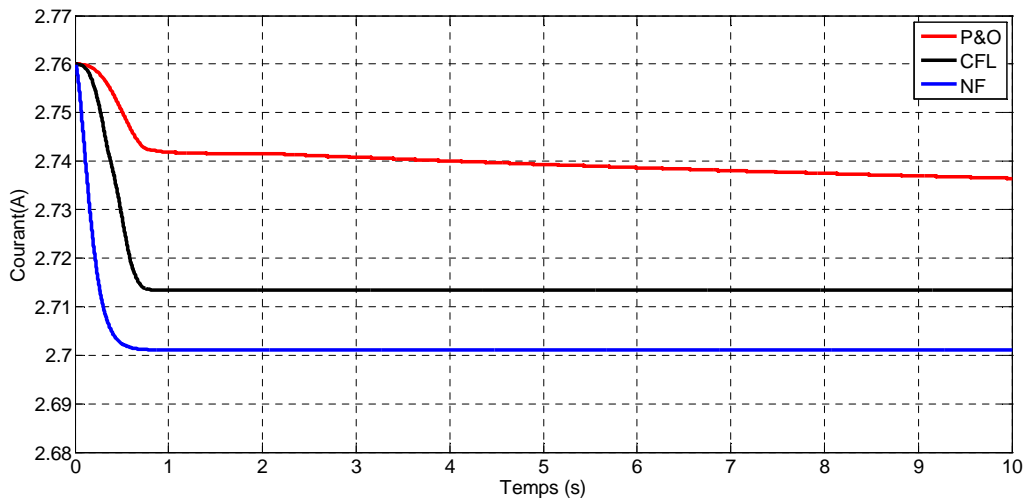


Figure (IV.5) Allure de le courant photovoltaïque sous les conditions ($E_s=800W/m^2$, $T_c=25^\circ C$)

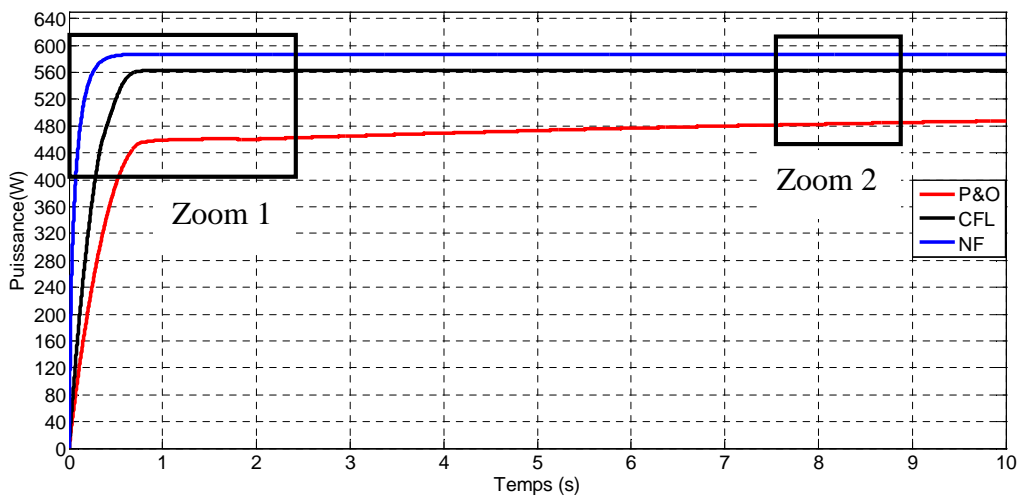


Figure (IV.6) Allure de la puissance photovoltaïque sous les conditions ($E_s=800W/m^2$, $T_c=25^\circ C$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur la figure (IV.6.a et IV.6.b)

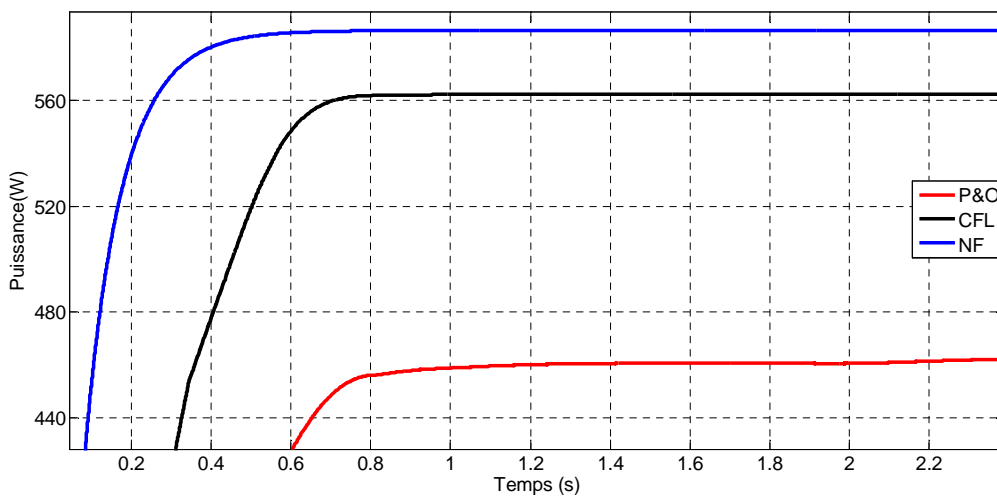


Figure (IV.6.a) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

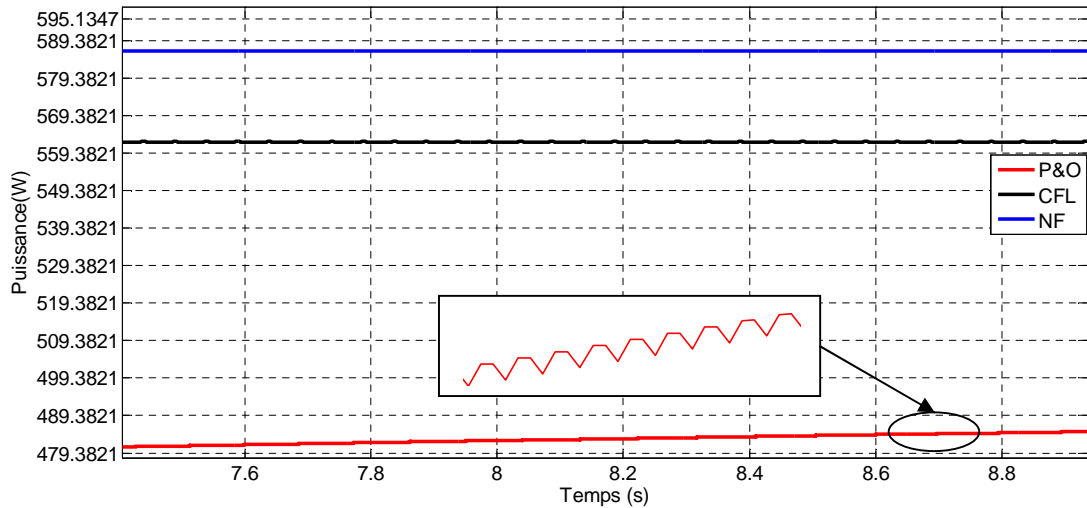


Figure (IV.6.b) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 2)

➤ Pour un ensoleillement de 400W/m^2 et température $T_c=25^\circ\text{C}$

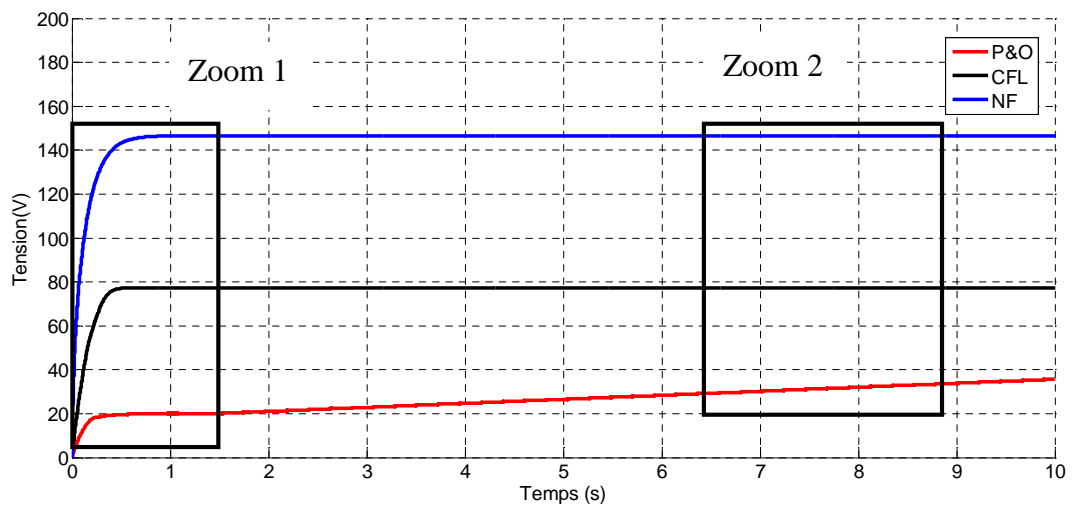


Figure (IV.7) Allure de la tension photovoltaïque sous les conditions ($E_s=400\text{W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur les figures (IV.7.a et IV.7.b)

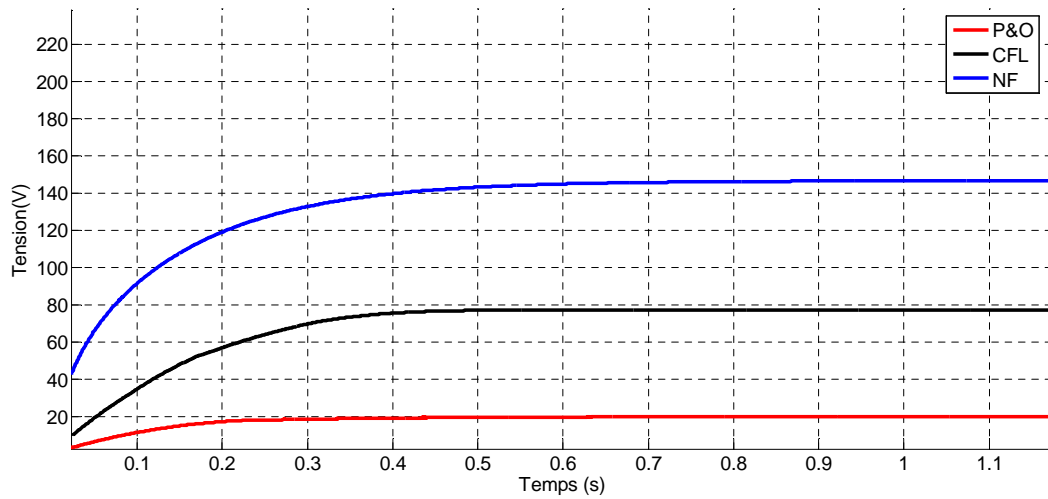


Figure (IV.7.a) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

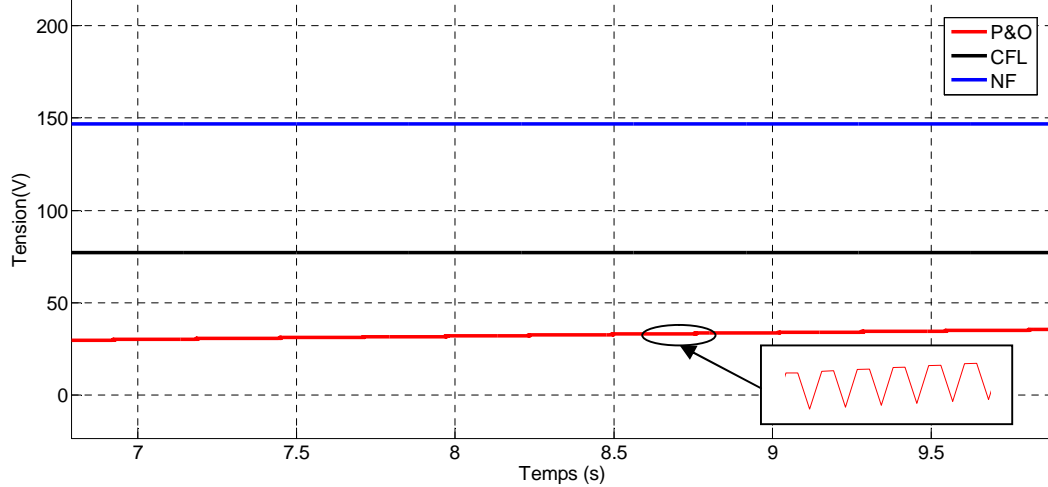


Figure (IV.7.b) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 2)

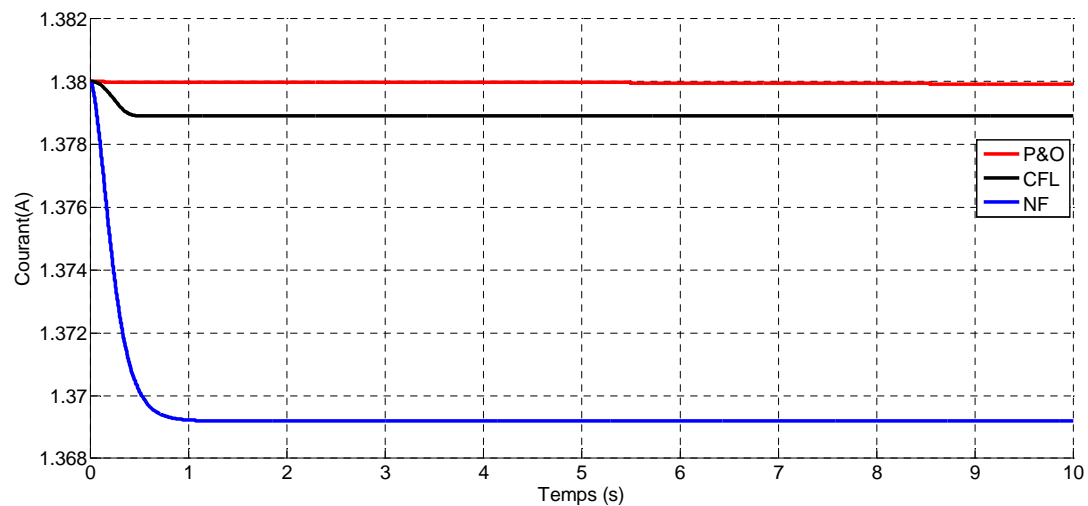


Figure (IV.8) Allure de le courant photovoltaïque sous conditions ($E_s=400W/m^2$, $T_c=25^\circ C$)

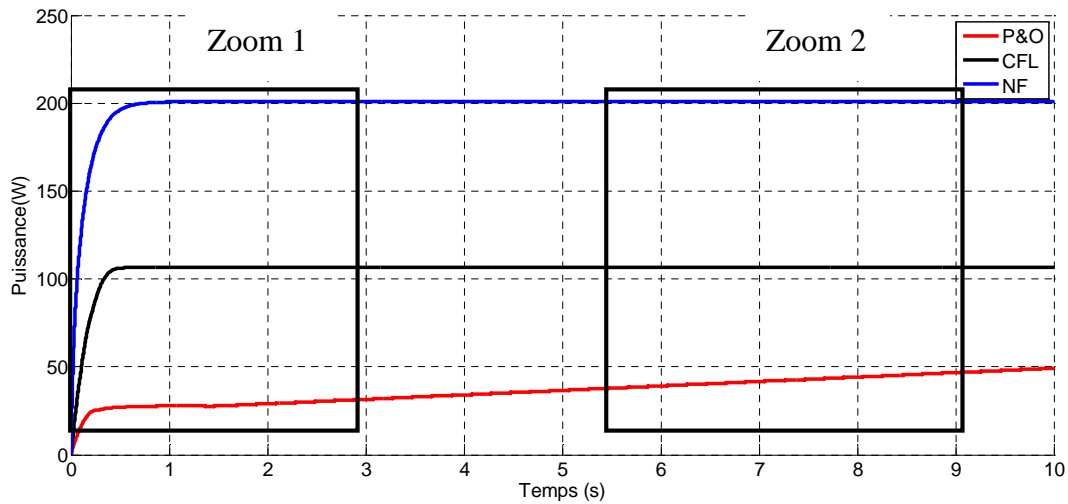


Figure (IV.9) Allure de la puissance photovoltaïque sous les conditions ($E_s=400W/m^2$, $T_c=25^\circ C$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur la figure (IV.9.a et IV.9.b)

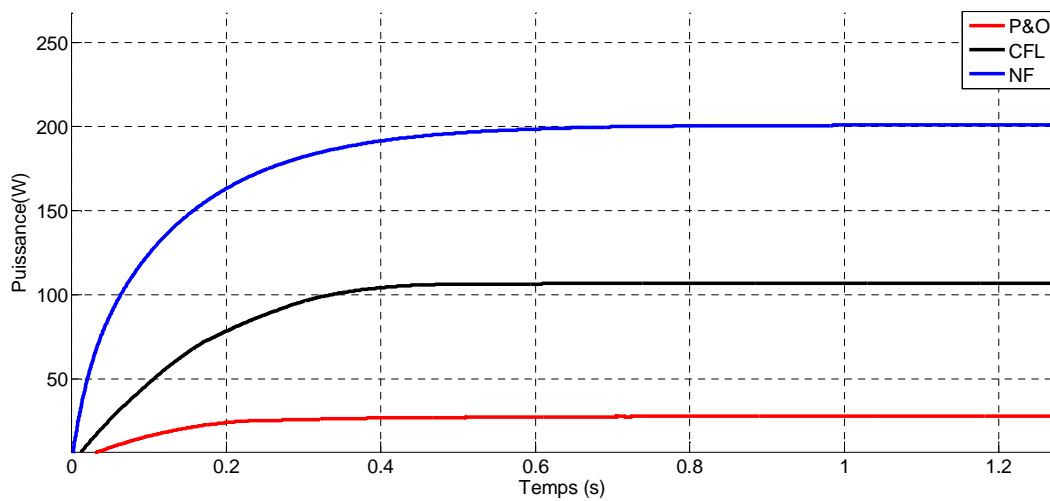


Figure (IV.9.a) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

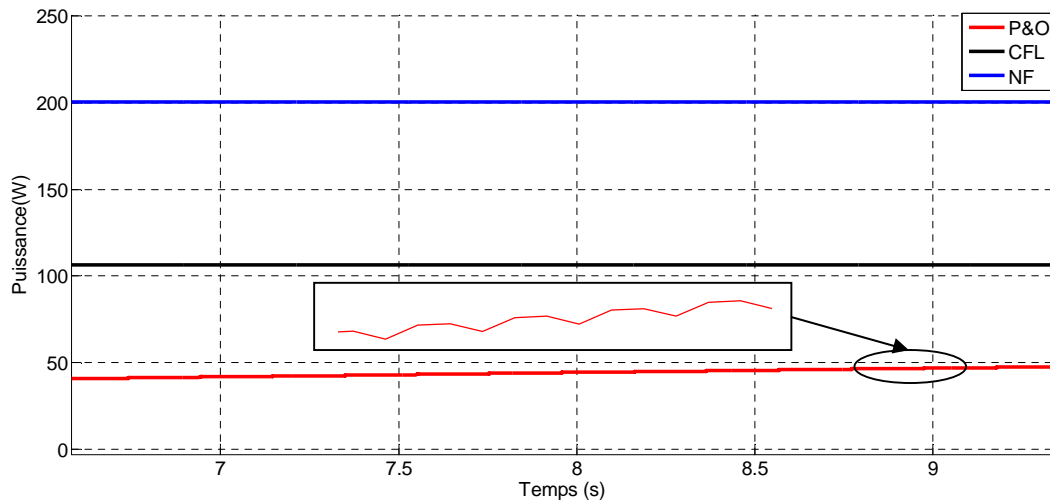


Figure (IV.9.b) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 2)

Les figures de (IV.1) à (IV.9) montrent la réponse du système pour les différentes algorithmes MPPT proposés sous les conditions stables pour fort, moyen et faible ensoleillement (1000W/m^2 , 800W/m^2 , 400W/m^2) avec une température constante ($T_c=25^\circ\text{C}$).

On remarque bien que l'algorithme neuro-floue est plus rapide et l'algorithme P&O est la plus lente. Suite à la perturbation continue de la tension de fonctionnement pour atteindre le MPP pour la méthode P&O, provoque une perte de puissance cela à cause des oscillations en régime permanent. Même la logique floue à des petites oscillations lente donc elle a une petite perte de puissance. Pour les ensoleillements de 800W/m^2 et 400W/m^2 les méthodes P&O et CFL présente une grande erreur.

➤ **Pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et température $T_c=15^\circ\text{C}$**

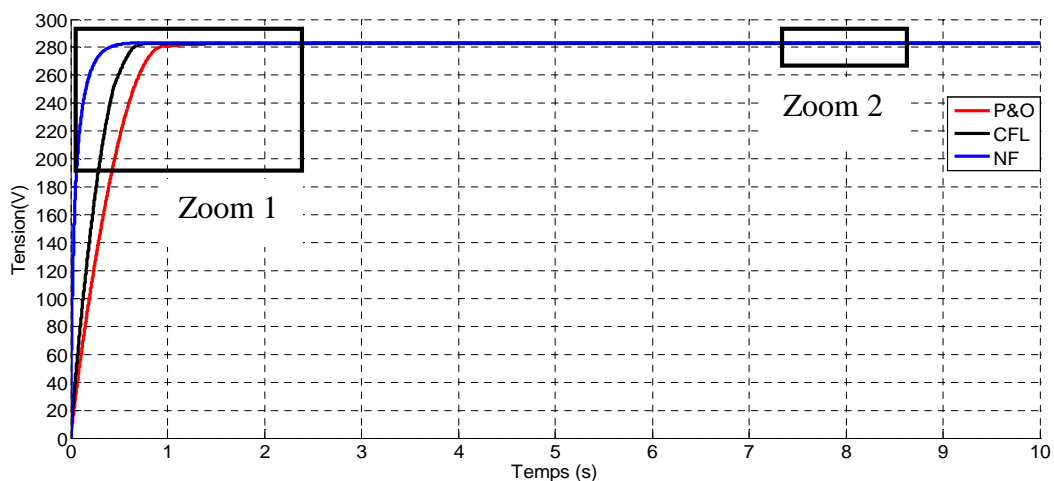


Figure (IV.10) Allure de la tension photovoltaïque sous les conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=15^\circ\text{C}$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur la figure (IV.10.a et IV.10.b)

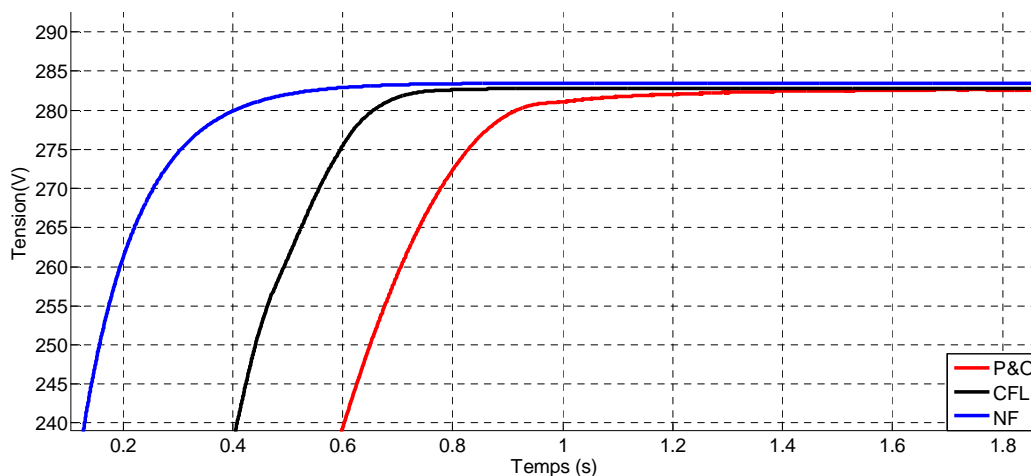


Figure (IV.10.a) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

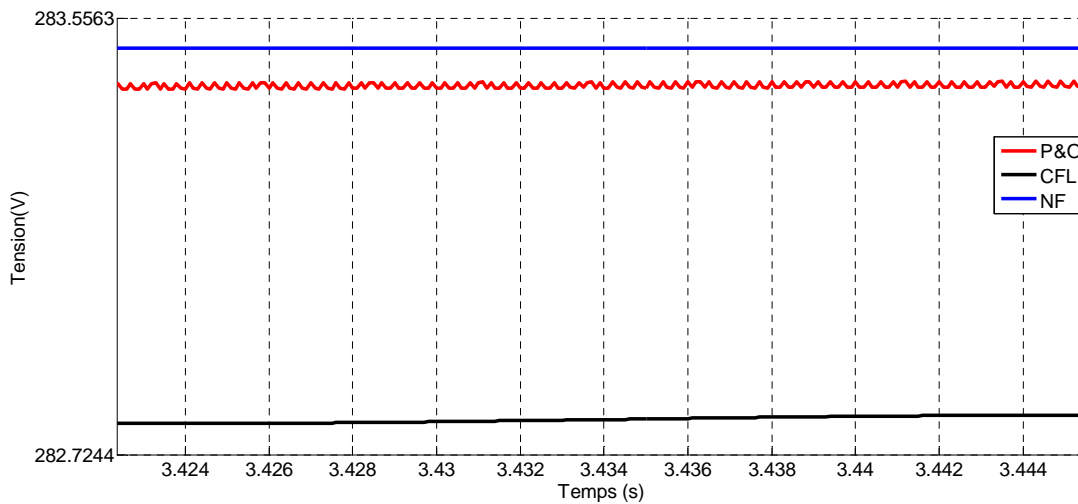


Figure (IV.10.b) Zoom sur l'Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)

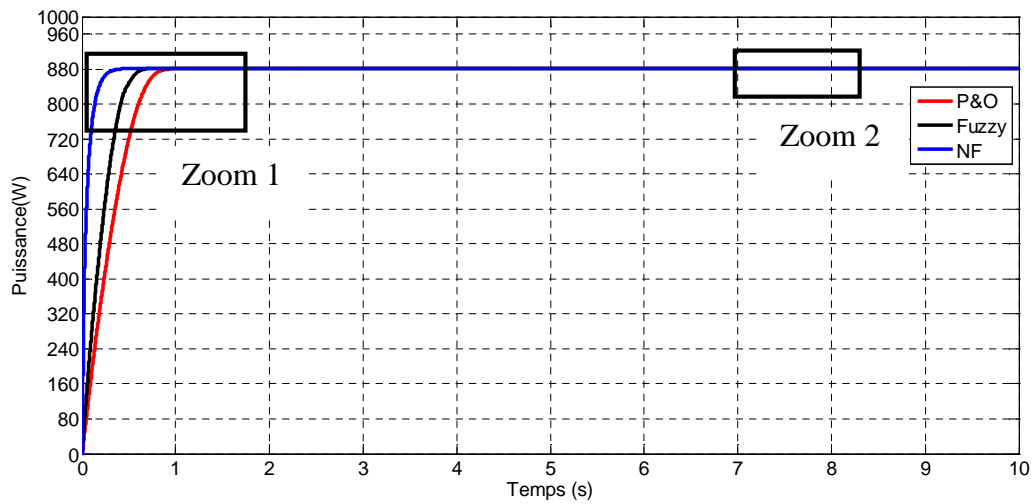


Figure (IV.11) Allure de la puissance photovoltaïque sous les conditions ($E_s=1000W/m^2$, $T_c=15^\circ C$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur la figure (IV.11.a et IV.11.b)

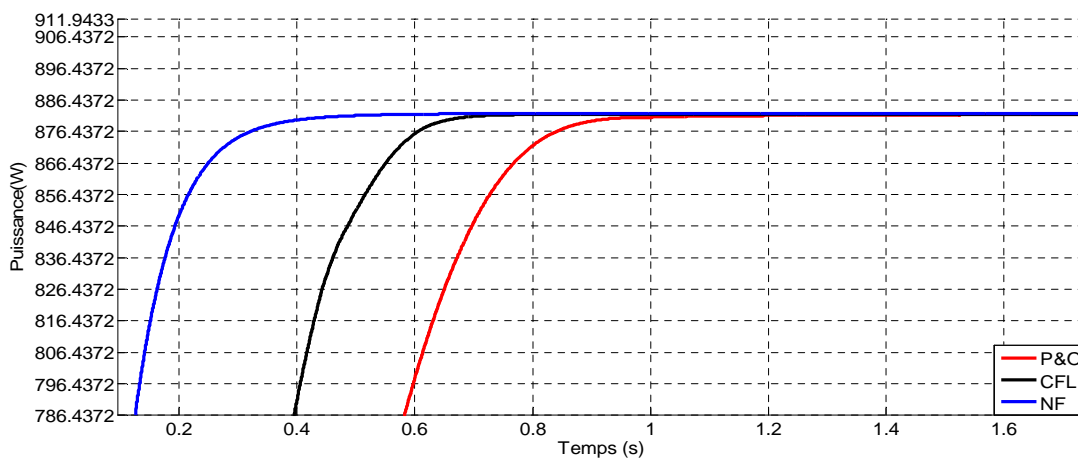


Figure (IV.11.a) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

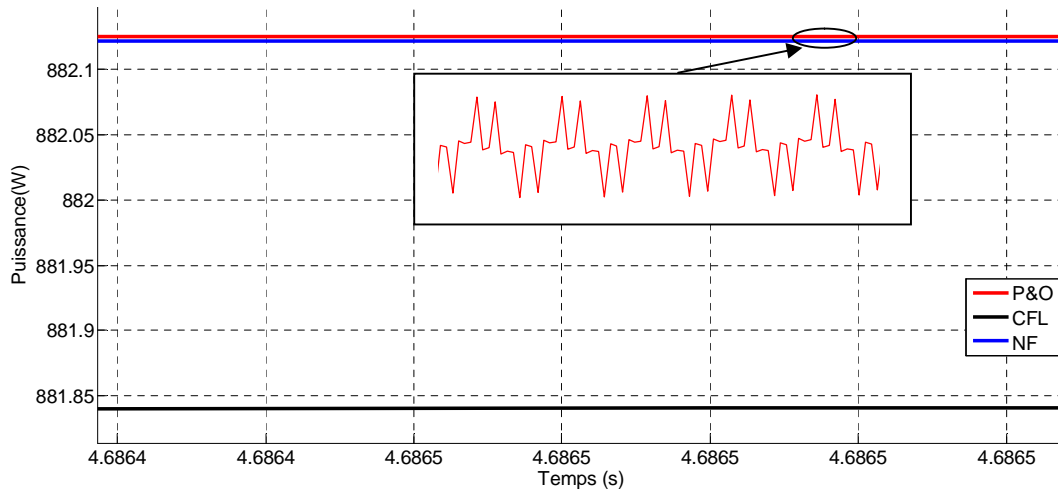


Figure (IV.12-b) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)

➤ Pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et température $T_c=45^\circ\text{C}$

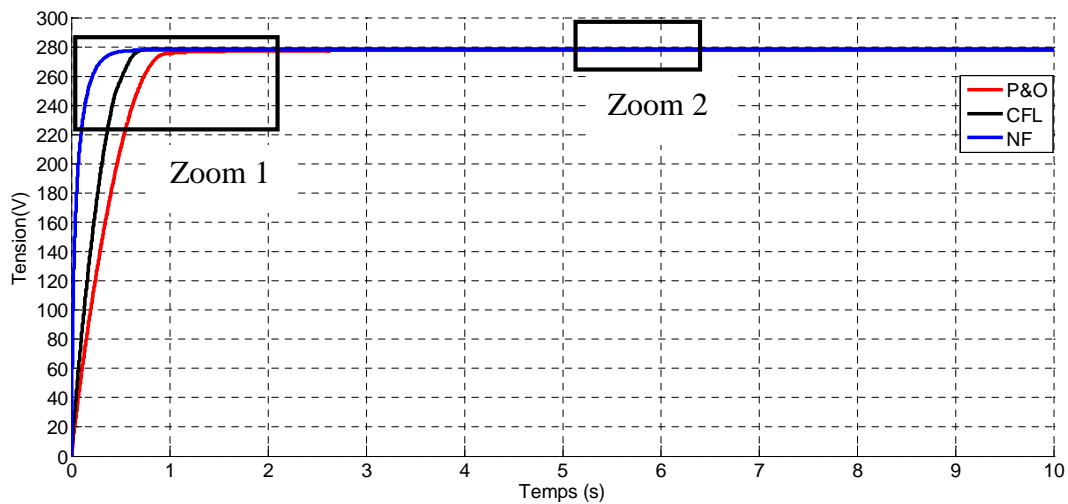


Figure (IV.12) Allure de la tension photovoltaïque sous les conditions ($E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_c=45^\circ\text{C}$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur la figure (IV.12.a et IV.12.b)

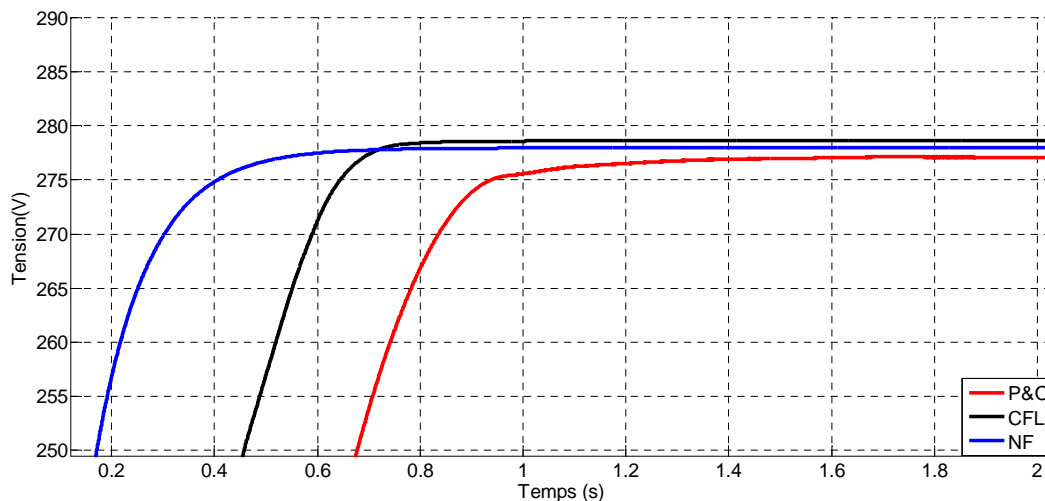


Figure (IV.12.a) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

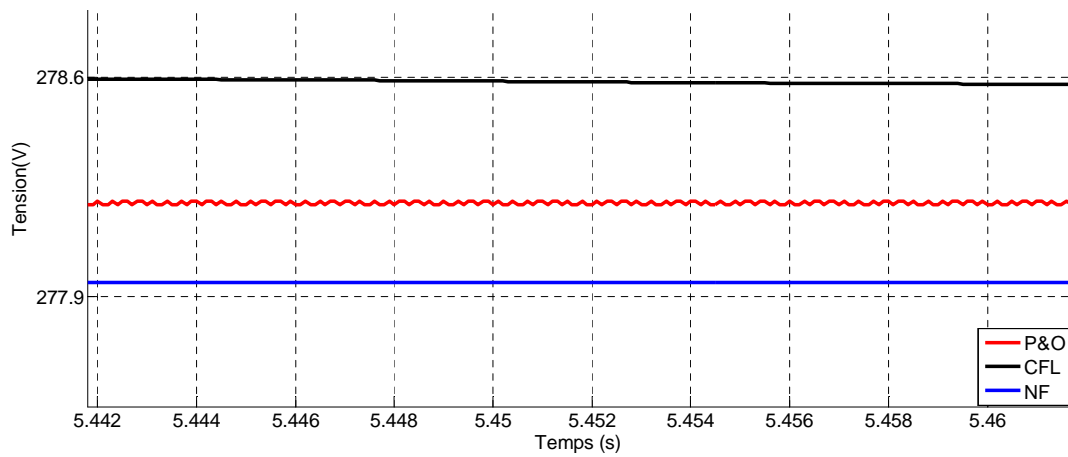


Figure (IV.12.b) Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)

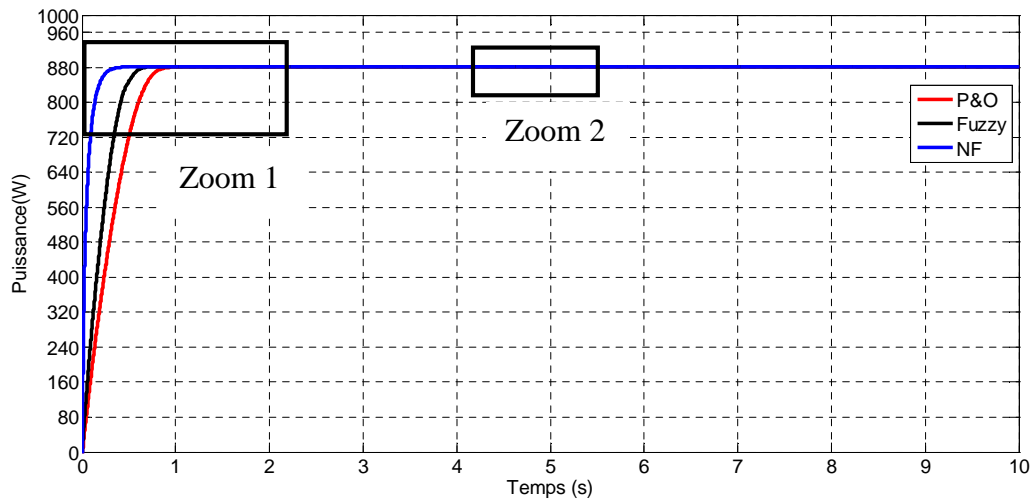


Figure (IV.13) Allure de la puissance photovoltaïque sous les conditions ($E_s=1000W/m^2$, $T_c=45^\circ C$)

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent est présenté sur la figure (IV.13.a et IV.13.b)

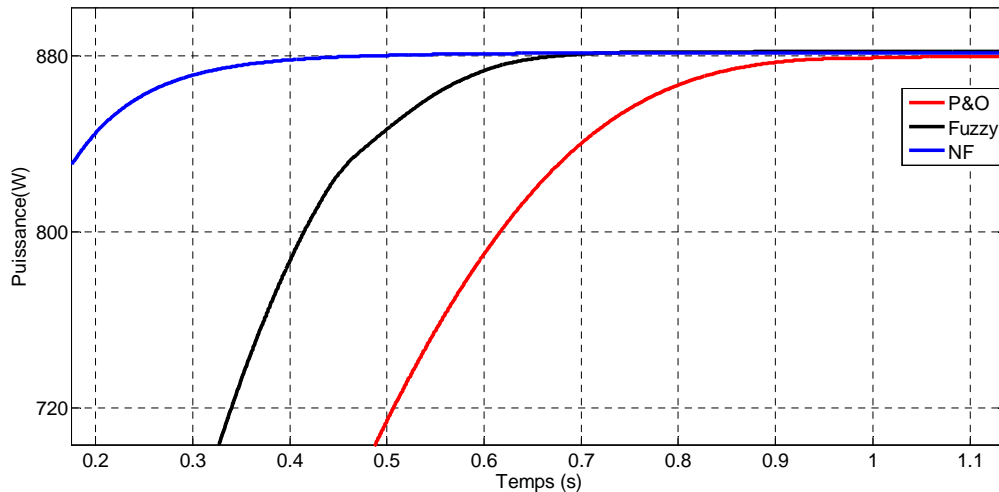


Figure (IV.13.a) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom 1)

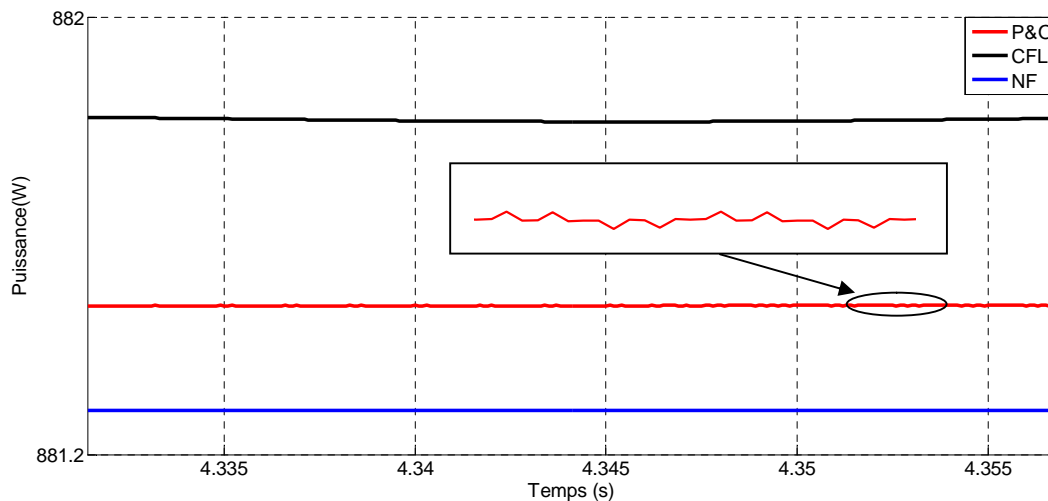


Figure (IV.13.b) Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom 2)

Les figures de (IV.10) à (IV.13) montrent la réponse des algorithmes MPPT proposés sous les conditions stables pour un ensoleillement constant ($E_s=1000\text{W/m}^2$) avec une température (15°C , 45°C).

On remarque qu'il n'y a pas un grand écart en régime permanent pour les trois méthodes (voir la figure IV.13.b), cela montre que les trois algorithmes répondent bien dans le cas de variation de température.

IV.2.2. Fonctionnement sous les conditions variables

Pour comprendre le comportement du système face aux changements d'éclairement on va effectuer une diminution rapide de l'ensoleillement à température constante ($T_c=25^\circ\text{C}$). En

commence par un ensoleillement de 1000W/m^2 et à l'instant $t=5\text{s}$ on bascule à $E_s=800\text{W/m}^2$, les résultats obtenus sont présentes en dessous :

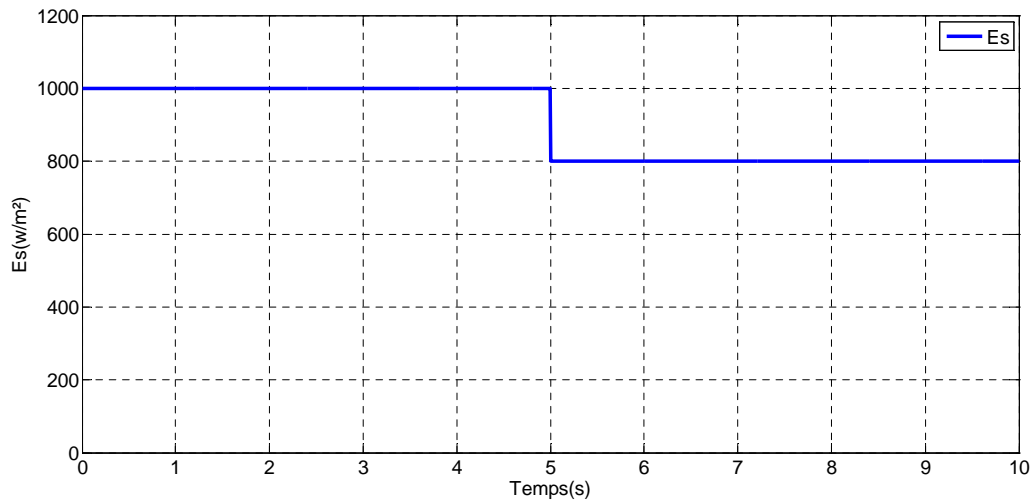


Figure (IV.14) Allure de la consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement rapide.

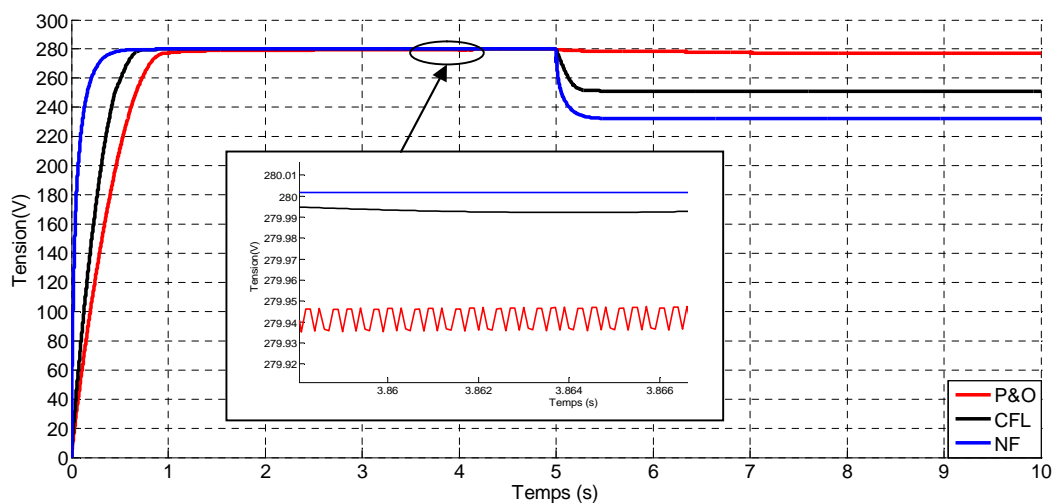


Figure (IV.15) Allure de la tension photovoltaïque dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement

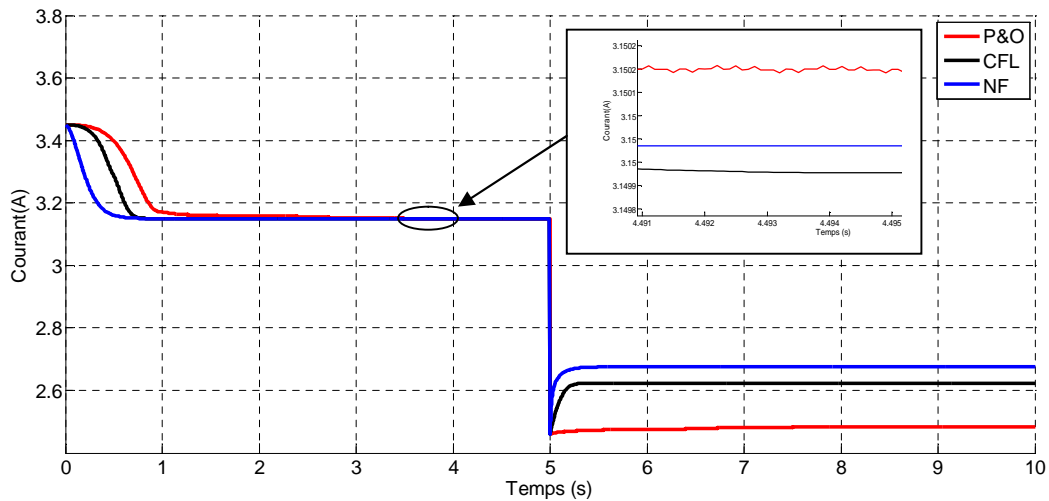


Figure (IV.16) Allure du courant photovoltaïque dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement

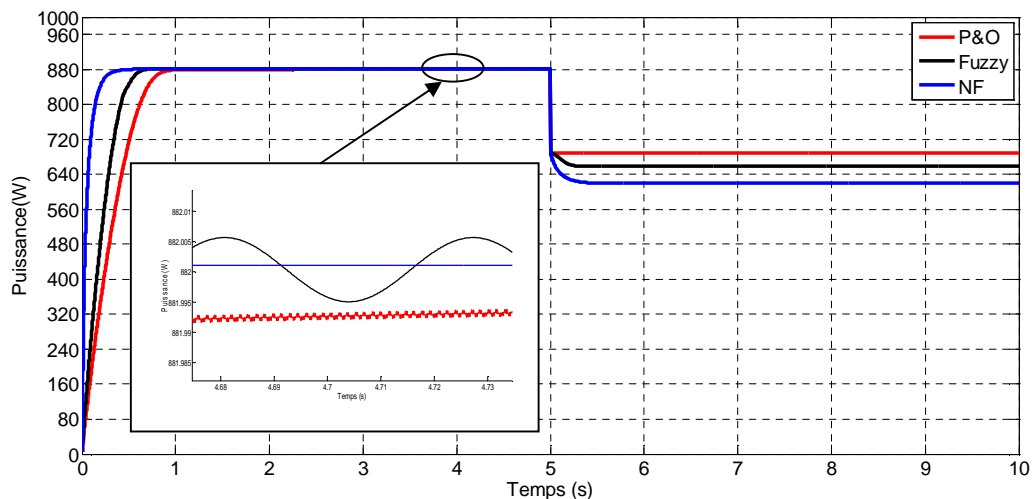


Figure (IV.17) Allure de la puissance photovoltaïque dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement

Pour une variation rapide d'ensoleillement (1000W/m^2 à 800W/m^2 , $T_c=25^\circ\text{C}$), on remarque que l'algorithme neuro floue répond bien, mais la méthode P&O ne répond pas bien suite à la variation, cela présente l'inconvénient moyen de la méthode P&O tel que s'est expliqué dans le troisième chapitre figure (III.3)

IV.2.3. Fonctionnement pour une journée d'été d'ensoleillement

Dans cette partie en va faire une simulation pour un profil journalier, pour voir la réponse des algorithmes MPPT durant toute la journée, les résultats obtenus sont donnés au dessous :

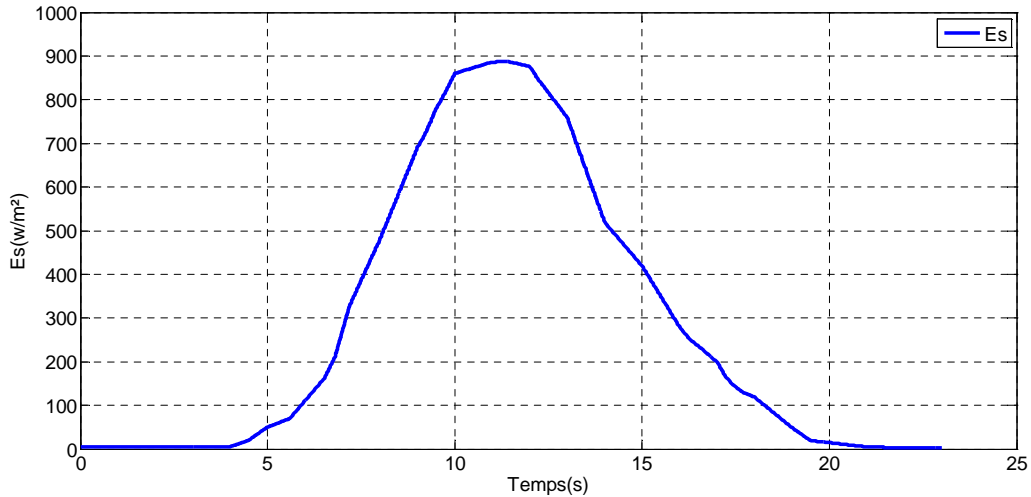


Figure (IV.18) Allure d'un profil d'une journée d'été

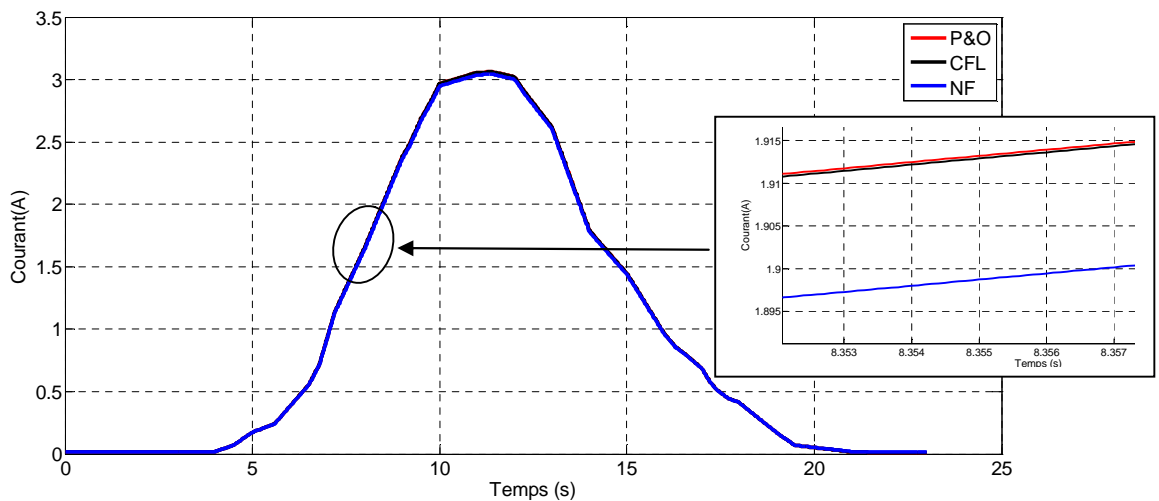


Figure (IV.19) Allure du courant pour un profil d'une journée d'été

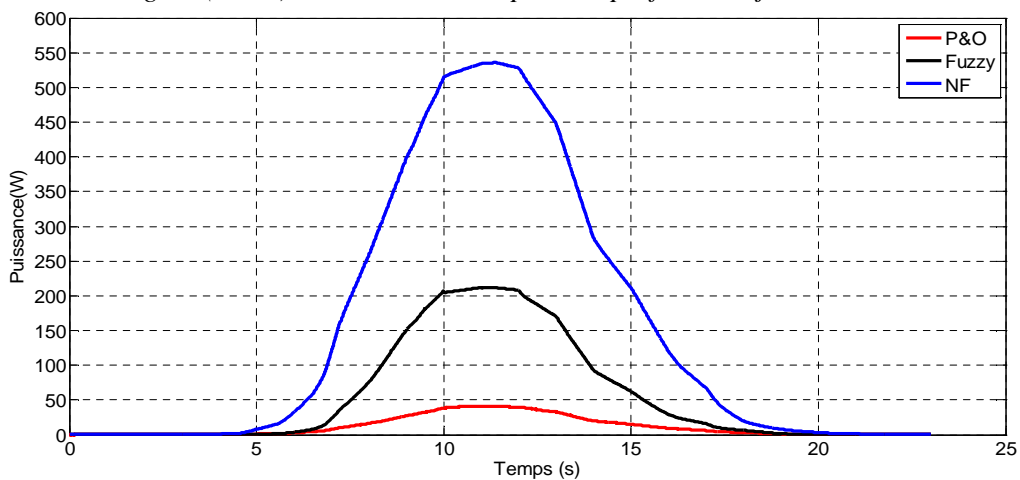


Figure (IV.20) Allure de la puissance pour un profil d'une journée d'été

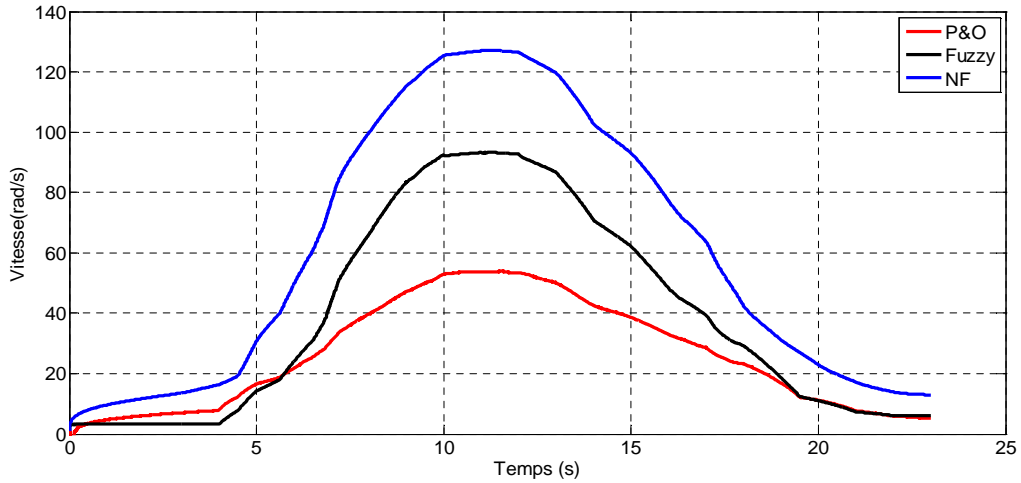


Figure (IV.21) Allure de vitesse pour le profil d'une journée

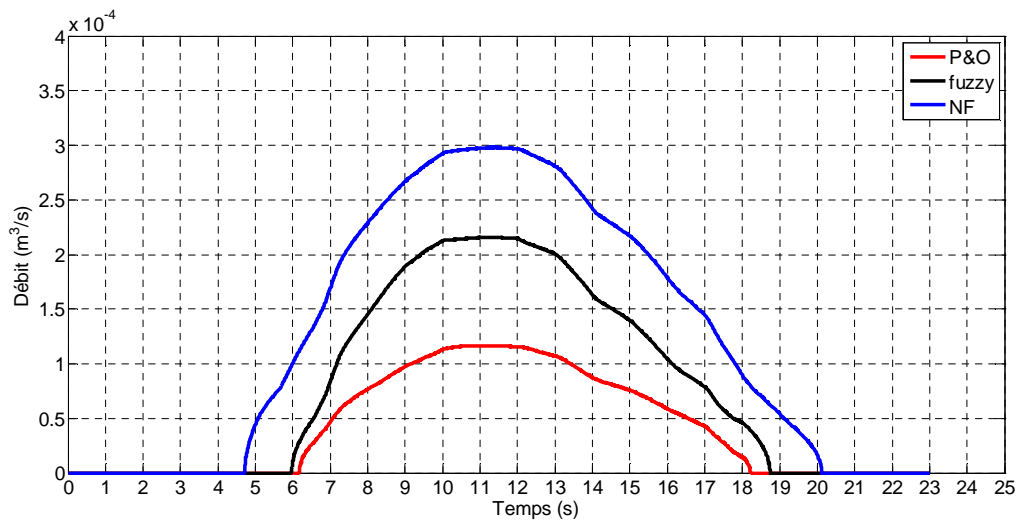


Figure (IV.22) Allure de débit pour le profil d'une journée

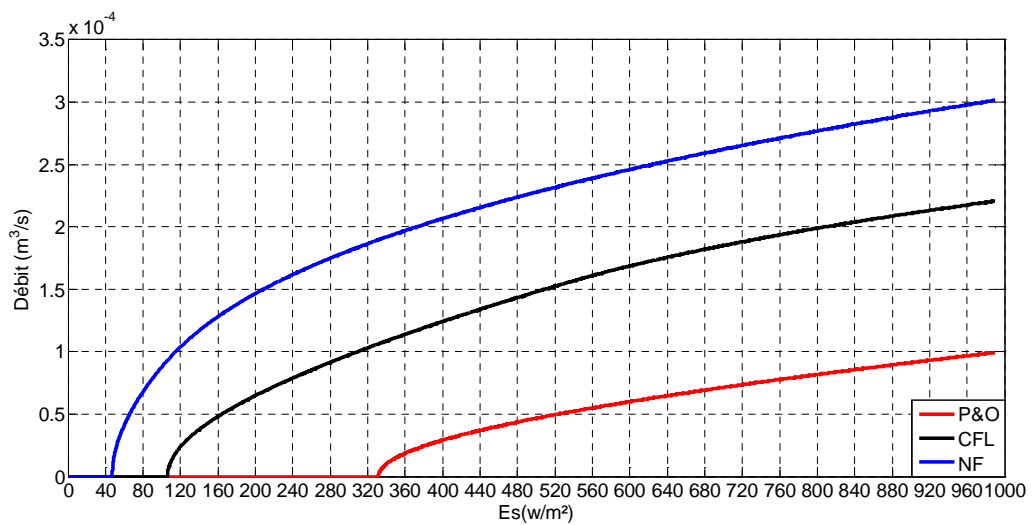


Figure (IV.23) Caractéristique $Q=f(E_s)$

Il est bien clair que le fonctionnement de système est amélioré en utilisant l’algorithme neuro-floue, on peut extraire une puissance supérieur par rapport aux autre types de commande MPPT.

On voit clair que la vitesse et le débit sont amélioré par l’algorithme neuro-floue nous a permit de gagner une heure par aux autre types de commande MPPT. et on peut avoir un pompage pour des valeurs très faible d’ensoleillement (45W/m²) pour la méthode NF ce que montre l’efficacité de la méthode par rapport aux autre type de commande MPPT.

IV.4. Simulation du système globale de pompage photovoltaïque

Dans le deuxième chapitre, on a présenté modélisations des composant du système de pompage photovoltaïque, en a mentionné la commande vectorielle par orientation de flux pour commander le moteur asynchrone. Cette commande consiste à rendre une machine asynchrone comme une machine à courant continu a excitation séparé (découplage entre I_{sq} et I_{sd}). La figure (IV.24) montre le schéma global de la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone.

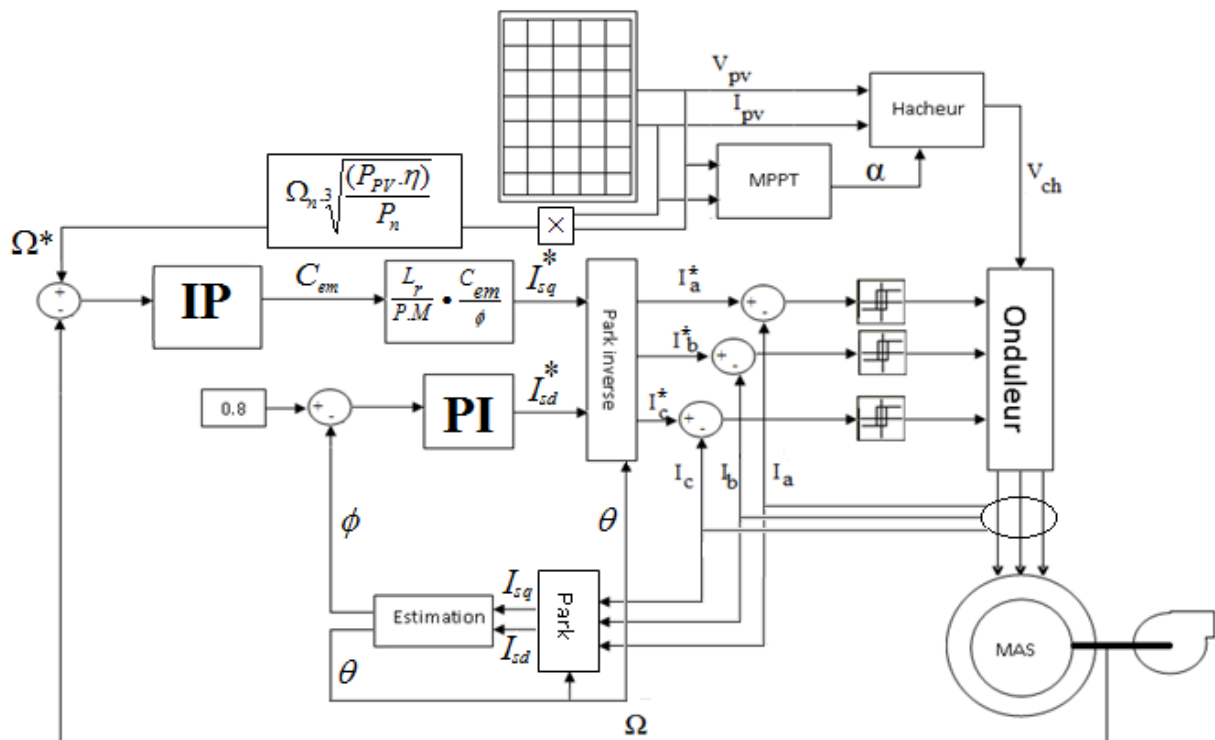


Figure (IV.24) Schéma global de système de pompage photovoltaïque.

La simulation de notre système est basée sur la modélisation des différents éléments du système de pompage déjà présenté au deuxième chapitre, les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

➤ **Pour un fonctionnement dans les conditions STC ($E_s=1000\text{W/m}^2$ $T_a=25^\circ\text{C}$)**

En applique un ensoleillement (1000W/m^2) et température constante (25°C) pour voir la réponse de notre système avec les deux méthodes P&O et NF.

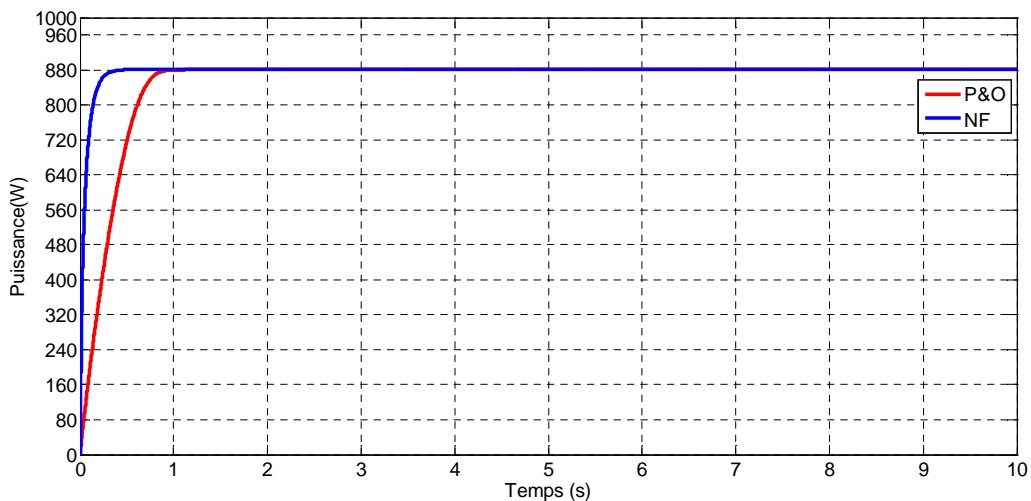


Figure (IV.25) Caractéristique $P_{pv}=f(t)$

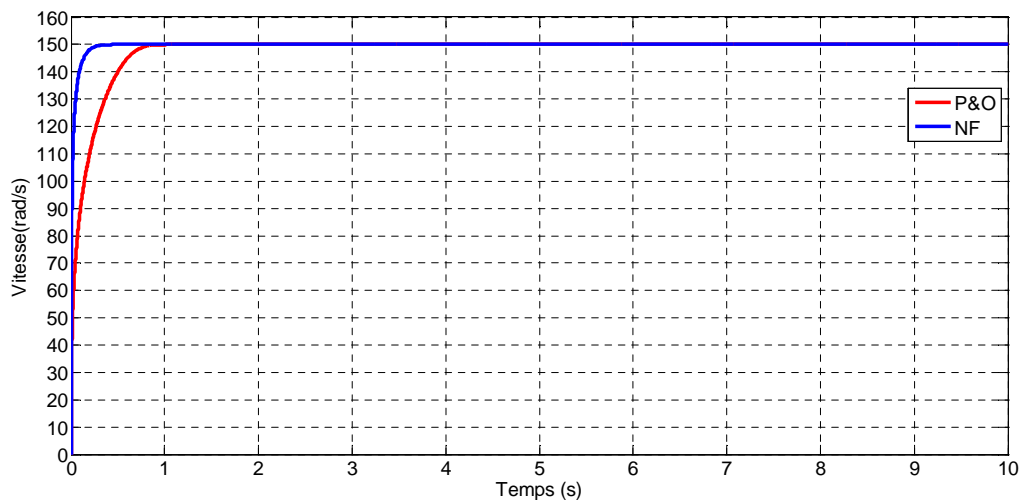


Figure (IV.26) Caractéristique $\Omega=f(t)$

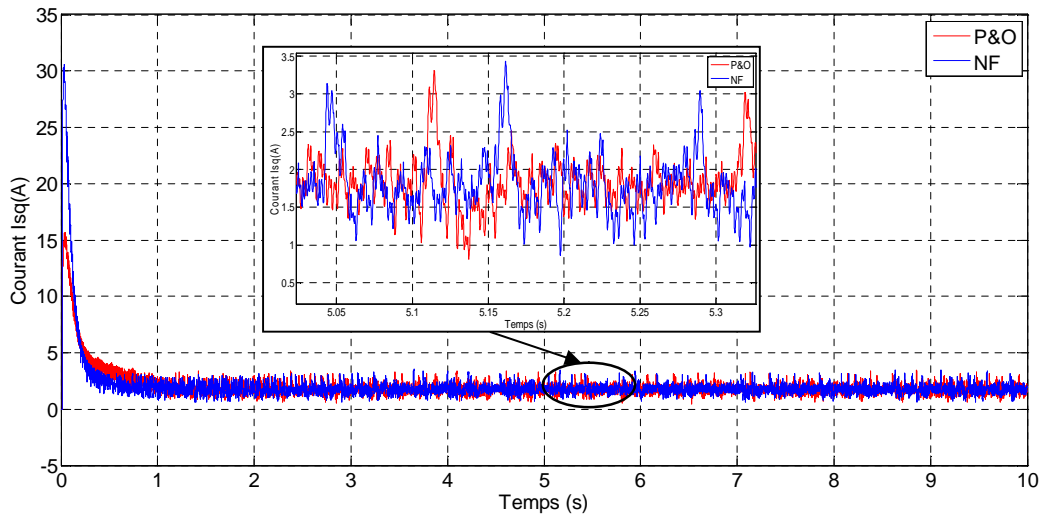


Figure (IV.27) Caractéristique $I_{sq}=f(t)$

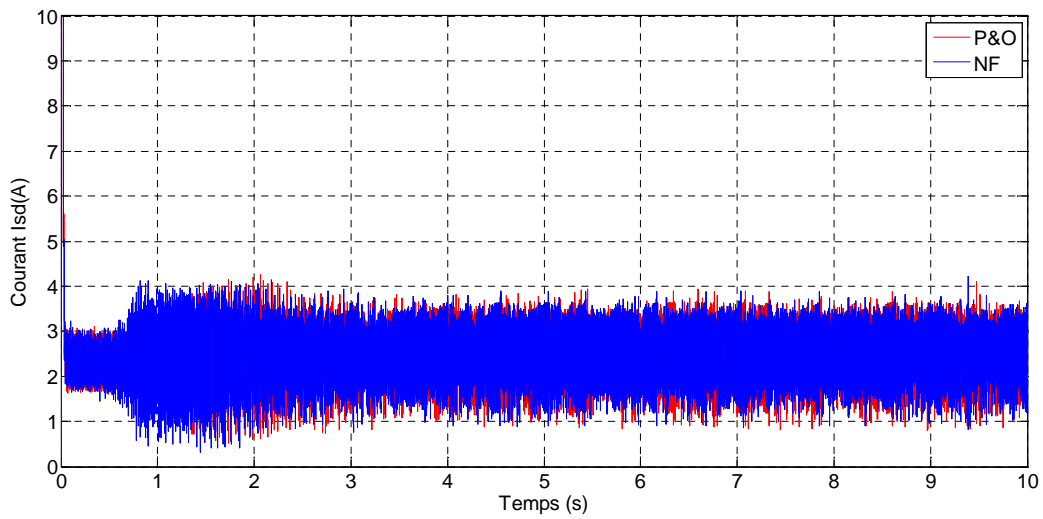


Figure (IV.28) Caractéristique $I_{sd}=f(t)$

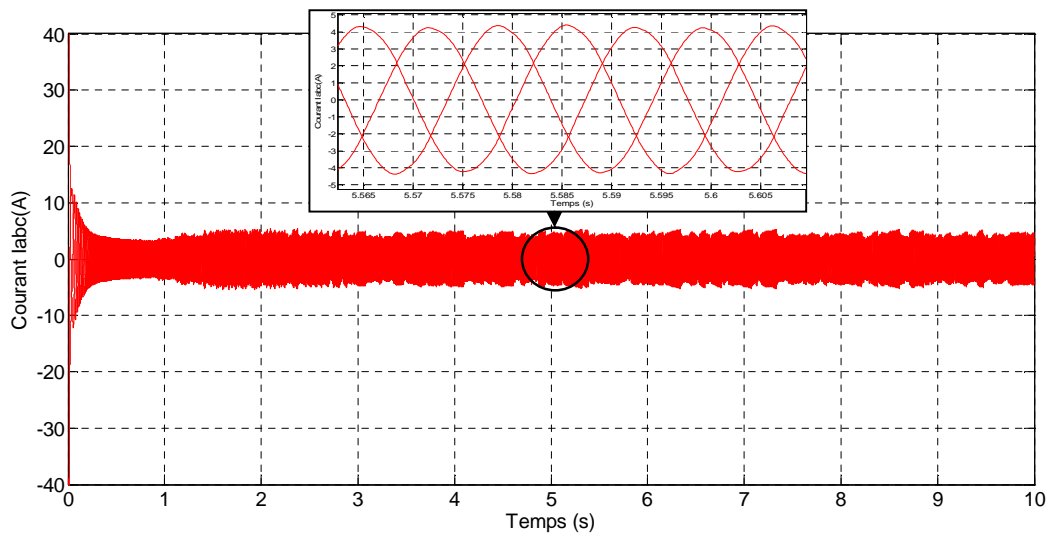


Figure (IV.29) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode P&O

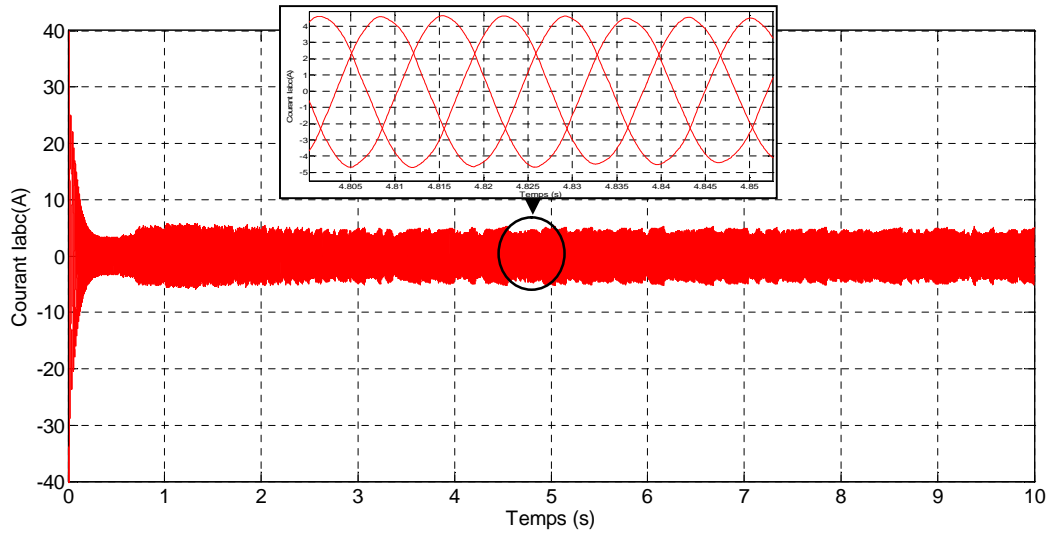


Figure (IV.30) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode NF

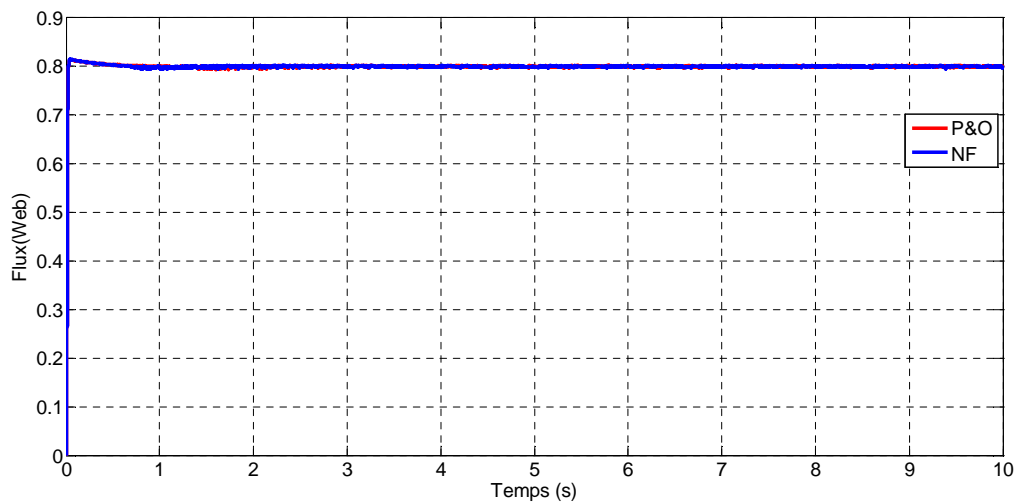


Figure (IV.31) Caractéristique $\phi=f(t)$

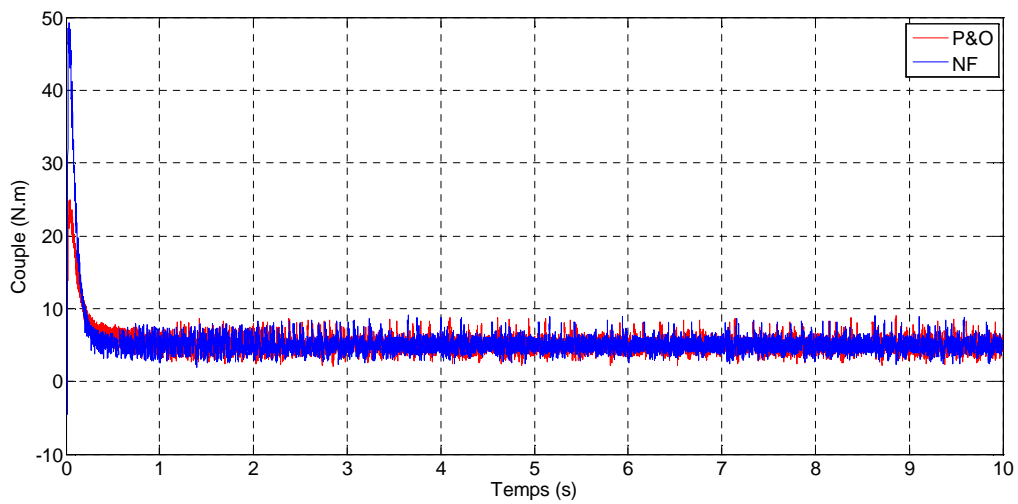


Figure (IV.32) Caractéristique $C_m=f(t)$

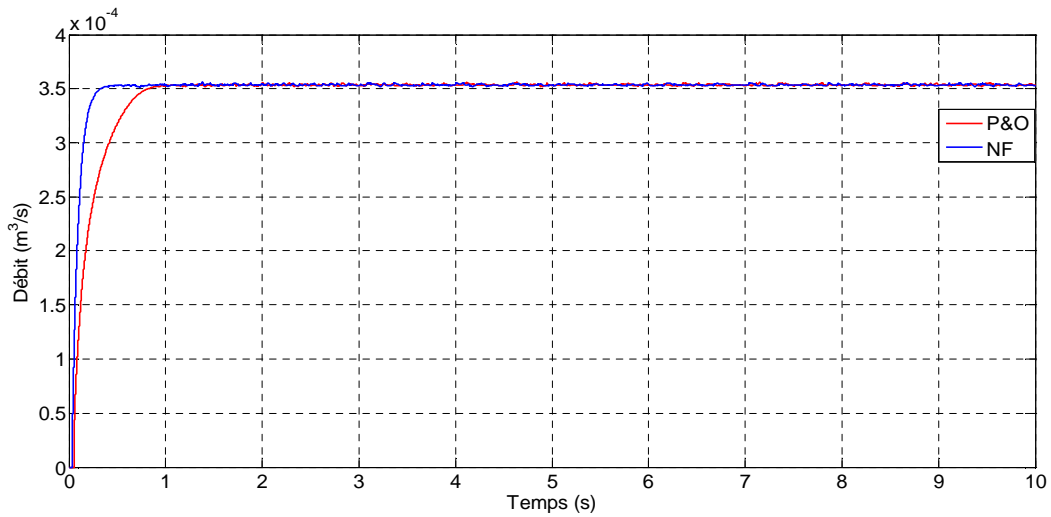


Figure (IV.33) Caractéristique $Q=f(t)$

➤ Pour un ensoleillement variable ($1000\text{-}800\text{W}/\text{m}^2$) et température 25°C

En applique un ensoleillement de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ puis à l’instant $t=5\text{s}$ l’ensoleillement diminue à $800\text{W}/\text{m}^2$ et température constante (25°C), on va voir le comportement du système.

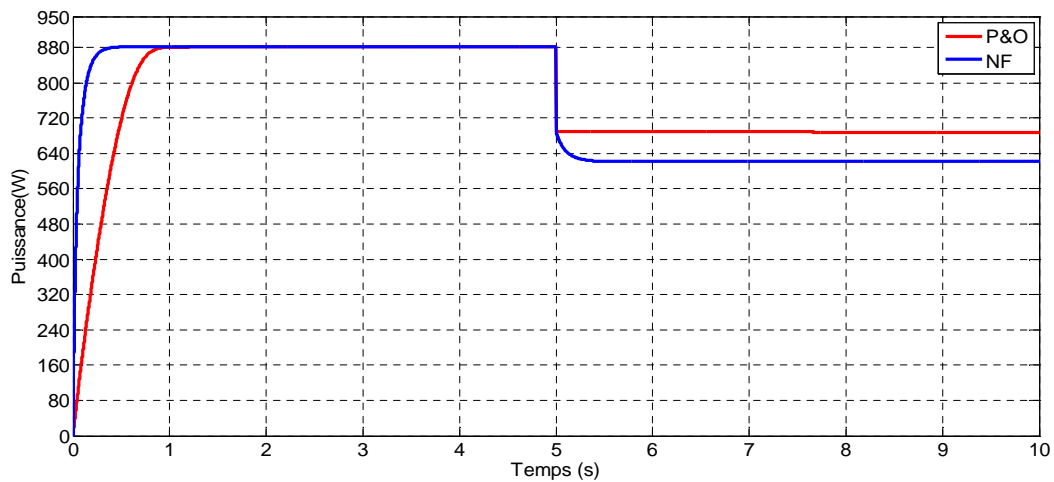


Figure (IV.34) Caractéristique $P_{pv}=f(t)$

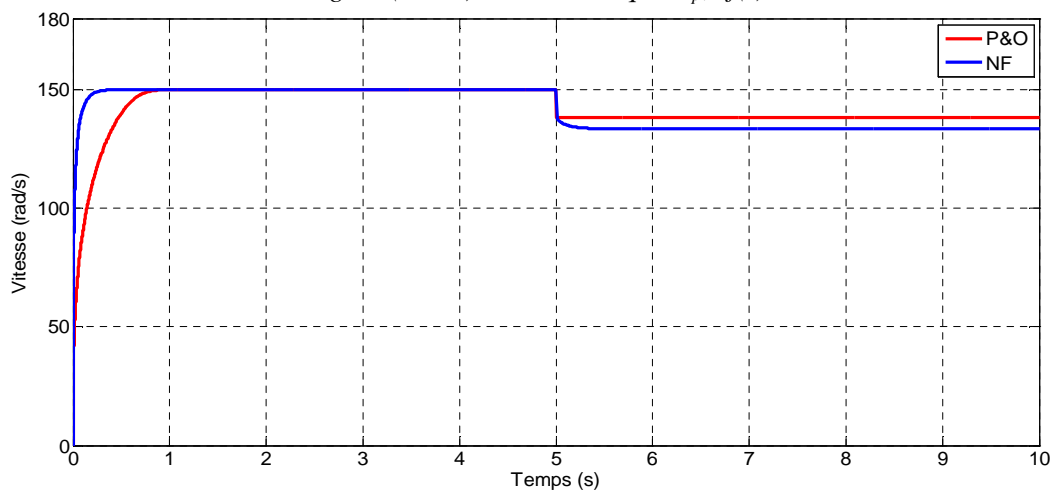


Figure (IV.35) Caractéristique $\Omega=f(t)$

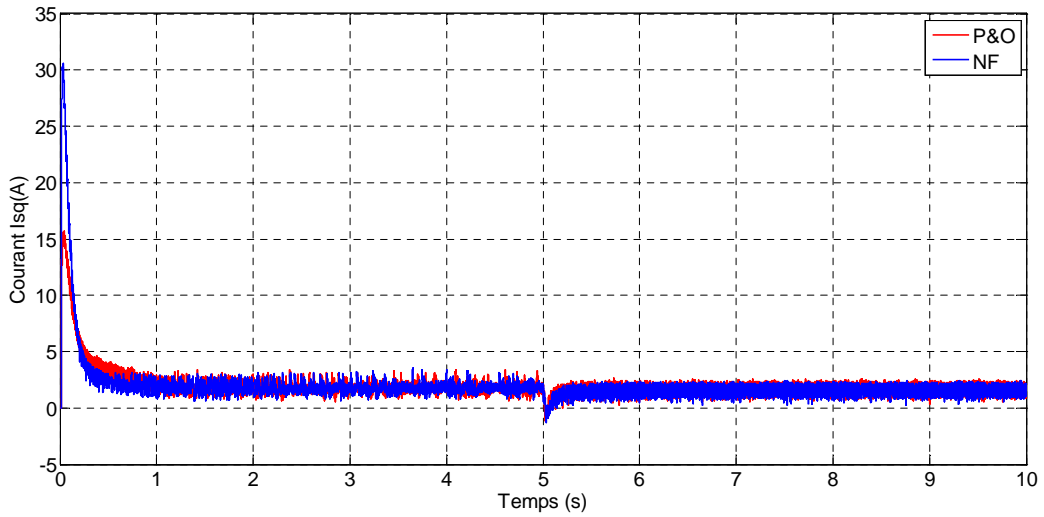


Figure (IV.36) Caractéristique $I_{sq}=f(t)$

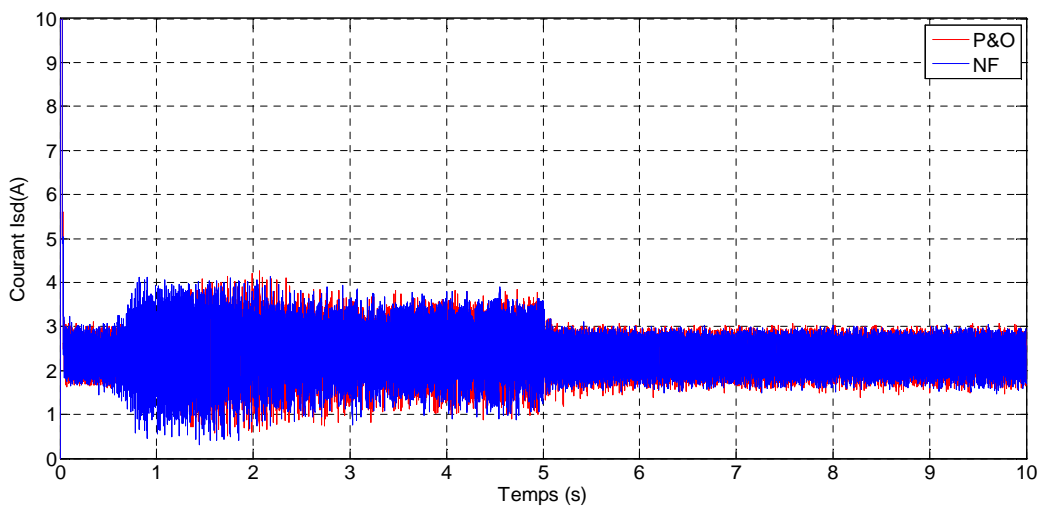


Figure (IV.37) Caractéristique $I_{sd}=f(t)$

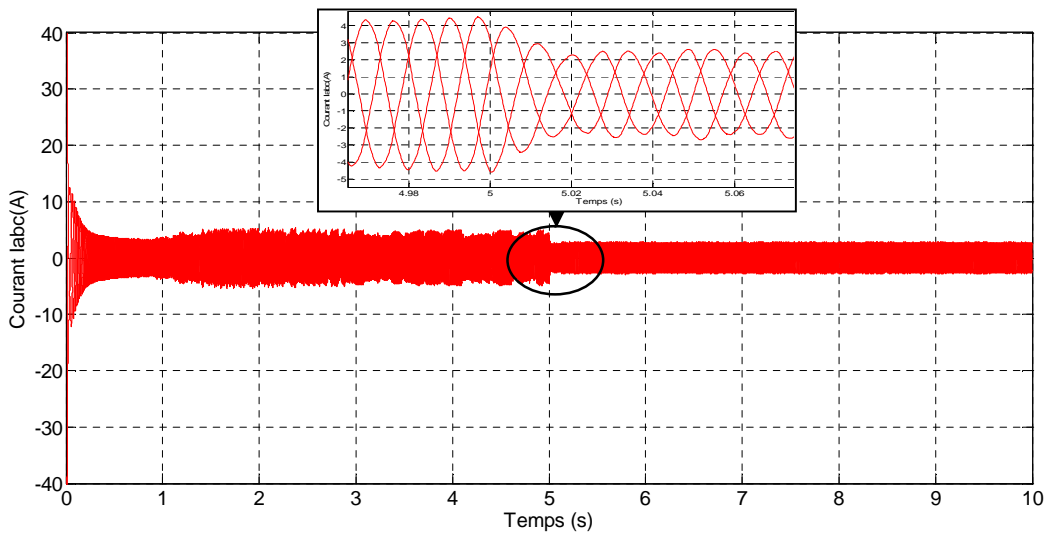


Figure (IV.38) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode P&O

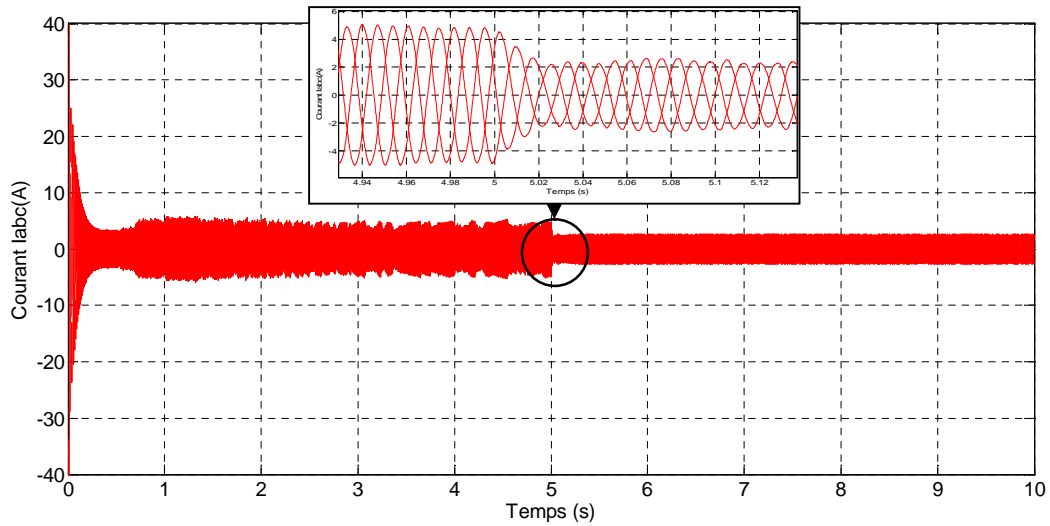


Figure (IV.39) Caractéristique $I_{abc}=f(t)$ pour la méthode NF

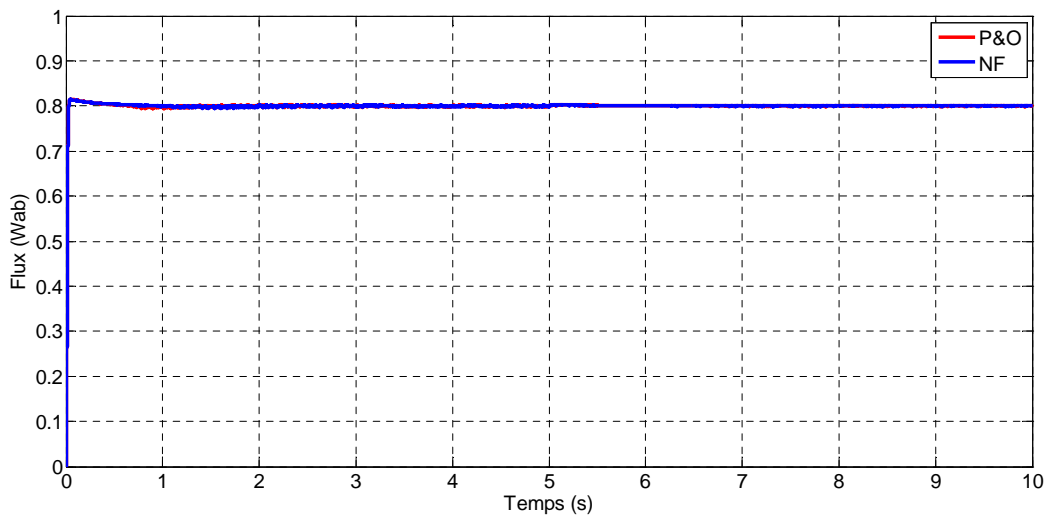


Figure (IV.40) Caractéristique $\phi=f(t)$

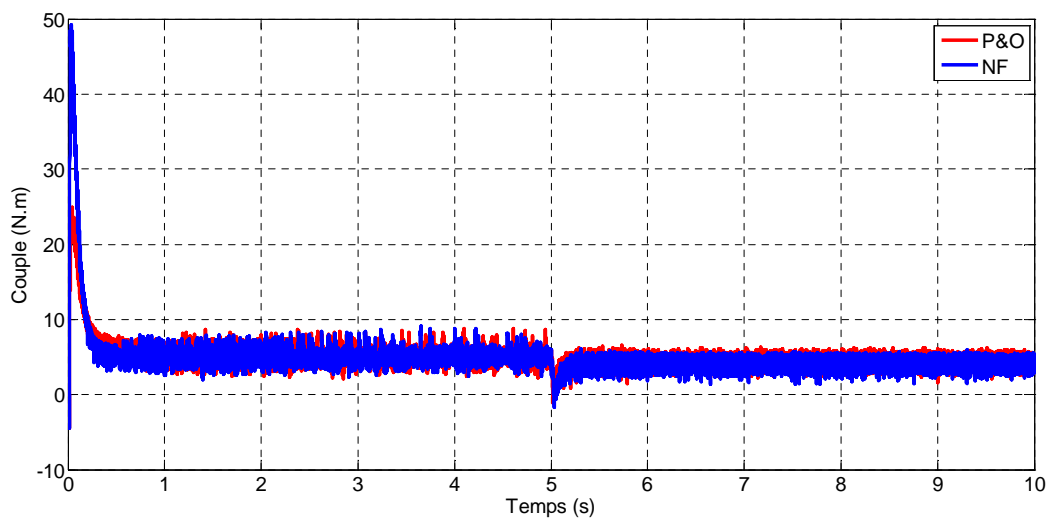


Figure (IV.41) Caractéristique $C_m=f(t)$

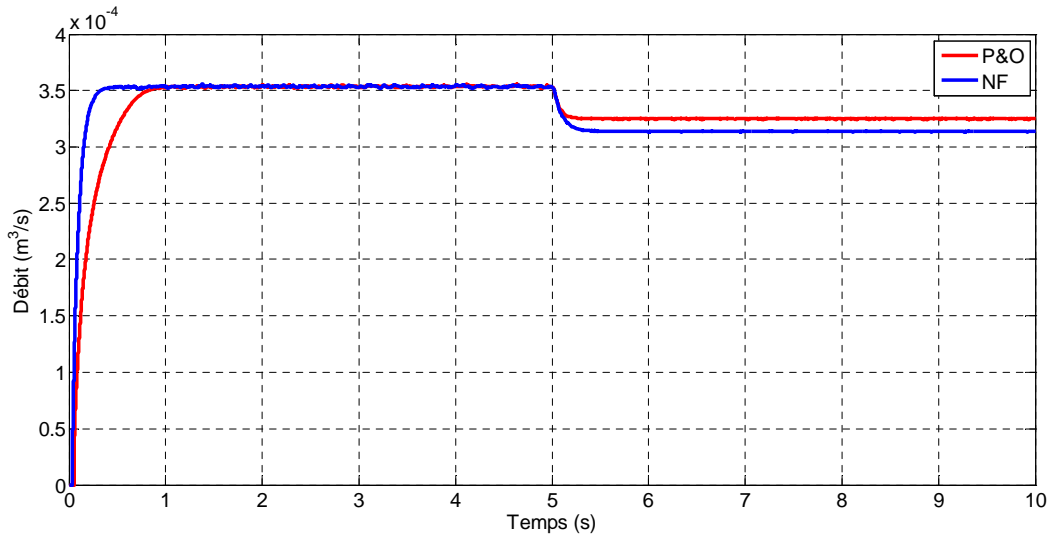


Figure (IV.42) Caractéristique $Q=f(t)$

Cette partie de notre travail, nous a permis d'obtenir les remarques suivantes :

- La vitesse, le débit et le couple varient proportionnellement par rapport à l'éclairement
- L'amorçage de la pompe nécessite une vitesse spécifique (montré par la courbe débit-vitesse)
- La réponse du système optimisé par l'algorithme neuro-flou est plus rapide que la P&O.

IV.5. Conclusion

Pour le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque et pour avoir un bon rendement, l'optimisation devient indispensable. Pour cela ce chapitre a été consacré à l'implantation des algorithmes d'optimisations (P&O, logique floue et neuro-floue).

Les comparaisons entre ces algorithmes (P&O, logique floue et neuro-floue), nous ont permis de voir que l'algorithme neuro-floue présente de meilleures performances statique et dynamique pour la poursuite de point de puissance maximale.

Conclusion générale

Notre travail c'est porté sur l'optimisation d'un système de pompage photovoltaïque, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, des convertisseurs d'énergies, d'un groupe motopompe et un réservoir d'eau.

Nous avons décrit la nécessité d'étudier la caractéristique du modèle du générateur photovoltaïque. En présentant les différentes zones de fonctionnement, l'influence des différents paramètres climatiques sur les caractéristiques I_{PV} (V_{PV}), P_{PV} (V_{PV}) ainsi que la nécessité de faire l'assemblage des panneaux soit en série et parallèle. Après nous avons décrit la chaîne de conversion d'énergie (hacheur et l'onduleur) puis le groupe motopompe (notre choix c'est porté sur un moteur asynchrone avec une pompe centrifuge), pour ces avantages : robustesse, entretien nul et prix réduit.

Après nous avons fait une modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque. On a commencé par le générateur photovoltaïque où on a présenté trois modèles électriques. Une évaluation après comparaison des différents modèles étudiés, nous a permis de choisir le modèle à une diode simplifiée pour la suite de notre travail, car il donne des résultats plus proches de ceux obtenus expérimentalement.

Pour exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum une commande MPPT doit être utilisée pour permettre le fonctionnement MPP. Différente méthode MPPT ont été présentées (P&O, CFL et NF). Une étude comparative a été présentée au quatrième chapitre pour différentes conditions de fonctionnement.

On a constaté que l'algorithme neuro-floue présente les meilleures performances de point de vue statique (temps de réponse) et dynamique (erreur).

Dans le dernier chapitre, le système de pompage photovoltaïque a été simulé en utilisant la méthode d'optimisation neuro-floue. On a appliqué la commande vectorielle, ayant pour principe, le découplage entre le couple et le flux, et pour maintenir la tension de bus continue à une valeur fixe à chaque fois que l'ensoleillement change. Donc cette commande nous a permis de simplifier et d'offrir un certain découplage de la régulation du couple (vitesse), rendant sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Enfin, les résultats de simulation montrent l'efficacité du système de pompage avec la méthode neuro-floue, d'ailleurs on a pu avoir un gain en débit en fonction de temps et en fonction d'ensoleillement, pour un fonctionnement durant la journée on a pu avoir un pompage deux heures avant la méthode P&O.

Et comme perspectives :

- Faire une implémentation de la méthode neuro-floue.
- Faire une comparaison entre la neuro-floue et d'autres méthodes que celle que nous avons étudiées.

Bibliographie

- [ABD07] **A. ABDEL GHANI, H. ABID, M. ABID, A.TAHOUR** « COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE ET MODE GLISSANT D'UNE MACHINE SYNCHRONE AUTOPILOTÉE », Revue. Roum. Science Technique. – Électrotechnique et Énergie., Vol 52, N°1, pp 89–103, Bucarest, 2007
- [BEL07] **F.BELHACHAT, C. LARBES, L. BARAZANE, S. KHARZI** « Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT »; 4th International confirance on computer integrated manufacturing CIP'2007.
- [BEN07] **W.C. BENMOUSSA, S. AMARA et A. ZERGA** «Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin»; Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen pp 301 – 306, 2007
- [BEN12] **S. BENSMAIL** « Contribution à la modélisation et à l'optimisation des systèmes photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique **Option : Systèmes Electro-Energétiques**; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 2012
- [BOR09] **C. BERNARD, C. S. OLIVEIRA, B. LAVAL, C. VAUDOUER** « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 –Energie renouvelables 2009.

- [BOU02] **M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA** « Le Pompage Photovoltaïque » ; Revue des Energies Renouvelables : Zones Arides pp 69-73, 2002
- [BOU08] **A. M. BOUDEN** « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque » ; Mémoire de magister en électronique Option : instrumentation; UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2008
- [BOU10] **A. BOUSSEKINE, N. GUERMOUCHE** « Contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur électromécanique ; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 2010
- [BOU11] **Y. BOUFGHED F. HAMOUCHE** « Commande neuro-floue d'un Robot scot », mémoire de Master en électrotechnique Option : Automatismes Industriels ; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 2011
- [CAR93] **F. CARRIER et E. J. SCHILLER** « Méthode de dimensionnement du réservoir dans les systèmes de pompage photovoltaïques » ; Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, Vol. 6, N° 2, pp. 175-193, 1993
- [DIME] <http://www.directindustry.fr/prod/emit/moteurs-electriques-asynchrones-a-cage-d-ecureuil-a-haut-rendement-32165-191974.html>
- [EPL] http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_11530.htm
- [HAD04] **A. HADJ ARAB, F. CHENLO and M. BENGHANEM**, « Loss-of-load Probability of Photovoltaic Water Pumping Systems »; Solar Energy, Vol. 76, N°6, pp 713-723, 2004.
- [HEL] http://www.hellopro.fr/Ingersoll_Rand_Air_Solutions_HIBON-2550-profil-fr-societe.html

- [IDJ10]** **K. IDJDARENE** « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », thèse doctorat Electrotechnique Option : Commande Electrique ; l'UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA, 2010
- [ISS06]** **S. ISSAADI** « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurons », mémoire de Magister en Electricité Solaire ; ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE ALGER, 2006
- [KAT06]** **L. KATI, K. HADOUCHE** « Performance d'un système photovoltaïque, caractérisation et modélisation », Mémoire d'ingénieur électromécanique; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 2006
- [KHE09]** **M.KHERCHI, M.DJ. SMAÏLI** « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire d'ingénieur en Electronique; ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE ALGER, 2009
- [LAL05]** **S.LALOUNI** « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batteries » ; mémoire de magistère en génie électrique option : commande électrique; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA, 2005
- [LEA06]** **A.B. LEARRTA** « Réalisation de commande MPPT numérique », Mémoire d'ingénieur technique industriel ; UNIVERSITE ROVIRA 1 VIRGILI Italie, 2006
- [LOU09]** **A .LOUADAH** « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » ; Mémoire de master en électromécanique; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 2009
- [MOH10]** **A. MOHAMMEDI** « Etude d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Master en électrotechnique option : Electromécanique ; ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, 2010

- [OBE06] **G.F. OBEIDI** « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue », Mémoire de Magister en Electricité Solaire ; ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE ALGER, 2006
- [PHOT] <http://www.photowatt.com/fr/rd/principe.php>
- [ROY98] **T. DJIAKO, J. ROYER, E. SCHILLER, B. SADA SY** « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens 1998.
- [SFU] <http://sites-final.uclouvain.be/lei/enseignement/elme/Realisations/groupe01/groupe/realisation.htm>
- [SPO] <http://www.spolyten.com/spolyten/pompage/>
- [THI07] **K. THIERRY, S. MAURICE** « Système Photovoltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte-à-goutte » ; Mémoire de DEA en Physique Appliquée Option : Semi-conducteurs ; université de OUAGADOUGOU, 2007
- [WICME] http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0lectrique
- [WIK] <http://www.wikiwater.fr/spip.php?article41>
- [WIKMAS] http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_asynchrone
- [WIKMCC] http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_courant_continu
- [WIKME] http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A9lectrique

- [WIKMS] http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_synchrone
- [ZAR08] **L. ZAROOUR, R. CHENNI, A. BORNİ et A. BOUZİD** « Improvement of synchronous and asynchronous motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control »; Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 59, N°. 4, pp 169-177, 2008
- [ZAR10] **L. ZAROOUR** « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau »; Thèse doctorat OPTION : Machines électriques; UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2010
- [ZİD11] **N. ZİDANE et L. MEZİANI** « Etude d'une installation photovoltaïque en vue d'un pompage solaire 6m³/jour »; mémoire d'ingénieur en électrotechnique option : électromécanique ; 2011.

Annexe1

Tableau 1 : paramètres pour le modèle d'une diode [LOU09]

Paramètre	Valeurs
P_1	0,0036
P_2	0,0001
P_3	-0,0005
P_4	70,843
A	1
E_g	$1,76 \cdot 10^{-19}$
$R_s (\Omega)$	0.614
$R_{sh}(\Omega)$	151.16

Tableau 2 : paramètres d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24 [BEN12]

Paramètre	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp} (W)	110
Courant au point de puissance maximale du panneau I_{mpp} (A)	3.15
Tension au point de puissance maximale du panneau V_{mpp} (V)	35
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	3.45
Tension de circuit ouvert V_{oc} (V)	43.5
Coefficient d'incrémentations du courant α_{sc}	0.0014
Coefficient d'incrémentations de la tension β_{oc}	-0.152

Tableau 3 : calcul d'erreur

	Tension (e_v %)	Courant (e_i %)	Puissance (e_p %)
Explicite	5,55	0,26	5,33
Simplifie	7,17	0,04684	0,5
Implicite	7,73	0,56	0,68

Annexe2

Tableau 1 : paramètre de moteur asynchrone [ZAR08]

Résistance statorique R_s (Ω)	4
Résistance rotorique R_r (Ω)	1.143
Inductance statorique L_s (Ω)	0.3676
Inductance rotorique L_r (Ω)	0.3676
Inductance mutuelle M (Ω)	0.3439
Nombre de pôle P	2
Inertie J (N.m)	0.03
Coefficient de frottement f (N.m.s/rad)	0.0009

Tableau 2 : paramètre de la pompe centrifuge [ZAR08]

Hauteur H_g (m)	10
Diamètre d (m)	0.006
la gravitation g (m^2/s)	9.81
la constante λ (m)	0.039
la longueur l (m)	7.4
la constante ζ (m)	6.3
la constante α_0 ($m/(\text{rad}/\text{sec})^2$)	4.9234e-3
la constante α_1 ($m/(\text{rad}/\text{sec})^2$)	1.5826e-5
la constante α_2 ($m/(\text{rad}/\text{sec})^2$)	-18144
Vitesse nominale ω_n (rad/s)	150
Débit nominal de la pompe Q (m^3/h)	1.5

Annexe3

Tableau 1 : tableau de règle [BER09]

ΔP_{PV} / ΔV_{PV}	GN	N	Z	P	GP
GN	GN	GN	N	N	Z
N	GN	N	N	Z	P
Z	N	N	Z	P	P
P	N	Z	P	P	GP
GP	Z	P	P	GP	GP

Tableau 2 : analogie entre le neurone biologique et le neurone formel [ZAR10]

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapses	Poids de connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrite	Signal d'entrée
Somma	Fonction d'activation

Résumé :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière.

Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque, autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque étaient appliqués, et des techniques étaient suivies pour avoir une bonne adaptation et un rendement élevé.

Ici on représente trois méthodes d'optimisation on commence par l'algorithme perturbation et observation (P&O), la logique floue et l'algorithme neuro-floue. On constate que l'algorithme neuro-floue présente les meilleures performances de point de vue statique (temps de réponse) et dynamique (erreur).