

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Electrique



جامعة محمد خيضر بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية.
المرجع: 2011/

Ref :

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences
Spécialité : Génie Electrique

Contrôle Flou -Génétique Hybride d'un Moteur BLDC dans un Système de Pompage photovoltaïque

Présentée par :
Mme TERKI AMEL

Soutenue publiquement le

Devant le jury composé de :

S. E. ZOUZOU	Professeur	Université de Biskra	Président
A.MOUSSI	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
A. BETKA.	Professeur	Université de Biskra	Co-rapporteur
L. RAHMANI	Professeur	Université de Sétif	Examineur
B. AZOUI	Professeur	Université de Batna	Examineur
D.BENATTOUS	MC	C U Oued	Examineur

Titre : Contrôle Flou-Génétique Hybride d'un Moteur BLDC dans un Système de Pompage PV
Rapporteur : Pr. Moussi Ammar
Co-Rapporteur : Pr. Betka Achour

Mme Terki Amel Biskra 2012

RÉSUMÉ

L'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement économique et social d'un pays. Sa consommation énergétique est devenue un critère de son niveau de développement. L'Algérie, à l'instar des pays en voie de développement, est confrontée au problème d'alimentation électrique des zones isolées et montagneuses.

En effet, d'une part, le réseau conventionnel est surtout limité aux zones urbaines, et d'autre part, le coût de production de l'énergie sur site est trop élevé. L'application de systèmes photovoltaïques apparaît comme une alternative prometteuse, d'autant plus que notre pays dispose d'une durée d'ensoleillement et d'une quantité d'énergie incidente très importantes.

L'objectif principal du travail se porte sur une étude de modélisation, d'optimisation et de control dans un système de pompage solaire photovoltaïque basé sur un moteur PMLDC entraînant une pompe centrifuge. Le travail a été concrétisé à l'optimisation du rendement de ce système, permettant d'extraire en permanence les valeurs optimales permettant la maximisation du débit pompé, ainsi que le contrôle par la logique floue pour l'amélioration des performances dynamique du moteur PMLDC.

Mots clé : générateur photovoltaïque, pompage photovoltaïque, contrôle flou, Optimisation par les algorithmes génétiques.

المخلص

الطاقة الكهربائية لها دور مهم في التنمية الاقتصادية والاجتماعية لأي بلد فاستهلاك الطاقة أصبح مؤشرا لمستوى التطور. والجزائر في مقدمة الدول النامية التي تواجه مشكل التغذية الكهربائية بالمناطق المعزولة والجبلية. فمن جهة الشبكة الكهربائية محصورة خاصة في المناطق الحضرية و من جهة أخرى فإن تكلفة إنتاج الطاقة بالوسائل البديلة مازالت باهظة. إذن فإن تطبيق نظام فوطوظوئي هو بمثابة حل ناجح. الهدف الأساسي لهذا العمل هو دراسة ومحاكاة نموذج رياضي للتحسين والمراقبة لنظام ضخ فوطوظوئي. وذلك باستعمال كل من الخوارزميات الجينية والمنطق المبهم.

كلمات المفاتيح : مولد فوطوظوئي، نظام ضخ فوطوظوئي، المراقبة باستعمال المنطق المبهم، التحسين باستعمال الخوارزميات الجينية.

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé sous la direction de Monsieur Moussi Ammar, Professeur à l'Université Mouhamed Kheider Biskra. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes sincères remerciements. Je lui dois beaucoup. Il m'a initié à la recherche avec compétence et modestie et m'a accordé sa confiance. Je suis enchantée d'avoir été son étudiante. Je lui témoigne ma sincère reconnaissance.

Je remercie M. Betka Achour, Professeur à l'Université Mouhamed Kheider Biskra d'avoir accepté de codiriger ce travail. Ses conseils éclairés, son écoute et son soutien ont été indispensables à l'achèvement de ce travail tout autant que ses enseignements riches et ses connaissances remarquables qui ont bien marqué ma formation. Je lui témoigne ma sincère gratitude.

Je voudrais remercier Monsieur le professeur Zouzou Saleh eddine à l'Université Mouhamed Kheider Biskra, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse malgré ses nombreuses occupations. Je voudrais le remercier également de m'avoir initialement ouvert les portes du Laboratoire LGEB.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Rahmani Lazhar, professeur à l'Université de Setif, qui me fait l'honneur d'accepter d'être membre du jury de cette thèse et de l'examiner.

Je remercie vivement Monsieur Azoui Boubakeri, Professeur à l'Université de Batna pour l'intérêt particulier qu'il a porté à mon travail et l'immense plaisir qu'il me fait en acceptant de faire partie de ce jury.

Je remercie également Monsieur Benatouss Djilani Maître de conférence à l'Université d'Oued d'avoir accepté d'être examinateur de ma thèse et de juger mon travail.

Je suis honoré et je remercie sincèrement M. Ahmed Taleb Abelmalik, Professeur à l'université de Valenciennes France, pour son accueil, pour son aide et pour sa générosité dont je lui serais toujours reconnaissant.

Finalement, je voudrais remercier infiniment mon mari Tarek, si cette thèse a abouti, c'est bien grâce à ses encouragements, à sa patience, à sa compréhension, à son aide et à son soutien, je lui suis reconnaissant pour son comportement globalement stable.

Merci à mes proches, mes enseignants et mes amis qui ont cru en moi et qui m'ont soutenu lors des étapes difficiles. Ce travail leur est dédié.

Mme Terki Amel 2012

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

- A_1 : surface effective du module(m).
 C_e : Couple électromagnétique(N.m).
 C_r : Couple résistant(N.m).
 H_g : Hauteur géométrique(m)
 H : hauteur manométrique(m).
 I : Courant de la sortie de la cellule(A).
 I_p : Courant photovoltaïque (photo-courant)(A).
 I_d : Courant direct sous obscurité de la jonction(A).
 I_0 : Courant inverse de la jonction(A).
 I_g : Courant de sortie de générateur solaire(A).
 I_{og} : Courant de circuit ouvert de générateur solaire(A).
 I_{ccg} : Courant de court circuit de générateur solaire(A).
 $i_{a,b,c}$: Courants des phases a, b et c(A).
 J : Moment d'inertie.
 K_e : Constante de la Force électromotrice.
 K_i : Constante de régulateur de vitesse
 K_p : Constante de régulateur de vitesse
 L_{eq} : Inductance équivalente(H)
 L_s : Inductance propre(H).
 M : Inductance mutuelle(H).
 N : Vitesse de rotation (tr/min).
 N_p : Nombre de module en parallèle.
 N_s : Nombre de module en série.
 P : Nombre de paire de pôle.
 p : Opérateur de Laplace (d/dt).
 P_{ah} : Puissance hydraulique absorbée (W).
 P_u : Puissance utile (W).
 P' : Pompe
 Q : Débit(m³/s).
 R : Résistance par phase du stator(Ω).

R_s : Résistance série(Ω).

R' : Réservoir

T : Température de la jonction en degrés Kelvin($^{\circ}\text{K}$).

V : Tension de la sortie de la cellule.

V_j : Tension au niveau de la jonction.

V' : vanne

ω : Vitesse de rotation(rd/sec).

ω^* : vitesse de référence (rd/s)

$\lambda_{a,b,c}$: Les Flux totaux des phases a , b et c.

ΔI : Bande d'hystérisis.

ξ : Coefficient d'amortissement.

τ : Constante de temps associée au régulateur PI.

θ : Angle électrique (degré $^{\circ}$)

ρ : masse volumique Kg/m^3

g : Accélération de pesanteur (m^2/s).

η_H : Rendement Hydraulique.

K : gain du hacheur.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 Schéma d'un système de pompage PV.....	3
Figure 1.2 Générateur photovoltaïque (GPV).....	3
Figure 1.3 Les caractéristiques du module PV.....	5
Figure 1.4 Les caractéristiques du GPV en fonction de :.....	5
Figure 1.5. Les caractéristiques I-V et P-V du système de pompage, $T=25^{\circ}\text{C}$	6
Figure 1.6 Algorithme de la commande perturbé & observe : P&O.....	11
Figure 1.7 Algorithme de la commande Hillclimbing	13
Figure 1.8 Algorithme de l'incrémentatation de la Conductance : IncCond	15
Figure 1.9 Rendement du système de pompage PV fonction d'ensoleillement.....	10
Figure 1.10 Débits du système de pompage PV fonction de l'ensoleillement	6

CHAPITRE 2

Figure 2.1 Système de pompage photovoltaïque.....	21
Figure 2.2 Schéma de principe du hacheur Buck.....	23
Figure 2.3 Moteur PMSLDC et le commutateur électronique.....	25
Figure 2.4 Les fonctions normalisées des f.e.m et des courants des phases.....	25
Figure 2.5 Principe du régulateur de courant à Hystérésis.....	29
Figure 2.6 Le système de commande.....	32
Figure 2.7 Schéma bloc simplifié du système de régulation PI.....	33
Figure 2.8 Mise en oscillation d'un système par contre-réaction.....	34
Figure 2.9 (1) Courbe $H = f(Q)$ de la canalisation.....	36
(2) courbes $H = f(Q)$ de la pompe	
Figure 2.10 Banc d'essai de pompage.....	38

CHAPITRE 3

Figure 3.1 Structure d'un système flou.....44
 Figure 3.1 Système d'entraînement complet.....45
 Figure 3.2 Structure d'un contrôleur flou.....46
 Figure 3.3 Partition des entrées et de la sortie du contrôleur flou.....46
 Figure 3.4 Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique48
 Figure 3.5 Organigramme d'un algorithme génétique.....50

CHAPITRE 4

CONTRÔLE DU PMSBLDC PAR LA LOGIQUE FLOUE

Figure 4.1 Algorithme de contrôle on-line de la vitesse d'un moteur PMSBLDC58

SANS CHARGE

Figure 4.2 Le courant de phase.....59
 a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.
 Figure 4.3 Le couple électromagnétique.....60
 a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.
 Figure 4.4 La vitesse.....61
 a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.
 Figure 4.5 La force électromotrice « fem ».....62
 a: Avec régulation PI. b : Avec contrôle flou.

AVEC CHARGE

Figure 4.6 Le courant de phase.....64
 a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.
 Figure 4.7 Le couple électromagnétique.....65
 a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.
 Figure 4.8 La vitesse.....66
 a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.
 Figure 4.9 La force électromotrice « fem ».....67
 a: Avec régulation PI. b : Avec contrôle flou.
 Figure 4.10 Les courants des trois phases.....68
 a: Sans régulation b : Avec régulateur PI. c: Avec contrôleur flou

OPTIMISATION DU RENDEMENT DU SYSTEM E DE POMPAGE PV

Figure 4.11 Caractéristique courant tension.....	70
Figure 4.12 Caractéristique puissance-tension.....	70
Figure 4.13 Courbes rendement -éclairage	71
Figure 4.14 Courbes débit –éclairage.....	71
Figure 4.15 Courbes gain-éclairage.....	71
Figure 4.16 Courbes rendement-éclairage.....	73
Figure 4.17 Courbe gain-éclairage.....	73
Figure4.18 Courbes de vitesse-éclairage.....	73
Figure 4.19 Caractéristique débit-éclairage.....	74

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Les expressions des f.e.m en fonction de la position.....	26
Tableau 2.2	Séquences de commutation des interrupteurs.....	26
Tableau 2.3	Tension de commande de l'onduleur	27
Tableau 2.4	Modèle du contrôleur de courant à hystérésis.....	30
Tableau 2.5	Les courants de références.....	31
Tableau 2.6	Ajustement des gains de régulateurs P, PI Et PID Selon ZN.....	34
Tableau 3.1	La table des règles flou.....	47

SOMMAIRE

SOMMAIRE

RESUMÉ	i
REMERCIEMENTS	2
LISTE DES SYMBOLES	5
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX	12
INTRODUCTION GÉNÉRALE	18
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART	22
1.1 Générateur photovoltaïque(GPV).....	24
1.2 Conditionnement de puissance.....	27
1.2.1 Convertisseur de puissance	27
1.2.2 Unité de contrôle.....	27
1.3 Charge moto-pompe.....	37
1.3.1 Moteur	37
1.3.2 Pompe	38
1.3 Conclusion.....	38
CHAPITRE 2 MODELISATION DU SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE	40
2.1 Générateur photovoltaïque(GPV).....	41
2.2 Convertisseur continu-continu(DC/DC) : hacheur.....	42
2.3 Moteur à courant continu à aimant permanent sans Balais(PMBLDC).....	44
2.3.1 Modèle du moteur PMBLDC.....	47
2.3.2 Contrôle du courant par hysteresis.....	49
2.3.3 Contrôle de vitesse.....	52

2.4	Pompe centrifuge.....	54
2.4.1	Caractéristiques des pompes centrifuges	55
2.4.2	Caractéristiques hauteur-debit	56
2.4.3	Canalisation de refoulement	57
2.5	Conclusion.....	58

CHAPITRE 3: APPLICATION DES TECHNIQUES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

- **LOGIQUE FLOUE**
- **ALGORITHME GÉNÉTIQUE**

3.1	La logique floue	61
3.1.1	Théorie des ensembles flous.....	61
3.1.2	Operateurs logiques flous.....	62
3.1.3	Les règles flous.....	62
3.1.4	Le mécanisme d'inférence flou.....	63
3.1.5	La structure d'une commande floue.....	64
3.1.6	Les types de systèmes flous.....	64
3.2	Application de La logique floue pour le contrôle d'un système de pompage PV....	65
3.2.1	Choix du structure de contrôleur.....	66
3.2.1	Choix de la stratégie de fuzzification.....	66
3.2.2	Établissement des règle d'inférence.....	67
3.2.3	Choix de la méthode d'inférence.....	67
3.2.4	Choix de la stratégie de défuzzification.....	67
3.3	Les algorithmes génétiques.....	68
3.3.1	Principes généraux.....	69
3.3.2	Le codage	71
3.3.3	La sélection	71
3.3.4	Le Croisement	71
3.3.5	La Mutation.....	72
3.3.6	Limitations des algorithmes génétiques.....	72
3.4	Application des AGs pour l'optimisation du rendement	73
3.4.1	Fonction d'évaluation	73
3.4.2	Variables de la fonction d'évaluation.....	74
3.4.3	Contraintes d'égalité.....	74
3.5	Conclusion.....	75

CHAPITRE 4: RESULTATS DE SIMULATION.....	77
4.1 Contrôle de moteur PMBLDC par la logique floue.....	77
4.2 Optimisation du rendement par les AG.....	90
4.3 Conclusion.....	95
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE.....	97
BIBLIOGRAPHIE.....	100
ANNEXES.....	108

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement économique et social d'un pays. Sa consommation énergétique est devenue un indice de son niveau de développement. L'Algérie, à l'instar des pays en voie de développement, est confrontée au problème d'alimentation électrique des zones isolées et montagneuses.

En effet, d'une part, le réseau conventionnel est surtout limité aux zones urbaines, et d'autre part, le coût de production de l'énergie sur site est trop élevé. L'application des systèmes photovoltaïques apparaît comme une alternative prometteuse, d'autant plus que notre pays dispose d'une durée d'ensoleillement et d'une quantité d'énergie incidente très importante [1].

La conversion directe de l'énergie solaire au moyen des générateurs photovoltaïques est l'une des formes d'exploitation de l'énergie solaire, elle possède des avantages de souplesse et d'adaptation aux diverses applications. Le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque est déterminé par l'impédance de la charge, l'éclairement et la température. La performance optimale du système de conversion est obtenue lorsque la puissance délivrée par le générateur est maximale. Cette performance ne peut être obtenue qu'en adaptant en permanence le générateur et la charge.

L'utilisation de l'énergie solaire pour le pompage d'eau est particulièrement bien adaptée aux zones rurales où l'eau fait cruellement défaut. La demande croissante en eau dans ces zones, destinée à l'alimentation en eau potable ainsi qu'à l'irrigation, fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des modules solaires comme source d'énergie aux groupes « moto-pompes »[2].

La recommandation d'un moteur à courant continu sans balais et à commutation électronique présente un choix favorable pour un système de pompage solaire suite aux avantages que fournit l'utilisation des aimants à base de terres rares d'une part, ainsi que les privilèges qu'offrent la commutation électronique qui en résulte, d'autre part :

- Un rapport couple / poids considérable, d'où un volume modéré
- Un rendement optimal
- Une faible maintenance du système.

L'objectif de la présente thèse étant le développement d'un procédé de contrôle et d'optimisation permettant d'améliorer les performances dynamiques du moteur à courant continu à aimant permanent sans balais, ainsi que la maximisation du rendement du système de pompage photovoltaïque en utilisant un ensemble de techniques dont on cite ceux d'intelligences artificielles à savoir :

- La logique floue
- Les algorithmes génétiques.

Le travail présenté est relatif à l'étude par simulation numérique d'un système de pompage photovoltaïque, utilisant un moteur à courant continu à aimant permanent sans balais (PMBLDC), alimenté par un générateur photovoltaïque et entraînant une pompe centrifuge qui est couramment utilisée dans ce genre d'application à cause de sa fiabilité et sa maintenance réduite. Afin d'assurer un fonctionnement optimal du générateur PV, il est nécessaire d'adapter la charge groupe « moto-pompe » au générateur de telle sorte qu'on force le générateur à délivrer son maximum de puissance à la charge. Un convertisseur statique continu-continu (hacheur) peut assurer cette fonction.

Tout d'abord, un état de l'art est établi avec un aperçu des travaux de recherches portant sur le pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre décrit le système de pompage photovoltaïque ainsi que sa modélisation mathématiques, ceci dans le but d'apporter un support théorique à l'analyse des résultats de simulation présenté précédemment. Cette analyse se base sur les différents sous systèmes constituant celui du pompage photovoltaïque.

Dans le chapitre trois, nous présentons la théorie de base de la logique floue et son application pour le contrôle du moteur à courant continu à aimant permanent sans balais (PMBLDC). En premier lieu, on présentera un rappel sur les ensembles flous, on se limitera aux propriétés essentielles.

En second lieu, l'approche floue sera utilisée pour le contrôle on-line à l'aide d'une table d'inférence proposée. L'optimisation du rendement du système était par l'utilisation des algorithmes génétiques, où on a suivi la même démarche que celle du contrôle flou.

Le dernier chapitre illustre les résultats de la simulation du système issu des algorithmes de commande et de contrôle ainsi que leur interprétation. Ils permettent en fait de voir les performances du contrôle flou pour le moteur PMBLDC, ainsi que celle de l'optimisation du rendement par les algorithmes génétique. La thèse est clôturée par une conclusion générale et une présentation des perspectives et des travaux futurs envisagés sur le même thème.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART

1. ÉTAT DE L'ART

Le soleil prévoit toute l'énergie nécessaire pour supporter la vie telle que nous la connaissons. En moyenne, la terre reçoit environ 12×10^{17} w de l'énergie solaire. Le challenge pour un avenir durable c'est d'exploiter une toute petite fraction de cette énergie pour subvenir aux relatives modestes exigences de l'activité humaine.

De récents développements mondiaux semblent garantir un marché pour l'énergie verte renouvelable. Parmi plusieurs sources d'énergie renouvelable actuellement exploitée, les systèmes photovoltaïques(PV) apparaissent d'être prometteur en vue de leur nature non polluante et l'avantage de la conversion directe d'énergie électrique. Bien sùre le soleil est la première source originale de la plupart des autres ressources d'énergie renouvelable : vent, vague (onde), hydro-électrique, biomasse, géothermique. Cependant, la ressource solaire directe est d'environ 200 fois plus grande que les ressources combinées [1-4].

La première cellule efficace, faite par Bell Laboratoire, qui a été rapportée en 1954, a attiré les premières pages des journaux. Le NewYorkTimes a reporté dans sa première page « Vast power of the sun is tapped by battery using sand ingredient » [1-3]. Depuis ce temps, beaucoup d'efforts ont été déployés pour rendre cette déclaration vraie, même si elle était grandiose à l'époque. L'utilisation croissante de ces cellules solaires est liée à l'économie, les facteurs d'efficacité et de fiabilité et les progrès récents dans les technologies d'état solaire a donné une impulsion à l'attractivité des cellules solaire avec des cellules solaires à haut rendement maintenant disponibles. Bien sûr le prix est encore élevé en comparaison avec d'autres sources d'énergie renouvelable, les cellules solaires ont des avantages en termes de fiabilité à long terme, maintenance, impact environnemental et social. La production de module photovoltaïque a donc augmentée régulièrement depuis les années 70 (une décennie de la crise énergétique) et elle a dépassé 24 MW à la fin du dernier siècle. L'électricité solaire est devenue un fait dans le monde.

La plupart des travaux de recherches actuelles impliquent la mise en œuvre des techniques et l'application dans plusieurs modes de vie. Les régions isolées, où la connexion au réseau

électrique est trop chère si elle n'est pas techniquement inabordable, ont trouvé dans l'électricité solaire une excellente solution pour leurs besoins. Dans les pays développés c'est devenu une autre alternative de source d'énergie et en vu de l'application dans l'électrification d'habitation, réfrigération, électricité de climatisation solaire, ainsi que les petites industries alimentaires, agriculture et services de santé [43-44]. Dans certains cas, où l'énergie produite excède la demande, l'électricité est envoyée dans le réseau.

Depuis que la valeur de la première installation de cellules solaire est encore élevée (avec l'absence de soutien gouvernemental dans la plupart des pays), on doit correctement mesurer et optimiser l'opération de système. Beaucoup de travaux de recherche se concentrent sur l'utilisation optimale des unités de générateur photovoltaïque qui constituent 60-80% de la valeur du système selon les moyens de stockage s'ils sont utilisés ou non. Le système photovoltaïque peut fonctionner en tant que système autonome (stand-alone), hybride ou connecté au réseau. Les schémas autonomes ont trouvé une large application dans les régions éloignées pour répondre aux exigences de l'énergie électrique tels que les systèmes de pompage d'eau. Les travaux de recherches ont également souligné cet aspect [5-7].

D'autres études se sont focalisées sur le chemin de dimensionnement et l'adaptation des systèmes de pompage photovoltaïque. Depuis l'adaptation propre entre la capacité installée et la charge isolée est essentielle pour l'optimisation d'une telle installation [41-42].

Un système typique de pompage PV est donné dans figure 1.1, il est constitué d'un générateur photovoltaïque (GPV), conditionneur d'énergie, une charge, et bien sûr d'autre accessoire tel que les batteries de stockage, câblages, transducteurs et protection. L'étape de conditionnement de puissance est constituée d'un convertisseur de puissance associé à une unité de contrôle. La charge, pour le système de pompage photovoltaïque, est constituée d'un moteur et d'une pompe.

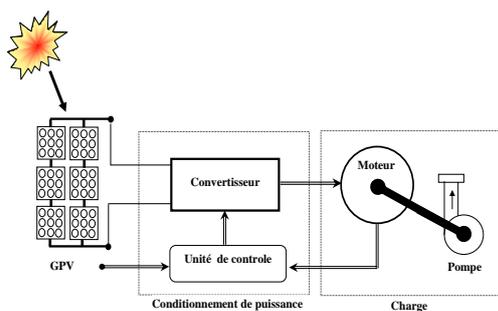


Figure 1.1 Schéma d'un système de pompage PV

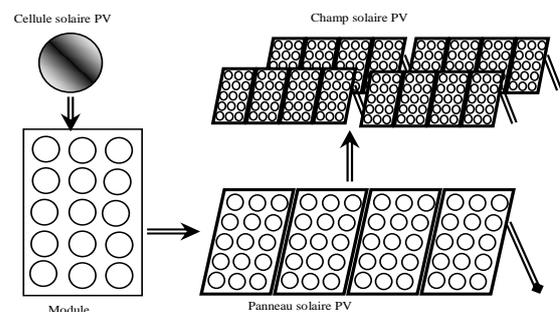


Figure 1.2 générateur photovoltaïque (GPV)

Par la suite, on donnera un bref aperçu sur les principaux travaux de recherche publiés pour chaque élément du système typique de pompage photovoltaïque.

1.1 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV)

Les cellules solaires représentent l'unité fondamentale de conversion d'un système PV. Pour une utilisation pratique, elles sont généralement assemblées en série dans un module. Pour une puissance élevée nécessaire, les modules sont interconnectés en séries ou/et en parallèles pour former un réseau d'unité de production d'énergie de courant continu (DC) connu par générateur photovoltaïque figure 1.2.

Les caractéristiques principales du GPV sont indiquées dans figure 1.3, où il apparaît que la caractéristique courant-tension (I-V) d'un module PV est non linéaire. Il fonctionne comme une source de courant pour les zones de basse tension et comme une source de tension dans les zones de haute tension. La puissance de sortie dans ces régions est bien en dessous de la valeur optimale qui peut être générée si le panneau solaire fonctionne autour du coude de la caractéristique I-V. Les valeurs caractéristiques nominales d'un panneau sont le courant de court circuit (I_{CC}), la tension en circuit ouvert (V_{OC}) et la puissance maximale ($P_{MAX} = I_{OP} \cdot V_{OP}$) comme une fonction de température et d'irradiation. Les caractéristiques typiques sont indiquées dans figure 1.3 a-d pour un module PV deux en parallèle-dix en séries.

La plupart des auteurs donnent des caractéristiques de I-V et P-V en fonction de l'insolation pour une température donnée. Cependant, les caractéristiques I-V et P-V sont très dépendantes de la température. Une température fixe n'existe pas dans la pratique à cause de l'effet de chauffage de l'énergie rayonnée. Ceci, combiné avec l'effet de refroidissement des vents environnants donne peu de condition de travail prédictible et rend le système difficile à modéliser.

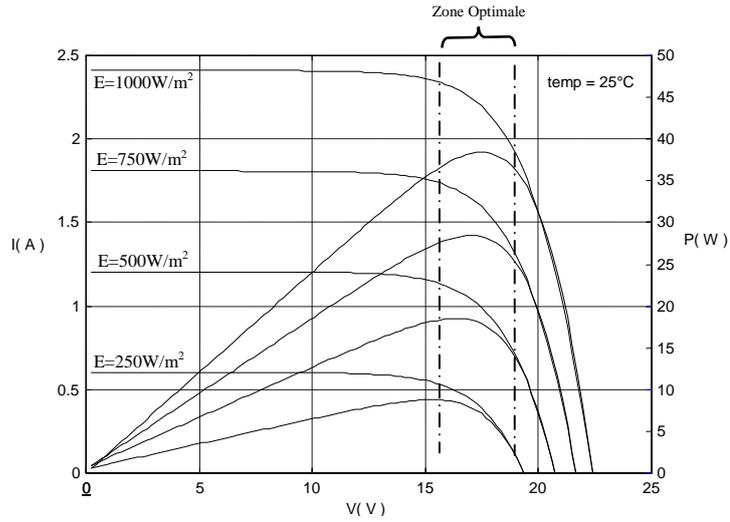


Figure 1.3 Les caractéristiques du module PV

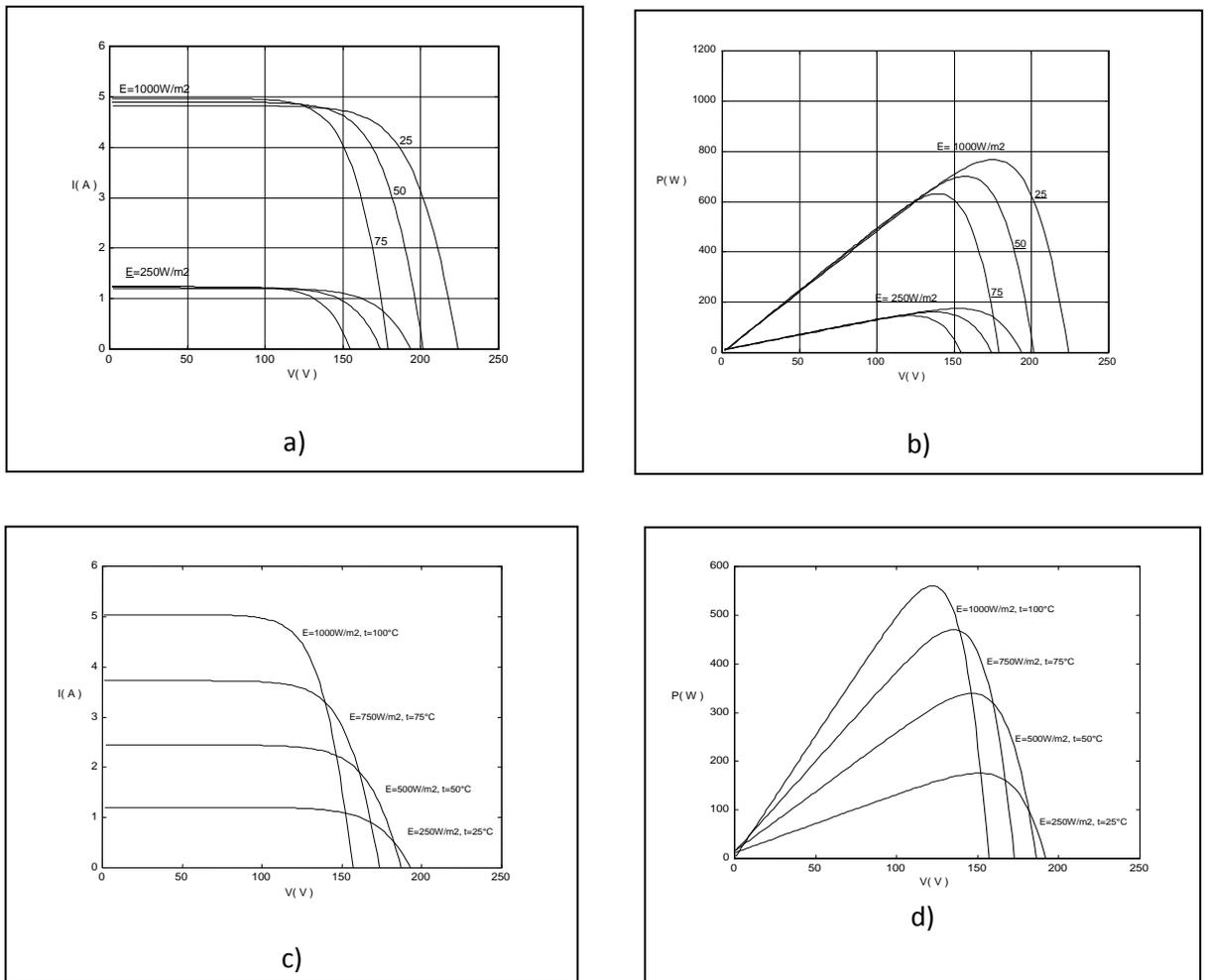


Figure 1.4 Les caractéristiques du GPV en fonction de :

- a-b: ensoleillement (250-1000 W/m²) et température (25,50 et 75° C)
- c-d: ensoleillement et température simultanée

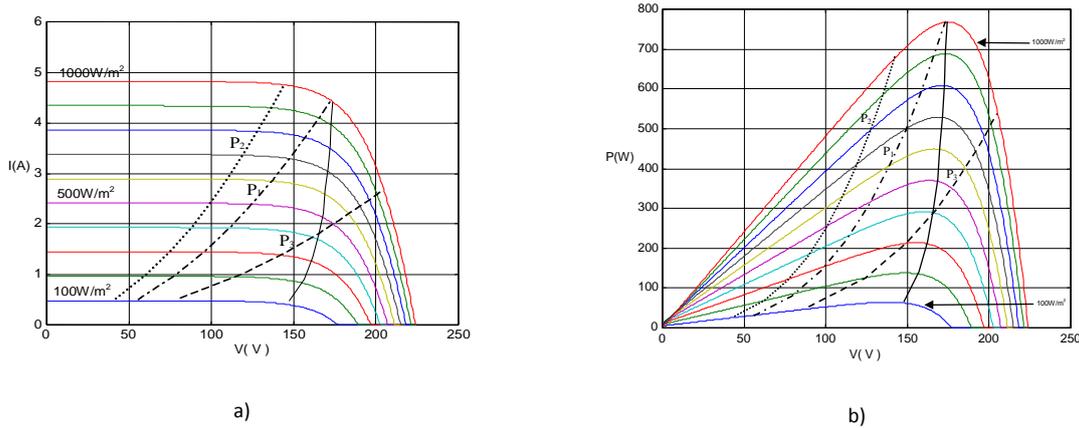


Figure 1.5. Les caractéristiques I-V et P-V du système de pompage, $T=25^{\circ}\text{C}$

a) Les caractéristiques I-V b) Les caractéristiques P-V

----- Les caractéristiques de charge

—— point de puissance maximale

1.2 CONDITIONNEMENT DE PUISSANCE

1.2.1 Convertisseur de puissance

Les sources de puissance PV sont, par nature, non linéaire. Elles sont soumises à de grandes variations sous des facteurs environnementaux, principalement l'irradiation et la température, qui à son tour change le point de fonctionnement maximale. En vue d'accélérer l'amortissement du coût du système, il est essentiel de faire fonctionner le GPV à son point de puissance maximale sur une base continue. Pour cette raison, les unités de puissance de conditionnement sont utilisées dans ce but. Cette unité dépend du type de charge étant alimenté par le GPV. Pour un système de pompage, la charge est généralement un moteur à courant continu (DC) ou à courant alternatif (AC). L'unité de conditionnement de puissance est plus souvent un hacheur continu-continu (DC-DC). Plusieurs types sont utilisés tels que Buck, Boost et Back-boost [37-38]. Certaines recherches ont travaillé avec la plupart de ces convertisseurs afin de trouver le type le plus compatible en termes de rendement énergétique global du système [29-33-35]. Il est précisé que le convertisseur Boost est le plus pratique pour le suivi de puissance maximale [29-37]. Par ailleurs, si la tension de sortie requise est inférieure à celle générée, il est recommandé d'utiliser une unité avec deux étapes de conversion [39].

Si un moteur à courant alternatif est utilisé, un onduleur doit être inclus pour assurer l'étape de conversion (DC-AC). Ceci a été rapporté dans [19-22] en utilisant un onduleur de six niveaux à

onde quasi-carré. Bien sûr un onduleur PWM donne de meilleures formes d'ondes à aucune réelle augmentation du coût. Récemment, les onduleurs de résonance ont reçu de l'attention [37-45-46] afin de réduire les pertes de puissance au niveau de l'onduleur et donc augmenter la puissance nette capturée du système. Dans la plupart de travaux de recherche, les pertes de puissance dans le convertisseur sont négligées ou données par une valeur fixe. Cela pourrait être inexact depuis que l'application du courant et la tension dépendent du point de fonctionnement et d'éclairement.

1.2.2 L'unité de contrôle

L'objectif principal de cette unité est d'optimiser la puissance de rendement du GPV. Pour une insolation et une température donnée, le GPV est caractérisé par la puissance maximale qui peut être délivrée sous une charge de courant et de tension spécifique. Ceci est connu comme une valeur optimale et on devrait forcer le GPV à fonctionner sous cette condition. Par contre, le point de fonctionnement du système dépend des caractéristiques du GPV, la charge et bien sûr les paramètres climatiques et thermiques.

Le moyen simple pour réaliser un système de pompage PV est de performer le couplage direct de la charge, le moteur-pompe à la source PV [10-15]. Cependant, même si la taille du GPV est initialement optimisée, il est indiqué que le rendement varie largement avec la température, insolation et les paramètres d'entraînement s'ils sont variables. Figure 1.5 montre le déplacement du point de fonctionnement d'une pompe centrifuge à moteur DC du système de pompage PV.

Différentes pompes sont considérées pour des différents niveaux d'insolation et de température fixée. La puissance maximale, le courant et la tension optimaux (I_{OP} , V_{OP}) sont également indiqués. Il est clair que selon les caractéristiques de la charge I-V, le couplage direct d'un moteur-système PV à une charge donnée peut être naturellement optimisé au point d'intersection de la caractéristique de charge et du locus de puissance maximale. Cela se produit pour une valeur donnée d'insolation. Comme cette dernière varie, le système devient sous-optimal. En plus, si la température change largement, les régions optimisées seront perdues par la suite. Figure 1.6 montre les débits des pompes pour un couplage direct et une puissance optimisée. On voit clairement que les performances du système de pompage sont améliorées si le rendement du générateur photovoltaïque est optimal. Afin d'optimiser la puissance, en d'autres termes, la recherche du point de puissance maximale du générateur PV, plusieurs techniques sont utilisées ; elles sont appelées techniques de la recherche de point de puissance maximale (MPPT). Ces techniques sont divisées en deux classes [31].

1.2.2.1 Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maxima (V_{OP} et I_{OP}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

- **Mesure de V_{OC} (Fraction de V_{OC})**

Elle consiste à comparer la tension du GPV (V_{PV}) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale (V_{OP}) [53- 65-66]. L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du hacheur, afin de faire coïncider les deux tensions. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire entre V_{OP} et V_{OC} d'un module PV.

$$V_{OP} = k_V \cdot V_{OC} \quad (1.1)$$

Avec k_V correspondant à un facteur de tension dont sa valeur dépend du GPV utilisé et de la température de fonctionnement.

Généralement, pour des GPV en Silicium(Si), il est compris entre 0.71 et 0.78. A partir de l'équation (1.1) et connaissant k_V , il faut cependant mesurer la tension de circuit ouvert (V_{OC}) afin d'en déduire la tension de référence (V_{OP}) à appliquer au PV. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de V_{OC} de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure. Un autre inconvénient est l'hypothèse faite sur l'évolution de k_V dans un GPV suivants les différents points de fonctionnement des caractéristiques de puissance. Beaucoup d'auteurs font l'hypothèse que ce coefficient est constant pour un générateur donné. Ceci est loin d'être vrai pour la plupart des GPV en Si qui affichent une variation d'au moins 10 % de ce facteur en fonction de la température de fonctionnement. Ces commandes sont très simples et très robustes mais aujourd'hui ne présentent pas assez de précisions inhérentes à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents.

- **Mesure de I_{CC} (Fraction de I_{CC})**

Cette méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre I_{OP} et I_{CC} comme le montre l'équation (1.2) [65-67].

$$I_{OP} = k_I \cdot I_{CC} \quad (1.2)$$

Avec k_i correspondant à un facteur de courant qui dépend là aussi du GPV utilisé et est généralement compris entre 0.78 et 0.92.

L'équation (1.2) montre que le courant I_{OP} peut être déterminé par une mesure de I_{CC} et que le PPM peut être atteint en appliquant un courant de référence égal à I_{OP} à la régulation en courant du convertisseur. La mesure de I_{CC} implique une perte de transfert de puissance du à la mise en court circuit du GPV. Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient. Ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont été très utilisées dans les années 80. Elles s'avéraient alors plus faciles à mettre en œuvre et un peu moins coûteuse. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module (I_{CC} et V_{CO}) qui ne peuvent pas se faire trop souvent. De plus, à chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée. Comme le montre l'étude comparative [13] ou le rendement MPPT de la méthode V_{OC} est de 88,1 %, soit 8 et 10 % inférieur à la commande P&O et IncCond respectivement.

1.2.2.2 La vraie commande MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer [11]. Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_i à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{i-1} . De là, un nouveau rapport cyclique K est calculé et est appliqué au hacheur DC-DC. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement.

- **Les commandes MPPT à algorithmes performants**

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM [52-53]. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond).

- Les commandes “Perturb and Observe” (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte [53-55]. Ainsi, l'incrément positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. Donc c'est suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure 1.6 représente l'algorithme classique associé à cette commande.

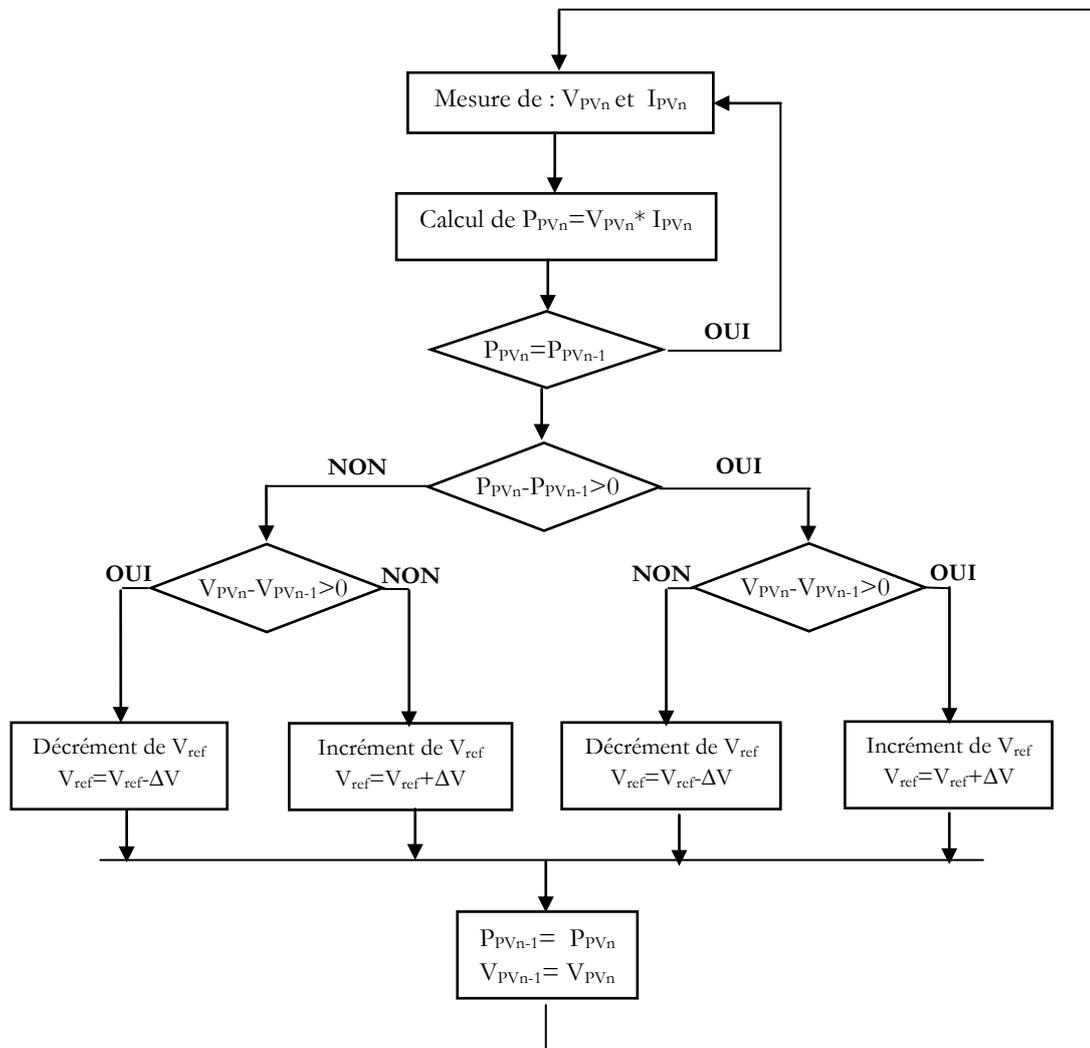


Figure 1.6 Algorithme de la commande perturbe & observe : P&O

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée vue sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi. Ce problème est mis en évidence, par exemple par [54].

Une étude comparative entre différents algorithmes de recherche a été effectuée par D. P. Hohm en 2000 [52]. Dans cet article, l'auteur a développé un banc de mesure et une procédure de test qui permettent d'évaluer différentes commandes MPPT sous les mêmes conditions climatiques durant une journée de fonctionnement. Il ressort de cette étude que la commande MPPT testée basée sur le principe P&O [57] affiche un rendement MPPT de l'ordre de 96,5 %.

En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

Ce mode de recherche présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent.

- **Principe des commandes "Hill Climbing"**

La technique de contrôle nommée Hill Climbing [58-61] consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur DC/DC.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure 1.7. La variable Slope correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. K et P_{pv} représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, a symbolise la variable d'incrémentement du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance P_{pv_n} est comparée à la valeur déterminée précédemment $P_{pv_{n-1}}$, en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur Slope change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment

rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations. L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède les mêmes inconvénients que la méthode P&O concernant des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques. Ces imperfections sont mises en évidence par Weidong Xiao [57], à l'aide d'un tableau évaluant les performances de cette commande en termes, de temps de réponse et de puissance extraite en sortie du PV, pour différentes valeurs de la variable a .

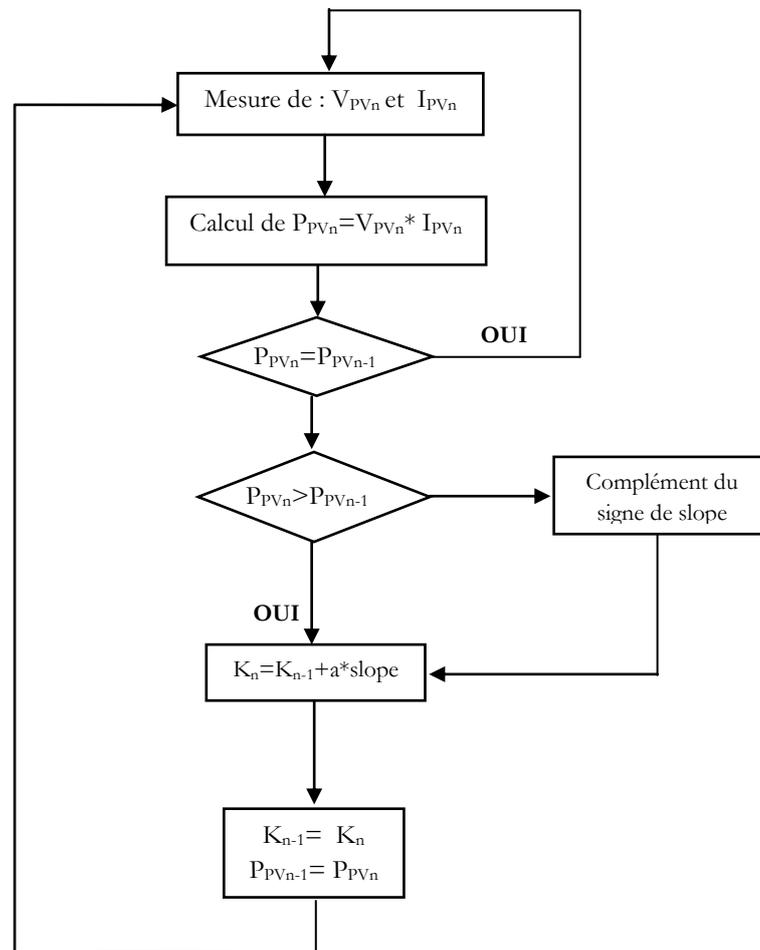


Figure 1.7 Algorithme de la commande Hillclimbing

Des informations concernant le rendement de cette commande sont fournies par le même auteur en [57]. Il est donc difficile d'évaluer concrètement les performances de cette commande lors d'un fonctionnement en condition réelle où le PPM peut varier à tout instant avec des amplitudes relativement importantes.

Il est à signaler qu'un gain intéressant de l'ordre de 15 % en termes de puissance extraite en sortie du GPV a été démontré par Eftichios Koutroulis [56] par l'utilisation de ce type de commande comparé au même convertisseur piloté à partir d'un rapport cyclique fixe, dont la valeur correspond à la position du PPM d'un GPV pour une température et une puissance d'ensoleillement données.

- **Principe des commandes "Incrément de conductance" (IncCond)**

Cette technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM [59-61]. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV. D'autre part, l'évolution de la puissance du module (P_{PV}) par rapport à la tension (V_{PV}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. Théoriquement, avec la méthode de contrôle de type IncCond, il est possible de trouver un PPM et de s'y immobiliser en stoppant la perturbation.

En pratique, le système présente une oscillation comme la commande P&O autour du PPM, à cause du bruit aux niveaux des acquisitions des paramètres d'entrée (I_{PV} et V_{PV}) et de la difficulté du système de bien analyser si la relation : $I_{PV}/V_{PV} + d I_{PV}/d V_{PV} = 0$ est bien remplie ou non. Ainsi, en réalité, cette condition n'étant jamais obtenue, le système est toujours en train de la rechercher. Par rapport à la commande P&O, le temps d'exécution de l'algorithme est plus long car ce dernier est plus complexe figure 1.8.

Une étude comparative en termes de rendement MPPT est également réalisée par H. Hussein [59] entre la commande IncCond et P&O. Lors de cet essai, le rendement affiché par la commande IncCond est de 89,9 % par rapport au 81,5 % de la commande P&O. Cette différence est principalement due aux variations relativement faibles autour du PPM engendrées par la commande IncCond. Lors du test comparatif effectué par [49], le rendement MPPT obtenu avec la commande IncCond était de 98,2 %. Cette différence peut s'expliquer par des conditions de test relativement éloignées dans les deux papiers. L'analyse de ces différentes méthodes de recherche, montre qu'elles ne sont pas trop éloignées sur leur fonctionnement en pratique ni sur les compromis à effectuer entre précision et rapidité au niveau de la valeur de la variable d'incrément.

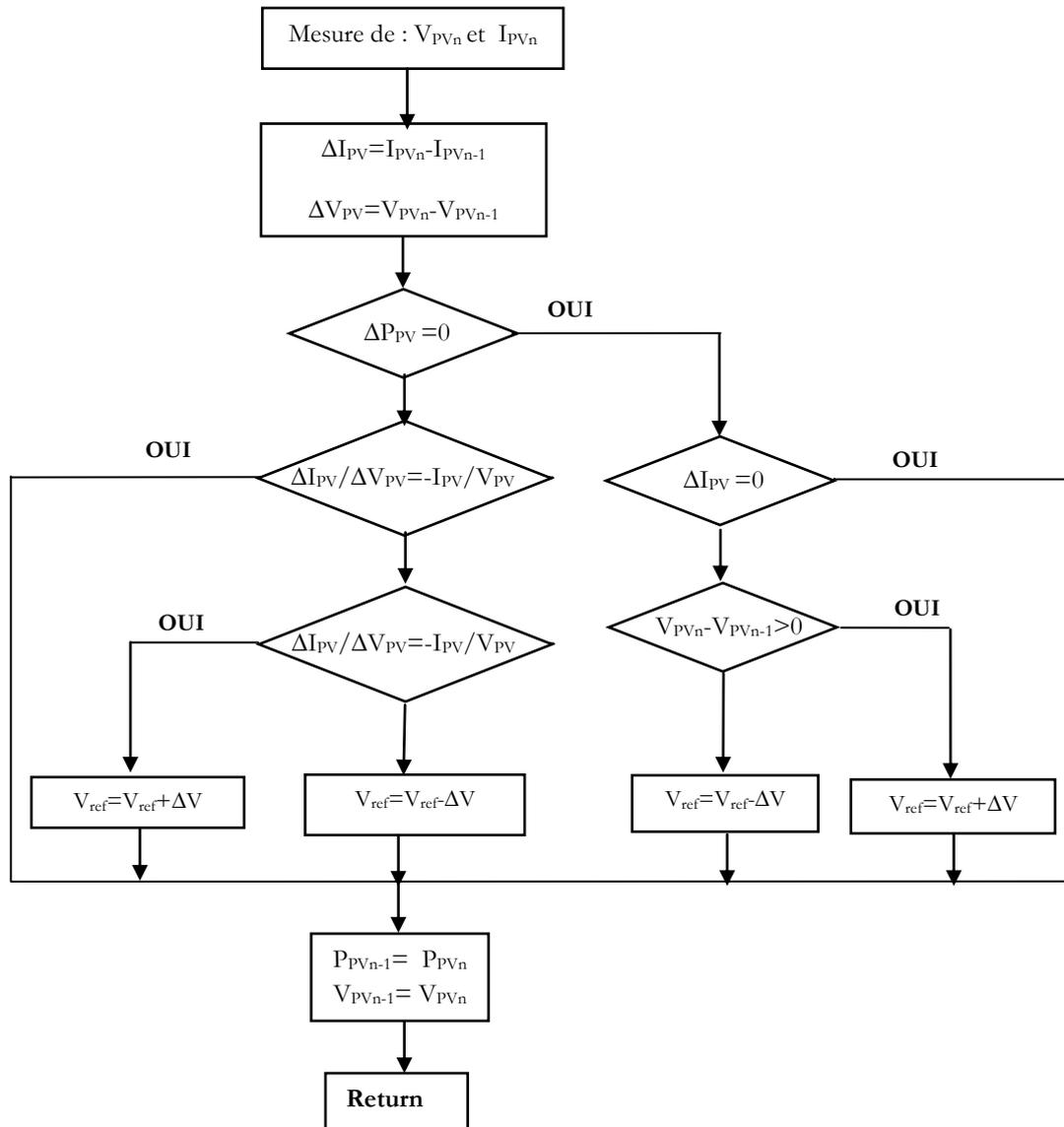


Figure 1.8 Algorithme de l'incrément de la Conductance : IncCond

- **Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue.**

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs [65-68]. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

T. Senjyu [66], propose la commande logique floue, est comparée directement à la méthode Hill Climbing. Les différents oscillogrammes montrent que le temps de réponse est légèrement amélioré, par contre l'erreur statique obtenue est relativement faible.

Le papier publié en 2004 [67] a démontré que l'emploi d'une commande MPPT basée sur le principe de la logique floue permet d'améliorer d'un facteur temps de réponse par rapport à une commande P&O classique. Dans cet article, aucune indication n'est donnée sur la variable d'incrément, mais après analyse des relevés, on en déduit que celle-ci est relativement petite car les oscillations autour du PPM sont très faibles expliquant la différence en termes de réponse dynamique. Un phénomène secondaire à prendre en compte est le temps mis par cette commande pour se stabiliser sur un nouveau PPM. La commande floue met 1,75 s pour s'immobiliser sur le PPM, alors que la commande P&O s'y positionne au bout de 1,25s, c'est-à-dire dès qu'elle l'a atteinte. Cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût.

- **Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels.**

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes [22-23-24-25]. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Ainsi elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants. Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches : Couche d'entrée, Couche cachée et Couche de sortie. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (V_{OC}, I_{CC}) associées ou non à des données atmosphériques. La sortie est un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le hacheur pour fonctionner le plus souvent possible au PPM.

1.3 CHARGE : MOTO-POMPE

1.3.1 Moteur

Au début, les pompes étaient entraînées par des moteurs à courant continu. Le couplage direct du GPV-moteur où le moteur DC était à excitation série, parallèle et indépendante est considéré avec ces performances en régime permanent et transitoire [10-14].

La performance du système est notablement différente de ceux connectés à une source de tension. En ajoutant que le système fonctionne seulement avec des forts niveaux d'ensoleillements pour des caractéristiques de charges constantes. Pour une caractéristique de charge aérodynamique (pompe centrifuge), le système a besoin relativement d'un couple plus bas, donc le système commence à fonctionner à un niveau d'ensoleillement plus faible.

[11-12] ressort que le moteur DC à excitation séparée était plus souhaitable pour le système PV depuis qu'il offre une bonne adaptation avec la source PV. L'introduction du MPPT améliore le démarrage et les performances du système en régime permanent [14-19].

Les caractéristiques transitoires du moteur DC alimenté par une source PV sont rapportées par [13-16-18]. Le courant et le couple de démarrage sont investigués pour un système PV sans et avec MPPT.

À cause des problèmes de maintenance rencontrés avec l'entraînement de moteur DC, les moteurs à induction offrent une bonne alternative vu sa maintenance, sa fiabilité, son coût bas et la robustesse du matériel. L'adaptation de la charge avec le moteur à induction-système de pompage PV est investiguée [47].

[48] se focalise sur l'introduction d'un MPPT pour un système PV-moteur à induction. Il examine l'influence de l'MPPT sur le rendement du GPV quand on applique le contrôle V/f pour l'entraînement du moteur à induction avec une pompe centrifuge submergée. L'analyse du régime transitoire et permanent du moteur à induction alimenté par une source PV est considérée [19-21].

Le développement dans le champ de l'électronique, contrôle et la technologie des matériaux a donné une impulsion pour un nouveau design moteur suite aux avantages que fournit l'utilisation des aimants à bases de terres rares : couple/poids considérable, d'où un volume modéré. Un rendement élevé (80 - 90%) pour une large gamme de vitesses et une maintenance moindre, grâce à la suppression de la commutation, leur donne la priorité pour les systèmes PV de pompage : ce sont les moteurs à courant continu à aimant permanent sans balais (PMBLDC) [16-18-28].

1.3.2 Pompe

Pour le pompage PV, deux types de pompes sont généralement utilisés : la pompe volumétrique et la pompe centrifuge. Les pompes volumétriques ont une caractéristique de charge constante par contre les pompes centrifuges ont une caractéristique aérodynamique (figure 1.10). Ces dernières travaillent pour une durée longue avec même de faible niveau d'ensoleillement et leur caractéristique de charge est plus proche des puissances maximales du GPV [8-9-11-20]. Dans [40] a montré que le rendement du couplage direct d'un système de pompage PV est de 58,11% pour une pompe volumétrique et est plus que 86% quant une pompe centrifuge est utilisée (figure 1.9).

Pour des petites applications, des pompes vibratoires peuvent être utilisées [34-45-46]. Ce type de pompe est caractérisé par sa simplicité, son faible coût et sa robustesse. Dans le but d'améliorer le rendement du système global par la réduction des pertes de convertisseur de puissance, un convertisseur à résonance est fréquemment utilisé avec ce type de pompes.

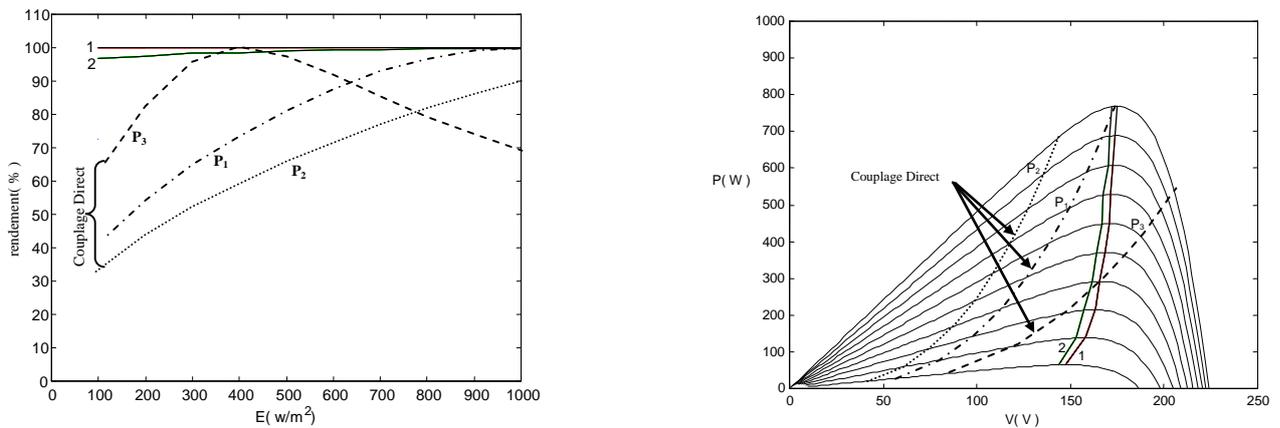
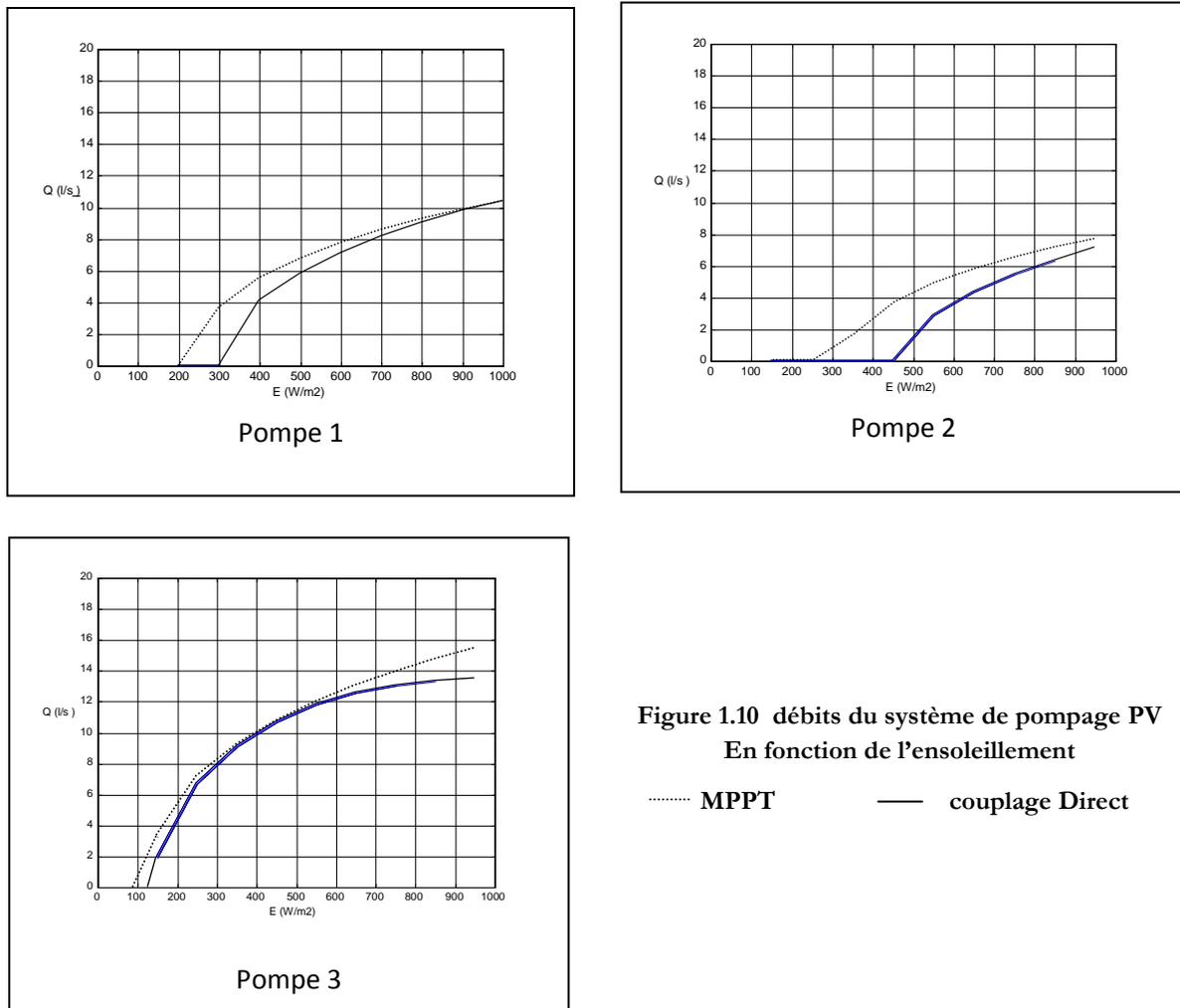


Figure 1.9 Rendement du système de pompage PV en fonction d'ensoleillement

1: vraie MPPT 2: $V_{ref} = \%V_{co}$
 P₁, P₂, P₃ : Couplage direct



**Figure 1.10 débits du système de pompage PV
En fonction de l'ensoleillement**
 MPPT — couplage Direct

1.4 CONCLUSION

D'après les travaux précédents, de diverses discussions sont présentées pour l'amélioration de la capture de puissance et du rendement du générateur PV, en utilisant plusieurs techniques de contrôle qui sont implémentés à travers Hardwars configurations.

Dans toutes ces études, pour un générateur PV et une charge donnés, l'objectif principal est comment adapter le générateur PV et la charge. Pour le système de pompage PV, les moteurs à courant continu à excitation séparée et à aimant permanent donnent la bonne adaptation pour le

générateur PV. Les convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost sont investigués. Divers techniques de contrôle sont rapportées et implémentées.

Dans la présente étude, le moteur à courant continu à aimant permanent sans balais (PMBLDC) est choisi vu les avantages qu'il présente via celui à courant continu à excitation séparée. La pompe centrifuge émergée donne la bonne adaptation pour le générateur PV.

Il ressort de la littérature que les commandes basées sur les techniques d'intelligences artificielles sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées imprécises. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités. Comme elles peuvent présenter des meilleures performances en termes de précision et de rapidité d'où notre choix d'utiliser :

- La logique floue pour le contrôle du moteur PMBLDC.
- Les algorithmes génétiques pour l'optimisation du rendement du système de pompage photovoltaïque.

Pour étudier le système de pompage photovoltaïque, il faut d'abord étudier les équations qui régissent ce système. C'est sur la modélisation de ce dernier que porte le prochain chapitre.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE

2. MODELISATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus répandues de l'énergie solaire dans le secteur agricole. L'usage à des fins agricoles de l'énergie solaire photovoltaïque pour transporter l'eau est une solution présentant un bon rapport coût-efficacité, réclamant peu d'entretien et digne de foi dans des régions où le réseau électrique n'est pas facilement accessible ou toujours fiable. Le présent chapitre décrit la modélisation mathématique des différents sous système constituants. Le système de pompage est l'association d'un ensemble de sous-systèmes interconnectés qui sont représentés par la figure 2.1:

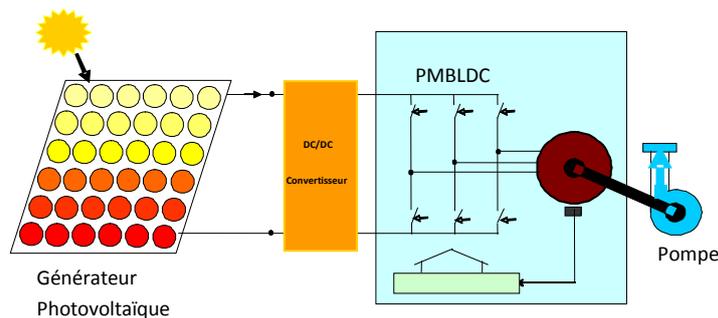


Figure 2.1 Système de pompage photovoltaïque.

Il est constitué principalement par :

- Un générateur photovoltaïque (GPV) composé de modules solaires photovoltaïques, ces derniers sont constitués des cellules. Le courant électrique produit, dont l'intensité varie selon les conditions climatiques.
- Un convertisseur statique d'énergie composé d'un convertisseur de l'électronique de puissance (hacheur) permettant la transformation du courant continu en courant continu, nécessaire pour améliorer le puissance, le rendement et la fiabilité du système photovoltaïque en adaptant la charge au générateur photovoltaïque. Ce convertisseur statique permet une variation de la vitesse de la pompe en fonction de l'éclairement, et

une poursuite du point à puissance maximale du GPV, permettant une optimisation de la quantité d'eau pompée.

- Un groupe motopompe qui comprend deux parties :
 - 1) Un moteur PMBLDC.
 - 2) Une pompe centrifuge [69].

2.1 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV)

Le générateur photovoltaïque peut être modélisée par une matrice formée de N_s modules séries et de N_p rangées en parallèles, dont la caractéristique courant-tension peut être régit par [10-69-73-75-76]:

$$I_g = I_{ccg} - I_{og} \left[\exp \left(\frac{V + R_{sg} \cdot I}{V_{thg}} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

$$\text{avec} \quad I_{ccg} = N_p \cdot I_{sc} \quad (2.2)$$

$$I_{og} = N_p \cdot I_0 \quad (2.3)$$

$$V_{thg} = N_s \cdot V_{th} \quad (2.4)$$

$$R_{sg} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \quad (2.5)$$

La tension thermique V_{th} et le courant I_0 sont respectivement identifiés par [69-95-80].

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc}}{\log \left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}} \right)} \quad (2.6)$$

$$I_0 = \left(I_{sc} - I_{op} \right) \exp \left(- \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op}}{V_{th}} \right) \quad (2.7)$$

Le modèle mathématique du GPV présenté au dessus est composé de dix modules en série et deux en parallèle. Le système moto-pompe-générateur PV est intercalé par un convertisseur DC-DC afin de poursuivre le point de sa puissance maximale.

2.2 CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU (DC-DC) : HACHEUR

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du générateur PV, il est nécessaire d'adapter la charge au générateur de telle sorte qu'on force le générateur à délivrer son maximum de puissance à la charge. Un convertisseur statique continu-continu (hacheur) peut assurer cette fonction. Bien sûr, il faut prévoir un système de gestion et de commande qui agit sur le rapport cyclique du hacheur pour assurer une adaptation optimale qui repose sur le fait qu'une variation de la charge modifie la position du point de fonctionnement de l'ensemble générateur-charge. Il suffit d'agir sur le rapport cyclique du hacheur pour assurer l'adaptation de la charge vue par le générateur. Le convertisseur DC-DC utilisé pour notre cas est un hacheur Buck (abaisseur) figure 2.2. Ce choix est basé sur l'intersection de la caractéristique de charge par rapport à celle du puissance-tension (voir chapitre 1). Le hacheur permet d'avoir une tension de sortie moyenne réglable, selon les durées de conduction et de blocage des composants de l'électronique de puissance qui le constitue.

La tension moyenne de sortie peut être donnée par [88] :

$$V_{\text{moy}} = K \cdot V \quad (2.8)$$

Et le courant moyen est exprimé par

$$I_{\text{moy}} = I / K \quad (2.9)$$

Où K est le gain du hacheur.

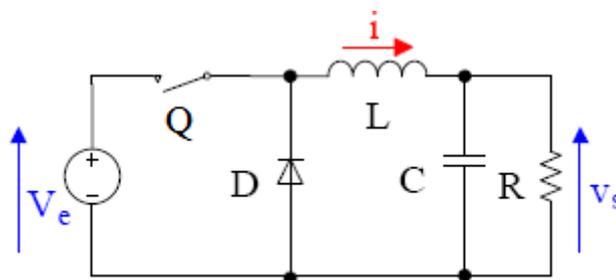


Figure 2.2 Schéma de principe du hacheur Buck

La puissance maximisée par le hacheur sera utilisée par le moteur PMBLDC pour entraîner une pompe centrifuge.

2.3 MOTEUR A COURANT CONTINU A AIMANTS PERMANENTS SANS BALAIS

Récemment, les moteurs à courant continu ont été graduellement remplacés par des moteurs PMBLDC puisque les applications industrielles exigent des actionneurs plus puissants, qui ont de faible encombrement. La souplesse à la commande, la longue durée de vie due à l'absence de la commutation mécanique ainsi que le faible bruit acoustique sont les principaux avantages de ce moteur. Leur principal inconvénient est la nécessité d'avoir une électronique de contrôle. Mais cet inconvénient est dépassé grâce au progrès réalisé dans les domaines de l'électronique de puissance et l'arrivée des nouveaux calculateurs numériques très sophistiqués ce qui permet de réaliser des variateurs performants.

Le moteur à courant continu à aimant permanent sans balais (PMBLDC) figure 2.3 qui tend à ébranler la suprématie dans les applications photovoltaïques et ce par les avantages qu'il présente : [18-28].

- Un rapport couple / poids considérable, d'où un volume modéré.
- Un rendement élevé (80 - 90%) pour une large gamme de vitesses.
- Moindre maintenance grâce à la suppression de la commutation mécanique.

Sachant que le moteur sans balai possède une f.e.m de forme trapézoïdale figure 2.4. L'application de la théorie des deux axes(d,q) (transformation de Parck) n'est la meilleure approche pour la modélisation et la simulation (nécessité d'une décomposition de f.e.m par série de Fourier). Pour se faire, on a recouru au modèle de la machine dans les issues naturelles, où les f.e.m des trois phases sont générées suite à la position du rotor, le tableau 2.1 résume ses expressions [16-18-19]. Durant 60° électrique, on a deux phases qui conduisent en série. A la fin d'une séquence, un élément s'ouvre et un autre se ferme pour commuter le courant d'une phase à l'autre. Ce dernier ne bascule pas instantanément d'une valeur à une autre vu l'aspect inductif de la machine, mais il passe par une étape de commutation où ce courant circule dans une maille court-circuitée. Quand l'énergie emmagasinée dans les inductances statoriques s'annule, le courant s'annule et change de sens et la diode se bloque comme est montré sur le tableau 2.3.

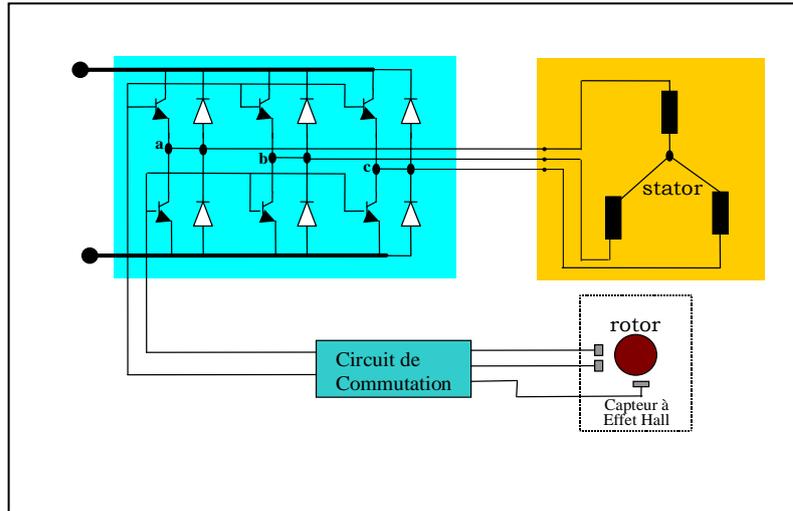


Figure2.3 Moteur PMBLDC et le commutateur électronique

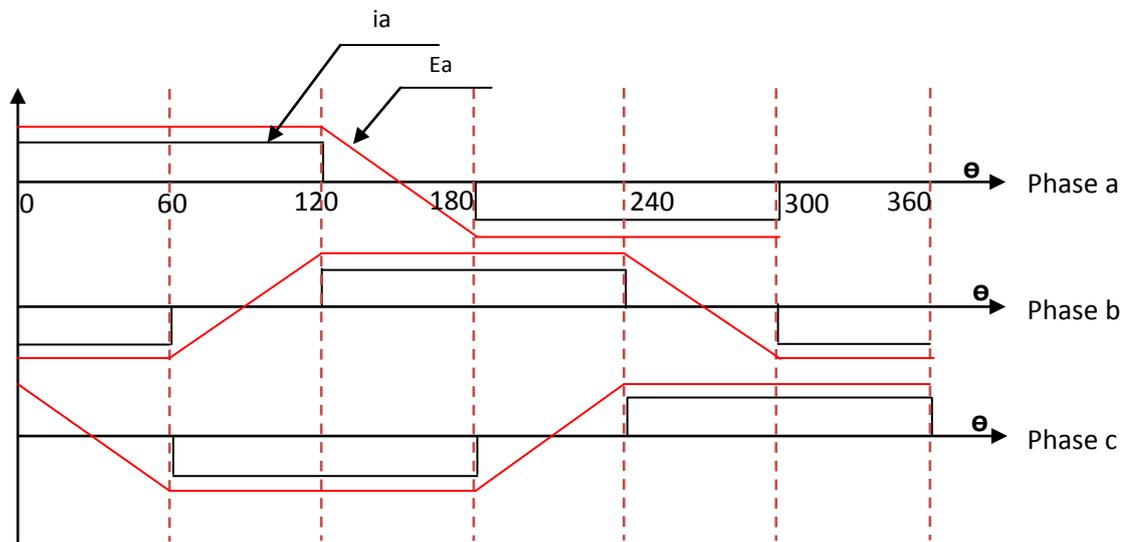


Figure2.4 Les fonctions normalisées des f.e.m et des courants des phases

Tableau 2.1 : Les expressions des f.e.m en fonction de la position

$\theta [^\circ]$	e_a	e_b	e_c
$0^\circ-60^\circ$	$K_e\omega$	$-K_e\omega$	$-6K_e\omega\theta/\pi + K_e\omega$
$60^\circ-120^\circ$	$K_e\omega$	$6K_e\omega\theta/\pi - 3K_e\omega$	$-K_e\omega$
$120^\circ-180^\circ$	$-6K_e\omega\theta/\pi + 5K_e\omega$	$K_e\omega$	$-K_e\omega$
$180^\circ-240^\circ$	$-K_e\omega$	$K_e\omega$	$6K_e\omega\theta/\pi - 7K_e\omega$
$240^\circ-300^\circ$	$-K_e\omega$	$-6K_e\omega\theta/\pi + 9K_e\omega$	$K_e\omega$
$300^\circ-360^\circ$	$6K_e\omega\theta/\pi - 11K_e\omega$	$-K_e\omega$	$K_e\omega$

Tableau 2.2 Séquence de commutation des interrupteurs [4-12]

Position angulaire θ°	Eléments conducteurs	diodes conductrices	Période de conduction de roue libre φ
$0^\circ-60^\circ$	T1 et T5	D6	0° a φ
$60^\circ-120^\circ$	T1 et T6	D2	60° a $60^\circ+\varphi$
$120^\circ-180^\circ$	T2 et T6	D4	120° a $120^\circ+\varphi$
$180^\circ-240^\circ$	T2 et T4	D3	180° a $180^\circ+\varphi$
$240^\circ-300^\circ$	T3 et T4	D5	240° a $240^\circ+\varphi$
$300^\circ-360^\circ$	T3 et T5	D1	300° a $300^\circ+\varphi$

Les séquences de commutation des éléments de l'onduleur (tableau 2.2), d'où on déduit les valeurs de tension de commande, voir tableau 2.3

Les valeurs des tensions V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont résumées dans le tableau 2.3 :

Tableau 2.3 tensions de commande de l'onduleur

θ :Position angulaire	V_{ao}	V_{bo}	V_{co}
0° - 60°	$U/2$	$-U/2$	0
60° - 120°	$U/2$	0	$-U/2$
120° - 180°	0	$U/2$	$-U/2$
180° - 240°	$-U/2$	$U/2$	0
240° - 300°	$-U/2$	0	$U/2$
300° - 360°	0	$-U/2$	$U/2$

2.3.1 Model du moteur PMLDC

La loi d'Ohm généralisée nous permet de décrire la partie électrique du moteur à l'aide des expressions suivantes [18-69].

$$V_{an} = Ri_a + p\lambda_a + e_a \quad (2.10)$$

$$V_{bn} = Ri_b + p\lambda_b + e_b \quad (2.11)$$

$$V_{cn} = Ri_c + p\lambda_c + e_c \quad (2.12)$$

$$V_{an} = V_{a0} - V_{n0} \quad (2.13)$$

$$V_{bn} = V_{b0} - V_{n0} \quad (2.14)$$

$$V_{cn} = V_{c0} + V_{n0} \quad (2.15)$$

Où R : résistance par phase du stator.

Les expressions des flux sont données par :

$$\lambda_a = L_s i_a - M(i_b + i_c) \quad (2.16)$$

$$\lambda_b = L_s i_b - M(i_a + i_c) \quad (2.17)$$

$$\lambda_c = L_s i_c - M(i_a + i_b) \quad (2.18)$$

Où L_s : inductance propre et M : l'inductance mutuelle.

$$\text{And } i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.19)$$

Par substitution des Eq.2.19 dans Eqs 2.16-2.18:

$$\lambda_a = i_a(L_s + M) \quad (2.20)$$

$$\lambda_b = i_b(L_s + M) \quad (2.21)$$

$$\lambda_c = i_c(L_s + M) \quad (2.22)$$

Par les équations électriques 2.14-2.16, on obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{eq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{eq} & 0 \\ 0 & 0 & L_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Où $L_{eq} = L_s + M$

De ce système les équations de phases découplées et les équations explicites de courants sont données par :

$$p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L_{eq} & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_{eq} & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_{eq} \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right] \quad (2.24)$$

L'expression de la partie mécanique est donnée par l'équation suivante:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + B\Omega = T_e - T_r \quad (2.25)$$

Avec : T_e : couple électromagnétique

T_r : couple de charge

Ω : vitesse.

J : moment d'inertie.

B : coefficient de frottement.

En négligeant le coefficient de frottement et en posant $\Omega = \frac{\omega}{P}$ où P est le nombre de paires de pôles, (2.25) peut être écrite :

$$\frac{d\omega}{dt} = P \cdot (T_e - T_r) / J \quad (2.26)$$

L'expression du couple est exprimée par:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (2.27)$$

Et la position angulaire est donnée par :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.28)$$

2.3.2 Contrôle du courant par Hystérésis

Il existe des stratégies pour le contrôle des courants dont le principe consiste à assurer l'autopilotage et d'imposer des courants dans les phases de la machine aussi proches que possible de leurs références en fonction de la position du rotor et des grandeurs électromécaniques désirées. L'une de ces méthodes est le contrôle des courants par hystérésis qui est couramment utilisée dans l'industrie, et qui a l'avantage de son indépendance des valeurs des paramètres de la machine [28-69].

Cette technique est basée sur la commande des interrupteurs du convertisseur de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase du moteur soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. En fonction des conditions opératives, la fréquence de commutation des interrupteurs suit une variation aléatoire [28].

Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les références de courants. La sortie des comparateurs est reliée à la logique de commande de l'onduleur de manière à imposer une commutation des interrupteurs lorsque le courant s'écarte de la valeur d'hystérésis de sa référence. Les références de courants sont sinusoïdales dans le cas des moteurs à f.e.m sinusoïdaux, elles sont rectangulaires dans le cas des moteurs à f.e.m trapézoïdales [26-28].

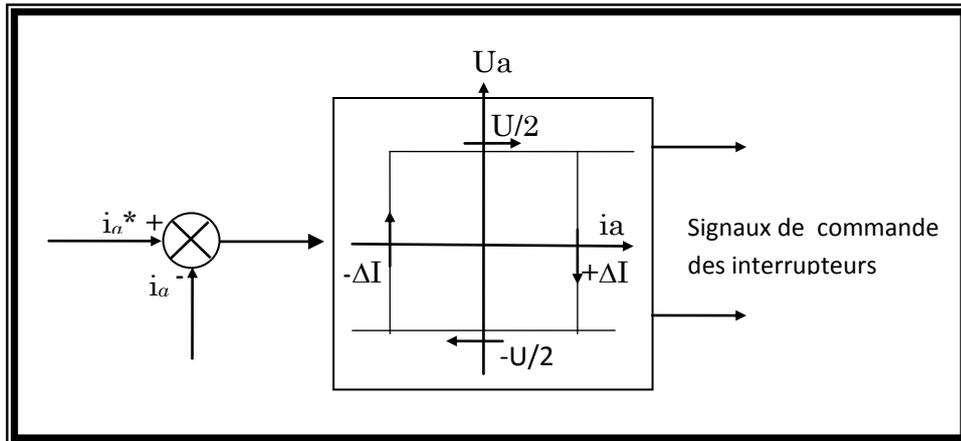


Figure 2.5 principe du régulateur de courant a Hystérésis.

Le but de cette technique est de faire contrôler les courants des phases de la machine (i_a, i_b, i_c) et de les maintenir entre deux enveloppes : supérieure et inférieure (valeur maximale et valeur minimale) autour des courants de référence (i_a^*, i_b^*, i_c^*). Les interrupteurs sont contrôlés par un comparateur à hystérésis et actionnés lorsque le courant de phase atteint la valeur maximale ou minimale. Le schéma de principe du régulateur de courant à hystérésis est donné par la figure 2.5 [82]. L'ouverture logique des interrupteurs du convertisseur (onduleur) est formulée comme suit :

Tableau 2.4 modèle du contrôleur du courant à hystérésis

Si $i_a < (i_a^* - \Delta I)$	T_1 on	T_4 off	$V_a = U/2$
Si $i_a > (i_a^* + \Delta I)$	T_1 off	T_4 on	$V_a = -U/2$
Si $i_b < (i_b^* - \Delta I)$	T_2 on	T_5 off	$V_b = U/2$
Si $i_b > (i_b^* + \Delta I)$	T_2 off	T_5 on	$V_b = -U/2$
Si $i_c < (i_c^* - \Delta I)$	T_3 on	T_6 off	$V_c = U/2$
Si $i_c > (i_c^* + \Delta I)$	T_3 off	T_6 on	$V_c = -U/2$

Avec : $2\Delta I$: est la bande d'hystérésis enveloppant les trois courants de référence.

La fréquence de commutation dépend de plusieurs facteurs comme :

- la valeur de tension continue U .
- le niveau de la f.e.m dépendant de la vitesse de rotation.

- l'inductance de fuite de l'enroulement statorique et la bande d'hystérésis ΔI .
- La fréquence maximale de commutation obtenue au démarrage lorsque la vitesse est presque nulle, peut être donnée par l'expression suivante [28-69] :

$$f_{\max} = \frac{U}{8.L_s.\Delta I} \tag{2.29}$$

L'amplitude des trois phases (I^*) est déterminée par rapport au couple de référence (C^*) et la constante du f.e.m (K_e) comme suit :

$$I^* = \frac{C^*}{K_e} \tag{2.30}$$

Les courants de références (i_a^*, i_b^* et i_c^*) qui sont fonction de la position du rotor (θ), prennent les valeurs du courant de référence I^* , $-I^*$ ou Zéro. La valeur du courant de référence est modélisée chaque 60° et est montrée dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 Les courants de références

Position	Courants de référence		
	i_a^*	i_b^*	i_c^*
$0^\circ - 60^\circ$	I^*	$-I^*$	0
$60^\circ - 120^\circ$	I^*	0	$-I^*$
$120^\circ - 180^\circ$	0	I^*	$-I^*$
$180^\circ - 240^\circ$	$-I^*$	I^*	0
$240^\circ - 300^\circ$	$-I^*$	0	I^*
$300^\circ - 360^\circ$	0	$-I^*$	I^*

2.3.3 Contrôleur de vitesse

Tout système à contrôler possède un contrôleur, qu'il soit analogique ou numérique. Ces contrôleurs ont pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. en second lieu, ils doivent agir sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

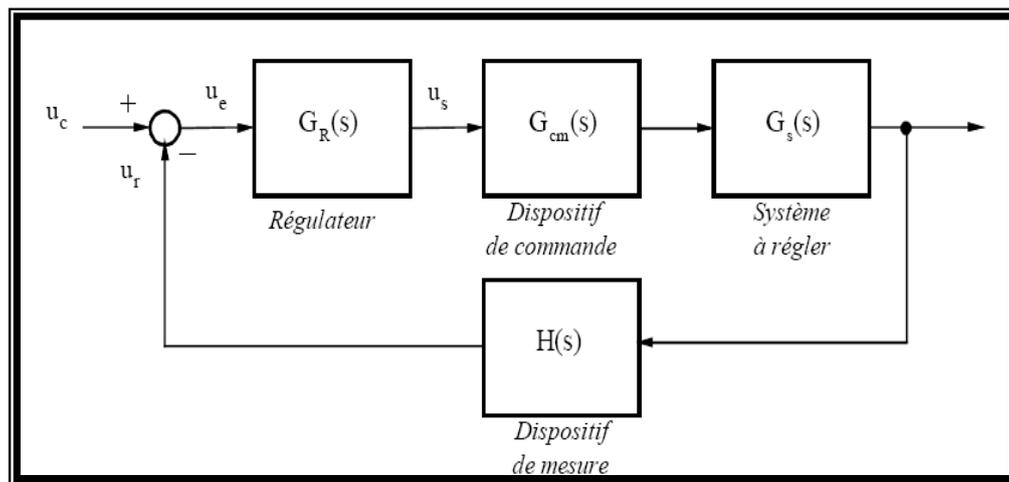


Figure 2.6 Le système de commande.

Les coefficients des régulateurs standards sont ajustables. Une fois ajustée, les coefficients restent fixes. L'ajustement optimal n'est donc possible que pour un point de fonctionnement du système à régler. Si les caractéristiques statiques et dynamiques de ce dernier varient dans sur large domaine, il y a des points de fonctionnement où l'amortissement dans le circuit de réglage n'est plus satisfaisant, et où il peut même apparaître un risque d'instabilité. Dans ces cas critiques, on fait appel à des régulateurs adaptatifs. Leurs coefficients sont variables en fonction d'une tension de contrôle qui doit dépendre du point de fonctionnement, de sorte que le circuit de réglage est toujours stabilisé de manière optimale.

Parfois les régulateurs doivent présenter des caractéristiques non linéaires. Il est souvent nécessaire de limiter la tension de sortie d'un régulateur, par exemple pour éviter une intervention trop brutale lors de l'apparition de phénomènes transitoires importants.

Pour le réglage de la vitesse, on a utilisé un régulateur PI (Proportionnel Intégral). La vitesse de rotation ω (n) est comparée avec la vitesse de référence ω^* (n). L'erreur de vitesse sera donc:

$$\omega_e(n) = \omega^*(n) - \omega(n) \quad (2.31)$$

L'erreur de vitesse, positive ou négative, dépend de la vitesse rotorique et de la vitesse de référence. La sortie du régulateur est exprimée par le couple donné dont l'expression est :

$$C_e(n) = C_e(n-1) + K_p [\omega_e(n) - \omega_e(n-1)] + K_i \omega_e(n) \quad (2.32)$$

Où K_p , K_i sont respectivement le coefficient proportionnel et celui intégral du régulateur.

Les lois de commande sont associées avec un régulateur proportionnel intégral PI pour contrôler le couple électromagnétique et d'effectuer la régulation de la vitesse. Nous savons que la dynamique de la machine, pour le contrôle de la vitesse ou de la position, est donnée par l'équation mécanique (2.28).

Le but de cette approche est de calculer les paramètres du régulateur et de tester les différentes dynamiques. Pour cela, un schéma-bloc simplifié du système de contrôle avec un régulateur PI est représenté sur la figure 2.7.

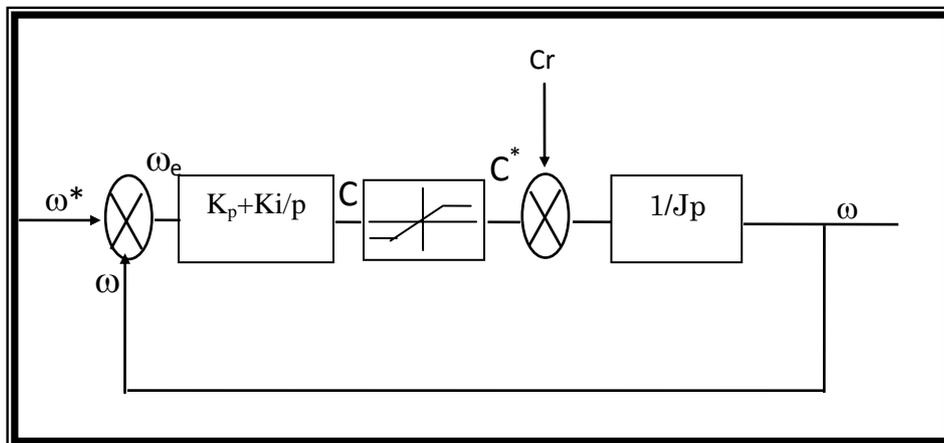


Figure 2.7 Schéma bloc simplifié du système de régulation PI.

Afin de calculer les paramètres du régulateur PI, on réalise l'essai de pompage de Ziegler Nichols. La méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée nécessite de boucler le système sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente figure 2.8 ; on se trouve ainsi à la limite de stabilité du système. Après avoir relevé le gain critique K_{cr} et la période d'oscillation T_{cr} . On peut calculer les paramètres du

régulateur choisi à l'aide du tableau 2.6. Les valeurs proposées par Ziegler et Nichols ont été testées dans de très nombreuses situations et il faut souligner qu'ici également elles conduisent à un temps de montée relativement court assorti d'un dépassement élevé.

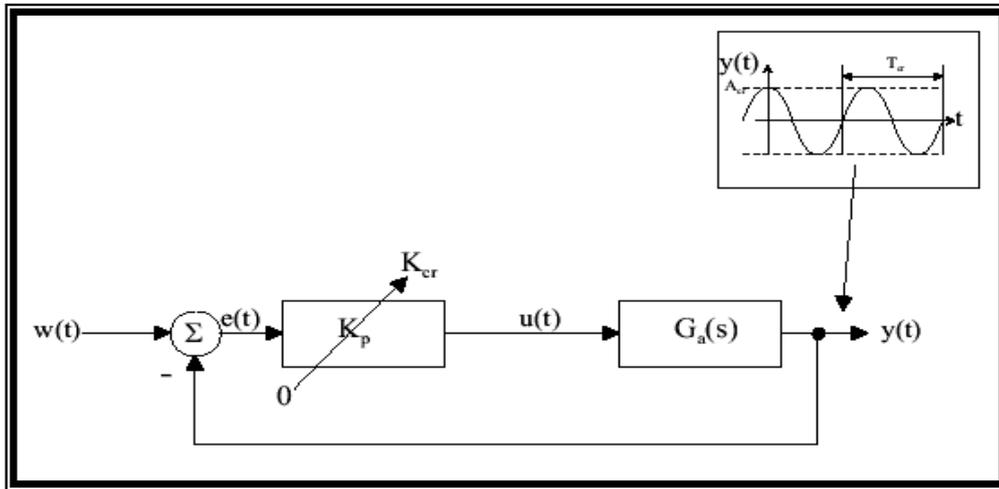


Figure 2. 8 Mise en oscillation d'un système par contre-réaction

Tableau 2.6 Ajustement des gains des régulateurs P, PI et PID selon ZN

Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	-	-
PI	$0.45 K_{cr}$	$0.83 T_{cr}$	-
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 T_{cr}$	$0.125 T_{cr}$

2.4 POMPE CENTRIFUGE

Il existe une grande variété de pompes conçues pour fonctionner avec des systèmes solaires de pompage et répondre à une diversité de besoins. La pompe choisie dans le système photovoltaïque décrit précédemment, est une pompe centrifuge qui sert à aspirer de l'eau d'un réservoir situé en amont et de la refouler par la suite dans un réservoir en aval, et ce en amplifiant sa pression.

2.4.1 Lois de similitude

Les lois de similitude sont exprimées pour une pompe donnée tournant à différentes vitesses par :

1) Le débit est proportionnel à la vitesse : $Q = f(\omega)$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.33)$$

2) Les hauteurs sont proportionnelles au carré de la vitesse : $H = f(\omega^2)$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \quad (2.34)$$

3) La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse : $Pa = f(\omega^3)$

$$\frac{Pa_2}{Pa_1} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^3 \quad (2.35)$$

2.4.2 Courbes Caractéristiques des pompes centrifuges

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge aux différents régimes possibles est caractérisé par une surface ayant pour équation $F(H, Q, N) = 0$.

Toutefois ce système de représentation à trois dimensions est assez compliqué et on préfère adopter un système plus simple à deux dimensions, qui consiste à introduire la notion des courbes caractéristiques, imaginé par [93].

2.4.2.1 La caractéristique (hauteur – débit)

Elle sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale H en fonction du débit Q et prenant comme paramètre la vitesse de rotation ω .

Le faisceau de courbe parabolique identifié par l'expression de PFLEIDER-PETERMAN [69-93] exprimé par :

$$H = C_1 \cdot \omega^2 - C_2 \cdot \omega \cdot Q - C_3 \cdot Q^2 \quad (2.36)$$

Les coefficients C_1 , C_2 et C_3 sont des fonctions des caractéristiques de la pompe.

Le faisceau de courbes est présenté sur la figure 2.9, montrant une translation vers le haut de la caractéristique $H=f(Q)$ de la pompe pour différents vitesses. Le point de fonctionnement de la pompe est l'intersection cette dernière avec la courbe Caractéristique $H-Q$ de la canalisation montré sur la figure 2.9(1).

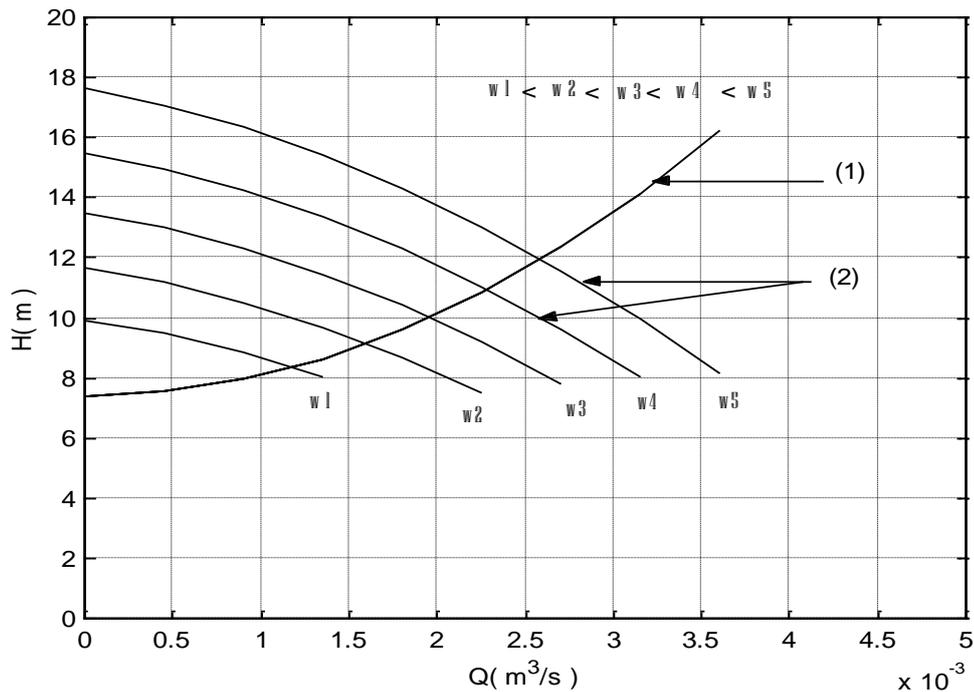


Figure 2.9 : 1. Caractéristique $H-Q$ de la canalisation
2. caractéristique $H-Q$ de la pompe pour différent vitesses

2.4.2.2 La caractéristique Rendement – débit

Le rendement d'une telle machine est le rapport de la puissance hydraulique P_{ah} empruntée au fluide, à la sortie de la pompe, à celle disponible sur l'arbre à l'entrée (mécanique) P_{ab} :

$$\eta = \frac{P_{ah}}{P_{ab}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_{ab}} \quad (2.37)$$

Avec ρ : la masse volumique de l'eau (kg/m^3)

g : l'accélération de pesanteur (m^2/s)

Q : le débit (l/s)

H : hauteur (m)

2.4.2.3 La caractéristique Couple – vitesse

La pompe centrifuge est caractérisée par un couple résistant, évoluant telle que la forme quadratique de la vitesse d'entraînement, il est décrit par [69-80] :

$$C_r = A \omega^2 \quad (38)$$

Où A : coefficient en fonction de la vitesse et de la puissance nominales.

2.4.3 Canalisation de refoulement

La canalisation de refoulement est constituée de deux circuits :

Dans le premier circuit ouvert, l'écoulement du fluide se fait dans le même réservoir, c'est le cas d'un banc d'essai de laboratoire. Dans le second circuit ouvert figure 2.10, la pompe aspire le liquide du réservoir d'aspiration ouvert R_1 , qui après son entrée dans la conduite de refoulement traverse un débitmètre et une vanne et s'élève jusqu'à la hauteur du réservoir aval R_2 où il s'écoule, les volumes des deux réservoirs amont et aval valent respectivement 2.25 m^3 et 0.6 m^3 , alors que le diamètre de la canalisation de refoulement est de 60mm.

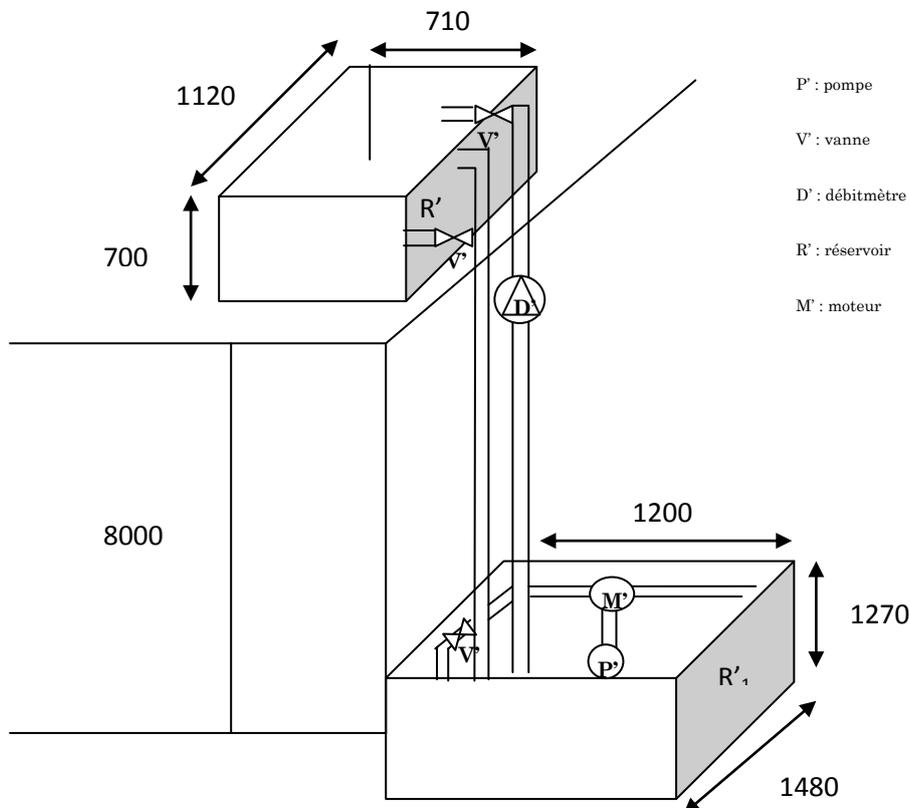


Figure 2.10 : Banc d'essai de pompage

2.4 CONCLUSION

On a présenté dans ce chapitre les modèles mathématiques de chaque sous système, commençant par le modèle du générateur photovoltaïque suivi par le convertisseur DC-DC : hacheur, puis le moteur à courant continu à aimant permanent sans balais PMBLDC et enfin celui de la pompe centrifuge avec sa canalisation de refoulement. Ces modèles seront utilisés pour mener une étude de simulation qui a pour but :

- Le contrôle du moteur à courant continu à aimant permanent sans balais (PMBLDC).
- L'optimisation du rendement global de l'association des sous systèmes constituant le système de pompage photovoltaïque.

L'application des techniques d'intelligences artificielles pour le contrôle et l'optimisation sera le sujet que porte le prochain chapitre.

CHAPITRE 3

APPLICATION DES TECHNIQUES D'INTELLIGENCES ARTIFICIELLES

- LOGIQUE FLOUE
- ALGORITHMES GENETIQUES

3. APPLICATION DES TECHNIQUES D'INTELLIGENCES ARTIFICIELLES

- LOGIQUE FLOUE
- ALGORITHMES GENETIQUES

Commander ou optimiser un processus par des méthodes classiques exige la connaissance des différents paramètres qui peuvent influencer sur celui-ci et agir en conséquence afin de contraindre le système à atteindre l'objectif fixé. Seulement cette connaissance est souvent entachée d'erreur et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation de processus. De plus le couplage rend la commande ou l'optimisation plus difficile. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant des méthodes dites robustes basées sur l'intelligence artificielles [82] à savoir la logique floue et les algorithmes génétiques.

La logique floue son intérêt réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles [82-83].

Les algorithmes génétiques sont très pertinent pour des problèmes d'optimisation globale en structure (problèmes avec plusieurs contraintes). Comme ils donnent une grande liberté dans le paramétrage et dans l'implémentation des différents traitements [90].

Ce chapitre présente un rappel théorique de quelques notions de la logiques floue, ainsi que son utilisation pour le contrôle du moteur PMSLDC alimenté par un GPV, entraînant une pompe centrifuge. Suivi par un aperçu général sur les principes de bases des algorithmes génétiques ensuite leur application pour l'optimisation du rendement du système de pompage photovoltaïque.

3.1 LA LOGIQUE FLOUE

La logique floue débute officiellement en 1965 avec la publication de l'article « fuzzy_sets » (ensemble flou) par le professeur Lotfi Zadeh [1], il pose les bases théoriques de la logique floue. Les quelques points de repères historiques suivants permettent de situer dans le temps le développement de la logique floue et ses applications au réglage. En 1973 Lotfi propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage de processus. En 1974, première application du réglage par la logique floue appliquée à une turbine à vapeur. En 1975 E. H. Mandani expérimente un régulateur flou qu'il perfectionne au cours des années suivantes. En 1985 M.Sugeno décrit des applications industrielles possibles en régulation floue, tel que les premiers produits industriels (JAPON) utilisant le principe de la logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de commande. En 1995 J.S.R.Jang élargit la logique floue aux systèmes à réseaux de neurones et l'intelligence artificielle.

La logique floue sur laquelle est basée la commande floue, est plus proche en son esprit au raisonnement humain et au langage naturel que les systèmes logiques traditionnels. Elle fournit principalement des moyens efficaces pour la capture de la nature approximative et inexacte du monde réel. La partie la plus importante d'un contrôleur flou est un ensemble de règles de commande reliées. De ce fait, un contrôleur flou représente un algorithme qui peut convertir une stratégie formelle (linguistique) de commande basée sur les connaissances d'un expert en une stratégie automatique de commande. L'expérience a montré que la commande floue donne de meilleurs résultats que les algorithmes de commande conventionnelle. Cependant, il n'existe pas de procédure systématique pour la conception de contrôleurs flous, cela est dû à la grande diversité des choix des paramètres et d'opérateurs dans l'algorithme de commande floue [26-27-84].

3.1.1 Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis [82].

Un ensemble flou A dans X est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X , le degré $\mu_A(x)$, compris entre 0 et 1 avec lequel x appartient à A [84]. Donc un ensemble flou peut être représenté par un ensemble de paires ordonnées :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \tag{3.1}$$

Tel que $\mu_A(x)$ la fonction d'appartenance d'un variable x .

X : est appelé l'univers de discours il peut contenir des valeurs continues ou discrètes.

$$\text{Si } X \text{ est discret : } A = \sum \mu_A(x)/x \quad (3.2)$$

$$\text{Si } X \text{ est continu : } A = \int \mu_A(x)/x \quad (3.3)$$

Tel que : X est l'univers de discours ou l'intervalle de variation de variable x .

3.1.2 Opérateurs logiques flous

Dans la théorie des ensembles classiques, on utilise différentes opérations tel que complément, union, intersection. Les mêmes opérations sont également définies dans la théorie des ensembles flous. Donc, la valeur de la fonction d'appartenance n'est pas limitée à la valeur $\{0,1\}$ mais peut prendre n'importe quelle valeur sur l'intervalle $[0,1]$. Ces opérations ne peuvent pas être définies de la même manière que celles dans les ensembles classiques. Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs. Cependant, les plus répandus sont ceux dit de «Zadeh» décrits ci-dessous [84].

Soient A , B et C des ensembles flous dans U : univers de discours, décrits par leurs fonctions d'appartenance $\mu_A(u)$, $\mu_B(u)$, $\mu_C(u)$ respectivement.

- L'union de A et B , notée par $A \cup B$, est définie par

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max[\mu_A(u), \mu_B(u)] \quad (3.4)$$

- L'intersection de A et B , noté par $A \cap B$, est définie par

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min[\mu_A(u), \mu_B(u)]$$

(3.5)

- Le complément de A , noté par \bar{A} , définies par:

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (3.6)$$

- Le produit cartésien de A , B , et C , noté $A \times B \times C$, et définie par :

$$\mu_{A \times B \times C}(u_1, u_2, u_3) = \min[\mu_A(u), \mu_B(u), \mu_C(u)] \quad (3.7)$$

Les opérations minimum, maximum et complémentation à 1 ont été choisies pour définir respectivement l'intersection, l'union et le complément d'ensembles flous Parce qu'ils préservent presque toute la structure de la théorie classique des ensembles.

3.1.3 Règles floues

L'outil le plus utilisé dans la logique floue est la base des règles floues. Une base des règles floues est composée de règles qui sont généralement de type :

SI « prédicat » ALORS « conclusion » [26-27-69].

3.1.4 Mécanisme d'inférence flou

Une base de règles floues comprend donc les règles linguistiques qui font appel à des fonctions d'appartenances. Le mécanisme d'inférence comprend les étapes suivantes :

- Fuzzification : La fuzzification permet de transformer les variables réels numériques d'entrées, en variables floues. Cette première étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état (après la définition des entrées et sorties). Celui-ci déterminé à l'aide des fonctions d'appartenance définies dans le système [26-27-36] (projection des variables physiques sur des ensembles flous). Donc la fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles.
- Degré d'activation : le degré d'activation d'une règle est l'évaluation des prédicat de chaque règle par combinaison logique des propositions du prédicat.
- Implication : le degré d'activation de la règle permet de déterminer la conclusion de la règle, c'est l'implication. Il existe plusieurs opérateurs d'implication, mais le plus utilisé est le minimum. L'ensemble de conclusion est construit en réalisant le minimum entre le degré d'activation et la fonction d'appartenance.
- Agrégation : l'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles concernant cette sortie. Les règles sont liées entre eux par un opérateur logique « OU », on calcule donc le maximum entre les fonctions d'appartenance résultant de chaque règle [82].
- Déffuzzification : la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer d'une valeur floue à une valeur numérique, c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes, la méthode la plus souvent rencontrée étant le calcul du centre de gravité. La méthode du centre de gravité est une des méthodes les plus mentionnées dans la littérature. L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée en utilisant la formule générale [26-27-36]:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M v^l \mu_{B^l}(v^l)}{\sum_{l=1}^M \frac{\mu_{B^l}(v^l)}{\sigma^{l^2}}} \quad (3.8)$$

Où v^l désigne le centre de gravité de la fonction d'appartenance de l'ensemble flou. B^l est le defuzzificateur évalué premièrement $\mu_{B^l}(v^l)$.

σ^l est une mesure de support de la fonction d'appartenance pour la $l^{i\text{eme}}$ règle. Pour les fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales, σ^l représente la base du triangle ou du trapèze.

Tandis que, pour les fonctions d'appartenance gaussienne σ^l est l'écart type.

3.1.5 Structure générale d'une commande floue

Le principe de fonctionnement d'un système flou est simple .celui-ci se décompose en des étapes distinctes (Figure 3.1).

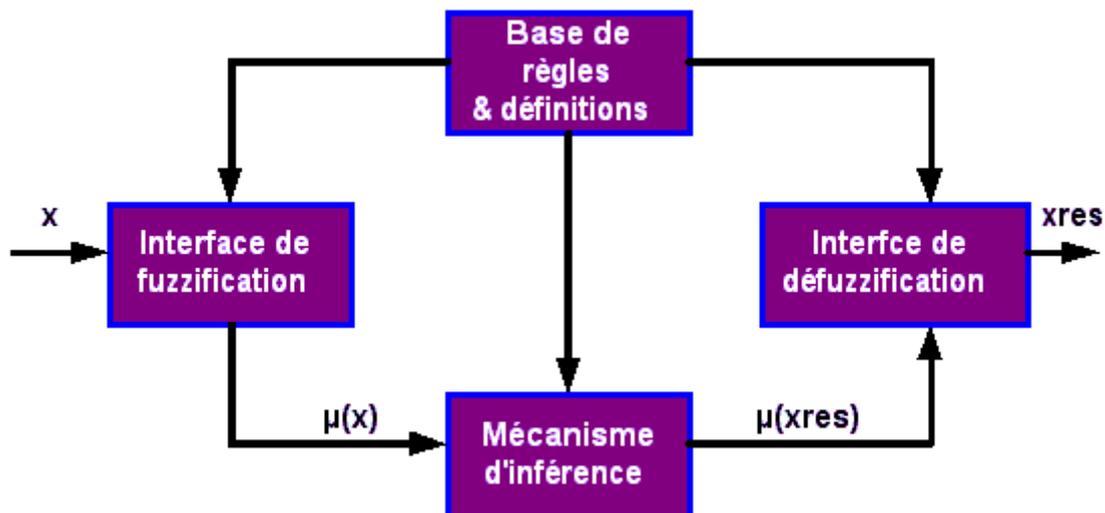


Figure 3.1 Structure d'un système flou.

3.1.6 Types de systèmes flous

En se basant sur le type de règles floues SI-ALORS, il existe deux types de systèmes flous :

- Système flou de Mamdani : Dans ce type de systèmes flous, la prémisse et la conclusion sont floues. Après l'inférence, le résultat donc est un ensemble flou caractérisé par sa

fonction d'appartenance. Il faut passer par une étape de « défuzzification » afin d'obtenir la valeur réelle de la commande à appliquer [82].

- Système flou de Takagi-Sugeno (TS): Il est dit de type procédural. En effet, seul la prémisse est floue. La conclusion, qui correspond à la commande, est directement une constante réelle ou une expression polynomiale (n'est pas floue) [82].

3.2 APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE POUR LE CONTROLE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Dans cette partie, on s'intéresse à une application de contrôle par la logique floue d'un moteur à courant continu sans balais à aimant permanent (PMBLDC) pour un système de pompage photovoltaïque (Figure 3.1). Ce dernier est constitué d'un générateur photovoltaïque alimentant le moteur PMBLDC qui entraîne une pompe centrifuge. Le moteur PMBLDC est contrôlé à travers une boucle de régulation qui a pour but d'améliorer la stabilité, précision et la rapidité du système.

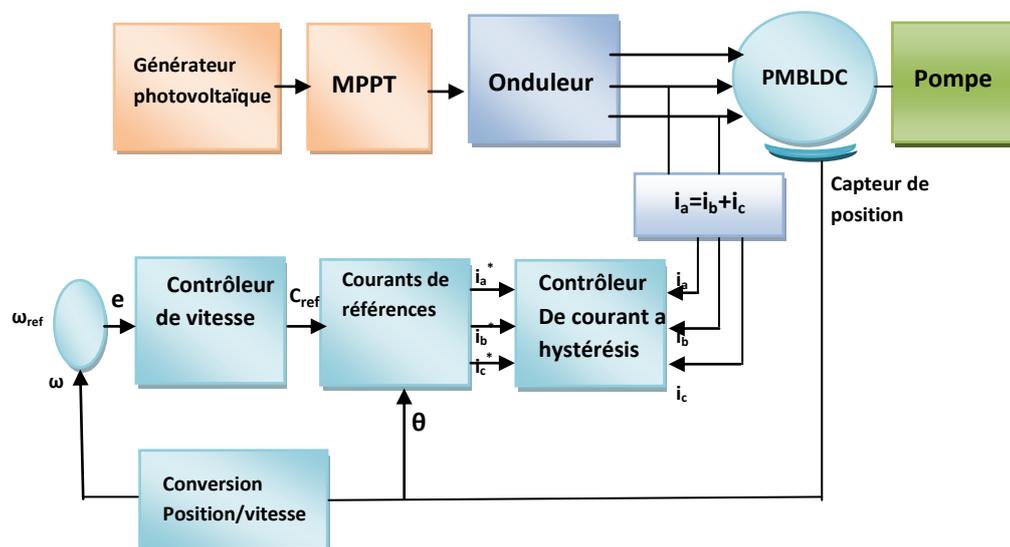


Figure 3.1 Système d'entraînement complet

3.2.1 Choix de la structure du contrôleur

La structure choisie est celle du contrôleur proposée par Mamdani, qui est un contrôleur à deux entrées: l'erreur et la variation de l'erreur. La sortie du contrôleur est la commande au processus (figure 3.2).

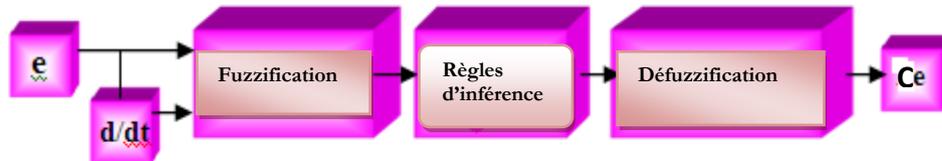


Figure 3.2 Structure d'un contrôleur flou.

3.2.2 Choix de la stratégie de fuzzification

Il s'agit du choix des formes des fonctions d'appartenance, et leur répartition sur l'univers de discours. Dans notre cas, nous avons choisi de travailler sur des univers de discours normalisé $[-1,1]$, partitionnés en sept classes (sous ensembles flous) pour les entrées et pour la sortie.

La forme la plus utilisée en commande floue est la forme triangulaire, pour cela nous utiliserons des fonctions d'appartenance triangulaires. La figure 3.3 montre notre partition floue de l'univers de discours.

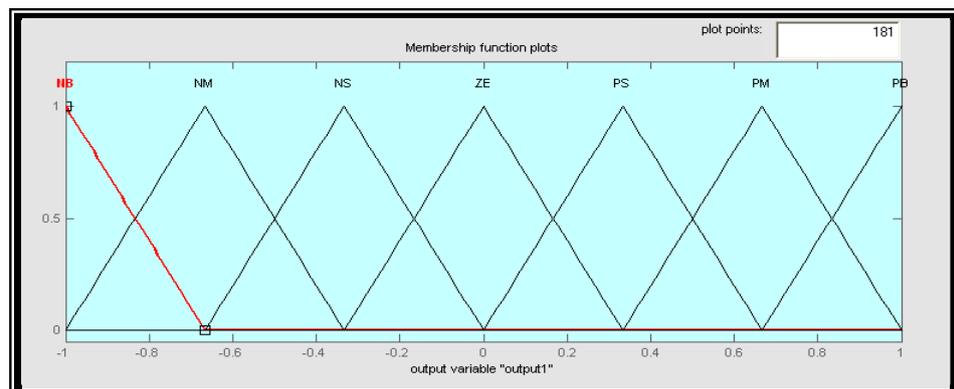


Figure 3.3 Partition des entrées et de la sortie du contrôleur flou.

3.2.3 Établissement des règles d'inférence

Sur la base de la description du système à régler avec des variables linguistiques et de la définition des fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie, on peut établir les règles d'inférence.

Nous avons utilisé une base de règle que l'on trouve dans la plupart des applications où la dynamique du système étudié présente une certaine symétrie autour d'un certain état stable. La tableau 3.1 représente la table des règles retenue dans notre étude.

Tableau 3.1 La table des règles.

		<i>La variation de l'erreur</i>						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
<i>l'erreur</i>	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

3.2.4 Choix de la méthode d'inférence

Les opérateurs min et max tels qu'ils sont définis par Zadeh sont utilisés pour inférer les règles, et l'opérateur max pour l'agrégation des règles.

3.2.5 Choix de la stratégie de défuzzification

La méthode la plus utilisée en commande flou est celle du centre de gravité, mais comme elle est très coûteuse en terme de temps de calcul, et le but de notre travail était de minimiser le temps de calcul, nous avons opté pour la méthode des centre des aires, qui est dérivée de la méthode du centre de gravité mais qui nécessitent peu de calculs.

3.3 ALGORITHMES GENETIQUES (AG)

Un AG peut être considéré à la base comme un processus aléatoire. Cependant, les informations qui viennent des fonctions objectives sont toujours utilisées pour paramétrer ce processus. Ils ont été développés par John Holland, ses collègues et ses étudiants, en 1967 à l'Université du Michigan à USA dans deux buts principaux :

- Mettre en évidence et expliquer rigoureusement les processus d'adaptation des systèmes naturels.
- Concevoir des systèmes artificiels qui possèdent les propriétés des systèmes naturels.

Les AG utilisent à la fois les principes de la survie des individus les mieux adaptés et ceux de la propagation du patrimoine génétique. Les AGs fonctionnent par une génération successive d'individus. L'ensemble des individus d'une génération s'appelle une population. Un chromosome est une suite de gènes et un individu est un ensemble de chromosomes. Ce principe est résumé dans la figure 3.4 [89-90]. Les gènes contiennent les paramètres permettant d'évaluer une fonction. Nous essayons de prendre les gènes les plus simples possibles (des valeurs binaires par exemple). La fonction d'évaluation s'appelle le fitness. Les AG génèrent une recherche de maximum sur cette fonction. La pertinence des paramètres (des gènes) est donc proportionnelle à la fonction. Par conséquent, plus le fitness est élevé, plus les gènes correspondants sont pertinents [89].

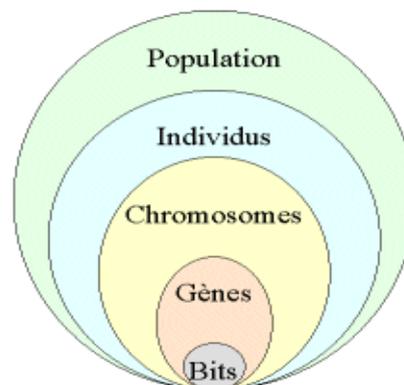


Figure 3.4 Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique

Le travail de recherche commence en plusieurs points dans l'espace des solutions, c'est-à-dire sur une population de points et non pas en un point singulier comme dans la plupart des techniques d'optimisation. Par les opérations mutation et croisement, ce sont les bons membres de cette population qui survivent. Donc, ils peuvent passer à la prochaine génération. A la fin de l'algorithme, une meilleure solution est engendrée [84-90]. L'organigramme d'un AG ainsi qu'un descriptif du principe sont détaillés par la suite.

3.3.1 Principes généraux

Les AG sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc. Un AG recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques.
2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global.
3. Une fonction à optimiser. Celle-ci est appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Le principe général du fonctionnement d'un AG est représenté sur la figure 3.5: on commence par générer une population d'individus de façon aléatoire. Pour passer d'une génération k à la génération $k+1$, les trois opérations suivantes sont répétées pour tous les éléments de la population k . Des couples de parents $P1$ et $P2$ sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c (généralement autour de 0.6) et génère des couples d'enfants $C1$ et $C2$. D'autres éléments P sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m (P_m est généralement très inférieur à P_c) et génère des individus mutés $P0$. Le niveau d'adaptation des enfants ($C1$, $C2$) et des individus mutés $P0$ sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population. Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis [84-90] :

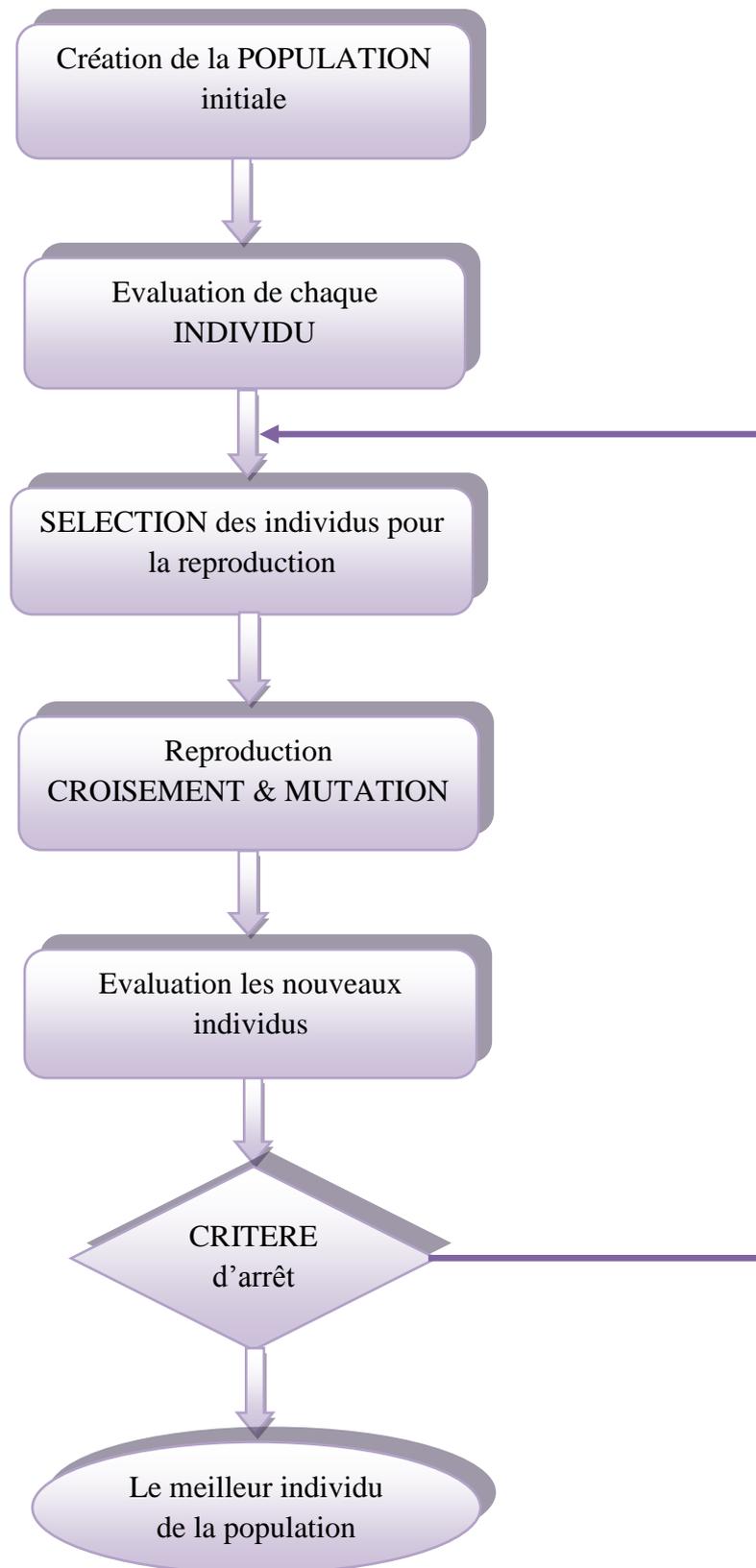


Figure 3.5 Organigramme d'un algorithme génétique.

3.3.2 Codage

Chaque paramètre d'une solution est assimilé à un gène, toutes les valeurs qu'il peut prendre sont les allèles de ce gène, on doit trouver une manière de coder chaque allèle différent de façon unique (établir une bijection entre un allèle "réel" et sa représentation codée).

Un chromosome est une suite de gène, on peut par exemple choisir de regrouper les paramètres similaires dans un même chromosome (chromosome à un seul brin) et chaque gène sera repérable par sa position : son locus sur le chromosome en question. Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement [89-90]:

- Le codage binaire : c'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire $\{0, 1\}$. Un gène est alors représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suite de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes [90].
- Le codage réel : cela peut-être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle.
- Le codage de Gray : dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" comme mesure de la distance de similarité entre deux éléments de population. Cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences [90].

3.3.3 Sélection

La sélection est un processus qui consiste à choisir parmi tous les individus de la population ceux qui vont participer à la construction d'une nouvelle génération où ce choix est basé essentiellement sur la valeur de la fonction d'adaptation de chaque individu. Un membre ayant une grande valeur de la fonction objectif aura plus de chance d'être sélectionné pour participer à la reproduction de la prochaine génération. Il y'a différentes méthodes de sélection telle que la sélection par roulette, sélection par rang et l'élitisme [90-91].

3.3.4 Croisement (crossover)

Le croisement utilisé par les algorithmes génétiques est la transposition informatique du mécanisme qui permet, dans la nature, la production de chromosomes qui héritent partiellement des caractéristiques des parents. Son rôle fondamental est de permettre la recombinaison des informations présentes dans le patrimoine génétique de la population [90-91].

On peut noter que le nombre de points de croisements ainsi que la probabilité de croisement P_c permettent d'introduire plus ou moins de diversité. En effet, plus le nombre de points de

croisements sera grand et plus la probabilité de croisement sera élevée plus il y aura d'échange de segments, donc d'échange de paramètres, d'information. Plus le nombre de points de croisements sera petit, plus la probabilité de croisement sera faible et moins ce dernier apportera de diversité.

3.3.5 Mutation

L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité de parcours d'espace. Cette propriété indique que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'état, sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. Ainsi en toute rigueur, l'algorithme génétique peut converger sans croisement, et certaines implantations fonctionnent de cette manière. Les propriétés de convergence des algorithmes génétiques sont donc fortement dépendantes de cet opérateur sur le plan théorique [92].

3.3.6 Limitations des algorithmes génétiques

Comme nous l'avons dit précédemment, les algorithmes génétiques sont des outils efficaces pour une classe de problèmes très large. De plus, ils permettent de traiter des problèmes où la fonction à optimiser ne présente aucune propriété de continuité ou de dérivabilité, par exemple. Néanmoins, les sections précédentes mettent en avant un certain nombre de limitations à leur sujet :

- Ils sont moins efficaces qu'un algorithme déterministe spécifique (lorsqu'il en existe un) dédié à un problème donné.
- Les nombreux paramètres qui les contrôlent sont délicats à régler (probabilités de croisement et de mutation notamment), ainsi que le codage des chromosomes qui peut faire varier radicalement la vitesse de convergence.
- Afin de garantir la robustesse des algorithmes évolutifs, le calcul d'un très grand nombre de fitness (parfois de l'ordre de plusieurs centaines de milliers) est généralement nécessaire avant l'obtention d'une bonne solution. Ce nombre de calcul important peut s'avérer problématique lorsque le coût de calcul (ressources systèmes ou temporelles) de la fitness est important, lorsqu'on travaille en grande dimension sur des fonctions à complexité importante par exemple.
- Ils peuvent éprouver des difficultés à gérer des contraintes nombreuses et complexes car la technique des pénalités intégrées à la fonction de coût utilise des contraintes a posteriori de manière passive [84-90].

Dans ce qui suit, on applique les AG pour l'optimisation du système de pompage PV. La fonction objective, les variables de la fonction d'évaluation et les contraintes d'égalité sont présentés avec leur formulation mathématique.

3.4 APPLICATION DES AGs POUR L'OPTIMISATION DU RENDEMENT DU SYSTEME DE POMPAGE PV

L'optimisation du rendement du système de pompage PV par les AGs est l'objectif de cette application. Le modèle du moteur PMBLDC pris pour ce cas, a été simplifié au modèle d'un moteur à courant continu et pour des raisons de simplicité, les pertes sont négligées.

Les équations électriques sont donnés par :

$$V = R \cdot I + K_e \cdot \omega \tag{3.9}$$

Avec K_e : coefficient de la f.e.m.

R : Résistance de l'induit.

Les équations mécaniques sont décrites comme suit :

$$C_e - C_r = 0 \tag{3.10}$$

Le couple électromagnétique d'une telle machine est une relation linéaire en fonction du courant d'induit :

$$C_e = K_e I \tag{3.11}$$

3.4.1 Fonction d'évaluation

Cette fonction permet de mesurer l'efficacité de la solution. La pertinence des solutions potentielles dépend essentiellement de la formulation de cette fonction. Le rendement du système de pompage comportant le GPV et la charge moto-pompe est régit par l'équation suivante :

$$\eta = A\omega^2 / EA_1 \tag{3.12}$$

La fonction évaluation ou objective à optimiser peut être adapté avec le problème traité comme suit :

$$\eta = 1/(A\omega^2/EA_1) \quad (3.13)$$

Si on considère la canalisation de refoulement, le rendement globale sera décrit par l'équation suivante :

$$\eta = (\rho. g. H. Q/E. A_1) \quad (3.14)$$

La fonction d'évaluation est donnée comme suit :

$$\eta = 1/(\rho. g. H. Q/E. A_1) \quad (3.15)$$

3.4.2 Variables de la fonction d'évaluation

Les variables de la fonction objective sur les quelles porte l'optimisation sont les variables de conception qui peuvent être de natures diverses. Les variables pris pour le système de pompage PV sont présentés de la façon suivante :

X(1)=I : le courant du générateur photovoltaïque

X(2)=V : la tension du générateur photovoltaïque.

X(3)=K : le gain du hacheur.

X(4)= ω : la vitesse du moteur.

X(5)=Q : la débit de la pompe.

X(6)=H : la hauteur manométrique totale.

3.4.3 Contraintes d'égalité

Les contraintes de conception du système sont des équations non linéaires données par :

Contrainte du PGV

$$I - I_{cc} + I_o. \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_{th}} - 1\right) \right] = 0 \quad (3.16)$$

Contrainte du moteur :

$$K.V - K_e. \omega + R. \frac{I}{K} = 0 \quad (3.17)$$

Contrainte de la pompe

$$Ke \cdot \frac{I}{K} - a \cdot \omega^2 = 0 \quad (3.18)$$

Contrainte de la canalisation et pompe

$$H - ((1.93 \cdot e^{-4} \cdot \omega^2) - (2.36 \cdot \omega \cdot Q) - 451538.94) = 0 \quad (3.19)$$

Contrainte de la canalisation

$$H - (122326.31 \cdot Q^2) - 7.43 = 0 \quad (3.20)$$

3.5 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté l'application de logique floue, ainsi que les algorithmes génétiques pour le système de pompage photovoltaïque.

Après une introduction on a commencé par la logique floue. Un rappel théorique de cette dernière portant sur sa définition, la théorie des ensembles flous, les opérateurs de la logique floue, les règles floues, le mécanisme d'inférence floue et la structure générale d'une commande floue. L'application de la logique floue était pour le contrôle du moteur PMBLDC alimenté par un GPV, entraînant une pompe centrifuge afin d'améliorer ses performances dynamiques.

Le principe de base d'un algorithme génétique est donné dans un organigramme. Avec une description des étapes de ce dernier : le codage, la sélection, le croisement, la mutation et le critère d'arrêt. L'application des algorithmes génétiques pour l'optimisation du système de pompage photovoltaïque avait comme fonction d'évaluation le rendement. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des équations qui régissent les contraintes d'égalités du système. Les résultats de simulation du contrôle et d'optimisation et leurs interprétations font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4

RESULTATS DE SIMULATION

4. RESULTATS DE SIMULATION

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulations et leurs interprétations. La simulation est effectuée en deux phases. Le but de la première phase est le contrôle du moteur PMBLDC dans un système de pompage photovoltaïque. Afin de mener une étude comparative, on a abordé en premier lieu le moteur PMBLDC sans régulation dans le cas à vide puis en charge. En second lieu le contrôle du moteur où on a présenté les performances dynamiques après régulation, sans et avec charge, et ceci par :

- Le contrôleur du courant à Hystérésis
- Le contrôleur de la vitesse par PI classique et celui flou.

Les résultats sont présentés, comparés et interprétés.

La deuxième phase c'est l'optimisation du rendement du système de pompage photovoltaïque. On a commencé tout d'abord avec un couplage du système sans optimisation dans le quel le moteur est directement couplé au GPV. L'optimisation par la méthode conventionnelle est réalisée en intercalant un hacheur (convertisseur DC-DC) entre le GPV et la charge (moteur-pompe). Durant l'opération d'optimisation, on fait varier le gain K du hacheur avec finesse, et on choisi le gain optimal qui correspond à la vitesse maximale. Cette phase se termine par l'application des algorithmes génétiques. Les résultats sont présentés, comparés et interprétés.

Les résultats présentés nous permettent en fait de voir les performances du contrôle flou pour le moteur PMBLDC via le régulateur classique PI, ainsi que l'optimisation par les algorithmes génétiques via le couplage direct(MD) et l'optimisation par la méthode conventionnelle (MC).

4.1 CONTRÔLE DU PMBLDC PAR LA LOGIQUE FLOUE

L'algorithme de contrôle de la vitesse du moteur PMBLDC alimenté par un générateur PV, entraînant une pompe centrifuge est présenté par la figure4.1. Les résultats de simulation de la commande de notre système sont exposés par la suite.

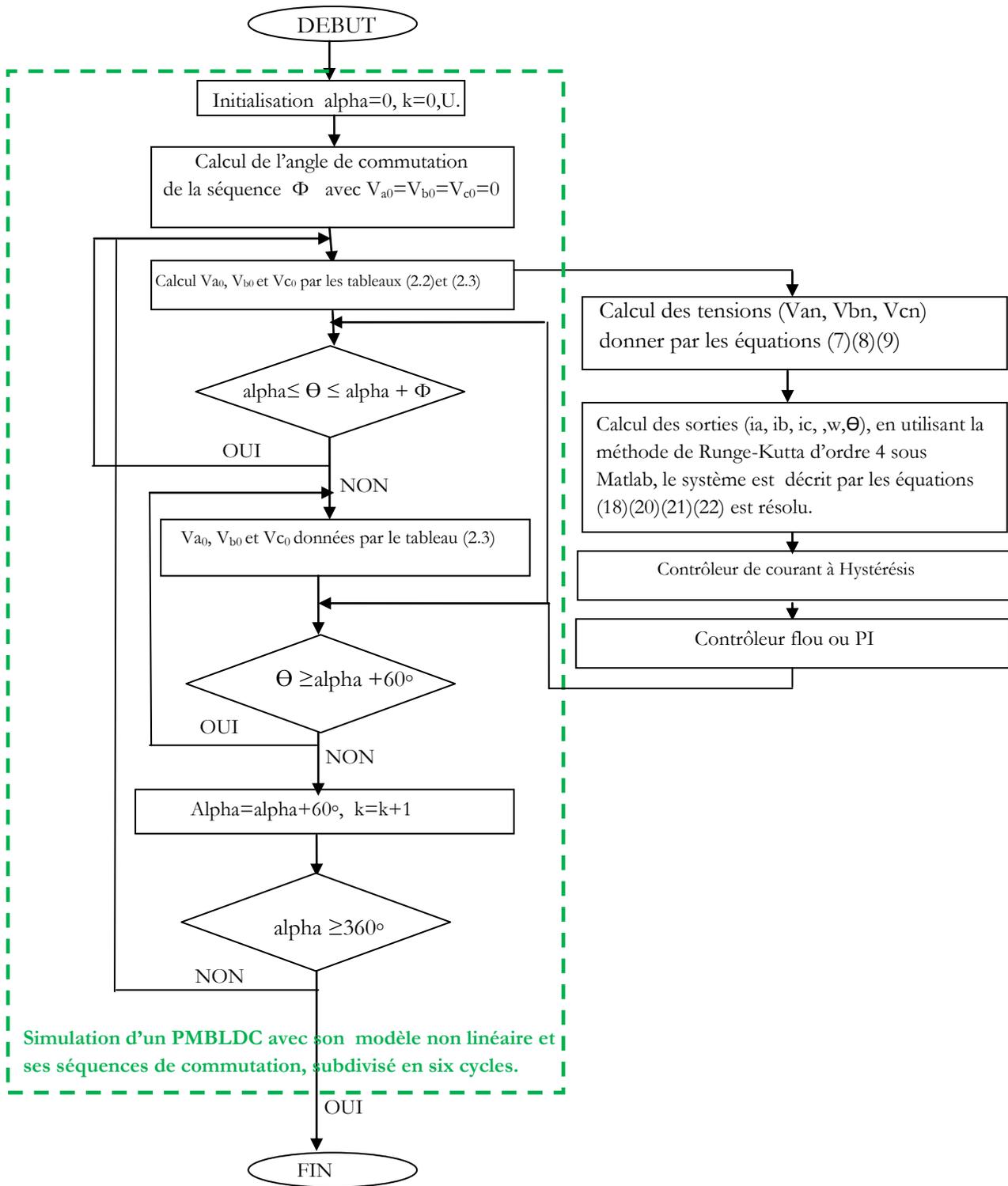


Figure 4.1 Algorithme de contrôle on-line de la vitesse d'un moteur PMSM.

4.1.2 Étude du système sans charge

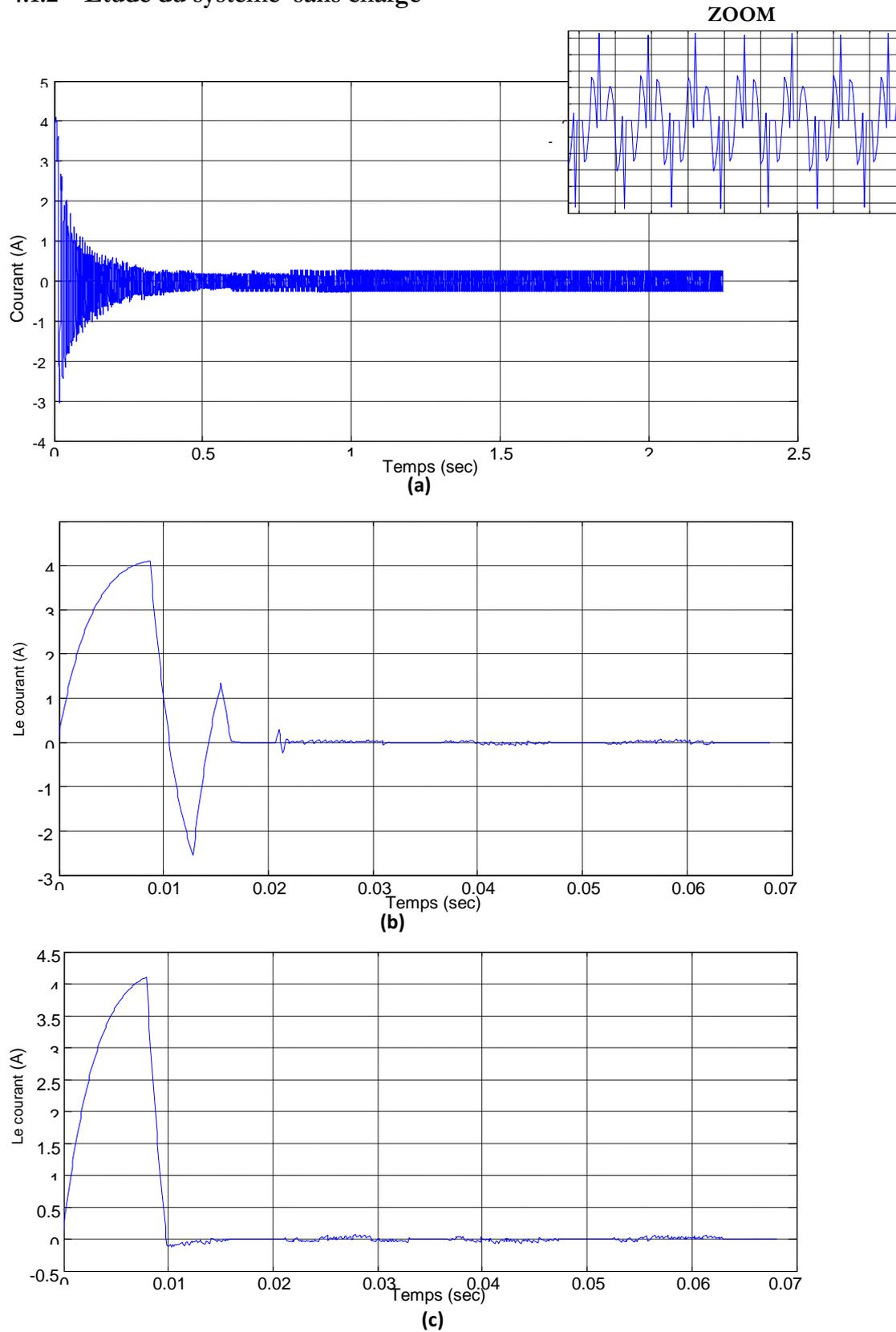
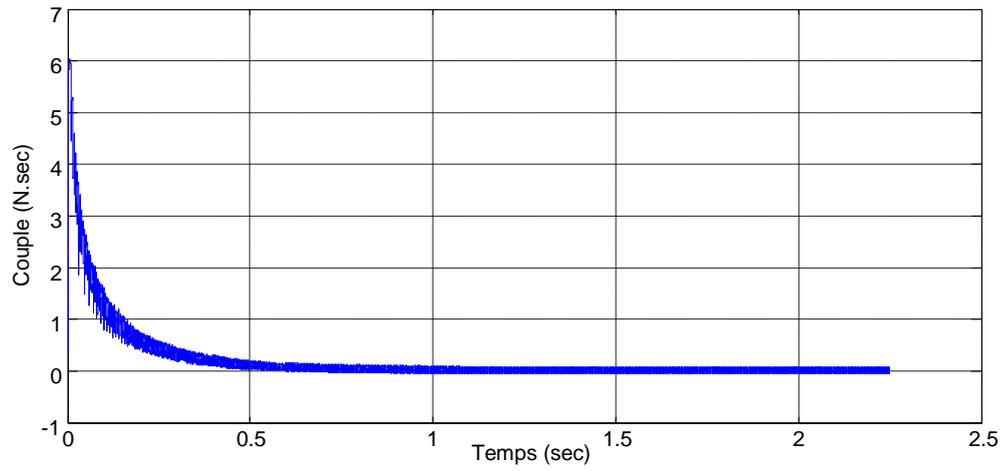
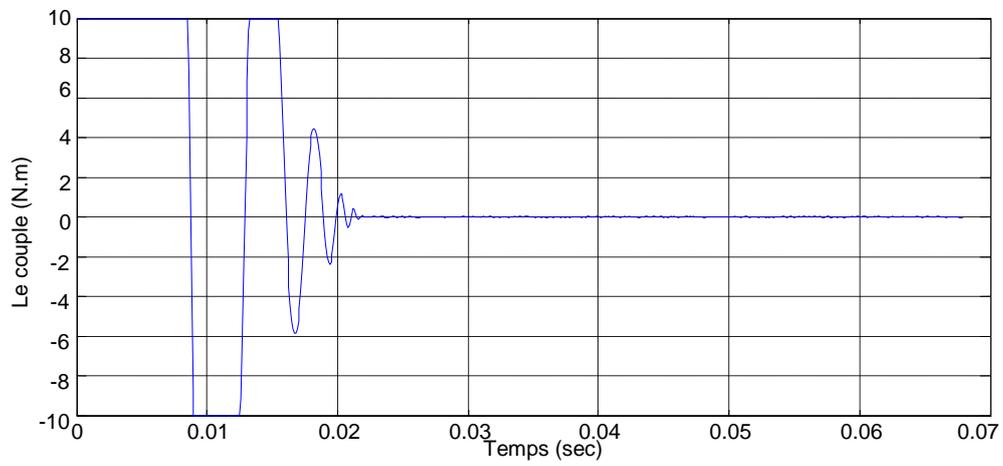


Figure 4.2 Le courant de phase.

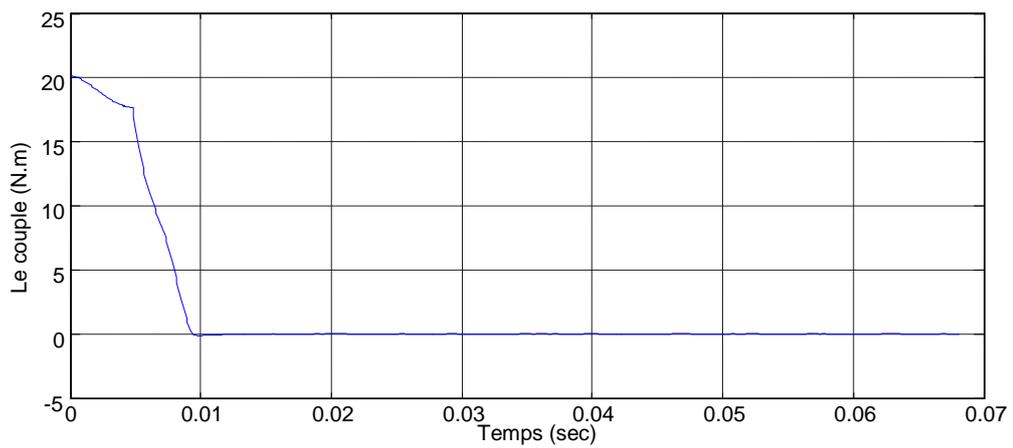
a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle fluu.



(a)



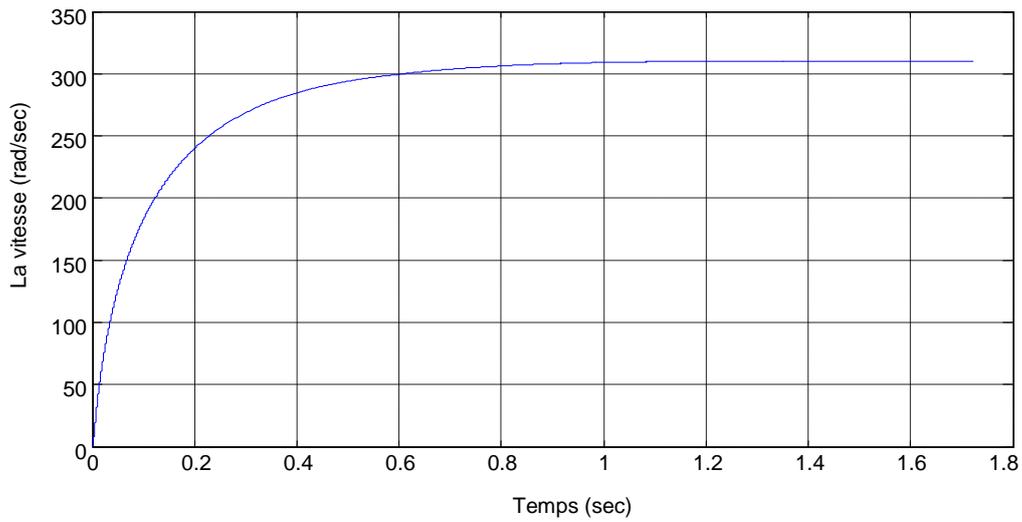
(b)



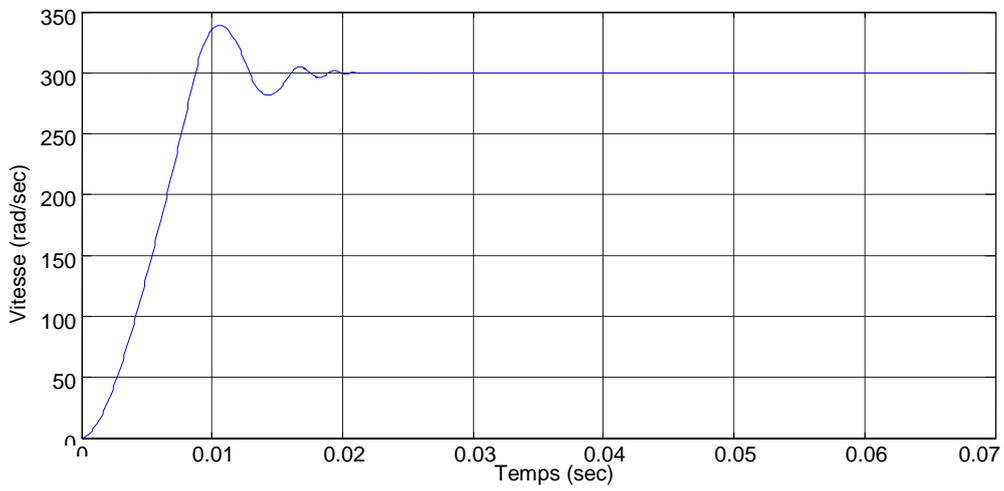
(c)

Figure 4.3 Le couple électromagnétique.

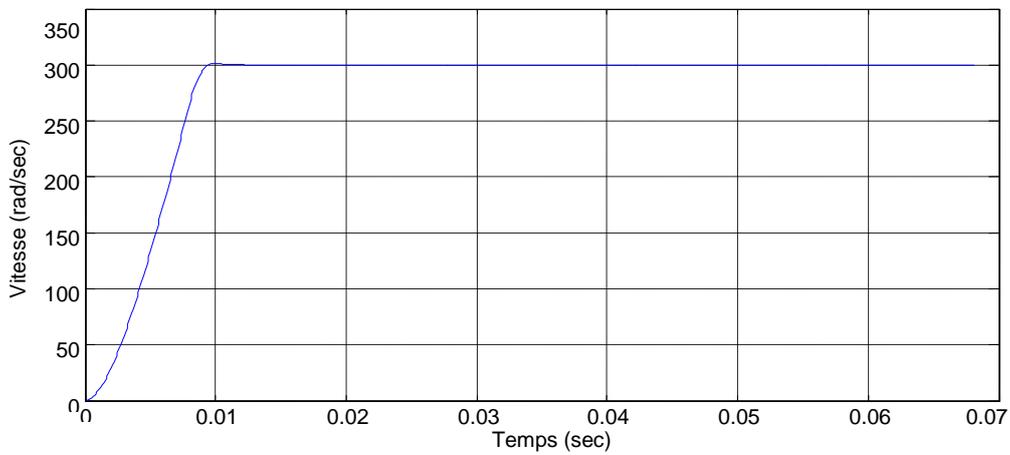
a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.4 La vitesse

a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôle flou.

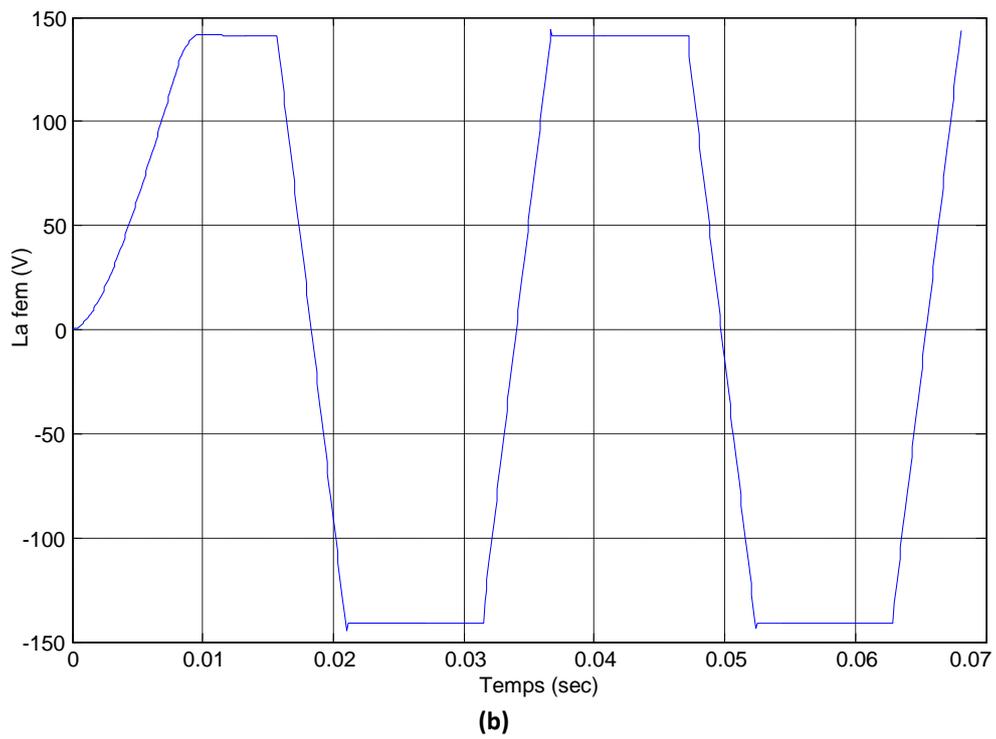
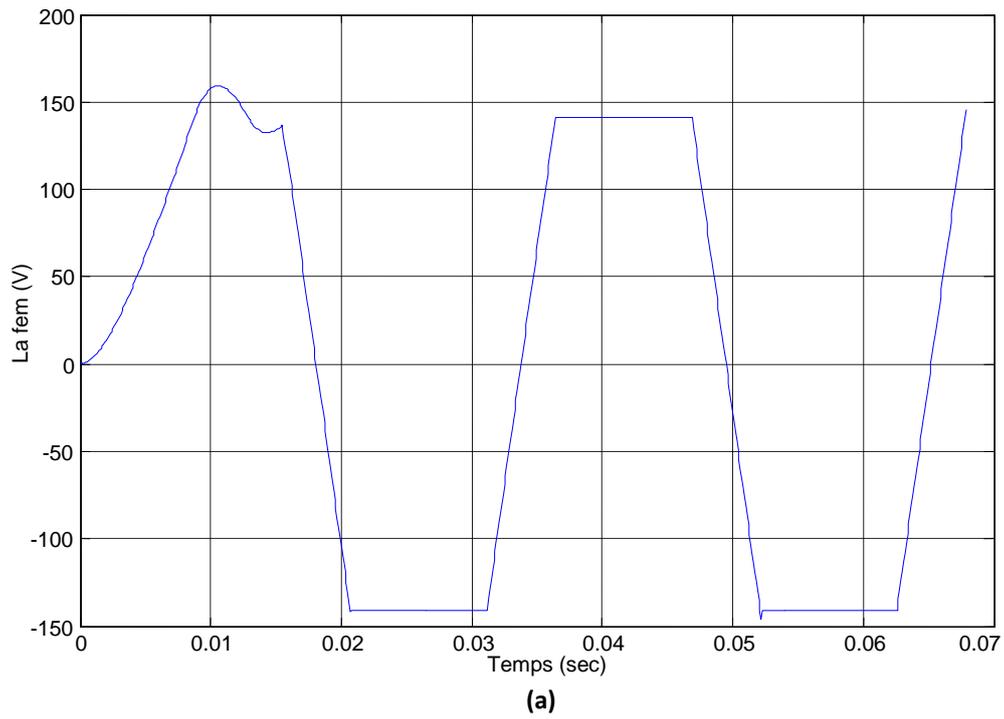


Figure 4.5 La force électromotrice « fem ».
 a : Avec régulation PI. b : Avec contrôle flou.

- **Interprétation des résultats sans charge**

La figure 4.2 (a-c) illustre le courant de phase sans charge dans les cas respectivement sans régulation, avec régulation PI et avec contrôle flou. On remarque que leurs valeurs décroît d'une valeur de court circuit vers la valeur zéro (0). Ceci est dû à l'absence de la charge qui est la pompe centrifuge avec sa canalisation.

Le comportement de couple illustré sur la figure 4.3 (a-c) suit celui des courants cité ci-dessus. Il augmente vers une valeur transitoire puis diminue en oscillant autour zéro (0). Dans le cas sans régulation le temps pris par le couple pour atteindre le régime permanent est important en le comparant avec ceux avec contrôle.

L'influence de l'absence de la charge sur la vitesse figure 4.4 (a-c) est bien claire. Le temps de montée sur la figure 4.4(b) est plus court (0.01s) que celui sur la figure 4.4 (a) (0.2s). Ceci est dû à l'influence du régulateur PI. Malgré qu'on remarque la présence d'un dépassement au niveau de vitesse. Par contre sur la figure 4.4 (c), le dépassement est atténué et le temps de montée est encore amélioré (0.008s), c'est le cas du régulateur flou.

Avec le régulateur PI, voir figure 4.5 (a), la forme trapézoïdal est bien claire après une phase transitoire. Il faut noter que le contrôleur flou rend le système plus rapide ce que est monté par la figure 4.5 (b).

4.1.2 Étude du système avec charge

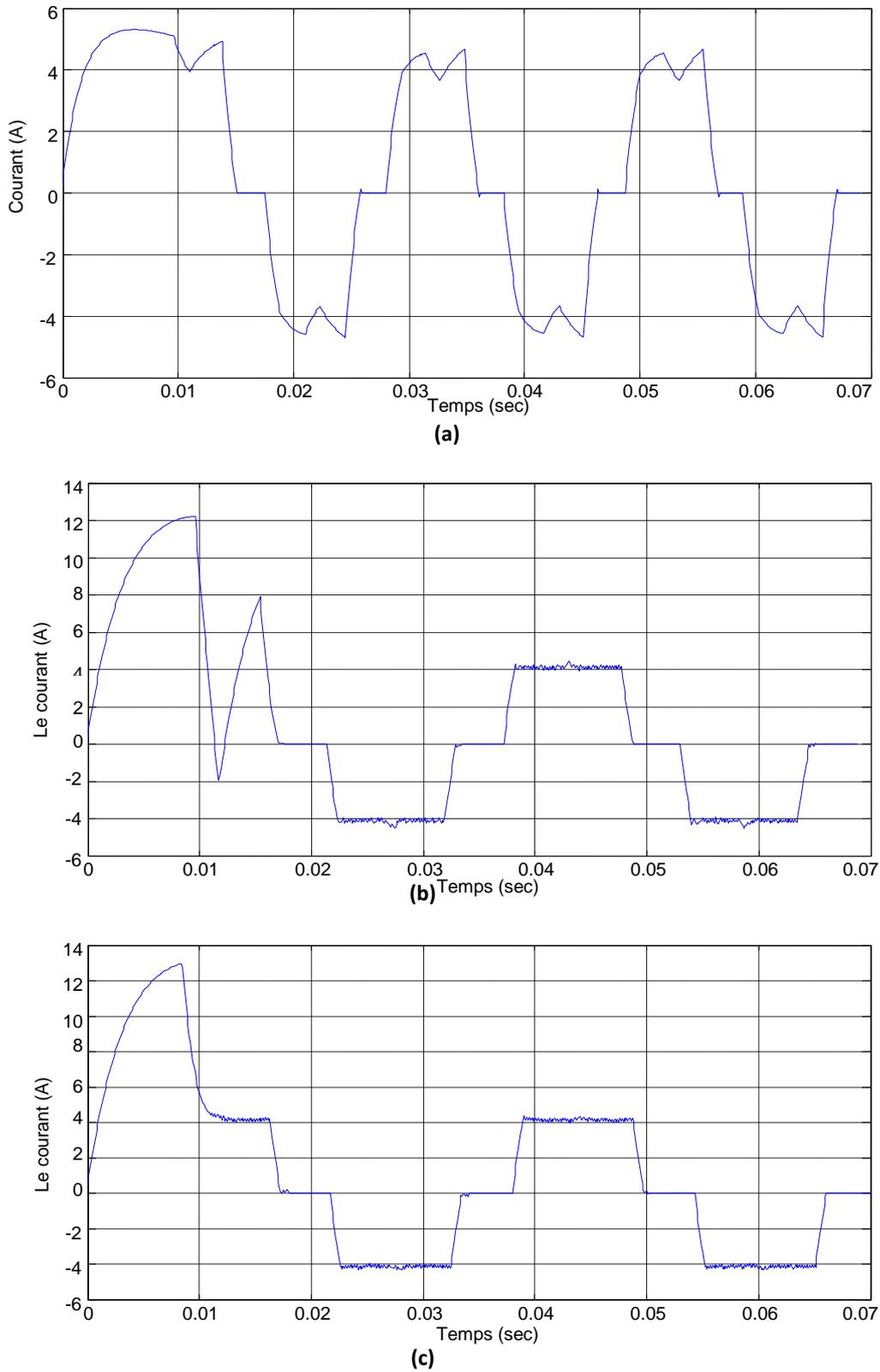
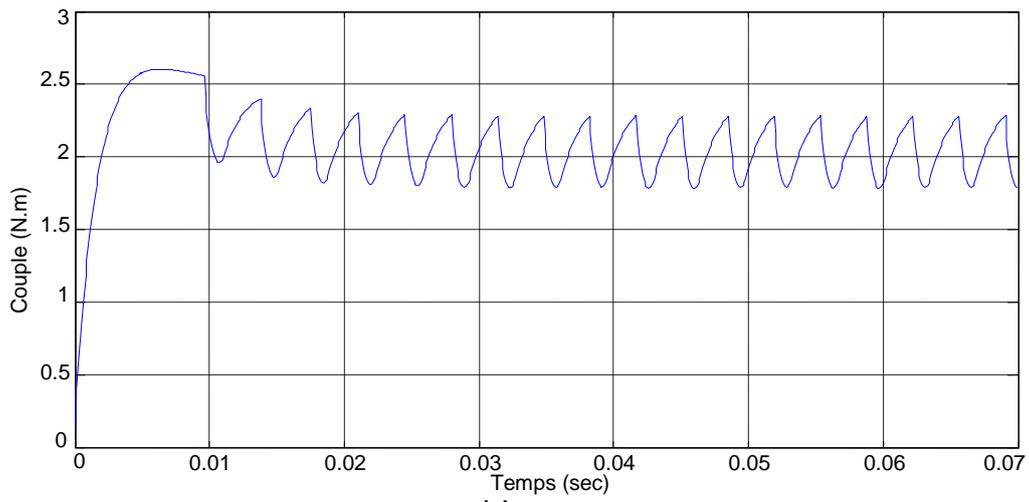
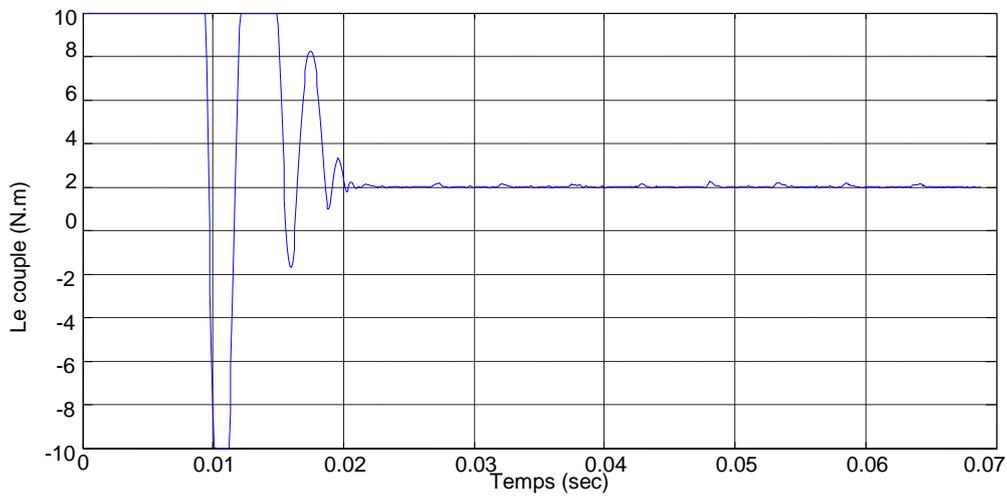


Figure 4.6 Le courant de phase.

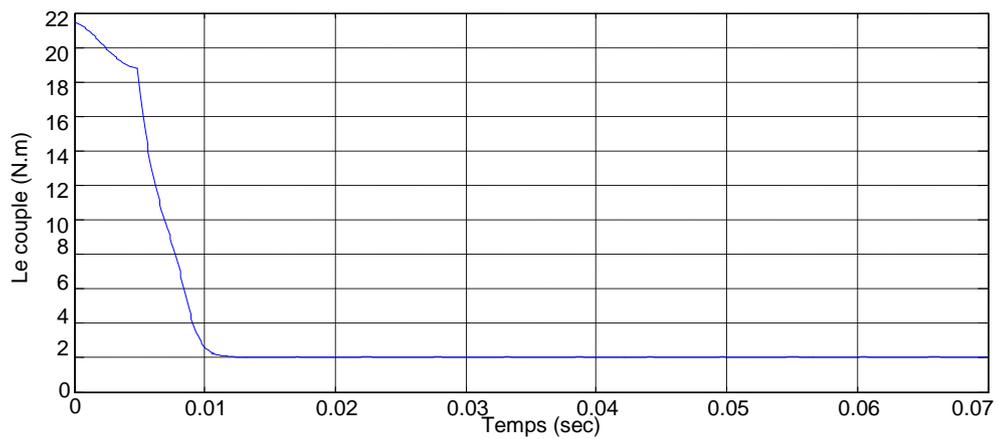
a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôleur flou.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.7 Le couple électromagnétique.

a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôleur flou.

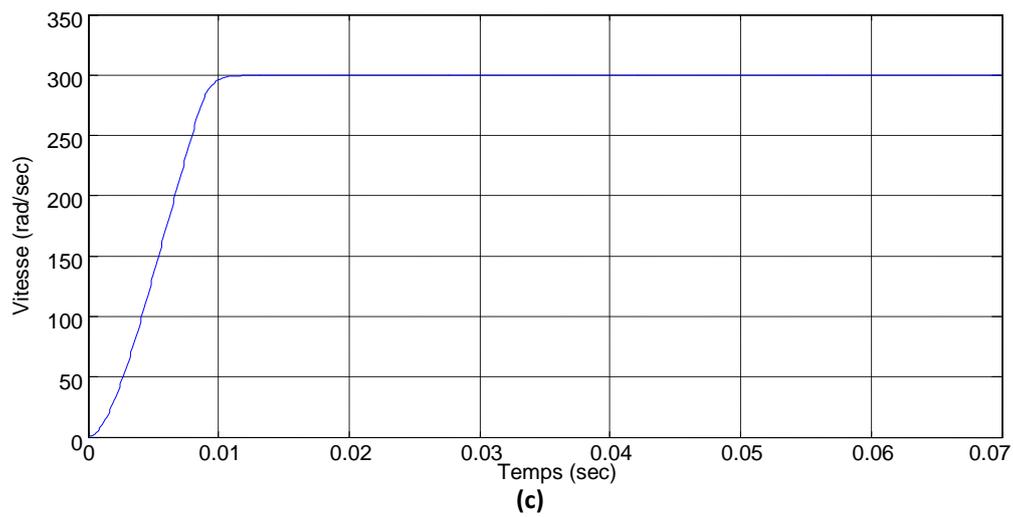
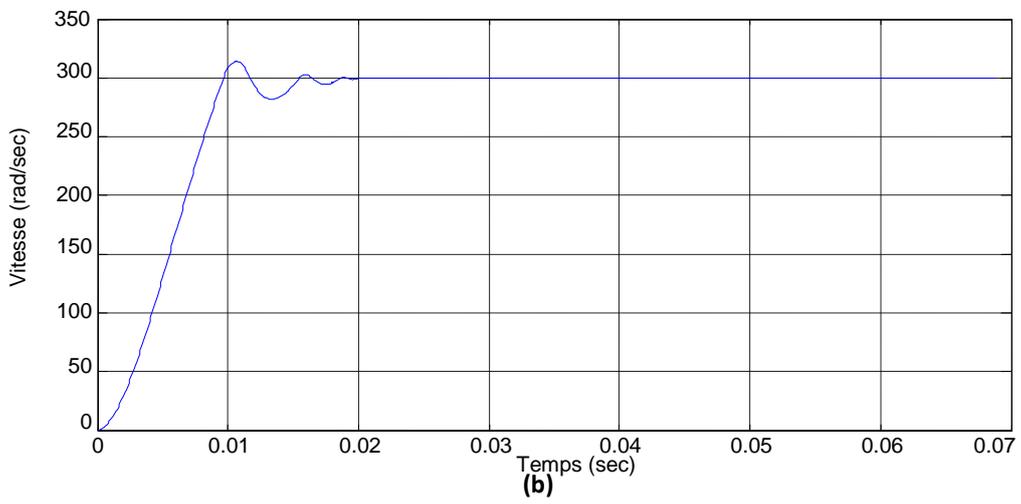
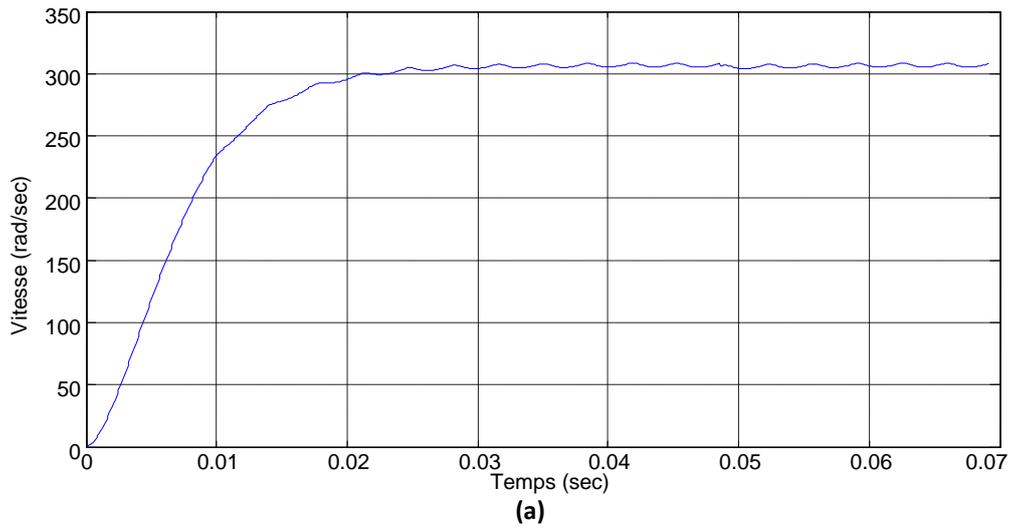
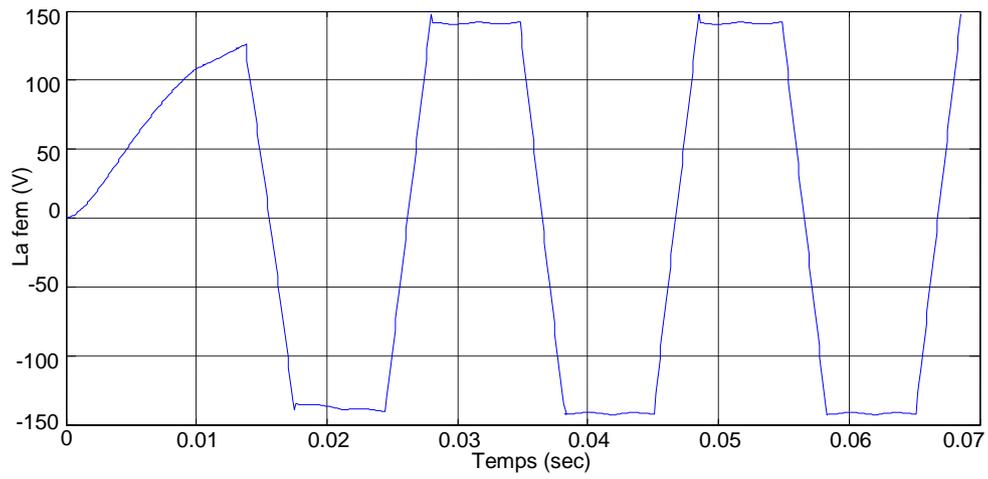
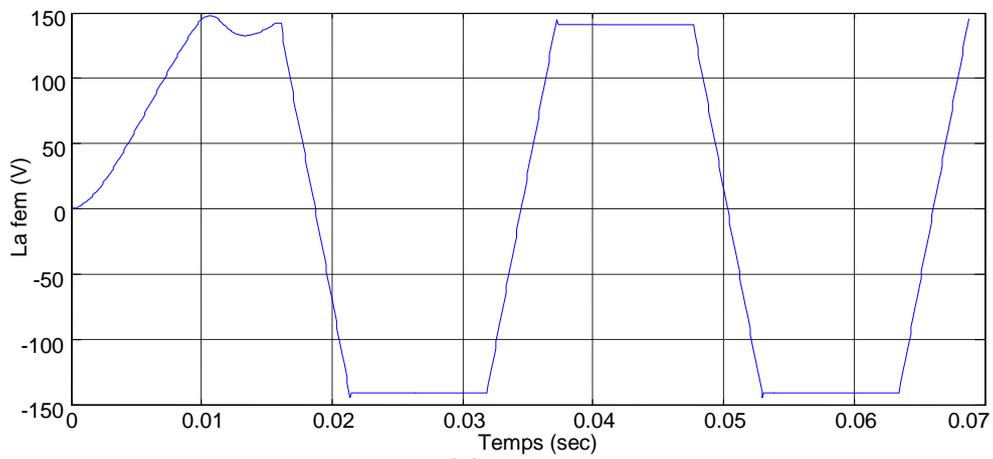


Figure 4.8 La vitesse.

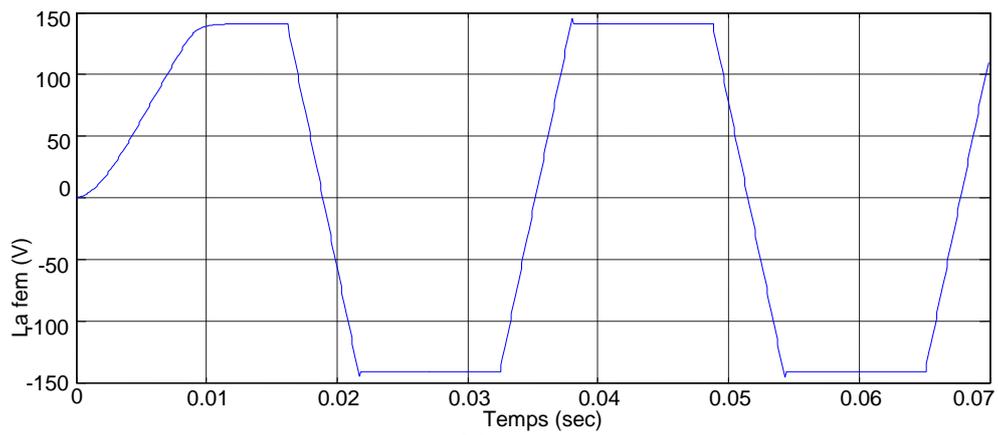
a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôleur flou.



(a)



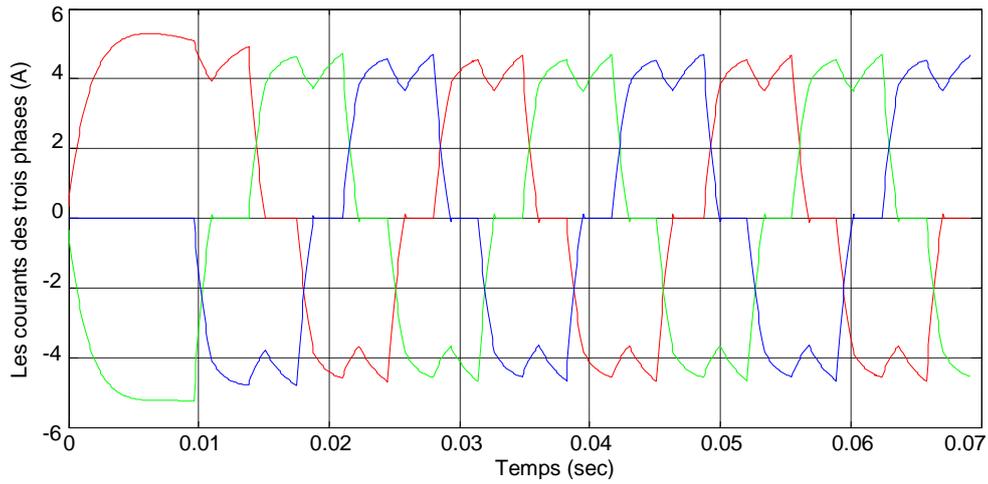
(b)



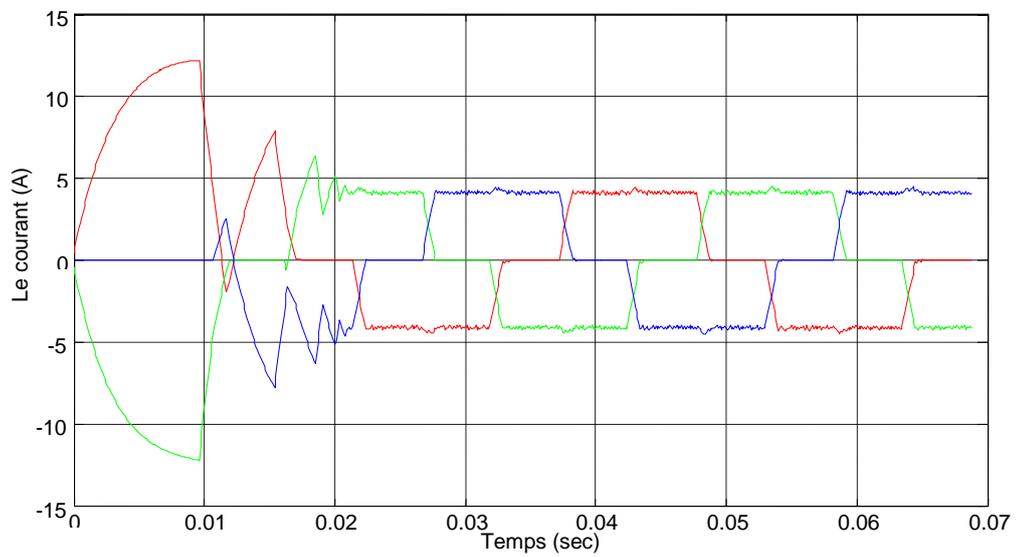
(c)

Figure 4.9 La force électromotrice « fem ».

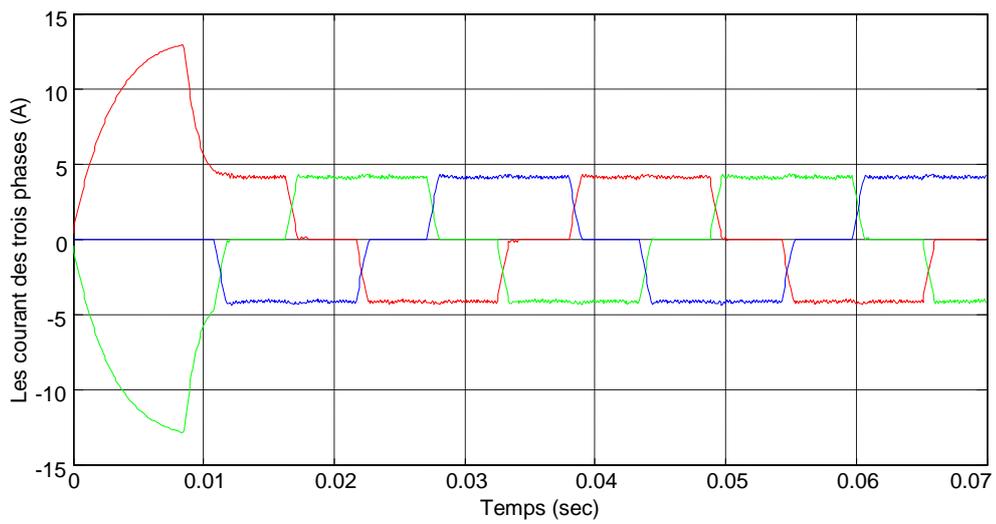
a: Sans régulation. b: Avec régulation PI. c: Avec contrôleur flu.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.10 les courants des trois phases.

a: Sans régulation b : Avec régulateur PI. c: Avec contrôleur flou

- **Interprétation des résultats avec charge**

Sur la figure 4.6(a-c), le courant de phase qui est présenté d'abord sans régulation(figure 4.6(a)) où le courant présente des grandes ondulations. Ces dernières sont dûes aux changements des séquences après un régime transitoire. Le courant dans ce cas atteint une valeur de 6 A puis diminue en stabilisent à la valeur 4.4 A. Avec régulation PI (figure4.6(b)), le courant se stabilise autour d'une valeur de référence 4.4 A. La figure4.6(c) c'est le cas du régulateur flou, la réponse du système est plus rapide que celle du régulateur PI, la phase transitoire est plus courte et le courant entre dans le régime permanent en oscillant autour d'une valeur de référence de 4.4 A.

Le couple suit la trajectoire du courant. On voit sur la figure 4.7 (a), Les ondulations du couple autour de la valeur 1.8 (N.m) jusqu'à 2.2 (N.m). La figure 4.7(b) montre l'atténuation des ondulations et le couple oscille autour d'une valeur de 2 (N.m). Ceci est due à l'influence du correcteur de courant à hystérésis. L'effet du régulateur flou sur la réponse figure 4.7 (c) est bien clair. Le système devient plus rapide.

La figure 4.8 (a) illustre la vitesse sans régulation. Les oscillations au niveau de cette dernière sont très claires. Elles sont dûes aux séquences de commutation. La vitesse atteint sa valeur nominale 314 (rad/sec). La figure 4.9(b), les oscillations sont disparut la vitesse suit celle de la référence 300(rad/sec). Le temps de monté est de 0.01s plus rapide que le précédent (0.013s). Ainsi qu'il faut noté que le système présente un dépassement. La régulation flou : figure 4.8 (c), semble parfaite, un temps de monté plus rapide (0.0008s) que celui des cas cité au dessus, la vitesse suit sa valeur de référence avec l'absence du dépassement.

Les oscillations de la fem sur la figure 4.9(a) sont dues à la commutation de l'onduleur à chaque séquence. Ce fait est remédié par la régulation figures : 4.9 (b) et 4.9 (c). il faut signalé ici que la réponse du système pour le contrôleur flou est plus rapide que celui du régulateur PI.

4.2 OPTIMISATION DU RENDEMENT DU SYSTÈME DE POMPAGE PV

En utilisant l'interface « gatool », la simulation est effectuée. En premier lieu on a pris comme rendement du système GPV-moteur-pompe, celui décrit par l'équation (3.12). En second lieu Le rendement régit par l'équation (3.14) qui définit le rendement global du système : le GPV-moteur-pompe ainsi que la canalisation de refoulement.

4.2.1 Optimisation du rendement GPV&moto-pompe

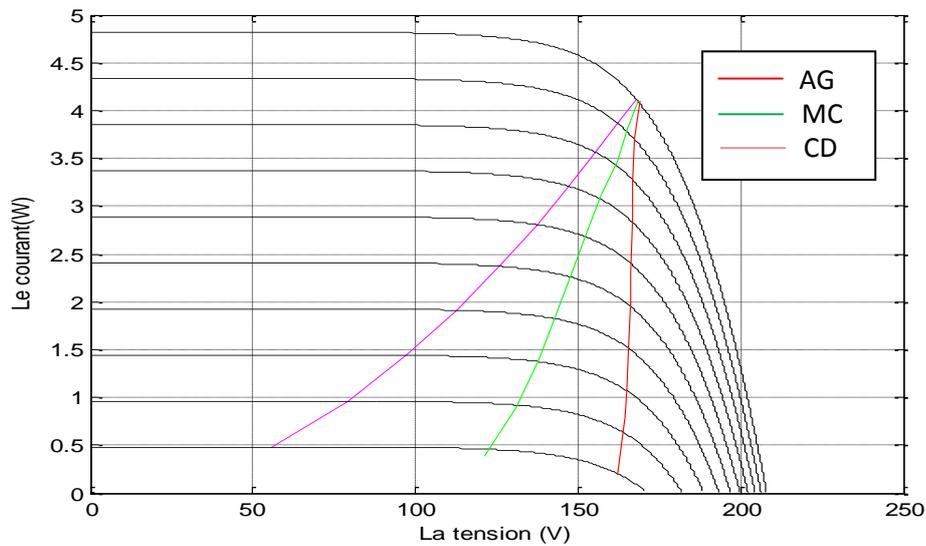


Figure 4.11 Caractéristique courant - tension

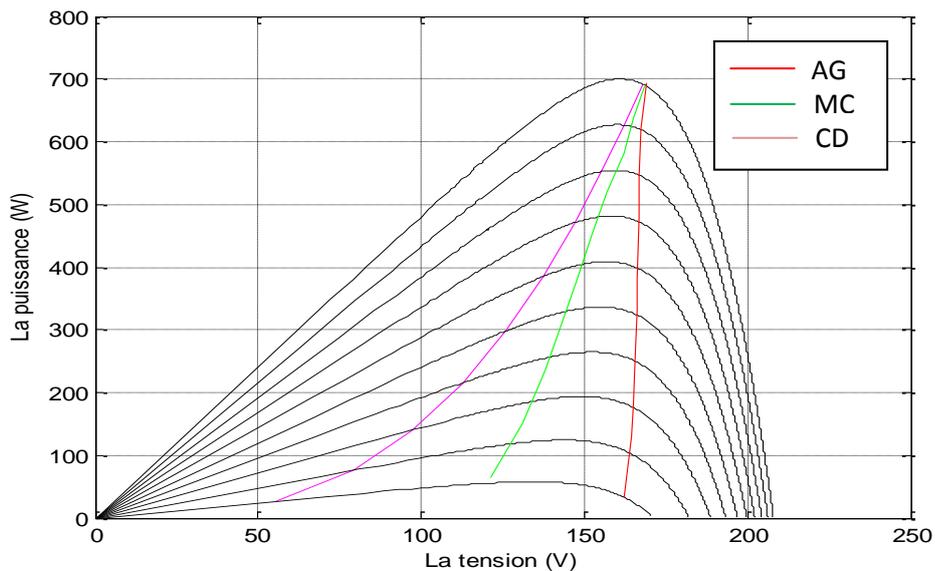


Figure 4.12 Caractéristique puissance-tension

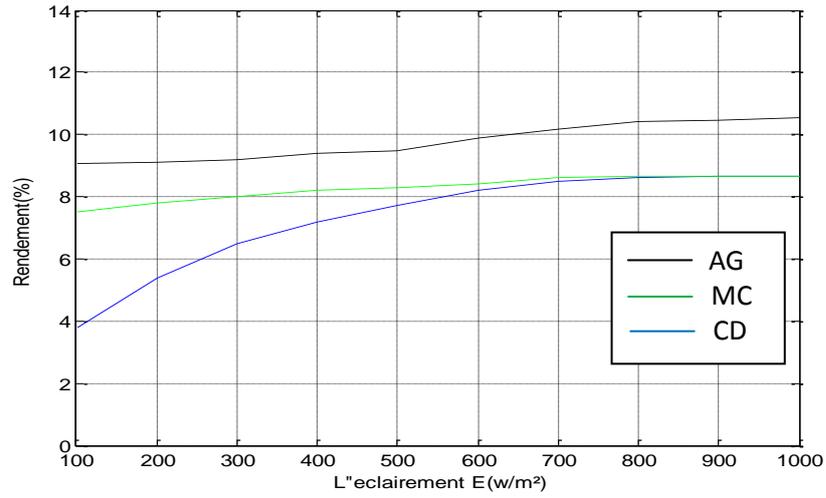


Figure 4.13 Courbes rendement -éclairement

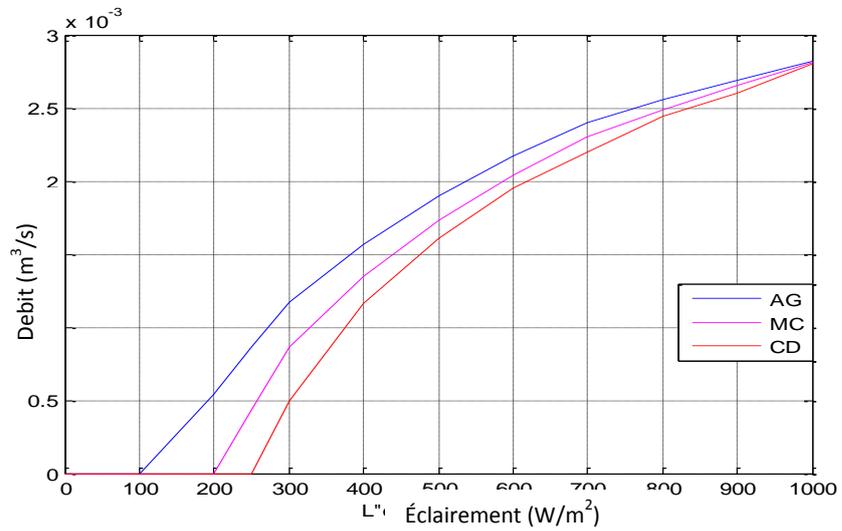


Figure 4.14 Courbes débit -éclairement

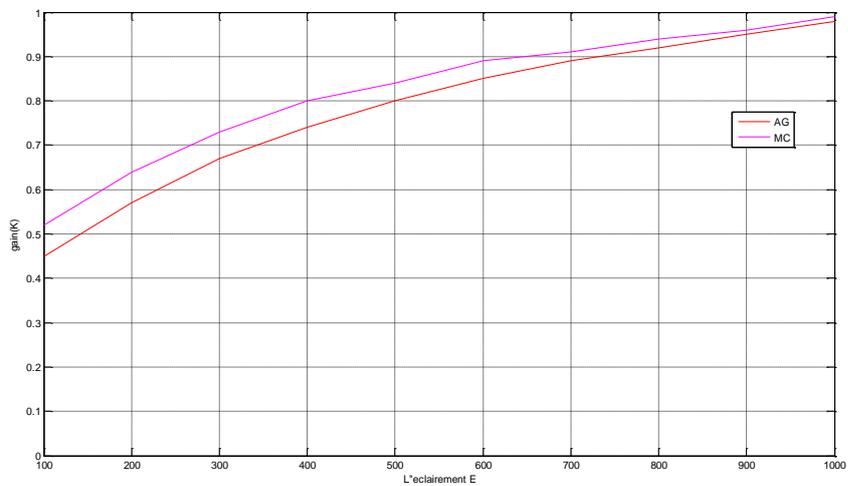


Figure 4.15 Courbes Gain-éclairement

La figure 4.11 représente la caractéristique courant- tension. On remarque que pour la courbe du couplage direct (CD) est loin de la zone optimale pour les faibles valeurs d'éclairement. Par contre pour les forts éclairements, elles se rapprochent. En appliquant la MC l'amélioration de la caractéristique surtout pour les faibles valeurs d'éclairement. La technique AG prouve son efficacité. Prenons par exemple $E = 100 \text{ (w/m}^2\text{)}$. La tension d'alimentation est augmentée d'une valeur aussi faible que 60 (v) par rapport à celle du couplage direct, et à une valeur de 163 (v) pour les AG par suite. Les puissances obtenues par la technique d'AG sont les valeurs optimaux qui donnent un rendements maximales, qui veut dire un débit maximal. La même analyse pour la figure 4.12 qui représente la caractéristique puissance-tension. Alors la puissance globale du générateur photovoltaïque est bien exploitée pour le cas des algorithmes génétiques.

Le rendement calculé est défini par le rapport entre la puissance obtenue a la sortie de moteur et la puissance maximale disponible. La figure 4.13 illustre l'allure du rendement, qui est enviren de 10.% pour la technique AG , et environ de 7% pour la methode coventionnelle par contre le couplage direct est caractérisé par un faible rendement pour les faibles valeurs d'éclairement, à titre d'exemple pour $E=100 \text{ (w/m}^2\text{)}$, le rendement est de 3.8%. Mais à partir de $E= 900 \text{ (w/m}^2\text{)}$ et plus, les valeurs du rendement sont proche des rendement optimisés, ce rapprochement prouve la bonne adaptation entre le groupe moto-pompe et le générateur pour le couplage direct a des forts éclairements.

La figure 4.14 représente les allures des débits, au couplage direct, la methode conventionnelle et la technique des algorithmes génétiques en fonction de l'éclairement. Dans le cas du CD le système commence à délivré de l'eau à un éclairement de $280 \text{ (w/m}^2\text{)}$, par contre pour la MC, c'est à partir d'un éclairement de $200 \text{ (W/m}^2\text{)}$. la pompe fournit de l'eau à partir de $100 \text{ (w/m}^2\text{)}$, pour la technique de AG. Ceci prouve l'efficacité des agoritmes génétiques comme outil d'optimisation.

L'allure du gain du hacheur est illustrée sur la figure 4.15. on remarque que pour la technique des AG est placée au dessus du celle de la methode conventionnelle.

4.2.2 Optimisation du rendement global

Dans le sous titre précédent, l'efficacité d'optimisation par les algorithmes génétiques est investiguée. On procède dans le présent sous titre à l'optimisation seulement avec cette dernière sans passer à celle conventionnelle.

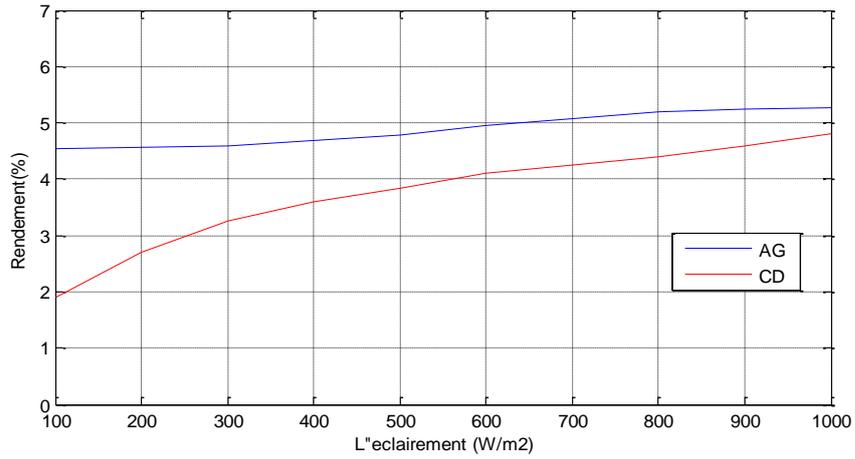


Figure 4.16 Courbes rendement-éclairage.

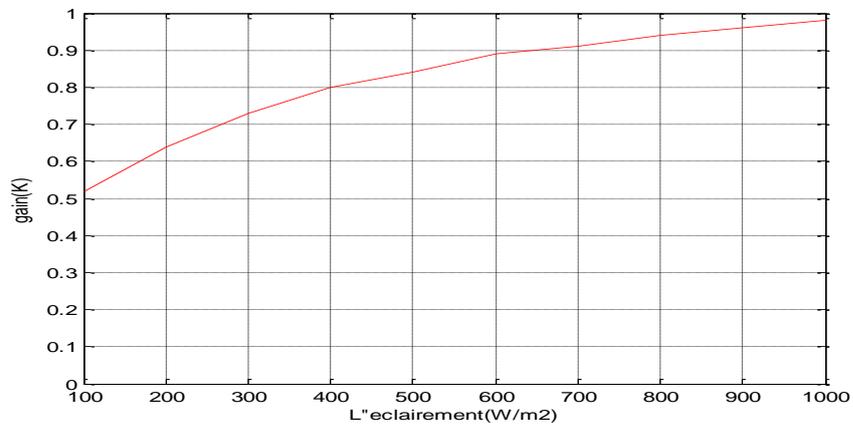


Figure 4.17 Courbe gain-éclairage.

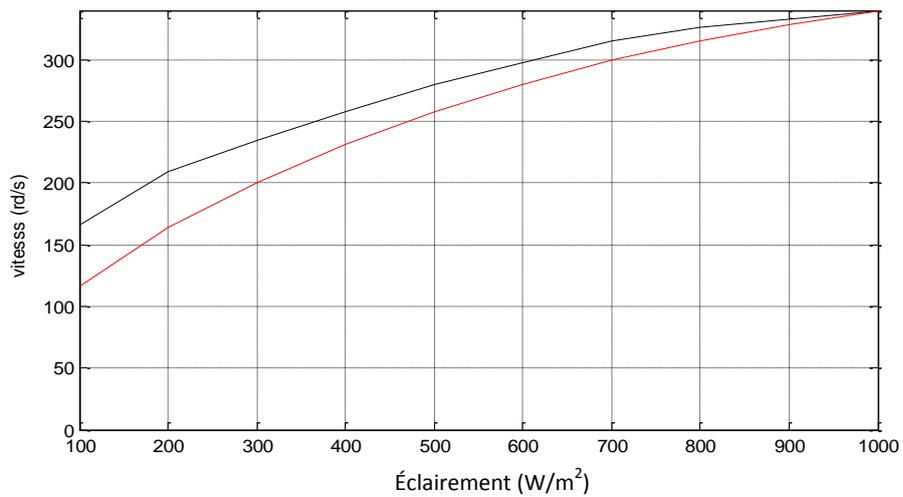


Figure 4.18 Courbes de vitesse-éclairage.

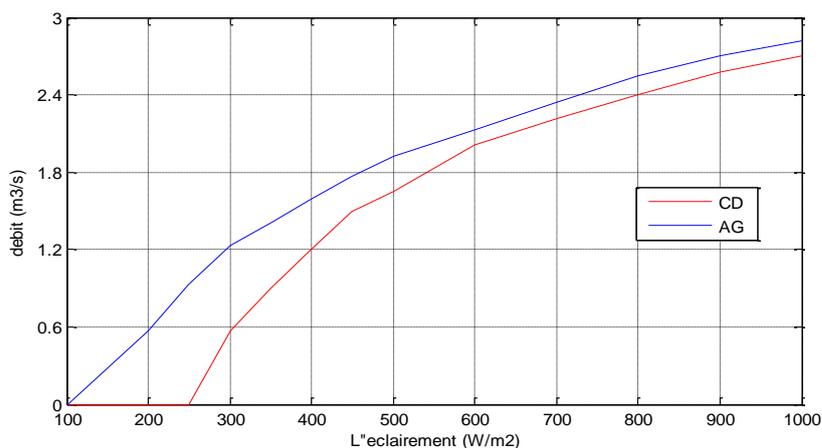


Figure 4.19 Caractéristique débit-éclairage.

La figure 4.16 illustre l'allure du rendement, qui est environ de 5.3% pour la technique AG, par contre le couplage direct est caractérisé par un faible rendement, spécialement pour les faibles valeurs d'éclairement, à titre d'exemple pour $E=100$ (w/m^2), le rendement est de 1.9%. Mais à partir de $E=900$ (w/m^2) et plus, les valeurs du rendement seront un peu plus proches, ce rapprochement prouve l'adaptation entre le groupe moto-pompe et le générateur pour le couplage direct a des forts éclairagements.

La figure 4.17 représente l'allure du gain au technique des AG en fonction de l'éclairement. Où le gain évolue d'une valeur de 0.52 pour un $E=100$ (w/m^2).

les allures de vitesse en fonction de l'éclairement sont représenté sur la figure 4.18, pour le couplage direct et la technique des AG. Dans le cas de AG le système délivré de l'eau à une vitesse de 160 (rad/sec) à partir d'un éclairement de 100(w/m^2). Par contre pour couplage direct, l'eau est donné à une vitesse de 120(rad/sec) pour le même éclairement. Pour des valeurs fortes d'éclairement l'allure pour CD et celle par les AG se approche.

La figure 4.19 représente les allures des débits, au couplage direct et la technique de AG en fonction de l'éclairement. Dans le cas du couplage direct le système ne commence à délivré de l'eau qu'à un éclairement de 250(w/m^2), par conséquent la maximisation de puissance force la pompe a fournir de l'eau à partir de 100(w/m^2), pour la technique de AG.

4.3 CONCLUSION

Cette simulation à été mené en deux phases :

La première phase était consacrée au contrôle du moteur PMSLDC alimenté par un GPV et entraînant une pompe centrifuge comme charge. Le contrôle du courant et de vitesse du moteur cité au dessus était effectué en cas sans et avec charge avec les contrôleurs suivants :

- Correcteur du courant à hystérésis.
- Contrôleurs de vitesse PI et celui flou

Alors on déduit que Le modèle proposé de l'entraînement du moteur a donné des résultats prometteux. L'analyse du moteur par phase a donné des résultats acceptables des courants de phase, couple et vitesse. Le contrôleur de courant à hystérésis a minimisé les ondulations du courant de phase ainsi que le couple en les maintenant autour des valeurs de référence à un niveau très réduits.

Les performances dynamiques du système avec les deux contrôleurs de vitesse PI et flou sont présentées et comparées. Il est prouvé que pour le contrôle d'un tell système compliqué et non linéaire, le contrôleur flou assure beaucoup mieux les propriétés dynamiques.

Dans la deuxième phase on a vu comment optimiser le rendement pour un système de pompage photovoltaïque. Après le couplage direct, l'optimisation par la méthode conventionnelle qui a été effectué en ajustant judicieusement le gain d'un hacheur : convertisseur DC-DC. Suivi en fin par l'optimisation par les algorithmes génétiques qui a comme variables du système de pompage photovoltaïque (I, V, K, W, Q, H).

Après présentation et comparaison des résultats obtenus pour cette phase, on peut souligner que le critère d'optimisation : les algorithmes génétiques, a offert un rendement et une débit maximales via celle de méthode conventionnelle. Il faut signaler encore que les résultats obtenus par ce critère peuvent être implantés pour optimiser le système de pompage photovoltaïque en temps réel.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans cette thèse sont focalisés sur le développement d'un procédé de contrôle et d'optimisation permet d'améliorer les performances dynamiques du moteur à courant continu à aimant permanent sans balais, ainsi que la maximisation du rendement du système de pompage photovoltaïque en utilisant un ensemble de techniques.

Aujourd'hui, l'énergie solaire photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à des grandes centrales connectées aux réseaux. Cependant, il reste encore pas mal de frein à son développement en termes de manques de production, de taux de pannes ou bien même de coût prohibitifs rendant cette source d'énergie chère et fiable tout au long de la durée de vie du générateur (au moins 25 ans).

Comme par ailleurs, plusieurs applications de l'énergie solaire photovoltaïque existent, dont l'utilisation pour le pompage d'eau est l'une. Elle est particulièrement bien adaptée aux zones rurales où l'eau fait cruellement défaut.

On a rappelé les principaux travaux publiés sur les systèmes de pompage photovoltaïque typique et ses différents sous-système, suivi par leur modélisation. L'application des techniques d'intelligences artificielle est ensuite traitée.

Les résultats de simulation obtenus permettent de tirer un ensemble de conclusion :

Dans le contexte du contrôle du moteur, on conclut que le modèle proposé de l'entraînement du moteur a donné des résultats prometteurs. L'analyse du moteur par phase a donné des résultats acceptables des courants de phase, couple, vitesse et f.e.m. Le contrôleur de courant par hystérésis à minimiser les ondulations du courant de phase ainsi que le couple en les maintenant autour des valeurs de référence à un niveau très réduits.

Les performances dynamiques du système avec les deux contrôleurs de vitesse PI et flou sont présentés et comparés. Il est prouvé que pour le contrôle d'un tel système compliqué et non linéaire, le contrôleur flou assure beaucoup mieux les propriétés dynamiques.

L'optimisation du système de pompage photovoltaïque permet de maximiser le rendement et le débit et de réduire le coût du système photovoltaïque. Pour parvenir à cet objectif on a opté pour différentes techniques d'optimisation.

L'optimisation conventionnelle du rendement du système de pompage photovoltaïque nécessite une variation très fine du gain du hacheur pour chaque éclairissement, afin de choisir la valeur optimale de celui-ci. Ce qui fait cette technique consomme énormément de temps de calcul. Sans ignorer qu'une variation du rendement du système de pompage photovoltaïque est liée aux caractéristiques du site et aux paramètres du système qui varient en fonction de temps.

Afin de résoudre ce problème, on a présenté un algorithme basé sur les techniques d'intelligence artificielle : les algorithmes génétiques qui utilisent à la fois les principes de la survie des individus les mieux adaptés et ceux de la propagation du patrimoine génétique, que l'on peut décrire par

l'organigramme de la figure 4.1. Ce processus se base sur plusieurs alternatives d'une population à chaque génération limitant ainsi le risque de convergence vers un optimum local. La convergence du processus d'optimisation est tributaire du choix de divers paramètres et opérateurs génétiques (taille de la population, codage, mutation, croisement, sélection, etc.). Ces derniers sont aussi à gérer en fonction des caractéristiques du problème à résoudre.

Après présentation et comparaison des résultats obtenus, on peut souligner que le critère d'optimisation : les algorithmes génétiques, a offert un rendement et un débit maximales par rapport à celle de méthode conventionnelle. Ainsi que les résultats obtenus par ce critère peuvent être implantés pour optimiser le système de pompage photovoltaïque en temps réel. Ce qui prouve l'efficacité et la robustesse de la technique des algorithmes génétiques.

Le présent travail ouvre plusieurs axes pour l'application, le contrôle et l'optimisation pour un système solaire photovoltaïque, notamment pour les systèmes connectés aux réseaux qui ont beaucoup d'intérêt actuellement. Cette étude de simulation doit être validée par l'implémentation pratiques des techniques choisies pour le contrôle ainsi que pour l'optimisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES

- [1] Lawrence E. Murr "Solar Materials Science", Academic Press, 1980.
- [2] Tomas Markvart "Solar Electricity", , Second edition, 1997, John Wiley & Sons.
- [3] Martin Green "Power to the People", UNSW Press book.
- [4] T. J. Hammers and al, "Renewable Energy for Developing Countries" IEEE Trans. on EC, Vol. 15, No. 4, 2000, pp: 481-493.
- [5] G. B. shrertha, L. Goel, " A Study On Optimal Sizing Of Stand Alone Photovoltaic Stations" IEEE Trans. on EC, Vol. 13, No. 4, 1998, pp: 373-377.
- [6] M. G. Jabori, " A contribution to the Simulation and Design Optimisation of Photovoltaic Systems" IEEE Trans. on EC, Vol. 6, No. 3, 1991, pp: 401-406.
- [7] K. Kalaitzakis "Optimal PV System Dimensioning with Obstructed Solar Radiation" Renewable Energy, Vol. 7, No. 1, pp: 51-56.
- [8] J. R. Potebaum, " Optimal Characteristics Of A Variable Frequency Centrifugal Pump Motor Drive" IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, N. 1, pp. 23-31, Feb. 1984.
- [9] W. R. Anis and al. "Coupling of a Volumetric Pump to a Photovoltaic Array", Solar Cells, Vol. 14, PP. 27-42, 1985.
- [10] Z. Zinge, "Optimum Operation of a Combined System pf a Solar Cell Array and a DC Motor", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 3, 1981, pp: 1193-1197.
- [11] J. Appelbaum, "Starting and Steady State Characteristics of DC Motor Powered by Solar Cell Generator", IEEE Trans. on EC, Vol. 1, No. 1, 1986, pp: 17-25.
- [12] M. M. Saied, "Matching of DC Motor to Photovoltaic generator for Maximum Daily Gross Mechanical Energy" IEEE Trans. on EC, Vol. 3, No. 3, 1988, pp: 465-471.
- [13] W. Z. Fam, M. K. Balachander, " Dynamic Performances of a DC Shunt Motor Connected to a Photovoltaic Array", IEEE Trans. on EC, Vol. 3, No. 3, 1988, pp: 613-617.
- [14] J. Appelbaum, M. S. Sarme, "The Operation of Permanent Magnet DC motors Powered by a Common Source of Solar Cells", IEEE Trans. on EC, Vol. 4, No. 4, 1989, pp: 635-642.
- [15] S. M. Alghuwainem, "Steady State Operation Of DC Motors Supplied From Photovoltaic Generators With Step Up Converters" IEEE Trans. on EC, Vol. 7, N°. 2, 1992, pp: 267-271.
- [16] S. Singer, "Starting Characteristics Of Direct Current Motors Powered By Solar Cells", IEEE Trans. on EC, Vol. 8, No. 1, 1993, pp: 47-52.

- [17] M. Akbaba, and al. "Matching Of Separately Excited Dc Motors To Photovoltaic Generators For Maximum Power Output", *Solar Energy*, Vol. 63, N0. 6, 1998, pp:375-385.
- [18] V. C. Mummadi, "Steady State And Dynamic Performances Analysis Of PV Supplied DC Motors Fed From Intermediate Power Converter", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol-61, 2000, pp: 365-381.
- [19] S. R. Bhat, and al, "Performance Optimisation of Induction Motor-Pump System Using Photovoltaic Energy Source", *IEEE Trans. on IA*, Vol. 23, No. 6, 1987, pp: 995-1000.
- [20] O. Olorunfemi, "Analyses Of Current Source Induction Motor Drive Fed From Photovoltaic Energy Source", *IEEE Trans. on EC*, Vol. 6, No. 1, 1991, pp: 99-106.
- [21] M. N. Eskandar, A. M. Zaki, "A Maximum Efficiency Photovoltaic-Induction Motor Pump System", *Renewable Energy*, Vol. 10, No. 1, 1997, pp: 53-60.
- [22] M. Veerachary, N. Yadaiah, "ANN Based Peak Power Tracking For PV Supplied Dc Motors", *Solar Energy*, Vol. 69, N0. 4, 2000, pp: 343-350.
- [23] T. Hiyama, and al. "Identification Of Optimal Operating Point Of PV Modules Using Neural Network For Real Time Maximum Power Tracking Control" *IEEE Trans. on EC*, Vol. 10, No. 2, 1995, pp: 360-367.
- [24] T. Hiyama, and al. "Evaluation Of Neural Network Based Real Time Maximum Power Tracking Control For PV System" *IEEE Trans. on EC*, Vol. 10, No. 3, 1995, pp: 543-548.
- [25] T. Hiyama, and al. "Neural Network Based Estimation Of Maximum Power Generation From PV Modules Using Environmental Information" *IEEE Trans. on EC*, Vol. 12, No. 3, 1997, pp: 241-247.
- [26] M. Godoy, N. N. franceschetti, "Fuzzy Optimisation based Control of a Solar Array System" *IEE Proc. EPA*, Vol. 146, No. 5, 1999, pp: 552-558.
- [27] T. F. Wu and al. "A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Application" *IEEE Trans. IE*, Vol. 47, No. 2, 2000, pp: 287-296.
- [28] C. L. P. Swamy and al. "Dynamic Performance of a permanent Magnet Brushless DC Motor Powered by a PV Array for Water Pumping" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 36, 1995, pp: 187-200.
- [29] Glasner , Joseph Appelbaum . " Advantage Of Boost Vs.Buck Topology For Maximum Power Point Tracker In Photovoltaic Systems". Tel-Aviv University, Faculty of Engineering, Dept.of Electrical Engineering-systems, Israel, IEEE.1996, pp355-358.
- [30] C. Hua, C. shen, "Control of Dc/Dc Converters for Solar Energy System with Maximum Power Tracking" *IECON'97 Conf. Vol. 2*, 1997, Usa, , pp: 827-832.
- [31] L.Merwe, G. Merwe, "Maximum Power Point tracking-Implementation Strategies" *ISIE'98 Symposium Proc.*, Vol. 1, No. 1, 1998, pp: 214-217.
- [32] H. M. Mashaly and al. "A Photovoltaic Maximum power Tracking Using Neural Networks" *Proc of the Third IEEE Conf. On Cont. Appl.* , Vol. 1, 1994, pp: 167-172.

- [33] I. H. Atlas, A.M. Sharaf, "A novel On-Line MPP Search Algorithm for PV Arrays" IEEE Trans. on EC, Vol. 11, No. 4, 1996, pp: 748-754.
- [34] D. C. Martins and al. "Water Pumping System from Photovoltaic Cells Using a Current Fed Parallel Resonant Push-Pull Inverter". 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record, Volume: 2, 1998, pp: 1892 -1898.
- [35] C. Hua, C. Shen, "Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control of DC/DC Converters for Photovoltaic Power System" 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record., Volume: 1, 1998 pp: 86 -93.
- [36] T. Senjyu, K. Uezato, "Maximum Power Point Tracker Using Fuzzy Control for Photovoltaic Arrays", Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 1994, pp: 143 -147.
- [37] H.D.Maheshappa, J.Nagaraju et M.V.Krishna Murthy. "An Improved Maximum Power Point Tracker Using Step- Up Converter With Current Locked Loop". Renewable energy, vol.13, N°22,1998, pp195-201.
- [38] Cihchiang Hua et Chihning Sher. "Control Of DC/DC Converter For Solar Energy System With Maximum Power Tracking". IEEE international conference on industrial electronics, vol.2, 1997, pp827-832.
- [39] Ramzy E.Katan and al. " Performance Analysis Of A Solar Water Pumping System". IEEE international conference on power electronics, vol.1, 1996, pp81-87.
- [40] Kame.Khouzam, Lucy Khozam. " Optimum Matching Of Direct – Coupled Electromechanical Loads To A Photovoltaic Generator". IEEE trans. on énergie conversion, vol.8 N°3, September 1993, pp343-349.
- [41] G. B. Shrestha, L. Coel "A Study on Optimal Sizing of Stand-alone Photovoltaic Stations", IEEE trans. E.C., Vol. 13, N 04, 1998, pp:373-378.
- [42] K. Kalaitzakis, "Optimal PV System Dimensioning with Obstructed Solar Radiation" Renewable Energy, Vol.7 N 01, 1996, pp:51-56.
- [43] S. J. Chiang, "Residential Photovoltaic Energy Storage System" IEEE Trans. IE. Vol.45, N 3, June 98, pp:385-394.
- [44] D. Coiante, "Towards the Photovoltaic Farm" IEEE 21st Photovoltaic Specialist Conf., Vol.2, 1990, pp: 1095-1098.
- [45] R. Liebenberg and al, "High Efficiency Long Life Actuator for PV Water pumping Applications" 5th European Conf. on PEA'93, pp:495-500.
- [46] H. Isoda and all, "Battery Charging Characteristics in small scaled from Photovoltaic Using Resonant DC-DC converters" IEEE IECON'90,vol.2, 1990, pp:1118-1123.
- [47] N. Argaw, "Optimisation of Photovoltaic Water Pumps Coupled with an Interfacing Pulse Width Modulated DC/AC Inverter Power Conditioning Device", IEEE, Vol. 1, 1994 pp: 1165-1168.

- [48] M. S. Taha and K. Suresh “Maximum Power Point Tracking Inverter For Photovoltaic Source Pumping Applications”
- [49] T. Eswam, P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques”, IEEE Transactions On, Energy Conversion, Vol. 22, pp. 439-449, Jun. 2007.
- [50] D. P. Hohm, M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental programmable, maximum power point tracking test bed”, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2000 pp. 1699-1702, Sept. 2000.
- [51] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method”, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.
- [52] K. Noppadol, W. Theerayod, S. Phaophak, “FPGA Implementation of MPPT using variable step-size P&O algorithm for PV applications”, Communication and Information Technologies, ISCIT'06, IEEE International Symposium On, pp. 212-215, Sept. 2006.
- [53] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Blaadger, “Improved MPPT Algorithms for rapidly Changing Environmental Conditions”, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 1614-1619, Aug. 2006.
- [54] C. Hua, C. Shen “Comparatives study of peak power tracking techniques for solar storage system”, IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC'98, Vol. 2, pp. 679-685, Feb. 1998.
- [55] W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O'Sullivan, “A new maximum power point tracking system”, IEEE Power Electronics Specialists Conference 1993, PESC'93, pp. 833-838, Jun. 1993.
- [56] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris, “Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 16, pp. 46-54, Jan. 2001.
- [57] W. Xiao, W. G. Dunford, “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'04, Vol. 3, pp. 1957-1963, Jun. 2004.
- [58] W. Xiao, W. G. Dunford, “Evaluating maximum power point tracking performance by using artificial lights”, Industrial Electronics Society, IEEE IECON'04, Vol. 3, pp. 2883-2887, Nov. 2004.
- [59] J. H. Lee, H. B. Bo, H. Cho, “Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size”, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 603-607, Aug. 2006.
- [60] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions”, Proc. Inst. Elect. Eng. Vol. 142, No.1, pp. 59-64, Jan. 1995.
- [61] T. Y. Kim, H. G. Ahn, S. K. Park, Y. K. Le, “A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation”, IEEE International Symposium on, Vol. 2, pp. 1011-1014, Jun. 2001.

- [62] A. S. Masoum, H. Dehbonei and E. F. Fuchs, "Theoretical and Experimental analyses of Photovoltaic Systems with voltage and current based maximum power point tracking", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 17, No. 4, pp. 514-522, Dec. 2002.
- [63] J. Ghaisari, M. Habibi, A. Bakhshai, "An MPPT controller design for photovoltaic (PV) system based on the optimal voltage factor tracking", *IEEE Electrical Power Conference, EPC 2007*, pp. 359-362, Oct. 2007.
- [64] N. Toshihiko, S. Togashi and N. Ryo, "Short-current Pulse based Maximum Power Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, pp. 217-223, Feb. 2002.
- [65] M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato, "Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV systems using fuzzy controller", *IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, No. 3, pp. 969-981, Jul. 2002.
- [66] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, and all, "A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller", *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'94*, pp. 396-403, Jun. 1994.
- [67] N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, P. Sirisuk, "RISC-microcontroller built-in fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered light-flasher applications", *Industrial Electronics Society, 2004, IECON 2004*, Vol. 3, pp. 2673-2678, Nov. 2004.
- [68] N. S. D'Souza, L. A. C. Lopes, X. Liu, "An intelligent maximum power point tracker using peak current control", *IEEE Power Electronics Specialists Conference 2005, PESC'05*, pp. 172-177, 2005.
- [69] A. Terki et al "An improved efficiency of fuzzy logic control of PMBLDC for PV pumping system" *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, pp.934-944, 2012.
- [70] S.A.KH. Mozaffari Niapour et al, "Brushless DC motor drives supplied by PV power system based on Z-source inverter and FL-IC MPPT controller" *Energy Conversion and Management* 52 pp. 3043-3059, 2011.
- [71] G.B. Shrertha, L. Goel, "A study on optimal sizing of stand-alone photovoltaic stations", *IEEE Trans. EC 13 (1998) 373-377*.
- [72] K. Kalaitzakis, Optimal PV system dimensioning with obstructed solar radiation, *Renew. Energ.* 7 (1996) 51-56.
- [73] Yahia Bakelli et al, Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept, *Sol. Energ.* 85 (2011) 288-294.
- [74] M.M. SAIED, Matching of DC motor to photovoltaic generator for maximum daily gross mechanical energy, *IEEE Trans. EC 3 (1988) 465-471*.
- [75] J. Samin et al, Optimal sizing of photovoltaic systems in varied climates, *Solar Energy.* 6 (1997) 97-107.
- [76] S. Ould-Amrouche et al, "Modelling photovoltaic water pumping systems and evaluation of their CO2 emissions mitigation potential", *Appl. Energ.* 87(2010) 3451-3459.

- [77] T.F. Wu et al, A fuzzy-logic-controlled single-stage converter for PV-powered lighting system application, *IEEE Trans. IE* 47 (2000) 287–296.
- [78] K. Benlarbi, A fuzzy global efficiency optimization of photovoltaic water pump system, *Sol. Energ.* 77 (2004) 203–216.
- [79] A. Betka, A. Attali, Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory, *Sol. Energ.* 84 (2010) 1273–1283.
- [80] S. M. Aghuwainem, “steady-state performance of DC motors supplied from photovoltaic generators with step-up converter”, *IEEE transaction of energy conversion*, vol.7, N°2, pp. 267-272, September 1992.
- [81] A. Boglietti, M. Pastorelli and F. Profumo, “A conduction angle control strategy for high speed brushless motors for spindle drives”, Springer-Verlag, 1993, pp. 387-395.
- [82] H. Buhler, *Réglage par la logique floue*, Presses polytechniques romandes, Lausanne, Suisse 1994.
- [83] R. D. Lorenz, “Advances in electric drive control”, *IEEE international electric machines and drives conference, IEMDC'99*, Seattle, Washington USA, pp.9-16, May 9-12, IEEE 1999.
- [84] L. Baghli, “contribution à la commande de la machine asynchrone, Utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques”, thèse de doctorat de l'Université de Henri Poincaré, France, 1999.
- [85] A. Rahideh et al “Optimal brushless DC motor design using genetic algorithms”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322, pp. 3680–3687, 2010.
- [86] A. Mokeddema et al, “Performance of a directly-coupled PV water pumping system”, *Energy Conversion and Management* 52, pp. 3089–3095, 2011.
- [87] I.H. Altas et al, “A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems”, *Renewable Energy* 33, pp. 388–399, 2008.
- [88] N. Hamrouni et al, “Theoretical and experimental analysis of the behavior of a photovoltaic pumping system”, *Solar Energy* 83, pp. 1335–1344, 2009.
- [89] Z. Michalewicz, *Genetic algorithms+Data Structures = Evolution Programs*. Berlin, Springer, 1992.
- [90] RR. Colin, ER. Jonathan, *Genetic algorithms—principles and perspectives, a guide to GA theory*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [91] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*: JohnWiley & Sons, 1997.
- [92] M. Srinivas and L. M. Patnaik, “Genetic Algorithms: A Survey”, *IEEE Computer*, Vol. 24, No. 6, pp. 17-26, June 1994.
- [93] J.M. Hirtz, *les stations de pompage d'eau*, Lavoisier. TEC&DOC, 1991.

ANNEXES

A. L'INTERFACE « Gatool »

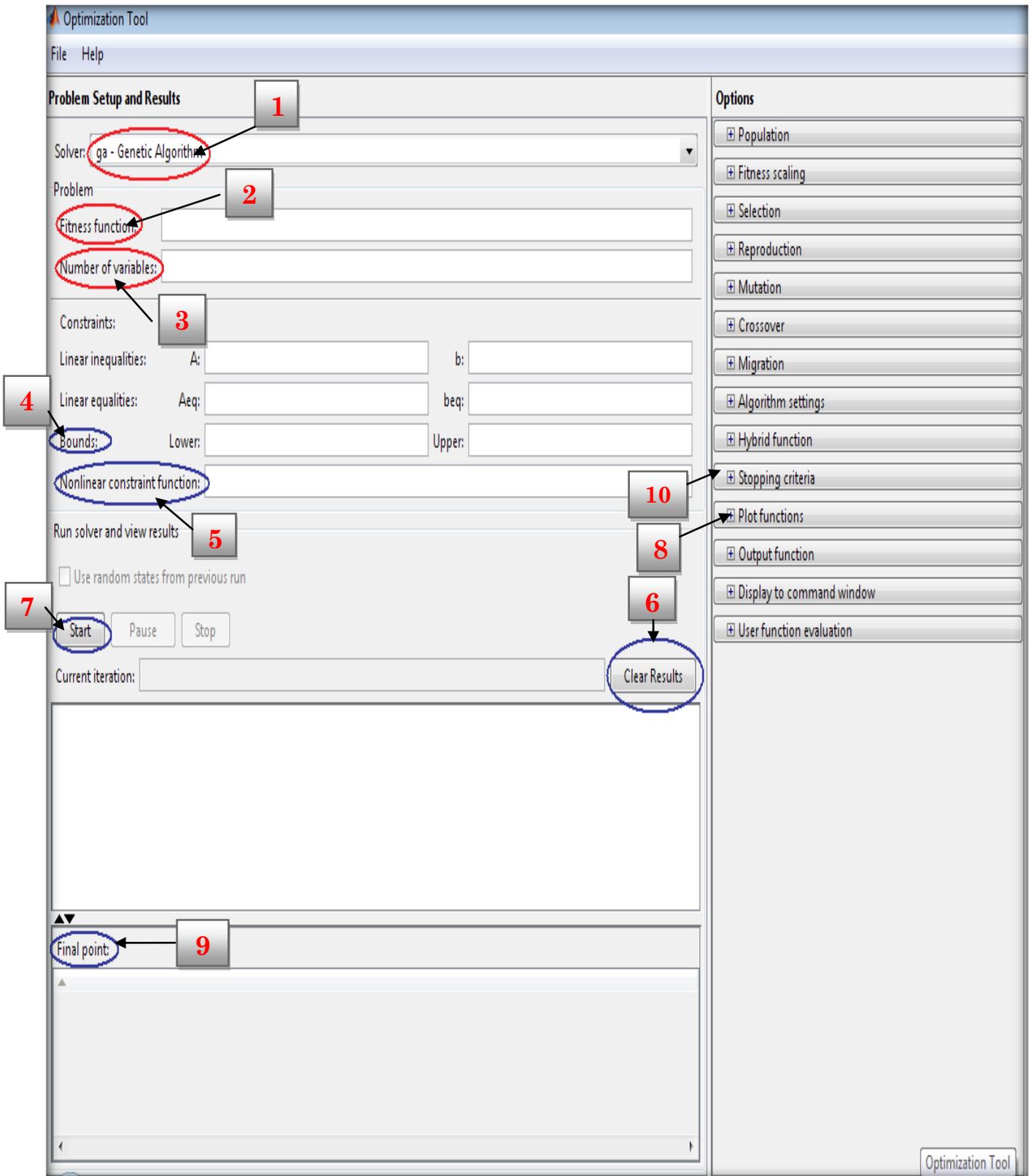


Figure A.1 Interface Gatool

- 1 Solver** : Cet outil correspond à la fonction du AG.
- 2 Fonction de l'aptitude (fitness)** : est la fonction objective que vous voulez minimiser. Vous pouvez spécifier la fonction comme un manche de la fonction de la forme @ fitness où fitness.m est un M-File qui revient un scalaire.
- 3 Nombre de variables (a exigé)** : est le nombre de variables indépendantes pour la fonction de l'aptitude (fitness).
- 4 Bounds** : des liens inférieurs et supérieurs sur les variables.
 - * **Lower** (inférieur spécifie) des liens inférieurs comme un vecteur.
 - * **Upper** (supérieur spécifie) des liens supérieurs comme un vecteur.
- 5 Nonlinear contrainte function (Non fonction de la contrainte linéaire)**: définit les contraintes non linéaires. Spécifiez la fonction comme une fonction anonyme ou comme un manche de la fonction de la forme « @contrainte » où contrainte.m est un M-File qui rend C et ceq aux vecteurs. Est-ce que les égalités du non linéaires sont du ceq de la forme = 0, et les inégalités du non linéaires sont de la forme $C \leq 0$.
- 6 Clear results** : résultats précédents supprime.
- 7 Start** : Pour courir le solver, cliquez le bouton du Début. Quand l'algorithme termine, le Statut et la vitre des résultats affichent la raison que l'algorithme a terminée. Le dernier point met à jour pour montrer les coordonnées du dernier point.
- 8 Plot function** : Les fonctions de l'intrigue vous permettent de comploter des plusieurs aspects de l'algorithme génétique comme il exécute. Chacun tire dans un axe séparé sur la fenêtre de l'exposition. Utilisez le bouton de l'Arrêt sur la fenêtre pour interrompre un processus courant.
- 9 Final point** : si vous ne voyez pas point Définitif, cliquez le triangle pointant montant sur l'icône sur le coin inférieur gauche.
- 10 Stopping criteria (Critères qui s'arrête)** : Le critère qui s'arrête détermine quelles causes l'algorithme pour terminer.

B. TABLEAUX DES RESULTATS D'OPTIMISATION DU RENDEMENT
Tableau B.1 Résultats d'optimisation par les algorithmes génétiques

E	100	200	300	400	500	600	700	MENT800	900	1000
I	0.2	0.79	1.1	1.58	2	2.3	2.87	3.26	3.7	4.1
V	163	164.5	165	165.5	166	166.2	166.5	167	167.6	169
K	0.45	0.57	0.67	0.74	0.8	0.85	0.89	0.92	0.95	0.97
W	166	209	235	258	280	297	315	326	333	340
η	9.08	9.12	9.2	9.39	9.59	9.9	10.17	10.41	10.47	10.56
Q	0	0.00054	0.00117	0.00157	0.0019	0.00217	0.0024	0.00256	0.00269	0.00282

Tableau B.2 Résultats d'optimisation par Méthode conventionnelle

E	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
I	0.39	0.9	1.4	1.8	2.27	2.7	3.1	3.47	3.8	4.1
V	121	131	138	142.5	148	152.5	157	162	165	168.5
K	0.52	0.64	0.73	0.8	0.84	0.89	0.91	0.94	0.96	0.98
W	147	193	219	242	265	285	305	320	328	340
η	7.5	7.8	8	8.2	8.3	8.4	8.6	8.65	8.66	8.65
Q	0	0	0.0086	0.00135	0.00173	0.00204	0.0023	0.00249	0.00265	0.00281

Tableau B.3 Résultats du Couplage direct

E	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
W	116.067	164.058	200.704	231.242	257.487	280.125	299.39	315.4626	328.666	328.666
η	5	5.8	6.5	7.2	7.7	8.2	8.5	8.6	8.65	8.65
Q	0	0	0.0005	0.0011	0.0016	0.0019	0.0022	0.00244	0.0026	0.0028

C. EXEMPLES

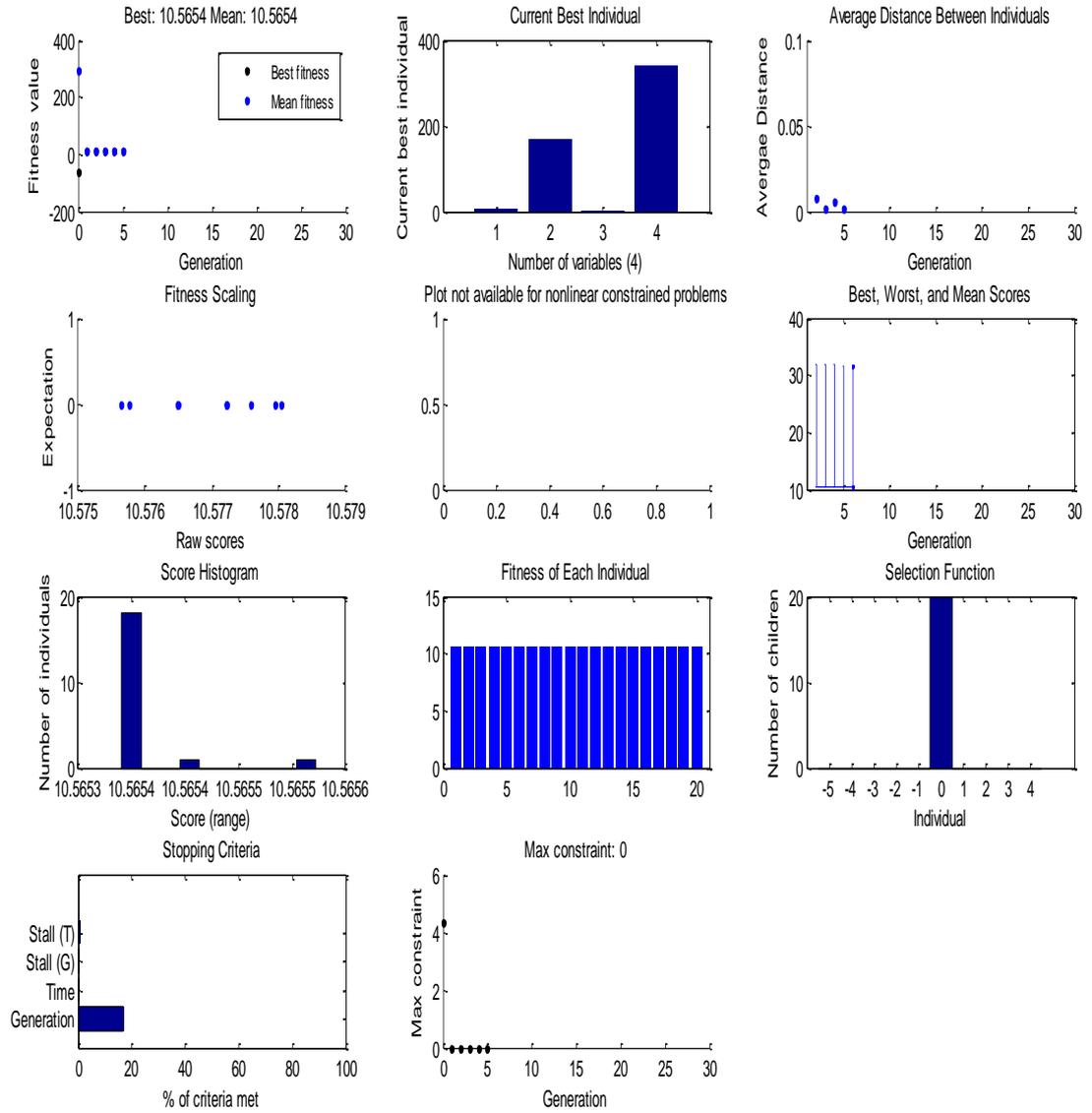
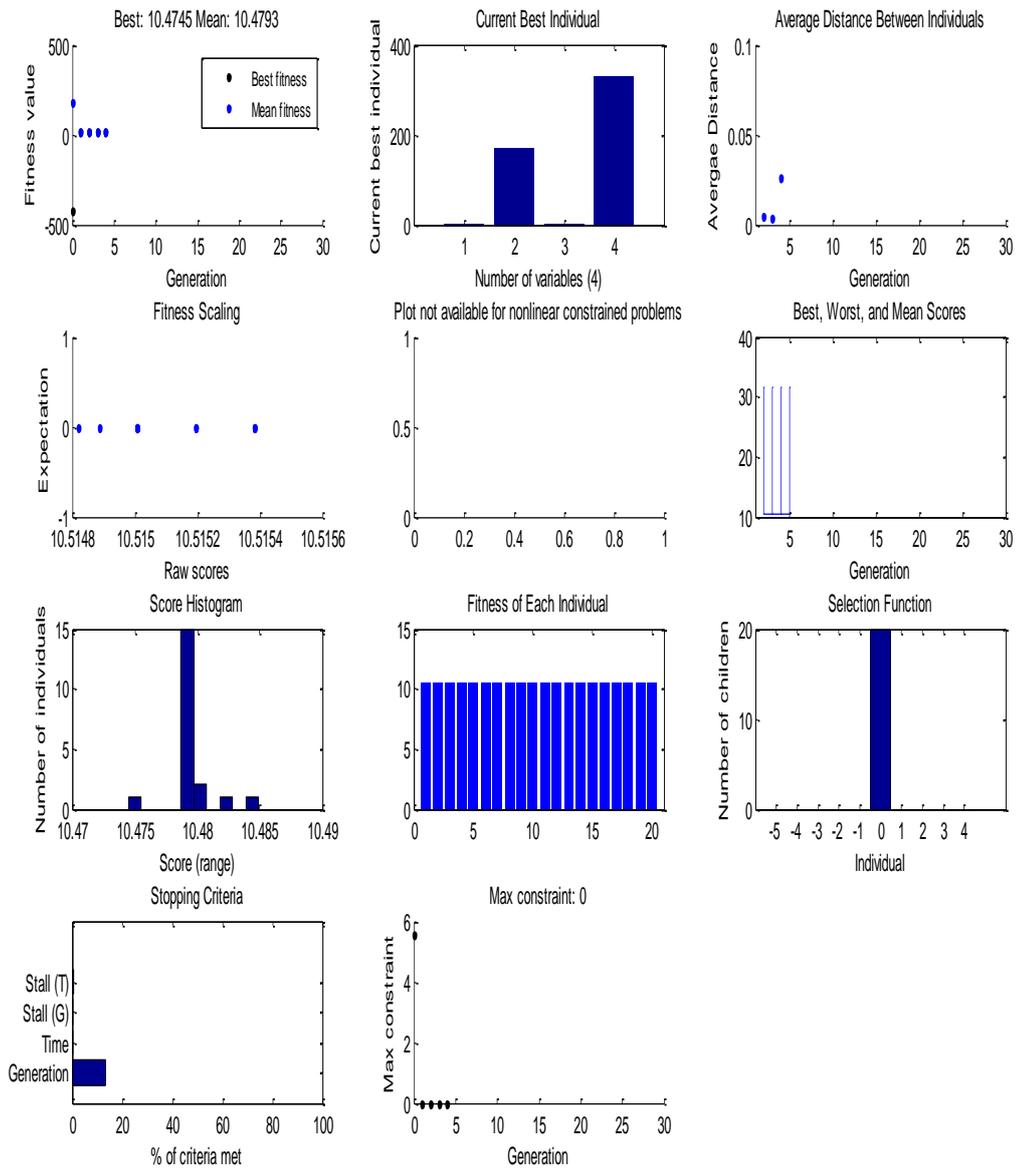


Figure C.1 Résultats d'optimisation par les AG pour un ensoleillement 1000W/m²



Stop

Figure C.1 Résultats d'optimisation par les AG pour un ensoleillement $800\text{W}/\text{m}^2$

D. APPENDIX

Le générateur photovoltaïque, moteur et pompe utilisés dans cette étude ont les paramètres suivants :

Les modules du générateur PV : AEG-40.

(Température $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairement $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.)

La tension de circuit ouvert $V_{OC}= 22.40 \text{ V}$

Le courant de court circuit $I_{CC}= 2.410 \text{ A}$

La résistance en série $R_s 0.450 \Omega$

Le coefficient de température pour le courant $a=0.06\%/ \text{ C}$

Le coefficient de température pour la tension $b= 0.40\%/ \text{ C}$

La pompe Centrifuge

La vitesse 3000 tr/min

La puissance 521 W

Le débit 2.597 l/s

La hauteur 14.11 m

Le rendement 69%

Le moteur à courant continu à aimant permanent sans balais

La puissance 690 W

La vitesse 3000 tr/min

La tension 200-220V

Le courant 4.8 A

La résistance par phase 1Ω

L'inductance par phase 5 mH

Nombre de pôles 6

Constante de E.m.f 0.47

E. CALCUL DES PARAMETRES DU SYSTEME DE POMPAGE PV

%%%%%%%%% LES DONNEE DU GENERATEURE PHOTOVOLTAIQUE %%%%%%%%%

```

ns=10;np=2;E=1000;
A1=35e-2*ns*np ;
Rs=0.45*ns/np;
Icc=2.41*np;
Voc=22.4*ns;
Iop=2.2*np;
Vop=17.45*ns;
Vth=(Vop+Iop*Rs-Voc)/log(1-Iop/Icc);
Io=(Icc-Iop)*exp(-(Vop+Iop*Rs)/Vth);
    
```

%%%%%%%%% LES DONNEES DU MOTEUR %%%%%%%%%

```

ke=0.47/2;
R=4.8;
w0=314;
A=1.68e-5;
    
```

%%%%%%%%% LES DONNEE DE LA POMPE %%%%%%%%%

```

e=0.73;g=9.81;r2=0.051;b2=0.01;beta2=1.047/2;
C1=(e/g)*(w0*r2)^2;C2=(e*1.15*w0)/(g*6.28*b2*0.97*tan(beta2));C3=442709.52; Hg=7.430;
C=1223216.3;
    
```

%%%%%%%%% CONTRAINTES D'EGALITE %%%%%%%%%

```

PM1=I-(Icc-Io*(exp((V+Rs*I)/ Vth)-1)); % contrainte du PGV
PM2=(Rs*I/K)+ke*W-K*V ; % contrainte du moteur
PM3=(ke*I/K)-A*W^2 ; % contrainte de la pompe
PM4=H-(1.93*e-4*W^2-2.36*W*Q-451538.94); % contrainte de la canalsation et pompe
PM5=H-1223216.31*Q^2-7.43; % contrainte de la canalisation
    
```

%% LES CONSTANTES DU REGULATEUR PI %%%

Coefficient de proportionnalité du régulateur PI : $K_p= 3.6$
Coefficient d'intégration du régulateur PI : $K_i= 0.0066$

%% LES DONNEES D'OPTIMISATION PAR LES AG %%%

Nombre de génération initial : 100
Codage binaire
Méthode de sélection : Roulette
Probabilité de croisement : 0.8
Probabilité de mutation : 0.01
Nombre de génération : 5