



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique



THÈSE

Présentée par

BOUCHAKOUR ABDELHAK

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Electrotechnique

Option : Commande électrique

Thème

**Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage
Photovoltaïque**

Soutenue le : 22/04/2018

Devant le Jury :

Nom et Prénom

Grade

Pr. ZIDI Sid Ahmed

Professeur

UDL SBA

Président

Dr BRAHAMI Mostéfa

Professeur

Univ. de SBA

Rapporteur

Pr. ALLAOUI Tayeb

Professeur

Univ. de Tiaret

Examineur

Dr. KANSSAB Abdelkader

MCA

Univ. de Chlef

Examineur

Année Universitaire : 2018

Laboratoire de recherche: Intelligent Control And Electrical Power Systems **ICEPS**

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes chers parents.

À ma chère femme.

À ma belle fille.

À mes frères.

À tous ma famille.

À tous mes amis et mes collègues...

Bouchakour Abdelhak

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu Tout Puissant pour toutes les merveilles qu'il fait dans ma vie et pour m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'étude.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers mon promoteur **Professeur Brahami Mostéfa**, pour la confiance qu'il m'a prodigué en me laissant une grande liberté dans ma recherche, pour ses encouragements continus, pour le suivi de près de mon travail, pour ses bons conseils judicieux, ses observations et son assistance pour mener à bien ce travail.

Je remercie vivement et très profondément :

- ✓ Monsieur **ZIDI Sid Ahmed**, professeur à UDL SBA, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.
- ✓ Monsieur **ALLAOUI Tayeb**, professeur à l'université de Tiaret, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ma thèse.
- ✓ Monsieur **KANSSAB Abdelkader**, Maître de conférences à l'université de Chlef, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ma thèse.

Je remercie encore mon collègue le **Dr Borni Abdelhalim**, maître de recherche dans URAER, Ghardaïa pour ses conseils et son aide.

Enfin, je terminerai par remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail de recherche.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des Symboles et abréviations

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etat de l'Art des Systèmes Photovoltaïques	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Demande mondiale énergétique.....	5
I.3. Production mondiale d'électricité.....	5
I.4. Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde.....	6
I.5. Taux de croissance annuel moyen des filières renouvelables.....	7
I.6. Potentiel solaire dans le monde	8
I.7. Situation énergétique en Algérie.....	10
I.8. Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie.....	10
I.9. Potentiel solaire en Algérie.....	11
I.10. Programme d'efficacité énergétique en Algérie.....	12
I.11. Solaire photovoltaïque.....	13
I.12. Solaire thermique.....	13
I.13. Eolien.....	14
I.14. Agences de recherche et de développement.....	14
I.15. Cadre juridique réglementaire et mesures incitatives.....	16
I.15.1. Cadre juridique.....	16
I.15.2. Incitatives financières et fiscales.....	17
I.15.3. Mesures réglementaires.....	17
I.16. Photovoltaïque : rappels et notions générales.....	18
I.16.1. Principe de la conversion photovoltaïque.....	18
I.16.2. Principe de l'effet PV.....	18
I.16.3. Technologies des cellules photovoltaïques.....	19
I.16.3.2. Technologie de 2 ^{ème} génération : couches minces "thin films".....	20
I.16.3.3. Technologie de 3 ^{ème} génération : multijonction, concentration.....	20
I.16.4. Types des Systèmes PV.....	21
I.16.4.1. Systèmes PV autonomes.....	21
I.16.4.2. Systèmes PV hybrides.....	21
I.16.4.3. Systèmes PV raccordés au réseau.....	22
I.16.5. Configurations d'un système de pompage PV.....	22

I.16.6. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque.....	23
I.16.6.1. Générateur photovoltaïque.....	24
I.16.6.2. Système de conversion (Convertisseurs).....	24
I.16.6.3. Moteurs d'entraînements.....	24
I.16.6.4. Pompe.....	26
I.17. Conclusion.....	27
Chapitre II : Modélisation des Différents Eléments d'un Système de Pompage Photovoltaïque	
II.1. Introduction.....	29
II.2. Modélisation des différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque...	29
II.2.1. Générateur photovoltaïque.....	29
II.2.1.1 Modèle électrique.....	30
II.2.1.2 Paramètres externes.....	31
II.2.1.3 Influence de l'ensoleillement et de la température sur les caractéristiques d'un GPV.....	33
II.2.1.4 Association des photopiles : Module photovoltaïque.....	34
II.2.2 Convertisseur DC/DC buck-boost.....	37
II.2.3 Onduleur de tension.....	38
II.2.3.1 Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale PWM.....	39
II.2.4 Modélisation du groupe motopompe.....	40
II.2.4.1 Modélisation de la machine asynchrone MAS.....	40
II.2.4.2 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)....	50
II.2.4.3 Modélisation de la machine à courant continu MCC.....	54
II.2.5 Modélisation de la pompe centrifuge.....	57
II.2.5.1 Hauteur manométrique totale	57
II.2.5.2 Pertes de charges linéaires.....	58
II.2.5.3 Pertes de charges singulières (locales)	58
II.2.5.4 Caractéristique débit-hauteur	59
II.2.5.5 Caractéristique couple vitesse $C(\omega)$ de la pompe.....	59
II.2.5.6 Calcul de puissance.....	59
II.3 Conclusion.....	60

Chapitre III : Optimisation de Fonctionnement du Système de Pompage Photovoltaïque

III.1. Introduction.....	61
III.2. Couplage direct du groupe motopompe-GPV.....	61
III.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)	62
III.3.1. Optimisation par la méthode de perturbation et d'observation (P&O)	65
III.3.2. Optimisation par la Méthode d'incrémentation de la conductance (INC).....	67
III.3.3. Optimisation par la méthode mode glissant.....	69
III.3.3.1. Principe de la commande par mode glissant.....	70
III.3.3.2. Conception de la commande par mode de glissement.....	71
III.3.3.3. Choix de la surface de glissement.....	71
III.3.3.4. Existence du mode de glissement.....	72
III.3.3.5. Calcul de la commande u	73
III.3.3.6. Régime de glissement réel.....	74
III.3.3.7. Phénomène de Réticence (Chattering)	75
III.3.3.8. Application du mode glissant au système PV.....	77
III.3.4. Synthèse de fonctionnement du système.....	78
III.3.5. Résultat de simulation.....	79
III.3.6. Conclusion.....	88

Chapitre IV : Optimisation du Système de Pompage Photovoltaïque par la Logique Floue et la Logique Floue Optimisée par le PSO

IV.1. Introduction.....	90
IV.2. Logique floue, principes et définitions.....	91
IV.2.1. Variables linguistiques.....	92
IV.2.2. Opérateurs de la logique floue.....	93
IV.2.3. Fonction d'appartenance.....	94
IV.2.4. Propositions et règle floue.....	96
IV.3. Réglage et commande de la logique floue.....	97
IV.3.1. Conception d'une commande par logique floue.....	98
IV.3.2. Configuration interne d'un régulateur par logique floue.....	99
IV.3.2.1. Interface de fuzzification.....	99
IV.3.2.2. Inférence floue.....	100
IV.3.2.3. Interface de defuzzification.....	101

IV.4. Avantages et inconvénients de la logique floue.....	101
IV.4.1. Avantages.....	101
IV.4.2. Inconvénients.....	102
IV.5. Application de la logique floue au système de pompage PV.....	102
IV.5.1. Description du régulateur floue.....	103
IV.5.2. Loi de commande.....	104
IV.6. Algorithme d'optimisation de l'essaim de particules PSO	106
IV.6.1. Formalisation.....	106
IV.6.2. Initialisation de l'essaim.....	107
IV.6.3. Equation de mouvement.....	108
IV.6.4. Description du contrôleur floue_PSO.....	110
IV.7. Résultats de simulations.....	111
IV.7.1. Résultats de simulations en régime dynamique.....	111
IV.7.2. Résultats de simulations en régime permanent.....	116
IV.8. Conclusion.....	120
Conclusion générale.....	121
Annexes	
Bibliographie	

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1. Consommation d'énergie mondiale.....	5
Fig.I.2. Production mondiale d'électricité.....	6
Fig.I.3. Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde.....	7
Fig.I.4. Taux de croissance annuel moyen 2002-2012.....	8
Fig.I.5. Capacité photovoltaïque globale et annuelle dans le monde.....	9
Fig.I.6. Puissances des énergies renouvelables d'ici 2030.....	11
Fig.I.7. Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.....	18
Fig.I.8. Cellules cristallines.....	19
Fig.I.9. Cellule a couche mince.....	20
Fig.I.10. Cellules multijonction et a concentration.....	21
Fig.I.11. Organigramme des différentes configurations des systèmes de pompage PV.....	23
Fig.I.12. Arbre des pompes hydrauliques.....	27
Fig.II.1. Système de pompage photovoltaïque étudié.....	29
Fig.II.2. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	30
Fig.II.3. Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.....	32
Fig.II.4. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un GPV pour différents éclairagements et temperature.....	33
Fig.II.5. Différents types de modules PV.....	34
Fig.II.6. Cellules en séries.....	35
Fig.II.7. Cellules en parallèles.....	35
Fig.II.8. Configuration d'un GPV sous ombrage partiel.....	36
Fig.II.9. Caractéristiques I(V) et P(V) en fonctionnement normal et sous ombrage.....	36
Fig.II.10. Schéma simplifié d'un convertisseur buck-boost.....	37
Fig.II.11. Topologies d'un convertisseur buck-boost.....	38
Fig.II.12. Schéma simplifié d'un onduleur triphasé utilisé pour le pompage PV.....	38
Fig.II.13. Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale.....	39
Fig.II.14. Représentation schématique du MAS.....	41
Fig.II.15. Représentation schématique de la commande vectorielle.....	45
Fig.II.16. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation du flux rotorique.....	46
Fig.II.17. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation des courants statoriques.....	47
Fig.II.18. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de la vitesse.....	48
Fig. II.19 Schéma global de la commande vectorielle d'une MAS.....	49
Fig.II.20. Démarrage à vide d'une MAS suivie d'une perturbation du couple de charge.....	50
Fig.II.21. Schéma global de la commande vectorielle d'une MSAP.....	53
Fig.II.22. Démarrage à vide d'une MSAP suivie d'une perturbation du couple de charge.....	54
Fig.II.23. Schéma d'un entraînement avec une MCC a excitation indépendante.....	55
Fig.II.24. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation du courant d'induit.....	56
Fig.II.25. Démarrage à vide d'une MCC suivie d'une perturbation du couple de charge.....	57
Fig. II.26. Caractéristiques H (Q) et la caractéristique de canalisation.....	59
Fig.III.1 Connexion direct GPV-charge.....	62
Fig.III.2. Tensions et puissances de charge pour un couplage direct.....	63
Fig.III.3. Points de fonctionnement du système de pompage PV.....	64
Fig.III.3. Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT.....	64
Fig. III.4. Organigramme de l'algorithme P&O.....	66
Fig.III.5. Illustration du comportement erratique de l'algorithme 'P&O' sous un changement d'éclairément rapide.....	67
Fig.III.6. Caractéristique P(V) d'un GPV, variation de dP/dV	68
Fig.III.7. Organigramme de l'algorithme INC.....	69
Fig.III.8. Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.....	71
Fig.III.9. Représentation de la commande discontinue.....	74
Fig.III.10. Régime glissant réel.....	75
Fig.III.11. Phénomène de réticence.....	75
Fig.III.12.a. Commande a deux seuils.....	76
Fig.III.12.b. Commande a un seul seuil.....	76
Fig.III.13. Configuration du contrôleur du système solaire.....	80
Fig. III.14. Profil de variation d'eclairément.....	81
Fig. III.15. Résultats de simulation de la puissance du GPV par la methode P&O, INC et MG avant et après optimisation ($t=25^{\circ}\text{C}$).....	83
Fig. III.16.a. Courants du GPV (t).....	83

Fig. III.16.b. Zoom des courants du GPV (t)	83
Fig. III.17.a Tensions du GPV (t)	84
Fig. III.17.b. Zoom des tensions du GPV (t)	84
Fig. III.18.a. Puissances du GPV (t)	84
Fig. III.18.b. Zoom des puissances GPV (t)	84
Fig. III.19.a. Rapport cyclique d(t)	84
Fig. III.19.b. Zoom du rapport cyclique d(t)	84
Fig.III.20. Résultats de simulation du système optimise par P&O, INC et mg et entrainer par la MCC.....	86
Fig.III.21. Résultats de simulation du système optimise par P&O, INC et mg et entrainer par la MSAP.....	87
Fig.III.22. Résultats de simulations du système optimise par P&O, INC et mg et entrainer par la MAS.	88
Fig.IV.1. Exemple de définition d'ensembles sur un univers de discours en logique binaire et en logique floue....	92
Fig.IV.2. Représentation graphique des termes linguistiques.....	93
Fig.IV.3. Procède générale lors de la conception d'une commande par logique floue.....	98
Fig.IV.4. Schéma synoptique général d'un contrôleur floue.....	99
Fig.IV.5. Structure globale de l'optimisation par la logique floue.....	102
Fig.IV.6. Schéma bloc du contrôleur MPPT par la logique floue.....	104
Fig.IV.7. Fonction d'appartenance de dP , dV et dV_{ref}	105
Fig.IV.8. Déplacement d'une particule.....	107
Fig.IV.9. Organigramme d'optimisation par essaim particulaire.....	109
Fig.IV.10. Schéma bloc du contrôleur MPPT par la logique floue optimise par le PSO.....	110
Fig.IV.11. Résultats de simulation des différentes grandeurs du GPV optimise par la LF et la LF_PSO.....	112
Fig.IV.12. Résultats de simulation des différentes grandeurs du système de pompage PV entraine par une MCC et optimise par la LF et la LF_PSO.	113
Fig.IV.13. Résultats de simulation des différentes grandeurs du système de pompage PV entraine par une MSAP et optimise par la LF et la FL_PSO.....	114
Fig.IV.14. Résultats de simulations des différentes grandeurs du système de pompage PV entraîné par une MAS et optimisé par la LF et la LF_PSO.....	116
Fig.IV.15. Point de fonctionnement I(V).....	117
Fig.IV.16. Ligne de puissance P(V).....	117
Fig.IV.16. W(G) avant et après l'optimisation des systèmes de pompage PV entraine par une MCC, une MSAP et une MAS.....	118
Fig.IV.17. Quantité d'eau pompée Q(G) avant et après l'optimisation par la LF_PSO des systèmes de pompage PV entraine par une MCC, une MSAP et une MAS.....	119
Fig.IV.18. Efficacité globale optimisée des systèmes de pompage PV entraine par une MCC, une MSAP et une MAS.....	119

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Production mondiale d'électricité.....	5
Tableau I.2 : Potentiel solaire en Algérie.....	12
Tabau.III.1 : Vérification des conditions de convergence.....	79
Tableau. IV.1 : Formes usuelles des fonctions d'appartenances.....	95
Tableau IV.3 : Table de règles d'inférence à sept classes.....	106
Tableau IV.4 : Paramètres optimal de la LF-PSO.....	110

NOTATIONS

Symbole	Désignation
φ	Eclairement (W/m ²).
I_0	Courant de saturation inverse (A).
I_{01}, I_{02}	Courants de saturation de la diode 1 et de la diode 2 respectivement (A).
I_{ph}	Courant photonique de la cellule (A).
$I_{ph,ref}$	Courant photonique de référence de la cellule (A).
I_{max}	Courant maximal de la cellule (A).
I_{cc}	Courant de court-circuit du panneau solaire (A).
$I_{cc,ref}$	Courant de court-circuit de référence du panneau solaire (A).
FF	Facteur de forme.
N_s	Nombre de panneaux en série.
N_p	Nombre de panneaux en parallèles.
V_{PV}	Tension du générateur photovoltaïque.
I_{PV}	Courant du générateur photovoltaïque.
P_0	puissance incidente sur le générateur photovoltaïque.
i_L	Courant du convertisseur DC/DC.
C_{PV}	Capacité du convertisseur DC/DC.
R_s	Résistance série (Ω).
T_c	Température de la cellule ($^{\circ}K$).
T_{ref}	Température de cellules, à condition de référence ($^{\circ}K$).
V_{CO}	Tension à vide du panneau solaire (V).
$V_{CO,ref}$	Tension à vide de référence du panneau solaire (V).
K	Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K.
n	Facteur de qualité de la diode.
n_{ref}	Facteur de qualité de référence de la diode.
η_{moteur}	Rendement du moteur.
$\eta_{onduleur}$	Rendement d'onduleur.
η_{pompe}	Rendement de la pompe.
μ_{isc}	Coefficient de la température du courant de court-circuit (A/ $^{\circ}C$)
μ_{oc}	Coefficient de la température en circuit ouvert (V/ $^{\circ}C$).
β	Nombre des cellules en série.
α	Nombre des cellules en parallèles.
S	Surface de générateur [m ²].
P	Nombre de pair de pole.
P_{PV}	Puissance du générateur photovoltaïque.
P_p	Puissance de pompe.

P_{conv}	Puissance du convertisseur.
P_{ond}	Puissance d'onduleur.
q	Constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-19} C$.
$[\omega, \omega_s, \omega_r]$	Vitesse mécanique, statoriques et rotorique (Rad/s).
$[\theta_s, \theta_r, \theta_m]$	angle de rotation statoriques, rotorique et mécanique.
$[\Phi_{rabc}]$	Matrice des flux rotorique.
$[\Phi_{rd}, \Phi_{rq}]$	Vecteurs des flux direct et quadratique.
$[\Phi_{sabc}]$	Matrice des flux statoriques.
Φ_e	Flux des aimants permanents par pôle.
$[I_{sd}, I_{sq}]$	Vecteurs des courants direct et quadratique (A).
$[L_{rr}]$	Matrice des inductances propres et des mutuelles entre phases rotorique (H).
$[L_{ss}]$	Matrice des inductances propres et des mutuelles entre phases statoriques (H).
$[M_{sr}]$	Matrice des inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotorique (H).
$[R_a, R_r]$	Matrice des résistances statoriques et rotorique (Ω).
$[V_{sd}, V_{sq}]$	Vecteurs des tensions direct et quadratique (A).
$[V_{d_ref}, V_{q_ref}]$	Tensions de références direct et quadratique (V).
$[I_d^*, I_q^*]$	Courants de références direct et quadrature (A)
T_e	Couple électromagnétique (N.m).
C_p	Coefficient de puissance.
T_r	Couple Résistant du moteur (N.m).
C_1, C_2, C_3	Signaux de commandes.
U_{ac}, U_{ba}, U_{cb}	Tensions composées à la sortie de l'onduleur (V).
E	Force électromotrice FEM (N).
J	Moment d'inertie (Kg/m^2).
D	Rapport cyclique.
K_p, K_i	Coefficient de régulateur proportionnel et intégrateur.
L_d, L_q	Inductances directe et en quadratique du stator (H).
$H(p)$	Fonction du transfert du système en boucle ouverte.
$G(p)$	Fonction du transfert du système en boucle fermée.
$[\Delta H_1, \Delta H_2]$	Pertes de charge linéaires et singulières.
ρ	Densité de l'air (Kg/m^3).
λ	Coefficient de pertes de charges linéaires.
L	Longueur de la tuyauterie (m).
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2).
Q	Débit d'eau (m^3/h).
T_L	Couple de charge de la pompe (N.m).
K_{fr}	Constante de canalisation.
$E(k)$	Erreur

K_E, K_{CE}	Facteurs d'échelles (normalisation).
CE (k)	Variation d'erreur
E	Force électromotrice FEM (N).
J	Moment d'inertie (Kg/m ²).

ABRÉVIATIONS

GIEC : Groupe d'Experts Internationaux sur le Climat

GES : Gaz à Effet de Serre

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

AIE : Agence Internationale de l'Energie

EnR : Energies Renouvelables

GWEC: Global Wind Energy Council

HCDS : Haute Commission pour le Développement de la Steppe

CSP : Solaire Thermodynamique

CREDEG : Centre de Recherche et Développement de l'Electricité et du Gaz

CDER : Centre de développement des énergies renouvelables

URAER : Unité de recherche appliquée en énergie renouvelable

UDES : Unité de développement des équipements solaires

URER.MS : Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien

UDTS : Unité de développement de la technologie du silicium.

FNER : Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie

Eg : Energie de Bande Gap

GPV : Générateur Photovoltaïque

MPP : Points de Puissance Maximale.

P&O : Perturb & Observation

INC : Incrémentale Conductance

CMG : Contrôleur par Mode Glissant

MCC : Machine à Courant Continu

MSAP : Machine Synchrone à Aimant Permanent

MAS : Machine Asynchrone

RLF: Réglage par Logique Floue

PSO : Optimisation par Essaims Particules

ACO : Optimisation par Colonie de Fourmis

CC : Courant Continu

CA : Courant Alternatif

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La communauté internationale (accord de Kyoto) s'est fixé des orientations pour le développement des énergies renouvelables, avec la libération du marché de l'électricité et l'exploitation de nouvelles énergies propres et durables. Cette libération du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée amènent dans le domaine du génie électrique de nombreux problèmes scientifiques et techniques nouveaux.

Parmi les sources des énergies renouvelables, on cite l'énergie solaire, l'énergie éolienne et les piles à combustible. Ce sont celles qui ont le potentiel énergétique le plus important en Algérie. Elles sont des énergies durables non polluantes et économiquement viables. L'énergie solaire est une ressource libre, propre et inépuisable qui peut être utilisée dans diverses applications. L'électricité produite par le réseau électrique national peut ne pas atteindre certaines régions éloignées; par conséquent, les sources d'énergie solaire deviennent critiques en particulier dans les pays en développement, où elles peuvent être utilisées pour l'éclairage ainsi que pour l'irrigation et le pompage de l'eau.

Le pompage de l'eau est essentiel dans le monde pour de nombreuses usages, notamment l'irrigation, l'abreuvement, l'approvisionnement en eau des villages et l'utilisation domestique. On estime que 11 % de la population mondiale, soit 768 millions de personnes, n'avait pas accès à l'eau potable en 2011. Les efforts de surmonter ce problème ont donné à des programmes de pompage de l'eau une priorité importante. Dans beaucoup de régions ce but peut être réalisé seulement par l'utilisation des nappes souterraines. Dans les secteurs lointains des réseaux électriques, il y a des possibilités diverses pour se servir de ces nappes : pompes à main, pompes diesel, pompes solaires, etc. Pour obtenir le fonctionnement le plus fiable et le plus économique, une attention particulière est portée à leur conception et à leur utilisation optimale.

Par conséquent, différents types de moteurs sont utilisés pour les systèmes de pompage photovoltaïque (PV), tels que les moteurs à courant continu (MCC), les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) et les moteurs à induction (MI); chaque moteur a des caractéristiques uniques qui déterminent son efficacité. Cependant, les moteurs à courant alternatif nécessitent l'installation d'un onduleur DC / AC entre les panneaux PV et le moteur. Dans les années passées les systèmes de pompage PV étaient principalement basés sur des

moteurs à courant continu, car ils présentent l'avantage d'être facilement contrôlable grâce au découplage naturel du flux et du couple. De nombreuses études sur les moteurs à courant continu ont signalé que ces moteurs demandent plus d'entretien ce qui signifie des coûts supplémentaires. En outre, les problèmes d'arc du commutateur limitent la taille et la vitesse de ces moteurs, ce qui les rend inadéquats dans certaines zones.

Ces limitations peuvent être surmontées en utilisant des systèmes de pompage PV guidée par des MSAP avec ou sans convertisseur DC / DC en raison de leur large gamme de tensions d'entrée. Cependant, ces systèmes sont coûteux et applicables à faible puissance, ce qui entrave leur utilité. Par contraste, en raison de leur disponibilité, de leur efficacité élevée, de leur faible maintenance, de leur conception durable et de leur petite taille, les systèmes de pompage PV guidé par les MI ont suscité un intérêt considérable de la part des chercheurs et des fabricants.

CONTRIBUTION ET ORGANISATION DE LA THESE

L'objectif visé par notre travail étant le développement d'un procédé d'optimisation qui permet de maximiser le rendement global du système de pompage PV entraînés par trois types de moteurs différents et qui ont la même puissance: un moteur à courant continu (MCC), un moteur asynchrone (MAS) et un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP).

L'optimisation des trois systèmes de pompage PV sera effectuée par un ensemble de techniques (MPPT) citées ci-dessous en tenant compte des critères tels que la simplicité de mise en œuvre, la vitesse de convergence, la stabilité, la réponse transitoire et la capacité à suivre les variations d'irradiations, à savoir :

- Méthode de perturbation et observation « P&O » ;
- Méthode d'incrémentation de conductance « INC » ;
- Le mode glissant ;
- La logique floue ;
- La logique floue optimisé par l'essaimage des particules (PSO).

Les trois systèmes sont ensuite comparés pour déterminer le système le plus efficace en termes de rendement et quantité d'eau pompée.

Le travail de thèse est principalement subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des formes d'énergies les plus consommées au monde, ainsi que la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et dans le cas particulier de l'Algérie. Nous listons ensuite d'une manière brève les étapes importantes du programme de développement des énergies renouvelables en Algérie, puis un état de l'art concernant le principe de la conversion PV ainsi que les différents types de cellules PV existant dans le marché. Nous donnons enfin une présentation générale des différents configurations de système de pompage PV avec les éléments principaux qui constituent ce type de système.

Dans le second chapitre, une modélisation mathématique des différents composants du système de pompage PV sera présentée ; à savoir le générateur photovoltaïque (GPV), avec l'influence des différents paramètres climatiques sur ces les caractéristiques I-V et P-V. Le modèle des deux convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec l'utilisation de la technique de commande MLI. Les machines d'entraînements (MCC, MSAP et MAS) avec l'utilisation de la stratégie de la commande vectorielle appliquée au MSAP et MAS, afin de pouvoir l'assimiler au modèle linéaire de la MCC. Nous donnons enfin le modèle de la pompe et le circuit hydraulique.

Dans le troisième chapitre, on abordera le problème d'optimisation du système de pompage PV. Rappelons que dans le cadre de cette étude, l'objectif est d'optimiser la puissance globale du système de pompage PV. Cela sera réalisé par l'ajustement du gain d'un convertisseur DC-DC intercalé entre le GPV et le groupe motopompe. On présente ensuite une étude comparative entre quelques méthodes de "tracking" de la puissance maximale en termes de simplicité, vitesse de convergence, stabilité, et la capacité à suivre les variations d'irradiations à savoir : "Perturb & Observe", "Incremental Conductance", et "Mode glissant".

Dans le quatrième chapitre, on s'intéressera à la maximisation de la puissance du GPV en utilisant la logique floue. Au début, on expose les concepts de base de la logique floue liés aux problèmes de commande ainsi que les différents types de régulateurs flous, en explicitant les éléments constitutifs de chaque type. Le principe d'optimisation de l'essaim de particules est ensuite abordé en présentant leur principe de fonctionnement ainsi que son application sur la commande floue pour optimiser ces gains. Les résultats seront ensuite présentés et discutés.

Dans la conclusion générale, on rappellera les principaux résultats obtenus et on donnera les éventuelles perspectives envisagées.

***CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DES
SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES***

I.1. Introduction

Dans son cinquième rapport, le Groupe d'experts internationaux sur le climat (GIEC) conclut qu'il est extrêmement probable (à plus de 95 %) que les activités humaines sont liées à l'accroissement des températures constaté depuis 1950. Cette hausse des températures est principalement due à l'utilisation des combustibles fossiles [1]. Selon les scénarios les plus probables, en raison notamment de la fonte des calottes glaciaires, les changements climatiques entraîneront une hausse du niveau des mers. Les événements climatiques extrêmes seront aussi plus fréquents et plus intenses. Les effets de réchauffement sur les populations humaines pourraient se traduire par une diminution de la disponibilité et de la qualité de l'eau potable, des rendements agricoles plus faibles, une augmentation de la mortalité liée à la chaleur, etc... [2].

En plus des mesures d'adaptation aux changements climatiques, des mesures d'atténuation, c'est-à-dire la diminution des émissions et l'augmentation des puits de carbone, comme les forêts et le stockage du carbone dans les produits du bois, sont nécessaires afin de réduire la contribution des activités humaines aux changements climatiques [3].

Le secteur de l'énergie émet les deux tiers des gaz à effet de serre de l'économie mondiale, ce qui explique sa position centrale dans les discussions liées aux changements climatiques. La Chine et l'Inde sont responsables de plus de 30 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) émanant de la consommation d'énergie [4, 2].

Les pays du monde entier se sont entendus à Copenhague en 2009, lors de la 15^{ème} conférence des parties (COP15), pour limiter la hausse des températures à 2 °C au-dessus du niveau de 1850. Seul un scénario très ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) de 10 % par décennie permettra d'y arriver. Depuis le début de l'année 2014, trois des quatre plus grandes économies du monde (l'Union Européenne, les États-Unis et le Japon) ont toutes adopté des politiques visant la réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre [4].

Pour une meilleure compréhension de l'importance des énergies renouvelables, et particulièrement, l'énergie solaire, le présent chapitre présente un bilan des formes d'énergies les plus consommées au monde, le potentiel solaire en Algérie, ainsi que les étapes importantes du programme de développement des énergies renouvelables en Algérie.

I.2. Demande mondiale énergétique

Malgré la détermination de la communauté internationale à réduire et à «décarboniser» c'est-à-dire favoriser les sources à faible teneur en carbone qui émettent moins de gaz à effet de serre, la demande d'énergie primaire a augmenté de plus de 50 % de 1990 à 2012, et la part des hydrocarbures est restée dominante à près de 82 %, tel que l'illustre la figure (I.1) [5].

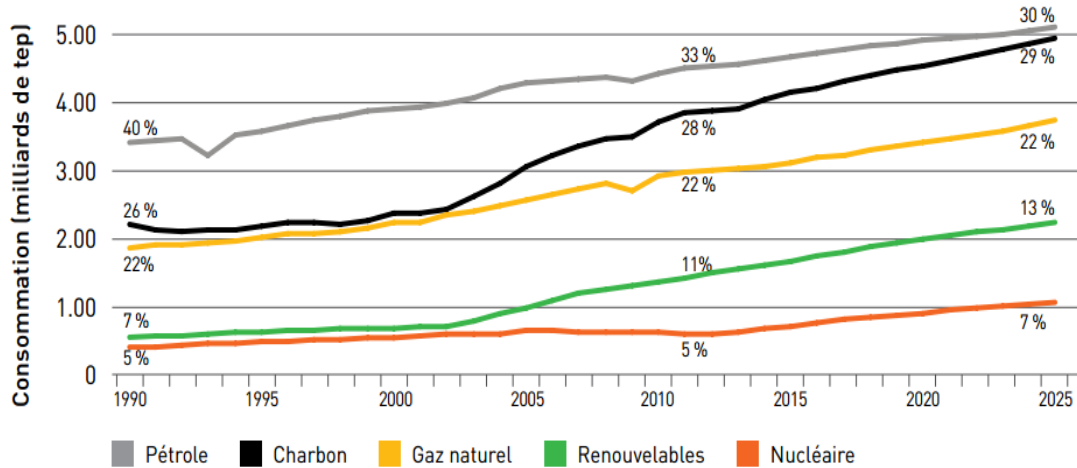


Fig.I.1. Consommation d'énergie mondiale

La part du charbon dans le portefeuille d'offre énergétique a pour sa part augmenté de près de quatre points de pourcentage pour s'établir à 29 % en 2012 (Tableau I.1). Ce phénomène est principalement dû à la hausse de la demande découlant de la croissance économique rapide des pays, qui ne sont pas membres de l'organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), menés par la chine. Toutefois, la mise en place de politiques gouvernementales qui visent à lutter contre les changements climatiques, particulièrement dans des pays non membres de l'OCDE, pourrait tempérer ces tendances au cours de la prochaine décennie [6, 7].

I.3. Production mondiale d'électricité

Le scénario central de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit que la production mondiale d'électricité augmentera de plus de 36 % de 2012 à 2025.

Tableau I.1 : Production mondiale d'électricité

Formes d'énergies	Demande en 1990	Demande en 2012	Demande en 2025	Part en 1990	Part en 2012	Part en 2025	dT _{totale} 1990-2012	dT _{totale} 2012-2025
Production annuelle d'électricité (TWh)								
Charbon	4 425	9 204	10 800	37%	41%	35%	+ 108%	+ 17%
Pétrole	1 310	1 144	695	11%	5%	2%	-13%	-3.08%

Gaz naturel	1 760	5 104	7 010	15%	22%	23%	+190%	+37%
Nucléaire	2 013	2 461	3 594	17%	11%	12%	+22%	+46%
Hydroélectricité	2 144	3 672	5 004	18%	16%	16%	+71%	+36%
Renouvelables	173	1 135	3713	1%	5%	12%	+556%	+227%
Total	11 825	22 721	30 817				+ 92%	+ 36%

La consommation d'électricité dans les pays en voie de développement devrait poursuivre sa croissance relativement prononcée, alors qu'elle sera plus modeste et stable dans les principaux pays membres de l'OCDE (États-Unis, Canada, Mexique et le Chili). Ainsi, la part des pays non membres de l'OCDE (l'Asie et l'Afrique) dont la demande mondiale atteindra 60 % en 2025, une augmentation de neuf points de pourcentage [4].

La majorité de l'électricité produite dans le monde provient de la décomposition de combustibles fossiles (pétrole, charbon ou gaz naturel) ou de combustibles nucléaires (figure I.2) [6, 5].

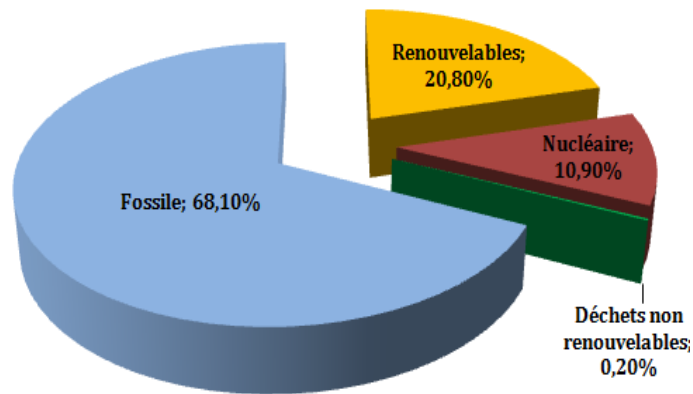


Fig.I.2. Production mondiale d'électricité

I.4. Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde

Grâce aux avancées technologiques, le secteur de l'électricité, (la première source d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle planétaire), est devenu une importante cible des efforts dans la lutte contre les changements climatiques. Afin de réduire la dépendance du secteur de l'électricité aux combustibles fossiles, plusieurs politiques gouvernementales encourageant ou forçant l'adoption de sources de production à faible teneur en carbone ont été mises en place au cours de la dernière décennie. Ainsi, l'agence internationale de l'énergie (AIE) anticipe que, d'ici 2025, la croissance annuelle moyenne de la production d'électricité de sources renouvelables sera quatre fois plus élevée que celle de la production totale d'électricité [8, 4].

L'énergie renouvelable consiste dans l'énergie produite à partir de sources qui se renouvelleront indéfiniment, comme l'énergie hydroélectrique, solaire et éolienne, ou produite de façon durable à partir de la biomasse (figure I.3).

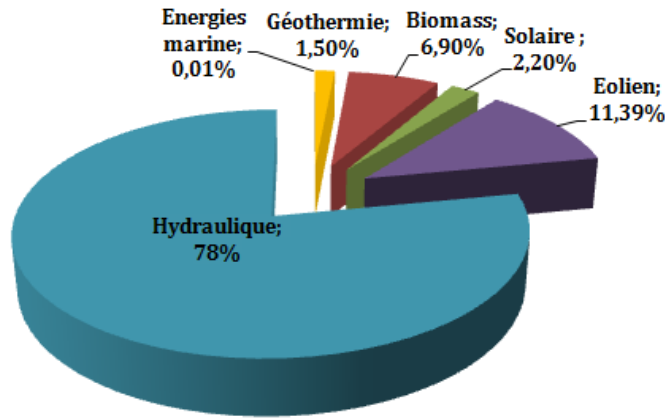


Fig.I.3. Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde

L'électricité renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité (incluant les centrales de pompage-turbinage) est la première d'entre elles avec une contribution en 2012 de 78 %. L'énergie éolienne est devenue la deuxième source d'énergie renouvelable, représente désormais 11,4 % du total renouvelable. Elle devance la filière biomasse (6,9 %). Suivent le solaire (2,2 %) qui rassemble les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques, la géothermie (1,5 %) et les énergies marines (0,01 %) qui restent une filière en phase de démonstration.

La production d'électricité renouvelable a atteint 4 699,2 TWh en 2012 dans le monde, franchissant le seuil des 20 % de la production d'électricité mondiale (20,8 %). Cette part reste supérieure à la production d'électricité d'origine nucléaire (10,9%). On peut donc affirmer que les énergies renouvelables ont, sur la dernière décennie, conforté leur place dans la structure mondiale de la production d'électricité [9, 10, 5].

I.5.Taux de croissance annuel moyen des filières renouvelables

L'hydraulique s'est trouvée seule pendant de nombreuses années pour compenser la marche en avant des combustibles fossiles. Ce n'est plus le cas aujourd'hui. L'apport des nouvelles technologies de production d'électricité renouvelable a été décisif pour contrer l'augmentation de la part de l'électricité conventionnelle dans le total mondial.

Sur la période 2002-2012, la croissance de la production des filières renouvelables hors hydraulique a été près de cinq fois plus rapide que celle de l'hydraulique, soit une moyenne annuelle de 15,1 % contre 3,1 % pour l'hydraulique. Aussi, la part des filières renouvelables sans l'hydraulique a pris trois points de pourcentage dans la production mondiale d'électricité, passant de 1,6 % du total en 2002 à 4,6 % en 2012. À l'inverse, la part de l'hydroélectricité a perdu 0,5 point dans le total mondial (de 16,7 % en 2002 à 16,2 % en 2012). Une analyse détaillée filière

par filière permet de montrer sur l'histogramme de la figure (I.4) que c'est la production d'électricité solaire qui affiche le plus fort taux de croissance annuel moyen sur la période (2002-2012) plus de 50,6% [8, 5].

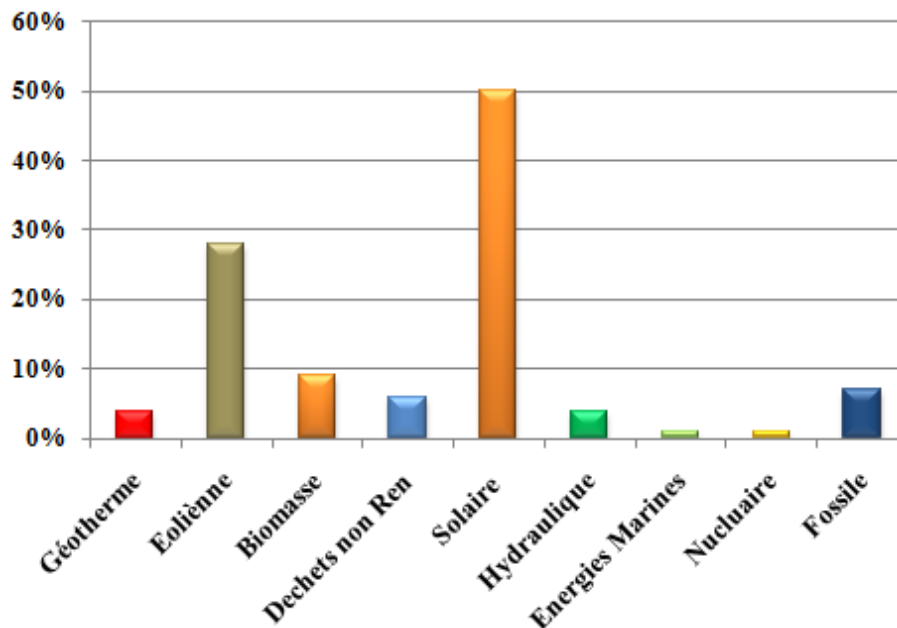


Fig.I.4. Taux de croissance annuel moyen 2002-2012

I.6. Potentiel solaire dans le monde

L'énergie solaire totale reçue par la surface du globe est absolument immense. En une année, l'humanité entière consomme 10 milliards de tonnes équivalent pétrole (Tep). Cette quantité représente moins de 3 % de ce que le soleil nous envoie gratuitement chaque jour. La puissance photovoltaïque totale installée dans le monde a atteint 223,2 GW à la fin de l'année 2015, et pourrait atteindre un volume d'au moins 396 GW d'ici 2020 contre 175,4 GW en 2014. Selon le dernier rapport de « GTM Research » (l'entreprise leader en matière d'analyse de marché et de conseil sur la transformation de l'industrie mondiale de l'électricité) sur le marché solaire mondial pour le troisième trimestre 2016, la demande mondiale atteindra cette année un nouveau record à 73 gigawatt (GW) en croissance de 33 % par rapport à l'année dernière.

Jusqu'en 2012 s'était l'Allemagne la première. À partir de 2013 cependant, la Chine a dépassé l'Allemagne avec un parc de centrales solaires installées qui a atteint 44 GW [11, 12].

Les cinq premiers pays : Chine, États-Unis, Allemagne, Japon, Inde représentent 80% de la demande mondiale en 2016. Celle-ci se diversifie à grande échelle avec des appels d'offres et des programmes d'autoconsommation. Chacun des marchés émergents devraient représenter plus de 2 GW/an en 2020. L'Amérique latine mène la charge, avec de nouveaux marchés comme le

Mexique, le Brésil et le Chili qui prévoit d'installer 26 GW d'ici 2021. Le Moyen-Orient et la Turquie devrait ajouter 19 GW. En Asie, la Thaïlande, les Philippines, la Corée du Sud, Taïwan et l'Indonésie devraient conjointement installer 23 GW d'ici 2021 [13, 14].

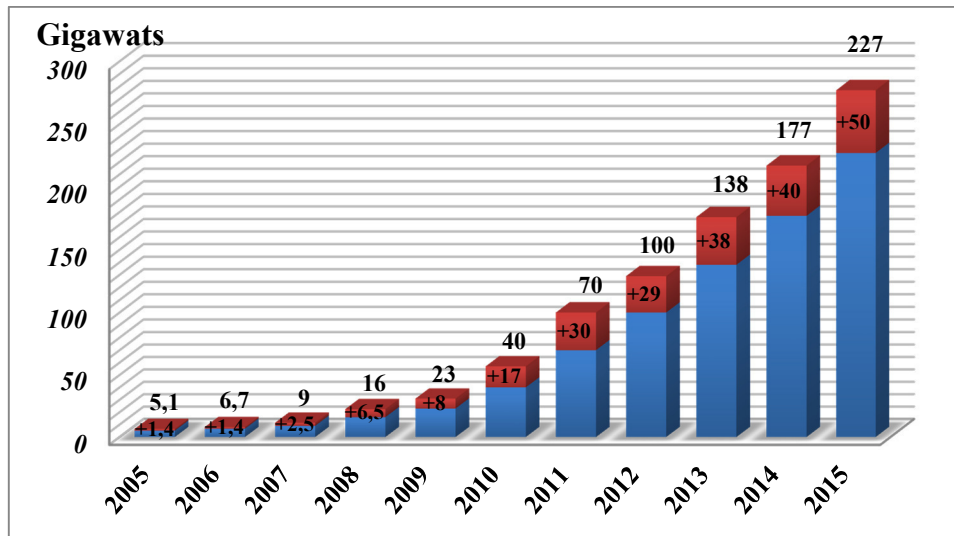


Fig.I.5. Capacité photovoltaïque globale et annuelle dans le monde

On distingue deux voies technologiques principales pour la production d'électricité d'origine solaire: la production thermodynamique, aussi appelée solaire thermique à concentration, et la production photovoltaïque. La concentration solaire nécessite des ciels clairs et secs (climat tropical sec) où l'ensoleillement direct est important: les zones les plus favorables sont l'Afrique du Nord et le Sud-ouest en Europe. Le principe général de cette technologie repose sur la concentration des rayons du soleil à l'aide de miroirs dans le but de chauffer des fluides caloporteurs à haute température (de 400 à 1000°C) [14].

La production photovoltaïque utilise la lumière du soleil pour la transformer en électricité au moyen de cellules, majoritairement à base de silicium. Le silicium est fabriqué à partir de la silice (notamment présente dans le sable), une matière abondante sur terre. Ainsi quand la lumière pénètre le silicium, elle apporte de l'énergie sous forme de photons. Les photons vont communiquer leur énergie aux atomes de silicium, conduisant à la création de charges électriques. Les électrons de la zone dopée au phosphore vont rejoindre les trous de la zone dopée au bore via la connexion extérieure. Ils sont alors collectés par les grilles en métal. Au passage, leur déplacement crée un courant électrique.

I.7. Situation énergétique en Algérie

A travers le lancement d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et de l'efficacité énergétique, l'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte qui s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur de ressources inépuisables et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Ainsi, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable [15].

La politique algérienne en matière d'énergie s'est fixé les objectifs suivants:

- Le développement et la conservation des ressources en hydrocarbures
- Le développement de l'utilisation domestique du gaz naturel
- Le développement des énergies renouvelables
- L'amélioration de la gestion de la demande en énergie
- Le renforcement de l'efficacité énergétique en renforçant le rôle de l'agence étatique spécialisée

En Algérie, 99.98% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles, notamment le gaz naturel qui est l'énergie la plus disponible. Celle-ci est passée de 7 492 MW en 2005 à 17 238,6 MW en 2015. Le reste (0.02%) est assuré par l'énergie renouvelable composée par l'hydraulique, l'éolienne et le photovoltaïque [16, 17, 18].

I.8. Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie

Les émissions de CO₂ liées à l'énergie fossile étaient en 2014 de 122,93 Mt CO₂, soit 3,16 tonnes par habitant, inférieure de 29 % à la moyenne mondiale : 4,47 tonnes, mais 3,3 fois la moyenne africaine : 0,96 tonnes (France : 4,32; Maroc : 1.57) [19].

Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PNEREE) de 2012, l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation [20].

Pour 2015, le rapport annuel de l'Agence internationale de l'énergie (l'AIE) sur le solaire mentionne l'Algérie, annonçant qu'elle a installé 270 MWc au cours de l'année, portant sa puissance solaire totale à 300 MWc, mais celui de GWEC (*Global Wind Energy Council*) sur l'éolien ne mentionne pas l'Algérie [21, 18].

Le gouvernement algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011, avait

permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national. Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 :

- 13 575 MWc de solaire photovoltaïque ;
- 5 010 MW d'éolien ;
- 2 000 MW de solaire thermodynamique (CSP) ;
- 1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets)
- 400 MW de cogénération ;
- 15 MW de géothermie.

Le total s'élève ainsi à 22 GW, dont plus de 4,5 GW doivent être réalisés d'ici 2020. Ainsi d'ici 2030, 37% de la capacité installée et 27% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable [22].

Le groupe Sonelgaz s'est investi dans le domaine des énergies nouvelles et renouvelables. Dans son programme de développement des énergies renouvelables, le groupe prévoit la réalisation de 67 projets de centrales solaires, dont 27 centrales photovoltaïques, 27 centrales hybrides, 6 centrales solaires thermiques et 7 centrales éoliennes. Les plus puissantes centrales solaires seront de type solaire thermique, avec une capacité maximale de 400 MW pour l'une d'entre elle. Pour une question d'efficacité optimale, elles seront toutes installées dans les régions du sud, notamment dans les wilayas d'Adrar, Ghardaïa, d'El Oued et de Béchar [23, 15]. La figure (I.6) représente le programme de développement des énergies renouvelables d'ici 2030.

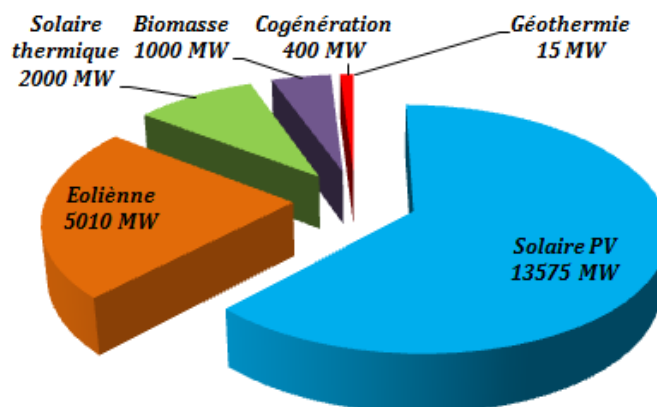


Fig.I.6. Puissances des énergies renouvelables d'ici 2030

I.9. Potentiel solaire en Algérie

La consommation d'électricité en Algérie par habitant atteignait 1 363 kWh en 2014, soit seulement 45 % de la moyenne mondiale : 3 030 kWh, mais 2,4 fois la moyenne africaine : 568 kWh (France : 6 955 kWh; Maroc : 912 kWh). Avec un territoire composé de 86% de désert saharien et par son positionnement géographique, la qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3700 heures (Sahara), avec une moyenne d'ensoleillement de 6,57 kWh/m²/jour. Si on devait comparer le solaire au gaz naturel, le potentiel solaire algérien est équivalent à un volume de 37 000 milliards de mètres cubes, soit plus de 8 fois les réserves de gaz naturel du pays, à la différence que le potentiel solaire est renouvelable, contrairement au gaz naturel. Le tableau suivant donne le potentiel solaire algérien en chiffres et selon la localisation [24, 25, 8].

Tableau I.2 : Potentiel solaire en Algérie

	Régions côtières	Haut plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.10. Programme d'efficacité énergétique en Algérie

L'objectif de l'efficacité énergétique consiste à produire les mêmes biens ou services, mais en utilisant le moins d'énergie possible. Les éléments de base de cette stratégie comprennent un programme national d'efficacité énergétique soutenu par un fonds national. Ce programme devrait aider à éviter l'émission de 470 000 tonnes de CO₂. Le plan d'action en matière d'efficacité énergétique se présente comme suit : [26, 16]

- Isolation thermique des bâtiments;
- Développement du chauffe-eau solaire;
- Généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie;
- Introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public;

- Promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel.

Pour accompagner et réussir le programme des énergies renouvelables, l'Algérie envisage de renforcer le tissu industriel pour être à l'avant-garde des mutations positives, aussi bien sur les plans industriel et technique que sur les plans de l'ingénierie et de la recherche. L'Algérie est également déterminée à investir tous les segments créateurs et à les développer localement. Les capacités et les types d'énergies renouvelables seront installés selon les spécificités de chaque région à savoir : [15]

- **Région du Sahara** : pour l'hybridation des centrales diesel existantes et l'alimentation des sites éparses compte tenu de l'important potentiel solaire et éolien existant au niveau de cette région;
- **Région des Hauts Plateaux** : pour son potentiel d'ensoleillement et d'exposition au vent, avec la disponibilité de terrains ;
- **Région du littoral** : selon la disponibilité des assiettes de terrain avec l'exploitation de tous les espaces où des potentiels renouvelables existent.

I.11. Solaire photovoltaïque

Sur la période 2014-2020, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration des capacités algériennes de 80%. Pour ce faire, il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium. Par ailleurs, il est attendu qu'un réseau de sous-traitance nationale soit mis en place pour la fabrication des onduleurs, des batteries, des transformateurs, des câbles et autres équipements entrant dans la construction d'une centrale photovoltaïque.

Il est également prévu la réalisation d'un centre d'homologation des équipements destinés aux installations des énergies renouvelables. C'est pourquoi, la capacité de production des modules photovoltaïques devrait être étendue pour atteindre les 200 MWc/an. Cette période serait marquée par le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements nécessaires à la construction d'une centrale photovoltaïque.

Il est prévu au courant de cette même période d'exporter non seulement l'électricité produite à partir des renouvelables mais aussi le savoir-faire des équipements entrant dans la production d'électricité à partir des énergies renouvelables.

I.12. Solaire thermique

La période 2011-2013 connaîtra le lancement des études pour la fabrication locale des équipements de la filière solaire thermique. Sur la période 2014-2020, il est prévu un taux d'intégration de 50% à travers la mise en œuvre de trois projets majeurs qui seront menés en parallèle à des actions de renforcement des capacités d'engineering :

- Construction d'une usine de fabrication de miroirs;
- Construction d'équipements de stockage d'énergie;
- Développement des capacités de réalisation.

Sur la période 2021-2030, le taux d'intégration devrait être supérieur à 80% grâce à la concrétisation des projets suivants :

- Extension de la capacité de fabrication des miroirs;
- Extension de la capacité de fabrication d'équipements de fluides caloporteurs et de stockage d'énergie;
- Extension de la capacité de fabrication des équipements du bloc de puissance;
- Conception, procurement et réalisation de centrales par des moyens propres.

I.13. Eolien

D'ici 2013, il est prévu de lancer les études pour la mise en place de l'industrie éolienne. Sur la période 2014-2020, l'objectif est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Cette période sera marquée par les actions suivantes :

- Construction d'une usine de fabrication de mâts et de rotors d'éoliennes;
- Création d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle;
- Montée en compétence de l'activité engineering et capacités de conception ;
- Procurement et réalisation capables d'atteindre un taux d'intégration d'au moins 50% par des entreprises algériennes.

Le taux d'intégration devrait être supérieur à 80% sur la période 2021-2030, grâce à l'extension des capacités de fabrication des mâts et des rotors d'éoliennes et le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle. Il est prévu aussi la conception, le procurement et la réalisation d'éoliennes par des moyens propres ainsi que la

maîtrise des activités d'engineering, de procurement et de construction de centrales et d'unités de dessalement des eaux saumâtres.

I.14. Agences de recherche et de développement

Dans le secteur de l'énergie, les activités ayant un rapport avec la promotion des énergies renouvelables sont pilotées par le ministère de l'énergie et des mines et mises en œuvre par l'APRUE qui a un département dédié à ce travail. Le centre de recherche et développement de l'électricité et du gaz (CREDEG), filiale du Groupe Sonelgaz, s'occupe de la construction et de la maintenance des installations solaires construite dans le cadre du programme national d'électrification rurale. Dans le secteur agricole, la haute commission pour le développement de la steppe (HCDS) assure sur terrain le pompage de l'eau et l'électrification par le biais de la gestion solaire au profit des régions de la steppe [27, 16].

L'Algérie encourage également la coopération avec les centres de recherche en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. Cinq organisations dans le secteur de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique sont actives depuis 1998 dans différents aspects relatifs à l'énergie renouvelable:

- Centre de développement des énergies renouvelables CDER ;
- Unité de recherche appliquée en énergie renouvelable URAER ;
- Unité de développement des équipements solaires (UDES) ;
- Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) ;
- Unité de développement de la technologie du silicium (UDTS).

Les missions de ces unités sont :

- Impulser et favoriser l'assimilation, la maîtrise, le progrès des sciences et techniques ainsi que l'innovation technologique dans le domaine des énergies renouvelables ;
- Assurer une veille scientifique et technologique en rapport avec les énergies renouvelables ;
- Rassembler et traiter l'information scientifique et technique ;
- Contribuer à la valorisation des résultats de la recherche en veillant notamment à leur diffusion, à leur exploitation et à leur utilisation ;
- Assurer la formation continue, le recyclage et le perfectionnement des personnels de la recherche ;

- Collecter, exploiter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaire, éolien et de biomasse dans les régions sahariennes ;
- Effectuer des travaux scientifiques et technologiques sur la conception et le développement des dispositifs et équipements de conditionnement d'énergie solaire et de biomasse ;
- Procéder à des études relatives à la qualification des sites d'installation des systèmes d'énergie solaire et éolienne ;
- Entreprendre des travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploration, de mesure, de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie solaire et éolienne.

I.15. Cadre juridique réglementaire et mesures incitatives

I.15.1. Cadre juridique

Consciente de l'intérêt grandissant des énergies renouvelables et de leurs enjeux, l'Algérie a intégré leur développement dans sa politique énergétique par l'adoption d'un cadre juridique favorisant une contribution plus conséquente des énergies renouvelables dans le bilan national. Le développement des énergies renouvelables est encadré par un ensemble de textes législatifs : [28, 15]

- La loi n°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie;
- La loi n°02-01 du 5 février 2002, relative à l'électricité et la distribution publique du gaz par canalisations;
- La loi n° 04-09 du 14 août 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

La réglementation a été renforcée par la publication des textes suivants:

- Décret exécutif n°11-423 du 08 décembre 2011 fixant les modalités de fonctionnement du compte d'affectation spécial n° 302 – 131 intitulé «Fonds national pour les énergies renouvelables et la cogénération».
- Arrêté interministériel du 28 octobre 2012 déterminant la nomenclature des recettes et des dépenses imputables sur le fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNER).

- Arrêté interministériel du 28 octobre 2012 précisant les modalités du suivi et de l'évaluation du FNER.
- Décret exécutif n°13-218 fixant les conditions d'octroi des primes au titre des coûts de diversification de la production d'électricité.
- Décret exécutif n°13-424 du 18 décembre 2013 modifiant et complétant le décret exécutif n° 05-495 du 26 décembre 2005 relatif à l'audit énergétique des établissements grands consommateurs d'énergie.
- Arrêté interministériel 21 Chaâbane 1435 correspondant au 19 juin 2014 modifiant et complétant l'arrêté interministériel du 20 Chaoual 1431 correspondant au 29 septembre 2010 portant sur l'agrément des bureaux d'audit et des experts
- Arrêtés ministériels du 02 février 2014 fixant les tarifs d'achat garantis pour la production d'électricité à partir d'installations utilisant la filière photovoltaïque et les conditions de leur application.
- De plus, la loi n° 11-11 du 18 juillet 2011 portant loi de finances complémentaire pour 2011 a relevé le niveau de la redevance pétrolière qui alimente essentiellement le fond national pour les énergies renouvelables et a étendu son champ d'application aux installations de cogénération.

I.15.2. Incitations financières et fiscales

Les aides financières se composent d'incitations économiques et d'incitations fiscales. Pour mieux répondre aux priorités d'actions énoncées dans le programme des énergies renouvelables et encourager les initiatives des particuliers et des entreprises, des modifications législatives et réglementaires seront apportées. Il s'agit de s'assurer que les utilisateurs, les intervenants et les différents investisseurs profitent d'un cadre législatif et réglementaire permettant de répondre efficacement aux défis à relever en matière d'énergies renouvelables. L'objectif de ces mesures est d'encourager les produits locaux et de fournir des conditions avantageuses, notamment fiscales, aux investisseurs désireux de s'impliquer dans les différentes filières d'énergies renouvelables. Pour encourager et soutenir les industriels dans la réalisation de ce programme, il est prévu, entre autres, la réduction des droits de douane et de la TVA à l'importation pour les composants, matières premières et produits semi-finis utilisés dans la fabrication des équipements en Algérie dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique [28, 27].

I.15.3. Mesures réglementaires

La politique volontariste de l'Algérie, dans la réalisation du programme de développement des énergies renouvelables se fera à travers l'octroi de subventions pour couvrir les surcoûts qu'il induit sur le système électrique national et sur le coût de mise à disposition de l'eau potable, notamment pour le programme de dessalement des eaux saumâtres. Aussi, des mesures réglementaires encadreront les apports de l'Etat et définiront les conditions et les mécanismes de contrôle adéquats pour permettre une utilisation optimale des fonds publics qui sont alloués à ce programme.

I.16. Photovoltaïque : rappels et notions générales

I.16.1. Principe de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, a été découvert la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. L'héliosélectricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1954 que trois chercheurs américains, (Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller) de la compagnie Bell Telephone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule. En 1958 les premiers satellites alimentés par des cellules solaires avec un rendement de 9 % sont envoyés dans l'espace [29, 30].

I.16.2. Principe de l'effet PV

La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Une cellule comporte deux parties qui sont dopées différemment. La couche N présente un excès d'électrons périphériques et la couche P présente un déficit d'électrons périphériques. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel.

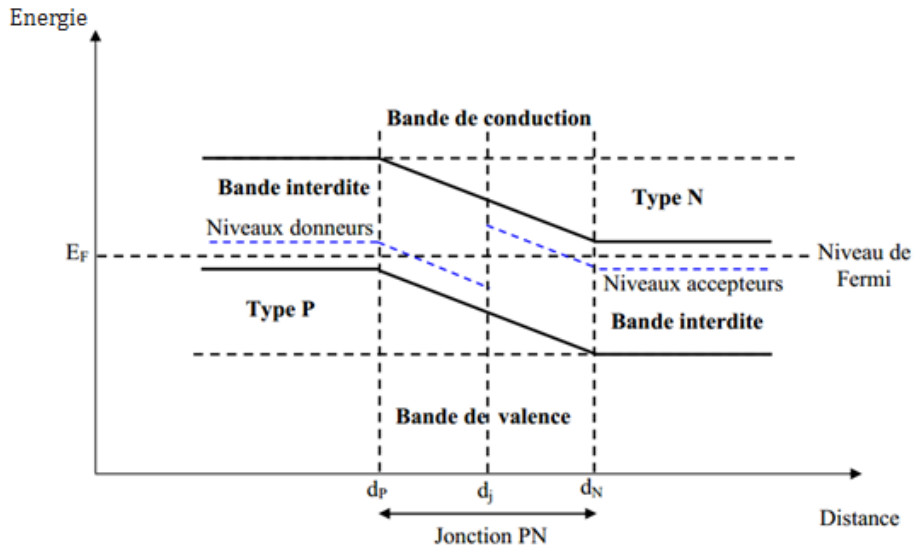


Fig.I.7. Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ($h\nu$) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap (E_g), ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui. L'excès d'énergie sera perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [31, 32, 33].

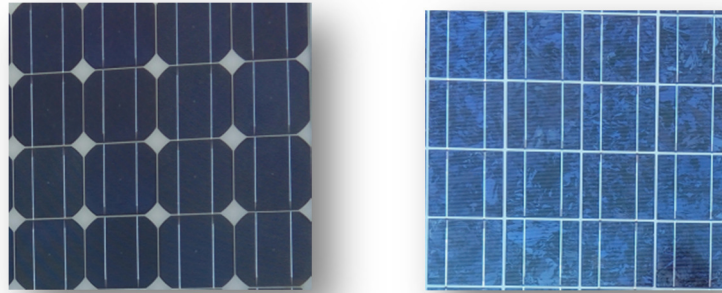
I.16.3. Technologies des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois types principaux de cellule solaire suivant leur mode de production : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques [34, 35, 33, 29].

I.16.3.1. Technologie de la 1^{ère} génération : cellules cristallines

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers (fines tranches) de silicium. Cette méthode est très énergivore et donc très chère, elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin.

- Les cellules de silicium monocristallin sont effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches. Ces cellules sont les plus efficaces, de 16% à 18%, mais elles sont aussi les plus chères.
- Les cellules de silicium poly-cristallines (multicristallin) sont composées d'un agglomérat de cristaux avec une efficacité de 13% à 15%, a grandement contribué à baisser le coût des modules.



(a) Cellules monocristallin

(b) Cellules polycristallin

Fig.1.8. Cellules cristallines

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe. L'un des inconvénients de ces deux technologies sont le rendement faible sous un faible éclairement.

I.16.3.2. Technologie de la 2^{ème} génération : couches minces "thin films"

Dans le cas de "couches minces", le semi conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). On distingue plusieurs types de cellules couches minces à savoir :

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellure de Cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).



Fig.I.9. Cellule à couche mince

Son prix est plus faible que les cellules cristallines; en revanche, son rendement est inférieur à celui des cellules cristallines, il est entre 7% et 11%. Elles fonctionnent avec un éclairage faible captent très bien le rayonnement diffus. Elles sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct offrant donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

I.16.3.3. Technologie de 3^{ème} génération : multijonction, concentration

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules:

- **Cellules multicouches** : superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire).
- **Cellules à concentration** : (permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule). Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (de l'ordre de 30 %).
- **Cellules organiques** : sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement les cellules photovoltaïques organiques et les cellules photovoltaïques organiques en polymères moléculaires.

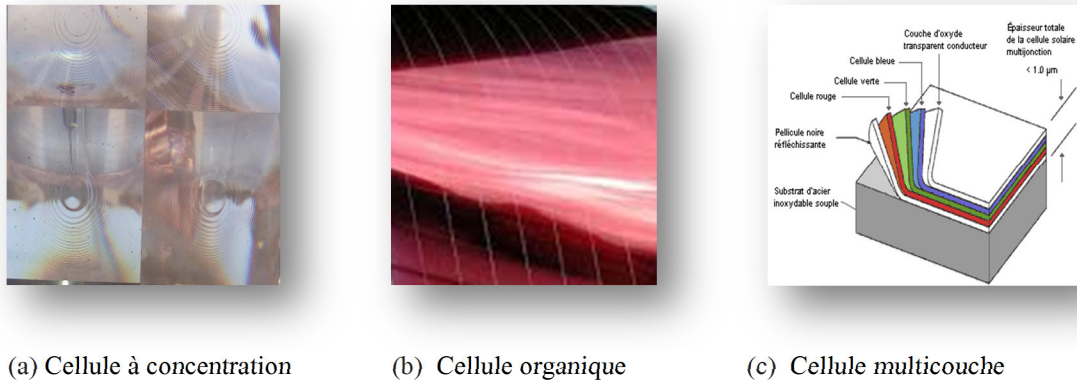


Fig.I.10. Cellules multijonction et à concentration

I.16.4.Types de Systèmes PV

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types: autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type choisi dépendra des besoins énergétiques et de l'emplacement [36, 33, 32, 30].

I.16.4.1. Systèmes PV autonomes

Sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum [36, 33, 32, 30].

I.16.4.2. Systèmes PV hybrides

Reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, le générateur PV est souvent allié à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si votre budget est limité [36, 33, 32, 30].

I.16.4.3. Systèmes PV raccordés au réseau

Permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans certains cas, le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous

ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique [36, 33, 32, 30].

I.16.5. Configurations d'un système de pompage PV

La figure (I.11) montre les différentes configurations d'un système de pompage PV. Le choix de la configuration la plus appropriée pour chaque application et site spécifique est essentiel à la viabilité économique et à la performance à long terme du système PV. La pompe est entraînée par un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique DC/AC est nécessaire pour convertir le courant continu provenant du GPV en courant alternatif.

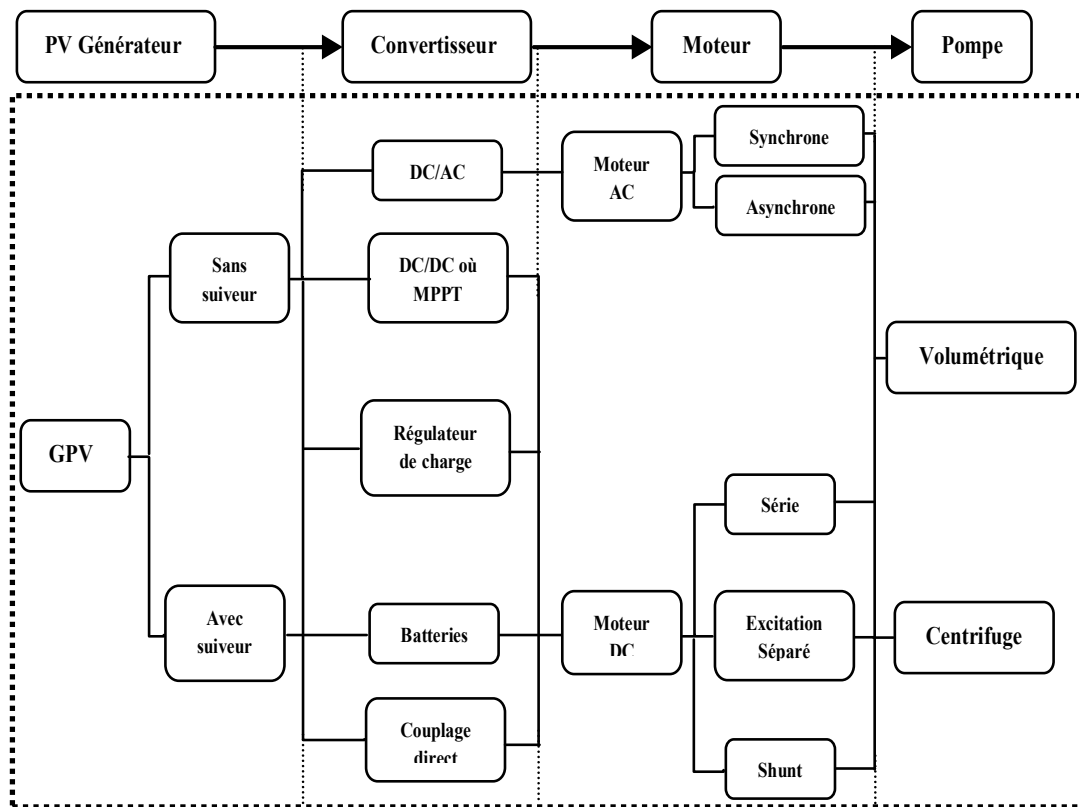


Fig.I.11. Organigramme des différentes configurations des systèmes de pompage PV [33]

Les batteries sont parfois une nécessité dans ces systèmes, en particulier, si les taux de pompage dépassent les taux de réapprovisionnement pour la source d'eau. Elles peuvent également être utilisées pour fournir de l'énergie pour une période de mauvais temps. Mais pour ce type de système, il est préférable de ne pas utiliser les batteries de stockage en raison de leur espérance de vie relativement courte, de leurs exigences d'entretien, de leur fiabilité, de leur coût élevé, de

leur protection par un régulateur de tension et pour des raisons environnementales et de les remplacer avec un stockage hydraulique [33].

I.16.6. Constitution d'un système de pompage PV

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable ; ses performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements (onduleur, moteur, pompe,...). Un système de pompage PV est un système complexe qui se compose de différents éléments interactifs dont l'un agit sur l'autre à savoir : le GPV, le système de conversion, le moteur d'entraînement, la pompe de refoulement et le circuit hydraulique.

I.16.6.1. Générateur photovoltaïque GPV

Le GPV représente la source de l'énergie électrique actionnant le moteur pompe. Il se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés [37].

I.16.6.2. Système de conversion (Convertisseurs)

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement entre le GPV et la charge, avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu DC/DC et avec une charge en alternatif, il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif DC/AC. En plus du rôle de la conversion du courant, il a également un rôle protecteur du GPV.

- **Convertisseurs DC-DC**

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un convertisseur DC/DC entre le GPV et la charge à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique.

- **Onduleur DC/AC**

L'onduleur transforme le courant continu produit par le GPV, en courant alternatif. Les onduleurs de pompage sont en général à fréquence (f) variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. Dans ce cas, le rapport de la tension alternative (U) sur la fréquence (U/f) est constant. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement [37].

I.16.6.3. Moteurs d'entraînements

Pour qu'une pompe fonctionne il faut un entraînement qui produit sa rotation. Le choix de l'entraînement de la pompe dépend de plusieurs facteurs tels que : rendement, souplesse de fonctionnement, fiabilité et autonomie de l'installation, faible puissance au démarrage. Principalement, on rencontre deux familles de moteurs qui sont actuellement les plus utilisées pour les applications de pompage PV :

- **Moteur à courant continu**

Les moteurs à courant continu sont considérés comme le premier choix pour les systèmes de pompage PV, car il offre l'avantage majeur d'être facilement contrôlable en raison du découplage naturel entre le flux et le couple. En terme de simplicité, les systèmes de pompage PV conduits par des moteur à courant continu sont les plus simple, puisque les modules photovoltaïques produisent un courant continu, et donc, nous n'aurons pas besoin de l'onduleur [38]. La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique. Parmi les types des MCC on peut citer : les moteurs à excitation indépendante, les moteurs à excitation parallèle, les moteurs à excitation série et les moteurs à excitation composée.

De nombreuses études sur les moteurs à courant continu ont signalé que ces moteurs demandent plus d'entretien ce qui signifie des coûts supplémentaires. En outre, les problèmes d'arc du commutateur limitent la taille et la vitesse de ces moteurs, ce qui les rend inadéquats dans certaines zones [39].

- **Moteur à courant alternatif**

Depuis quelques années, l'arrivée d'onduleurs permettant le contrôle de la vitesse des moteurs à courant alternatif, nous ont permis leur utilisation pour les applications de pompage solaire. Il existe deux types principaux de machines à courant alternatifs :

- **Moteurs synchrones** : le terme synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Il existe trois types de machines synchrones : les machines synchrones à rotor bobiné, les machines synchrones à réluctance, et les machines synchrones à aimants permanents.
- **Machines asynchrones** : connue également sous le terme machine à induction. L'utilisation des machines asynchrones devient de plus en plus courante dans le monde

industriel du fait de leur qualité de robustesse, disponibilité, efficacité, faible coût et leur quasi absence d'entretien. Les systèmes de pompage PV conduits par des moteurs asynchrones ont suscité un intérêt considérable par les chercheurs et les fabricants [39, 40].

Ce type de moteur tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme et sa vitesse est déterminée par la fréquence de source d'alimentation. Par conséquent, une commande en vitesse est seulement possible dans le cas où on a une source d'alimentation à fréquence réglable. Ceci signifie que pour l'usage de ce type de moteur pour le pompage PV nécessite un onduleur à fréquence variable pour commander sa vitesse. Ceci apporte aussi un surcoût [41, 42].

I.16.6.4. Pompe

On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi, d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide. L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a eu lieu suite à la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

Pour les systèmes de pompage solaire, les pompes centrifuges et volumétriques sont les plus répandues. Il existe d'autres types de pompes fonctionnant selon d'autres principes qui ne sont pas recommandés pour des applications de pompage solaire à cause de leur faible rendement. Selon l'application et le type de la source d'eau (eau de surface, de fleuve, puits, ...), différentes pompes peuvent être utilisées. Les pompes centrifuges sont conçues pour une profondeur constante et leur débit augmente avec la vitesse de rotation. Par contre, les pompes volumétriques ont un débit de refoulement presque indépendant de la profondeur mais directement proportionnel à la vitesse de rotation. Quatre configurations physiques différentes sont identifiées : [43, 44] voir figure (I.12).

- **Pompe et moteur submergés** : Cette disposition est souvent utilisée pour des alésages de profondeur moyenne avec des pompes centrifuges, qui sont protégées contre les dommages et le vol.
- **Pompe submergée avec moteur sur surface (pompe noyée)**: La pompe utilise un arbre alternatif verticalement pour transférer l'énergie du moteur. Cela permet un entretien plus

facile du moteur mais introduit des problèmes de fiabilité et d'efficacité grâce à la commande mécanique vers le bas de l'alésage.

- **Pompe et moteur flottants** : Cette conception est inadaptée aux forages mais attrayante pour le pompage des barrages, des canaux et des puits ouverts.
- **Pompe d'aspiration sur la surface** : Cette configuration est pratique pour l'entretien mais peut être problématique pour l'amorçage de la pompe.

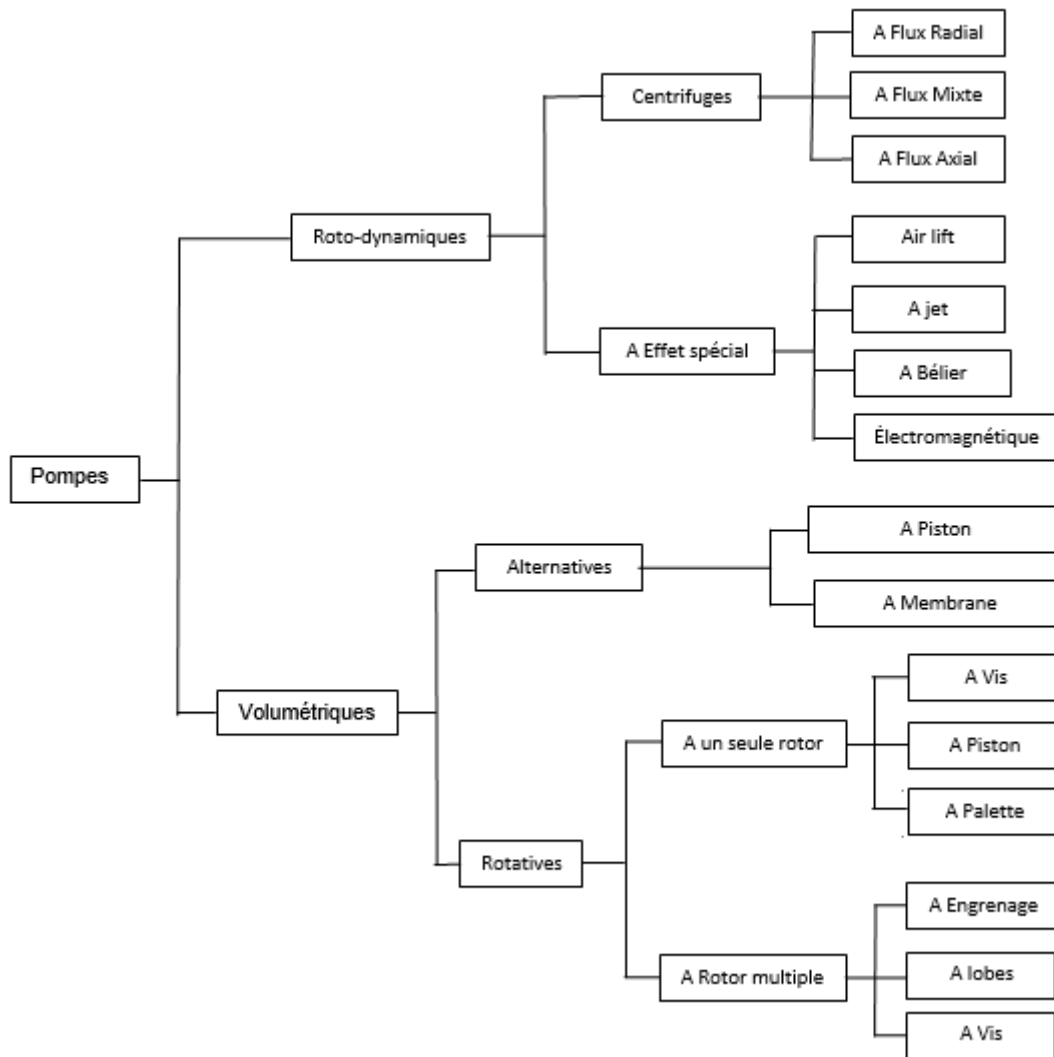


Fig.I.12. Arbre des pompes hydrauliques

I.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un état d'art sur la production et la consommation d'électricité en général et celle d'origine renouvelable dans le monde ainsi que le taux de croissance annuel moyen des filières renouvelables et en particulier en Algérie. Nous avons

ensuite présenté le programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PNEREE) et le cadre juridique réglementaire de ce type d'énergies en Algérie.

Nous avons, discuté le principe de la conversion de l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que les différentes configurations des systèmes PV à savoir : les systèmes PV autonomes, les systèmes PV connectés au réseau et enfin les systèmes de pompage PV. Enfin nous avons présenté le système de pompage PV étudié dans cette thèse qui est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir le GPV, le convertisseur DC/DC, l'onduleur de tension DC/AC, les moteur d'entraînements, la pompe et le circuit hydraulique.

CHAPITRE II

MODELISATION DES ELEMENTS D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE

II.1. Introduction

Le pompage de l'eau est essentiel dans le monde pour de nombreux usages, notamment l'irrigation, l'abreuvement, l'approvisionnement en eau des villages et l'utilisation domestique. On estime que 11 % de la population mondiale, soit 768 millions de personnes, n'avait pas accès à l'eau potable en 2011 [45].

Cependant, le pompage des eaux souterraines ne peut être effectué de manière durable que dans la mesure où le taux d'extraction est égal au taux de reconstitution de l'aquifère. Sinon, une nappe phréatique abaissée conduit à des puits secs et des dégâts écologiques et sociaux [46].

Les systèmes de pompage PV peuvent varier considérablement selon ces applications : le moment des besoins en eau, la capacité de la source d'eau, la profondeur des puits, le taux de réapprovisionnement de la source, la variabilité saisonnière et les caractéristiques d'insolation solaire [47].

La modélisation des différents éléments d'un système de pompage PV tels que, le générateur PV, l'onduleur, la motopompe et le circuit hydraulique implique la connaissance de plusieurs disciplines: météorologie, l'électronique, l'électrotechnique et l'hydraulique, ect... et exige une bonne compréhension des interactions entre elles.

Dans ce chapitre, nous présentons les modèles mathématiques des différents éléments d'un système de pompage PV. Le schéma de la figure (II.1) représente une configuration typique d'un système de pompage PV.

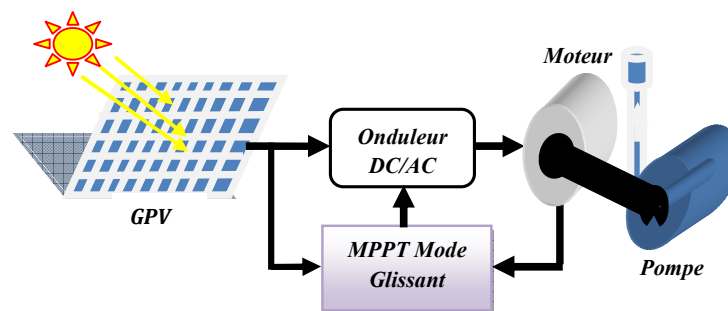


Fig.II.1. Système de pompage PV étudié

II.2. Modélisation des différents éléments d'un système de pompage PV

II.2.1. Générateur photovoltaïque GPV

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un panneau PV et l'association de plusieurs panneaux PV donne lieu à un GPV.

II.2.1.1. Modèle électrique

Le comportement électrique d'une cellule PV est décrit le plus souvent soit par :

- un modèle à une diode (en une seule exponentielle) ;
- soit par un modèle à deux diodes (en double exponentielle) figure (II.2).

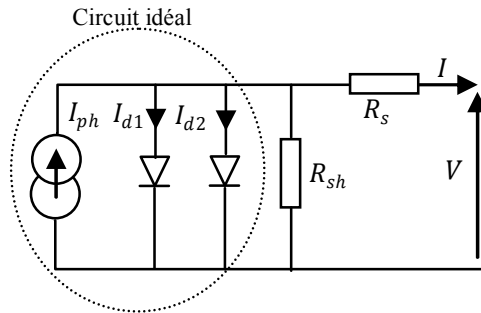


Fig.II.2. Structure d'une cellule photovoltaïque [48]

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et shunt R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure (II.2). La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé. La résistance shunt est due au courant de fuite au niveau de la jonction PN [49, 50]. Les deux modélisations sont représentées respectivement par les équations qui suivent :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_r \quad (II.1)$$

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_r \quad (II.2)$$

Avec :

$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{\phi}{1000} \right)$: Photo-courant de cellule proportionnel à l'éclairement ϕ . Ce courant correspond également au courant de court-circuit I_{cc} .

- $I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right)$: est le courant traversant la diode. On peut faire apparaître le potentiel thermodynamique $V_T = \frac{nkT}{q}$.
- I_0 : courant de saturation inverse de la diode.
- q : charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).
- k : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$).

- n : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.
- T : température de la jonction en degré K.
- $I_r = \frac{V+R_s I}{R_{sh}}$ est le courant dérivé par la résistance shunt.

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule PV ainsi que sa caractéristique courant-tension.

$$I = I_{cc} \left(\frac{\phi}{1000} \right) - I_{01} \left(e^{\frac{(V+R_s I)}{V_T}} \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

$$I = I_{cc} \left(\frac{\phi}{1000} \right) - I_{01} \left(e^{\frac{(V+R_s I)}{V_T}} \right) - I_{02} \left(e^{\frac{(V+R_s I)}{V_T}} \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

À noter que pour le modèle en une seule exponentielle, la diode D' sera éliminée. La représentation avec un modèle en double exponentielle est utilisée souvent pour des cellules en silicium polycristallin. Par contre pour des cellules en silicium amorphe, un modèle en une seule exponentielle est souvent utilisé. Plusieurs travaux de recherche ont montré que les deux modèles possèdent un domaine de validité; le modèle en double exponentielle se prête mieux aux mesures de la caractéristique courant-tension pour des tensions élevées tandis que celui à une exponentielle est plus précis pour de basses et moyennes tensions [51, 52, 45]. Quelque soit le modèle utilisé (avec une seule exponentielle où avec double exponentielle), le point de fonctionnement du panneau PV est caractérisé par :

$$\begin{cases} V_{PV} = N_s \cdot V \\ I_{PV} = N_p \cdot I \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

II.2.1.2. Paramètres externes

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes I(V), ou de l'équation (II.3). Les plus usuels sont les suivants :

- **Courant de court-circuit** : c'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du GPV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle, R_{sh} infinie) ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.3), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{(R_s I_{cc})}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{V_T}} - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (II.7)$$

Pour le silicium $I_{cc} = 30 \text{ mA/cm}^2$ pour un éclairage maximal.

- **Tension de circuit ouvert** : c'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un GPV). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (II.8)$$

Dans le cas idéal sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (II.9)$$

Pour une photopile en silicium la tension de circuit ouvert V_{co} est de 0.55 à 0.6V.

- **Facteur de forme FF** : dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou fill factor, il est défini par :

$$FF = \left(\frac{V_{MIM}}{V_{co} I_{cc}} \right) \quad (II.10)$$

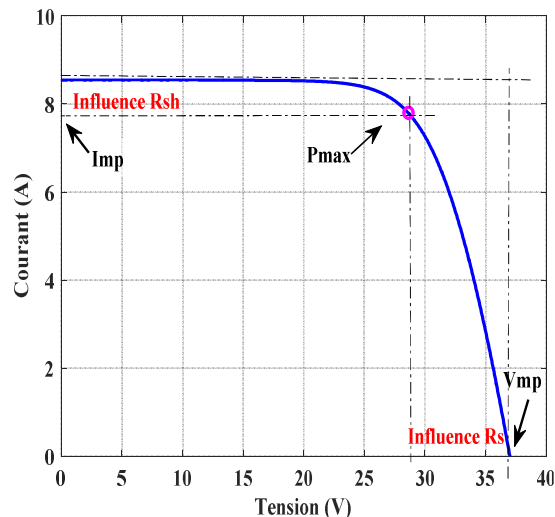


Fig.II.3. Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique I(V) d'une cellule PV

Ce facteur montre la déviation de la courbe I(V) par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}), qui correspond à la photopile idéale.

La puissance des modules PV s'exprime en Watt-crête. Cette dernière représente la puissance que fournit un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C .

- **Rendement :** La puissance est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique $I(V)$. Le rapport de la puissance électrique optimale à la puissance incidente.

$$n = P_M/P_0 \tag{II.11}$$

P_0 : est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles $P_0 = \Psi * S$.

Ψ : Flux global [W/m^2].

S : Surface de générateur [m^2].

II.2.1.3. Influence de l'ensoleillement et de la température sur les caractéristiques d'un GPV

Les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur solaire varient selon les niveaux d'éclairement. Le niveau d'éclairement est défini comme la constatation de la densité de l'énergie solaire qui est exprimé en W/m^2 sur la surface d'une zone et selon l'orientation des modules PV [53].

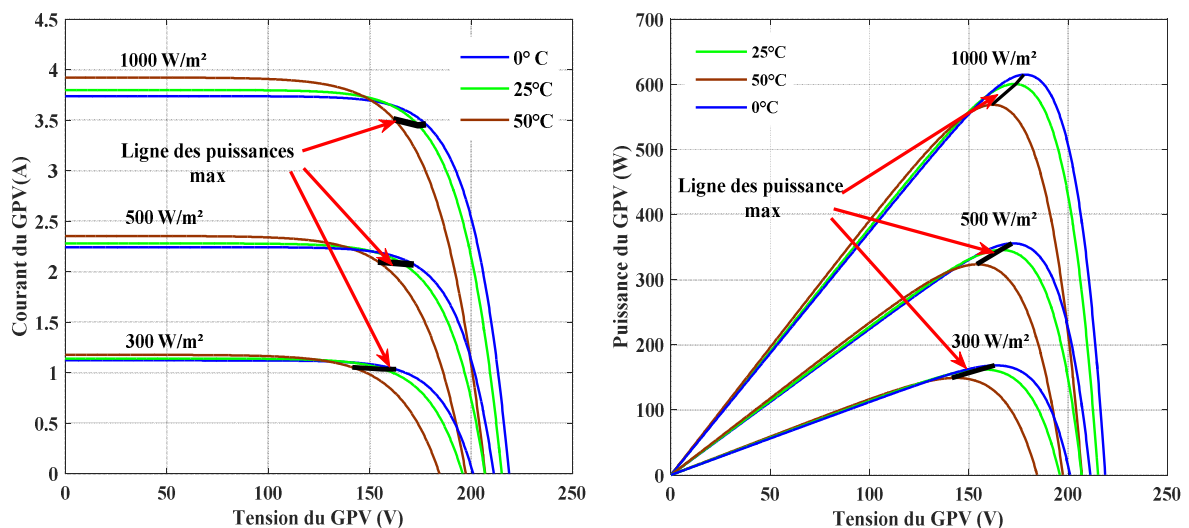


Fig.II.4. Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un GPV pour différents éclairements et températures

Le courant débité par le GPV est pratiquement proportionnel à l'éclairement ϕ . La tension de circuit ouvert V_{CO} ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. Lorsque la température

augmente, le courant augmente d'environ 3.10^{-2} mA/C par cm^2 de cellule alors que la tension décroît de 2 mV par degré. L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de 5.10^{-5} W/C par cm^2 de cellule, soit une variation de 0,35% par degré [52, 51, 46].

II.2.1.4. Association des photopiles, Module PV :

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible (de l'ordre de 3 W). Pour accroître cette puissance, on assemble ces cellules soit en série (pour augmenter la tension), soit en parallèle (pour augmenter le courant). Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et sur la surface arrière d'une feuille de Tedlar (Polyvinyle fluoride). Les cellules sont assemblées pour former un GPV élémentaire (module PV) qui est généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation [54].

Les cellules d'un module PV typique sont séparées en plusieurs segments qui sont protégées par des diodes antiparallèles. Si une de ces cellules venait à être ombragée, la diode se déclencherait de manière à protéger les cellules de cette partie de module.



Fig.II.5. Différents types de modules PV

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire de monter les modules en rangées série-parallèle pour former ce que l'on appelle champ PV [54, 48].

- **Association en série**

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant

(Fig.II.6).

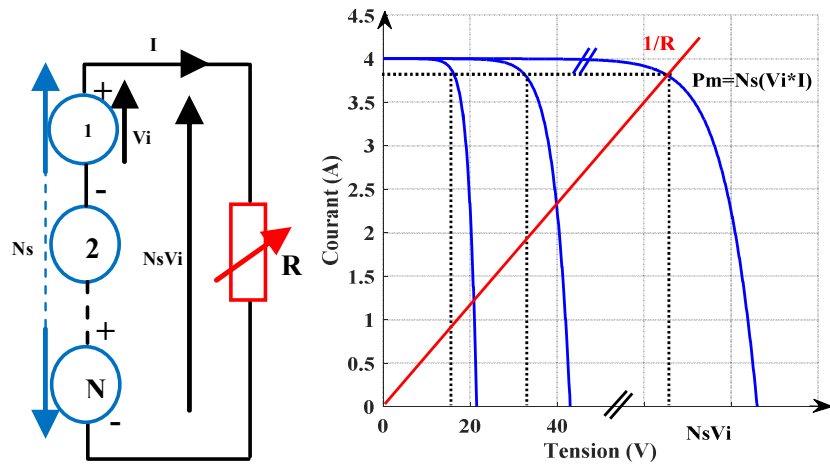


Fig.II.6. Cellules en séries

▪ Association en parallèle

Les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension.

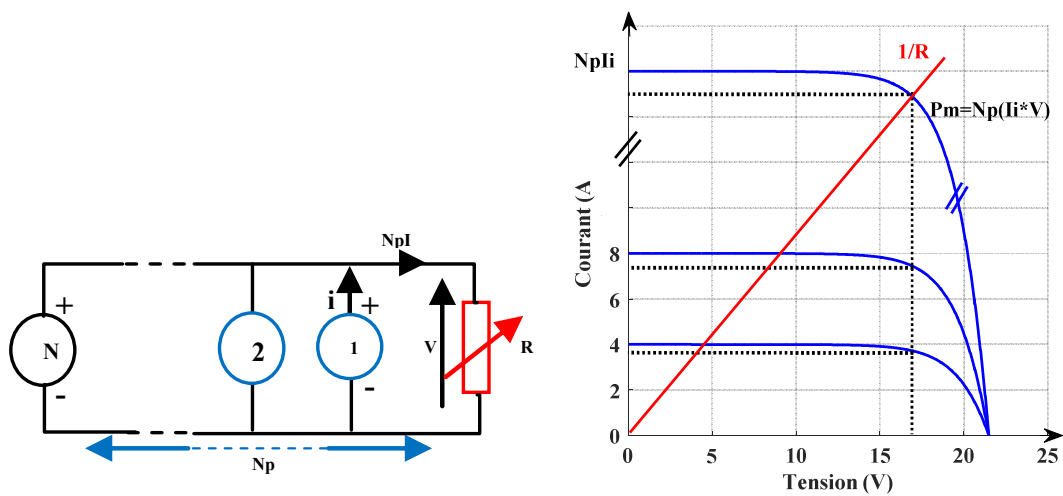


Fig.II.7. Cellules en parallèles

Pour appliquer les caractéristiques : courant tension $I(V)$ et puissance tension $P(V)$ d'une seule cellule sur un module, quelques hypothèses sont nécessaires :

- Tous les modules ont les mêmes caractéristiques électriques (même I_{cc} et même V_{co})
- Aucune occultation partielle.
- Aucune influence thermique.

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise de β cellules en série et α en parallèle est la suivante :

$$I = \alpha I_{cc} \left(\frac{\varphi}{1000} \right) - \alpha I_0 \left(e^{\frac{(\beta V + \frac{\beta R_s I}{\alpha})}{\beta V T}} \right) - \frac{\beta V + \frac{\beta R_s I}{\alpha}}{\frac{\beta}{\alpha} R_{sh}} \quad (II.12)$$

La puissance de sortie du module est égale à la puissance de sortie totale de toutes les cellules PV sous un éclairage solaire uniforme. Mais dans une condition d'éclairage non uniforme, l'ombre par exemple (l'ombre d'arbres, de maison d'un voisin ou d'un panneau PV à l'autre), comme il est représentée sur la figure (II.8), certaines de ces photopiles vont se comporter en récepteur, en polarisation directe ou inverse entraînant une élévation de la température de ces photopiles et peut détériorer le module PV [55, 56].

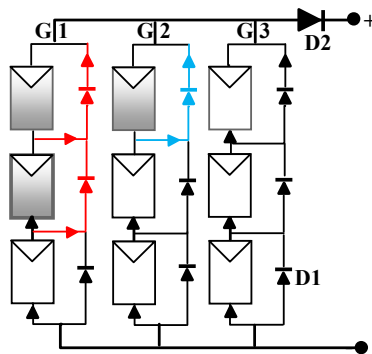


Fig.II.8. Configuration d'un GPV sous un ombrage partiel

Les courbes I(V) et P(V) en fonctionnement normal et sous ombrage sont représentés dans la figure (II.9).

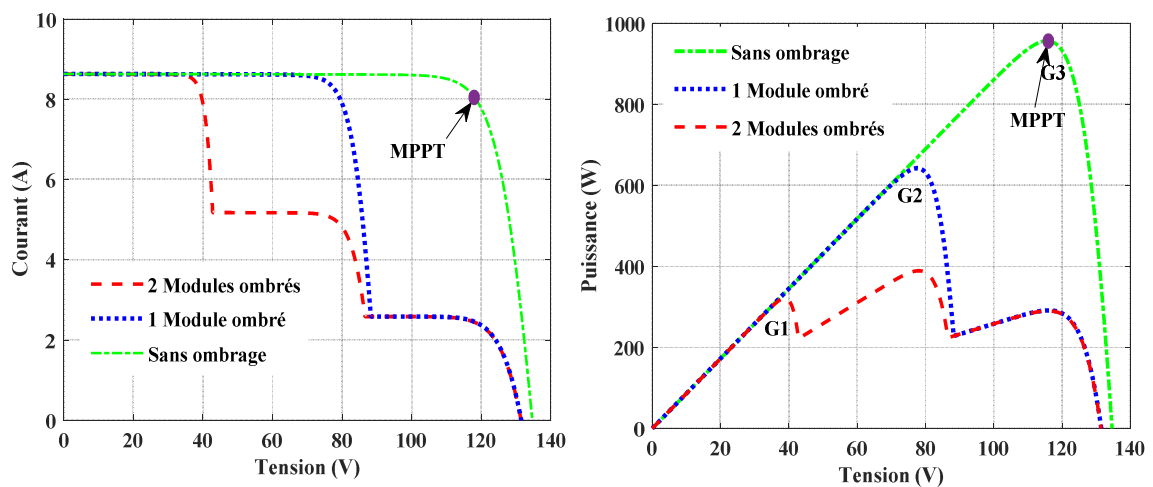


Fig.II.9. Caractéristiques I(V) et P(V) en fonctionnement normal et sous ombrage

Lorsqu'une cellule PV est ombrée, la puissance maximale diminue et les caractéristiques P(V) contiennent plusieurs points de puissance maximale (MPP) locaux, ce qui pose une difficulté au suivi du global MPP.

Pour éviter ces problèmes, la plupart des modules PV sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série avec l'association de diode by-pass (D1) (figure II.8). Le nombre de cellules par sous réseaux est un compromis économiques entre protection et pertes d'une partie importantes du GPV en cas de défaut partiel.

Les diodes de blocage (D2) évitent que le flux de courant soit inversé entre les strings de modules reliés en parallèle. Les diodes by-pass servent alors à protéger les cellules à l'ombre en dérivant l'intensité "normale" pour l'empêcher de passer dans la cellule "masquée". Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes by-pass) [57, 58, 59].

II.2.2. Convertisseur DC/DC buck-boost

Le convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible ou plus grande. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs buck et boost est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E. Le schéma de principe d'un convertisseur buck-boost est représenté à la figure (II.10) [53].

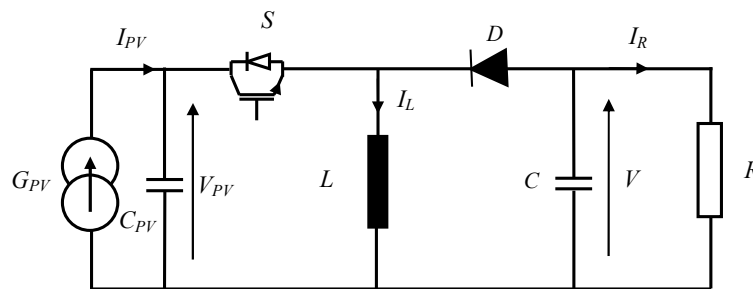


Fig.II.10. Schéma simplifié d'un convertisseur Buck-Boost

Lorsque le transistor est commuté à l'état ON (état de conduction $u=1$), la diode est inversement polarisée (Fig.II.11 (a)). Pendant cette période, le courant d'inductance est généré à partir du GPV, alors que la diode reste inversement polarisée, nous disons que le circuit fonctionne en "période de charge".

Lorsque le transistor est éteint ($u=0$), la diode est directement polarisée (Fig.II.11 (b)). Cette deuxième période est connue sous le nom de "période de décharge" du fait que l'énergie stockée dans l'inductance L est transférée à la charge R [60].

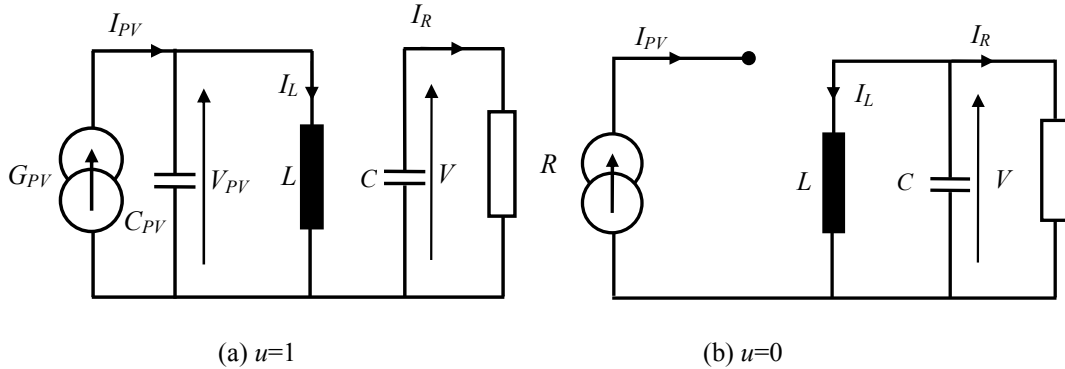


Fig.II.11. Topologies d'un convertisseur buck-boost

On applique les lois de Kirchhoff aux deux topologies (Fig.II.11), le système d'équations différentielles décrivant le convertisseur buck-boost est le suivant:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = uV_{PV} - (1-u)V_{PV} \\ C \frac{dV_{PV}}{dt} = -(1-u)I_L - \frac{V_{PV}}{R} \\ C_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - uI_L \end{cases} \quad (II.13)$$

II.2.3. Onduleur de tension

Pour les applications de pompage PV, les moteurs électriques à courant alternatif sont souvent utilisés. Il serait donc préférable d'utiliser des onduleurs de tension pour alimenter ces moteurs à partir des panneaux PV. Ces onduleurs transforment la tension continue issue des panneaux en une tension alternative monophasée ou triphasée avec une fréquence variable en agissant sur la commande de ces interrupteurs, qui sont synthétisés par la mise d'anti-parallèle d'un IGBT et d'une diode. Les hypothèses suivantes sont faites à propos des semi-conducteurs : les commutations se font sans pertes et instantanément et les effets des empiétements ou des chevauchements seront négligés. Dès lors, chaque ensemble transistor diode peut être assimilé à un interrupteur idéal [61, 30].

La figure (II.12) présente le schéma d'un onduleur de tension triphasé utilisé dans un système de pompage PV.

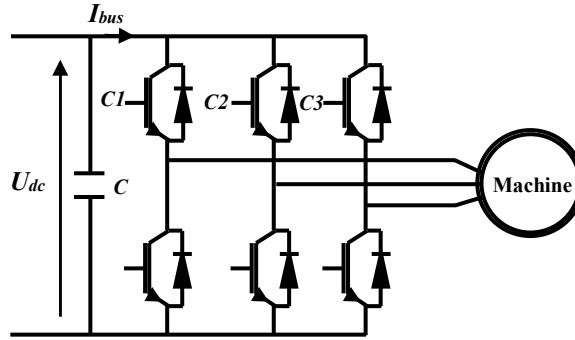


Fig.II.12. Schéma simplifié d'un onduleur triphasé utilisé pour le pompage PV

Les ordres de commande de l'onduleur sont transmis aux trois bras par l'intermédiaire des signaux de commandes C_1 , C_2 , C_3 . La convention adoptée pour le fonctionnement de chaque bras est la suivante :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Et le courant I_{bus} à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$I_{bus} = C_1 I_a + C_2 I_b + C_3 I_c \quad (\text{II.15})$$

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} U_{ac} \\ U_{ba} \\ U_{cb} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Le potentiel du point neutre est :

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.17})$$

II.2.3.1. Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale PWM

La technique de commande MLI permet de définir les instants de commande des interrupteurs de l'onduleur. Les trois tensions de phase sont générées par comparaison de trois tensions de référence ayant une certaine fréquence à un signal triangulaire commun d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure à celle des tensions de sortie. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La figure (II.13) montre le comportement d'une MLI réalisée avec la technique "Sinus-triangle".

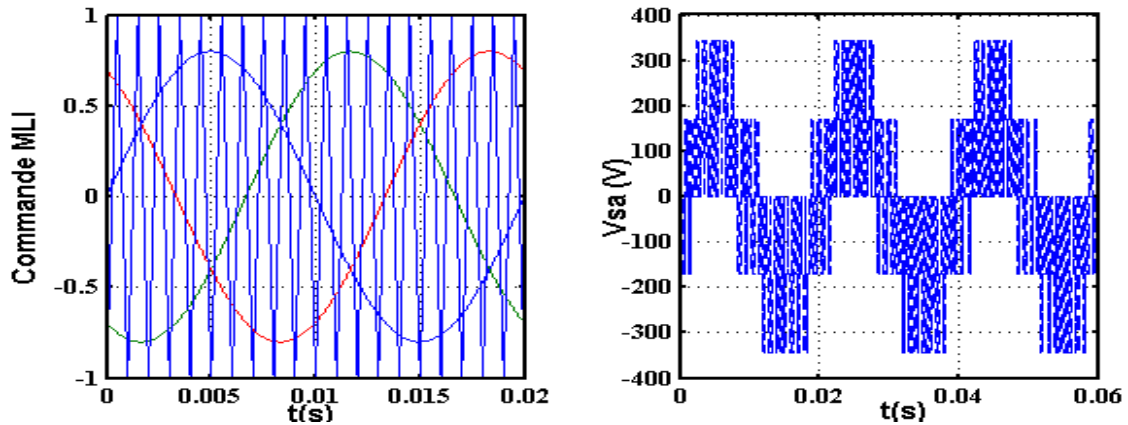


Fig.II.13. Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale

La stratégie triangulo- sinusoidale est caractérisée par deux paramètres qui sont l'indice de modulation m qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse f_p à la fréquence de référence ou modulante f_s et r le coefficient de réglage en tension qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence V_s à la valeur de crête de la porteuse V_p .

$$m = \frac{f_p}{f_s} \quad (\text{II.18})$$

$$r = \frac{V_s}{V_p} \quad (\text{II.19})$$

II.2.4. Modélisation du groupe motopompe

II.2.4.1. Modélisation de la machine asynchrone MAS

La mise en équation de la MAS est effectuée en adoptant les hypothèses simplificatrices suivantes [46, 41] :

- l'entrefer est d'épaisseur uniforme l'effet d'encoche n'est pas pris en compte ;
- la densité du courant est uniforme dans les sections des conducteurs ;
- la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- les résistances des enroulements ne varient pas avec la température ;
- la distribution spatiale des forces magnétomotrices est supposée sinusoidale le long de l'entrefer.

- Représentation générale

Il est habituel de représenter les machines électriques et en particulier les machines asynchrones dans un repère de Fresnel triphasé et équilibré. Considérons donc une MAS triphasé au stator et au rotor représentée schématiquement sur la figure (II.14) [62, 63, 64].

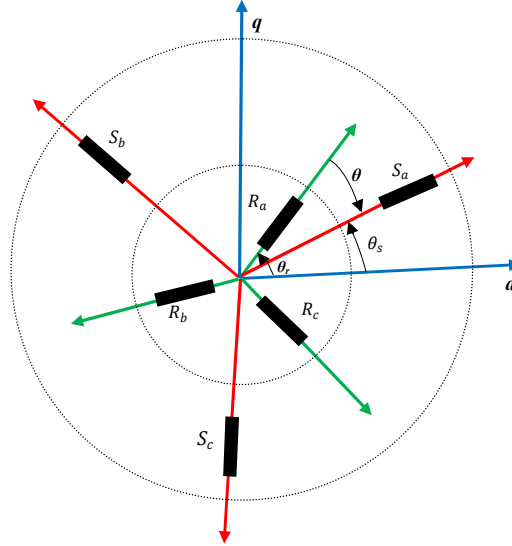


Fig.II.14. Représentation schématique d'une MAS

Les phases sont repérées respectivement par (S_a, S_b, S_c) et (R_a, R_b, R_c); la position relative instantanée entre les deux axes "S_a" et "R_a" est définie par l'angle électrique (θ) variable et fonction du temps. Les angles (θ_s) et (θ_r) sont respectivement les angles entre l'axe "a" du stator ou du rotor et la référence "d" de la base (dq). A priori, nous pouvons exprimer la relation liant ces angles entre eux par :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II.20})$$

Pour établir les équations régissant le fonctionnement du moteur, il est préférable de travailler avec un angle de rotation électrique (θ) au lieu d'un angle de rotation mécanique (θ_m). La relation entre ces deux angles est donnée par :

$$\theta = p\theta_m \quad (\text{II.21})$$

Avec les hypothèses décrites précédemment, nous pouvons écrire les équations des tensions et du flux statorique et rotorique sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_r][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \\ [\varphi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \\ [\varphi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

[L_{ss}] : Matrice des inductances cycliques et des mutuelles d'une phase statorique;

[L_{rr}] : Matrice des inductances cycliques et des mutuelles d'une phase rotorique;

[M_{sr}] : Matrice des inductances mutuelles entre une phase statorique et rotorique.

Le modèle mathématique de la MAS dans le repère triphasé est très complexe et non linéaire. Il est donc nécessaire de développer un modèle plus simple pour faciliter la modélisation. L'utilisation de la transformation de Park, sous certaines hypothèses simplificatrices, permet de rapporter les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électriquement perpendiculaires appelés *d* pour l'axe direct, et *q* pour celui en quadrature. Toutes les grandeurs électromagnétiques sont ramenées sur un seul repère (*dq*). Cela s'explique par une transformation de trois enroulements en deux enroulements.

Les équations des tensions et des flux de la MAS, écrites dans le plan (*dq*), sont les suivantes :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{cases} \varphi_{dqs} = L_s I_{dqs} + L_m I_{dqr} \\ \varphi_{dqr} = L_r I_{dqr} + L_m I_{dqs} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases}$$

$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ Est la pulsation statorique, $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$ est la pulsation rotorique et $\omega + \omega_r = \omega_s$ avec $\omega = p\Omega$ la pulsation mécanique.

Cependant, nous pouvons simplifier ces équations encore en choisissant un référentiel particulier pour *dq*. En effet, trois types de référentiels peuvent être envisagés, à savoir :

- **Référentiel lié au stator** : caractérisé par $\theta_s = 0$, et par conséquence $\theta_r = -\theta$, le système d'équations (II.23) devient alors :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

- **Référentiel lié au rotor:** caractérisé par $\theta_r = 0$, et par conséquence $\theta_s = \theta$. Le système d'équations (II.23) devient alors :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

- **Référentiel lié au champ tournant:** le système d'équation (II.23) devient alors :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

C'est dans ce référentiel que nous allons travailler par la suite. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation.

Il existe plusieurs façons de choisir les variables d'état de la MAS dans les repères de Park. En général, le choix est fixé par l'utilisateur suivant ses besoins dans l'étude et la conception de sa commande. Pour cela : $X = A\dot{X} + BU$

$$\text{Avec : } X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} ; U = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

Dans ce cas, le modèle de la MAS mis sous forme variable d'état est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{R_a}{\sigma L_s} i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \varphi_{dr} + \frac{M\omega_m}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{R_a}{\sigma L_s} i_{qs} - \omega_s i_{ds} - \frac{M\omega_m}{\sigma L_s L_r} \varphi_{dr} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{qs} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega_m) \varphi_{qr} + \frac{MR_r}{L_r} i_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -(\omega_s - \omega_m) \varphi_{dr} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{qr} + \frac{MR_r}{L_r} i_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.28})$$

Avec: $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} R_a = R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r$

L'expression du couple en fonction des courants statoriques et les flux rotoriques est donnée par:

$$T_e = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II.29})$$

L'équation de couple électromagnétique n'est pas linéaire, à cause de produit croisé des composantes du courant et du flux (couplage). Cela implique une commande permettant de résoudre ce problème.

L'équation mécanique devient :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_e - T_r \quad (\text{II.30})$$

- Commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la MAS comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple [67].

▪ Commande par orientation de flux rotorique

Le principe de la commande vectorielle est de réduire l'expression du couple (II.29), ce qui la rend comparable à l'expression du couple de la MCC. La technique consiste à placer le repère (dq) tel que l'axe d coïncide avec le flux à orienter ; ce qui revient à imposer les composantes ($\varphi_{dr} = \varphi_r$; $\varphi_{qr} = 0$) dans un repère lié au champ tournant.

Le couple se réduira alors à :

$$T_e = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{sq}) \quad (\text{II.31})$$

L'équation (II.28) devient :

$$\begin{cases} \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_a i_{ds} + \sigma L_s \omega_s i_{qs} + \frac{MR_r}{L_r^2} \varphi_{dr} + v_{ds} \\ \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_a i_{qs} - \sigma L_s \omega_s i_{ds} - \frac{M\omega_m}{L_r} \varphi_{dr} + v_{qs} \\ L_r \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -R_r \varphi_{dr} + MR_r i_{ds} \\ 0 = -(\omega_s - \omega_m) \varphi_{dr} + \frac{MR_r}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

À partir du système d'équation (II.31), le flux et la vitesse estimés sont:

$$\varphi_{dr} = \frac{M}{1 + \left(\frac{L_r}{R_r}\right)S} i_{ds} \quad (\text{II.33})$$

$$\omega_r = \frac{M}{\varphi_{dr}} \left(\frac{R_r}{L_r}\right) i_{qs} \quad (\text{II.34})$$

- Découplage et compensation

Le système d'équations (II.27) montre que V_d et V_q dépendent à la fois des courants statoriques sur les axes (dq) ce qui nous amène à implanter un découplage.

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation, cette dernière consiste à faire une régulation des courants en négligent les termes de couplage qui seront rajoutés aux sorties des régulateurs des courants afin d'obtenir des tensions de références pour alimenter l'onduleur.

Les termes de couplage sont définis de telle sorte que les tensions restantes soient une relation du premier ordre avec les composantes des courants [67, 68, 69].

Les sorties des régulateurs des courants sont :

$$\begin{cases} V_{ds}^* = R_a i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} \\ V_{qs}^* = R_a i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

On pose :

$$\begin{cases} e_{sd} = \sigma L_s \omega_s i_{qs} + \frac{MR_r}{L_r^2} \varphi_{dr} \\ e_{sq} = -\sigma L_s \omega_s i_{ds} - \frac{M\omega_m}{L_r} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Les tensions de références sont alors :

$$\begin{cases} v_{ds_ref} = V_{ds}^* - e_{sd} \\ v_{qs_ref} = V_{qs}^* - e_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

$$\begin{cases} v_{ds_ref} = (\sigma L_s S + R_a) i_{ds} - \sigma L_s \omega_s i_{qs} - \frac{MR_r}{L_r^2} \varphi_{dr} \\ v_{qs_ref} = (\sigma L_s S + R_a) i_{qs} + \sigma L_s \omega_s i_{ds} + \frac{M\omega_m}{L_r} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

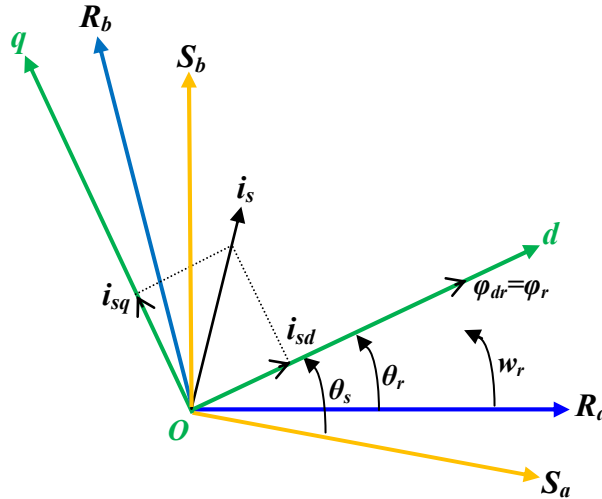


Fig.II.15. Représentation schématique de la commande vectorielle

- Calcul des régulateurs
 - Régulation de flux

Le schéma bloc de la régulation de flux est représenté par la figure (II.16). Il convient de régler le flux en agissant sur la composante du courant statorique I_{sd}^* .

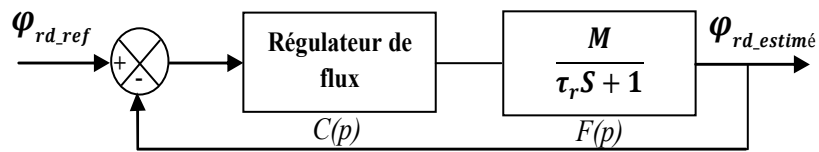


Fig.II.16. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation du flux rotorique

Prenant l'équation (II.33), le φ_{dr} sera :

$$(L_r S + R_r) \varphi_{dr} = M R_r i_{ds} \quad (II.39)$$

$$\frac{\varphi_{dr}}{i_{ds}} = \frac{M R_r}{L_r S + 1} \quad (II.40)$$

$$\frac{\varphi_{dr}}{i_{ds}} = \frac{M}{\tau_r S + 1} \quad (II.41)$$

Avec : $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$H(p) = C(p)F(p) \quad (II.42)$$

Avec : $C(p) = G \left(\frac{\tau_r S + 1}{\tau_r S} \right)$

$$H(p) = \left[G \left(\frac{\tau_r S + 1}{\tau_r S} \right) \right] \left[\frac{M}{\tau_r S + 1} \right] = \frac{MG}{\tau_r S} \quad (\text{II.43})$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$G(p) = \frac{H(p)}{H(p)+1} \quad (\text{II.44})$$

$$G(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{MG} S} = \frac{1}{1 + \tau_n S} \quad (\text{II.45})$$

$$t_r = 3\tau_n = 3 \frac{\tau_r}{MG} \quad (\text{II.46})$$

$$G = \frac{3L_s}{RMt_r} \quad (\text{II.47})$$

▪ Régulation des courants

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (II.17).

De l'équation (II.35) et (II.36) on déduit :

$$\begin{cases} \sigma L_s S i_{ds} + R_a i_{ds} = e_{sd} \\ \sigma L_s S i_{qs} + R_a i_{qs} = e_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

$$\frac{i_{sdq}}{e_{sdq}} = \frac{1}{R_a} \left(\frac{1}{\tau_r' S + 1} \right) \quad (\text{II.49})$$

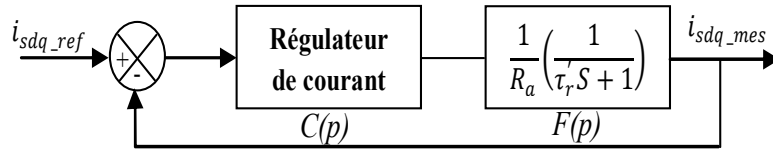


Fig.II.17. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation des courants statoriques

Avec : $\tau_r' = \frac{\sigma L_s}{R_a}$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$H(p) = C(p)F(p) \quad (\text{II.50})$$

Avec : $C(p) = G \left(\frac{\tau_r' S + 1}{\tau_r' S} \right)$

$$H(p) = \left[G \left(\frac{\tau_r' S + 1}{\tau_r' S} \right) \right] \left[\frac{1}{R_a (\tau_r' S + 1)} \right] = \frac{G}{\tau_r' S R_a} \quad (\text{II.51})$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$G(p) = \frac{H(p)}{H(p)+1} \quad (\text{II.52})$$

$$G(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r R_a}{G} S} = \frac{1}{1 + \tau_n S} \quad (\text{II.53})$$

$$t_r = 3\tau_n = 3 \frac{\tau_r R_a}{G} \quad (\text{II.54})$$

$$G = \frac{3L_s}{t_r} \quad (\text{II.55})$$

▪ **Régulation de vitesse**

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (II.18). Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple électromagnétique.

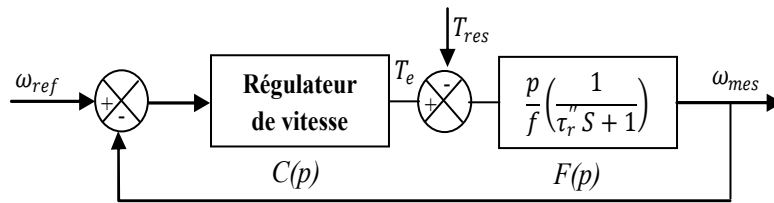


Fig.II.18. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de la vitesse

Avec : $\tau_r'' = \frac{J}{f}$

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_e \quad (\text{II.56})$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + \frac{f}{p} \omega = T_e \quad (\text{II.57})$$

$$\omega \left(\frac{J}{p} S + \frac{f}{p} \right) = T_e \quad (\text{II.58})$$

$$\omega = \frac{p}{JS+f} T_e \quad (\text{II.59})$$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$H(p) = C(p)F(p) \quad (\text{II.60})$$

Avec : $C(p) = G \left(\frac{\tau_r'' S + 1}{\tau_r'' S} \right)$

$$H(p) = \left[\frac{G(\tau_r'' S + 1)}{\tau_r'' S} \right] \left[\frac{p}{f} \left(\frac{1}{\tau_r'' S + 1} \right) \right] = \frac{pG}{f\tau_r'' S} \quad (\text{II.61})$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$G(p) = \frac{H(p)}{H(p)+1} \quad (\text{II.62})$$

$$G(p) = \frac{1}{1 + \frac{f}{G} \tau_r'' s} \quad (\text{II.63})$$

$$\tau_n = \frac{f}{G} \tau_r'' \quad (\text{II.64})$$

$$G = 3 \frac{J}{\tau_r} \quad (\text{II.65})$$

- Description du système global

La figure (II.19) montre la commande vectorielle d'une MAS dans un repère (dq), utilisé pour réguler le courant et le flux en fonction de leurs références. La commande vectorielle se caractérise par le découplage naturel entre le flux du rotor et le couple électromagnétique. Le découplage est obtenu en contrôlant les deux composantes du vecteur de courant du stator I_{ds} et I_{qs} [67, 68, 69].

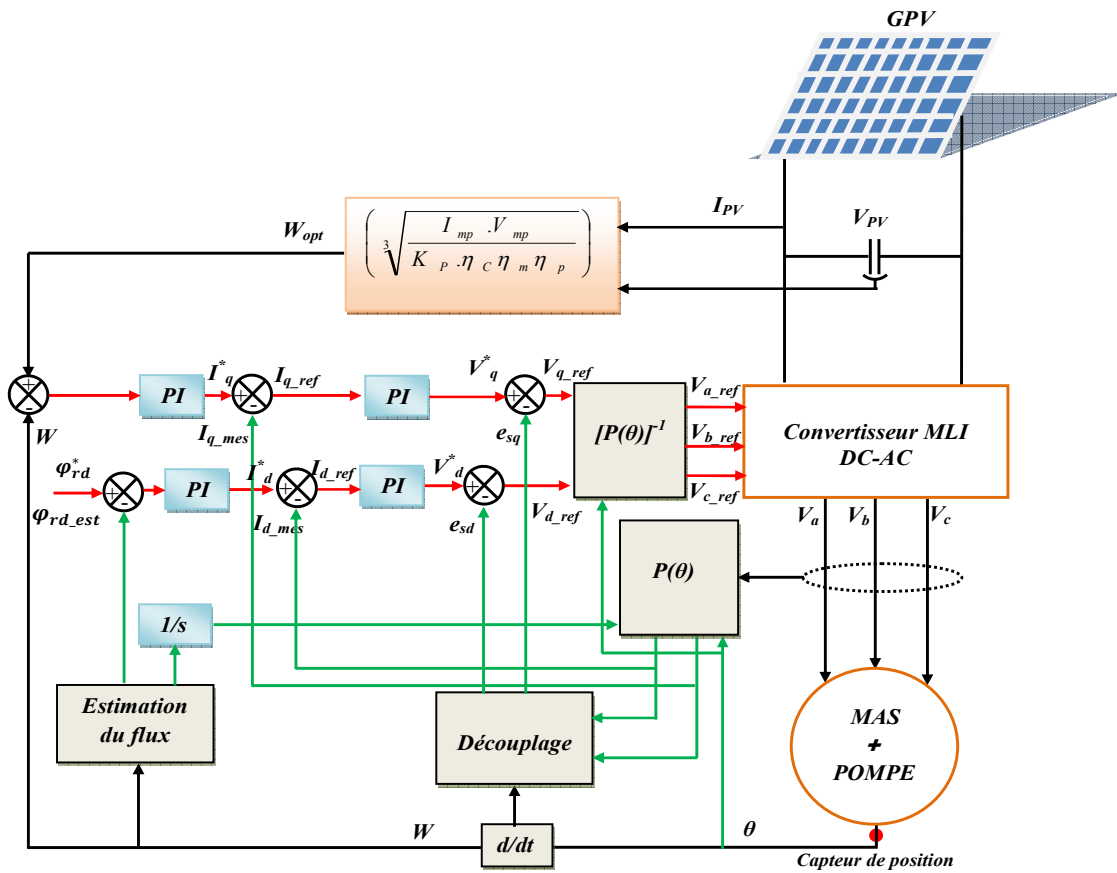


Fig. II.19. Schéma global de la commande vectorielle d'une MAS

Le flux rotorique réduit à sa seule composante d peut être commandé par le courant I_{ds} et le couple ou la vitesse par le courant I_{qs} .

- Résultats de simulations

La figure (II.20) montre l'évolution des courants, du couple, du flux et de la vitesse, obtenue sous MATLAB Simulink pour une MAS lors d'un démarrage à vide suivi par une perturbation

du couple de charge (5 N.m) avec une vitesse de référence (195 rad/s) ainsi qu'un flux nominal de référence (0.8 Wb) à l'instant $t = 5$ s. Les paramètres de la machine sont mentionnés dans l'annexe.

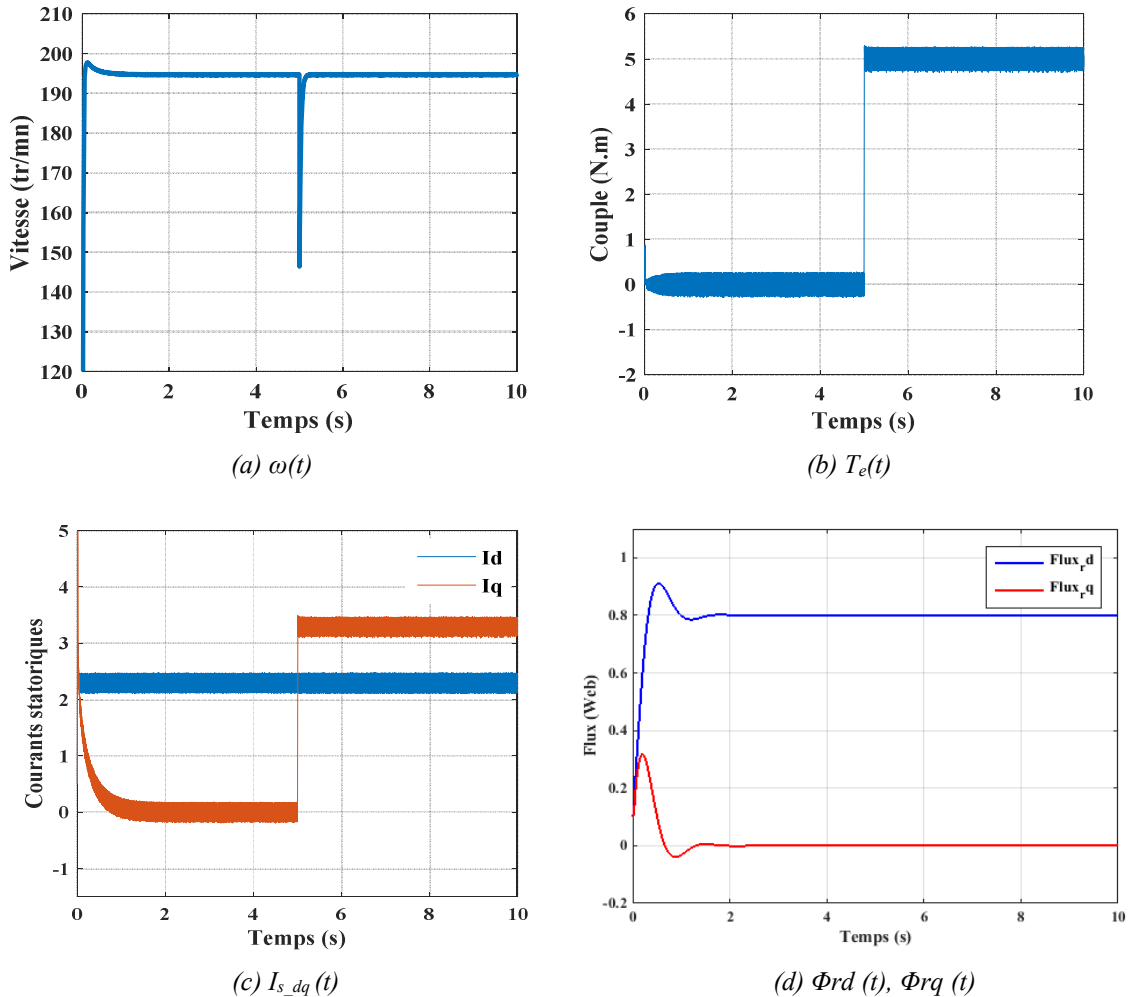


Fig.II.20. Démarrage à vide d'une MAS suivi d'une perturbation du couple de charge

La perturbation du couple de charge a été rapidement rejetée par le régulateur de vitesse. Le couple électromagnétique, c'est l'image du courant quadratique et le courant direct reste constant quel que soit la variation de couple de charge (principe de commande vectorielle).

Le flux rotorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante directe nulle, et suivant l'axe (q) avec sa valeur de référence 0.8 (Wb).

II.2.4.2. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La machine synchrone est devenue attractive est concurrente de la machines asynchrone dans les domaines des systèmes d'entraînement électrique à cause de son avantage qui est l'élimination

des pertes par glissement. Pour ce type de machine, l'inducteur est remplacé par des aimants, créant le champ d'excitation. Ceci représente aussi l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ce qui donne un rendement élevé, et n'exige aucun entretien pendant toute la durée de vie [62, 63, 64].

La MSAP est modélisée en considérant les mêmes hypothèses de la MAS. L'expression des tensions des phases du stator du MSAP est donnée par la relation (II.66) :

Expression des tensions et flux statoriques :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R'_a][I_{abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abc}] \\ [\varphi_{abc}] = [L][I_{abc}][\varphi_{eabc}] \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

L'application des transformations de Park fait aboutir à :

$$\begin{cases} v_d = R'_a I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_s \varphi_q \\ v_q = R'_a I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_s \varphi_d \\ \varphi_d = L_d I_d + \varphi_e \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

Avec : Φ_e , le flux d'aimant permanent par pôle.

Le modèle de la MSAP sous forme matricielle peut s'écrire :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q - \omega_s \varphi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_a & -L_q \omega_s \\ L_d \omega_s & R'_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.68})$$

Donc le modèle différentiel de la MSAP est :

$$\begin{cases} L_d \frac{dI_d}{dt} = -R'_a I_d - L_q \omega_s I_q + v_d \\ L_q \frac{dI_q}{dt} = -R'_a I_q - L_d \omega_s I_d - \omega_s \varphi_e + v_q \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

Le couple électromagnétique sera exprimé par :

$$T_e = P[(L_d - L_q)I_d + \varphi_e]I_q \quad (\text{II.70})$$

L'équation mécanique s'écrit :

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = T_e - T_r \quad (\text{II.71})$$

La MCC à un avantage primordial d'être facilement commandé, car le flux et le couple sont découplés et sont contrôlés indépendamment. Pour une MSAP le découplage n'existe plus, ce qui rend la machine difficile à commander. Cette difficulté réside dans le fait qu'il existe un

couplage entre les variables d'entrées (tension, fréquence) et les variables de sortie (couple, vitesse). Pour qu'on arrive à un contrôle semblable à la MCC, on applique la commande vectorielle [70, 71, 72].

À partir de l'équation (II.70), on constate que pour contrôler le couple il faut contrôler les composantes directes et en quadrature du courant. Dans le cas d'une MSAP à pôles lisses ($L_d = L_q$) l'expression du couple sera :

$$T_e = P\varphi_e I_q \quad (II.72)$$

Pour une MSAP à pôles saillants, il faut assurer l'orthogonalité entre le flux rotorique φ_e et la composante en quadrature du courant statorique, ceci revient à imposer le courant direct $I_d = 0$

$$T_e = P\varphi_e I_q \quad (II.73)$$

Comme le flux des aimants est constant, le couple électromagnétique obtenu devient proportionnel au courant I_q .

- Découplage et compensation

L'équation (II.69) montre que V_d et V_q dépendent à la fois des courants statoriques sur les axes (dq), ce qui nous amène à implanter un découplage. Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation. Cette dernière consiste à faire une régulation des courants en négligeant les termes de couplage qui seront rajoutés aux sorties des régulateurs des courants afin d'obtenir des tensions de références pour alimenter l'onduleur [70, 71, 72].

Les sorties des régulateurs des courants sont :

$$\begin{cases} V_d^* = R'_a I_d + \sigma L_d \frac{dI_d}{dt} \\ V_q^* = R'_a I_q + \sigma L_q \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (II.74)$$

On pose :

$$\begin{cases} e_d = L_q \omega_s I_q \\ e_q = -\omega_s (L_d I_d + \varphi_e) \end{cases} \quad (II.75)$$

Les termes de références sont alors :

$$\begin{cases} v_{d.ref} = V_{ds}^* - e_{sd} \\ v_{q.ref} = V_{qs}^* - e_{sq} \end{cases} \quad (II.76)$$

$$\begin{cases} V_{d.ref} = (R'_a + \sigma L_d) I_d - L_q \omega_s I_q \\ V_{q.ref} = (R'_a + \sigma L_q) I_q + \omega_s (L_d I_d + \varphi_e) \end{cases} \quad (II.77)$$

Le réglage du courant et de la vitesse pour une MSAP est le même que pour la MAS.

- Description du système global

La figure (II.21) montre le schéma global de la commande vectorielle d'une MSAP dans un repère (dq) alimenté par un onduleur de tension [70, 71, 72, 73].

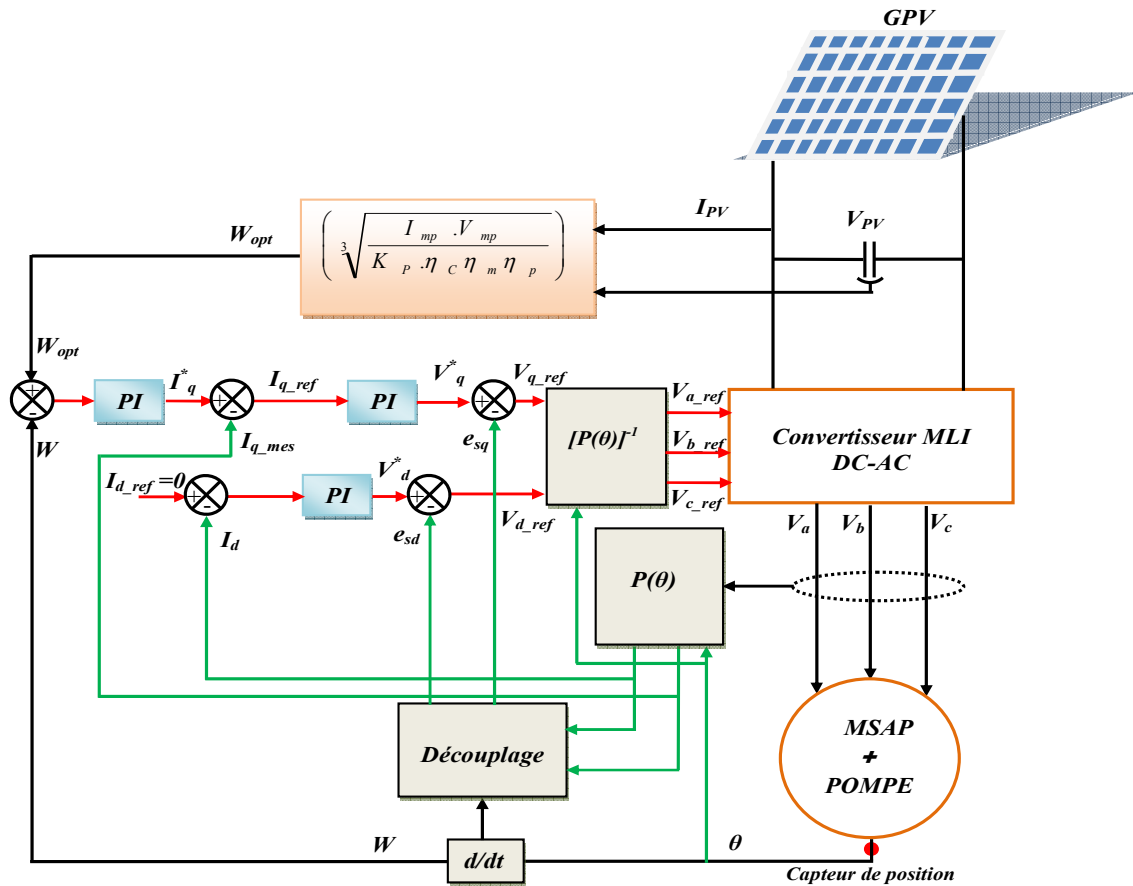


Fig.II.21.Schéma global de la commande vectorielle d'une MSAP

Les courants de références direct I_d^* et quadrature I_q^* sont comparés séparément aux courants mesurés I_d et I_q . Les erreurs sont appliquées à l'entées des régulateurs PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références V_d_ref et V_q_ref . Ces tensions après passage par la transformation de Park servent comme tensions de références (V_a_ref , V_b_ref , V_c_ref) pour commander l'onduleur. Les tensions de sortie de l'onduleur qui alimente la machine sont contrôlées par une technique de modulation de largeur d'impulsion MLI qui permet un réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie.

- Résultats de simulations

La figure (II.22) montre l'évolution des courants, du couple et de la vitesse, obtenus sous MATLAB Simulink pour une MSAP lors d'un démarrage à vide suivie par une perturbation du couple de charge (5 N.m) avec une vitesse de référence (195 rad/s) à l'instant $t = 5$ s. Les paramètres de la machine sont mentionnés dans l'annexe.

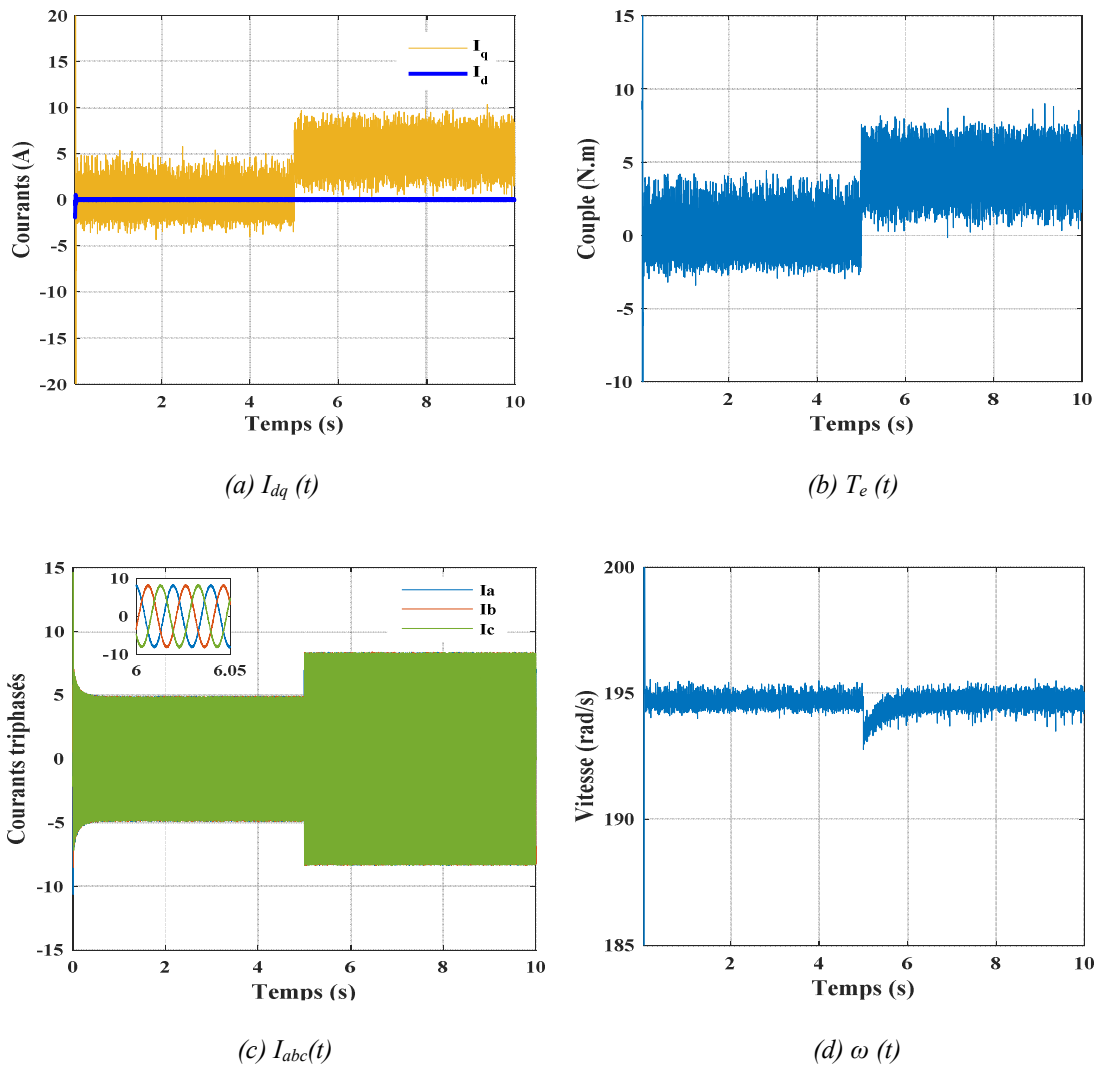


Fig.II.22. Démarrage à vide d'une MSAP suivies d'une perturbation du couple de charge

Lors d'un démarrage à vide, le courant I_d est maintenu égale à zéro par le régulateur de courant (courant de référence supposé nul), la composante I_q est nulle (pas de couple de charge). Après l'application du couple de charge à $t=5$ s, la perturbation du couple a été rapidement rejetée par le régulateur de vitesse. Le couple est l'image du courant I_q selon le principe de la commande vectorielle, il compense instantanément le couple résistant.

II.3.4.3. Modélisation de la machine à courant continu MCC

La MCC peut être modélisée par le biais d'équations électrique et mécanique. Du côté électrique nous pouvons dire que la MCC se définit par un circuit d'induit et un circuit inducteur. L'induit peut être vu comme une résistance R_a et une inductance L_a en série avec une source de tension commandée E proportionnelle à la vitesse. Du coté mécanique, la MCC représente par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée. Le schéma d'une MCC est représenté sur la figure suivante [62, 63, 64] :

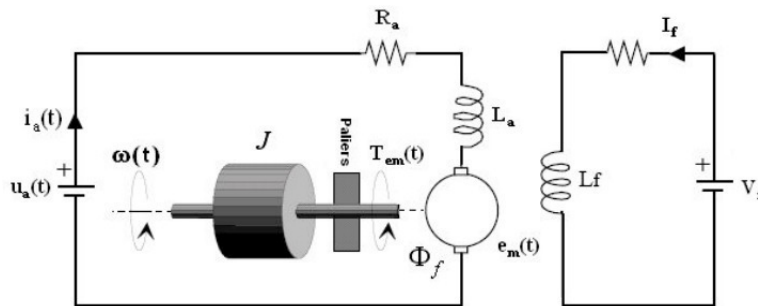


Fig.II.23. Schéma d'un entraînement avec une MCC à excitation indépendante

La MCC à un avantage primordial d'être facilement commander, le flux et le couple sont naturellement découplés et sont contrôlés indépendamment [73, 75, 76, 70, 68].

L'équation de tension induite s'écrit :

$$e_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E \quad (\text{II.78})$$

Equations électromécaniques :

La tension induite E , appelée FEM "force électromotrice" est proportionnelle à la vitesse angulaire ω et au flux inducteur φ :

$$E = K_E \omega_m \varphi \quad (\text{II.79})$$

Le couple électromagnétique $T_e(t)$ développé a pour expression :

$$T_e(t) = K_T i_a \varphi \quad (\text{II.80})$$

k_E , k_T sont des constantes dépendant de la construction de la machine.

- Réglage du courant d'induit

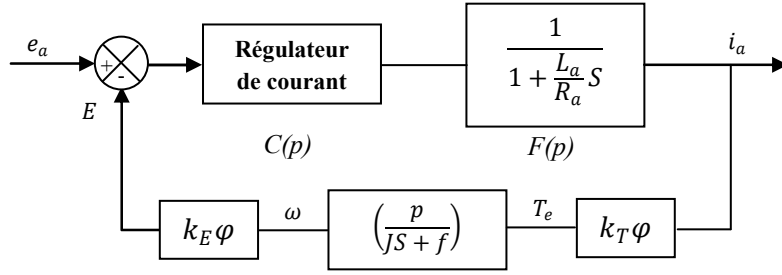


Fig.II.24. Schéma fonctionnel de la boucle de régulation du courant d'induit.

Avec : $\tau_r''' = \frac{L_a}{R_a}$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$H(p) = C(p)F(p) \tag{II.81}$$

Avec : $C(p) = G \left(\frac{\tau_r''' S + 1}{\tau_r''' S} \right)$

$$H(p) = \left[G \left(\frac{\tau_r''' S + 1}{\tau_r''' S} \right) \right] \left[\frac{1}{(\tau_r''' S + 1)} \right] = \frac{G}{\tau_r''' S} \tag{II.82}$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$G(p) = \frac{H(p)}{H(p) + 1} \tag{II.83}$$

$$G(p) = \frac{1}{G + \tau_r''' S} \tag{II.84}$$

$$t_r = 3\tau_n = 3 \frac{\tau_r'''}{G} \tag{II.85}$$

$$G = \frac{L_a}{3R_a t_r} \tag{II.86}$$

- Résultats de simulations

La figure (II.25) montre l'évolution du courant d'induit, du couple et de la vitesse, obtenus sous MATLAB Simulink pour une MCC lors d'un démarrage à vide suivie d'une perturbation du couple de charge (4 N.m) avec une vitesse de référence (180 rad/s) à l'instant t =5 s. Les paramètres de la machine sont mentionnés dans l'annexe.

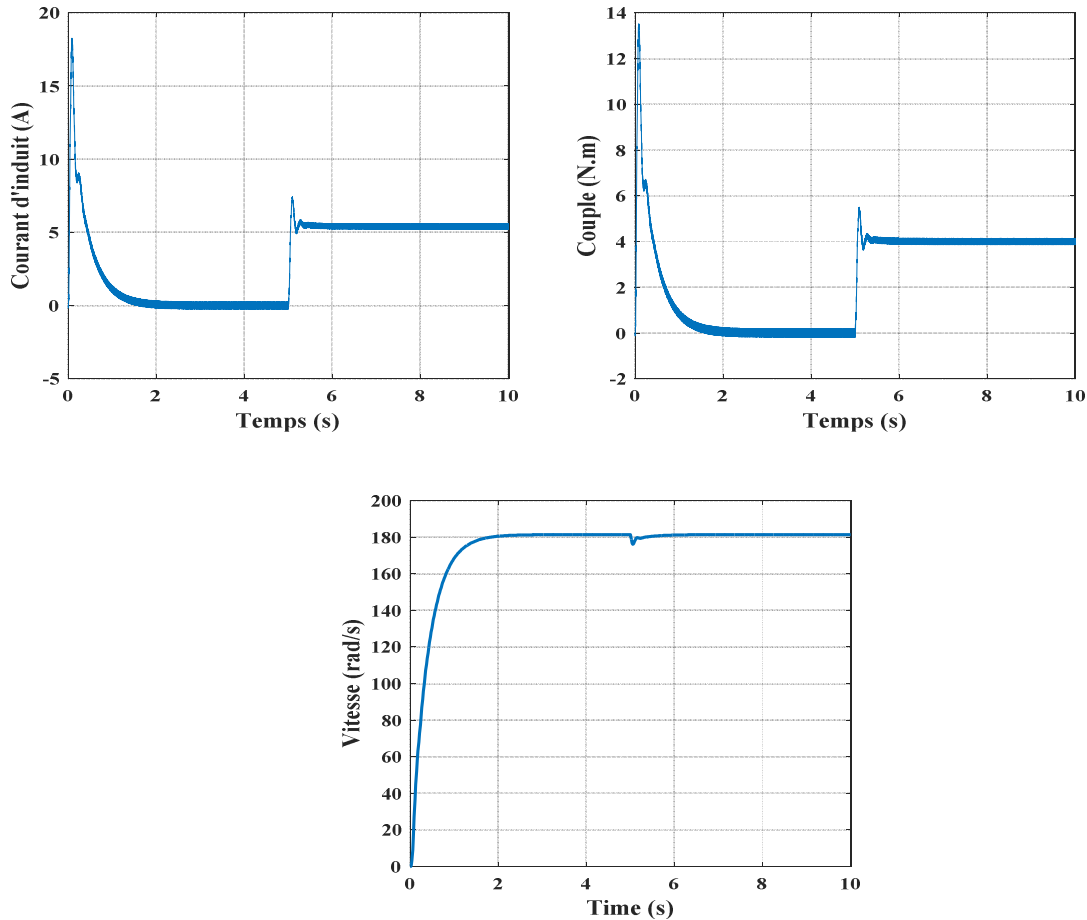


Fig.II.25. Démarrage à vide d'une MCC suivi d'une perturbation du couple de charge

Lors d'un démarrage à vide, le courant d'induit est égal à zéro. Après l'application du couple de charge à $t=5$ s, la perturbation du couple a été rapidement rejetée par le régulateur de vitesse. Le couple est l'image du courant selon le principe de la commande vectorielle, il compense instantanément le couple résistant.

II.2.5. Modélisation de la pompe centrifuge

Le dimensionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres : le débit, la vitesse et la hauteur. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite.

II.2.5.1. Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale dépend fortement de la hauteur géodésique qui est la hauteur nette de transport d'eau. De plus de la hauteur géodésique, d'autres facteurs influent sur la hauteur manométrique totale à savoir les pertes de charge linéaires (ΔH_1) et singulières (ΔH_2) dans les conduites. Cette hauteur peut être exprimée sous cette formule [77, 75, 74, 73] :

$$H = H_g + \Delta H \quad (\text{II.87})$$

II.2.5.2. Pertes de charges linéaires

Se sont les pertes d'eau dans la tuyauterie données par la formule (II.88):

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.88})$$

Avec :

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s²).

v : Vitesse moyennes du fluide (m/s) qui est donnée par : $v = \frac{4Q}{\pi D^2}$

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{II.89})$$

Les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation. Ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation et quand le diamètre de la conduite augmente, elles diminuent considérablement.

II.2.5.3. Pertes de charges singulières (locales)

Ces pertes dues essentiellement aux divers changements de section qui correspondent aux accidents de parcours dans les réseaux hydrauliques, elles peuvent être exprimées par [78, 79, 72] :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \quad (\text{II.90})$$

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (\text{II.91})$$

$$\Delta H = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} Q^2 \quad (\text{II.92})$$

Avec : K_{fr} Constante de canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_g + K_{fr}Q^2 \quad (II.93)$$

II.2.5.4. Caractéristique débit-hauteur

En général, la pompe est décrite par sa caractéristique hauteur/débit $H(Q)$ dont (H) est la hauteur manométrique totale et (Q) est le débit de la pompe. La caractéristique peut être estimée par le modèle de « Pleider-Peterman » et exprimée par la formule (II.94):

$$H = a_0\omega_m^2 - a_1\omega_m Q - a_2Q^2 \quad (II.94)$$

Avec : a_0, a_1, a_2 des coefficients donnés par les fabricants.

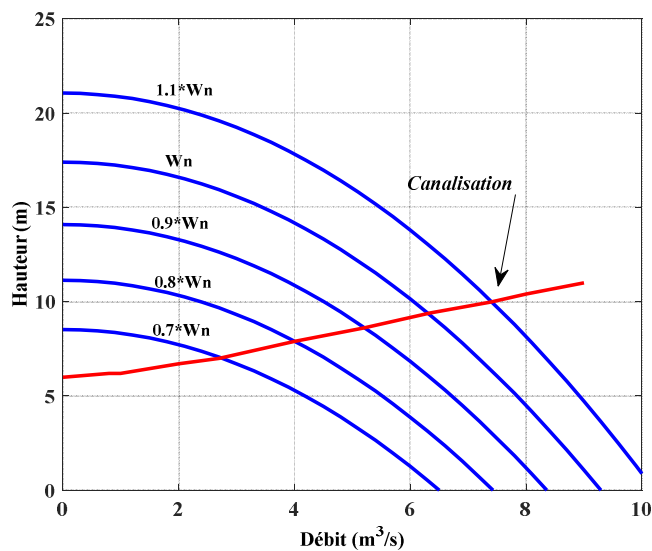


Fig. II.26. Caractéristiques $H(Q)$ et caractéristique de canalisation

II.2.5.5. Caractéristique couple vitesse $C(\omega)$ de la pompe

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse du moteur qui est de la forme suivante :

$$T_L = k_r\omega_m^2 \quad (II.95)$$

Avec : $K_r = \frac{P_m}{\omega_m^3}$

II.2.5.6. Calcul de puissance

L'énergie mécanique nécessaire à une pompe est toujours supérieure à l'énergie transmise au fluide suite aux différents frottements des organes de rotation. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_H = \frac{\rho g Q H}{\eta_p} \quad (\text{II.96})$$

Avec : η_p le rendement de la pompe qui est de l'ordre de 0.4 à 0.8 pour les pompes centrifuges.

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique de chaque élément constituant notre système de pompage PV. Ce dernier est constitué de panneaux solaires, d'un convertisseur DC/DC, d'un onduleur de tension DC/AC, du groupe motopompe et d'un circuit hydraulique. Pour le générateur PV, nous avons présenté deux modèles: le modèle en une seule exponentielle et celui en double exponentielle. Ensuite, nous avons décrit brièvement le modèle du convertisseur DC/DC buck-boost et de l'onduleur de tension tout en considérant que ses composants sont parfaits et que la commutation de ses bras se fait d'une manière instantanée. Après cela nous avons présenté les modèles dynamiques des machines asynchrone, à aimant permanent et à courant continu utilisées pour ce type de système de pompage PV. Nous avons terminé le chapitre avec la modélisation de la pompe centrifuge. Pour la partie hydraulique, nous avons reporté les modèles caractérisant le fonctionnement d'une pompe centrifuge tout en tenant compte du régime d'écoulement et des pertes de charge. De ce fait, il est nécessaire d'étudier l'optimisation de fonctionnement du système de pompage PV. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III
OPTIMISATION DE FONCTIONNEMENT DU
SYSTEME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAIQUE

III.1. Introduction

La puissance électrique produite par un GPV dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Pour ces raisons, le GPV ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation devra être intégré entre les deux. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale [80, 81].

Dans le but d'atteindre cet objectif, l'étage d'adaptation doit être muni d'une commande MPPT, qui va agir sur son rapport cyclique en fonction des variations des conditions météorologiques ou de la charge pouvant survenir. Dans ce sens, nous présentons dans ce chapitre l'optimisation de fonctionnement du système de pompage PV. On présente d'abord le couplage direct du groupe motopompe-GPV et ensuite, certaines méthodes de suivi de la puissance maximale tel que (P&O, INC et MG). Enfin, des simulations seront présentées tout en tenant compte de l'effet de changement des conditions météorologiques [82, 83].

III.2. Couplage direct du groupe motopompe-GPV

Quand le GPV reçoit un appel de courant trop fort, il débite son maximum de courant correspondant à un fonctionnement en court-circuit. C'est le cas d'une liaison directe du GPV à une charge [84]. À noter que dans certaines situations, il existe des charges qui ne peuvent pas être vaincues car les régimes transitoires sont importants. Par exemple, la pompe ne peut pas débiter de l'eau si la puissance consommée n'est pas suffisante pour élever l'eau à la hauteur demandée. Ceci est dû au problème d'éloignement du point de fonctionnement par rapport au point de fonctionnement optimal [85]. Or, nous savons que si le GPV ne voit pas une charge optimale à ses bornes il ne débite pas son maximum de puissance.

Les systèmes de pompage à couplage direct, comme montré sur la figure (III.1), sont des systèmes simple et fiable [86]. Ceci est dû principalement à l'absence des convertisseurs d'électronique. Ses avantages ont mené à son utilisation très répandue à travers le monde. Appelbaum et Bany (1979) ont analysé le comportement dynamique de ces systèmes [87, 88]. Roger (1979) et Anis (1985) ont rapportés que pour une charge composée d'un moteur DC et

une pompe volumétrique alimentée en liaison directe, le travail se fera dans la zone I (figure III.3), pour chaque valeur de l'énergie reçue [89, 90].

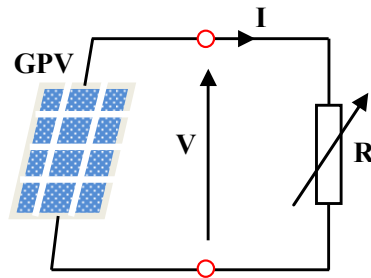


Fig.III.1. Connexion direct GPV-charge

Lorsqu'un GPV est directement couplé à une charge, son point de fonctionnement sous un rayonnement constant est l'intersection de sa courbe caractéristique courant-tension $I=f(V)$ avec la ligne de charge $I_{ch}=f(V)$. Ce point de fonctionnement n'est pas forcément le point de puissance maximale (MPP). Alors dans le couplage direct, les GPV_s sont souvent surdimensionnés pour assurer une puissance suffisante à fournir à la charge pendant les mois à faible rayonnement, ce qui conduit à un système excessivement cher.

Malgré les avantages du couplage direct, il reste néanmoins que ce type de couplage n'est possible que dans des conditions spécifiques (température, éclairage, type et paramètres de la charge). Alors, il faut faire appel à des techniques plus sophistiquées.

III.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les GPV ou encore avec les générateurs éoliens [91, 87]. La méthode MPPT est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du système.

Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le GPV de manière à fournir en permanence le maximum de puissance. La figure (III.2) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le GPV. À noter que le tracking joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement [92, 87].

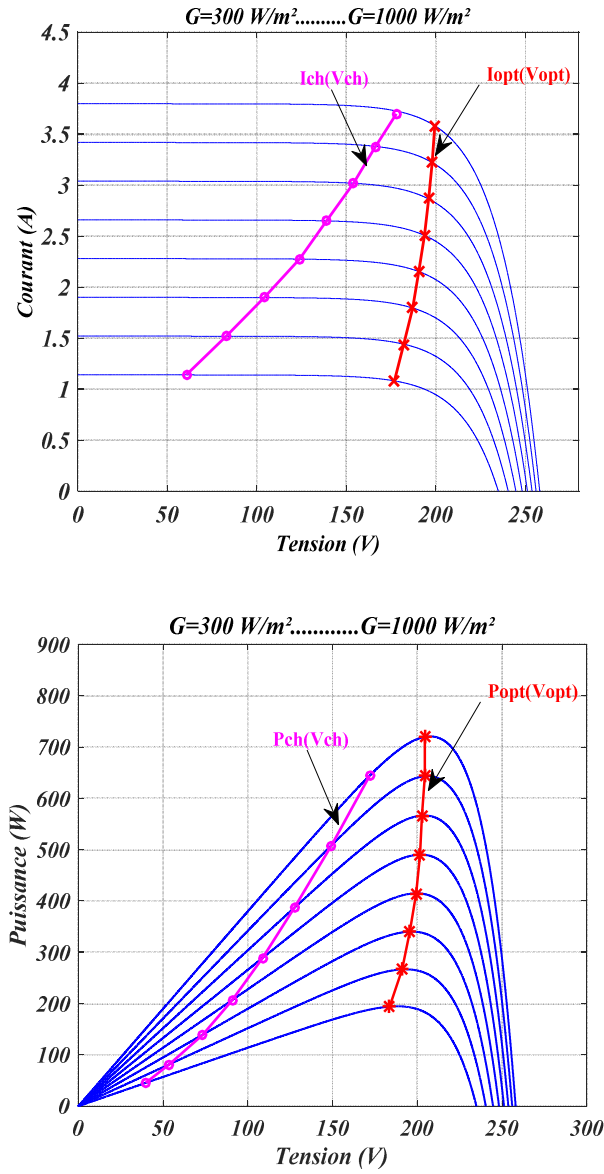


Fig.III.2. Tensions et puissances de charge pour un couplage direct

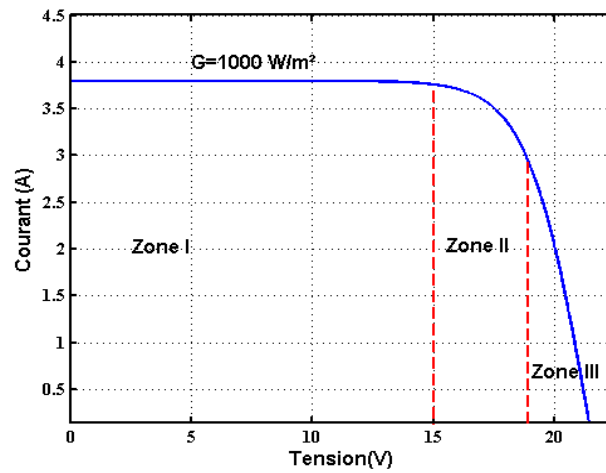


Fig.III.3. Points de fonctionnement du système de pompage PV

On peut voir que les points de fonctionnement du système, situés à l'intersection des caractéristiques I-V du générateur et la courbe de charge de l'ensemble moteur-pompe, se déplace selon la valeur de l'ensoleillement. Pour des fortes valeurs de l'ensoleillement, les caractéristiques se coupent dans la zone où la puissance débitée par le générateur est optimale (zone 2). Par contre, pour les faibles valeurs de l'ensoleillement le point de fonctionnement s'éloigne de cette zone; ce qui entraîne des performances du système assez médiocre et donc le générateur est sous-utilisé. La figure (III.4) montre le schéma de la technique de poursuite du point de puissance maximal ou MPPT.

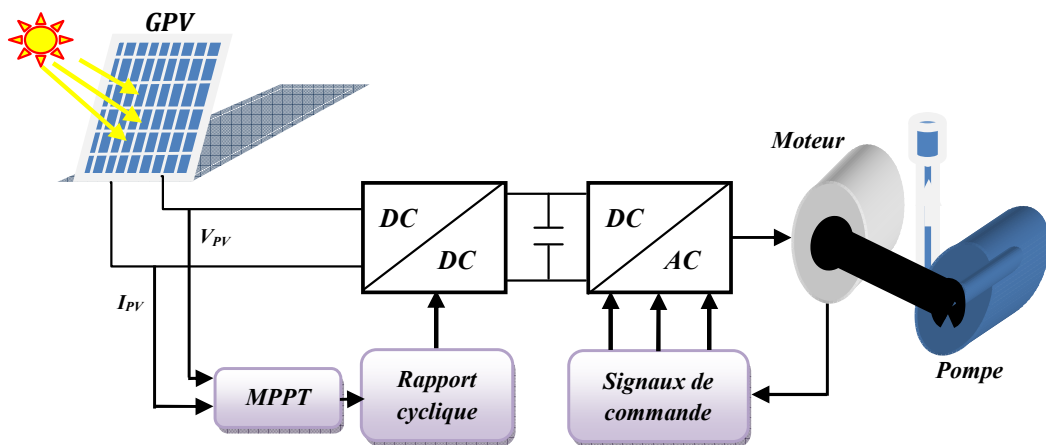


Fig.III.4. Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT

Le point de puissance maximale est habituellement contrôlé par deux variables de commande, la tension ou la puissance, qui sont à chaque fois mesurées et employées à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module PV est au PPM. Plusieurs publications sur les commandes de la recherche MPPT apparaissent dans la littérature, et ce depuis les années 1970. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche. Une comparaison de ces techniques peut suggérer plusieurs informations importantes pour la conception de ces types de systèmes. Dans ce qui suit, nous allons citer quelques méthodes et stratégies de tracking existant dans la littérature.

III.3.1. Optimisation par la méthode de perturbation et d'observation (P&O)

L'algorithme "Perturber et observer" (P&O : Perturb-and-Observe) est bien connu et il continue à être la méthode la plus employée dans les modules MPPT parce qu'elle est simple et n'exige seulement que des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque : V_{PV} et I_{PV} respectivement [93]. Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{PV} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de

sortie du GPV. On considère que le GPV fonctionne à un point qui n'est pas forcément le MPP. On perturbe la tension de fonctionnement avec (dV) et on observe la variation (dP) de la puissance électrique. Si (dP) est positif, alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP. D'autres perturbations successives de la tension dans la même direction (c'est-à-dire avec le même signe algébrique) devraient déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP. Dans le cas où (dP) est négative, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP, et donc le signe algébrique de la perturbation de la tension devrait être inversé pour déplacer de nouveau le point de fonctionnement vers le MPP.

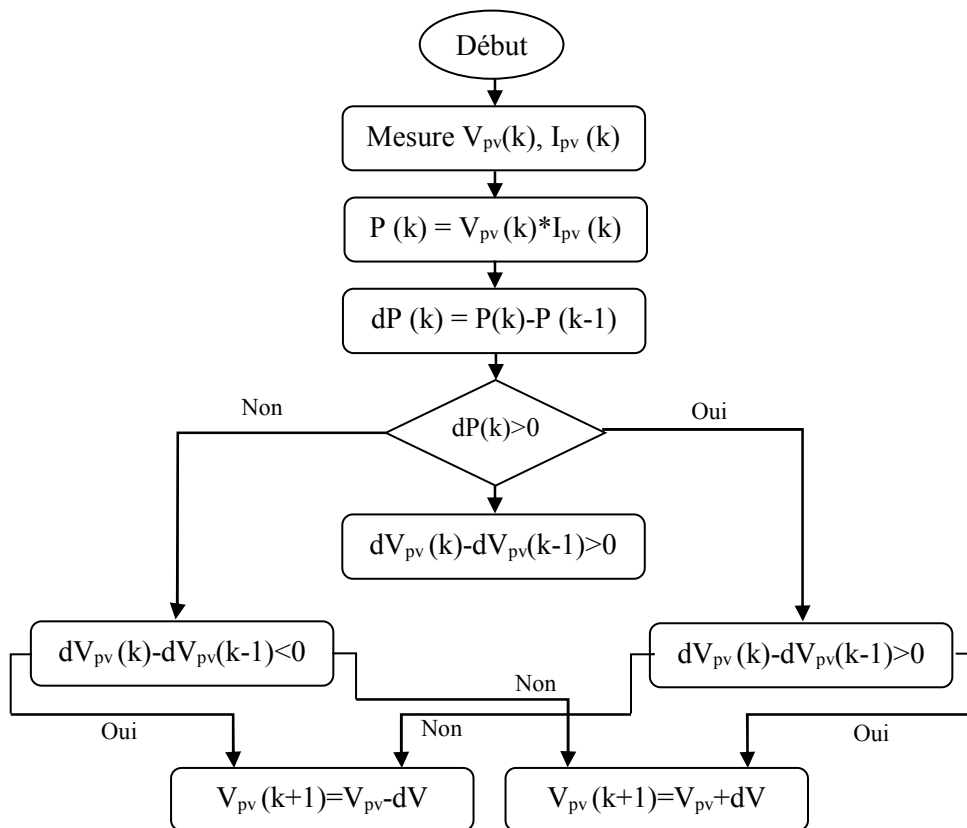


Fig. III.4. Organigramme de l'algorithme P&O

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité. Quand l'intensité de lumière solaire diminue, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du MPP. Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" est qu'il ne peut pas déterminer quand il a atteint vraiment le MPP. À ce moment, il oscille autour du MPP, en changeant le signe de la perturbation (dV) après chaque mesure de (dP). En outre, il a été montré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique sous un changement rapide du niveau de l'ensoleillement (passage d'un nuage mobile). L'algorithme continuera à déplacer le point de fonctionnement plus loin du point

réel de puissance maximale, et il y aura plus de puissance perdue. Cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que le changement de l'éclairement ralentisse ou se stabilise.

Sur le schéma de la figure (III.5), nous considérons que le point de fonctionnement est sur la courbe 1. Le MPPT oscille autour du MPP du point A. Puis, nous supposons que la valeur de l'ensoleillement augmente et la courbe puissance tension du générateur se déplace vers la courbe 2.

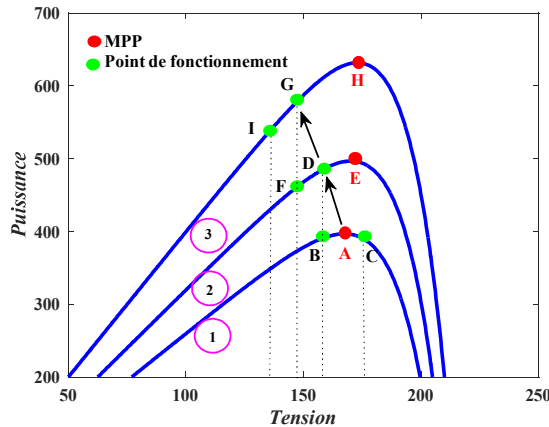


Fig.III.5. Illustration du comportement erratique de l'algorithme 'P&O' sous un changement d'éclairement rapide

Si, au cours du changement rapide de l'ensoleillement, le MPPT perturbait le point de fonctionnement du point A vers le point B, l'algorithme déplace en réalité le point de fonctionnement de A vers D (puisque le point D et B ont la même tension). Donc, ceci conduit à un (dP) positif et le MPPT continuera de perturber la tension dans la même direction ; donc, vers le point F. Si l'ensoleillement augmente toujours rapidement, le point de fonctionnement se déplace vers le point G sur la courbe 3 au lieu du point F sur la courbe 2. Alors, le MPPT voit toujours un (dP) positif et il déplace le point de fonctionnement vers le point I tandis qu'il croit en bon sens de convergence vers le MPP. À partir des points A → D → G → I, le MPPT s'éloigne continuellement du MPP en diminuant le rendement de l'algorithme.

Plusieurs améliorations de l'algorithme "P&O" ont été proposées [92, 82]; une des plus simples méthodes nécessite l'ajout d'une fonction "attendre" qui cause une cessation momentanée des perturbations si le signe algébrique de la perturbation est inversé plusieurs fois en un petit moment tout en indiquant que le MPP a été atteint. Ceci réduit l'oscillation au tour du MPP et améliore l'efficacité de l'algorithme pour des ensoleillements constants. Cependant, il rend également le MPPT plus lent pour répondre au changement des conditions climatiques empirant le comportement erratique des jours partiellement nuageux.

III.3.2. Optimisation par la Méthode d'incrémentation de la conductance (INC)

L'algorithme d'incrémentation de la conductance a été développé pour améliorer l'algorithme (P&O) surtout le problème d'oscillation autour du MPP. Les tensions et courants du générateur sont mesurés, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance $G=I/V$ et la conductance incrémentale $dG= dI/dV$ et décider de son comportement [94, 95, 96, 97, 98].

La dérivée de la puissance par rapport à la tension est :

$$\frac{dP}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} \quad (III.1)$$

Ceci conduit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, & \frac{dP}{dV} = 0 & (a) \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, & \frac{dP}{dV} > 0 & (b) \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, & \frac{dP}{dV} < 0 & (c) \end{cases} \quad (III.2)$$

Les équations (III.1) et (III.2) sont employées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (III.2.a) soit satisfaite. Une fois le MPP est atteint, l'algorithme continue à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement de la valeur du courant soit détecté. Ce dernier résulte d'un changement au niveau de l'ensoleillement. Quand l'ensoleillement augmente, le MPP se déplace vers la droite de la tension de fonctionnement. Pour compenser ce mouvement du MPP, le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement. La même chose pour le cas contraire, quand l'ensoleillement diminue, le MPPT doit diminuer cette dernière comme il est indiqué à la figure (III.6).

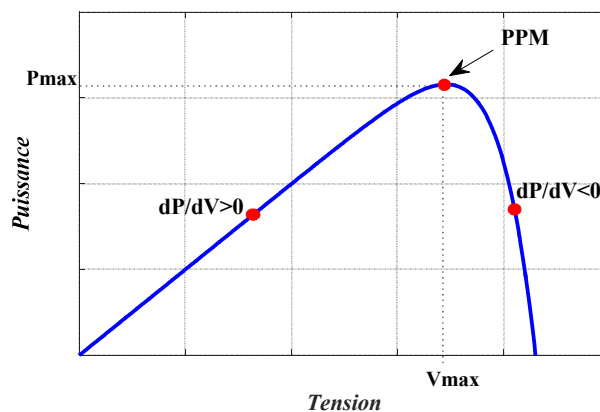


Fig.III.6.Caractéristique $P(V)$ d'un GPV, Variation de dP/dV

L'organigramme de l'algorithme (INC) est montré sur la figure (III.7). Après la mesure de I_{pv} et V_{pv} du GPV, on calcule dI et dV . Si $dV=0$ et $dI=0$, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le MPPT fonctionne toujours au MPP. Si $dV=0$ et $\Delta I > 0$, alors l'ensoleillement a augmenté. Ceci exige d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver de nouveau le MPP. Contrairement si $dI < 0$, l'ensoleillement a diminué tout en exigeant à l'algorithme de diminuer la tension de fonctionnement. Si le changement de la tension n'est pas nul, les rapports dans les équations (III.2-b) et (III.2-c) peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le MPP. Si $(dI/dV) > (-I/V)$ (c'est-à-dire le rapport $(dP/dV) > 0$), donc le point de fonctionnement est à gauche du MPP. Ainsi, la tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le MPP. De même, si $(dI/dV) < (-I/V)$ (c'est-à-dire le rapport $(dP/dV) < 0$), le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP tout en signifiant que la tension doit être réduite pour atteindre le MPP.

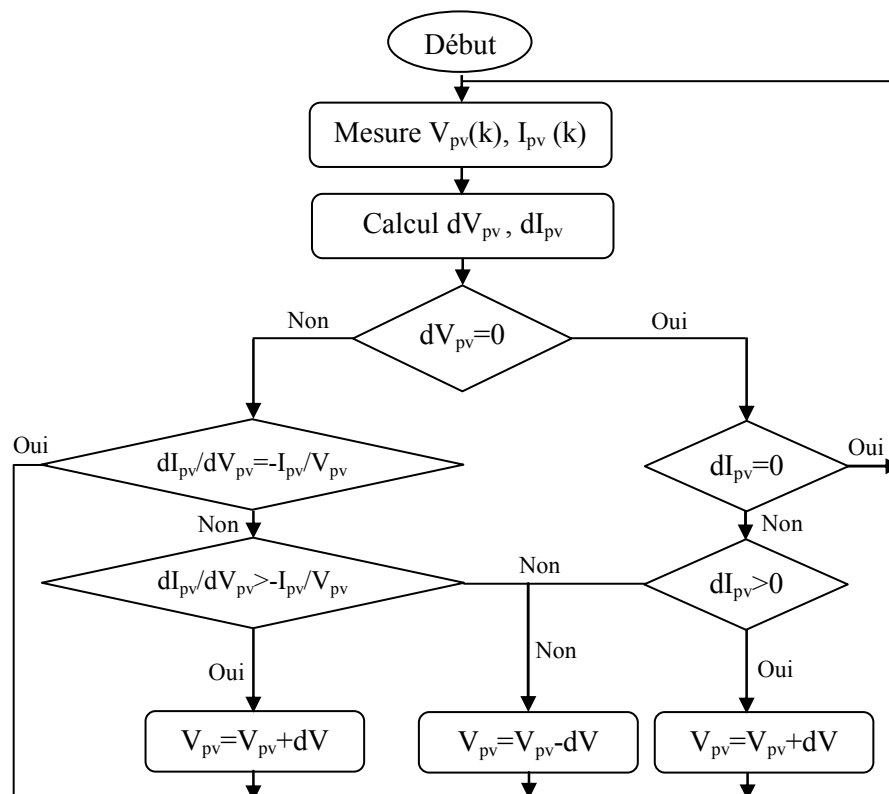


Fig.III.7.Organigramme de l'algorithme INC

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme "P&O" puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le MPP, et il peut aussi déterminer l'atteinte du MPP. De plus, dans les conditions de

changement rapide de l'ensoleillement, l'algorithme ne devrait pas prendre la mauvaise direction comme c'est le cas avec l'algorithme "P&O", et d'ailleurs, il n'oscille autour du MPP une fois qu'il l'atteint.

III.3.3. Optimisation par la méthode mode glissant (MG)

La théorie des systèmes à structure variable a fait l'objet de multiples études depuis les années cinquante dont les premiers travaux sont ceux d'Anosov [99], de Tzypkin [100] et d'Emelyanov [101] et [102] dans l'ex URSS. Les recherches ont connu un nouvel essor au début des années soixante grâce à la résolution de l'équation différentielle au second membre, suivi des recherches de Emelyanov [103], d'Itkis [104] et d'Utkin [105] qui a introduit la théorie des modes glissants. La commande par MG est un cas particulier de la théorie des systèmes à structure variable [106]. La communauté de l'automatisation a rapidement pris conscience de l'intérêt de cette approche qui allie la simplicité de la synthèse et la robustesse [107, 108, 109]. Cette technique de commande et d'observation a reçu un intérêt sans cesse croissant du fait :

- de leur simplicité relative d'élaboration ;
- de leur robustesse vis-à-vis de certaines incertitudes paramétriques et perturbations ;
- de la large gamme de leurs applications dans des domaines très variés tels que la robotique, la mécanique ou l'électrotechnique [110, 111, 112, 113, 114, 115, 116]

La technique consiste à définir une surface dite de glissement, et une loi de commande obtenue de manière à conduire et à contraindre le système à rester au voisinage d'une surface dite surface de commutation [117, 118, 119].

III.3.3.1. Principe de la commande par mode glissant

Le principe de cette technique est de contraindre le système à atteindre et rester sur une surface donnée. La surface considérée est alors désignée comme étant la surface de glissement ou de commutation. Le comportement dynamique résultant, appelé régime glissant idéal, est complètement déterminé par les paramètres et les équations définissant la surface. L'avantage d'obtenir un tel comportement est double : d'un côté, nous avons une réduction de l'ordre du système, et de l'autre, le régime glissant est insensible aux perturbations intervenant dans les mêmes directions que les entrées [120, 122, 123]. La trajectoire vers la surface de glissement dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [124, 125, 122, 123] :

- **Le mode de convergence -MC-**: c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x,y) = 0$ (dans le cas de deux dimensions). Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- **Le mode de glissement -MG-** : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x,y) = 0$.
- **Le mode du régime permanent -MRP-** : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [126, 124, 123, 122].

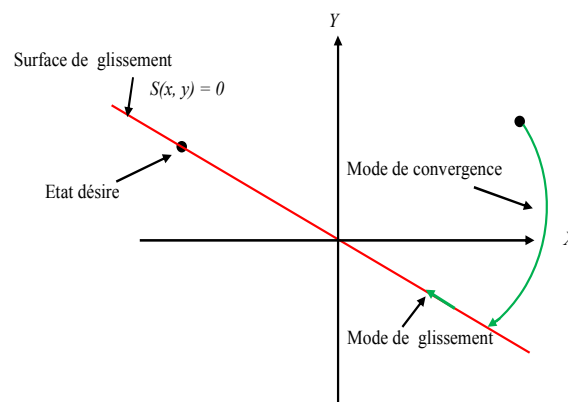


Fig.III.8. Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

III.3.3.2. Conception de la commande par mode de glissement

La conception de la commande peut se faire en trois étapes principales [127, 128, 121, 122]. Il faut d'abord définir le choix de la surface telle que la dynamique du système soit stable, établissement des conditions d'existence et ensuite concevoir une commande permettant le suivi de la surface de glissement.

III.3.3.3. Choix de la surface de glissement

La surface de glissement peut être une expression linéaire ou non linéaire [129]. Ensuite de trajectoire, la surface devra être choisie de façon à garantir la stabilité du point d'équilibre $e(x) = 0$ ($e(x)$ représente l'erreur d'état $e(x) = x_{ref} - x$). C'est à dire que le choix de la surface doit assurer la stabilité du système en boucle fermée [121].

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x} = A(x, t)x + B(x, t)u \quad (III.3)$$

Où $x = [x^1, x^2, \dots, x^n]^T \in R^n$ est le vecteur d'état ; $u \in R$ est le vecteur de commande qui commute entre deux valeurs (u^- , u^+) selon le signe de la surface de commutation $s(x)$:

$$u(x, t) = \begin{cases} u^+(x, t) & \text{si } s(x) > 0 \\ u^-(x, t) & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$u^+(x, t)$ et $u^-(x, t)$ étant des fonctions continues. $S = \{x \in R^n : s(x) = 0\}$ est une variété de glissement qui divise l'espace d'état en deux parties disjointes $s(x) > 0$ et $s(x) < 0$. Cette logique de commutation a pour but de contraindre la trajectoire à suivre la surface de commutation. On dit alors que la trajectoire du système glisse le long de la surface de commutation $s(x) = 0$ et on parle alors du phénomène de glissement.

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x_{ref} , nous choisissons la surface de glissement en fonction de l'erreur $e(x)$ et r comme suit :

$$s(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x\right)^{r-1} \cdot e(x) \quad (\text{III.5})$$

r : est un degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande

Afin de maintenir la surface $S(x)$ égale à zéro, il faut que l'erreur $e(x)$ soit égale à zéro pour un choix convenable du paramètre λ_x [130, 127, 126].

III.3.3.4. Existence du mode de glissement

L'étude de l'existence du MG, comme l'étude de la stabilité d'un point d'équilibre, est basée sur la méthode de Lyapunov. Afin de garantir l'attractivité de la surface $S(x, t) = 0$, on considère une fonction de Lyapunov V définie positive ($V(x) > 0$) dont la dérivée par rapport au temps le long des trajectoires du système en boucle fermée sera définie négative $\dot{V}(x) < 0$. Nous définissons la fonction de LYAPUNOV comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{III.6})$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{III.7})$$

L'équation (III.6) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du

système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie [131, 130].

III.3.3.5. Calcul de la commande u

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface). Pour cette raison la surface est déterminée indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement. L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés.

De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties : une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre la stabilisante (U_n).

$$U = U_{eq} + U_n \quad (III.8)$$

U_{eq} correspond donc à la commande proposée par FILIPOV. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $s(x)=0$. La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{s}(x) = 0$. Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander. Elle peut être aussi interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs U_{min} et U_{max} . U_n la commande discrète est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (III.9)$$

En remplaçant (III.3) et (III.8) dans (III.9), nous trouvons :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot (A(x, t) + B(x, t) \cdot U_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x, t) U_n \quad (III.10)$$

La surface $S(x)$ est nulle durant le mode de glissement et le régime permanent. D'où, nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot A(x, t) \quad (III.11)$$

Pour U_{eq} différente de zéro, il faut que $\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \neq 0$

En remplaçant (III.11) dans (III.10), la dérivée de la surface sera:

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \cdot U_n \quad (III.12)$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (III.6) devient :

$$\dot{V}(x) = S(x, t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) u_{eq} \quad (III.13)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(x, t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)$. La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais (figure III.9).

$$U_n = K \cdot \text{sign}(S(x, t)) \quad (III.14)$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)$

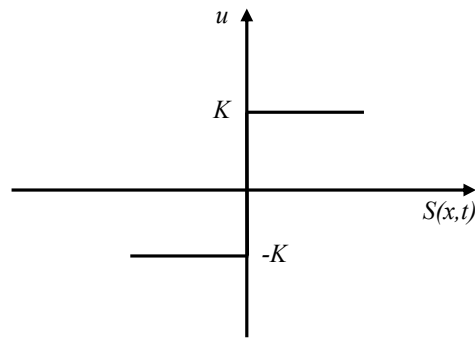


Fig.III.9. Représentation de la commande discontinue

III.3.3.6. Régime de glissement réel

Les commandes non linéaires sont de nature continue et sont difficiles à exprimer en échantillonné, plus particulièrement, la commande par mode de glissement. Ceci est dû aux hypothèses de conception qui supposent que la fréquence de commutation est infinie. Dans les SSV échantillonnés, l'état du système converge vers la surface sans y rester. Il se produit donc

un mouvement de zigzag dans une bande au voisinage de la surface de commutation (figure III.10) [127, 126]. Cette bande est le siège du mode de glissement réel qui est appelé quasi-mode de glissement ou plus précisément pseudo mode de glissement. Ce mouvement est dû au fait que l'action de la commande n'est activée qu'aux instants d'échantillonnage et est maintenue constante entre ces instants. De plus, les grandeurs mesurées ou calculées à l'instant t_k ne sont disponibles qu'à l'instant t_{k+1} .

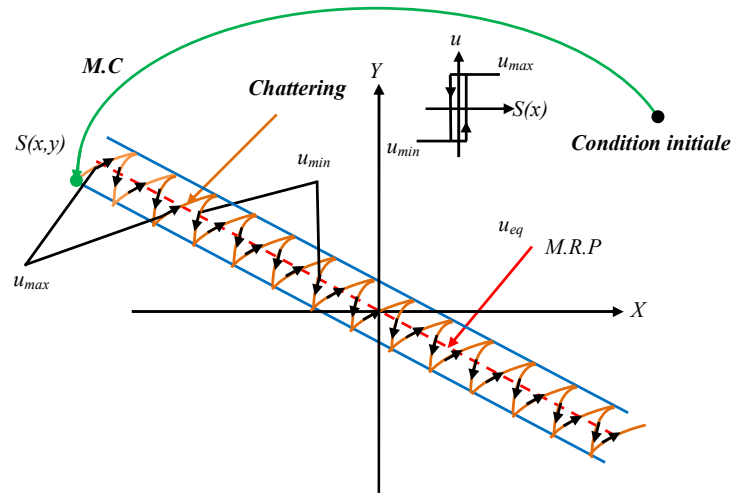


Fig.III.10. Régime glissant réel

III.3.3.7. Phénomène de Réticence (Chattering)

Dans la pratique, un régime glissant idéal n'existe pas car la fréquence de commutation des organes de commande a une limite finie. Autrement dit, il n'existe aucun organe de commutation pouvant commuter à une fréquence infinie (en effet cet organe devrait délivrer une énergie infinie). Le caractère discontinu de la commande engendre un comportement dynamique particulier autour d'une couche limite de la surface de glissement qui est communément appelé chattering ou phénomène de réticence (figure.III.11).

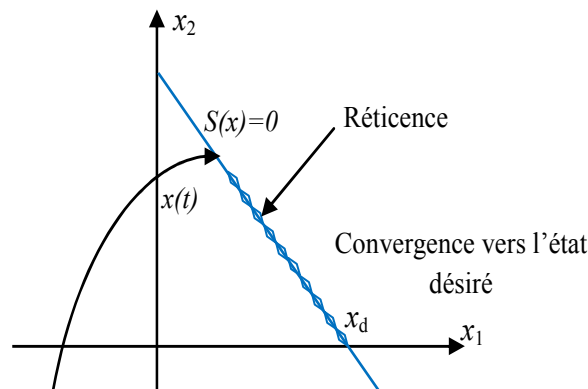


Fig.III.11. Phénomène de réticence

Cette oscillation au voisinage de la surface est due à l'imperfection des éléments de commutation ou des limites technologiques et physiques, telles que les retards au niveau des commutations ou des comportements avec hystérésis, qui peuvent exciter les dynamiques négligées (non modélisées) à haute fréquence. La réticence peut provoquer une détérioration anticipée de l'organe de commande. Pour remédier à ce problème de nombreux algorithmes à structure variable ont été développés. On peut citer la commande continue dans une bande de surface [129], fuzzy sliding mode, la commande avec correction intégrale en régime permanent [132,133,134], l'utilisation d'un observateur pour estimer la commande équivalente et les solutions par limitation de la condition de glissement [135, 121].

- Solution de couche limite

Cette solution connue aussi par le nom Boundary layer solution, a été proposée par Slotine et Sastry en 1983 [136] et Slotine en 1984 [137]. Elle consiste à effectuer une approximation continue des discontinuités présentes dans la loi de commande au voisinage de la surface de glissement.

Dans le but de réduire ces oscillations, nous proposons une des solutions qui repose sur la variation de la commande $U_n = -k \text{sign } S(t)$ en fonction de la distance entre la trajectoire de la variation à régler et la surface de glissement. Il s'agit d'encadrer la surface par une bande avec un ou deux seuils. Le choix des seuils est directement lié à la précision en boucle fermée.

La commande varie entre les deux valeurs limites ($\pm k$) suivant une pente entre les deux seuils (figure.III.12.a), ou dans le cas d'un seul seuil par une pente qui passe par l'origine du plan $(S(x,t), u)$ (figure.III.12.b), [127, 124].

▪ **Commande douce à deux seuils**

$$u_n = \begin{cases} 0 & \text{si } |S(x, t)| < \varepsilon_1 \\ |K| \cdot \frac{S(x, t) - \varepsilon_1 \cdot \text{sign}(S(x, t))}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & \text{si } \varepsilon_1 < |S(x, t)| < \varepsilon_2 \\ |K| \cdot \text{sign}(S(x, t)) & \text{si } |S(x, t)| > \varepsilon_2 \end{cases} \quad \text{(III.15)}$$

▪ **Commande douce à un seul seuil**

$$\text{(III.16)} \quad u_n = \begin{cases} |K| \cdot \frac{S(x, t)}{\varepsilon} & \text{si } |S(x, t)| \leq \varepsilon \\ |K| \cdot \text{sign}(S(x, t)) & \text{si } |S(x, t)| > \varepsilon \end{cases}$$

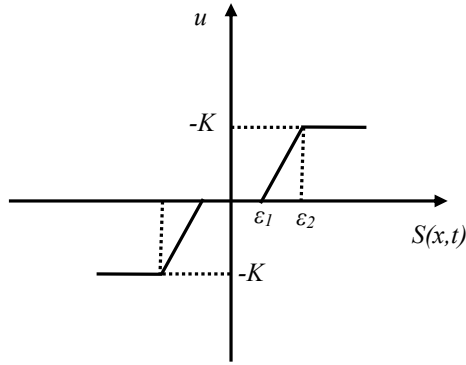


Fig.III.12.a. Commande à deux seuils

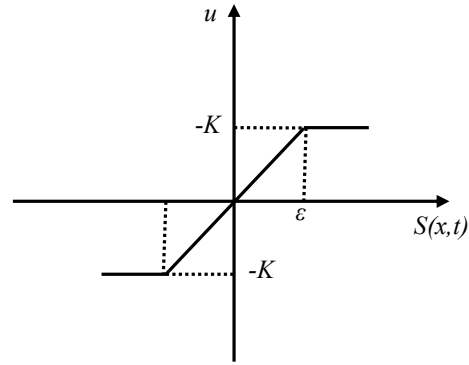


Fig.III.12.b. Commande à un seul seuil

Quel que soit la méthode utilisée pour réduire le phénomène de réticence, plus le nombre de seuils est grand, plus les effets du phénomène de réticence sont atténués. De ce fait, il en résulte un écart statique qui est en fonction du nombre de seuils utilisés. Le nombre de seuils influence également sur la robustesse de la commande vis-à-vis des perturbations et des imprécisions des paramètres du modèle [127, 125, 124].

- Solution par des modes glissants d'ordre supérieur

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour palier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans l'expression de la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures, ce qui a le mérite de réduire le Chattering [125, 124].

III.3.3.8. Application du mode glissant au système PV

La puissance de sortie du GPV :

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot i_{pv} \tag{III.17}$$

Pour une puissance de GPV maximal, on a $\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = 0$

La surface de glissement est définie par $S = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}}$

Tel que $\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = \frac{\partial (V_{pv} \cdot i_{pv})}{\partial V_{pv}}$

Donc:

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = \frac{\partial i_{pv}}{\partial V_{pv}} V_{pv} + i_{pv} = 0 \tag{III.18}$$

La structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre la stabilisation (U_n).

Avec:

$$U(t) = U_{eq}(t) + U_n(t) \quad (III.19)$$

U_n est défini selon le signe de la surface de glissement :

$$U_n = \begin{cases} 0 & S \geq 0 \\ 1 & S < 0 \end{cases} \quad (III.20)$$

La dérivée de la surface est :

$$S(x) = \frac{\partial S}{\partial x^T} f(x) \quad (III.21)$$

$$\dot{S}(x) = -\frac{\partial S}{\partial x^T} \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x^T} f(x) + \frac{\partial S}{\partial x^T} g(x) U_{eq} \quad (III.22)$$

Pour définir la commande U_{eq} , la dérivée de la surface doit être égale à zéro $\dot{S}(x) = 0$

$$U_{eq} = -\frac{\frac{\partial S}{\partial x^T} f(x)}{\frac{\partial S}{\partial x^T} g(x)} = -\frac{L_f S(x)}{L_g S(x)} \quad (III.23)$$

Avec :

$$L_f h_2 = \frac{\partial h_2}{\partial x^T} f(x) = \left(\frac{\partial^2 i_{pv}}{\partial^2 V_{pv}} V_{pv} + 2 \frac{\partial i_{pv}}{\partial V_{pv}} \right) \frac{i_{pv}}{C} \quad (III.24)$$

$$L_g h_2 = \frac{\partial h_2}{\partial x^T} g(x) = \left(\frac{\partial^2 i_{pv}}{\partial^2 V_{pv}} V_{pv} + 2 \frac{\partial i_{pv}}{\partial V_{pv}} \right) * \left(-\frac{i_L}{C} \right) \quad (III.25)$$

D'après le système on a :

$$S(x) = C \frac{\partial V_{pv}}{\partial t} = I_{pv} - u I_L \quad (III.26)$$

Soit :

$$S(x) = I_{pv} - (U_{eq} + U_n) \cdot I_L \quad (III.27)$$

En substituant les équations (III.24) et (III.25) à l'équation (III.23), la commande U_{eq} sera :

$$U_{eq} = -\frac{i_{pv}}{i_L} \quad (III.28)$$

L'équation (III.13) peut être écrite comme :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (III.29)$$

$$\text{Avec : } \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{pv} \\ \frac{\partial i_L}{\partial t} \\ \dot{V} \end{bmatrix} f(x) = \begin{bmatrix} \frac{i_{pv}}{C_{pv}} \\ \frac{V}{L} \\ -\frac{i_L}{C} - \frac{V}{RC} \end{bmatrix} g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{i_L}{C_{pv}} \\ \frac{V_{pv} - V}{L} \\ \frac{i_L}{C} \end{bmatrix}$$

En mettant l'équation (III.28) dans l'expression (III.19), le modèle final sera :

$$U = -\frac{i_{pv}}{i_L} + K_u \operatorname{sgn}(S(i_{pv})) \quad (III.30)$$

- Conditions de convergence et d'existence

La stabilité de Lyapunov est l'un des critères utilisés pour étudier la convergence vers la surface de glissement.

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) > 0 \quad (III.31)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S \frac{dS}{dt} = \frac{\partial P_{PV}}{\partial t} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} \right) \quad (III.32)$$

En remplaçant l'équation (II.3) du chapitre II dans (III.18), on obtient l'équation de S :

$$S = (I_L + I_0) - I_0 \left(1 + \frac{qV_{PV}}{\gamma.K.T_c} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{dV_{PV}}{\gamma.K.T_c}\right) \right] \quad (III.33)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dV_{PV}} \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} = -I_0 \left(\frac{2q}{\gamma.K.T_c} + \frac{qV_{PV}}{\gamma.K.T_c} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{dV_{PV}}{\gamma.K.T_c}\right) \right] \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (III.34)$$

La stabilité du système est résumée dans le tableau 1.

Tableau III.1 : Vérification des conditions de convergence

	S	dS
$\frac{dV_{pv}}{dt} < 0$	Négative	Positif
$\frac{dV_{pv}}{dt} > 0$	Positif	Négative
$S \cdot \frac{dS}{dt}$	Négative	Négative

La figure (III.13) montre la configuration proposée pour l'optimisation du GPV. Le contrôleur MPPT suit le point maximale de puissance utilisant la tension et le courant du GPV en commandant le courant d'inductance à suivre le courant de référence par l'intermédiaire de la surface de glissement.

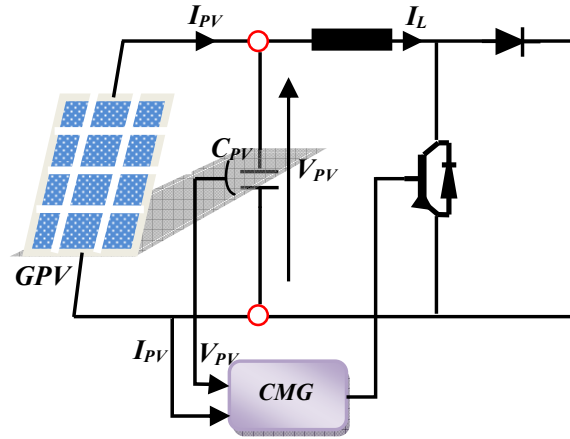


Fig.III.13. Configuration du contrôleur du système PV

III.3.4. Synthèse de fonctionnement du système

L'algorithme de recherche MPPT se fera de la façon suivante :

- Déterminer la caractéristique $I(V)$ du GPV et le point de puissance maximale (V_{MP} , I_{MP} , P_{MP}), pour un éclairement et une température donnés.
- Déterminer la vitesse de référence optimale de la machine en fonction des caractéristiques du GPV, qui sont elle-même fonction de l'éclairement et de la température et ce, à travers la procédure suivante :

On a :

$$\begin{cases} P_{pompe} = k_p \cdot \omega^3 \\ P_{moteur} = \frac{P_{pompe}}{\eta_{pompe}} \end{cases} \quad (III.35)$$

La puissance de moteur peut être déterminée en fonction du rendement comme suit :

$$P_{moteur} = \eta_{moteur} \cdot P_{onduleur} \quad (III.36)$$

La puissance de l'onduleur peut être déterminée en fonction du rendement comme suit :

$$P_{onduleur} = \eta_{onduleur} \cdot P_{convertisseur} \quad (III.37)$$

La puissance du convertisseur peut être déterminée en fonction du rendement comme suit :

$$P_{convertisseur} = \eta_{convertisseur} \cdot P_{pv} \quad (III.38)$$

On déduit que :

$$k_p \cdot \omega^3 = \eta_{pompe} \cdot \eta_{moteur} \cdot \eta_{onduleur} \cdot \eta_{convertisseur} \cdot I_{pv} \cdot V_{pv} \quad (III.39)$$

La vitesse optimale en fonction des valeurs maximales du courant et de la tension du GPV est :

$$\omega_{opt} = \sqrt[3]{\frac{\eta_{pompe} \cdot \eta_{moteur} \cdot \eta_{onduleur} \cdot \eta_{convertisseur} \cdot I_{pv} \cdot V_{pv}}{k_p}} \quad (III.40)$$

Avec :

η_{moteur} , $\eta_{onduleur}$, $\eta_{convertisseur}$, η_{pompe} (respectivement le rendement du moteur, celui de l'onduleur, celui du convertisseur et celui de la pompe). Voir annexe

III.3.5. Résultats de simulation

Pour tester et comparer les algorithmes MPPT (P&O, INC et MG). Des radiations solaires variables ont été appliquées à chaque système PV, répartis sur trois intervalles, tout en gardant la température constante égale à 25° comme indiqué sur la figure (III.14). Nous évaluons ces algorithmes à partir d'aspects : rapidité, précision et ondulation. On a pris t=1s pour montrer le régime transitoire.

- De 0 à 0.3 secondes, le rayonnement solaire est égal à 1000W/m².
- De 0.3 à 0.6 secondes, le rayonnement solaire est égal à 300W/m².
- De 0.6 à 1 secondes, le rayonnement solaire est égal à 500W/m².

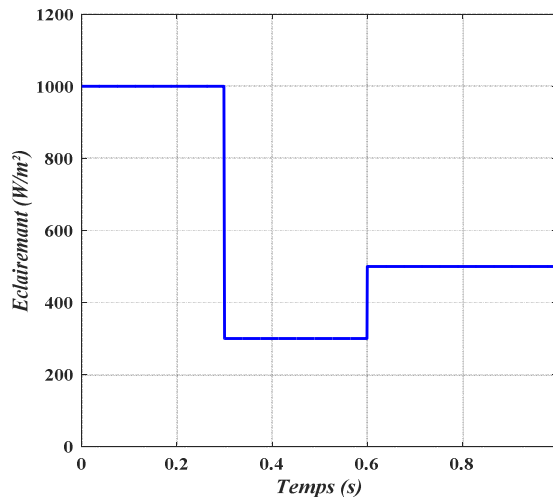
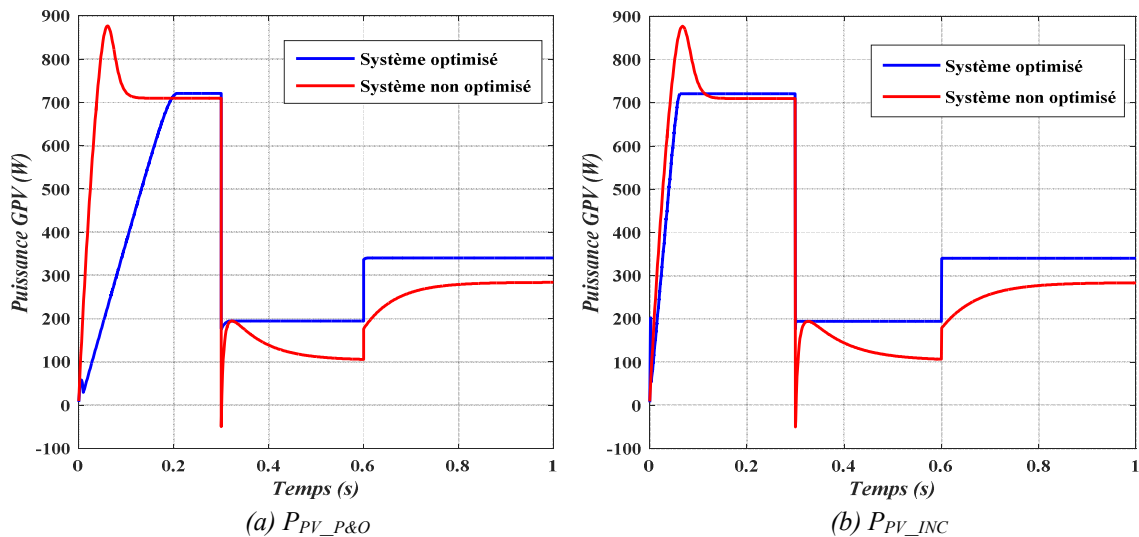


Fig. III.14. Profil de variation d'éclairement

La figure (III.15.c) montre que la puissance de sortie du GPV varie avec l'éclairement et que les trois algorithmes donnent presque le même type de courbe de sortie. Elle montre qu'il existe un gain entre le mode du couplage direct et le couplage optimisé selon les trois niveaux d'éclairement appliqués.

Au premier palier de l'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$, l'optimisation n'a aucun effet sur la puissance du GPV, la puissance est d'environ 720 W (puissance nominale). Une diminution d'éclairement $G=300 \text{ W/m}^2$, (passage de nuages par exemple), ferait chuter la puissance d'environ 100 W pour le couplage direct. L'optimisation augmenterait la valeur de la puissance maximale environ 87% pour atteindre 187 W correspondant à une tension optimale de 180 V et un courant optimal de 1.03 A respectivement (Fig.III.16.a et Fig.III.17.a). Une autre augmentation au niveau d'éclairement de 500 W/m^2 , donne une puissance électrique de 284 W pour le couplage direct. L'optimisation augmenterait la valeur de la puissance maximale d'environ 19% pour atteindre 340 W correspondrait à une tension optimale de 196.5 V et un courant optimal de 1.73 A respectivement (Fig.III.16.a et Fig.III.17.a). L'effet de l'optimisation se fait sentir aux bas éclairagements. L'optimisation a forcé le GPV à fonctionner à son MPP en augmentant sa valeur de puissance par rapport au couplage direct.



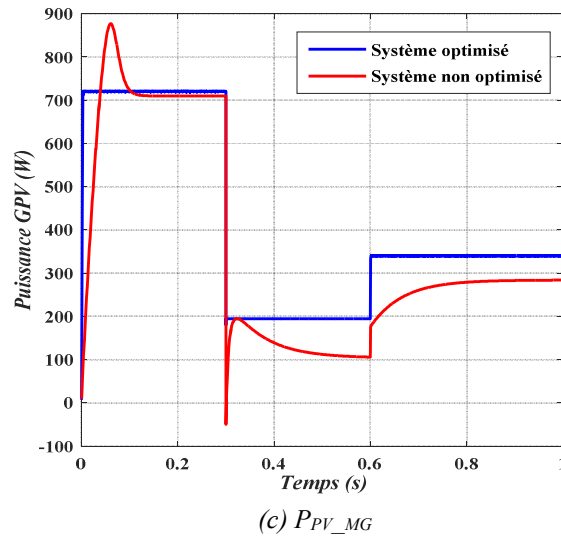


Fig. III.15. Résultats de simulation de la puissance du GPV avant et après optimisation

Les résultats de simulations montrent que le contrôle MPPT avec P&O, INC et le MG force le système à fonctionner de manière optimale à tout moment autour du MPP.

Les figures (III.16) à (III.19) montrent le courant, la tension, la puissance du GPV et le rapport cyclique en fonction du temps optimisés par les algorithmes P&O, INC et le MG respectivement avec le zoom de chaque grandeur.

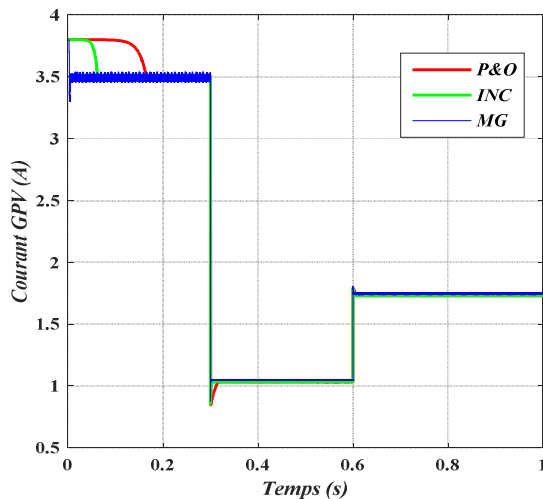


Fig.III.16.a. Courants GPV (t)

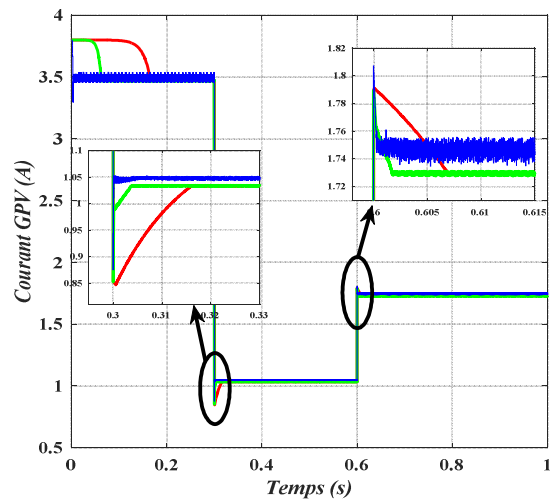


Fig.III.16.b. Zoom des courants GPV (t)

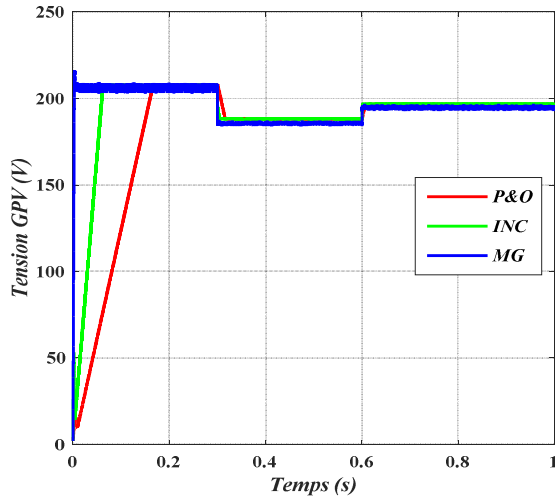


Fig. III.17.a. Tensions GPV (t)

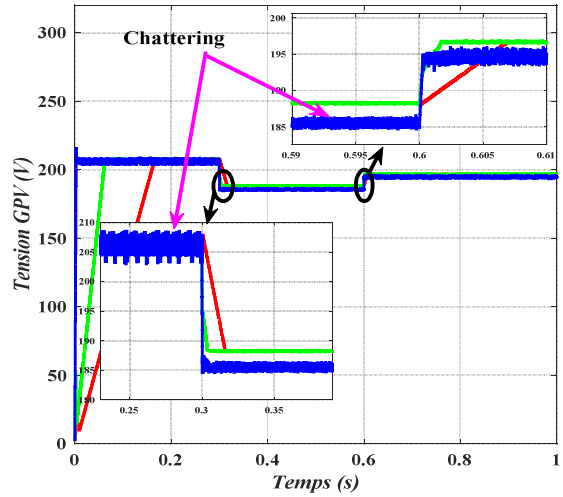


Fig. III.17.b. Zoom des tensions GPV (t)

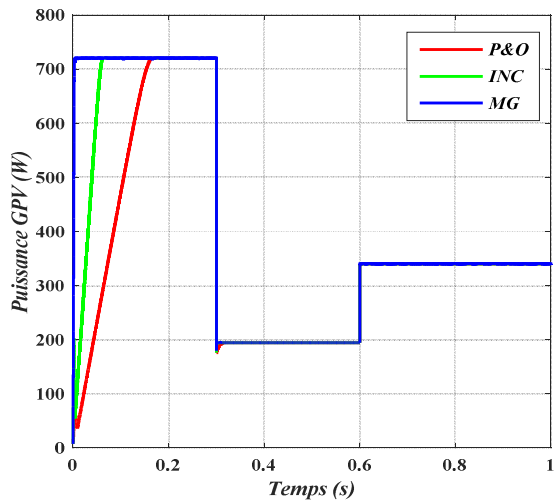


Fig. III.18.a. Puissances GPV (t)

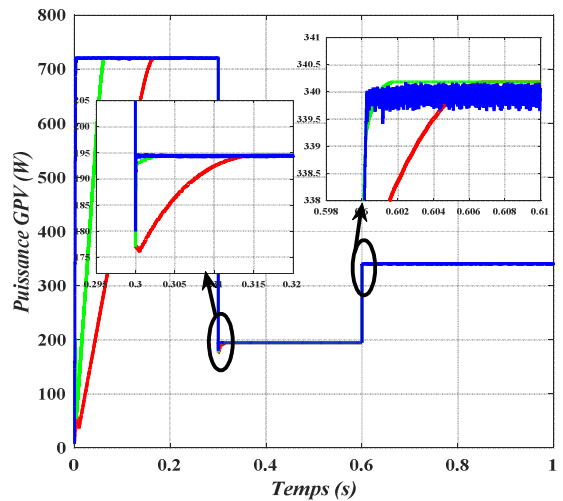


Fig. III.18.b. Zoom des Puissances GPV (t)

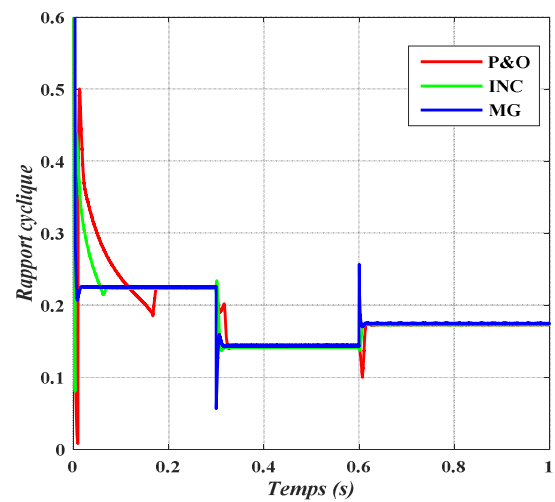


Fig. III.19.a. Rapport cyclique D(t)

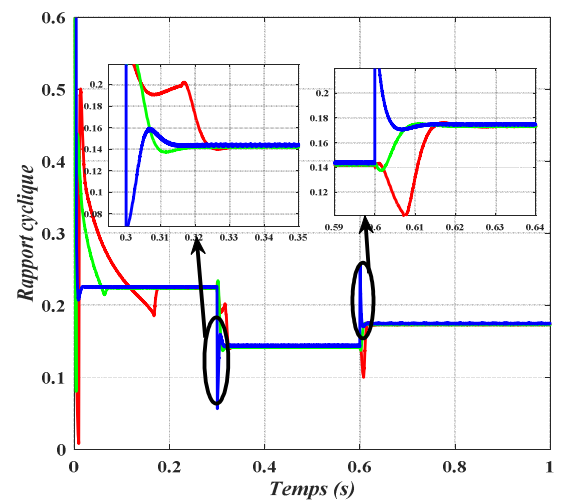


Fig. III.19.b. Zoom du rapport cyclique D(t)

Les résultats montrent que tous les trois algorithmes sont appropriés aux systèmes photovoltaïques lors des variations d'éclairement rapide. En termes de temps de réponse, les figures montrent que la méthode de recherche du MPP par le MG est meilleure que les autres méthodes (P&O et INC), temps de réponse presque nul, 0.1 s pour (INC) et 0.18 s pour (P&O). Mais en terme d'ondulation, nous notons que la méthode de recherche du MPP par le MG a plus d'ondulation que la méthode P&O et INC, et cela à cause du phénomène de chattering de MG.

On remarque que le rapport cyclique du hacheur, ajusté par la technique de MG contient des pics lors des variations brusques de l'éclairement qui influent directement sur les différentes grandeurs avec un temps de réponse presque nul par rapport (P&O) et (INC). On peut déduire que la stabilité de suivi et la vitesse de réponse de la technique MPPT avec le MG est meilleure que celle de l'INC et P&O.

Ce qui suit, c'est l'évolution des résultats du système de pompage PV optimisé par (P&O), (INC) et le (MG) et guidé par la MCC, MSAP et MAS respectivement répartis sur trois intervalles :

- De 0 à 3 secondes, le rayonnement solaire est égal à 1000W/m^2 .
- De 3 à 6 secondes, le rayonnement solaire est égal à 300W/m^2 .
- De 6 à 10 secondes, le rayonnement solaire est égal à 500W/m^2 .

La figure (III.20) montre l'évolution des résultats du système de pompage PV guidé par la MCC. Pour le premier intervalle où $G=1000\text{ W/m}^2$, aucune différence n'est à noter entre les grandeurs mesurées et les valeurs nominales; la vitesse est 183.3 rad / s avec un courant d'armature de 5.5 A et un couple de 4 Nm . Une diminution d'éclairement $G=300\text{ W/m}^2$, (passage de nuages par exemple), la vitesse prend sa nouvelle valeur 117 rad / s , le courant d'induit $2,2\text{ A}$ et le couple $1,6\text{ Nm}$. Pour une autre augmentation brusque d'éclairement $G=500\text{ W/m}^2$, la vitesse augmente à 141 rad/s , le courant d'induit est de 3.2 A et le couple 2.5 Nm .

La figure (III.21) montre l'évolution des résultats du système de pompage PV guidé par MSAP. Pour le premier intervalle où $G=1000\text{ W/m}^2$, aucune différence n'est notée entre les grandeurs mesurées et les valeurs nominales; la vitesse est 188.5 rad/s , le couple électromagnétique, est l'image du courant quadratique, mais le courant direct est nul quel que soit la variation de consigne de vitesse (principe de la commande vectorielle).

La figure (III.22) montre l'évolution des résultats du système de pompage PV guidé par MAS. Pour le premier intervalle où $G=1000\text{ W/m}^2$, aucune différence n'est notée entre les grandeurs

mesurées et les valeurs nominales; la vitesse est de 188.5 rad / s, le couple électromagnétique, est l'image du courant quadratique, mais le courant direct reste constant quel que soit la variation de consigne de vitesse (principe de commande vectorielle). Le flux rotorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature nulle.

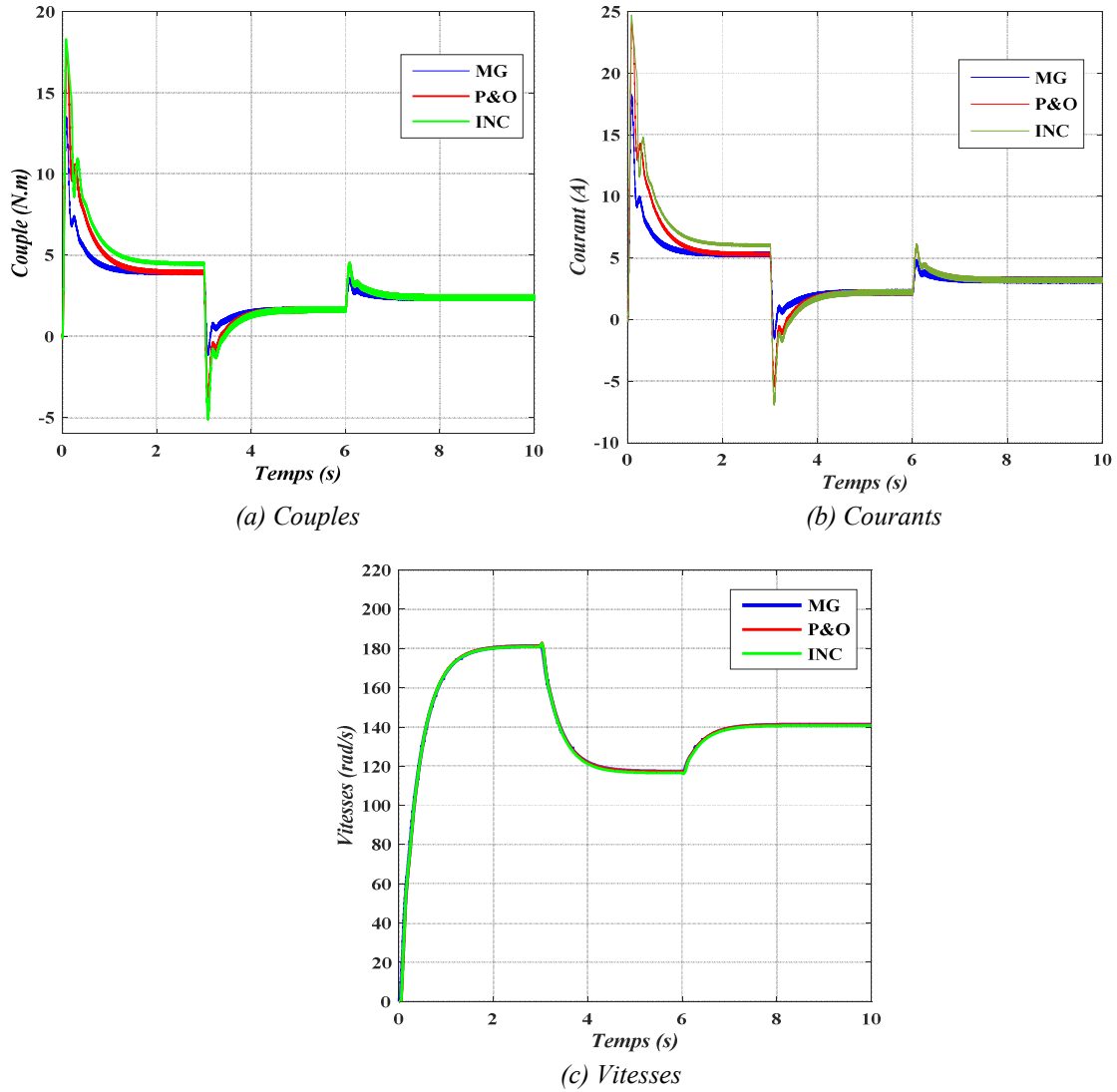


Fig.III.20. Résultats de simulation du système optimisé par les algorithmes P&O, INC et le MG et entraîné par la MCC

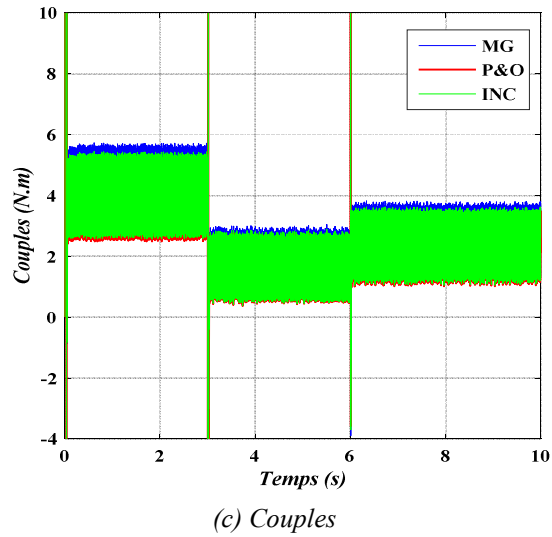
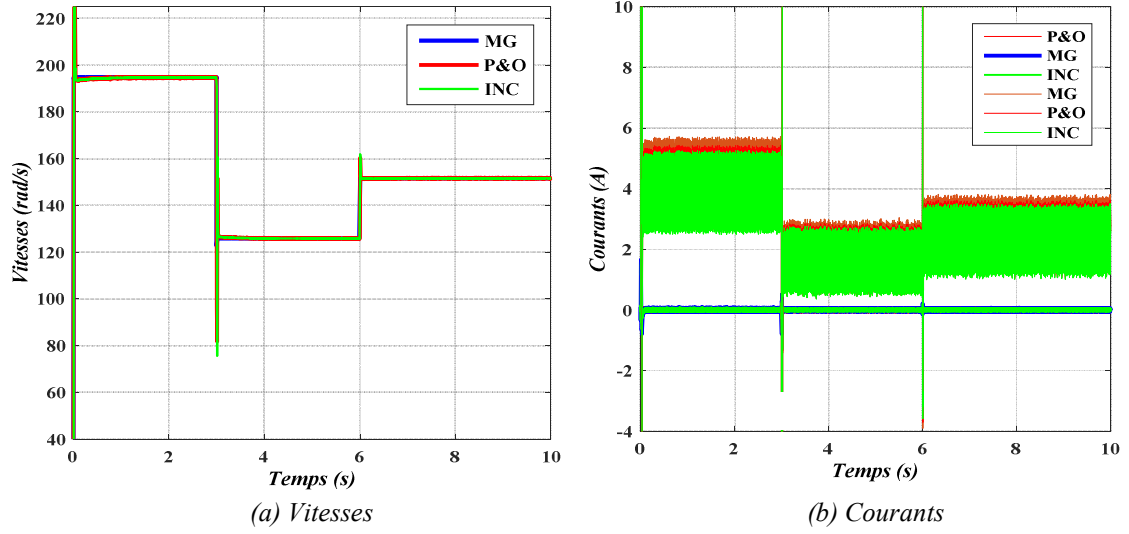
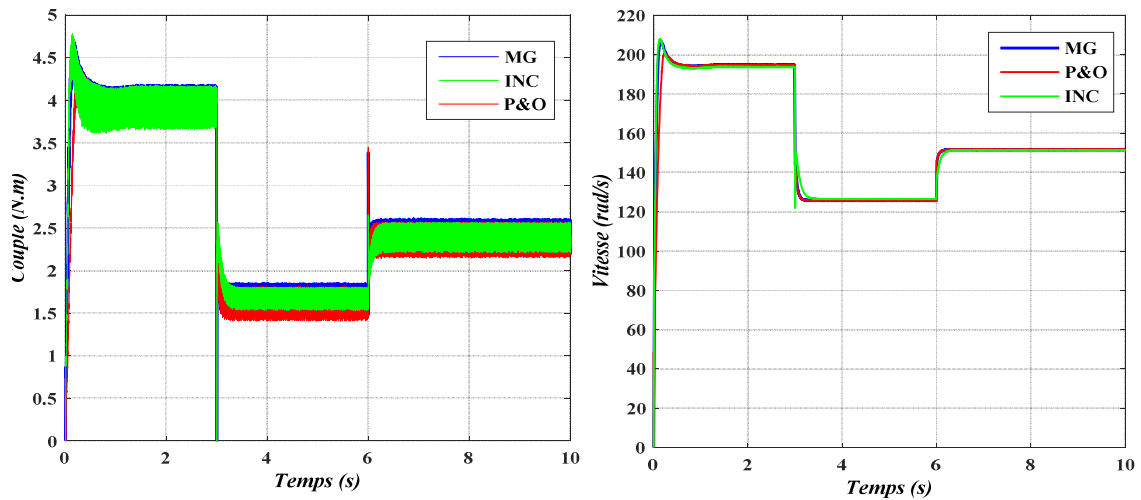


Fig.III.21. Résultats de simulation du système optimisé par les algorithmes P&O, INC et le MG et entraîné par la MSAP



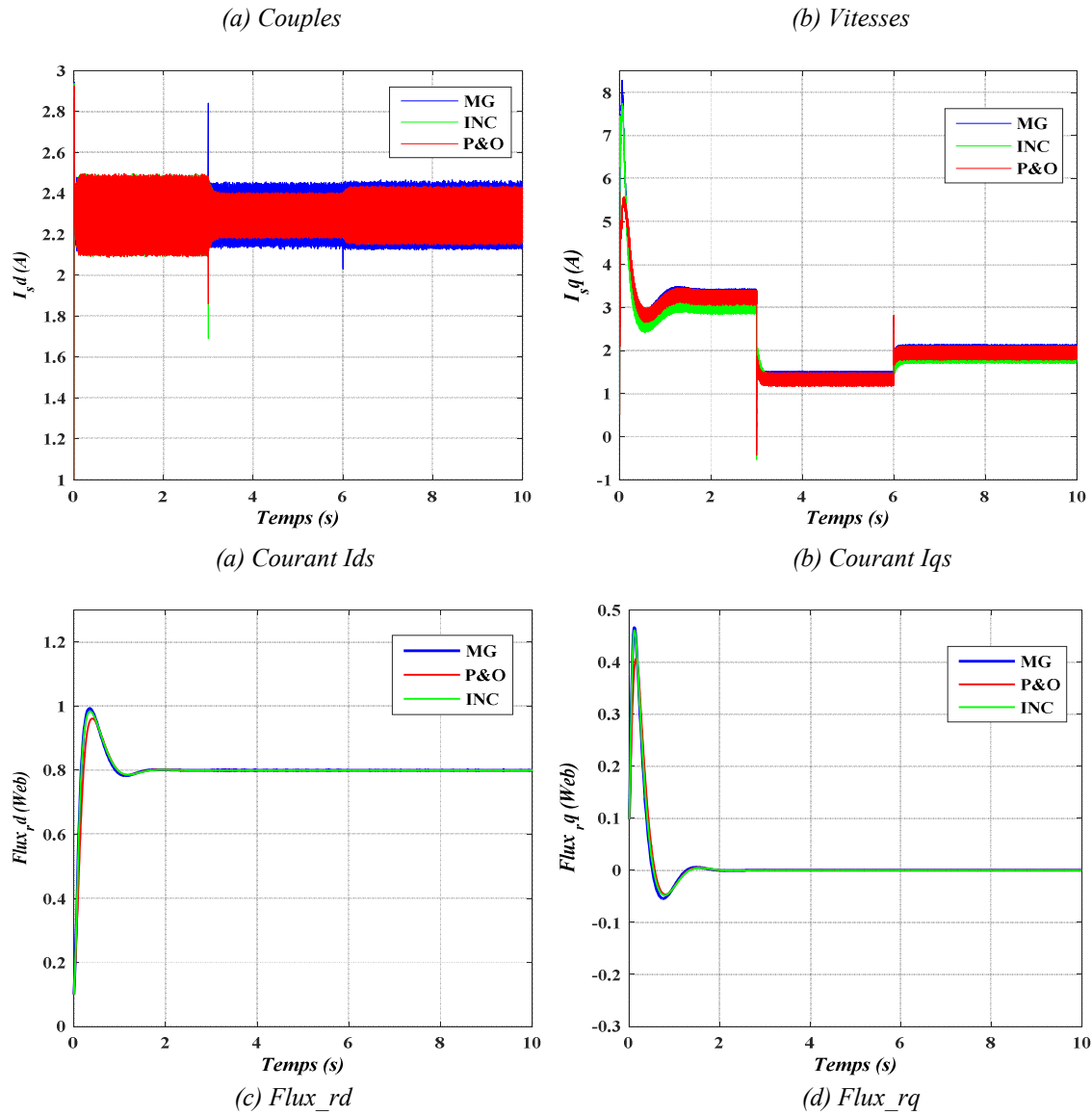


Fig.III.22. Résultats de simulations du système optimisé par les algorithmes P&O, INC et MG et entraîné par la MAS

III.3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une comparaison entre trois contrôleurs MPPT (perturbation et d'observation (P&O), Incrémentale conduction (INC) et le contrôleur par mode glissant (MG)), pour trois systèmes de pompage photovoltaïques différents et sous un éclairage solaire variables. L'utilisation de ces contrôleurs MPPT permet d'économiser environ 15% de la production d'énergie. Cette comparaison consiste à étudier la performance de ces contrôleurs MPPT (temps de réponse et ondulation) autour du point de puissance optimal. Selon les critères sélectionnés, nous avons trouvé que le contrôle par mode glissant est meilleur que les

deux autres algorithmes en termes de rapidité. Mais en terme d'ondulation, nous notons que la méthode de recherche du MPP par le CMG a plus d'ondulation que la méthode P&O et INC, et cela est dû au phénomène de chattering. Pour cela on introduira au chapitre suivant la méthode Floue_PSO pour corriger ce problème de chattering.

CHAPITRE IV
OPTIMISATION DU SYSTEME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAIQUE PAR
LA LOGIQUE FLOUE ET LA LOGIQUE FLOUE
OPTIMISEE PAR LE PSO

IV.1. Introduction

Les méthodes conventionnelles de réglage sont basées sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de la fonction de transfert ou d'équations d'état. Malheureusement, celles-ci ne sont pas toujours disponibles. La majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler automatiquement. Cette difficulté provient de : leur non-linéarité, la variation de leurs paramètres, la qualité des variables mesurables [138, 139].

Ces difficultés ont conduit à l'avènement et au développement de nouvelles techniques telles que la commande floue. Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy sets) [140].

En 1978, la société danoise F.L. Midth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue. C'est à partir de 1985 environ, que les japonais commencèrent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande. Tout récemment, en Europe et en Amérique du nord, une intense activité de recherche a débuté afin d'introduire le principe du réglage par logique floue [141,140].

La logique floue est une technique très puissante de résolution de problèmes avec une large applicabilité dans le contrôle et la prise de décision [142]. Elle est très utile lorsque le modèle mathématique du problème à traiter n'existe pas ou existe mais difficile à implémenter, ou il est trop complexe pour être évalué assez rapidement pour des opérations en temps réel [143]. La logique floue est aussi supposée pour les situations où il y a de larges incertitudes et des variations inconnues dans les paramètres et la structure du système [144, 142].

Cependant il n'y a aucune procédure générale pour concevoir un contrôleur floue, vu que beaucoup d'erreurs d'essais, peuvent être rencontrées lors de sa réalisation et que ces contrôleurs peuvent être non adaptables à d'autres applications. Les difficultés rencontrées dans leur conception, ont guidé les chercheurs à s'orienter vers l'optimisation de ces contrôleurs. C'est pourquoi les méthodes d'intelligence bio-inspirées ont été appliquées avec succès ces dernières années pour le réglage des contrôleurs. Ces techniques comprennent des algorithmes génétiques [145, 146, 147, 148] et l'optimisation des essaims de particules (PSO). Le PSO peut générer une solution de haute qualité avec des caractéristiques de convergence plus stables et un temps de calcul plus court que les autres méthodes stochastiques [149, 150].

Les systèmes PV sont de nature non linéaire, leur modèle mathématique est caractérisé par une grande complexité et forte non linéarité. L'objectif de ce chapitre est de développer un contrôleur à base de la logique floue optimisé par le PSO, pour commander un convertisseur DC/DC permettant au GPV de délivrer sa puissance maximale d'une manière rapide et précise sans avoir besoin d'un modèle mathématique exacte du système PV. Dans un premier temps, nous introduisons quelques notions de logique floue, puis nous appliquons cette technique d'optimisation aux systèmes de pompage PV. En second lieu, nous introduisons quelques notions sur l'optimisation de l'essaimage de particules qui seront proposées pour optimiser les gains du contrôleur LF et donc améliorer les performances de la logique floue.

IV.2. Logique floue, principes et définitions

Les compréhensions de l'univers dans lequel nous évoluons sont généralement imparfaites dans la mesure où elles peuvent être entachées d'incertitudes et/ou d'imprécisions, ne serait-ce qu'à travers la perception que nous en avons. Or, nous pouvons constater que l'homme intègre naturellement ces imperfections dans la vie de tous les jours, en particulier au niveau du raisonnement et de la décision. L'idée du professeur Lotfi Zadeh [151], en 1965, à travers le nouveau concept ensembliste d'appartenance graduelle d'un élément à un ensemble, a été de définir une logique multi évaluée permettant de modéliser ces imperfections c'est prendre en compte les états intermédiaires entre le tout et le rien. L'utilité de cette approche peut être illustrée de la manière suivante :

Une température de 10°C, pour un humain, est généralement considérée comme froide; une autre de 40°C est qualifiée de chaude. Si chacune de ces valeurs appartient à une catégorie (ensemble) bien définie, qu'en est-il pour des valeurs intermédiaires? Une réponse intuitive consiste à affirmer qu'elles appartiennent à une ou deux des catégories précédentes avec des niveaux ou des degrés (normalisés) différents. On évite ainsi des transitions brusques entre différentes catégories, comme cela est le cas en logique binaire (figure. IV.1). Il semble en effet surprenant de considérer qu'une température de 40°C est chaude, alors qu'une température de 39,9°C ne l'est pas [152].

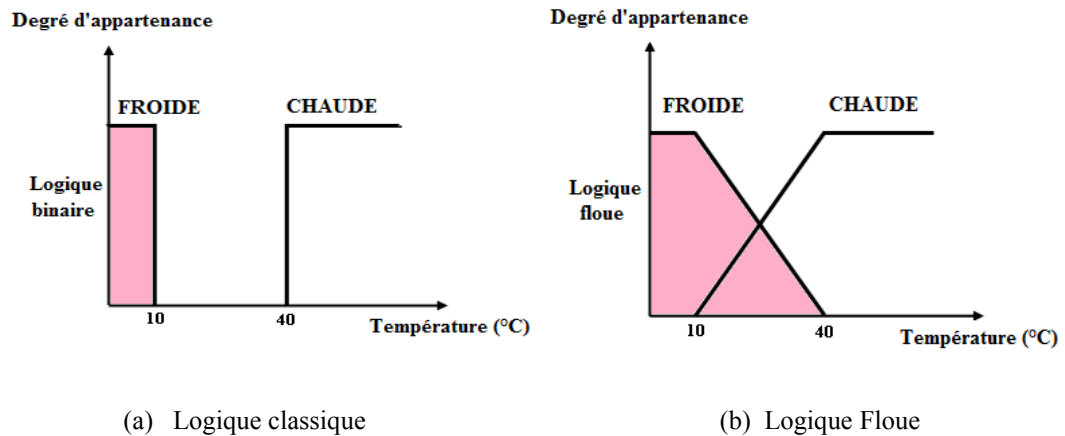


Fig.IV.1. Exemple de définition d'ensembles sur un univers de discours en logique binaire et en logique floue

Pour cette raison, ce type de figure s'appelle une fonction d'appartenance. On peut ainsi résumer la terminologie dans l'illustration suivante [153] :

- Variable linguistique : Température
- Valeur d'une variable linguistique : Froide, chaude
- Ensembles flous : " Froide ", " Chaude ",
- Plage de valeurs : (0, 10, 30,40, ...)
- Fonction d'appartenance : $\mu E(x) = a$ ($0 \leq a \leq 1$)
- Degré d'appartenance : a

IV.2.1. Variables linguistiques

L'ensemble de référence d'un mot du langage naturel s'appelle l'univers de discours. L'univers de discours d'un mot est un ensemble de terme qui évoque le même concept mais à des degrés différents. Il peut être fini ou non. Une variable linguistique représente un état dans le système à régler dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans le terme linguistique qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel ou artificiel [154].

Chaque variable linguistique est caractérisé par un par un triplé (V, X, T_V) , où : V représente une variable classique (âge, température, vitesse,...) définie sur l'univers de discours X . T_V est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre V [155, 156, 157]. Par exemple, si la vitesse est interprétée comme une variable linguistique, alors son ensemble de termes est $T_{VITESSE} = \{lente, moyenne, rapide, \dots\}$ où chaque terme est caractérisé par un ensemble flou. Ces termes peuvent être

définis comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont montrées sur la figure (IV.2) :

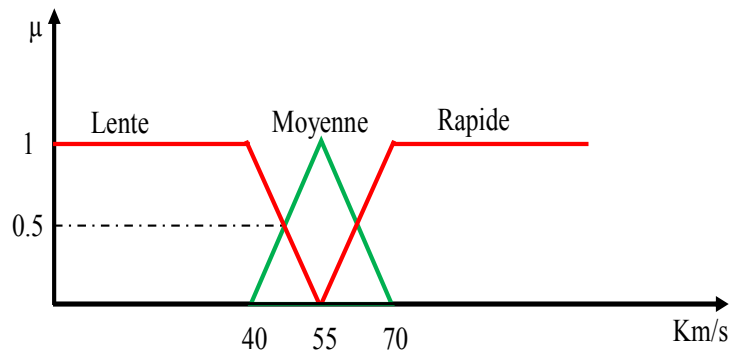


Fig.IV.2. Représentation graphique des termes linguistiques.

IV.2.2. Opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs ET ou OU. IL s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. Le plus souvent, les opérateurs ET ou OU sont réalisés respectivement par les règles «min» et «max». Il y a alors une certaine affinité avec les règles de la logique classique. Cependant, il existe un grand nombre de règles pour la réalisation des opérateurs ET et OU qui tiennent compte du caractère particulier de la logique floue. Soient A et B deux ensembles flous dans le référentiel X ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonction d'appartenance [158, 159, 156, 157].

- **Définition 1 (Union)** : la fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ de l'union $A \cup B$, est définis pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (IV.1)$$

Dans le domaine de la commande, le + représente souvent le MAX :

$$\mu_A(u) + \mu_B(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (IV.2)$$

- **Définition 2 (intersection)** : la fonction d'appartenance $\mu_{A \cap B}$ de l'intersection $A \cap B$, est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (IV.3)$$

- **Définition 3 (Complémentation) :** la fonction d'appartenance $u_{\bar{A}}$ du complément de l'ensemble A, notée \bar{A} , est définie pour tout $u \in U$ par :

$$u_{\bar{A}}(u) = 1 - u_A(u) \quad (IV.4)$$

- **Définition 4 (produit cartésien) :** soit (A_1, \dots, A_n) , des ensembles flous respectivement définis sur (U_1, \dots, U_n) , le produit cartésien de (A_1, \dots, A_n) , est un ensemble flou défini sur (U_1, \dots, U_n) , de fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 * A_2 * \dots * A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min(\mu_{A_1}(u_1), \mu_{A_2}(u_2), \dots, \mu_{A_n}(u_n)) \quad (IV.5)$$

$$\mu_{A_1.A_2.\dots.A_n} = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (IV.6)$$

- **Définition 5 (Relation floue) :** Une relation floue représente le degré de présence, ou d'absence d'une association entre les éléments de deux ou plusieurs ensembles flous. Une relation floue d'ordre n est un ensemble flou défini sur $(U_1 \times \dots \times U_n)$ par l'expression suivante :

$$R_{U_1 \times \dots \times U_n} = \{((u_1, \dots, u_n), \mu_R(u_1, \dots, u_n)) / (u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n\} \quad (IV.7)$$

$$R_{U_1.U_2.\dots.U_n} = \{((x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n)) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U_1.U_2.\dots.U_n\} \quad (IV.8)$$

- **Définition 6 (Composition des règles floues) :** Soit R et S deux relations floues définies respectivement dans $U \times V$ et $V \times W$. La composition de R et S est un ensemble flou, symbolisé par $R \circ S$, de fonction d'appartenance :

$$\mu_{R \circ S}(u, w) = \{ (u, w), \text{SUP}(\mu_R(u, v) * \mu_S(v, w)), \mu \in U, v \in V, w \in W \} \quad (IV.9)$$

$$R \circ S = \{ ((U, W), \text{sup}_{v \in V} \min(\mu_R(U, V), \mu_S(V, W))) , \mu \in U, v \in V, w \in W \} \quad (IV.10)$$

IV.2.3. Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance », qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique. Le traitement numérique 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 on associe à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance désignée par $\mu_A(x)$, qui sera désignée par le degré ou le facteur d'appartenance, dont la valeur varie entre 0 et 1. Il est à noter que l'ensemble des éléments de x pour lesquels $\mu_A(x) > 0$, est appelé «support de A». Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance les fonctions suivantes : [160, 161, 162]

- **Fonction triangulaire** : Elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$ qui déterminent les coordonnées des trois sommets

$$\mu(x) = \text{Max} \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-d} \right), 0 \right) \quad (\text{IV.11})$$

- **Fonction trapézoïdale** : Elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$:

$$\mu(x) = \text{Max} \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-d} \right), 0 \right) \quad (\text{IV.12})$$

- **Fonction gaussienne** : Elle est définie par deux paramètres $\{\sigma, m\}$:

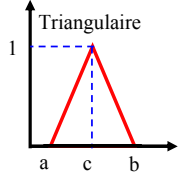
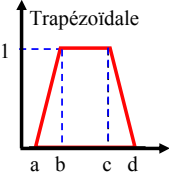
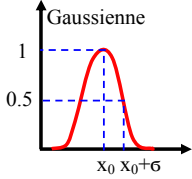
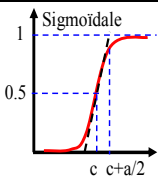
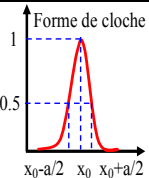
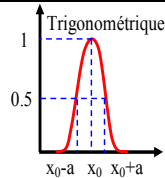
$$\mu(x) = \exp \left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (\text{IV.13})$$

- **Fonction sigmoïdale** : Elle est définie par deux paramètres $\{a, c\}$:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot (x-c))} \quad (\text{IV.14})$$

Les formes usuelles des fonctions d'appartenances sont les suivantes :

Table IV.1 : Formes usuelles des fonctions d'appartenances

 <p style="text-align: center;">Triangulaire</p> $\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$ <p style="text-align: center;">Fonction Triangulaire</p>	 <p style="text-align: center;">Trapézoïdale</p> $\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$ <p style="text-align: center;">Fonction Trapézoïdale</p>	 <p style="text-align: center;">Gaussienne</p> $\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma}\right)$ <p style="text-align: center;">Fonction Gaussienne</p>
 <p style="text-align: center;">Sigmoïdale</p> $\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(a \cdot (x - c))}$ <p style="text-align: center;">Fonction Sigmoïdale</p>	 <p style="text-align: center;">Forme de cloche</p> $\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2}$ <p style="text-align: center;">Fonction en Forme de Cloche</p>	 <p style="text-align: center;">Trigonométrique</p> $\mu(x) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{\pi \cdot (x - x_0)}{2 \cdot a}\right)\right)$ <p style="text-align: center;">$x_0 - 2 \cdot a \leq x \leq x_0 + 2 \cdot a$</p> <p style="text-align: center;">Fonction Trigonométrique</p>

IV.2.4. Proposition et règle floue

Une proposition floue élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique (V, X, Tv) par la qualification « V est A », avec A appartenant à T_V . Par exemple, « taille de Paul est MOYENNE » est une proposition élémentaire définie à partir de la variable linguistique (taille de Paul, {tailles}, {MOYENNE}). La valeur de vérité d'une proposition élémentaire « V est A » est égale à $\mu_A(v)$ où v correspond à la valeur numérique exacte de V .

Une proposition floue générale est définie à partir de propositions élémentaires et d'opérateurs logiques binaires (et, ou, implique) ou une aire (non). Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur de vérité de telles propositions. Nous ne donnons ici que les plus communément utilisées [162, 161, 160, 159].

- **Conjonction** : (V_1 est A_1) et (V_2 est A_2)

$$\min(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2)) \quad \text{Logique de Zadeh}$$

$$\max(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2) - 1, 0) \quad \text{Logique de Lukasiewicz}$$

$$\mu_{A_1}(v_1) \cdot \mu_{A_2}(v_2) \quad \text{Logique probabiliste}$$

- **Disjonction** : (V_1 est A_1) ou (V_2 est A_2)

$$\max(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2)) \quad \text{Logique de Zadeh}$$

$$\min(\mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2), 1) \quad \text{Logique de Lukasiewicz}$$

$$\mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2) - \mu_{A_1}(v_1) \cdot \mu_{A_2}(v_2) \quad \text{Logique probabiliste}$$

- **Implication**: (V_1 est A_1) implique (V_2 est A_2)

$$\min(1 - \mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2), 1) \quad \text{Logique de Lukasiewicz}$$

$$\min(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2)) \quad \text{Logique de Mamdani}$$

$$\mu_{A_1}(v_1) \cdot \mu_{A_2}(v_2) \quad \text{Logique de Larsen}$$

- **Complémentation** : non (V est A)

$$1 - \mu_A(v)$$

Dans ce qui précède, v , v_1 et v_2 correspondent à des instanciations numériques réelles des variables V , V_1 et V_2 . Une règle floue est une proposition floue générale utilisant une implication entre deux propositions floues quelconques. Par exemple :

(V_1 est A_1) et (V_2 est A_2) **implique** (V_3 est A_3), ou sous une forme plus linguistique:

Si (V_1 est A_1) et (V_2 est A_2) **alors** (V_3 est A_3) est une règle floue.

(V_1 est A_1) et (V_2 est A_2) sont appelées prémisse de la règle et (V_3 est A_3) conclusion.

IV.3. Réglage et commande de la logique floue

Un domaine d'application de la logique floue qui devient de plus en plus important, est celui de réglage et de la commande de processus industriel. En effet cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des études théoriques approfondies. Par des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique.

Les travaux de Lotfi Zadeh sur la théorie des ensembles flous ont jeté les bases de la commande floue actuelle. Ces travaux ont mis un certain temps avant d'être acceptés par la communauté de l'automatique et de l'industrie. Dans le domaine de la commande, la première application de la logique floue a été réalisée par Mamdani en 1974 par la construction d'un premier contrôleur flou pour une commande de vitesse d'un moteur [163]. Mais ce n'est que depuis quelques années que la commande floue a connu, essentiellement, un essor remarquable. Elle a été appliquée à des problèmes aussi divers que la purification de l'eau, le métro de Sendai, la fabrication du ciment, la marche automatisée d'une rame de métro, ect... [164, 165]

Ils existent beaucoup d'efforts de recherches réussies pour les applications de la théorie de la logique floue aux systèmes à commander. Ces travaux montrent une performance remarquable de ce type de régulateur en le comparant avec le régulateur PID conventionnel [166, 167].

IV.3.1. Conception d'une commande par logique floue

Le procédé à suivre lors de la conception d'une commande par logique floue est assez différent de celui d'une commande conventionnelle (Figure IV.3) [154, 153].

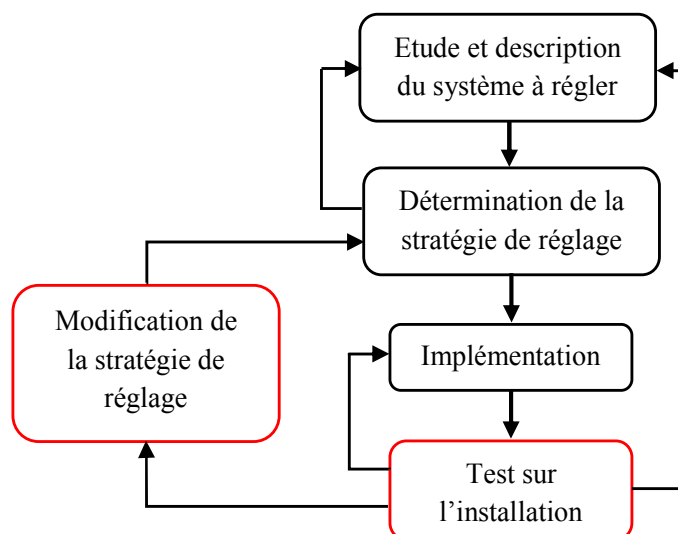


Fig.IV.3. Procédé générale lors de la conception d'une commande par logique floue

Généralement, lors de la conception d'un réglage ou d'une commande par logique floue nous commençons par une étude et description approfondie du système à régler. Il ne s'agit pas d'une recherche d'un modèle mathématique, mais d'une description du comportement dynamique du système, qui se fait par des variables linguistiques qui peuvent être accompagnées d'une définition par fonction d'appartenance, après une détermination de la stratégie de commande qui représente l'étape la plus importante, lors de conception d'une commande par logique floue. En effet, cette dernière contient la détermination de plusieurs paramètres. Les dernières étapes sont l'implémentation et le test de l'installation de cette stratégie ainsi des modifications de cette stratégie s'il est nécessaire [154].

IV.3.2. Configuration interne d'un régulateur par logique floue

Le régulateur par logique floue est composé de quatre éléments de base (figure IV.4) [167, 168, 169] :

- **Interface de fuzzification** : permet de transformer les grandeurs mesurées d'entrée en des grandeurs floues;
- **Base de connaissances** : comprend la base de données et la base de règles floues ;
- **Moteur d'inférence floue** : la base des règles, qui contient la définition des termes utilisés dans la commande et les règles caractérisant la cible de la commande et décrivant la conduite de l'expert ;
- **Interface de défuzzification** : détermine une action précise à partir des descriptions floues des variables de sortie.

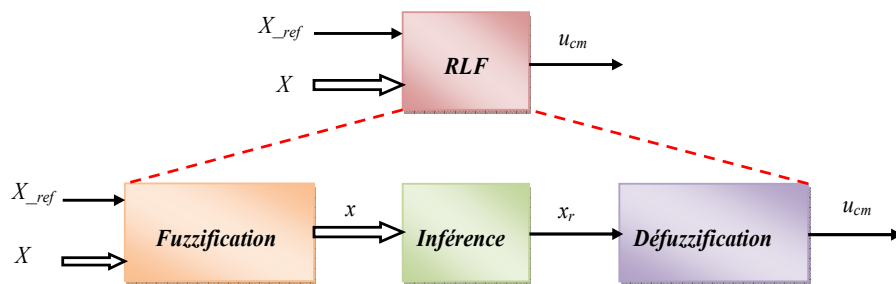


Fig.IV.4. Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

IV.3.2.1. Interface de fuzzification

C'est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,...) est arbitraire [170, 171]. On peut

introduire pour une variable x trois, cinq ou sept valeurs linguistiques. La désignation standard des ensembles flous est :

- NG Négatif Grand (**NB** Big negatif)
- NM Négatif Moyen (**NM** Medium negatif)
- NP Négatif Petit (**NS** Small negatif)
- EZ Environ Zéro (**Z** About Zero)
- PP Positif Petit (**PS** Small positif)
- PM Positif Moyen (**PM** Medium positif)
- PG Positif Grand (**PB** Big positif)

L'interface de fuzzification inclut les fonctions suivantes [155, 156, 157, 158]:

- mesure des variables d'entrée ;
- représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants ;
- transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

IV.3.2.2. Inférence floue

C'est un mécanisme de décision. Il est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue [157, 158, 159]. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles. Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

- **Méthode d'inférence max-min (Mamdani, 1974)**
Méthode d'inférence max-min, réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie, réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur « OU » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [155, 156, 157, 158].
- **Méthode d'inférence max-prod (Larsen, 1980)**
La méthode d'inférence max-produit 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 [155, 156, 157, 158].

- **Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno, 1985)**

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la méthode d'inférence somme-prod réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne ; tandis que l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit. La conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle [142,155, 156, 157, 158].

IV.3.2.3. Interface de defuzzification

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeurs physiques nécessaires pour un tel état de processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire. Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont : [172, 173]

- **méthode du maximum** : Cette méthode génère une commande précise en calculant la moyenne des valeurs pour lesquelles l'appartenance est maximale. Cependant, cette méthode présente un certain inconvénient lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.
- **méthode de centre de gravité** : C'est la méthode la plus utilisée dans les contrôleurs flous. Elle génère le centre de gravité de la fonction d'appartenance issue de l'inférence. La sortie défuzzifiée Z est définie par : [97, 98]

$$\bar{y} = \frac{\int y \cdot \mu_{res}(y) \cdot dy}{\int \mu_{res}(y) \cdot dy} \quad (IV.15)$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface. La détermination du centre de gravité nécessite une envergure de calcul assez importante, surtout pour l'exécution en temps réel. De ce fait, cette méthode est la plus coûteuse en temps de calcul.

IV.4. Avantages et inconvénients de la logique floue [95, 96, 97]

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et d'inconvénients.

IV.4.1. Avantages

- La non-nécessité d'une modélisation (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable);
- Il n'y a pas nécessaire de faire un modèle mathématique du système à régler ;
- Le système flou est un approximateur universel, c'est-à-dire, il est suffisamment générale pour générer n'importe quelle action ;
- La logique floue est facile à comprendre par ceux qui ne sont pas des spécialistes, car elle imite la stratégie du raisonnement humain ;
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus;
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-Linéaire et difficile à modéliser);
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire);

IV.4.2. Inconvénients

- Manque de directives précises pour la conception d'un régulateur (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification);
- Approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances des opérateurs souvent difficile);
- Impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable);
- Possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non-linéaire; la cohérence des inférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

IV.5. Application de la logique floue au système de pompage PV

Dans cette section, on s'intéresse à l'application de logique floue pour l'optimisation des trois systèmes de pompage photovoltaïque étudiés. Cette optimisation consiste en la maximisation de la puissance globale du GPV ainsi que le rendement de ces systèmes. Le schéma de la figure (IV.5), représente la structure globale de l'optimisation par la logique floue.

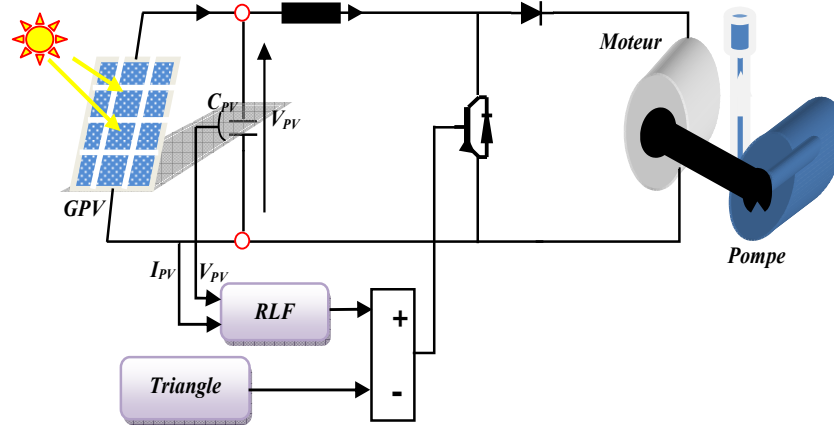


Fig.IV.5. Structure globale de l'optimisation par la logique floue

Les étapes de calcul des différentes commandes sont les suivantes [174, 175, 176, 177, 178, 179, 180] :

1. Echantillonnage de la sortie
2. Calcul de l'erreur notée $E(K)$:

$$E(k) = \frac{P_{PV}(k+1) - P_{PV}(k)}{V_{PV}(k+1) - V_{PV}(k)} \quad (\text{IV.16})$$

4. Calcul des valeurs normalisées de $E(k)$ et $dE(k)$
5. Calcul de la variation de la commande dD_i en suivant les étapes suivantes :

- **Fuzzification** : Calculer les degrés d'appartenance de $E(k)$ et $dE(k)$ pour les 7 classes à l'aide de leurs fonctions d'appartenance.
- **Inférence floue**: Calculer, en utilisant la table des règles de la commande (Tableau IV.3), les fonctions d'appartenance résultantes de la variable linguistique dD_i à chacune de ses classes.
- **Défuzzification** : Une réduction notable de l'envergure de calcul s'obtient par l'emploi de la méthode de centre de gravité, est donnée par la relation suivante:

$$dD = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) - D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (\text{IV.17})$$

Avec $\mu(D_j)$, le degré d'activation de la $j^{\text{ème}}$ règle et D_j l'abscisse du centre de gravité de la $j^{\text{ème}}$ classe.

6. Calcul de la valeur physique de la commande.

7. Laisser la sortie évoluer jusqu'à la prochaine période d'échantillonnage et puis ré-exécuter toutes les règles.

IV.5.1. Description du régulateur flou

La structure du contrôleur flou (FLC) appliquée au système de pompage PV est représentée sur la figure (IV.6). Le contrôleur reçoit comme entrées l'erreur et la variation d'erreur de la tension et de la puissance du GPV. La tension V_{PV} du GPV est contrôlée de sorte qu'elle suive la tension de référence (V_{PV_ref}) obtenu à la sortie du contrôleur flou (FLC). La sortie du régulateur de tension est utilisée pour commander le rapport cyclique du convertisseur DC / DC.

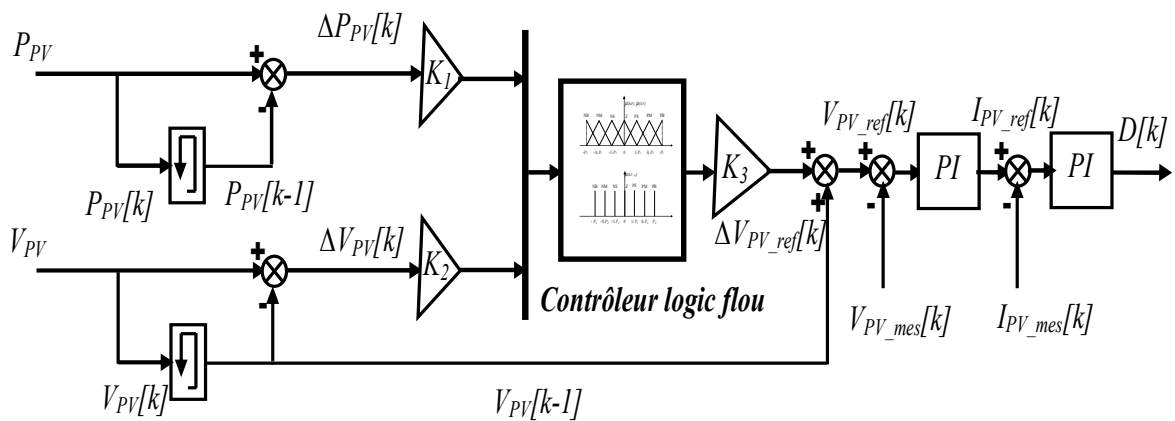


Fig.IV.6. Schéma bloc du contrôleur MPPT par la logique floue

Le contrôle flou comporte :

- Un bloc de calcul de variation de l'erreur au cours du temps ($dP(k)$ et $dV(k)$) ;
- Des facteurs d'échelle associés à l'erreur, à la variation de l'erreur et à la variation de la commande (dD) ;
- Des règles du contrôleur flou (Inférence) ;
- Un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande en valeur numérique ;
- Un sommateur.

IV.5.2. Loi de commande

La loi de commande est en fonction de l'erreur E et de sa variation dE ($D=f(E, dE)$). Par conséquent, l'activation de l'ensemble des règles d'inférence associées donne la variation de la

commande dD nécessaire, permettant ainsi l'ajustement de la commande D . La forme de cette loi de commande est donnée par [174, 175, 176, 177, 178, 179, 180] :

$$D_{K+1} = D_K + K_{dD} \cdot D_{K+1} \quad (IV.18)$$

Où : K_{dD} est le gain associé à la commande D_{k+1} et est la variation de la commande dD_{k+1} . L'erreur E et la variation de l'erreur dE sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} X_E = K_E \cdot E \\ X_{dE} = K_{dE} \cdot dE \end{cases} \quad (IV.19)$$

Où K_E et K_{dE} sont les facteurs d'échelles (facteurs de normalisation). Nous faisons varier ces facteurs jusqu'à ce que nous ayons un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

En supposant que le FLC a sept variables linguistiques, celles-ci sont utilisées pour former les règles floues (Tableau IV.3), alors que les fonctions d'appartenance du contrôleur sont données dans la figure (IV.7).

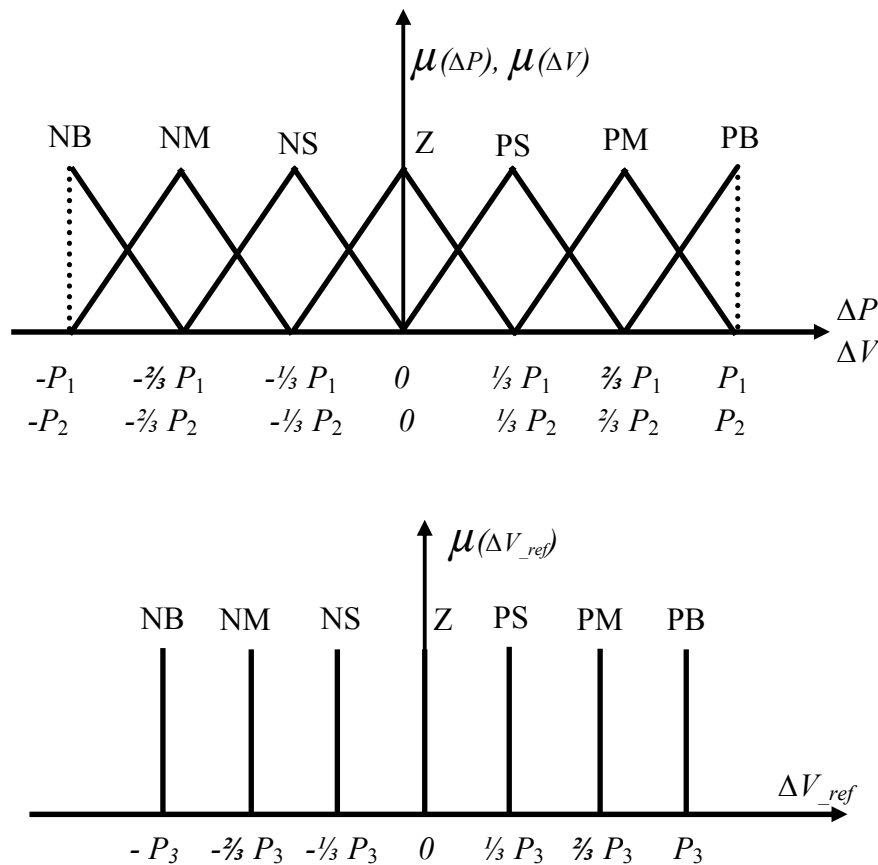


Fig.IV.7. Fonction d'appartenance de dP , dV et dV_{ref}

Les classes d'appartenance sont :

NB: Big négatif, **NM:** Négative moyen, **NS:** Small négatif, **Z:** About Zero, **PS:** Small positif, **PM:** Positif moyen et **PB:** Big positif.

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens. Les règles flous sont résumées et présentées dans le tableau (IV.3) :

Tableau IV.3 : Table de règles d'inférence à sept classes

dV \ dP	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	Z	NM	PB	NB
NM	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NS	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
Z	NP	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PM	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PB	NB	NB	NM	Z	PM	PB	PB

IV.6. Algorithme d'optimisation de l'essaim de particules (PSO)

Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver les meilleures solutions (en minimisant et/ou maximisant la/les fonctions objectifs du problème posé), tout en satisfaisant un ensemble de contraintes définies par l'utilisateur [181, 182].

Les méthodes d'optimisation basées sur l'essaimage sont des algorithmes sophistiqués et qui sont inspirés de la nature. Les algorithmes les plus connus de cette catégorie incluent les algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) [183], les algorithmes génétiques (GA) [184] et l'algorithme d'optimisation par essais de particules (PSO) [185,186, 187].

L'optimisation par essaim de particules (OEP), ou en anglais (Particle Swarm Optimization PSO) est une méthode d'optimisation stochastique qui est inspirée d'un comportement social des animaux évoluant en essaim tel que les vols groupés d'oiseaux et la scolarisation des poissons. Ce comportement social est modélisé par une équation mathématique permettant de guider les

«Particules» durant le processus de déplacement. Cet algorithme a été inventé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [188, 189, 187, 182].

IV.6.1. Formalisation

La méthode d'optimisation par essaim particulaire met en jeu un ensemble d'agents pour la résolution d'un problème donné. Cet ensemble est appelé essaim. L'essaim est composé d'un ensemble de membres, ces derniers sont appelés particules. Les particules de l'essaim représentent des solutions potentielles au problème traité. L'essaim de particules survole l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules de son entourage [190,191, 189]. Son déplacement est influencé par (Figure IV.8) :

- Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure position qu'elle a atteint jusqu'ici (parfois la position courante) et sa qualité (la valeur de la fonction à optimiser en cette position) ;
- Chaque particule est capable de communiquer avec un certain nombre de ses voisins et d'obtenir de chacune d'elles sa propre meilleure performance (et la qualité afférente) ;
- Chaque particule choisit la meilleure performance parmi les meilleures dont elle à connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine les trois tendances suivantes : suivre sa propre vitesse, revenir vers sa meilleure performance, et aller vers la meilleure performance de ses informatrices. Une fois la meilleure informatrice détectée, la modification de la vitesse est une simple combinaison linéaire de ces trois tendances.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée par la figure (IV.8) :

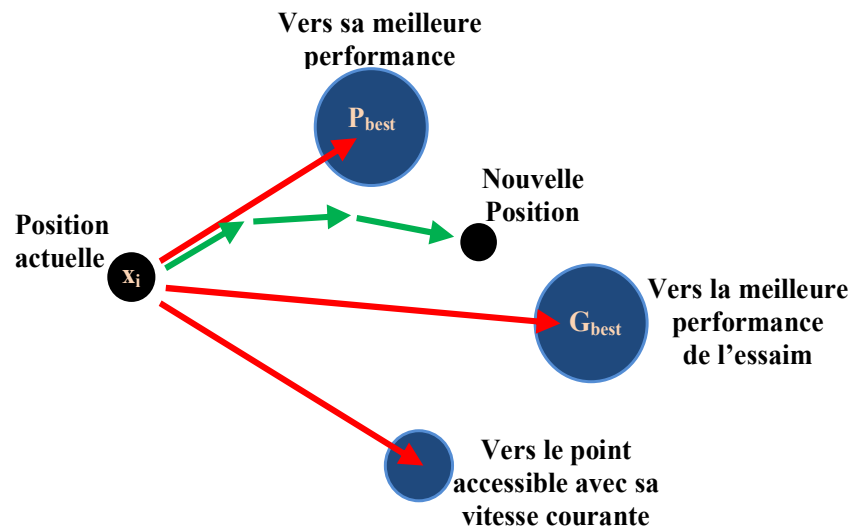


Fig.IV.8. Déplacement d'une particule

IV.6.2. Initialisation de l'essaim

La position des particules ainsi que leur vitesse initiale doivent être initialisées aléatoirement selon une loi uniforme sur $[0, 1]$. Mais en pratique, il n'est pas souhaitable que trop de particules tendent à sortir de l'espace de recherche dès le premier pas du temps, ni d'ailleurs plus tard. Pour les premières formulations nous nous contentons de tirer au hasard les valeurs des composantes de chaque position et vitesse, selon une distribution uniforme dans :

$$[(x_{min} - x_{max})/2, (x_{max} - x_{min})] \quad (IV.20)$$

IV.6.3. Equation de mouvement

Afin d'estimer la qualité de la particule i , il est indispensable de calculer sa fonction «Objective» (aussi appelée fitness). On considère un ensemble de n particules et une fonction objective f que l'on cherche à minimiser sur un espace de recherche D . Pour chaque particule, on définit son vecteur de position $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$, et son vecteur de vitesse $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective f dans chaque itération. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $P_{besti} = (p_{besti1}, p_{besti2}, \dots, p_{bestiD})$ et que $G_{best} = (g_{best1}, g_{best2}, \dots, g_{bestD})$ correspond à la meilleure position atteinte par les particules de l'essaim. On suppose que toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation G_{best} (global best).

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace. Leurs vitesses de déplacement et leurs position à l'itération $(k+1)$ sont mises à jours. Les équations régissant cette étape sont données par (IV.21) et (IV.22) respectivement [191, 188, 187]:

$$v_{i,j}^{k+1} = wv_{i,j}^k + c_1r_{1i,j}^k(pb_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2r_{2i,j}^k(g_{best}^k - x_{i,j}^k), j \in \{1, \dots, D\} \quad (IV.21)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1}, j \in \{1, \dots, D\} \quad (IV.22)$$

w : s'appelle le facteur d'inertie, il sert à contrôler l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur.

c_1 et c_2 : sont des constantes positives, appelées respectivement le facteur cognitif et le facteur social permettant le contrôle du comportement individuel et collectif de chaque particule.

r_1 et r_2 : sont des nombres aléatoires distribués uniformément dans l'intervalle $[0,1]$.

À l'itération $(k+1)$, les deux vecteurs P_{best} et G_{best} sont mis à jour, dans le cas d'une minimisation suivant les deux équations [191, 188] :

$$P_{best}_i^{k+1} = \begin{cases} P_{best}_i^k, & \text{si } f(x_i^{k+1}) \geq P_{best}_i^k \\ x_i^{k+1}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (IV.23)$$

$$G_{best}^{k+1} = \min_{P_{best}_i} f(P_{best}_i^{k+1}), 1 \leq i \leq n \quad (IV.24)$$

Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une "erreur acceptable" ξ comme critère d'arrêt [192, 187].

Algorithme d'optimisation par essaim de particules

1. **Initialisation** aléatoire de n particules : position et vitesse ;
 2. **Evaluation** de la position de chaque particule ;
 3. **Pour** chaque particule i , $P_{best}_i = x_i$;
 4. **Calcul de** G_{best} selon l'équation(IV.24) ;
 5. **Tant que** le critère d'arrêt n'est pas satisfait faire :
 6. **Déplacement** des particules selon les équations (IV.21) et (IV.22)
 7. **Evaluation** des positions des particules ;
-

8. Mise à jour de P_{besti} et G_{best} selon les équations (IV.23) et (IV.24)
 9. Fin
-

Le modèle de l'algorithme PSO peut être montré ci-dessous:

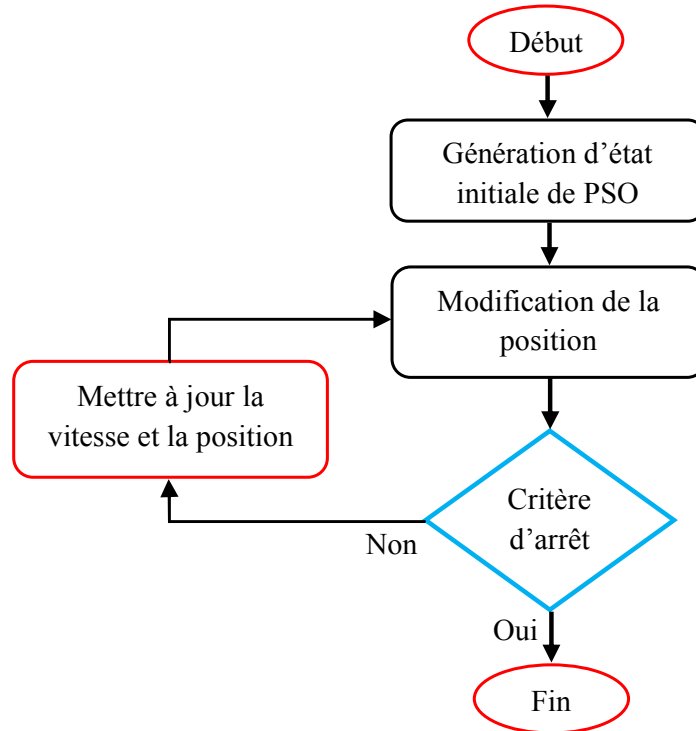


Fig.IV.9. Organigramme d'optimisation par essaim particulaire

IV.5.1. Description du contrôleur floue_PSO

La structure du contrôleur LF_PSO appliquée aux systèmes de pompage PV est représentée sur la figure (IV.10). Il est défini pour trouver les valeurs optimales de deux contrôleurs flous et PI à savoir : P_1 , P_2 , P_3 , K_1 , K_2 , K_3 , k_{p1} , k_{i1} , k_{p2} , k_{i2} afin de minimiser la fonction fitness donné par l'équation (IV.25).

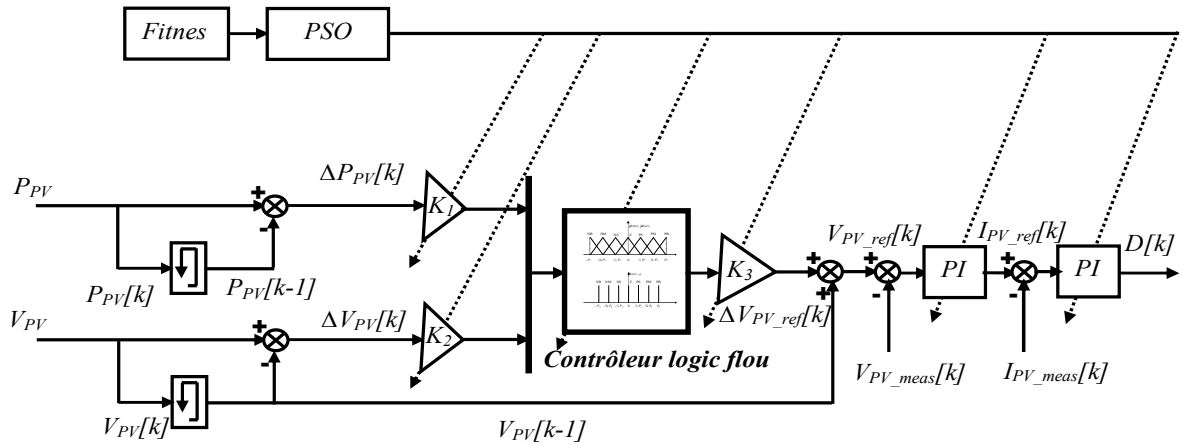


Fig.IV.10. Schéma bloc du contrôleur MPPT par la logique floue optimisée par le PSO

$$F(k) = \sum_{i=1}^N |e(i)| + |e_1(i)| + |e_2(i)| \quad (IV.25)$$

Avec : $e = P_{PV-max} - P_{PV}$ (P_{PV-max} : la puissance max du GPV), $e_1(i) = V_{PV_ref} - V_{PV_mes}$, $e_2(i) = I_{PV_ref} - I_{PV_mes}$. (N : est le nombre d'échantillons et k est le nombre d'itération).

Un ensemble de paramètres de contrôleur répartis dans les régions ci-dessous est représenté dans chaque particule, dans lequel la population initiale d'individus est démarrée de manière aléatoire.

$$0.01 < P_1, P_2, P_3 < 1, \quad 0.001 < K_1, K_2, K_3, K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2} < 100$$

Tableau IV.4 : Paramètres optimal de la LF-PSO

Paramètres	P ₁	P ₂	P ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K _{p1}	K _{i1}	K _{p2}	K _{i2}
Floue_PSO	0.01	0.784	0.01	3.809	0.029	4.665	6.80	3.772	0.001	0.001

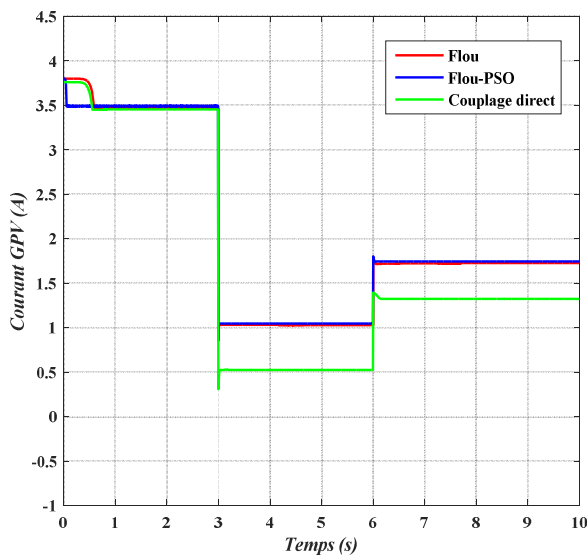
IV.6. Résultats de simulations

IV.6.1. Résultats de simulations en régime dynamique

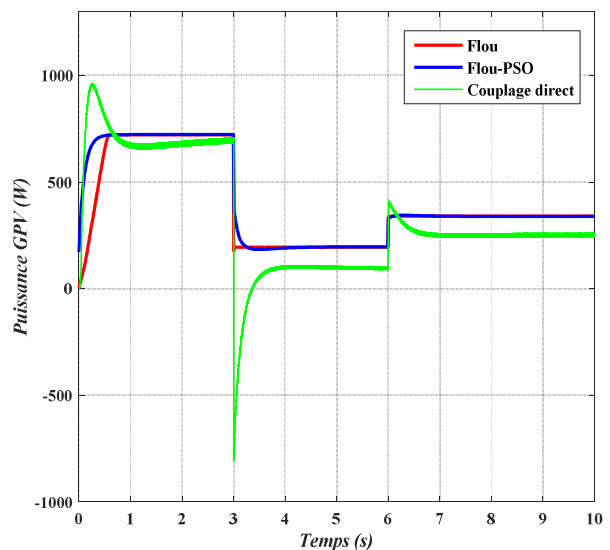
Les résultats de simulation illustrés par les figures (IV.11-13) représentent les allures des différentes grandeurs de simulation des trois systèmes de pompage PV optimisés par la LF et la LF_PSO sous des radiations solaires variables, répartis sur trois intervalles, tout en gardant la température constante égale à 25°C.

- De 0 à 3 secondes, le rayonnement solaire est égal à 1000W/m².
- De 3 à 6 secondes, le rayonnement solaire est égal à 300W/m².
- De 6 à 10 secondes, le rayonnement solaire est égal à 500W/m².

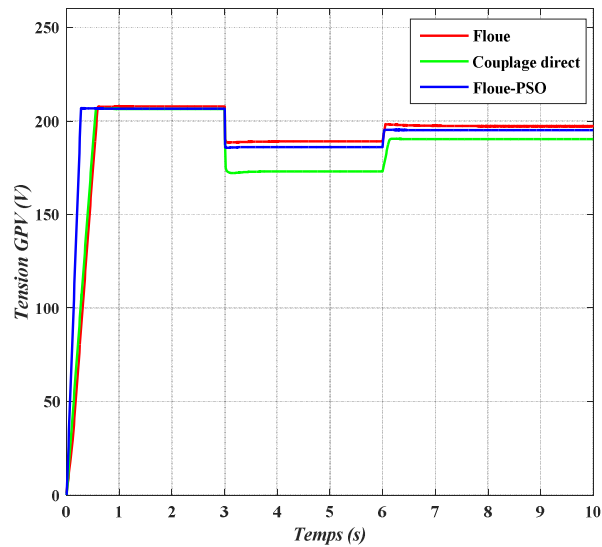
Les fonctions d'appartenance à sept classes (figure IV.7) avec la base de règles montrées au tableau (IV.3) contrôlent l'erreur (E) et la variation de l'erreur (CE) après adaptation tel que le montre la figure (IV.11.a) où on obtient le point optimal pour l'intensité de courant qui est de 3.5A avec un régime transitoire de 0.65s et 0.05s pour la LF et la LF_PSO respectivement, pour un éclaircissement de 1000 W/m². La variation de la tension du GPV est montrée dans la figure (IV.11.c). Les valeurs obtenues à l'état d'équilibre sont proches des valeurs optimales de tension qui sont de 208 V, 190 V et 198 V pour G=1000 W/m², 300W/m² et 500W/m² respectivement. La variation de la puissance instantanée du GPV est montrée dans la figure (IV.11.b). Ses valeurs optimales sont près de 720 W, 194 W et 340 W pour un éclaircissement de 1000 W/m, 300 W/m² et 500 W/m² respectivement. Pour G=300 W/m², l'optimisation augmenterait les différentes grandeurs (tension GPV, puissance GPV et courant GPV), d'environ 8.51%, 49.1%, et 50.02% respectivement. Pour G=500 W/m², l'optimisation augmenterait les différentes grandeurs (tension GPV, puissance GPV et courant GPV) d'environ 3.49%, 34.2%, et 24.12% respectivement. Donc l'effet d'optimisation est ressenti pour les faibles éclaircissements. Donc on peut dire que la puissance globale délivrée par le GPV est bien exploitée.



(a) Courant du GPV



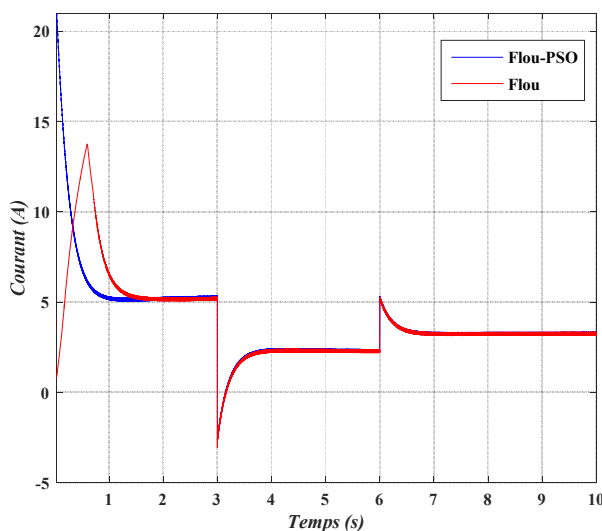
(b) Puissance du GPV



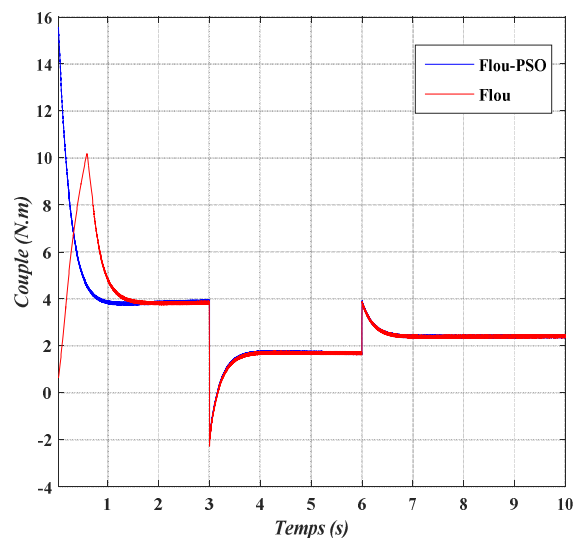
(c) Tension du GPV

Fig.IV.11. Résultats de simulation des différentes grandeurs du GPV optimisé par la LF et la LF_PSO

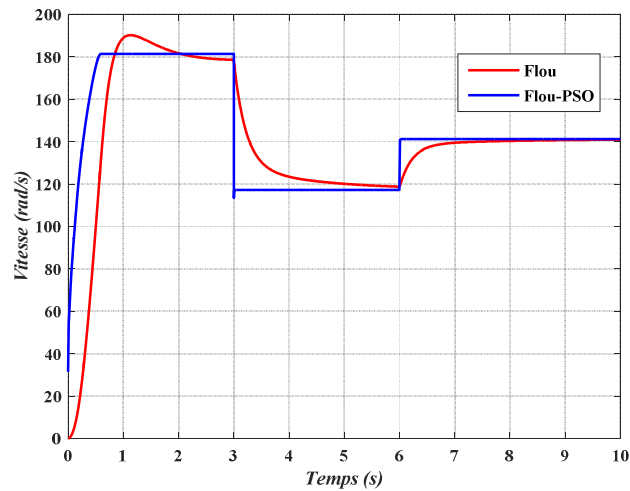
La figure (IV.12) montre l'évolution des résultats du système de pompage PV entraîné par le MCC et optimisé par la LF et la LF_PSO. Toutes les grandeurs, se stabilisent vers ces valeurs optimales après un temps de réponse $t = 0,9$ s et $t = 1,5$ s pour le contrôleur LF et LF_PSO respectivement. Pour le premier intervalle où $G=1000$ W/m², aucune différence n'est notée entre les grandeurs mesurées et les valeurs nominales; la vitesse est 183.3 rad / s avec un courant d'armature de 5.5 A et un couple de 4 N.m. Une diminution d'éclairement $G=300$ W/m², (passage de nuages par exemple), la vitesse prend sa nouvelle valeur 117 rad / s, le courant d'induit 2,2 A et le couple 1,6 Nm. Une autre augmentation brusque d'éclairement à $G=500$ W/m², la vitesse augmente à 141 rad / s, le courant d'induit 3.2 A et le couple 2.5 N.m.



(a) Courant



(b) Couple



(c) Vitesse

Fig.IV.12. Résultats de simulation des différentes grandeurs du système de pompage PV entraîné par une MCC et optimisé par la LF et la LF_PSO

La figure (IV.13) montre l'évolution des résultats du système de pompage PV entraîné par le MSAP et optimisé par la LF et la LF_PSO. Pour le premier intervalle où $G=1000 \text{ W/m}^2$, aucune différence n'est notée entre les grandeurs mesurées et les valeurs nominales; la vitesse est 188.5 rad/s , le couple est 4 Nm et le courant quadrature est 4 A . Une diminution d'éclairement $G=300 \text{ W/m}^2$, (passage de nuages par exemple), la vitesse prend sa nouvelle valeur 126 rad / s , le courant d'induit 2.2 A et le couple 2 Nm . Une autre augmentation brusque d'éclairement à $G=500 \text{ W/ m}^2$, la vitesse augmente à 151 rad / s , le courant d'induit 3.2 A et le couple 3 Nm . Le couple électromagnétique est l'image du courant quadratique, mais le courant direct est nul quel que soit la variation de consigne de vitesse (principe de commande vectorielle).

Il à noter que pour le système de pompage PV entraîné par la MSAP, le régime transitoire est presque nul pour les deux méthodes d'optimisation, mais avec des pics lors de la variation aux niveaux d'éclairement pour la commande par la LF.

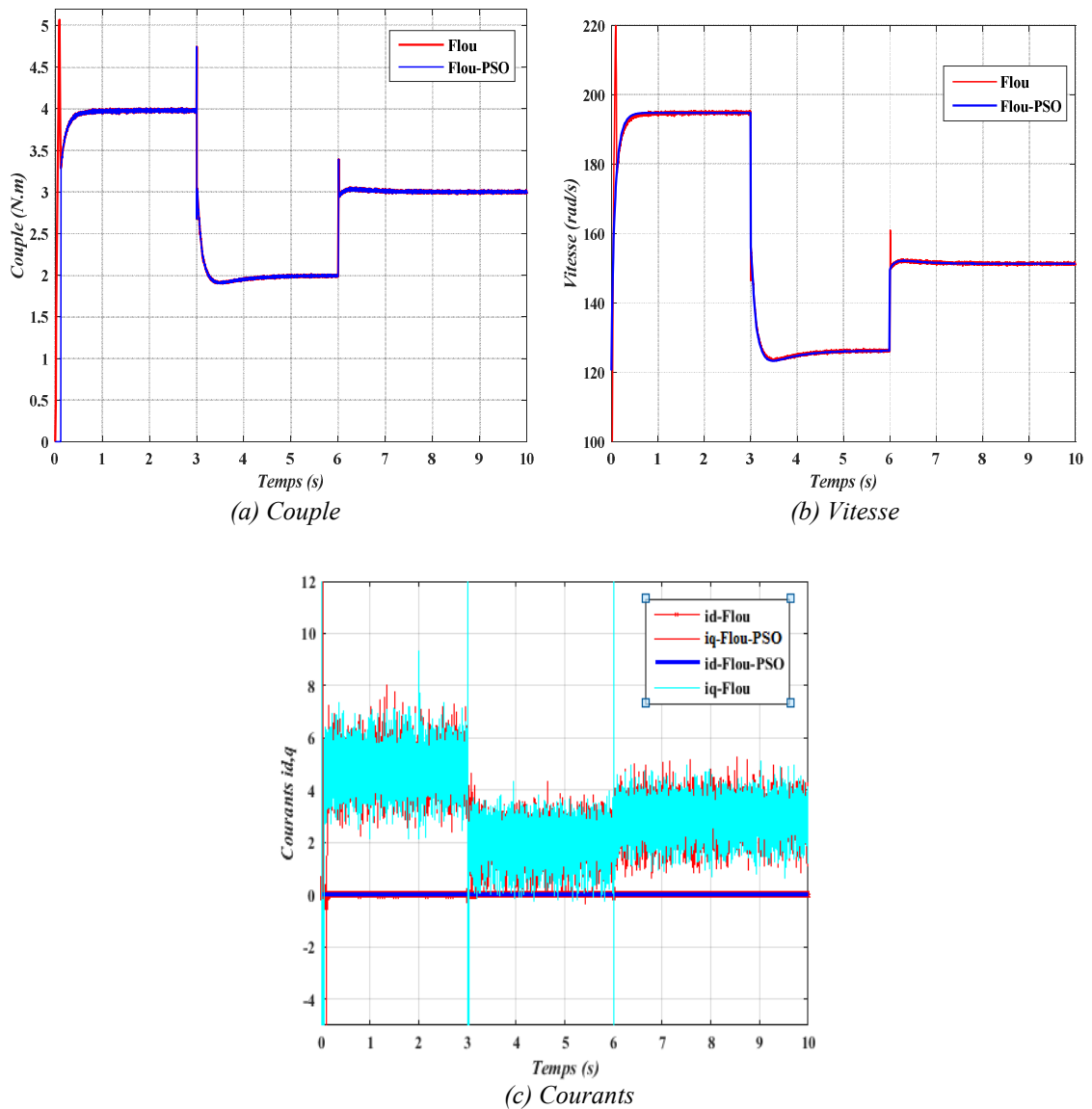


Fig.IV.13. Résultats de simulation des différentes grandeurs du système de pompage PV entraîné par une MSAP et optimisé par la LF et la FL_PSO

La figure (IV.14) montre l'évolution des résultats du système de pompage PV entraîné par le MAS et optimisé par la LF et la LF_PSO. A partir des caractéristiques ci-après et en vérifiant le principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté, on note que la valeur de flux rotorique direct est $\Phi_{rd} = 0.8$ Wb et que le flux rotorique quadratique est $\Phi_{rq} \approx 0$ Wb.

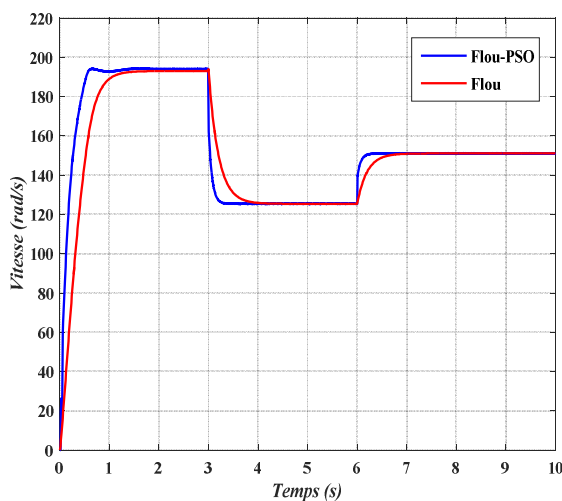
On choisit les deux coefficients, K_E (l'erreur) et K_{CE} (la variation d'erreur), pour permettre de changer la sensibilité du régulateur floue sans en changer la structure. Ce sont ces derniers qui fixeront les performances de l'optimisation et la forme des différentes grandeurs, que ce soit au niveau d'ondulation ou du temps de réponse. Dans ce cas, on prend $K_E = 1000$ et $K_{CE} = 0.01$.

Pour le premier intervalle où $G = 1000$ W/m², aucune différence n'est notée entre les grandeurs mesurées et les valeurs nominales après un régime transitoire de $t = 1.5$ s et $t = 0.6$ s pour le CLF

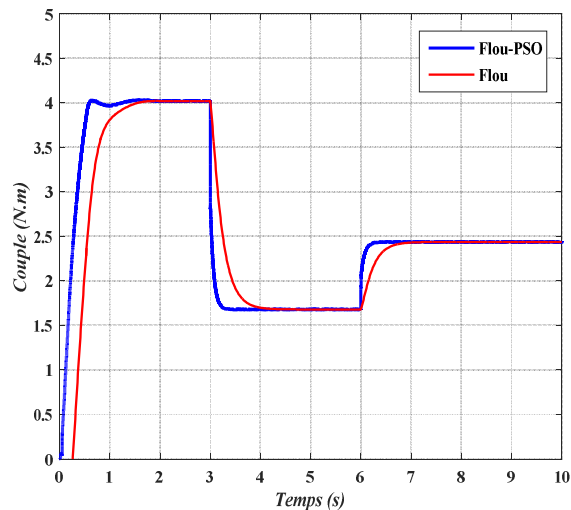
et le CLF_PSO respectivement. La vitesse est 188.5 rad/s, le couple est 4 Nm, les courants statoriques $i_{sd}=3$ A et $i_{sq}=2.2$ A. Une diminution brusque d'éclairement à 300W/m² ferait chuter la vitesse à environ 125 rad/sec, le couple à 1.68 Nm et la valeur du courant statorique quadrature à 1.21 A. Après augmentation à nouveau du niveau d'insolation à 500W/m² et après un régime transitoire presque nul pour le CLF_PSO et d'environ 0.8 s pour le CLF, il y a réajustement aux valeurs optimales qui sont 151 rad/s, 2.43 Nm et 1.85 A pour la vitesse, le couple et le courant statorique quadrature.

Le couple électromagnétique, est l'image du courant quadratique, mais le courant direct reste constant quel que soit la variation de consigne de vitesse (principe de la commande vectorielle). Le flux rotorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature nulle.

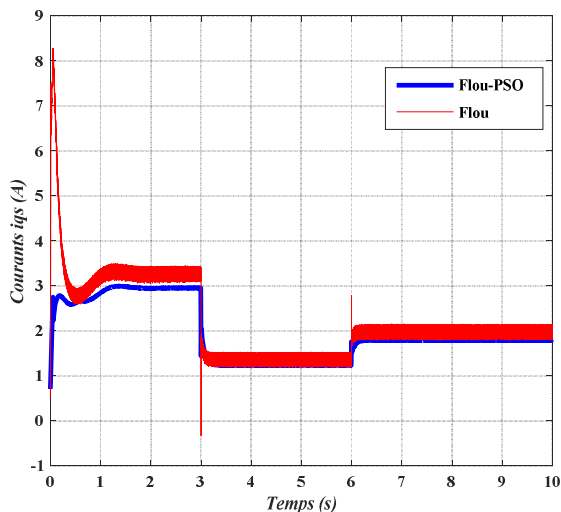
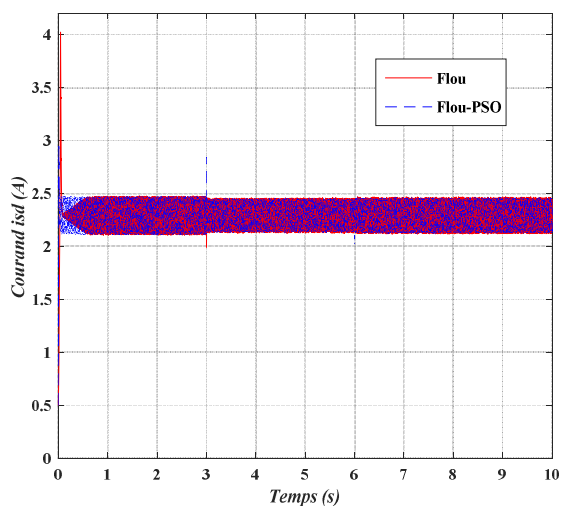
Il à noter que pour le système de pompage PV entraîné par la MAS, il y'a absence des pics lors de la variation aux niveaux d'éclairement pour la commande par le CLF et le CLF_PSO.



(a) Vitesse



(b) Couple



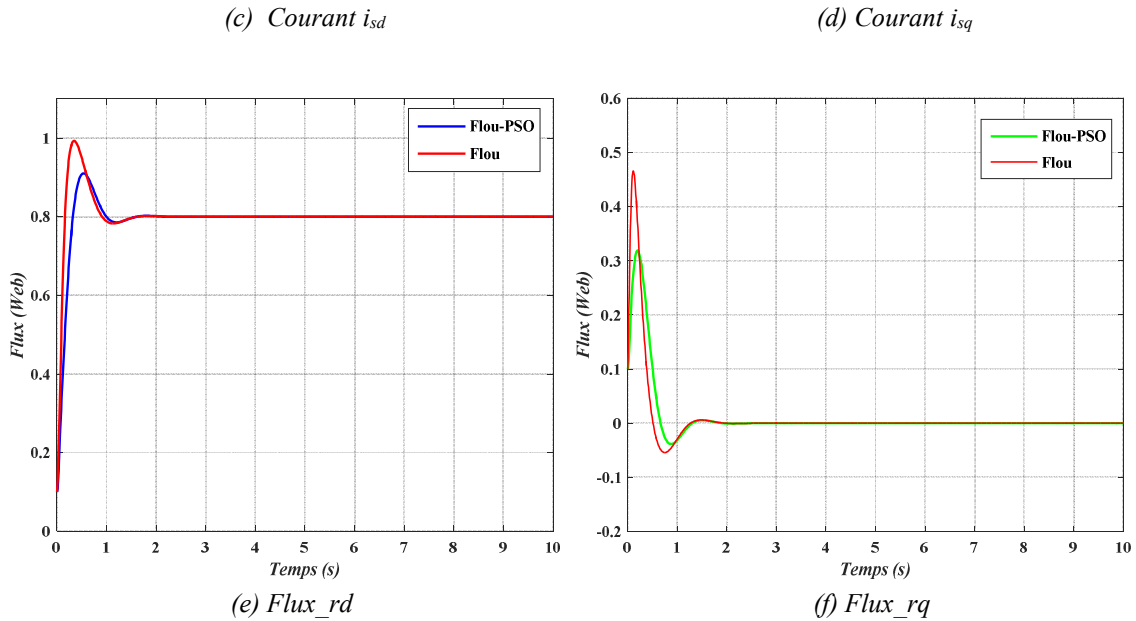


Fig.IV.14. Résultats de simulations des différentes grandeurs du système de pompage PV entraîné par une MAS et optimisé par la LF et la LF_PSO

IV.6.2. Résultats de simulation en régime permanent

Les figures (IV.15) à (IV.18) montrent les différentes grandeurs du système de pompage PV entraîné par une MCC, MSAP et MAS et optimisé par la LF et la LF_PSO, pour un intervalle d'éclairement variant entre 200 W/m² et 1000 W/m² et une température constante T=25°C.

Les caractéristiques (I-V) et (P-V) illustrent la position des points de fonctionnements du groupe motopompe par rapport aux points de puissances maximales du GPV (Figs. IV.15 et IV.16). Les caractéristiques (I-V) et (P-V) de charge du moteur vont glisser vers la bande des valeurs maximales du GPV, qui se situe entre 160 et 210 V avec un petit retard pour le CLF. On peut noter que l'optimisation avec la LF et LF_PSO force le système à fonctionner d'une façon presque idéale. L'optimisation avec le CLF_PSO améliore la vitesse du moteur d'entraînement par rapport au couplage direct.

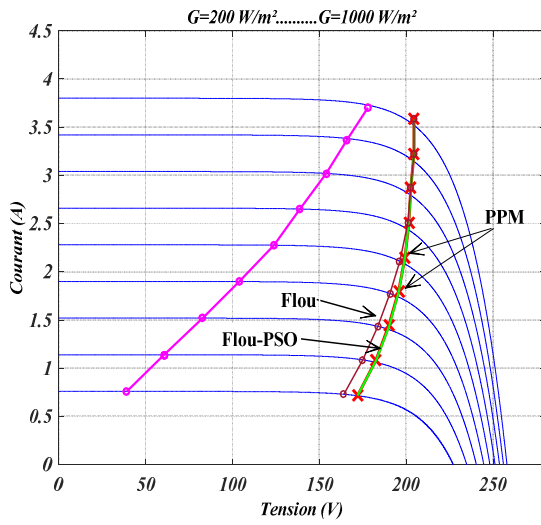


Fig.IV.15. Point de fonctionnement I-V

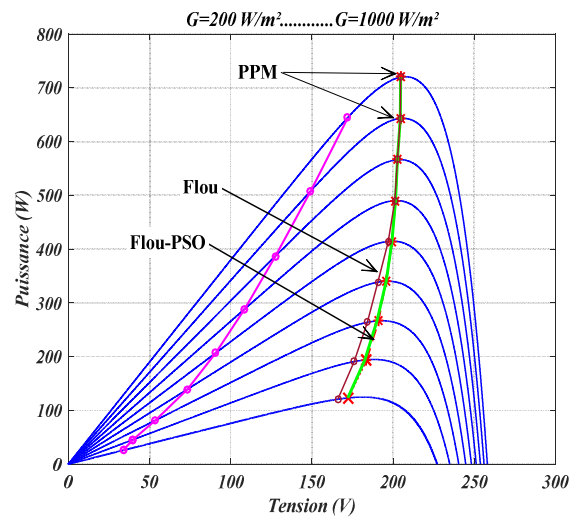
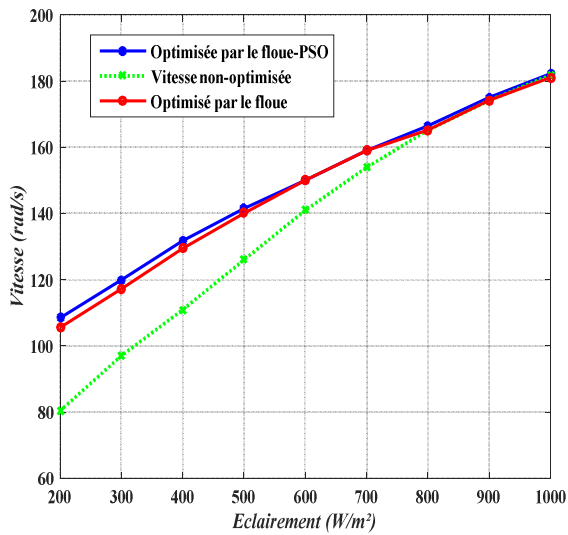
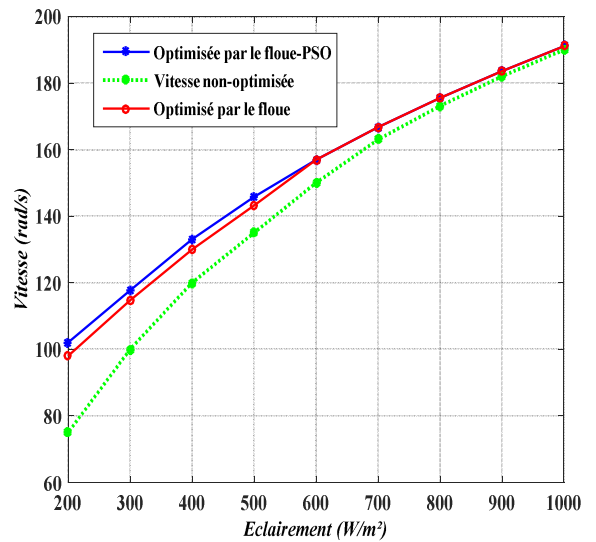


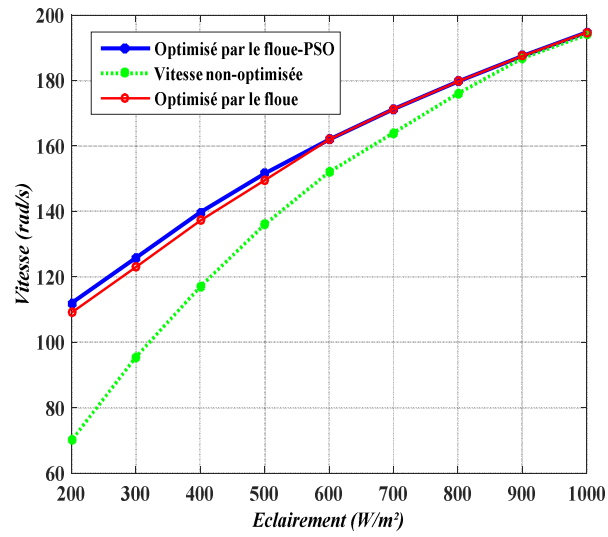
Fig.IV.16. Ligne de puissance P-V



(a) Vitesse_MCC

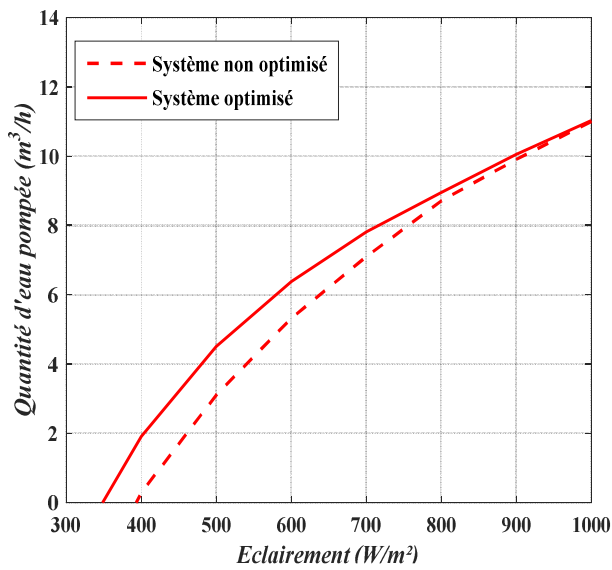


(b) Vitesse_MSAP

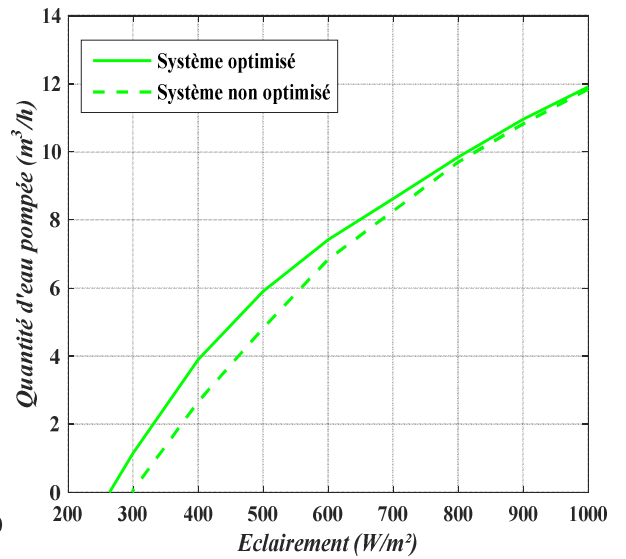


(c) Vitesse_MAS

Fig.IV.16.W(G) avant et après l'optimisation des systèmes de pompage PV entraîné par une MCC, une MSAP et une MAS



(a) Q_{MCC}



(b) Q_{MSAP}

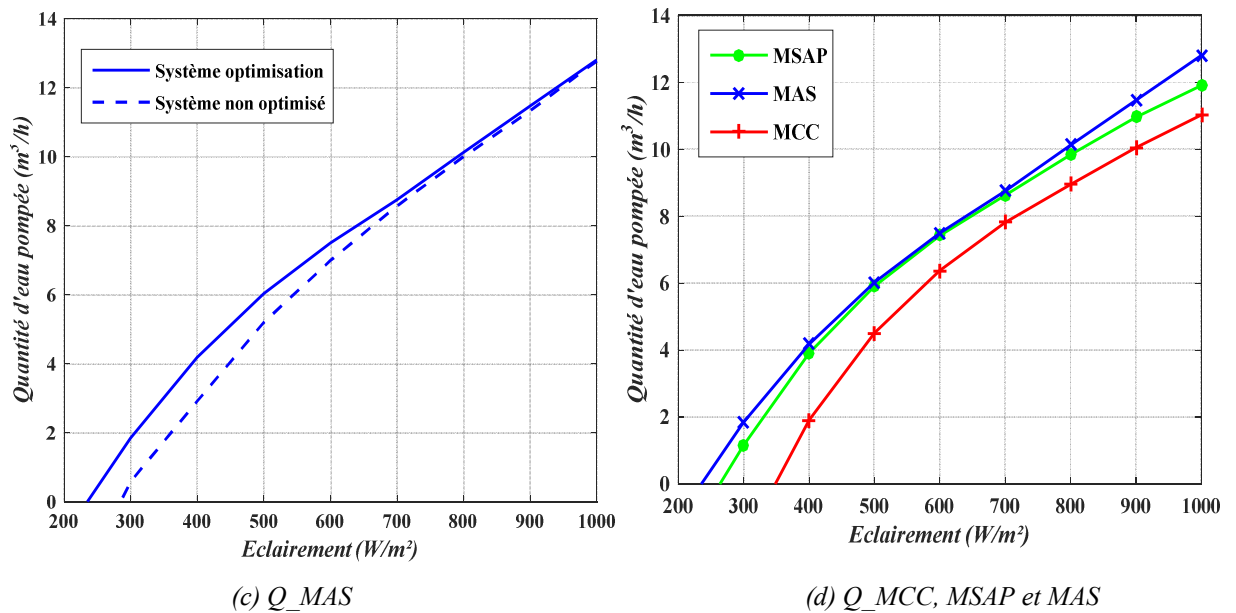


Fig.IV.17. Quantité d'eau pompée $Q(G)$ avant et après l'optimisation par la LF_PSO des systèmes de pompage PV entraîné par une MCC, une MSAP et une MAS

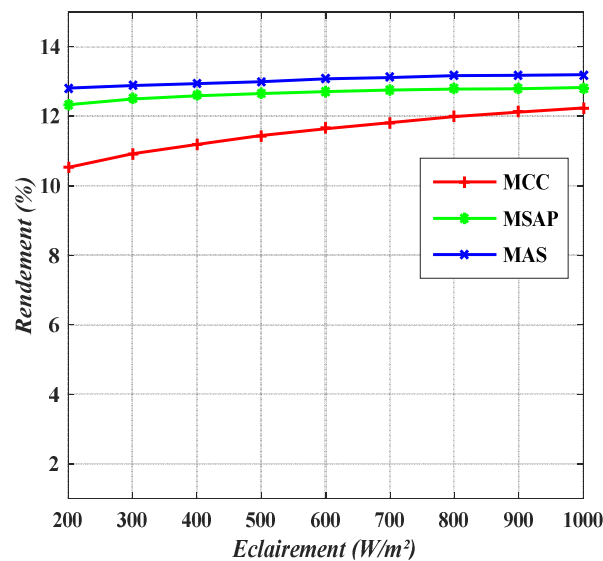


Fig.IV.18. Efficacité globale optimisée des systèmes de pompage PV entraîné par une MCC, une MSAP et une MAS

Les courbes $Q(G)$ montrent que la pompe ne commence à débiter de l'eau qu'après avoir atteint un certain régime. Au-deçà de ce dernier, elle ne peut débiter de l'eau. Ce régime change d'un système à un autre. Dans le cas du couplage direct le système ne commence pas à fournir de l'eau à partir d'un éclairement de 400W/m^2 , 300 W/m^2 et 285 W/m^2 pour la MCC, MSAP et MAS respectivement, par conséquent l'optimisation avec la LF_PSO force la pompe à fournir de l'eau à partir de 345 W/m^2 , 260 W/m^2 et 230 W/m^2 pour la MCC, MSAP et MAS respectivement. L'effet d'optimisation est remarquable pour les faibles éclairagements (inférieur à 600 W/m^2).

On remarque aussi une nette amélioration du rendement global du système. Il est à noter également que le rendement global du système de pompage PV entraîné par la MAS est le meilleur. En conséquence, la quantité d'eau pompée par jour (100.302 m³) est largement supérieure à celle pompée par les systèmes entraînés par la MCC (86.332 m³) et MSAP (93.192 m³) en particulier.

Après avoir comparé les performances des trois systèmes de pompage PV optimisés par la LF et la LF_PSO, on peut noter que les systèmes de pompage PV entraînés par la MAS et la MSAP sont le meilleur choix pour le pompage PV.

IV.7. Conclusion

Dans le but d'éliminer les inconvénients des algorithmes d'optimisation conventionnels, on a introduit, un contrôleur MPPT basé sur la LF et la LF_PSO qui permet de maximiser le point de puissance maximale (MPP) et par conséquent l'efficacité globale et la quantité d'eau pompée des systèmes de pompage PV entraînés par une MCC, MSAP et MAS couplés à une pompe centrifuge.

Les résultats de simulation prouvent que l'optimisation par la FL_PSO peut s'adapter aux incertitudes et donner une réponse rapide et une bonne performance en régime transitoire, peu sensible aux variations des perturbations externes par rapport aux méthodes conventionnelles. Toutefois, il y a un inconvénient qui réside dans le temps de calcul qui est relativement grand dépendant de la classe des fonctions d'appartenance.

Les résultats montrent aussi que la MAS est le meilleur choix pour l'entraînement des systèmes de pompage PV, en termes d'efficacité et de productivité en régime permanent car ces machines nécessitent un faible entretien.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux présentés dans cette thèse concernent la modélisation, l'optimisation et la simulation des configurations les plus existantes des chaînes de pompage photovoltaïque fonctionnant à leur puissance maximale.

Une attention particulière a été portée au développement des modèles de comportement de ces systèmes pour rapprocher le plus possible la réalité des phénomènes. Les systèmes de pompage solaires étudiés consistent en un ensemble d'éléments se trouvant en interaction; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'hacheur, l'onduleur de tension, le moteur à courant continu, le moteur synchrone à aimant permanent, le moteur asynchrone, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique. Nous avons défini pour chacun d'entre eux un modèle mathématique capable de simuler leur comportement dans les conditions réelles de fonctionnement.

L'utilisation de l'énergie solaire pour le pompage d'eau présente un intérêt très important; cependant cette énergie souffre encore du faible rendement, du coût élevé et de la puissance intermittente à cause de la variation des conditions météorologiques dans certaines régions.

Cela se vérifie sur les caractéristiques I-V et P-V sous l'influence de différents éclairagements. L'étude nous a montré que le courant débité par le GPV est pratiquement proportionnel à l'éclairage, et que le meilleur rendement est obtenu lorsque le GPV n'est pas ombragé et pendant les jours à ciel dégagé.

L'étude nous a montré aussi que les systèmes de pompage PV peuvent varier considérablement selon le moment des besoins en eau, la capacité de la source d'eau, la profondeur des puits, le taux de réapprovisionnement de la source et la variabilité saisonnière.

Actuellement, l'emploi des moteurs alternatifs dans les systèmes de pompage PV est largement utilisé, surtout avec l'existence des onduleurs pour la commande de la vitesse.

Les machines asynchrones et les machines synchrones à aimant permanent apportent une solution intéressante pour la réalisation de ce type de système. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines à courant continu, à savoir : une durée de vie élevée, un

rendement élevé, une maintenance réduite. En outre, les MAS présentent le meilleur choix pour ces systèmes en termes d'efficacité et de productivité en régime permanent.

Le problème qui se pose pour les systèmes solaires est généralement une exploitation non optimale de ces systèmes. Alors une adaptation est nécessaire pour maximiser son rendement d'une part et de réduire leurs coût d'autre part. Pour parvenir à cet objectif, nous avons opté pour différentes techniques d'optimisation. Nous avons d'abord étudié l'optimisation conventionnelle de la puissance du GPV avec les algorithmes "Perturb and Observe" (P&O) puis l'algorithme "Increment of Conductance" (INC).

Nous avons constaté une variation très sensible du rapport cyclique du hacheur côté GPV lorsque l'éclairement varie. Cette sensibilité est dépendante de la nature de la charge. Afin de résoudre ce problème, nous avons présenté un algorithme basé sur les techniques numériques (l'optimisation par le mode glissant CMG).

Une étude comparative entre ces trois types de commande, nous a amené à conclure que le contrôle par mode glissant est plus performant que les deux autres algorithmes en termes de rapidité. Mais en terme d'ondulation, le CMG a plus d'ondulations de tension que les deux autres algorithmes (P&O et INC), et cela est dû au phénomène de chattering.

Afin de résoudre ce problème, nous avons présenté quelques algorithmes basés sur les techniques d'intelligence artificielle (floue et floue_PSO).

Au premier palier, nous avons présenté le contrôleur flou dont la conception est basée sur les règles linguistiques générales qui nous permettent une optimisation du rendement globale des systèmes de pompage PV.

Cependant il n'y a aucune procédure générale pour concevoir un contrôleur flou, vu que beaucoup d'erreurs d'essais, peuvent être rencontrées lors de sa réalisation. Donc on s'est orienté vers l'optimisation de ce contrôleur avec l'optimisation des essaims de particules (PSO). Le PSO peut générer une solution de haute qualité avec des caractéristiques de convergence plus stables et un temps de calcul plus court que les autres méthodes stochastiques.

Les résultats de simulation prouvent que l'optimisation par la LF_PSO peut s'adapter aux incertitudes et donner une réponse rapide et une bonne performance en régime transitoire, peu sensible aux variations des perturbations externes par rapport aux méthodes conventionnelles

avec absence des oscillations de la tension. Toutefois, il y a un inconvénient qui réside dans le temps de calcul qui est relativement grand dépendant de la classe des fonctions d'appartenance.

En perspective, ce travail pourra être complété par:

- L'utilisation de la méthode combinée neuro-floue où mode glissant-floue, optimisées par les algorithmes génétiques, pour l'optimisation de la puissance maximale du système photovoltaïque.
- Le développement d'une carte de pompage solaire pour l'irrigation agricole des différentes régions d'Algérie.
- L'étude des performances des systèmes de pompage solaire dans des sites réels.
- La combinaison de la source d'énergie solaire avec d'autres sources d'énergie renouvelable telle que l'énergie éolienne et les piles à combustibles.

ANNEXES

1. Caractéristiques du module photovoltaïque MSX60 ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

$I_{cc}(\text{A})$	$I_{max}(\text{A})$	$V_{co}(\text{V})$	$V_{max}(\text{V})$	$P(\text{W})$	μ_{Icc}	$N_{cs} \mu_{vco}$	N_{cs}	N_s
3.8	3.5	21.5	17.4	60	-0.00247	0.00222	36	12

2. Paramètres des machines électriques :

Référence:

[1] K. Benlarbi, L. Mokrani "A fuzzy efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system", *Solar energy* 77 pp. 203-216 (2004).

[2] L. Zarour, R. Chenni, "Improvement of synchronous and asynchronous motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 59, no.4, pp. 169-177, 2008.

[3] R. Chedid, "A simplified Electric Circuit Model for the Analyst of hybrid Wind-Fuel Cell Systems" Department of Electrical & Computer Engineering University of Beirut1-4244-1298-6/07/2007IEEE.

▪ Paramètres de la machine asynchrone (MAS)

P_n (W)	I_{sn} (A)	R_s (Ω)	R_r (Ω)	L_d (H)	M (H)	L_d (H)	J_m (Kg/m ²)	B_m (Nm/(rad/s))	P
746	3.4	4	1.143	0.3676	0.3489	0.3676	0.003	$98 e^{-4}$	2

▪ Paramètres de la machine Synchrone à aimant permanent (MSAP):

P_n (W)	I_{sn} (A)	R_r (Ω)	R_s (Ω)	L_d (H)	Φ_e (Wb)	L_d (H)	J_m (Kg/m ²)	B_m (Nm/(rad/s))	P
746	6	1.143	1.93	0.0424	0.8	0.00795	0.003	$8 e^{-4}$	2

▪ Paramètres de la machine à courant continu

P_n (W)	e_a (V)	I_a (A)	R_a (Ω)	L_a (H)	K_E (V/(rad/s))	J_m (Kg/m ²)	B_m (Nm/(rad/s))	K_T (Nm/A)	P
746	180	5.5	8.03	0.045	0.741	0.024	0	0.741	2

3. Pompe centrifuge:

Couple de charge: $C_r=5$ Nm

P_n (W)	a_0 (m/(rad/s) ²)	a_1 (m/(rad/s) ²)	a_2 (m/(m ³ /s) ²)
560	$4.9234e^{-3}$	$1.5825e^{-5}$	-18144

▪ Paramètres de canalisation :

H_g (m)	L (m)	λ (m)	D (m)	g (m ² /s)
10	7.4	0.0396	0.06	9.81

4. Paramètres du régulateur PI

Boucles de régulation	i_{sd}	i_{sq}	Φ_{rd}	ω
K	1272	2.175	2.2677	0.1955
Ki	3436.2	3436.2	5.0000e-5	7.84

5. Les coefficients de normalisées de la logique floue

$K_E = 1000$; $K_{CE} = 0.0005$.

6. Rendement des éléments du système

$\eta_{moteur} = 0.91$, $\eta_{onduleur} = 0.95$, $\eta_{convertisseur} = 0.91$, $\eta_{pompe} = 0.64$ (respectivement le rendement du moteur, celui de l'onduleur, celui du convertisseur et celui de la pompe).

7. Programme d'optimisation des gains de la logique floue par le PSO :

```
mppt4=readfis('mppt4')

pid=[ 0.0100    0.0100    1.0000    2.7688    0.4455    4.0000...
      2.0884    3.9911    0.6561    0.0010];

input(1).range=[-pid(1) pid(1)];
input(2).range=[-pid(2) pid(2)];
output.range=[-pid(3) pid(3)];

Pi=[-(pid(1)) -(2/3)*(pid(1)) -(1/3)*(pid(1)) (1/3)*(pid(1)) (2/3)*(pid(1))
(pid(1))...
    -(pid(2)) -(2/3)*(pid(2)) -(1/3)*(pid(2)) (1/3)*(pid(2)) (2/3)*(pid(2))
(pid(2))...
    -(pid(3)) -(2/3)*(pid(3)) -(1/3)*(pid(3)) (1/3)*(pid(3)) (2/3)*(pid(3))
(pid(3))];

mppt4.input(1).mf(1).params= [Pi(1) Pi(1) Pi(2)];
mppt4.input(1).mf(2).params= [Pi(1) Pi(2) Pi(3)];
mppt4.input(1).mf(3).params= [Pi(2) Pi(3) 0];
mppt4.input(1).mf(4).params= [Pi(3) 0 Pi(4)];
mppt4.input(1).mf(5).params= [0 Pi(4) Pi(5)];
mppt4.input(1).mf(6).params= [Pi(4) Pi(5) Pi(6)];
mppt4.input(1).mf(7).params= [Pi(5) Pi(6) Pi(6)];

mppt4.input(2).mf(1).params= [Pi(7) Pi(7) Pi(8)];
mppt4.input(2).mf(2).params= [Pi(7) Pi(8) Pi(9)];
mppt4.input(2).mf(3).params= [Pi(8) Pi(9) 0];
mppt4.input(2).mf(4).params= [Pi(9) 0 Pi(10)];
mppt4.input(2).mf(5).params= [0 Pi(10) Pi(11)];
mppt4.input(2).mf(6).params= [Pi(10) Pi(11) Pi(12)];
mppt4.input(2).mf(7).params= [Pi(11) Pi(12) Pi(12)];

mppt4.output.mf(1).params= [Pi(13)];
mppt4.output.mf(2).params= [Pi(14)];
mppt4.output.mf(3).params= [Pi(15)];
```

```
mppt4.output.mf(4).params= [0];  
mppt4.output.mf(5).params= [Pi(16)];  
mppt4.output.mf(6).params= [Pi(17)];  
mppt4.output.mf(7).params= [Pi(18)];
```

```
g1=pid(4);  
g2=pid(5);  
g3=pid(6);  
k1=pid(7);  
k2=pid(8);  
k3=pid(9);  
k4=pid(10);
```

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CAROLYN SYMON « Changement climatique : faits, tendances et implications pour le monde économique » Cinquième Rapport d'Évaluation du GIEC, Groupe de Travail n°1. Septembre 2013.
- [2] Phillipe Amprosi, Stéphane Hellegate « Changement climatiques et enjeux de sécurité » Centre international de recherche sur l'environnement et le développement, Septembre 2005.
- [3] Simon Coquillaud, « kit pédagogique changements sur les climatiques » CIAT International Center for Tropical Agriculture Mars 2015
- [4] Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles « Politique énergétique 2016-2025, Tendances mondiales et continentales » Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2014.
- [5] Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla » Doctorat en Sciences université el Hadj Lakhdar – Batna 10/2015.
- [6] Observ'ER, l'Observatoire des Energies Renouvelables, “La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde”, Quinzième Inventaire Edition 2013.
- [7] “Rapport Mondial 2012 Sur Les Energies Renouvelables”, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- [8] Ministère de l'Énergie et des Mines « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2007 Alger.
- [9] Agence Internationale de l'Énergie (AIE) « Energy technology perspectives 2015, mobilising innovation to accelerate climate action » IEA PUBLICATIONS, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15.
- [10] Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Rekingier « Global market outlook For Photovoltaics 2014-2018 » EPIA – the European Photovoltaic Industry Association 2014
- [11] Paul Scherrer « Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050 » Publié en 2013 par : Conseil Français de l'Énergie 12 rue de Saint-Quentin 75010 Paris – France.
- [12] Antoine Laurent « Énergies, matières premières et mondialisation » UTL Faits de société 2013-2014.
- [13] Oliver Schäfer, James Watson « Global Market Outlook For Solar Power / 2015 - 2019 » EPIA – the European Photovoltaic Industry Association 2014.
- [14] Alsaleh, Sami « Investigation of a jet pump system performance for cleaning of photovoltaics panels » Doctoral, Thesis (Ph.D.), University of Nottingham. 2017
- [15] Ministère de l'énergie « Programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie » le ministère de l'énergie SATINFO 2016.
- [16] Ministère des Affaires Etrangères du Danemark « Appui technique/prestations de services pour l'évaluation de l'impact économique, technologique et environnemental de la réglementation nationale et des incitations relatives aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique » Algérie (Projet) Avril 2010
- [17] CREG (Commission de régulation de l'électricité et du gaz) 2008: Rapport annuel, Alger.
- [18] AIE (Agence Internationale de l'Énergie) 2010: Electricité/chaleur en Algérie en 2007, Paris.

- [19] « Bilan Énergétique National 2016 » Ministry of Energy Edition 2017.
- [20] Ministère de l'énergie et des mines « Directives en matière d'énergies renouvelables » Edition 2007, Alger.
- [21] AIE « Bilan énergétique de l'Algérie » Agence Internationale de l'Energie, 2009- 2005 Paris
- [22] AIE. « Statistiques mondiales clés en matière d'énergie » Agence Internationale de l'Energie, Paris 2008.
- [23] Ministry of energy and mines designed « Renewable Energy and Energy Efficiency Program» Sonelgaz Group Company, March 2011.
- [24] Nations Unies, commission économique pour l'Afrique « le secteur des énergies renouvelables dans l'Afrique du nord» Septembre 2012 B.P. 2062 Rabat Riad, Maroc
- [25] <https://www.planetoscope.com/Source-d-energie/1811-production-mondiale-d-electricite.html>.
- [26] APS Review Downstream Trends 2009: Algeria « Power Generation» Article daté du 9 février 2009.
- [27] Kamel Ait Cherif « Les enjeux et les défis de la transition énergétique en Algérie» Algérie ECO, 21 mars 2017.
- [28] <http://www.andi.dz/index.php/fr/les-energies-renouvelables>
- [29] Jimmy Royer Thomas Djiako Eric Schiller Bocar SadaSy «Le Pompage Photovoltaïque» IEPF/Université' Ottawa/EIER/CREPA. 1998.
- [30] Yann PANKOW « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque » Thèse de doctorat, Electronique Electrotechnique et Automatique. 2004.
- [31] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en développement », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME)
- [32] A. buyers « Les systèmes photovoltaïques » guide, Article, Canada, 2002.
- [33] Stuart R. Wenham, Martin A. Green, « APPLIED PHOTOVOLTAICS Second Edition » Earth scan in the UK and USA in 2007.
- [34] Gourbi Abdelkader « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque hybride de production d'énergie électrique» Thèse de doctorat Intelligent Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [35] Aysar M.M. Yasin «Distributed Generation Systems Based on Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell» International PhD In Energy University à Degli Studidi Catania.
- [36] Hadi Malek « Control of grid-connected photovoltaic systems using fractional order operators» Thesis doctoral UTAH STATE UNIVERSITY Logan, Utah 2014.
- [37] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » l'Université de Toulouse, 2009.
- [38] Hany Ferdinando, Heri Saptono Warpin dyasmoro, Stanley Kardinal Jusuf 1st Kentingan Physics Forum July 23 – 24, 2001 – Surakarta Developing Mathematical Model of DC Servo Motor Using Bond Grap.
- [39] Abdulrahman Mohammed Al-Ibrahim, 'Optimum Selection of Direct-Coupled Photovoltaic Pumping System in Solar Domestic Hot Water Systems', Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering), University Of Wisconsin-Madison, 1997

- [40] Jean-Paul Louis « Modélisation des machines électriques en vue de leur commande » série génie électrique 2013.
- [41] S. Canat, J. Faucher : "Simulation temporelle d'un démarrage d'une machine asynchrone à cage", IRCCYN Nantes, Journées du 24 et 25 octobre 2002
- [42] M. Poloujadoff : "Machines asynchrones : Régimes quelconques", Article D3485, Technique de l'ingénieur, 02, 2000.
- [43] R. E. Katan, V. G. Agelidis, C. V. Nayar : "Performance analysis of a solar water pumping system", Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers, and Energy. Systems for Industrial Growth (PEDES), 81-87, 1996.
- [44] Dr. ir. S. A. Miedema: "Modeling & simulation of the dynamic behavior of a pump /pipeline system", http://www.oep.tudelft.nl/dredging/miedma/1996_weda/weda96.htm, 2000.
- [45] R. Moraes Duzat: "analytical and experimental investigation of photovoltaic pumping systems", thesis of "doctors der naturwissen schaften", university of Oldenburg - Germany, 2000.
- [46] Mustapha Belarbi « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque » thèse de Magister Université. des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2006.
- [47] Jeff Kenna and Bill Giki « SOLAR WATER PUMPING»A Handbook. Intermediate Technology Publications 1985.
- [48] A. Ricaud : "Photopiles solaires", Presses polytechniques et universitaires romandes Lausanne –Suisse (Première édition), 1997.
- [49] M. Arrouf and S. Ghabrou, "Modeling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the Simulink programming environment," Desalination Solar Energy, vol. 209, no. 1, pp. 23-30, April 2007.
- [50] K. Benlarbi, "Fuzzy, neuronal and neuro-fuzzy optimization of a photovoltaic water pumping system driven by DC an AC motors," Master Thesis, , Batna University., Algeria 2003.(in French)
- [51] A. Bouchakour and M. Brahami, "A comparative and analytical study of various MPPT techniques applied in PV systems for fast changing environmental conditions," 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference, Marrakech, Ouarzazate, Morocco, December 2015.
- [52] Elgendy, Mohammed Ali Mohammed "Photovoltaic pumping systems with microcontroller-based MPPT control" Doctoral Thesis (Ph.D.) University of Newcastle upon Tyne, 2010.
- [53] A. Bouchakour and M. Brahami, "Study of a photovoltaic system using MPPT Buck-Boost converter," International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, vol. 3, no.1, pp. 65-68, February 2015.
- [54] A. SARR "Simulation des systèmes hybrides photovoltaïques", Maîtrise en technologie des systèmes M. ING, Ecole de technologie supérieure. Université du Québec – Montréal, 12, 1998.
- [55] Fawzan Salem, Mohamed, A. Awadallah "Detection and assessment of partial shading in

- photovoltaic arrays” *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 3 (2016) 23–32.
- [56] L. Fialhoa, R. Melicio “Effect of Shading on Series Solar Modules: Simulation and Experimental Results” *Science direct, Procedia Technology* 17 (2014) 295 – 302.
- [57] Makbul A.M. Ramli, Sennoga Twaha “A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017) 144–159.
- [58] A. Fezzani, I. Hadj Mahammed , and S. Said, “MATLAB-Based Modeling of Shading Effects in Photovoltaic arrays” STA'2014-PID3406- REC.
- [59] M. Saadsaoud *, H A. Abbassi « Study of Partial Shading Effects on Photovoltaic Arrays with Comprehensive Simulator for Global MPPT Control” *International Journal of Renewable Energy Research* M. Saad saoud et al., vol.6, no.2, 2016
- [60] H. S. Ramirez and R.S. Ortigoza, “Control design techniques in power electronics devices,” Springer- Verlag London, pp. 235-358, 2006.
- [61] Hebertt Sira-Ramírez and Ramón Silva-Ortigoza “Control Design Techniques in Power Electronics Devices” Springer-Verlag London Limited 2006.
- [62] A. IVANOV SMOLENSKI“ *Machines électriques_1*” Edition Mir Moscou 1982.
- [63] A. IVANOV SMOLENSKI“ *Machines électriques_2*” Edition Mir Moscou 1982.
- [64] Jean Chatelin“ *Machines électriques X*” Ecole Polytechnique fédérale.
- [65] M. Kostenko“ *Machines électriques Tom II*” Edition Mir Moscou 2002.
- [66] Paul Akiki « Conception multi-physique de machines électriques à flux radial et axial pour des applications à entraînement direct» thèse doctorat, École Supérieure d'Electricité, September 2017
- [67] J.P. Carou and J.P. Hautier, “Modélisation et commande de la machine asynchrone, ” *Méthode et pratique de l'ingénieur*, Paris, Chapitre 2, pp. 42,1995.
- [68] L. Zarour, R. Chenni, “Improvement of synchronous and asynchronous motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control,” *Journal of Electrical Engineering*, vol. 59, no.4, pp. 169-177, 2008.
- [69] G. Didier, H. Razik "Sur la détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones", *Revue 3EI*, numéro 27, 12, 2001.
- [70] O. Atlam and M. Kolhe, “Performance evaluation of directly photovoltaic powered DC PM (direct current permanent magnet) motor-propeller thrust system,” *Energy*, vol. 57, pp. 692-698, June 2013
- [71] A. Khalief, “Contribution à la commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimant permanents (MSAP),” *Doctoral thesis*, Marseille University, 2012. (in French)
- [72] H. Bouzeria, C. Fetha and T. Bahi, “Fuzzy logic space vector direct torque control of PMSM for photovoltaic water pumping system,” *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 760-771, April 2015.
- [73] A. Ghoneim, “Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 11, pp. 1449-1463, Oct 2006.
- [74] A. Mokeddem and A. Midoun, “Performance of a directly-coupled PV water pumping

- system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 10, pp. 3089-3095, April 2011.
- [75] J. Appelbaum, “Starting and steady-state characteristics of dc motors powered by solar cell generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. EC-1, no. 1, pp. 17-25, March 1986.
- [76] V. C. Mummadi, “Steady-state and dynamic performance analysis of PV supplied DC motors fed from intermediate power converter,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 61, no. 4, pp. 365-381, February 2000.
- [77] P. Packiam and N. K. Jain, “Steady and transient characteristics of a single stage PV water pumping system,” *Energy Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 173-199, December 2014.
- [78] A. Betka and A. Attali, “Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory,” *Solar Energy*, vol. 84, no. 7, pp.1273-1283, April 2010.
- [79] D. Rekioua, A.Y. Achour “Tracking power photovoltaic system with sliding mode control strategy” *Energy Procedia* 36 (2013) 219 – 230.
- [80] Salim ABOUDA « Contribution à la commande des Systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage» Thèse doctorat en cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax.
- [81] L. Van der Merwe, G. J. Van der Merwe "Maximum power point tracking – Implementation Strategies", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1(1): 214-217, 1998.
- [82] J. H. R. Enslin, M. S. Wolf, D. B. Suyman, W. Swiegers "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(6): 769-773, 1997.
- [83] A. Brambilla, M. Gambarara, A. Garutti, F. Ronchi: "New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking", *Proceedings of the 30th IEEE Power Electronics Conference*, 632-637, 1998.
- [84] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, M. Osakada: "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", *IEE Proceedings of Generation, Transmission, Distribution*, 142(1): 59-64, 1995.
- [85] M. S. Taha, K. Suresh : "Maximum power point tracking inverter for photovoltaic source pumping applications", *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers, and Energy Systems for Industrial Growth (PEDES)*, 883-886, 1996.
- [86] Campana, Pietro Elia, Li, Hailong, Zhang, J., Liu, J. "Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation" *In: Energy Conversion and Management*, ISSN 0196-8904, E-ISSN 1879-2227, Vol. 95, 32-41 p.
- [87] Zarour Laid "Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau" Doctorat en sciences en électrotechnique option : machines électriques. Université Mentouri de Constantine
- [88] J. Appelbaum, "Starting and Study State Characteristics of DC Motors by Solar Cell ". *Solar Energy*, Vol. EC-1, N°1, pp17-25, March1989.
- [89] Y. Roger H. siao, "Direct Coupling of Photovoltaic Power Source to Water Pumping System ", *Solar Energy*, Vol.32, N°4, pp489-498, 1984
- [90] W. R. Anis, H. Metwally, "Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping

- System", *Solar Energy*, Vol.53, N°4, pp369-377, 1994
- [91] D. P. Hohm, M. E. Ropp "Comparative study of maximum power point tracking algorithms", *Progress in photovoltaic: research and applications*, 11: 47-62, 2003.
- [92] Dalila Beriber, Abdelaziz TALHA "MPPT Techniques for PV Systems" 978-1-4673-6392-1/13/\$31.00 ©2013 IEEE
- [93] Y. Kim, H. Jo, D. Kim "A new peak power tracker for cost-effective photovoltaic power system", *IEEE Proceedings*, 3(1): 1673-1678, 1996.
- [94] Nafaa Jeddi, Lilia El Amraoui Ouni "Comparative Study of MPPT techniques for PV Control Systems" 978-1-4799-7300-2/14/\$31.00 ©2014 IEEE
- [95] Hassan Abouobaida, Mohamed Cherkaoui "Comparative Study of Maximum Power Point Trackers for Fast Changing Environmental Conditions" 978-1-4673-1520-3/12/\$31.00 ©2012 IEEE
- [96] Rokeya Jahan Mukti, Ariful Islam "Designing an Efficient Photovoltaic System with Maximum Power Point Tracking Technique by Comparing Different Converter Topologies" 978-1-4799-6288-4/14/\$31.00 ©2014 IEEE
- [97] S. Nemsı , L. Barazane "Comparative study between two maximum power point tracking (MPPT) techniques for photovoltaic system" *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°4 (2013) 773 – 782
- [98] Abdelhak Bouchakour, Mostefa Brahami "A Comparative and Analytical Study of Various MPPT Techniques Applied in PV Systems for Fast Changing Environmental Conditions" 978-1-4673-7894-9/15/\$31.00 ©2015 IEEE
- [99] Anosov D.V. «On Stability of Equilibrium Points of Relay Systems». *Automation and remote control*, Vol. 2, pp. 135-149, 1959.
- [100] Tzypkin Y. Z., "Theory of Control Relay Systems". Moscow, Gostekhizdat, 1955 (en Russe).
- [101] Emelyanov S.V. "On Peculiarities of Variable Structure Control Systems with Discontinuous Switching Functions". *Doklady ANSSR*, Vol. 153, pp. 776-778, 1963.
- [102] Abdalmoaty, Mohamed « Learning Stochastic Nonlinear Dynamical Systems Using Non-stationary Linear Predictors Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2017, 186 p.
- [103] Emelyanov S.V. «Variable Structure Control Systems". Moscow Nauka, 1967.
- [104] Itkis U. «Control Systems of Variable Structure». J. Wiley: New York, 1976.
- [105] Utkin V. I. "Sliding Mode and their Application in Variable Structure Systems». Mir, Moscou, 1978.
- [106] Edwards C. et Spurgeon S. "Robust Output Tracking using a Sliding Mode Controller Observer Scheme". *Int. Jour. of Cont*, Vol. 64, N 5, pp. 967-983, 1996.
- [107] Sira-Ramirez H. "On the Dynamical Sliding Mode Control of Nonlinear Systems". *Int. Jour. of Cont*, Vol. 57, pp. 1039-1061, 1993.
- [108] S.C. Lin, and Y.Y Chen (1995) "A GA-based fuzzy controller with sliding mode," *IEEE International Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 1103-1110.
- [109] Hedrick J.K., Slotine J.J.E. et E.A. Misawa "Nonlinear State Estimation using Sliding Observers". In *Proc. of 25th IEEE Conf. on Dec and Cont*, Greece, pp. 332-339, 1986.
- [110] Yang J.M. et Kim J.H. "Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Non-holomic

- Wheeled Mobile Robots". IEEE Trans. on Robot. And Auto, Vol.15, N 3, pp. 578-587, 1999.
- [111] Bag S. K., Spurgeon S. K. et Edwards C. "Dynamic Output Feedback Sliding Mode Design for Linear Uncertain Systems". Proceedings of the 35 th Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, 1996.
- [112] Bloch A. et Drakunov S., "Stabilization and Tracking in the Non-homonymic Integrator via Sliding Mode". Systems and Control Letters, Vol. 29, pp. 91-99, 1996.
- [113] Seungrohk O. et Khalil H., «Output Feedback Stabilization using Variable Structure Control». International Journal of Control, Vol. 62, N 4, pp. 831-848, 1995.
- [114] Guldner J. et Utkin V.I., «Tracking the Gradient of Artificial Potential Fields: Sliding Mode Control for Mobile Robots». International Journal of Control, Vol. 63, No3, pp. 417-432, 1996.
- [115] Fossard A.J., "Commande à structure variable : poursuite approchée du modèle. Application à l'hélicoptère" Rapport Technique DERA 16791, 1991.
- [116] Young K.K.D., "Asymptotic Stability of Model Reference Systems with Variable Structure Control". IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 22, pp. 279-281,
- [117] A.S.I. Zinober, O.M.E. El Ghezawi et Billings S.A. "Multivariable Structure Adaptive Model Following Control Systems". Proceedings of IEE, Vol. 129, pp. 6-12, 1982.
- [118] Boukhobza T., Djemai M. et Barbot J.P. "Nonlinear Sliding Observer for Systems in Output and Output Derivative" Proceedings of IFAC World Congress, Vol. 6, pp. 299-305, 1996.
- [119] Koshkouei A. J. et Zinober A. S. I. "Sliding Mode State Observers for Linear Multivariable Systems". Proceedings of the 34 th Conference on Decision and Control, NewOrleans, 1995.
- [120] BENMANSOUR Souhila "Génération de mouvement optimal et commande d'un bras manipulateur hyper dynamique" Doctorat en Sciences. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2015/2016
- [121] M. Rabia BENAYACHE "Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires incertains : application à un système hydraulique" Doctorat de l'Université de Valenciennes Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle 2009/2010.
- [122] B. Karim "Approche Polytopique de la Commande de Systèmes Incertains par Modes Glissants d'Ordre Supérieur : Application aux Robots Flexibles", Thèse doctorat 2010.
- [123] M. C. S. Alaoui, "Commande et Observateur par Modes glissants d'un Système de Pompage et d'un Bras Manipulateur", Thèse de doctorat Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 2009.
- [124] M.S. Merzouga, H. Benalla, L. Louze, «Sliding Mode Control (SMC) Of Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) » Energy Procedia Vol.18, pp 43 – 52, 2012.
- [125] H. D. Battista, R. J. Mantz, C. F. Christiansen «Dynamical Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generators», IEEE, Vol. 15, Issue. 4, December 2000.
- [126] B. Beltran "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur" Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [127] A. Borni, "Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie

- électrique” Thèse de Doctorat, Dept. Elec. Eng Sciences., Constantine 1 Univ., 2015.
- [128] A. Chihi, A. Chbeb, and A. Sellami, “Switching function optimization of sliding mode control to a photovoltaic pumping system ”Studies in Computational Intelligence, vol. 576, pp. 463-493, November 2014.
- [129] J. E. Slotine et W. Li “Applied nonlinear control” Printice-Hall International, 1991. p.21
- [130] U. BENZ « Réglage par Mode de Glissement Hybride, Applique au Réglage de Position de Systèmes Electromécaniques », Thèse de doctorat Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 1992.
- [131] 8. Y. dote and R.G.hoft, "Microprocessor based sliding mode controller for dc motor drives" presented at the Industrial Application. SOC. Annu. Meeting, Cincinnati, OH, 1980.
- [132] S. Seshagiria et H. K. Khalil “On introduction integral action in sliding mode control” Proceeding of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, Nevada USA, (1473-1479), 2002.
- [133] S. Seshagiria et H. K. Khalil “Robust output feedback regulation of minimum-phase nonlinear systems using conditional integrators” Automatica, 41(43-54), 2005.
- [134] F. Harashima, H. Hashimoto et K. M. Practical: robust control of robot arm using variable structure systems. Proceeding of IEEE, Int. Conf. on robotics and automation San Francisco, (532-534), 1986.
- [135] A. Bondarev, S. Bondarev, N. Kostilyeva “Sliding modes in systems with asymptotic observers” Automation and Remote Control, 46(5)(679-684), 1985
- [136] Slotine J.J. et Sastry S.S. “Tracking Control of Nonlinear System using Sliding Surface, with Application to Robotic Manipulators” Int. Jour. of Cont, Vol. 38, pp. 465-492, 1983.
- [137] Slotine J.J.E. “Sliding Controller Design for Nonlinear Systems” .Int. Jour. of Cont, Vol. 40, N 2, pp. 421-434, 1984.
- [138] Guettaf Abderrazak «Optimisation floue- génétique d'un système de pompage éolien » Thèse Doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra 2013
- [139] Aashoor, Fathi « Maximum power point tracking techniques for photovoltaic water pumping system » Doctoral Thesis (Ph.D.), University of Bath 2015.
- [140] M. TA CAO «Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue» Thèse de Doctorat, Université Laval Québec 1997.
- [141] C. Dualibe, M. Verleysen, Paul G.A. Jaspers «Design of Analog Fuzzy Logic Controllers in Cmos Technologies Implementation, Test and Application» Kluwer Academic Publishers New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow 2003.
- [142] N TKOUTI « Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau par la Logique Floue» Thèse Doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra 2004.
- [143] Chuen Chien “Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, part I” IEEE Transactions on System Mann. And cyri Rsetrs, Vol. 20 No. 2, March/April 1990 pp: 405-

- 417.
- [144] F. Gordillo, F.R. Rubio, E.F. Camacho, M. Brenguel and J.P. Bonilla “Genetic Design of a Fuzzy Logic Controller for a Solar Power Plant” Dr. Dobb’s journal, April 1998.
- [145] O. Demir, I. Keskin, and S. Cetin, “Modeling and control of a nonlinear half-vehicle suspension system: a hybrid fuzzy logic approach,” *Nonlinear Dynamic*, vol. 1, p. 21392151, 2012
- [146] S. Chopra, R. Mitra, and V. Kumar, “A robust scheme for tuning of fuzzy PI type controller,” in 3rd International IEEE Conference Intelligent Systems, 2006, pp. 300–305.
- [147] Z. Li, Y. Yang, X. Gong, Y. Lin, and G. Liu, “Fuzzy control of the semi-active suspension with MR damper based on GA,” in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008, pp. 1–6.
- [148] J. Zhang, Z. Zhao, Y. Sun, and W. Han, “Optimal design of fuzzy logic controller for multibody model of semi-active suspension based on genetic algorithm,” *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications is*, vol. 5, pp. 1478–1483, 2010.
- [149] K. Rajeswari and P. Lakshmi, “PSO optimized fuzzy logic controller for active suspension system,” in *International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, 2010, pp. 278–283.
- [150] R. Naik, K. Sekhar, and K. Vaisakh, “Adaptive PSO based optimal fuzzy controller design for AGC equipped with SMES and SPSS,” *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 8–17, 2005.
- [151] L.A. Zadeh, “information and control,” *Fuzzy Sets*, vol 8, pp 338-353, 1965.
- [152] L.A. Zadeh, “Calculus of fuzzy restrictions,” *Fuzzy sets and their applications to Cognitive and Decision Processes*, pp 1-40, Zadeh, Fu, Tanaka, Shimura editors, 1975.
- [153] H. Bühler, «Le Réglage par la Logique Floue», Presses Polytechniques Romandes, 1994
- [154] Hossam Hosni Shaheen « Voltage-Control Based on Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization Strategy » Master of Science in Electrical Engineering, The Islamic University of Gaza February 2010.
- [155] M.N. Cirstea, A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick «Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems» An imprint of Elsevier Science Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 2002
- [156] S. N. Sivanandam, S. Sumathi and S. N. Deepa «Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB »Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [157] P. Borne, J. Rozinoer, J. Y. Dieulot, "Introduction à la Commande Floue", Edition Technip, 1998.
- [158] E. H. Mamdani, « Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis » *IEEE Trans. Computer*, Vol. 26, N°.12, pp.1182-1191, December.1977.
- [159] J. M. Mendel, « Fuzzy systems for engineering; A tutorial » *IEEE Proc*, Vol. 83, N°3,

- pp347-377, March, 1995.
- [160] R. Zhao, Z. Chang, P. Yuan, L. Yang, Z. Li « A Novel Fuzzy Logic and Anti wind up PI Controller for Three-phase Grid Connected Inverter » 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, IEEE, Vol 1 pp 442-446, December, 2009.
- [161] M. Rosyadi, S. M. Muyeen, R. Takahashi, J. Tamura «A Design Fuzzy Logic Controller for a Permanent Magnet Wind Generator to Enhance the Dynamic Stability of Wind Farms» applied sciences Vol. 2, Issue 4 pp 780-800, 22 Nov. 2012.
- [162] M. Rosyadi, S. M. Muyeen, R. Takahashi, J. Tamura «Fuzzy-PI Controller Design for PM Wind Generator to Improve Fault Ride Through of Wind Farm» International Journal Renewable Energy Research, Vol.3, No.2, pp 308-314, 2013
- [163] E.H. Mamdani, «Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant » Proceedings of IEEE, vol 121, no12, pp 1585-1588, 1974.
- [164] J.P. Barrat, M. Barrat et Y. Lecluse, «Exemple d'application de la logique floue : Commande de la température d'un four pilote», Technique de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôle R7428, juillet 1993.
- [165] J. Botzheim, C. Cabrita, L. T. Keôzy, A. E. Ruano, « Estimating membership Functions Parameters by the Levenberg-Marquardt Algorithm » Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp 1666-1672, 25-29 July 2004, Budapest, Hungary
- [166] R. A. M. Lauchlan, P. Ngamsom, R. Chaloo et S. L. Omar, «Three link planar robotic arm trajectory planning and its adaptive fuzzy logic control » Intelligent Control Systems Laboratory. Texas A&M University, Kingsville, Texas 78363. © 1997 IEEE.
- [167] C.C. Lee, «Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part 1» IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, vol 20, pp 404-418 .1990.
- [168] C.C. Lee, «Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part 2» IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics.
- [169] K. M. Passino. et S. Yurkovich, « Fuzzy Control » © 1998 Addison Wesley Longman, Inc.
- [170] Jorge Hurel, Anthony Mandow «Tuning a Fuzzy Controller by Particle Swarm Optimization for an Active Suspension System» 978-1-4673-2420-5/12/\$31.00 ©2012 IEEE
- [171] A.TERKI*, A. MOUSSI, A. BETKA «the effectiveness of fuzzy logic control for PV pumping system » Courier du Savoir – N°12, Octobre 2011, pp.47-55
- [172] E. V. Broekhoven, B. D. Baets, «A Comparison of Three Methods for Computing the Centre of Gravity Defuzzification» Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp 1537-1542 ,25-29 July 2004,Budapest, Hungary

- [173] J. S. Jean et H. B. Diab, «Defuzzification Techniques for Fuzzy Controllers,» IEEE Trans on Main, Cyb- part B, Vol 30, no 1, pp 223-229,1999.
- [174] H. L. Hey, J. D. P. Pacheco, J. Imhoff, and R. Gules, «A Maximum Power Point Tracking System With Parallel Connection for PV Stand-Alone Applications», IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, Issue. 7, pp. 2674–2683, Jul. 2008.
- [175] M. Hatti, «Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque» JCGE'08 LYON, 16 et 17 Décembre. 2008.
- [176] C.Y.Won, D.H.Kim, S.Chan Kim, W.S. Kim, H.S. Kim «A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays, Using Fuzzy Controller», IEEE Power Electronics Specialists Conference Vol.1, pp 396-403, 1994.
- [177] Tsai-Fu Wu, C.H. Chang, Y.K. Chen, «A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Applications», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, Issue. 2, pp 287-296, April 2000.
- [178] N. Patchara prakiti, S. Premrude epre chacharn,Y. Sriuthai siriwong « Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System » Renewable Energy ,Vol.30,Issue 11, pp 1771–1788, 2005.
- [179] V. I. Utkin, «Sliding Modes in Control and Optimization » Springer-Verlllg, Berlin, Heidelberg. Printed in The United States of America 1992.
- [180] V. Utkin, J. Guldner, J. Shi «Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems» Second Edition by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an Imprint of Taylor & Francis Group, an Informa Business 2009.
- [181] R. Eberhart, J. Kennedy, «A new optimizer using particle swarm theory» Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE Press, pp. 39-43,1995.
- [182] Salima Nebti «Reconnaissance de Caractères Manuscrits par Intelligence Collective » Thèse de doctorat Université Ferhat Abass-Sétif Mars 2017.
- [183] M. Dorigo, G. Di Caro, «The ant colony optimization meta-heuristic: New ideas in optimization». McGraw-Hill Ltd., UK, Maidenhead, UK, England. 1999.
- [184] D.E. Goldberg, «Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning». Addison Wesley. Pp. 41. 1989.
- [185] J. Kennedy, R.C. Eberhart, «Swarm Intelligence». Morgan Kaufmann. ISBN 1-55860-595-9. 2001.
- [186] DT. Pham, E. Koç, J.Y. Lee, J. Phrue ksanant, «Using the Bees Algorithm to schedule jobs for a machine», Proc Eighth International Conference on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance, LAMDAMAP, Euspen, UK, Cardiff, p. 430-439. 2007.
- [187] Y. Cooren, «Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique, » Thèse de doctorat en science, Spécialité : sciences de l'ingénieur, université paris 12 val de marne, 2008.

- [188] Abdelhalim Borni, Noureddine Bouarroudj, Abdelhak Bouchakour «P&O-PI and fuzzy-PI MPPT Controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: a comparative study» *Int. J. Power Electronics*, Vol. 8, No. 4, 2017
- [189] Y. Cooren, A. Nakib, P. Siarry. «Image Threes holding using TRIBES, a parameter-free Particle Swarm Optimization Algorithm » *Proceedings of the International Conference on Learning and Intelligent Optimization*, pp 81-94. Springer, 2008.
- [190] Y. Cooren, M. Clerc, P. Siarry. «Performance evaluation of TRIBES, an adaptive particle swarm optimization algorithm ». *Swarm Intelligence*. Vol. 3, N° 2, pp 149- 178, 2009.
- [191] A. El Dor, « Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d'images et en électronique », Thèse de doctorat en informatique, université paris-est école doctorale mathématiques et STIC (MSTIC, E.D. 532) 2012.
- [192] X. Cai and Y. Tan, «A study on the effect of Vmax in particle swarm optimization with high dimension ». *Int. J. Bio-Inspired Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 210-216, 2009.

Publications internationales :

- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami, Abdelhalim Borni, Layachi Zaghba, Fazzani Amor, “A comparative and analytical study of various MPPT techniques applied in PV systems for fast changing environmental conditions” 978-1-4673-7894-9/15/\$31.00 ©2015 IEEE
- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami, Abdelhalim Borni, Layachi Zaghba, Fazzani Amor, “Performance Comparison of PI and IP Controllers Used to Control a DC Machine Powered by a Photovoltaic Generator” *Proceedings of Engineering and Technology – PET Copyright - IPCO 2015*.
- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami and Abdelhalim Borni “Comparative Study on Photovoltaic Pumping Systems Driven by Different Motors Optimized with Sliding Mode Control” *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 7, no. 3, 2017, pp. 201 – 216.
- ✚ Zaghba, L., Borni, A., **Bouchakour**, A., Fezzani, A., Mahamed, I.H., Terki, N. “Robust tracking with fuzzy sliding mod control strategy for grid connected photovoltaic system” (2016) *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2015*, art. no. 7455022, . DOI : 10.1109/IRSEC.2015.7455022 ,DOCUMENT TYPE : Conference Paper.
- ✚ L. Zaghba, Hadj Mahamed, A. Fezzani, **A. Bouchakour**, N. Terki « A combined simulation and experimental analysis the dy namic performance of a 2 kW photovoltaic plant installed in the desert environment», *International Journal of Energy and Environmental Engineering*,(2016) 7:249–260, ISSN 2008-9163 , DOI 10.1007/s40095-016-0216.
- ✚ L. Zaghba, N.Terki, A. Fezzani, **A. Bouchakour** , I. Hadj Mahamed, «Simulation and experimental study the management of a PV /battery / charges of autonomous photovoltaic system Implemented in south of algeria», *Journal of Electrical Engineering : Volume 16 / 2016 - Edition : 3*.
- ✚ Abdelhalim Borni, **Abdelhak Bouchakour** and Norddine Bouarroudj, Layachi Zaghba “P&O-PI and fuzzy-PI MPPT Controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: a comparative study” *Int. J. Power Electronics*, Vol. 8, No. 4, 2017.
- ✚ A. Borni, L. Zaghba, **A. Bouchakour**, A. Lakhdari “Fuzzy logic, PSO based fuzzy logic algorithm and current controls comparative for grid-connected hybrid system” *AIP Conference Proceedings 1814,020006 (2017)*; <http://doi.org/10.1063/1.4976225>.
- ✚ L. Zaghba, A. Borni, **A. Bouchakour**, N. Terki “The effect of seasonal variation on the performances of grid connected photovoltaic system in southern of Algeria” *AIP Conference Proceedings 1814, 020005 (2017)*; <http://doi.org/10.1063/1.4976224>.
- ✚ L. Zaghba, A. Borni, **A. Bouchakour**, N. Terki “Robust maximum power point tracking technique and PI current controller design for grid connected PV system using MATLAB/SIMULINK” *In: Journal of Electrical Engineering. (Journal of Electrical Engineering, 2015, 15(2):315-320)*
- ✚ L. Zaghba, A. Borni, **A. Bouchakour**, N. Terki “Fuzzy logic, PSO based fuzzy logic algorithm and current controls comparative for grid-connected hybrid system” *AIP Conference Proceedings, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES 2016-Cnam. (AIP Conference Proceedings, 23 February 2017, 1814)*.
- ✚ L. Zaghba, A. Borni, **A. Bouchakour**, N. Terki “Adaptive intelligent MPPT controller comparison of photovoltaic system under different weather conditions of Ghardaïa site (South

of Algeria)” *Journal of Electrical Engineering. (Journal of Electrical Engineering, 2015, 15(3):214-222)*

- ✚ L. Zaghba, A. Borni, **A. Bouchakour**, N. Terki “Intelligent control MPPT technique for PV module at varying atmospheric conditions using MATLAB/SIMULINK” *Proceedings of 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2014. (Proceedings of 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2014, 12 March 2014, :661-666)*
- ✚ L. Zaghba, A. Borni, **A. Bouchakour**, N. Terki “Adaptive Artificial intelligence based fuzzy logic MPPT control for stand-alone photovoltaic system under different atmospheric conditions.” *Renewable Energy & Sustainable Development; Jun2015, Vol. 1 Issue 1, p11-16, 6p*

Communications internationales :

- ✚ **A. Bouchakour**, M. Brahami, « Les Onduleurs Photovoltaïque Connectes Aux Réseaux Basse Tension». *VIIth International Congress on Renewable Energy and the Environment, CERE 19-21 March 2013, Sousse, Tunisie.*
- ✚ **A. Bouchakour**, M. Brahami, «Étude de Méthodes de Protection d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau électrique». *16èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2013), Marrakech (Maroc), du 15 au 17 Novembre, 2013.*
- ✚ **A. Bouchakour**, M. Brahami, L. Zaghba, A. Borni « Study of a Photovoltaic System Using MPPT Buck-Boost Converter» *The 3rd International Conference on Fluid Dynamics and Thermodynamics Technologies April 21-23, 2014 Antalya, Turkey.*
- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami, Abdelhalim Borni, Hadj Mahammed Idriss and Layachi Zaghba « Performance Comparison of PI and IP Controllers Used to Control a DC Machine Powered by a Photovoltaic Generator» *Conférence Internationale des Energies Renouvelables “ qui aura lieu en Décembre 19 au 21/2014, Monastir Tunisie.*
- ✚ **A. Bouchakour**, L. Zaghba, I.Hadj Mahammed, A. Borni, A. Fezzani “Sizing of Components in Stand-Alone Photovoltaic Power Systems” *Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, l'Electronique, l'Automatique et la Maintenance,(CIEEAM) ENP d'Oran-24-25 Novembre 2015.*
- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa BRAHAMI, Abdelhalim Borni, Hadj Mahammed Idriss, Layachi Zaghba and Fezzani Amor “A Comparative and Analytical Study of Various MPPT Techniques Applied in PV Systems for Fast Changing Environmental Conditions” *3rd International Renewable an Sustainable Energy Conference Marrakech – Ouarzazate, Morocco, December, 10-13, 2015.*
- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, A. Borni, Hadj Mahammed Idriss, Layachi Zaghba and Fezzani Amor «Robust Tracking with fuzzy sliding mode control strategy for grid connected photovoltaic system» *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference Marrakech – Ouarzazate, Morocco, December, 10-13, 2015.*
- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami, Idriss.H.Mahammed, Amor Fezzani, Layachi Zaghba, Abdelhalim Borni, , « Simulation Study of the Influence of Aging and Weather Conditions on the Electrical Production of a Photovoltaic Module », *4th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'16),14 - 17 November (Marrakech).*
- ✚ **Abdelhak Bouchakour**, Mostéfa Brahami, Abdelhalim Borni, Amor Fezzani, Layachi Zaghba, Boukebbous Seif « Study and optimization of photovoltaic powered water pumping systems », *5th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'17), Tangier Maroc.*

- ✚ Layachi Zaghba, **Abdelhak Bouchakour**, Abdelhalim Borni « *Modeling and simulation to study the effects of partial shading on PV array under different configurations* » *First international conference on Electrical Engineering, ICEEB'14*
- ✚ A. Borni, A. Fezzani, **A. Bouchakour** and IH Mohammed « *Simulation and study the impact of partial shading conditions on the MPPT tracking operation for the PV system* » *International conference on automatics and mechatronics CIAM'2015.*
- ✚ A. Fezzani, **A. Bouchakour**, I. Hadj Mahammed, « *Degradation Evaluation of PV Module Using Solmetric PVA-600 Analyzer* », *Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR 2016, 24 - 25 Octobre 2016, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algeria.*
- ✚ A. Borni, L. Zaghba, **A. Bouchakour**, L. Zarour « *Study and Improve Photovoltaic Systems Performance based on Fuzzy metaheuristics MPPT Optimization* », *Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR 2016, 24 - 25 Octobre 2016, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algeria.*
- ✚ Abdelhalim Borni, Layachi Zaghba, **Abdelhak Bouchakour** and Laid Zarour, «*Fuzzy logic, PSO based Fuzzy logic algorithm and Current controls comparative for Grid-Connected Hybrid System* », *TMREES Conference Series, 16-18 Novembre 2016, Paris- France.*
- ✚ Amor Fezzani, Hadj Mahammed Idriss, **Abdelhak Bouchakour**, Layachi Zaghba, « *Experimental Study of One Diode Modeling under Partial Shading of Photovoltaic Module* », *2ème Conférence Internationale en Sciences Et Technologies Électriques au Maghreb, 26 - 28 Octobre 2016, Marrakech, Maroc*
- ✚ Abdelhalim Borni, Norddine Bouarroudj , **Abdelhak Bouchakour** “ *Optimized MPPT Controllers Using GA for Grid Connected Photovoltaic Systems, Comparative study*” *International conference on technologies and materials for renewable energy, Environment and sustainability, TMREES, Beirut, Lebanon April 21-24-2017.*
- ✚ L. Zaghba, **A. Bouchakour**, A. Borni, A. Fezzani , “*Experimental typical meteorological years to study energy performance of a PV grid-connected system*” *International conference on technologies and materials for renewable energy, Environment and sustainability, TMREES, Beirut, Lebanon April 21-24-2017.*

Résumé

Ce travail porte sur l'étude et le développement d'un procédé d'optimisation qui permet de maximiser le rendement global d'un système de pompage photovoltaïque entraînés par trois types de moteurs différents: un moteur à courant continu à excitation séparé (MCC), un moteur asynchrone (MAS) et un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP). Pour cela, des méthodes basées sur des algorithmes d'optimisation conventionnelles et des méthodes d'intelligence artificielle telles que le mode glissant, la logique floue et la logique floue optimisée par le PSO plutôt ont été utilisées. Les trois systèmes sont ensuite comparés pour déterminer le système le plus efficace en termes de rendement et de quantité d'eau pompée.

Mots clés : système de pompage photovoltaïque, convertisseur DC/DC, moteur à courant continu, logique floue, pompe centrifuge

Abstract

This work concerns the study and development of an optimization process that maximizes the overall efficiency of a photovoltaic pumping system driven by three different types of motors: a separately excited DC motor (DCM), asynchronous motor (ASM), and a permanent magnet synchronous motor (PMSM). For this, methods based on conventional optimization algorithms and artificial intelligence methods such as sliding mode, fuzzy logic and fuzzy logic optimized by the PSO rather have been used. The three systems are then compared to determine the most efficient system in terms of yield and amount of water pumped.

Key words: photovoltaic pumping system, DC / DC converter, DC motor, fuzzy logic, centrifugal pump

ملخص

هذا العمل يركز على دراسة وتطوير عملية التحسين الذي يزيد من الكفاءة الكلية لنظام ضخ المياه باستعمال الطاقة الشمسية مدفوعة بثلاثة أنواع مختلفة من المحركات محرك التيار المستمر، محرك حثي ومحرك متزامن. ولهذا، تم استخدام الأساليب القائمة على خوارزميات التحسين التقليدية وتقنيات الذكاء الاصطناعي والتي تتمثل في وضع الانزلاق والمنطق الضبابي والمنطق الضبابي المحسن بواسطة سرب الجسيمات بدلا من ذلك. وفي الأخير يتم مقارنة النظم الثلاثة لتحديد النظام الأكثر كفاءة من حيث المرودية وكمية المياه التي يتم ضخها.

الكلمات المفتاحية : نظام الضخ الضوئية، محول، محرك التيار المستمر، المنطق غامض، مضخة الطرد المركزي.