

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

جامعة سعد دحلب البلدية 1
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الألية والكهر وتقنى
Département d'Automatique & Electrotechnique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines électriques

Présenté par

KARA Allaeddine

&

DAHDAH Mohamed

Thème

Commande SHE PWM pour une application photovoltaïques en utilisant l'optimisation par essaim de particules (PSO)

Proposé par : KAHLANE Hamza

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

Je tiens à remercier dieu de m'avoir donné la patience de terminer ce travail.

Mes remerciements les plus particuliers vont à mon encadreur monsieur **KAHLANE Hamza** pour son rôle majeur dans l'élaboration de ce travail par ses remarques constructives et ses suggestions pertinentes, qu'il trouve ici mon vif témoignage en reconnaissance de son rôle important dans l'amélioration du manuscrit de ce mémoire.

Je remercie les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Je réserve une pensée toute particulière à mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et guidé tout au long de mes études. Qu'ils trouvent, en ce mémoire, le modeste témoignage de ma profonde reconnaissance.

Enfin, j'aimerais remercier ma famille, ainsi que mes amis qui m'ont aidé et encouragé tout au long de mon travail.

الملخص

الغرض من هذا العمل هو دراسة التحكم في تحديد مؤشر النمذجة وإلغاء التناغم في التحول. وتستند هذه السيطرة إلى خوارزمية السرب الأمثل للجسيمات، وهو النهج الذي أثبتت فعاليته في العديد من المجالات. دراسة لضمان أداء ودقة في مجال الصور الفولطية PSO خوارزمية

الكلمات الرئيسية:

PSO سرب الجسيمات، الطاقة الضوئية،

Résumé :

Le but de ce travail est l'étude d'une commande pour identifier l'indice de modulations et éliminer les harmoniques de commutations (SHE). Cette commande est basée sur l'algorithme d'optimisations par essaim particules (PSO), une approche qui a prouvé son efficacité dans les plusieurs domaines. Une étude pour assurer la performance et la précision de l'algorithme PSO dans le domaine photo voltaïque.

Mots clés : Commande SHE, photovoltaïque, PSO.

Abstract:

The goal of this work is the study of a control to search for the modulation index and eliminate switching harmonics (SHE). This command is based on the Particle Swarm Optimizations (PSO) algorithm, an approach that has proven effective in several areas. A study to ensure the performance and accuracy of the PSO algorithm in the photovoltaic field

Key words: SHE, PSO, solar panel.

Sommaire

Remerciements

Résumé :

Introduction générale :..... 1

Chapitre 1

Le pompage photovoltaïque et la machine asynchrone

1.	Le pompage photovoltaïque	5
1.1	Introduction :.....	5
1.2	Technique de pompage :.....	5
1.2.1	Pompage « au fil de soleil » :.....	5
1.2.2	Pompage avec batteries :.....	5
1.3	Les composants d'un système de pompage PV :.....	6
1.3.1	Générateur Photovoltaïque :.....	7
1.3.2	Les groupe électropompe :.....	7
1.3.2.1	Les pompes :.....	7
1.3.2.1.1	La pompe centrifuge :.....	7
1.3.2.1.1.1	Caractéristique d'une pompe centrifuge :.....	7
1.3.2.1.2	La pompe volumétrique :.....	8
1.3.2.1.2.1	Caractéristique d'une pompe volumétrique :.....	8
1.3.2.2	Les moteurs électriques :.....	8
1.3.2.2.1	Moteur à courant continu avec balais :.....	8
1.3.2.2.2	Moteur à courant continu, sans balais (Brushless) :.....	9
1.3.2.2.3	Moteur à courant alternatif :.....	9
1.3.3	L'électronique de commande et de contrôle :.....	9
1.3.4	La partie stockage :.....	10
1.4	Dimensionnement complet de l'installation :.....	10
1.5	Taille du générateur photovoltaïque :.....	11
1.5.1	Méthode analytique :.....	11
1.5.2	Méthode graphique :.....	11
1.5.3	Les abaques :.....	12
1.6	Dimensionnement des stations de pompage solaire :.....	13
2	La machine asynchrone	14
2.1	Introductions :.....	14
2.2	Définition :.....	14
2.3	Commande des moteurs asynchrones :.....	15

2.3.1	Introduction :.....	15
2.3.2	Commande scalaire :.....	15
2.3.2.1	Contrôle en V/f de la machine asynchrone :.....	16
2.3.2.2	Contrôle scalaire du courant :.....	16
2.3.3	Commande vectorielle :.....	16
2.4	Constitution d'un moteur asynchrone :.....	16
2.4.1	Stator :.....	17
2.4.2	Rotor :.....	18
3	Conclusion :.....	19

Chapitre 2

Onduleur de tension et la commande SHE

1.	Onduleur de tension.....	21
1.1	Introduction :.....	21
1.2	Définition :.....	21
1.3	Classification des onduleurs :.....	22
1.3.1	Selon leur nombre de phase (monophasé ou triphasé) :.....	22
1.3.1.1	Onduleur de tension monophasé en demi- pont :.....	22
1.3.1.1.1	Le principe de fonctionnement :.....	23
1.3.1.1.2	Avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en demi pont :.....	23
1.3.1.2	Onduleur de tension monophasé en pont H :.....	24
1.3.1.2.1	Principe de fonctionnement :.....	24
1.3.1.2.2	Les avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en pont H :.....	25
1.3.1.3	Onduleur de tension triphasé :.....	25
1.3.2	Selon la nature de la grandeur (tension ou courant) à transformer :.....	27
1.3.2.1	Les onduleurs de tension :.....	27
1.3.2.2	Les onduleurs de courant :.....	27
1.3.3	Selon le mode de commutation de leurs interrupteurs :.....	27
1.3.3.1	Les onduleurs autonomes :.....	27
1.3.3.2	Les onduleurs non autonomes :.....	27
2.	La commande SHE PWM :.....	28
2.1	Introduction :.....	28
2.2	Les techniques de PWM :.....	28
2.2.1	PWM engendrée :.....	28
2.2.2	MLI Vectorielle :.....	28
2.2.3	MLI calculée (programmée) :.....	29
2.3	Principe de la commande SHE PWM :.....	29

2.4	Calcul des valeurs exactes des angles de commutation par la méthode de NEWTON-RAPHSON :	33
2.4.1	Description :	33
2.4.2	Résolution du système non linéaire par la Méthode de Newton-Raphson :	35
2.5	La base de données des angles exacts :	38
3.	Conclusion :	38

Chapitre 3

Optimisation par essaim de particules PSO

2.	Définitions :	41
3.	Les différents types du PSO :	41
3.1	PSO de l'optimum global :	41
3.1.1	Principe de déplacement d'une particule dans PSO de l'optimum global :	42
3.2	PSO de l'optimum local :	45
3.2.1	Principe de déplacement d'une particule dans PSO de l'optimum local :	45
4.	Les Composants de vitesse :	48
5.	Les paramètres du PSO :	49
6.	La comparaison entre les deux version (global et local) :	51
7.	Exemple sur l'efficacité du PSO :	51
8.	Les champs d'application du PSO :	52
9.	Conclusion :	53

Chapitre 4

Résultats de la Simulations

1.	Introduction :	55
2.	Indice de modulation im et l'éliminations d'harmoniques :	55
2.1	Formulation du problème :	55
2.2	Elimination d'harmoniques par PSO :	57
3.	Résultats de simulation :	59
4.	Conclusion :	69
	Conclusion Générale :	71
	Bibliographie :	

Liste des figures

Figure 1. 1: Schéma synoptique simplifié de pompage PV.....	6
Figure 1. 2: Diagramme du pompage PV par motopompe à CC.....	9
Figure 1. 3: courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation	13
Figure 1. 4: Eclaté d'un moteur asynchrone à cage.....	17
Figure 1. 5: Eclaté d'un moteur asynchrone à bagues.....	17
Figure 1. 6: le stator de la machine asynchrone.	18
Figure 1. 7: Symboles électrique du moteur asynchrone à rotor bobiné (a) et à cage d'écureuil (b). ...	18
Figure 2. 1: Schéma de principe de l'onduleur.....	22
Figure 2. 2: Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi – pont.....	22
Figure 2. 3: Schéma de principe et la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H.	24
Figure 2. 4: Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	26
Figure 2. 5: représentation d'une période de commutation avec temps mort.....	26
Figure 2. 6: La tension normalisée de sortie de l'onduleur.	29
Figure 2. 7: courbes des angles de commutation exact pour m égal à 3.....	37
Figure 3.1: volée d'oiseaux.....	40
Figure 3.2: L'étoile topologie de voisinage.	42
Figure 3.3: principe de déplacement d'une particule dans PSO de l'optimum global.	42
Figure 3.4: Organigramme de l'algorithme PSO de l'optimum global.....	44
Figure 3.5: l'anneau topologie de voisinage.	45
Figure 3.6: principe de déplacement d'une particule dans PSO du l'optimum local.	46
Figure 3.7: organigramme de l'algorithme PSO du l'optimum local.	47
Figure 3.8: schéma vectorielle du déplacement d'une particule.	49
Figure 3.9: le diminue progressif en poids de l'inertie.....	51
Figure 3.10: convergence de la fonction objective.....	52
Figure 4. 1: bloc diagramme d'implantation du PSO.....	57
Figure 4. 2: partie Simulink de la fonction objectif.....	60
Figure 4. 3: la valeur de fonction objective sans PSO pour im=0.1 (Fitness fonction=0.2609 80 itérations).....	60
Figure 4. 4: Présente la convergence de la fonction objective avec PSO pour im=0.1 (best fonction value :0.230891 pour 80 itérations).....	61
Figure 4. 5: la valeur de fonction objective sans PSO pour im=0.2.....	62
Figure 4. 6: Présente la convergence de la fonction objective avec PSO pour im=0.2 (best fonction value :0.126128 pour 80 itérations).....	62
Figure 4. 7: la valeur de fonction objective sans PSO im=0.3 (Fitness fonction=0.0664).....	63
Figure 4. 8: la convergence de la fonction objective pour im=0.3 (best fonction value :0.0637472 pour 80 itérations).....	63
Figure 4. 9: la convergence de la fonction objective pour im=0.5 (best fonction value :0.0637472 pour 80 itérations).....	64
Figure 4. 10: la convergence de la fonction objective pour im=0.5 (best fonction value :0.000218036 pour 150 itérations).	64
Figure 4. 11: la valeur de fonction objective sans PSO im=0.8 (Fitness fonction=0.1349).....	65

Figure 4. 12: la convergence de la fonction objective pour $im=0.8$ (best fonction value :0.126681 pour 140 itérations).....	65
Figure 4.13: PSO Convergence graph $im=0.5$	66
Figure 4.14: objective fonction graph.....	67
Figure 4.15: les angles de commutations pour chaque itération.....	68
Figure 4.16 : évaluation de im pour chaque itération.....	68

Liste des tableaux

Tableau 2. 1: Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en demi pont.....	23
Tableau 2. 2: Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en pont H.....	25
Tableau 2. 3: Nombre d'angle en fonction de m	38
Tableau 4. 1: les angles de commutations pour éliminer les harmoniques 5, 7, 11, 13, 15, 19 et 23.....	59
Tableau 4. 2: les valeurs de la fonction objectif sans/avec PSO en fonctions de l'index de modulation.....	66
Tableau 4.3 : les angles de commutations en fonction de m	68

Introduction générale :

L'usage de l'énergie a largement évolué depuis la période primitive où les besoins énergétiques de l'homme étaient très limités. La révolution industrielle qui survint en occident à la fin du XVIIe siècle a contribué à l'évolution de l'utilisation d'énergie. L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie la plus consommée dans le monde, elle est primordiale pour le développement d'un pays. La consommation mondiale de l'énergie électrique n'a pas cessé d'augmenter (elle augmente d'environ 2% par année). Les principales sources d'énergie électrique proviennent des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et du nucléaire, cependant ces sources d'énergie sont devenues moins fiables ç cause de nombreux facteurs dont on peut citer :

Epuisement progressif du stock d'énergie dont on a épuisé sans retenue.

La répartition inégale des gisements de ces sources provoque de lourdes tensions géopolitiques.

Les changements climatiques déjà amorcés dont on ne peut plus nier l'évidence ; probablement directement liés aux émissions des gaz à effet de serre, le CO₂ en tête, résultants de l'activité humaine.

Tous ces désavantages cités précédemment, présentant un risque majeur pour l'avenir de notre planète, ont poussé l'homme à songer à de nouvelles sources d'énergie qui se renouvellent assez rapidement pour être considérés comme inépuisables. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants, provoqués principalement par le soleil (l'énergie solaire, mais aussi hydraulique, éolienne et la biomasse...), la lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...). Ce qui a conduit à la recherche et au développement de la conversion et de stockage des énergies renouvelables.

L'énergie solaire photovoltaïque est récemment répandue à travers le monde, elle est en forte croissance depuis quelques années (sa production a été multipliée par neuf depuis l'année 2000) et est reconnue comme étant une technologie moins chère, elle est à la fois saine partagée par tous les habitants du globe terrestre, inépuisable, pure, gratuite et ne demande pas la création de nouvelles lignes électriques qui demande généralement un lourd investissement. Grâce à ses avantages, de nombreuses études sont menées pour son développement.

Introduction Générale

L'Algérie est un pays riche en énergie solaire par rapport à son taux d'ensoleillement. La superficie immense de Sahara permet une grande exploitation de l'énergie solaire. L'Algérie est supposée avoir une place parmi les pays leaders au parrainage de cette technologie dans les années à venir. Il reste alors à établir une politique sérieuse dans le cadre de l'exploitation de ces immenses potentiels énergétiques. Un pas est lancé dans ce sens après la signature de chef de l'état en 2009 d'un décret qui retranche 0.5% de la fiscalité pétrolière pour le développement des énergies renouvelables.

Dans ce mémoire, on a choisi comme source d'énergie photovoltaïque pompage PV, on a utilisé la commande SHE PWM (MLI) pour commander l'onduleur triphasé.

La technique de modulation de largeur d'impulsion basée sur la dispersion de la tension triphasée obtient une large application dans la modulation AC à cause de la baisse des pertes de commutation, la tension de sortie plus élevée pour la même tension DC, et un meilleur contenu harmonique.

D'après le développement des interrupteurs semi-conducteurs à commutation. Les convertisseurs de fréquences de type onduleurs de tension MLI. Trouvent beaucoup d'intérêt surtout dans l'entraînement des machines à courant alternatif. La commande qui est souvent adaptée aux convertisseurs statiques est la commande MLI. Plusieurs méthodes ont été développées dans le but de générer une tension sinusoïdale à la sortie de l'onduleur ayant le moins d'harmoniques possible.

Donc le but de ce mémoire, nous allons développer et étudier la commande SHE PWM (MLI), utilisant l'algorithme d'optimisation méta-heuristiques (optimisation par essaim particules PSO) pour identifier l'indice de modulations et suivre les angles de commutations et éliminé les harmoniques. Nous montrons, grâce à des études de simulation sur MATLAB, nous allons vous montrer l'éliminations des harmoniques. Pour finir, une conclusion générale donne une synthèse sur le travail effectué et résume les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées.

Outre l'introduction, ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

- Le premier chapitre est porté sur deux titre, dans le premier titre on a présente le pompage photo voltaïque, on a vu la technique de pompage PV, ainsi on a expliqué brièvement les composantes d'un système pompage PV et le dimensionnement complet de l'installation de pompage et on a expliqué les méthodes de taille du générateur PV, et dans le deuxième titre on a introduit la machine asynchrone, on a

parlé sur la commande de la machine et on a présenté la constitution de moteur asynchrone.

- Dans le deuxième chapitre on a fait une définition sur l'onduleur de tension, on a donné la classification des onduleurs selon trois modes bien définis, après on a fait une étude théorique sur la commande SHE-PWM.
- A travers le chapitre trois, nous avons donné la présentation bien expliquée de l'algorithme intelligent d'optimisation par essaim particulaires (PSO).
- Et dans le dernier chapitre on a donné les résultats de notre travail pour la commande de l'onduleur triphasé par l'optimisation essaim particulaire PSO qui consiste a déterminé le meilleur résultat.

On termine notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Le pompage photovoltaïque et **la machine asynchrone**

1. Le pompage photovoltaïque

1.1 Introduction :

La demande croissante d'eau dans notre pays a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïque comme source d'énergie aux groupes moteur-pompes. la réalisation d'un système de pompe photovoltaïque autonome, faible et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer, avec une excellente fiabilité et bon fonctionnement de service.

1.2 Technique de pompage :

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux techniques sont possibles : dans la première méthode, l'énergie solaire est consommée en « temps réel » ; on parle alors d'un « pompage au fil du soleil ». Cette solution nécessite un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard). La deuxième technique consiste à utiliser un stockage de l'énergie, cette fois-ci, via des batteries. L'énergie stockée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau [1]

1.2.1 Pompage « au fil de soleil » :

Comme on va le constater, la méthode de pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système utilisant des batteries pour stocker de l'énergie d'abord. Le principe de fonctionnement de cette méthode d'une telle installation reste relativement simplifiée avec des panneaux photovoltaïques alimentant une pompe (de surface ou immergée) 12 ou 14 Vdc (courant continu) assistée par un régulateur contrôleur qui approvisionne l'eau lorsque les panneaux sont exposés au soleil. C'est l'eau elle-même qui est pompée et stockée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement. On parle alors d'un stockage hydraulique.

1.2.2 Pompage avec batteries :

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie

emmagasinée pour être utilisée pour d'autres besoins ultérieurs. L'inconvénient majeur, voire handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être chargées. Elles nécessitent, en outre un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Donc c'est cette technique qui donne une faible fiabilité et une perte de rendement.

1.3 Les composants d'un système de pompage PV :

Les systèmes de pompe à eau solaire comprennent généralement de [2] :

- Le générateur photovoltaïque
- Le groupe électropompe
- L'électronique de commande et de contrôle
- La partie stockage

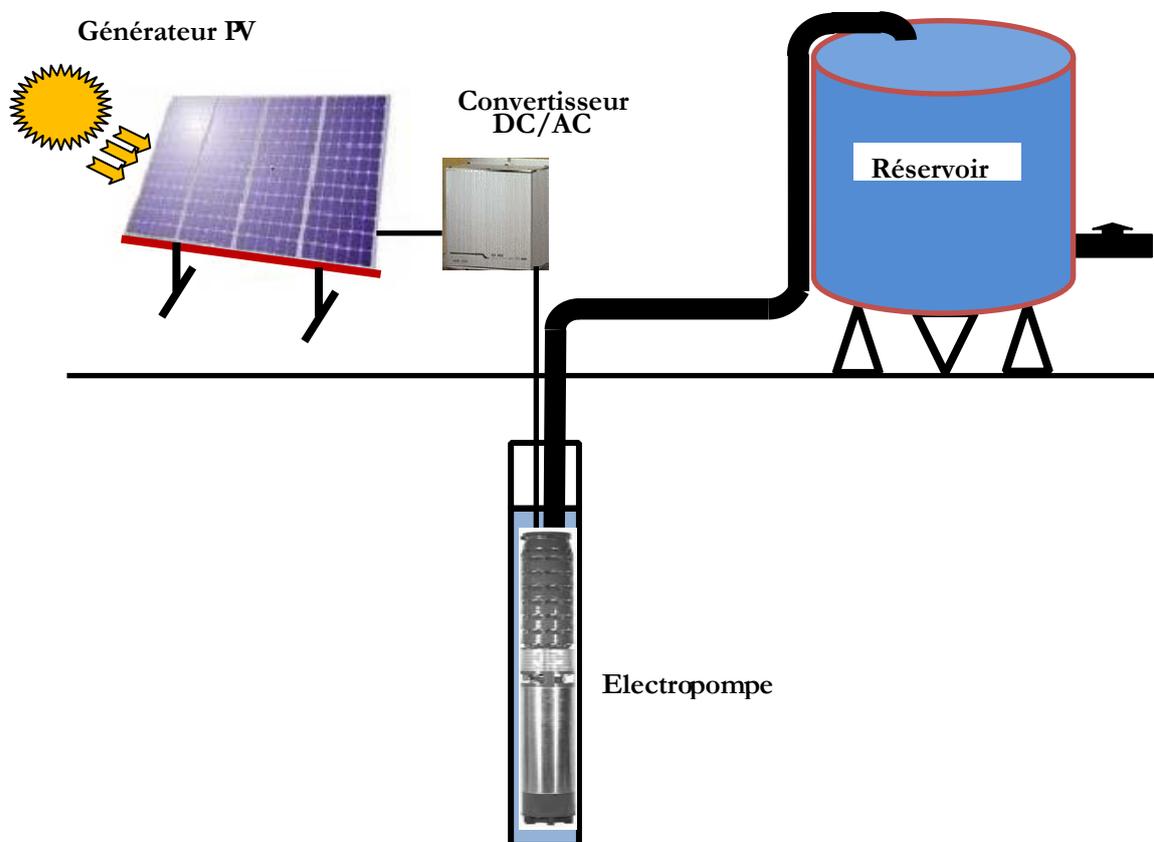


Figure 1. 1: Schéma synoptique simplifié de pompage PV

1.3.1 Générateur Photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est un système complet qui garantit la production et la gestion de l'alimentation électrique des capteurs photovoltaïques. Selon le type d'application, l'énergie est stockée dans des batteries et/ou convertie en courant alternatif.

Les applications de ce type de générateur sont nombreuses, notamment dans les endroits reculés (cabanes, petites stations de télécommunication, stations topographiques, panneaux de signalisation...) ou les mobil-homes (bateaux de croisière, caravanes...). Les applications typiques pour les passionnés de radio sont les relais, les balises et le trafic portable. Lorsqu'il conduisait l'ordinateur portable au sommet de la montagne, il le prenait pour charger la batterie ; il le fixait au sac à dos lorsqu'il marchait, ou le mettait lorsqu'il arrêtait la voiture. Sur une pierre. La puissance instantanée (quelques watts) est trop faible pour alimenter l'émetteur lors des pics de modulation, mais elle est suffisante pour charger la batterie pendant l'écoute ou lorsque la station est à l'arrêt [3].

1.3.2 Les groupe électropompe :

1.3.2.1 Les pompes :

Une pompe est un appareil utilisé pour aspirer et transporter un fluide. Il existe deux principaux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques. Ce dernier est adapté pour élever un faible débit d'eau à une pression élevée [4].

1.3.2.1.1 La pompe centrifuge :

La pompe centrifuge transfère l'énergie cinétique du moteur au fluide par le mouvement de rotation de la roue ou des aubes. L'eau entrant au centre de la pompe sera poussée vers l'extérieur et vers le haut par la force centrifuge des pales.

1.3.2.1.1.1 Caractéristique d'une pompe centrifuge :

- Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans les applications d'énergie photovoltaïque car les couple d'entraînement de la pompe est presque nul au démarrage
- La pompe fonctionne à très faible ensoleillement et le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante
- Utiliser pour des débits importants.

1.3.2.1.2 La pompe volumétrique :

La pompe volumétrique transfère l'énergie cinétique du moteur de manière alternative, de sorte que le fluide surmonte la gravité grâce au changement continu du volume connecté alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Les pompes volumétriques ont toujours une partie mobile dans la creuse, qui déplace le liquide en modifiant le volume contenu dans la partie creuse.

Le principal avantage des pompes volumétriques est qu'elles peuvent fournir des fluides à des pressions très élevées. Ils ne conviennent qu'aux faibles débits, ce qui les rend très limités dans l'arrosage des cultures.

1.3.2.1.2.1 Caractéristique d'une pompe volumétrique :

Le couple de démarrage est pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la H (3 à 5 fois le couple nominale). La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau inférieure à 5

1.3.2.2 Les moteurs électriques :

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des machines électriques fonctionnent grâce au magnétisme, il existe deux types de moteurs : à courants continus et alternatif [5].

1.3.2.2.1 Moteur à courant continu avec balais :

Le moteur à courant continu utilisé pour les applications pompe à eau solaire est un moteur en série, qui a un couple de démarrage suffisant pour surmonter la résistance de démarrage de la pompe à eau et répond bien aux courants variables. Le couplage est direct ou avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par rapport cyclique (Figure 1.2). Le dispositif ainsi défini nécessite un équipement électronique relativement simple, mais présente l'inconvénient d'un moteur à courant continu qui nécessite un entretien régulier. La brosse doit être remplacée régulièrement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des motopompes submersibles, où la pompe doit être retirée du forage pour remplacer les balais. Il est surtout utilisé pour le pompage de l'eau dans des puits ouverts.

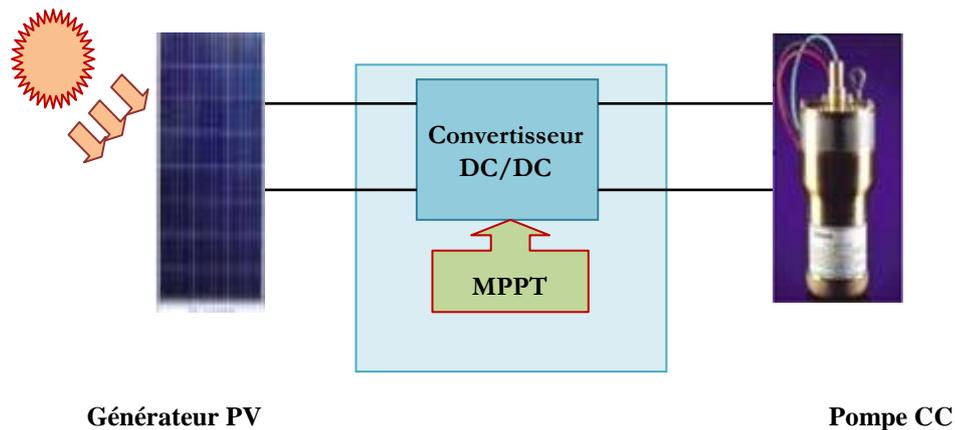


Figure 1. 2: Diagramme du pompage PV par motopompe à CC

1.3.2.2.2 Moteur à courant continu, sans balais (Brushless) :

Ce type de moteur a non seulement les avantages d'un moteur à courant continu, mais a également les avantages d'un moteur à courant alternatif : couple de démarrage important et longue durée de vie (car il n'y a ni roulements ni balais), mais son utilisation à faible puissance est encore limitée.

1.3.2.2.3 Moteur à courant alternatif :

Les moteurs alternatifs sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire.

1.3.3 L'électronique de commande et de contrôle :

➤ Le convertisseur DC/DC (hacheur) :

La fonction principale de l'onduleur est de convertir le courant continu généré par le panneau solaire en courant alternatif triphasé pour faire fonctionner le groupe moteur de la pompe à eau. L'onduleur fonctionne évidemment avec le circuit qui génère le signal PWM, qui est contrôlé par le circuit de régulation et de protection. Le convertisseur DC/AC assure une transmission optimale de la puissance de générateur solaire au bloc moteur de la pompe et protège la pompe du ralenti lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits.

L'efficacité de l'onduleur est généralement élevée pour utiliser pleinement l'énergie produite par le générateur. Elle est d'environ 95% au point de fonctionnement nominal.

➤ Le convertisseur DC/AC (onduleur) :

La fonction principale de l'onduleur est de convertir le courant continu généré par le panneau solaire en courant alternatif triphasé pour faire fonctionner le groupe moteur de la pompe à eau. L'onduleur fonctionne évidemment avec le circuit qui génère le signal PWM, qui est contrôlé par le circuit de régulation et de protection. Le convertisseur DC/AC assure une transmission optimale de la puissance du générateur solaire au bloc moteur de la pompe et protège la pompe du ralenti lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits. Utiliser pleinement l'énergie produite par le générateur. Elle est d'environ 95% au point de fonctionnement nominal.

1.3.4 La partie stockage :

Le stockage d'énergie peut être réalisé de deux manières : le stockage d'énergie électrique ou le stockage d'eau. Cette dernière méthode est généralement utilisée car il est plus pratique de stocker de l'eau dans un réservoir que de stocker de l'énergie électrique dans une batterie lourde, coûteuse et fragile. De plus, le système de stockage de batterie entraînera des coûts supplémentaires, des problèmes de maintenance de la batterie et l'obligation de remplacer la batterie après 3 à 5 ans d'utilisation. De plus, l'efficacité énergétique est meilleure lorsqu'il n'y a pas de batteries. Les réservoirs peuvent généralement être construits localement, et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne nécessite pas d'entretien compliqué et est facile à réparer sur place.

1.4 Dimensionnement complet de l'installation :

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire
- Détermination de l'énergie solaire
- Choix des composants.

1.5 Taille du générateur photovoltaïque :

Il existe deux méthodes pour déterminer la taille des systèmes de pompage photovoltaïque : les méthodes analytiques et les méthodes graphiques. Ces méthodes permettent de déterminer la taille des unités de pompage photovoltaïque pour répondre à des besoins en eau clairement définis.

1.5.1 Méthode analytique :

Une fois connus le volume journalier Q m/jour, la hauteur manométrique totale H et l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan du générateur, la puissance nominale correspondante du générateur photovoltaïque P est calculé par l'expression suivante [6] :

La puissance fournie par le générateur PV dans les conditions standards de mesure CSM, (éclairage de 1000w/m et la température 25°C).

$$P = \eta \cdot A \cdot G \quad 1.1$$

Avec :

P : la puissance de sortie du générateur (w sous CSM (puissance crête)).

η : le rendement du générateur à la température de référence.

A : la surface active du générateur (m).

G : l'éclairement dans les conditions CSM.

L'énergie électrique journalière est donné par l'équation :

$$E = \eta \cdot A \cdot G \quad 1.2$$

Où :

η : le rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation.

G : l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison.

1.5.2 Méthode graphique :

Le calcul de la puissance du générateur photovoltaïque peut être effectuée de deux manières : soit par des expressions analytiques comme celle donnée ci-dessus, ou bien en utilisant les

abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur qui donne en fonction de l'irradiation globale la puissance nécessaire développée P par les panneaux pour faire fonctionner la pompe dans cette gamme de débit, et de HMT. Ces dernières sont assez pratiques (voir Figure 1.3) et résument les performances des différentes pompes en fonction des conditions de leur utilisation [7].

1.5.3 Les abaques :

Ce sont des diagrammes à lecture directe qui facilitent les calculs numériques. Un graphique utilisé pour déterminer spontanément les résultats obtenus par calcul dans un système de lignes prédéfini et préparé. Le graphique est lu directement sans effectuer de dessin supplémentaire. En lisant les points de concomitance liés aux besoins du locuteur, les données situées à l'intersection des droites correspondantes sont directement lues.

Les constructeurs d'équipement élaborent de tels diagrammes sur la base des données calculées ou mesurées. Ce genre de graphes donne la configuration possible d'une électropompe. A titre d'exemple, la figure 1.3 montre les caractéristiques de l'électropompe SP14A-3 donné par le constructeur GRANDFOS.

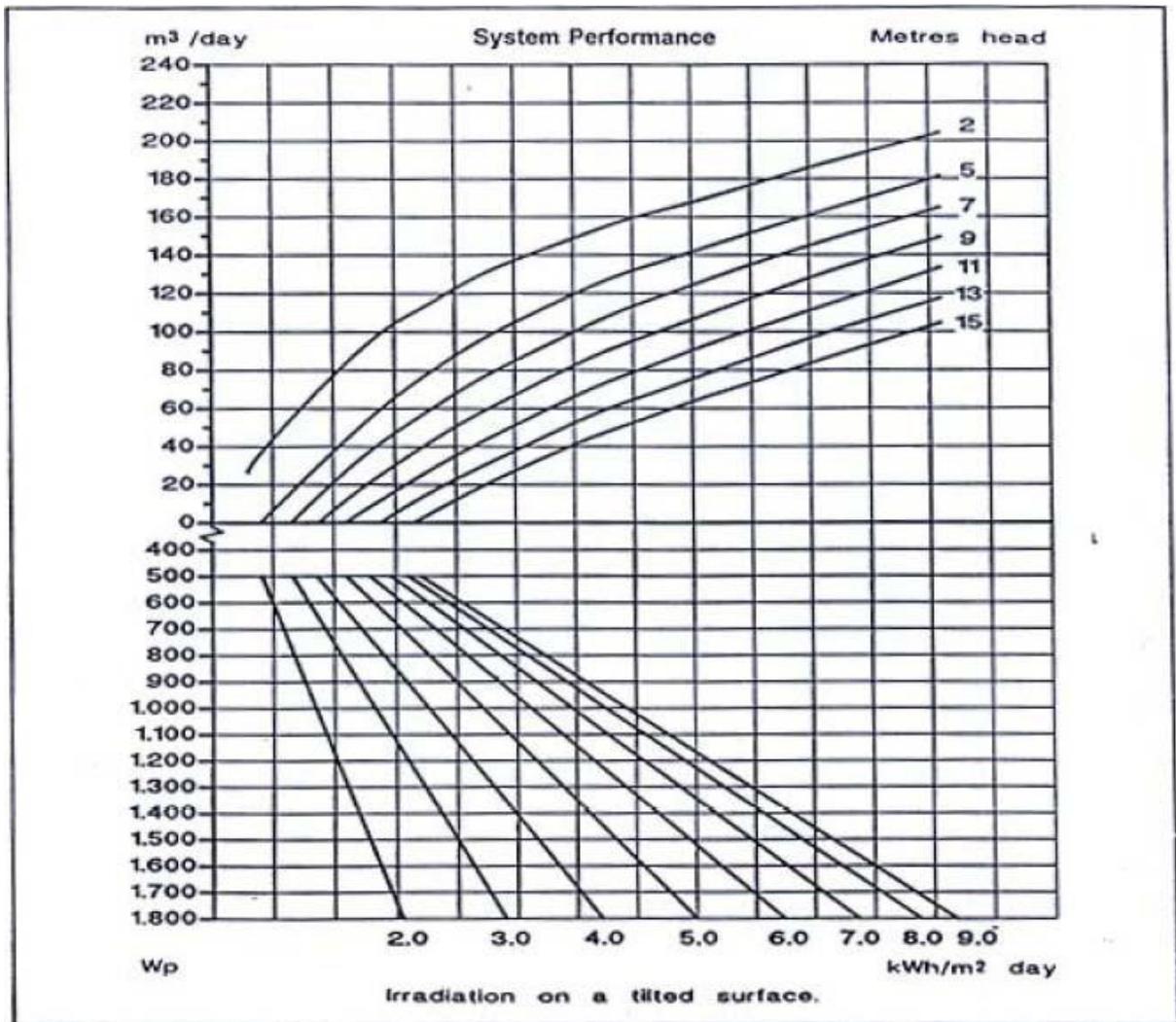


Figure 1. 3: courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation

1.6 Dimensionnement des stations de pompage solaire :

Pour définir la puissance utile au fonctionnement des pompes développées par panneaux solaires, les données minimales sont :

- La situation géographique pour déterminer l'irradiation solaire globale.
- Le débit pour déterminer les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- La hauteur manométrique totale pour mesurer le niveau statique, le rabattement maximal, la hauteur de réservoir et les pertes de charge dues à la tuyauterie.

On procédera comme suit :

1. Définir l'irradiation globale journalière mensuelle en // par rapport à la latitude de la zone de travail.
2. Choisir une pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale.
3. Choisir l'onduleur adapté à la pompe (tension et puissance).
4. Déterminer la puissance de crête P requise pour le fonctionnement de la pompe à l'aide d'analyses ou de méthodes graphiques.
5. Choisir le type de panneaux solaire (définir leur puissance nominale P).
6. Déterminer le nombre de panneaux par relation P/P.
7. Vérifier la tension nominale pour le fonctionnement de l'onduleur (selon les modèles).
8. Déterminer le nombre de module série / parallèle (la forme de connexion).

2 La machine asynchrone

2.1 Introductions :

Le moteur asynchrone présente de nombreux avantages par rapport au moteur à courant continu. L'absence du système balais collecteur permet d'accroître sa fiabilité, et de limiter son coût de fabrication et d'entretien. Par ailleurs, les progrès réalisés en matière de commande et les développements technologiques, tant dans le domaine de l'électronique de puissance que celui de la microélectronique, ont rendu possible l'usage de commandes performantes faisant du moteur asynchrone un concurrent potentiel dans les domaines de la vitesse variable [8].

2.2 Définition :

Un moteur asynchrone est un moteur bipolaire, alimenté par un réseau alternatif de fréquence f, et ne tourne pas avec précision à la vitesse synchrone N définie par la formule suivante :

$$N = f / p = \omega / 2\pi p \quad \text{t/s} \quad (1.3)$$

Le moteur asynchrone est constitué d'un stator connecté à une alimentation triphasée et d'un rotor composé d'enroulements polyphasés court-circuités.

Le stator crée un flux tournant à la vitesse angulaire synchrone :

$$\Omega = \omega/p \quad (1.4)$$

Ce flux magnétique rotatif balais les enroulements du rotor et y induit un courant. L'interaction entre le flux statorique et le courant rotorique induit produit le couple de rotation du rotor. Si le rotor tourne à la même vitesse que le flux magnétique tournant, le flux magnétique traversant l'enroulement du rotor ne changera plus, et il n'y aura plus de courant induit dans le rotor, donc il n'y aura pas de couple.

Le rotor tourne à une vitesse Ω' plus petite que Ω . L'écart entre Ω' et Ω augmente lorsque le couple résistant sur l'arbre du rotor augmente.

On appelle glissement l'écart des vitesses angulaires synchrone Ω et réelle Ω' rapporté à la vitesse synchrone Ω :

$$g = (\Omega - \Omega') / \Omega = (\omega - \omega') / \omega = (N - N') / N \quad (1.5)$$

Avec :

$$N = \Omega / 2\pi \quad \text{et} \quad N' = \Omega' / 2\pi \quad (1.6)$$

2.3 Commande des moteurs asynchrones :

2.3.1 Introduction :

On distingue deux types de commandes ; les commandes scalaires et les commandes vectorielles.

La commande scalaire : est basé sur le modèle en régime permanent, elle est simple à implanter avec une dynamique lente. Elle contrôle les grandeurs en amplitude.

La commande vectorielle : basée sur le modelé transitoire, précise et rapide elle permet le contrôle de couple à l'arrêt ; chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP...).

Elle contrôle les grandeurs en amplitude et en phase [9].

2.3.2 Commande scalaire :

Il existe une variété de commandes scalaires selon qu'il s'agisse d'un courant ou d'une tension. Ils dépendent d'abord de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant). Les onduleurs de tension sont maintenant les plus utilisés dans les petites et moyennes puissances, et le plus utilisé est le contrôle V/f.

2.3.2.1 Contrôle en V/f de la machine asynchrone :

Le principe est de garder $V/f = \text{constant}$, c'est-à-dire de garder le flux maximum constant. Le couple est contrôlé par l'effet sur le glissement.

On voit bien que le couple est directement proportionnel au carré du rapport de la tension sur la fréquence statorique.

2.3.2.2 Contrôle scalaire du courant :

La différence par rapport à la commande précédente est qu'un inverseur de courant (interrupteur) est utilisé. Le courant électrique est appliqué directement à chaque phase de la machine. La valeur du courant I_d (courant continu) est égale à une constante, qui est proche de la valeur quadratique moyenne du courant appliqué I_s . Elle est appliquée en utilisant la régulation du pont redresseur commandé.

2.3.3 Commande vectorielle :

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps. Cependant, il ne peut être mis en œuvre et réellement utilisé qu'avec les progrès de la technologie microélectronique. En fait, cela nécessite un calcul de transformation de Parker, une évaluation de fonction trigonométrique, une intégration, des règles... ce qui ne peut se faire en simulation pure. Le contrôle d'un moteur asynchrone doit contrôler le couple, la vitesse et même la position.

2.4 Constitution d'un moteur asynchrone :

Un moteur asynchrone comporte deux parties principales : le stator ou inducteur et le rotor ou induit, séparés par un mince entrefer.

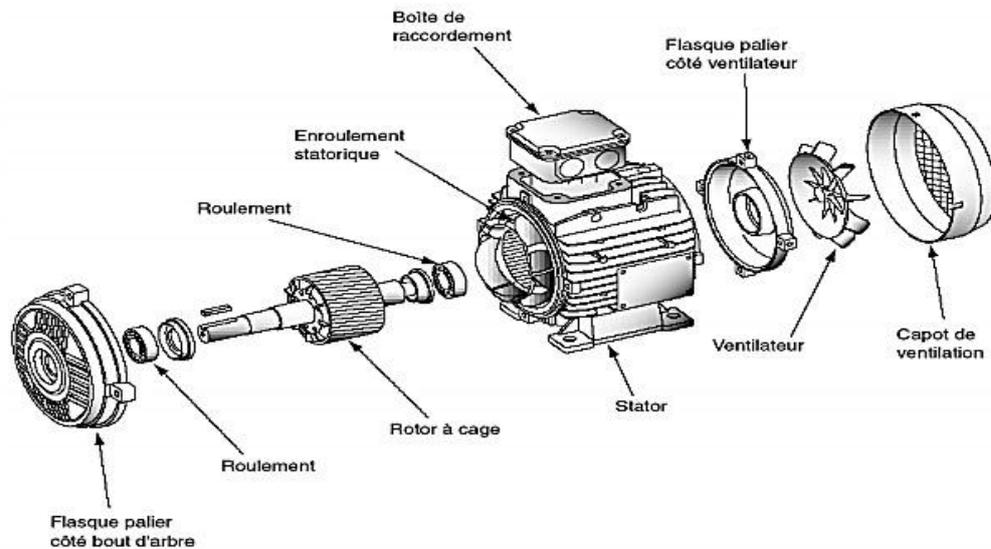


Figure 1. 4: Eclaté d'un moteur asynchrone à cage.

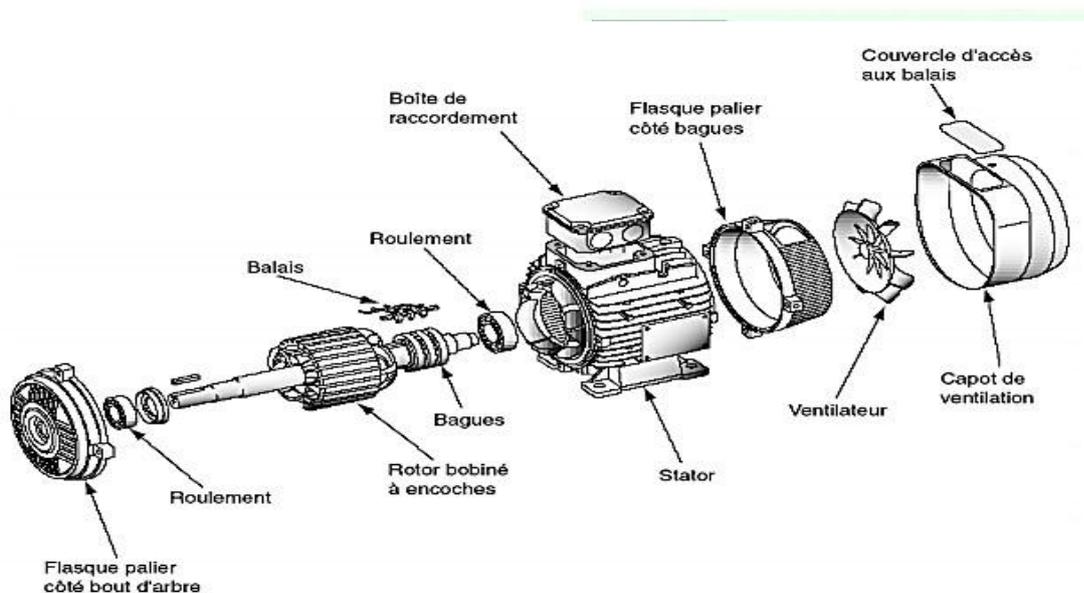


Figure 1. 5: Eclaté d'un moteur asynchrone à bagues.

2.4.1 Stator :

C'est la partie fixe du moteur. Le boîtier en fonte ou en alliage léger renferme une fine plaque (environ 0.5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Ces feuilles sont isolées les unes des autres par oxydation ou vernis isolant. Le laminage du circuit magnétique réduit les pertes causées par les cycles d'hystérésis et les courants de foucault. La plaque mince est pourvue d'une

encoche et l'enroulement du stator pour générer le champ tournant est situé dans bobines. La méthode de couplage de ces bobines détermine le nombre de paires de pôles dans le moteur, qui à son tour détermine la vitesse du champ tournant.

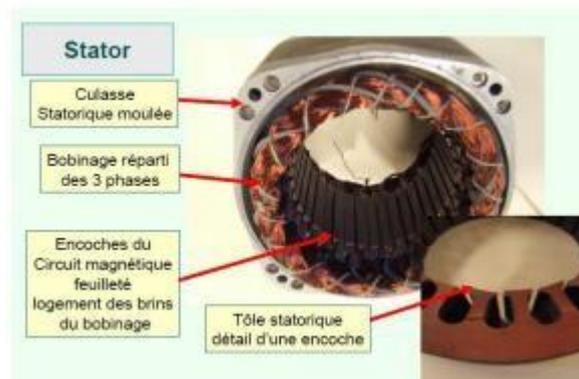


Figure 1. 6: le stator de la machine asynchrone.

2.4.2 Rotor :

C'est la partie mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilement de tôles isolées les unes des autres et forme un cylindre claveté sur l'arbre moteur. Le rotor est composé de conducteurs court-circuités, il n'est donc connecté à aucune source d'alimentation, et il tourne à une vitesse (N) inférieure au champ tournant.

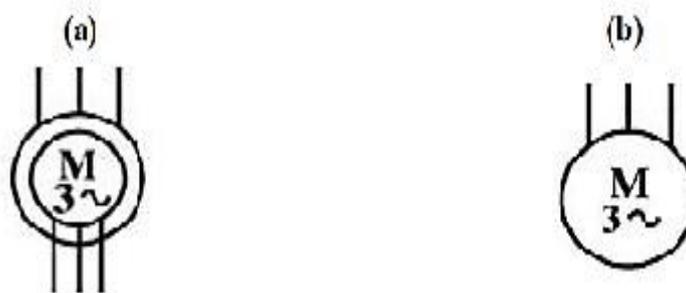


Figure 1. 7: Symboles électrique du moteur asynchrone à rotor bobiné (a) et à cage d'écureuil (b).

3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné deux techniques de pompage PV ont été présentées : pompage au fil de soleil et pompage avec batterie. Nous avons montré l'intérêt du pompage dit « au fil du soleil ». Nous avons également conclu que selon l'état actuel de l'art, le système de pompe photovoltaïque le plus courant consiste en une petite pompe centrifuge avec un moteur à induction triphasé.

Nous avons ainsi sur ce chapitre définir la machine asynchrone, en à traiter les deux commandes de la machine asynchrone : commande scalaire et la commande vectorielle. Et on à parler aussi sur la construction de la machine. Donc on conclure que La machine asynchrone fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications, ceci est dû essentiellement à sa fiabilité, son faible coût et sa simplicité de construction.

Chapitre 2

Onduleur de tension et la commande SHE

1. Onduleur de tension

1.1 Introduction :

Un Convertisseur statique est un système qui adapte une source d'énergie électrique en convertissant l'énergie électrique en un récepteur donné. Le premier convertisseur de puissance est constitué d'un moteur couplé mécaniquement. Avec l'apparition de semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors..., les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques. On distingue plusieurs familles de convertisseurs statique :

Continu / Continu (Hacheur)

Continu / Alternatif (Onduleur)

Alternatif / Alternatif (Gradateur)

Alternatif / Continu (Redresseur)

La conversion continue-alternative est assurée par l'onduleur qui permet d'obtenir une tension alternative à partir d'une source de tension continue.

1.2 Définition :

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergies électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur [10]. Il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie.

L'onduleur solaire se présente sous la forme d'un boîtier métallique muni d'un radiateur ou d'un ventilateur. Il est généralement placé le plus près des modules photovoltaïques pour réduire les pertes d'électricité. L'onduleur a une durée de vie moyenne de 8 à 12 ans. C'est l'un des éléments du panneau photovoltaïque qui nécessite un contrôle régulier pour s'assurer de son bon fonctionnement.

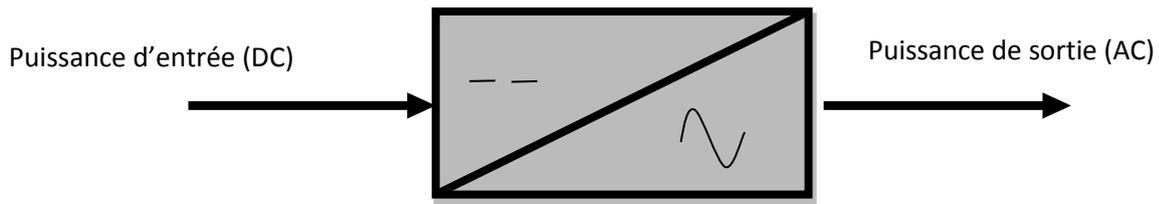


Figure 2. 1: Schéma de principe de l'onduleur

1.3 Classification des onduleurs :

Les onduleurs sont classés en fonction du nombre de phase (monophasé ou triphasé), en fonction de la grandeur (tension ou courant) à transformer et enfin du mode de commutation des semi-conducteurs utilisé.

1.3.1 Selon leur nombre de phase (monophasé ou triphasé) :

1.3.1.1 Onduleur de tension monophasé en demi- pont :

Ce type d'onduleur fournit en sortie une tension alternative monophasée. Il existe deux onduleurs monophasés, selon sa topologie.

La figure suivante (2.2) représente le schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge RL de l'onduleur monophasé en demi – pont :

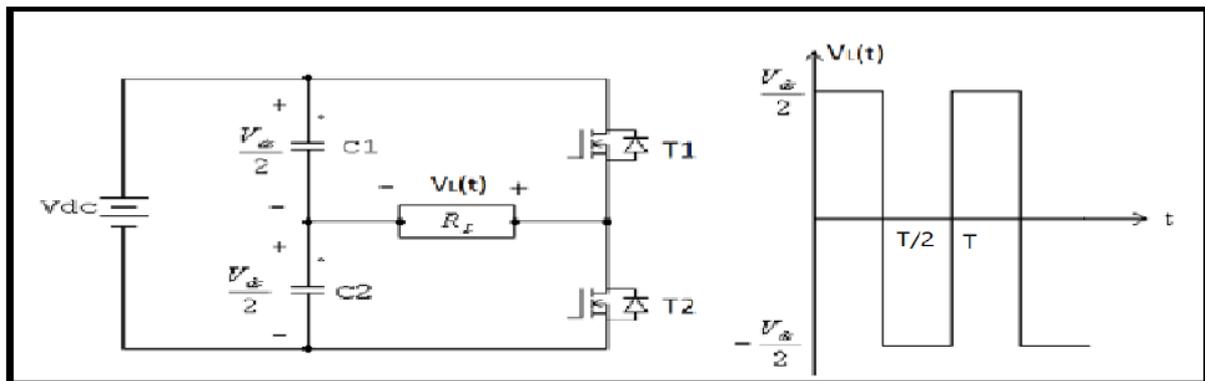


Figure 2. 2: Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi – pont.

L'onduleur monophasé en demi pont est constitué d'un seul bras qui contient deux interrupteurs de puissance noté T1 et T2 à commande complémentaire. Deux diodes montées en antiparallèle sur les interrupteurs permettant à la bobine de restituer l'énergie emmagasinée lors de l'ouverture des interrupteurs.

1.3.1.1.1 Le principe de fonctionnement :

Dans ce circuit l'opération de commutation des interrupteurs T1 et T2 est effectuée de telle sorte que si la première est ouverte l'autre est nécessairement fermé et inversement.

La fermeture des deux interrupteurs T1 et T2 en même temps provoque un court-circuit de la tension d'entrée V_{dc} ce qui résulte en un flux de courant élevé qui est très nocif pour les interrupteurs de puissance. Le tableau (2.1) suivant présente les états de commutations des interrupteurs [10] :

T1	T2	V_L
ON	OFF	$\frac{V_{dc}}{2}$
OFF	ON	$\frac{-V_{dc}}{2}$

Tableau 2. 1: Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en demi pont.

1.3.1.1.2 Avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en demi pont :

Les avantages :

- Offre une structure simple et économique avec seulement deux interrupteurs commandés et deux diodes [11].
- Un seul interrupteur passant à chaque instant donc une chute de tension réduite.

Les inconvénients :

- La tension de blocage des interrupteurs est égale à deux fois la tension maximale aux bornes de charge.
- Les réglages de la puissance en peuvent se faire que par la modulation à largeur d'impulsion.
- La durée de chaque créneau doit être grande devant les temps de commutation.

1.3.1.2 Onduleur de tension monophasé en pont H :

La figure (2.3) représente un onduleur monophasé en pont H et sa forme de tension de sortie aux bornes de la charge RL.

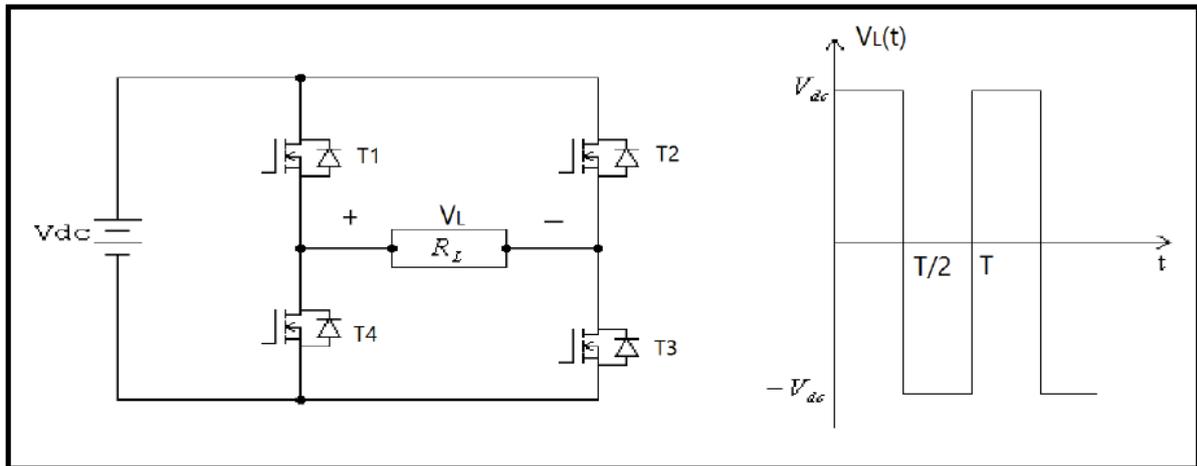


Figure 2. 3: Schéma de principe et la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H.

L'onduleur est composé de deux bras. Chaque bras contient deux interrupteurs. Les diodes sont installées en antiparallèle, et les diodes antiparallèles assurent la réversibilité du courant dans la charge.

A partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet d'avoir une tension de sortie plus proche d'une onde sinusoïdale.

1.3.1.2.1 Principe de fonctionnement :

La commande de l'onduleur monophasé en pont H est établie comme suit :

Quand les interrupteurs T1 et T3 sont fermés pendant la première demi période, les interrupteurs T2 et T4 sont ouverts. A ce moment la tension de sortie aux bornes de la charge égale à V_{dc} .

Quand les interrupteurs T2 et T4 sont fermés pendant le reste de la période, les interrupteurs T1 et T3 sont ouverts, la tension de sortie aux bornes de la charge devient $-V_{dc}$.

Pour éviter le problème de court-circuit de la tension d'entrée, un temps mort est respecté entre deux commutations [12].

Le tableau (2.2) ci-dessous représente l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé à pont [10] :

T1	T2	T3	T4	$V_L(t)$
ON	OFF	ON	OFF	Vdc
OFF	ON	OFF	ON	-Vdc
ON	OFF	OFF	ON	0
OFF	ON	ON	OFF	0

Tableau 2. 2: Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en pont H.

1.3.1.2.2 Les avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en pont H :

Les avantages :

- La tension de blocage de chaque interrupteur est égale à la tension maximale aux bornes de la charge [11].
- La commande à décalage permet de régler la puissance fournie sans augmenter la fréquence de commutation [11].
- Simplicité et rapidité du montage.

Les inconvénients :

- L'obtention d'une tension non sinusoïdale à la sortie ce qui provoque une dégradation du régime de fonctionnement [11].
- Influence des interrupteurs sur la tension de sortie.
- Spécification des secteurs dans ce type d'onduleur.

1.3.1.3 Onduleur de tension triphasé :

L'onduleur triphasé à deux niveaux est généralement utilisé pour les applications de moyennes puissances, la structure de cet onduleur peut être obtenue par la mise en parallèle de trois onduleurs monophasés en demi pont comme représenté à la figure (2.4). Chaque bras contient deux interrupteurs complémentaires en commande pour que la tension d'entrée ne soit jamais en court-circuit. Ce type d'onduleur est très utilisé avec la MLI pour l'alimentation

des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variable, chacune des trois tensions de sortie est décalées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre. [11]

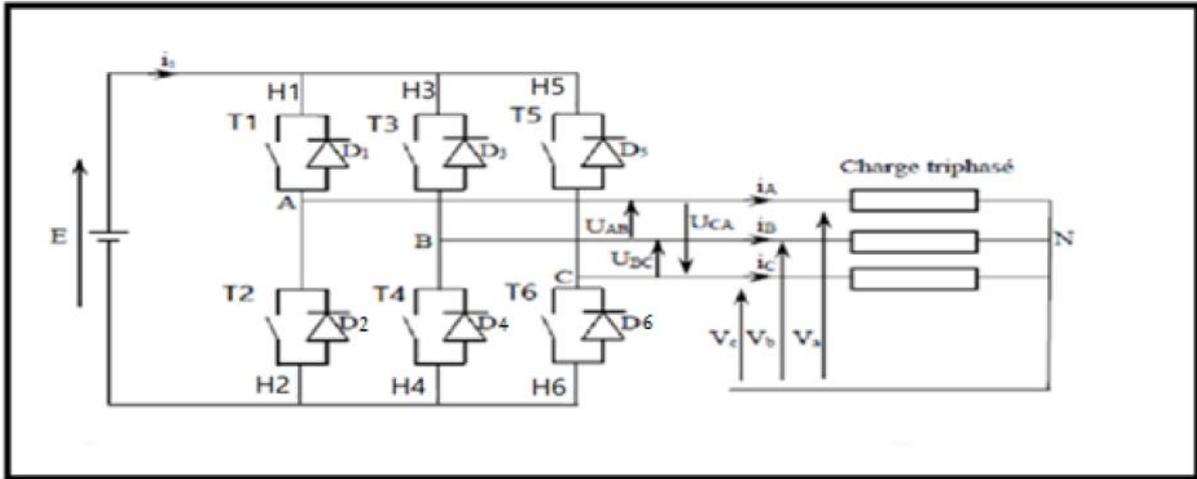


Figure 2. 4: Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Les caractéristiques de l'onduleur sont principalement définies par ces composants de puissance. Ceux-ci déterminent la puissance, la tension et le courant maximum commutés, aussi, la fréquence maximale de commutation et le temps mort. Ces deux dernières caractéristiques sont très importantes car elles vont influencer la conception.

La fréquence maximale de commutations est déterminée par les temps de commutations (temps d'ouverture et de fermeture des interrupteurs), et par le temps mort qui sert à prévenir les risques de courts circuits sur un bras entre l'ouverture d'interrupteur et la fermeture de son complémentaire [11].

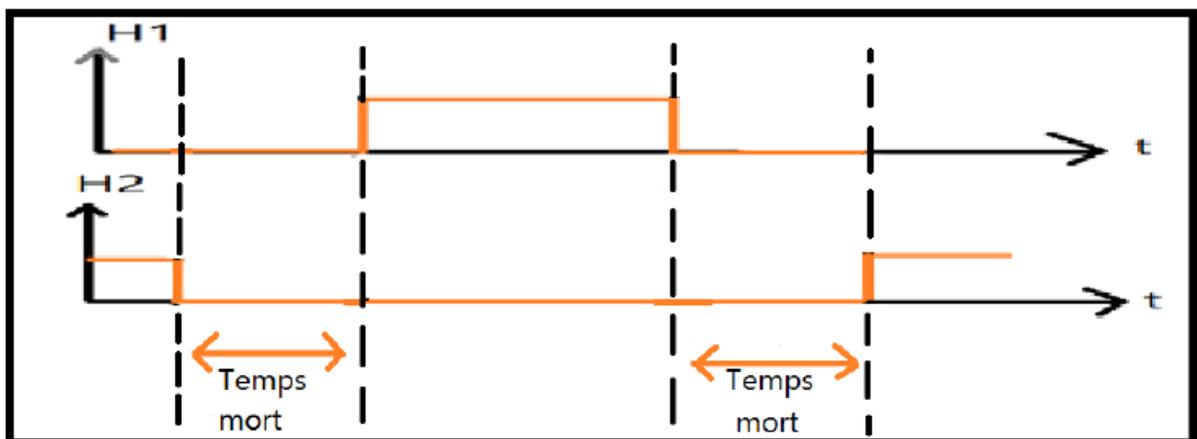


Figure 2. 5: représentation d'une période de commutation avec temps mort.

1.3.2 Selon la nature de la grandeur (tension ou courant) à transformer :

1.3.2.1 Les onduleurs de tension :

Les onduleurs de tension reliant une source de tension continue de faible impédance à une source de courant alternative utilisent des interrupteurs électroniques réversibles en courant. Ils fournissent une tension de sortie de fréquence fixe ou variable selon les besoins du système. La tension de sortie ne dépend pas de la charge contrairement au courant de sortie qui lui en dépend. Les onduleurs de tension sont généralement utilisés dans le domaine industriel pour la commande des moteurs de moyenne et grandes puissances [13].

1.3.2.2 Les onduleurs de courant :

L'onduleur de courant est placé entre une source de courant continue et une source de tension alternative. Ce type d'onduleur utilise des semi-conducteurs de puissance unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension. Il fournit à sa sortie un courant de valeur efficace réglable qui est indépendant de la charge contrairement à la tension de sortie qui en dépend quant à elle. Les onduleurs de courant sont surtout utilisés dans les entraînements à vitesse variable de moteur à courant alternatif [13].

1.3.3 Selon le mode de commutation de leurs interrupteurs :

1.3.3.1 Les onduleurs autonomes :

Les onduleurs autonomes sont constitués d'interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture et dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. Dans ce cas, on peut commander la fréquence de la tension de sortie de l'onduleurs [14].

1.3.3.2 Les onduleurs non autonomes :

Les onduleurs non autonomes sont constitués de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est dite « naturelle » contrairement à l'onduleur autonome.

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour les moteurs synchrones de très forte puissance, de l'ordre des mégawatts [14].

2. La commande SHE PWM :

2.1 Introduction :

Le principe de la technologie de modulation d'élimination d'harmonique SHE PWM a été proposé pour la première fois par Turnbull en 1964, puis a développé par Patel et Hoft.

La technique consiste à former une série d'ondes de sorties à largeur variable et à sillons contrôlables. Déterminez l'angle de commutation pour éliminer certaines harmoniques parasites dans l'onde de sortie. Par conséquent, l'efficacité du système de machine à onduleur est améliorée en réduisant l'onduleur de couple et les pics et pertes de courant dans la machine [15-16].

2.2 Les techniques de PWM :

Il existe plusieurs techniques PWM. Une brève description de l'ensemble de ces techniques est résumée dans les paragraphes suivants :

2.2.1 PWM engendrée :

Parmi les variantes de la modulation PWM engendrée, la plus populaire étant la modulation sinusoïdale "Modulation sinus-triangle SPWM (Sinusoïdal PWM)".

Cette technique consiste à comparer une tension de référence de fréquence F_r , image du signal souhaité à la sortie, appelée modulante, avec une porteuse triangulaire ou en dent de scie de fréquence F_p . Les points d'intersection entre la modulante et la porteuse correspondent aux instants de commutation au moment desquels l'onduleur change d'état.

2.2.2 MLI Vectorielle :

La modulation vectorielle SVM (Space Vector Modulation) est une technique numérique. Les ordres de commutations des interrupteurs sont déterminés par un algorithme et sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques avec un vecteur de tension de contrôle qui est calculé globalement et approximé sur une période de modulation, par un vecteur de tension moyen, puis les ordres de commandes adéquats sont appliqués aux interrupteurs.

2.2.3 MLI calculée (programmée) :

Cette technique consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs (séquences de fonctionnement) de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur. Ces séquences de fonctionnement sont en général mémorisées et restituées cycliquement pour assurer la commande des interrupteurs. Les critères usuellement retenus sont : l'élimination d'harmoniques de rangs spécifiés ou l'élimination d'harmoniques dans une bande de fréquences spécifiée.

2.3 Principe de la commande SHE PWM :

La technique SHE PWM est basée sur l'algorithme de Patel et Hoft. Dans cette technique, il est possible d'asservir le fondamental de la tension et d'annuler les amplitudes des $(m-1)$ premiers harmoniques.

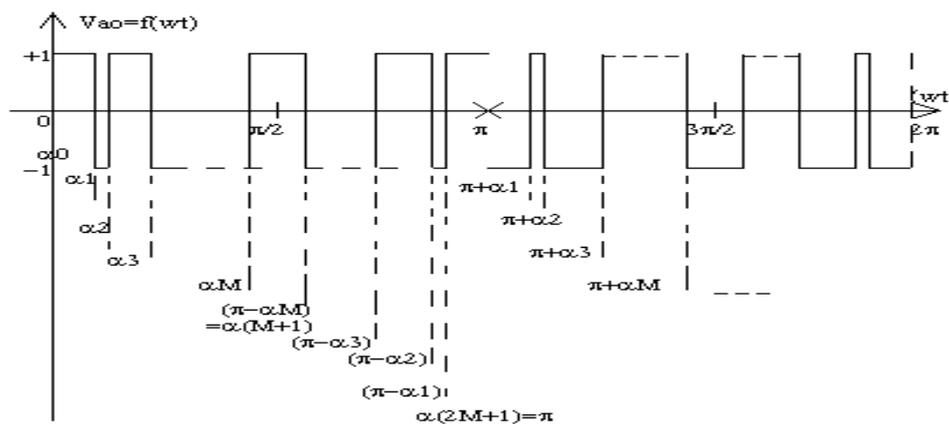


Figure 2. 6: La tension normalisée de sortie de l'onduleur.

La figure (2.6) correspond aux instants de commutation de la tension d'une valeur positive $+E/2$ à une valeur négative $-E/2$ ou inversement. L'indice m est le nombre d'angles de commutation de la tension de sortie de l'onduleur. La tension de sortie de l'onduleur est construite de façon à présenter une symétrie demi-onde (fonction impaire par rapport à l'angle α). Cette symétrie permet de supprimer certains types d'harmoniques, ce qui simplifie le développement en série de Fourier de cette tension et réduit le taux d'harmoniques. Ensuite, on fixe l'amplitude du fondamental à la valeur I_m et on annule les amplitudes des $(m-1)$ premiers harmoniques.

Les coefficients a_n et b_n sont données par :

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) d\alpha \\
 a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) \sin(n\alpha) d\alpha \quad n=1,2,3,4\dots \\
 b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) \cos(n\alpha) d\alpha
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

D'autre part comme $f(\alpha)$ présente une symétrie demi onde : $f(\alpha + \pi) = -f(\alpha)$

La valeur moyenne a_0 est nulle et seulement les harmoniques impaires existent. Par conséquent, l'indice n prend les valeurs impaires 1,3,5,7,9, ...

Les coefficients a_n et b_n sont alors donnés par :

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 0 \\
 a_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi f(\alpha) \sin(n\alpha) d\alpha \\
 b_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi f(\alpha) \cos(n\alpha) d\alpha
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Remplaçons $f(\alpha)$ par sa valeur dans l'équations (2.2) :

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^\pi (-1)^0 \sin(n\alpha) d\alpha \right] + \dots \\
 &\dots + \frac{2}{\pi} \left[\int_{2M}^{(2M+1)\pi} (-1) \sin(n\alpha) d\alpha \right] \\
 a_n &= \frac{2}{\pi} \left[\sum_{k=0}^{2M} \int_{\alpha_k}^{(k+1)\pi} (-1)^k \sin(n\alpha) d\alpha \right] \quad n=1,3,5, \dots \\
 a_n &= \frac{2}{n\pi} \left[\sum_{k=0}^{2M} (-1)^k (\cos(n\alpha_k) - \cos(n\alpha_{k+1})) \right]
 \end{aligned}$$

Avec : $\alpha_{2M+1} = \pi$ et $\alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{2M+1}$

$$a_n = \frac{2}{n\pi} \left[\cos(n\alpha_0) - \cos(n\alpha_{2M+1}) + 2 \sum_{k=0}^{2M} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]$$

Comme :

$$\alpha_0 = 0$$

$$\alpha_{2M+1} = \pi$$

On déduit :

$$\cos(n\alpha_0) = 1$$

$$\cos(n\alpha_{2M+1}) = (-1)^n$$

D'où :

$$a_n = \frac{2}{n\pi} \left[1 - (-1)^n + 2 \sum_{k=0}^{2M} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]$$

De même pour le coefficient b_n , on trouve, après simplifications, le résultat suivant :

$$b_n = \frac{-4}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \sin(n\alpha_k) \right]$$

Comme n doit être impair ou peut écrire :

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + \sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right] \quad n \text{ impair} \quad (2.3a)$$

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[- \sum_{k=0}^{2M} (-1)^k \sin(n\alpha_k) \right] \quad n \text{ impair} \quad (2.3b)$$

D'autre part la forme d'onde $f(\omega t) = V_{a0}(t)$ présente une symétrie quart-d'onde i.e. :

$$f(\alpha) = f(\pi - \alpha)$$

Et d'après (2.6) on a :

$$\alpha_k = \pi - \alpha_{2M-K+1} \quad K=1, 2, \dots, M$$

D'où :

$$\sin(n\alpha_k) = \sin(n(\pi - \alpha_{2M-K+1}))$$

$$\sin(n\alpha_k) = \sin(n\pi)\cos(n\alpha_{2M-K+1}) - \cos(n\pi)\sin(n\alpha_{2M-K+1})$$

Pour n impair on a:

$$\sin(n\pi) = 0 \quad \cos(n\pi) = -1$$

D'où :

$$\sin(n\alpha_k) = \sin(n\alpha_{2M-K+1}) \quad K=1, 2, \dots, M \quad (2.4)$$

Donc :

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^M (\sin(n\alpha_k) - \sin(n\alpha_{2M-k+1})) = 0$$

D'autre part :

$$\cos(n\alpha_k) = \cos(n(\pi - \alpha_{2M-k+1}))$$

$$\cos(n\alpha_k) = \cos(n\pi)\cos(n\alpha_{2M-k+1}) + \sin(n\pi)\sin(n\alpha_{2M-k+1})$$

D'où :

$$\cos(n\alpha_k) = -\cos(n\alpha_{2M-k+1}) \quad (2.5)$$

Donc, remplaçons (2.5) dans (2.3a) :

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right] \quad (2.6)$$

Avec n impair et différent d'un multiple de 3.

On considère une alimentation unité, i.e. $E_d/2=1$.

Le coefficient a_n est l'amplitude de l'harmonique de rang n de signal suivant :

$$v_a(t) = f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) \quad (2.7)$$

Le système d'équation possède m variables inconnues $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_m$ appelées angles de commutation exactes. Le problème est de calculer les valeurs de celles-ci qui permettant :

D'annuler les amplitudes a_n des $(m-1)$ premiers harmoniques f_n :

$$f_n(\omega t) = a_n \sin(n\omega t)$$

D'assigner une valeur déterminée au fondamental f_1 :

$$f_1(\omega t) = a_1 \sin(\omega t)$$

2.4 Calcul des valeurs exactes des angles de commutation par la méthode de NEWTON-RAPHSON :

2.4.1 Description :

Le relation (2.6) est un système de m équation non linéaires à m inconnues $\alpha_1 \dots \alpha_m$.

On assigne une valeur déterminée i_m , appelée indice de modulation, à l'amplitude a_1 du fondamental et on annule les amplitudes a_n des $(m-1)$ premiers harmoniques.

On résout ce système par la méthode itérative de Newton-Raphson. Celle-ci converge bien (quadratiquement) si l'on possède un bon estimé initial de la solution. Cet estimé peut être obtenu par la méthode du gradient. Mais, celle-ci étant lente (convergence linéaire) [17].

Pour le montage triphasé, les harmoniques de rang 3 et multiple de 3 sont inopérants.

Pour cette raison les triples ne sont pas éliminés dans cette étude.

D'autre part, il faut éliminer deux harmoniques de tension pour éliminer un harmonique de courant.

Comme l'amplitude du fondamental doit être fixée à une valeur déterminée, ceci fixe la première valeur de m à 3 (m étant le nombre de commutations par quart d'onde ou nombre de découpages par demi-onde). Par conséquent lorsque m augmente successivement par pas égal à 2, le nombre d'harmonique de courant qui seront éliminés n'augmente par pas égal à 1 [18].

Finalement on obtient un système de m équations non linéaires de la forme :

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]$$

Avec $n = 1,5,7,11,13, \dots$ et $m = 1,3,5,7,9,11, \dots$ (m impair).

Par exemple pour m égal à 3, n prend les valeurs 1,5,7, pour m égal à 5, n prend les valeurs 1,5,7, 11,13, pour m égal à 7, n prend les valeurs 1,5,7,11, 13, 17,19...etc

$$a_1 = \frac{4}{n} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(\alpha_k) \right] = -im$$

$$a_5 = \frac{4}{5\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(5\alpha_k) \right] = 0$$

$$a7 = \frac{4}{7\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(7\alpha k) \right] = 0$$

$$a11 = \frac{4}{11\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(11\alpha k) \right] = 0 \quad (2.8)$$

$$a13 = \frac{4}{13\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(13\alpha k) \right] = 0$$

.....

$$an = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n\alpha k) \right] = 0$$

Ces amplitudes sont normalisées i.e la tension d'alimentation continue est supposée égale à unité.

On doit signaler que la valeur de l'indice de modulation im assignée au fondamental est un indice sans dimension variant de 0 à 1. Pour obtenir la valeur correspondante en volt, il faut multiplier im par $Ed/2$, la tension d'alimentation continue de l'onduleur demi pont.

D'autre part la méthode itérative de Newton- Raphson ne converge pas pour une valeur positive de im . C'est pourquoi on assigne une valeur négative ($- im$) au fondamental. Ce qui correspond à un déphasage de π du fondamental. Ce déphasage est sans effet sur le moteur.

En résumé, on a un système de forme générale :

$$f_1(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(\alpha_k) \right] + im = 0$$

$$f_2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{5\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(5\alpha_k) \right] = 0$$

$$f_3(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{7\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(7\alpha_k) \right] = 0 \quad (2.9)$$

.....

$$f_m(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right] = 0$$

Pour résoudre ce système, on va utiliser la méthode itérative de Newton- Raphson. Mais on doit localiser préalablement la solution cherchée.

2.4.2 Résolution du système non linéaire par la Méthode de Newton- Raphson :

Notons :

$$\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_m^*)$$

Le vecteur solution du système non linéaire (2.9) :

$$f_i(\alpha) = 0 \quad i=1, m$$

Avec $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$.

Si chaque fonction f_i est continue et continûment différentiable, alors on peut la développer en série de Taylor dans le voisinage d'un estimé $\alpha^{(k)}$ (obtenu à la 1^{ème} itération) proche de α^* .

On obtient :

$$\begin{aligned} f_i(\alpha^*) &= f_i(\alpha^{(k)} + (\alpha^* - \alpha^{(k)})) \\ &= f_i(\alpha^{(k)}) + \sum_{j=1}^m \left[\frac{\partial f_i(\alpha)}{\partial \alpha_j} \right]_{\alpha=\alpha^{(k)}} (\alpha_j - \alpha_j^{(k)}) + \dots \\ &\dots + \frac{1}{2!} \sum_{j=1}^m \sum_{r=1}^m (\alpha_j^* - \alpha_j^{(k)}) (\alpha_r^* - \alpha_r^{(k)}) \left[\frac{\partial^2 f_i(\alpha)}{\partial \alpha_j \partial \alpha_r} \right]_{\alpha=\alpha^{(k)}} + \dots \dots + \dots = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Pour $i = 1, \dots, m$

Si $\alpha^{(k)}$ est un estimé proche de α^* , les éléments $(\alpha_i^* - \alpha_i^{(k)})^2$ sont négligeables ainsi que les termes de degré supérieur.

Le système (2.10) s'écrit donc :

$$\sum_{j=1}^m \frac{\partial f_i(\alpha)}{\partial \alpha_j} (\alpha_j - \alpha_j^{(k)}) = -f_i(\alpha^{(k)}) \quad (2.11)$$

Avec $i = 1, \dots, m$.

Définissons la matrice des dérivées premières :

$$E^{(k)} = (E_{ij}^{(k)})$$

Avec :

$$E_j^{(k)} = \left[\frac{\partial x_i(\alpha)}{\partial \alpha_j} \right]_{\alpha = \alpha^{(k)}} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, m$$

D'où :

$$E^{(k)} = \frac{8}{\pi} \begin{pmatrix} \sin(\alpha_1) - \sin(\alpha_2) \dots & \sin(\alpha_m) \\ \sin(5\alpha_1) - \sin(5\alpha_2) \dots & \sin(5\alpha_m) \\ \dots & \dots \\ \sin(n\alpha_1) - \sin(n\alpha_2) \dots & \sin(n\alpha_m) \end{pmatrix}$$

Définissons le vecteur erreur :

$$\Delta \alpha^{(k)} = [\Delta \alpha_1^{(k)}, \Delta \alpha_2^{(k)}, \dots, \Delta \alpha_m^{(k)}]^t \quad (2.12)$$

Avec $\Delta \alpha_j^{(k)} = \alpha_j^* - \alpha_j^{(k)}$

Soit le vecteur :

$$F^{(k)} = [F_1^{(k)}, F_2^{(k)}, \dots, F_m^{(k)}]$$

Avec : $F_i^{(k)} = -f_i(\alpha^{(k)})$.

Alors le système (2.12) s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$E^{(k)} \cdot \Delta \alpha^{(k)} = F^{(k)} \quad (2.13)$$

Où $\Delta \alpha^{(k)}$ est le vecteur inconnu.

Une fois le vecteur $\Delta \alpha^{(k)}$ déterminé, on obtient un meilleur estimé $\alpha^{(k+1)}$ de α^* par la relation :

$$\alpha^{(k+1)} = \alpha^{(k)} + \Delta \alpha^{(k)}$$

On continue jusqu'à ce que :

$$|\alpha^* - \alpha^{(k)}| \rightarrow 0$$

En pratique, α^* étant l'inconnue, on arrête les opérations par l'un des tests suivants :

1) $k \geq K_{\max}$

2) $|f_i(\alpha^{(k+1)})| \leq E0$

Où E_0 est une borne supérieure de l'erreur fixée à priori et K_{\max} le nombre maximum d'itérations admissible.

La figure (2.7) donne à titre d'exemple, le graphe des angles de commutations exacts calculés pour m égal à 3.

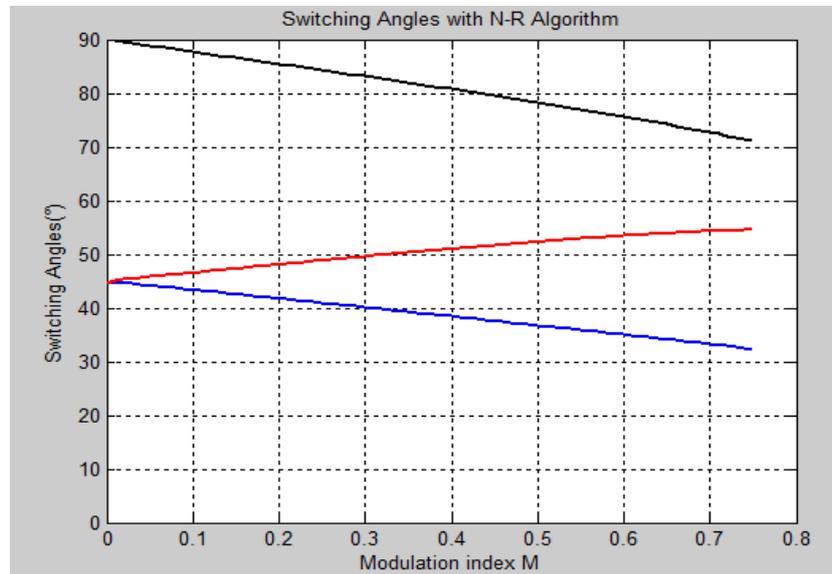


Figure 2. 7: courbes des angles de commutation exact pour m égal à 3.

2.5 La base de données des angles exacts :

Pour construire notre base de données des angles exacts qui sera utilisées dans l'étape d'apprentissage de notre système PSO on fait le choix présenté dans le tableau (2.3) où on augmente le nombre d'angle (nombre d'harmonique éliminés) quand la fréquence diminue.

Indice im	Nombre d'angles m
$0 < im < 0.1$	23
$0.1 < im < 0.2$	19
$0.2 < im < 0.4$	15
$0.4 < im < 0.6$	7
$0.6 < im < 0.8$	5
$0.8 < im < 1$	3

Tableau 2. 3: Nombre d'angle en fonction de im .

3. Conclusion :

Nous avons traité dans ce chapitre, une des systèmes de conversion les plus utilisable dans les machines tournantes : onduleur de tension.

On a défini brièvement l'onduleur de tension, nous avons classifié l'onduleur selon 3 catégories : en fonction du nombre de phase (monophasé ou triphasé), en fonction de la grandeur (tension ou courant) à transformer et selon le mode de commutation de semi-conducteurs utilisé.

On a défini chaque type de fonctionnement de l'onduleur, on a donné le principe de fonctionnement et les avantages et les inconvénients de chaque type.

Nous avons ainsi parler dans ce chapitre sur la commande SHE PWM, on a présenté les techniques de PWM (PWM engendrée, MLI vectorielle et MLI calculée).

La commande SHE PWM basé sur le calcul des valeurs exactes des angles de commutation, lors de l'utilisation de cette technique, exige la résolution de système de m équation non linéaires à m inconnues en temps réel, pour la résolution de système on a utilisé la méthode itérative de Newton Raphson.

Chapitre 3

Optimisation par essaim de particules PSO

1. Introduction :

L'optimisation est le paradigme actuel dans tous les aspects de la vie. Son importance est due à la difficulté du problème d'optimisation d'une part, et au grand nombre d'applications pratiques qui peuvent s'exprimer sous forme de problèmes d'optimisation d'autre part. Bien que les problèmes d'optimisation soient généralement faciles à définir, ils sont souvent difficiles à résoudre. En fait, la plupart de ces problèmes sont des problèmes complexes, aléatoires ou fortement non linéaires, il n'y a donc actuellement aucune solution d'algorithme efficace qui soit efficace pour toutes les données.

Dans ce chapitre, l'accent sera mis sur une méthode d'optimisation intelligente (algorithme) qui est classée comme une méta-heuristique inspirée par des analogies comportementales. Il s'agit de l'algorithme d'optimisation des essaims de particules (PSO). Par la suite, nous nous intéressons particulièrement à l'introduction de différents types d'algorithmes d'optimisation d'essaims de particules et à l'efficacité de l'algorithme dans la résolution de problèmes non linéaires.



Figure 3 1: volée d'oiseaux

2. Définitions :

La bio-inspiration est un changement de paradigme qui amène les ingénieurs à s'inspirer de la nature pour développer de nouveaux systèmes artificiels. Depuis son apparition, l'optimisation par essaim particulaire a gagné la popularité croissante parmi des chercheurs et des praticiens comme une technique robuste et efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles [19].

L'optimisation par essaim de particules a été introduite, en 1995, par Russel Eberhart, ingénieur en électricité, et James Kennedy, socio-psychologue. Cette méthode se base sur la collaboration des individus entre eux : chaque particule est définie par sa position (une solution) et sa vitesse [20]. Dans l'optimisation par PSO, la vitesse de chaque particule est modifiée de manière itérative par sa meilleure position personnelle, et la meilleure position trouvée par les particules dans son voisinage. En conséquence, chaque particule recherche autour d'une région définie par sa meilleure position personnelle et la meilleure position de son voisinage. Désormais, nous utilisons V_i pour désigner la vitesse de la i ème particule dans l'essaim, X_i pour désigner sa position, P_i pour désigner la meilleure position personnelle et P_g pour désigner la meilleure position globale trouvée par les particules dans leurs voisinages.

3. Les différents types du PSO :

3.1 PSO de l'optimum global :

Dans cette version le voisinage pour chaque particule est l'essaim entier. Le réseau social utilisé par ce type d'algorithme est la topologie d'étoile, figure (3.2). Pour la topologie de voisinage d'étoile, le composant social de la mise à jour de vitesse de particules reflète l'information obtenue à partir de toutes les particules dans l'essaim. Dans ce cas-ci, l'information sociale est la meilleure position trouvée par l'essaim, désigné sous le nom de g .

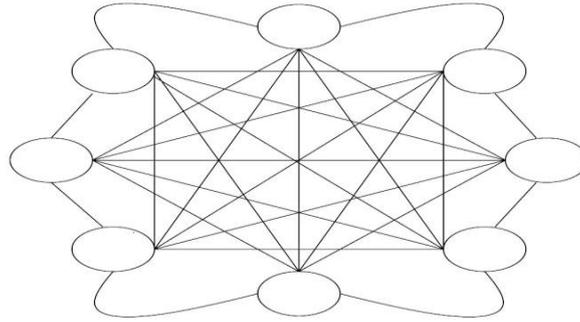


Figure 3 2: L'étoile topologie de voisinage.

3.1.1 Principe de déplacement d'une particule dans PSO de l'optimum global :

L'algorithme PSO dans sa version globale est initialisé par une population de solutions potentielles aléatoires interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche [21]. Toutes les particules étant considérées voisines et chacune d'elle dispose d'une vitesse et une petite mémoire, lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance, en position et en valeur. La performance de chaque particule est mesurée selon une fonction objective prédéfinie relative au problème à résoudre.

La théorie de la socio-psychologie suggère que les individus sont influencés par leur comportement passé et par le succès de leurs voisins dans le réseau social et non pas nécessairement dans l'espace [22]. Dans ce contexte, chaque particule interroge chaque congénère de proximité sur sa meilleure performance. Sur la base des informations dont elle dispose, chaque particule modifie sa vitesse d'une manière stochastique en fonction de sa propre vitesse actuelle, sa meilleure performance et la meilleure performance de ses voisins.

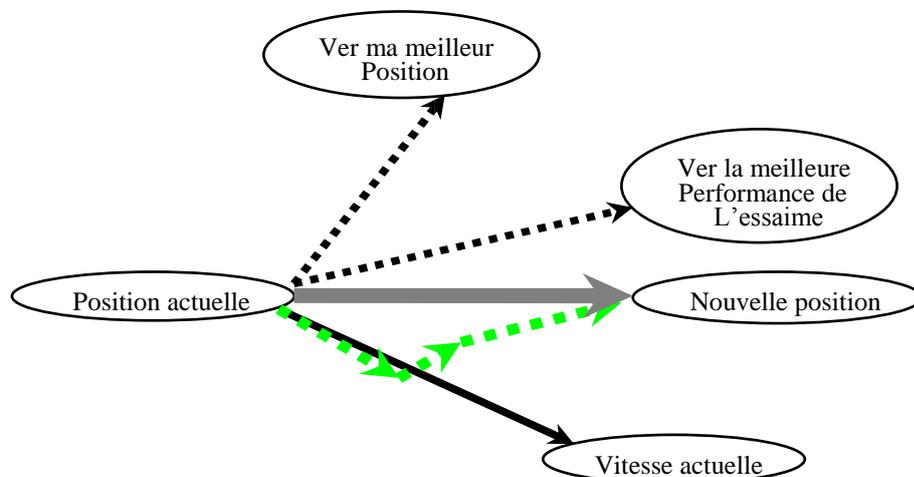


Figure 3 3: principe de déplacement d'une particule dans PSO de l'optimum global.

La figure (3.3) montre que la décision de déplacement d'une particule est basée sur une combinaison linéaire de trois tendances à savoir de suivre sa propre voie, revenir vers sa meilleure performance et aller vers la meilleure performance de ses voisines.

Chaque membre de l'essaim conserve une connaissance partielle de sa meilleure position, et la meilleure position de toutes les particules de l'essaim et ajuste dynamiquement sa propre vitesse en se basant sur ces informations. L'ajustement de vitesse est basé sur les comportements historiques des particules eux-mêmes aussi bien que leurs compagnons. La particule la mieux placée dans une région proche de l'endroit de la nourriture (optimum global) va motiver l'essaim d'explorer de proximité cette région et les régions adjacentes. De cette façon, les particules tendent à se rapprocher davantage de cet optimum d'une étape à l'autre durant le processus de recherche. Dans chaque étape on définit une nouvelle meilleure particule qui, à son tour, va attirer vers elle de l'essaim.

La particule ajuste dynamiquement sa propre vitesse en se basant sur les comportements historiques des particules eux-mêmes aussi bien que leurs compagnons.

La vitesse de chaque particule peut être mise à jour itérativement selon l'équation suivante :

$$v^i(k+1) = wv^i(k) + c_1rand_1(p^i - x^i(k)) + c_2rand_2(g - x^i(k)) \quad (3.1)$$

Où

k : est le nombre d'itération,

w : est le coefficient d'inertie,

$v^i(k)$: est la vitesse courant de la particule i à l'itération k ,

$x^i(k)$: est la position actuelle de la particule i à l'itération k ,

$c_1 c_2$: sont les coefficients d'accélération,

$rand_1, rand_2$: sont des nombres aléatoires de distribution uniforme sur [0.1].

Chaque particule rejoint sa nouvelle position dans l'espace de recherche en utilisant l'équation suivant :

$$x^i(k+1) = x^i(k) + v^i(k+1) \quad (3.2)$$

Après un certain nombre d'itération, les particules se regroupent par la suite dans la région où les solutions sont les plus convenables (probables). Si une particule tend à sortir de l'espace de recherche, on lui attribue la valeur du point frontière le plus proche avec ralentissement voire annulation de sa vitesse.

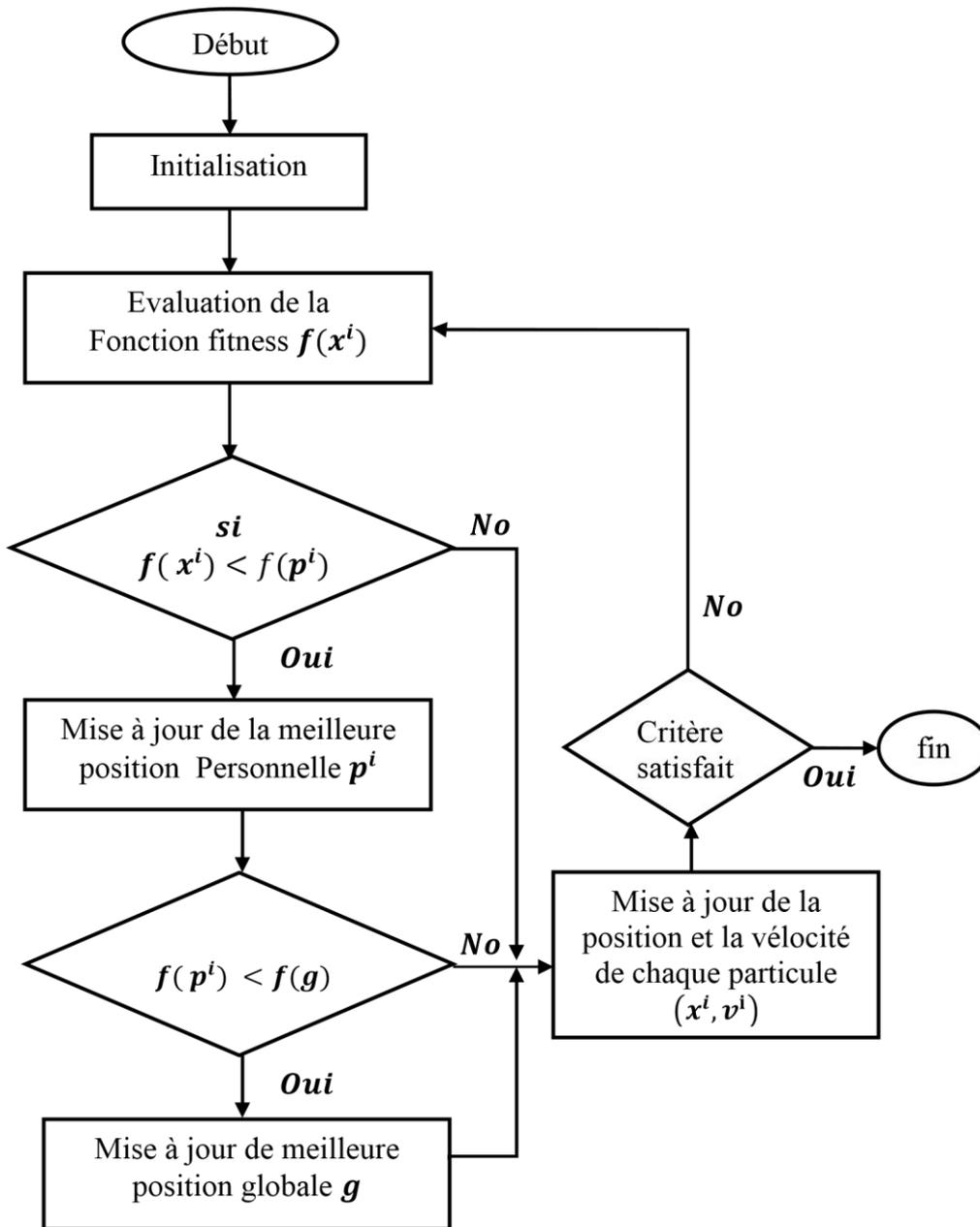


Figure 3 4: Organigramme de l’algorithme PSO de l’optimum global.

3.2 PSO de l'optimum local :

Dans cette version de PSO, utilisations d'une topologie de réseau sociale d'anneau où un plus petits voisinages sont définis pour chaque particule, figure (3.5). Le composant social reflète l'information échangée dans le voisinage de la particule, reflétant la connaissance locale de l'environnement. La contribution sociale à la vitesse de particules est proportionnelle à la distance entre une particule et la meilleure position a trouvé par le voisinage des particules.

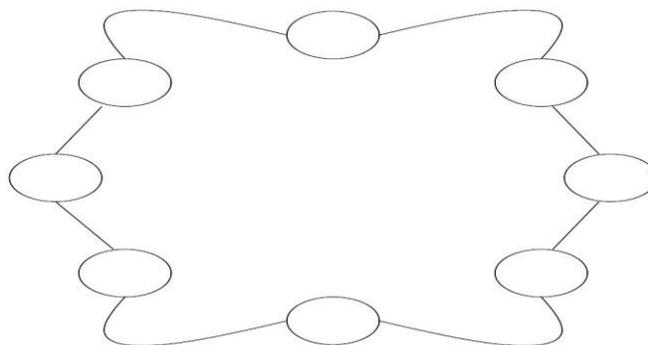


Figure 3 5: l'anneau topologie de voisinage.

3.2.1 Principe de déplacement d'une particule dans PSO de l'optimum local :

L'algorithme PSO dans sa version locale est initialisé par une population de solutions potentielles aléatoires interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche [3]. Comme illustré sur la figure (3.6), montre comment des particules sont influencées par leurs voisins immédiats. Pour maintenir le graphique lisible, seulement certains des mouvements sont illustrés, et seulement la direction globale de vitesse est indiquée. Le voisinage 1, les particules a et le b se déplacent vers la particule c, qui est la meilleure solution dans ce voisinage. Considérant le voisinage 2, les mouvements des particules d vers f, fait ainsi e. Pour la prochaine itération, e sera la meilleure solution pour le voisinage 2. Mouvement maintenant de d et de f vers e comme illustré sur la figure (3.) (b) (seulement une partie de l'espace de solution est illustrée). Les blocs représentent les positions précédentes. Noter que e reste la meilleure solution pour le voisinage 2.

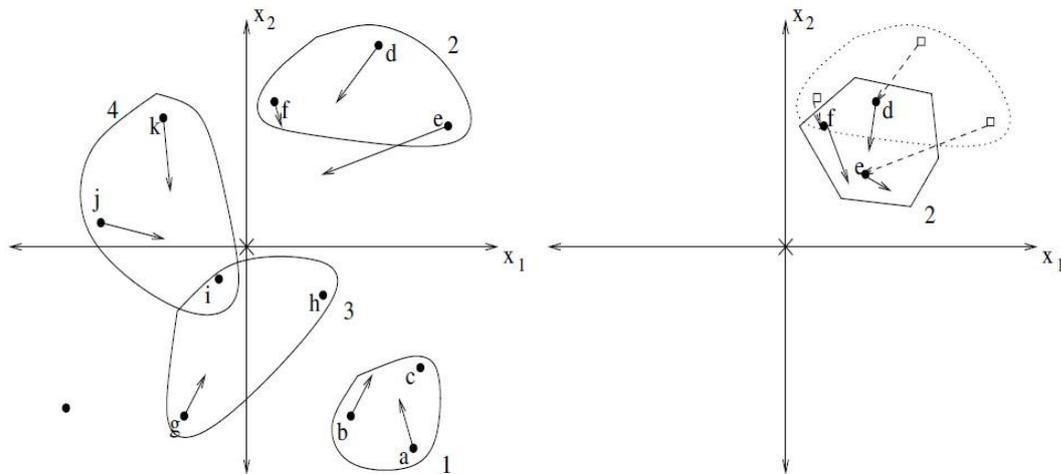


Figure 3 6: principe de déplacement d'une particule dans PSO du l'optimum local.

La particule ajuste dynamiquement sa propre vitesse en se basant sur les comportements historiques des particules eux-mêmes aussi bien que leurs voisins immédiats.

La vitesse de chaque particule peut être mise à jour itérativement selon l'équation suivants :

$$v^i(k+1) = wv^i(k) + c_1rand_1(p^i - x^i(k)) + c_2rand_2(g_n - x^i(k)) \quad (3.3)$$

Où

g_n : est la meilleur position découverte par les voisins immédiats.

La meilleure position découverte par les voisins immédiats N_i est défini comme suit :

$$\langle q_n(k+1) \in \{N_i/f(\tau q_n(k+1)) = \min \{f(x(k)), \forall x \in N_i\} \quad (3.4)$$

Il est important de noter que pour la PSO de base, les particules dans un voisinage N_i n'ont aucun rapport entre eux. Les choix des voisinages est fait a basé sur des index de particules.

Cependant, des stratégies ont été développées ou des voisinages sont formés ont basé sur la similitude spatiale.

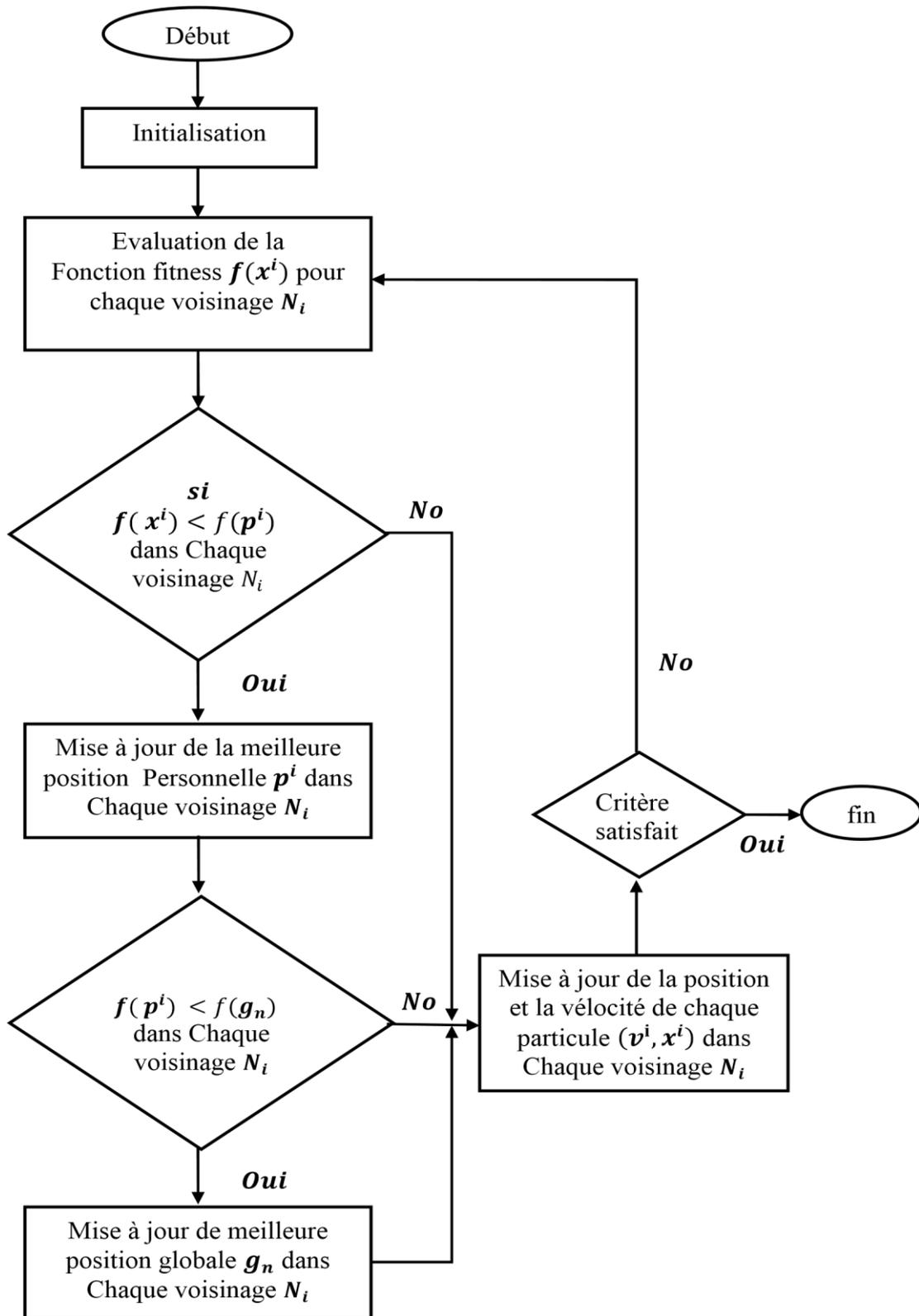


Figure 3 7: organigramme de l’algorithme PSO du l’optimum local.

4. Les Composants de vitesse :

Le calcul de vitesse du i^{eme} particule comme donné dans les équations (3.1) et (3.2) compose de trois termes :

- **La vitesse précédente**, $v^i(k)$, qui sert de mémoire de la direction précédente de vol, c-à-dire, mouvement dans le passé immédiat. Ce terme de mémoire peut être vue comme élan, qui empêche la particule de la direction rigoureusement changeante, et à la polarisation vers la direction courante. Ce composant désigné également sous le nom du composant d'inertie.
- **Le composant cognitif**, $c_1 rand_1(p^i - x^i(k))$, qui mesure la performance de la particule i relativement à sa performance passée. Dans une certaine mesure, le composant cognitif ressemble la mémoire individuelle de position qui était la meilleur pour la particule. L'effet de ce terme est que ces particules sont attirées à leur propres meilleurs positions, ressemblant la tendance des individus de retourner aux situations ou aux endroits qui les ont satisfaits plus dans le passé.
- **Le composant social**, $c_2 rand_2(g_n - x^i(k))$, dans la version globale de PSO ou, $c_2 rand_2(g_n - x^i(k))$, dans la version locale, qui mesure la performance de la particule i relativement à un groupe de particules, où des voisins. Conceptuellement, le composant social ressemble à une norme ou à une norme de groupe que les individus cherchent à atteindre. L'effet du composant social est que chaque particule est attirée vers la meilleure position trouvée par son voisinage.

La figure (3.8) présente une illustration géométrique des mises à jour de vitesse et de position :

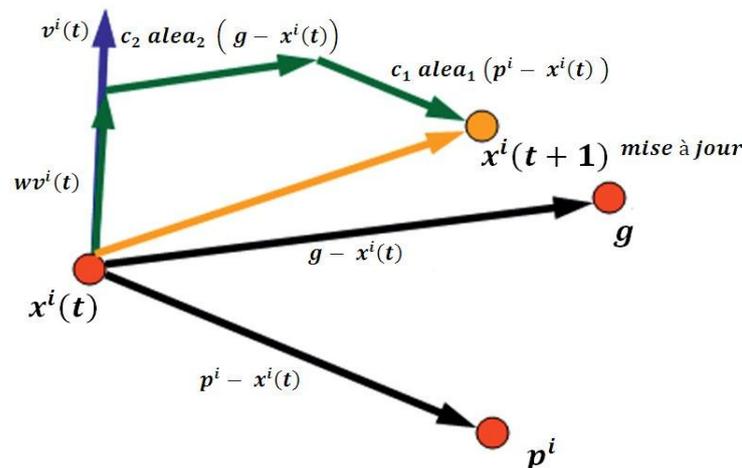


Figure 3 8: schéma vectorielle du déplacement d'une particule.

5. Les paramètres du PSO :

Le PSO de base est influencé par un certain nombre de paramètres de contrôle, à savoir la dimension du problème, nombre de particules, coefficients d'accélération, poids d'inertie, voisinage taille, nombre d'itérations, et les valeurs aléatoires qui influencent la contribution des composants cognitifs et sociaux [23],[24].

- **Taille de l'essaim** : On lui a montré dans un certain nombre d'études empiriques que PSO a la capacité de trouver les solutions optimales avec de petites tailles d'essaim de 10 à 30 particules.

- **Taille de voisinage** : La taille de voisinage définit l'ampleur de l'interaction sociale dans l'essaim. Plus les voisinages sont petits, moins l'interaction se produit. Tandis que de plus petits voisinages sont plus lents dans la convergence, ils ont une convergence plus fiable aux solutions optimales. De plus petites tailles de voisinage sont moins susceptibles des minimums locaux. Pour profiter des avantages de petites et grandes tailles de voisinage, commencer la recherche avec de petits voisinages et augmenter la taille de voisinage proportionnellement à l'augmentation en nombre des itérations. Cette approche assure une première diversité élevée avec une convergence plus rapide pendant que les particules se déplacent vers un secteur prometteur de recherche.

- **Nombre d'itérations** : Le nombre d'itérations pour atteindre une bonne solution est également dépendant au problème. Trop peu d'itérations peuvent terminer la recherche prématurément. Un nombre trop grand d'itérations a la conséquence de la complexité du calcul supplémentaire inutile (à condition que le nombre d'itérations est le seul état d'arrêt).
- **Les coefficients d'accélération** : influencent la valeur maximale du déplacement qu'une particule peut prendre durant une seule itération. c_1 , c_2 sont désignés également sous le nom de paramètres cognitif et social, respectivement. Les nombres aléatoires $rand_1$, $rand_2$ sont employés pour affecter la nature stochastique de l'algorithme.
- **Le coefficient (poids) d'inertie** : a été développée par Eberhart et al, régit la quantité de vitesse actuelle qui devrait être maintenue pour influencer le calcul de la nouvelle vitesse. De cette façon, le paramètre règle les capacités d'exploration globale et locale de l'essaim et influence le comportement de convergence de l'algorithme. Un grand poids d'inertie facilite l'exploration globale (exploration de nouveaux secteurs), alors qu'une petite valeur tend à faciliter l'exploration locale (exploration fine du secteur courant de recherche). Une valeur appropriée du poids de l'inertie fournit habituellement l'équilibre entre les capacités globales et locales d'exploration et par conséquent une réduction du nombre d'itérations nécessaires pour localiser la solution optimale. En règle générale, il est souhaitable de commencer le poids d'inertie à une grande valeur, afin de faire une meilleure exploration globale de l'espace de recherche, et le diminue graduellement pour affiner l'exploration locale.

La figure (3.8) illustre le diminue progressif en poids de l'inertie :

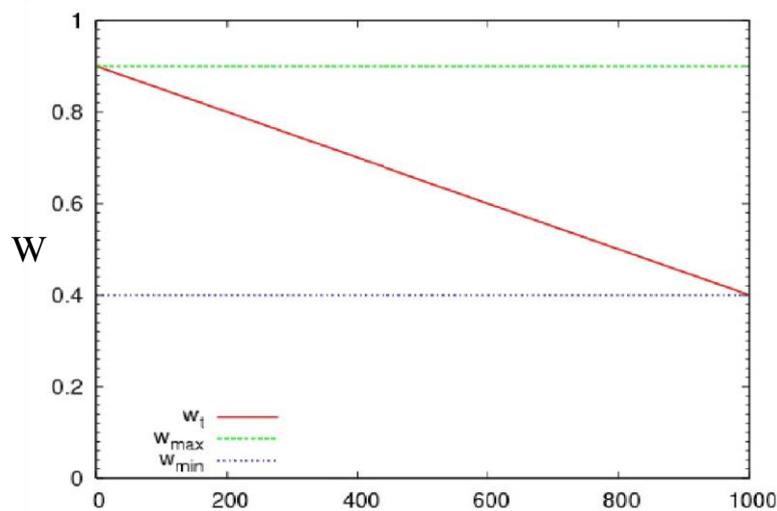


Figure 3 9: le diminue progressif en poids de l'inertie.

6. La comparaison entre les deux version (global et local) :

Il y a deux différences principales entre les deux approches en ce qui concerne leurs caractéristiques de convergence :

- En raison de l'interconnectivité plus grande de particules du PSO de l'optimum global, il converge plus rapidement que le PSO d'optimum local. Cependant, cette convergence plus rapide vient au cout de moins de diversité que le PSO d'optimum local.
- Par suite de sa plus grande diversité (qui a comme conséquence de plus grandes parties de l'espace de recherche étant couvert), le PSO d'optimum local est moins susceptible de l'emprisonnement dans des minimum locaux. En général (selon le problème), le voisinage structure tels comme la topologie d'anneau utilisée dans le PSO d'optimum local améliore les performances.

7. Exemple sur l'efficacité du PSO :

Dans le but de test les capacités du PSO, nous avons choisi de chercher l'optimisation d'une fonction objective d'une sphère définit par :

$$F_{sph}(x) = \min \sum_{i=1}^n x_i^2$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

On prend :

- $S=50$; taille de l'essaim.
- $k=1000$; nombre d'itérations.
- $c_1=c_2=2$
- w ; d'après *Eberhart et al*

Le résultat obtenu est : itération=1000 ; best cost= $9.9086e-296$.

La figure (3.10) montre la convergence de la fonction objective.

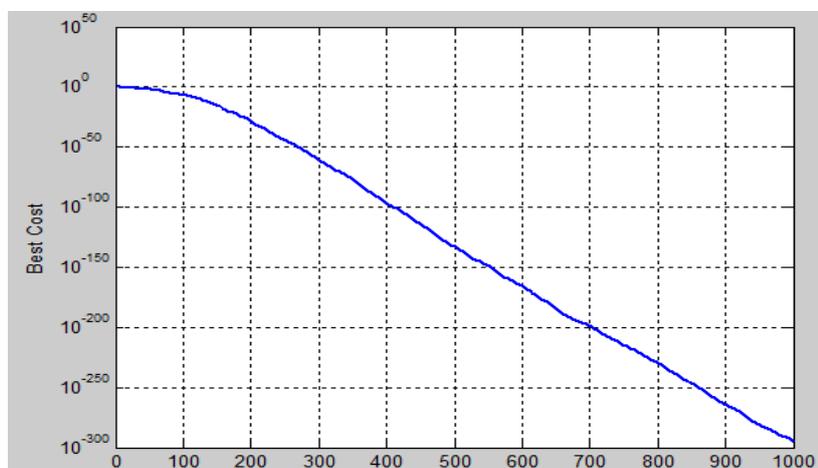


Figure 3 10: convergence de la fonction objective.

8. Les champs d'application du PSO :

Cet algorithme se révèle efficace pour les problèmes d'optimisation non linéaires à variables continue ou discrète. Il a fait sa preuve dans des domaines variés entre autres comme l'optimisation de :

- L'apprentissage de réseaux de neurones [23],
- Les régulateurs PID [25],
- Régulation et optimisation de l'écoulement de puissance [26],
- L'identification et le diagnostic des machines électrique [26],
- La commande des convertisseurs de puissance [26],

9. Conclusion :

Ont conclu que l'algorithme PSO se révèle efficace pour les problèmes d'optimisation non linéaires. La puissance de cet algorithme découle de la nature même de son principe fondé sur la notion de coopération entre les particules. PSO semble très performant en termes de la précision des solutions trouvées, du temps de calcul et du nombre de paramètres à ajuster.

Pour notre système, nous avons opté pour l'algorithme PSO d'optimum global car il semble bien adapté au problème posé en termes de temps de calcul.

Chapitre 4

Résultats de la Simulations

1. Introduction :

Afin que la tension délivrée par l'onduleur soit proche de la forme sinusoïdale idéale et avec un faible taux d'harmoniques, la stratégie d'élimination d'harmoniques est souvent proposée pour les onduleurs de tension. L'objectif est de calculer les instants adéquats d'ouverture et de fermeture des interrupteurs du convertisseur, pour annuler les harmoniques indésirables (de rang 5,7,11,13,17,19,23...) et contrôler le fondamental. En effet, la présence de tels harmoniques dans une source de tension alimentant une charge provoque plusieurs contraintes : création des pertes au niveau des équipements, perturbation des pertes au niveau des équipements, perturbation des performances de charge, diminution du facteur de puissance.

Cette technique offre donc plusieurs avantages :

- Réduction du cout des filtres.
- Réduction des pertes par commutation aux bornes des interrupteurs.
- Augmentation de la durée de vie des composants.
- Amélioration de la fiabilité du système (convertisseur-machine).

Donc dans ce chapitre nous allons élaborer l'algorithme PSO avec les angles de la commutation de l'onduleurs triphasé (on pose les angles de commutations) en suite on chercher le meilleur index de modulation m pour l'élimination d'harmoniques.

Nous allons surtout exploiter la propriété d'approximation de l'algorithme PSO universelle.

2. Indice de modulation m et l'éliminations d'harmoniques :

2.1 Formulation du problème :

Notre objective est de chercher le meilleur indice de modulations m pour les angles de modulations donner afin de supprimer les harmoniques indésirables tout en contrôlant la composante fondamentale. Ce but peut être ramené à un problème d'optimisation.

Voilà notre équation générale de m équations non linéaires de la forme de chapitre 2 :

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]$$

Avec $n = 1,5,7,11,13, \dots$ et $m = 1,3,5,7,9,11, \dots$ (impair).

Le fondamental doit être contrôlé donc à sa valeur relative de référence définie comme suit :

$$f_1(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(\alpha_k) \right] + im = 0$$

$$f_2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{5\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(5\alpha_k)] = 0$$

$$f_3(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{7\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(7\alpha_k)] = 0$$

.....

$$f_m(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) = \frac{4}{n\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n\alpha_k)] = 0$$

Afin d’assurer que le fondamental va tendre vers sa valeur de référence et que les harmoniques indésirables seront nuls, le problème d’optimisation peut être formulé de la manière suivante :

1- Minimiser la fonction suivante :

$$F = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \frac{16}{\pi^2} [(1 + 2 \sum_{j=1}^8 (-1)^i \cos(\alpha_i)) - M]^2 + \\ [(1 + 2 \sum_{j=1}^8 (-1)^i \cos(n\alpha_i)) \frac{4}{n\pi}]^2 \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

2- La solution doit satisfaire la contrainte (4.1) donnée par :

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \alpha_4 \leq \alpha_5 \leq \alpha_6 \leq \alpha_7 \leq \alpha_8 \leq \frac{\pi}{2} \quad (4.2)$$

Les objectifs que l’on désire atteindre sont introduit dans la formulation du problème, le transformant en un problème uni-objectif. Une fois le problème d’optimisation est bien défini, nous procédons par la suite à l’utilisation les essais particulières pour trouver les angles de commutation optimaux.

2.2 Elimination d'harmoniques par PSO :

Le but de l'algorithme PSO de l'optimum global est d'optimiser une fonction continue en cherchant son maximum ou son minimum dans un espace donné. L'application du PSO de l'optimum global dans le problème d'élimination d'harmoniques de l'onduleur triphasé consiste à chercher le minimum de l'équation (4.1).

L'intégration des PSO dans le schéma fonctionnel de commande de l'onduleur triphasé par stratégie d'élimination d'harmoniques, donné par la figure (4.1)

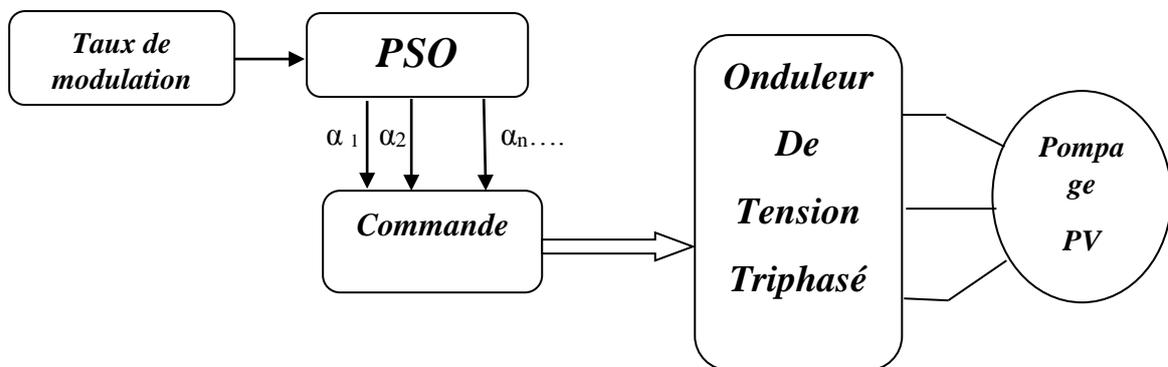


Figure 4. 1: bloc diagramme d'implantation du PSO.

Le pseudo-code adopté pour l'algorithme PSO se résume dans les étapes suivantes :

Données

- La taille de l'essaim ;
- Le nombre maximal d'itérations $itération^{max}$;
- Le paramètre cognitif c_1 ;
- Le paramètre social c_2 ;
- Les valeurs maximale w^{max} et minimale w^{min} de coefficient d'inertie ;

Etape 1 : initialisation

Itération=0 ;

For $i=1$: nombre de particules

- Initialiser la position $\alpha^i(0) = [\alpha_{a1}^i(0) \alpha_{a2}^i(0) \alpha_{a3}^i(0)]$ de chaque particule avec des angles aléatoires 0 et $\frac{\pi}{2}$ vérifiant la contrainte (4.2) ;

- Initialiser la vitesse $v_{\alpha}^i(0) = [v_{a1}^i(0) v_{a2}^i(0) v_{a3}^i(0)]$. De chaque particule à une valeur aléatoire ;

- Initialiser la valeur de Fitness $_p_i$ de la particule i ;

End for

- Initialisation de Fitness $_g$ de l'essaim ;

While nombre maximal d'itérations non atteint

Itération = itération+1 ;

- Calculer le coefficient d'inertie w

$$w = w^{\max} - \frac{w^{\max} - w^{\min}}{\text{itérationmax}} \text{ itération} ;$$

Contraints : les angles de commutation retenus doivent respecter impérativement la contrainte (4.2).

For $i=1$: nombre de particules

Etape 2 : évaluation de la fonction objective

-calculer la valeur de la fonction Fitness i de chaque particule i de la l'essaim en utilisant l'équation (4.1)

Etape 3 : mise à jour de la meilleure position du particule i

If Fitness $i < Fitness_p_i$

Then Fitness $_p_i = Fitness\ i$ et $\alpha_{pi} = \alpha^i$

End if

Etape 4 : mise à jour de la meilleure position de l'essaim

If $Fitness_{p_i} < Fitness_g$

Then $Fitness_g = Fitness_{p_i}$ et $\alpha_g = \alpha_{p_i}$

End for

For $i = 1$: nombre de particules

Etape 5 : mise à jour de la vitesse et de la position du particule i

$$v_x^i = w v_x^i + c_1 rand(\alpha_{p_i} - \alpha^i) + c_2 rand(\alpha_g - \alpha^i)$$

$$\alpha^i = \alpha^i + v_x$$

End for

End while

3. Résultats de simulation :

- **1ere résultat de programme (1) :**

On prendre d'abord les angles de commutations de référence comme initialisation [27],
Pour tester le bon fonctionnement de la fonction objective et comparais les résultats avec
notre 2eme résultats :

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
4.86	14.20	19.99	27.92	34.86	41.86	49.52	56.06

Tableau 4. 1: les angles de commutations pour éliminer les harmoniques 5, 7, 11, 13, 15, 19 et 23.

Pour monter la capacité des essais de particules dans l'optimisation de la commande de l'onduleur triphasé, le paramètres de l'algorithme PSO utilisé dans l'optimisation de la commande SHE sont :

- $S = 10$; taille de l'essaim.
- $K = 150$; nombre d'itérations.
- Condition d'arrêt est ($k=150$)

On a utilisé le programme MATLAB SIMULINK pour introduire la fonction objective :

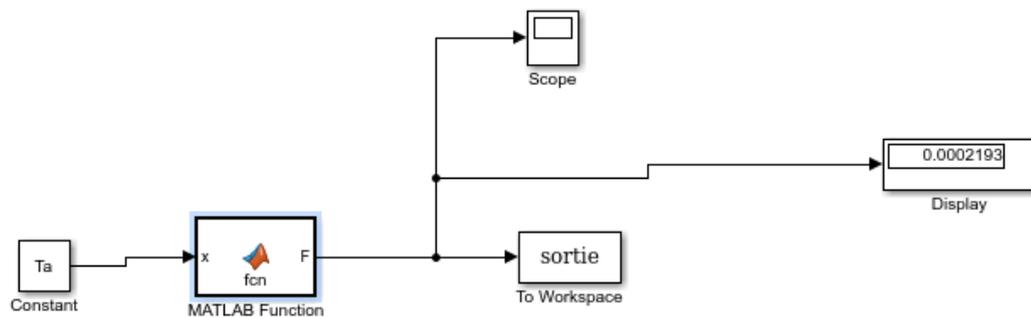


Figure 4. 2: partie Simulink de la fonction objectif.

Premier cas pour $im=0.1$:

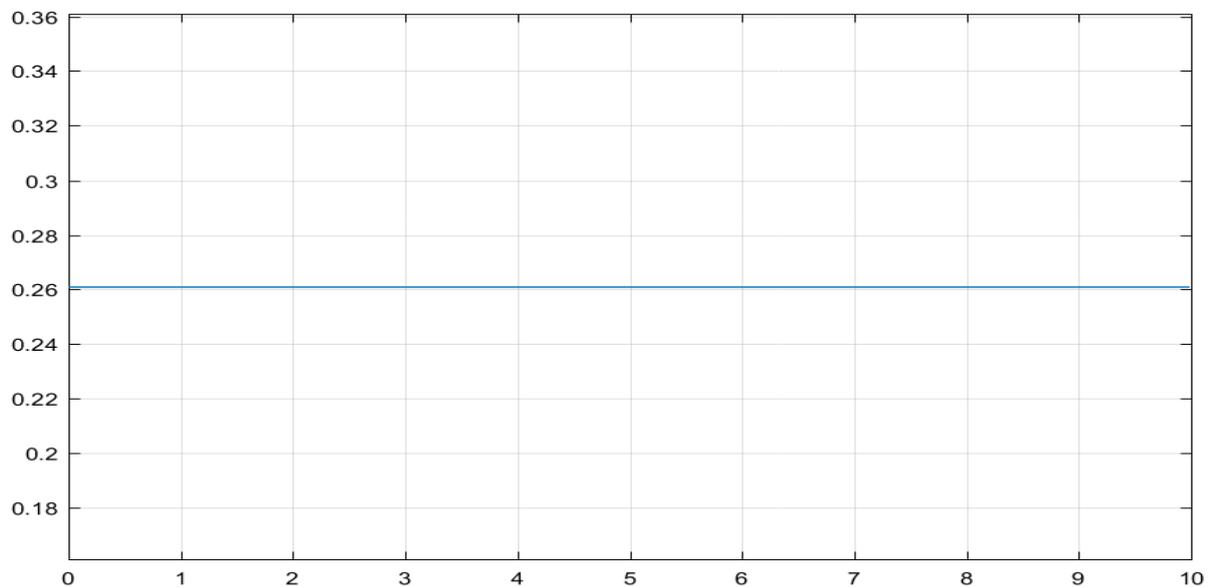


Figure 4. 3: la valeur de fonction objective sans PSO pour $im=0.1$ (Fitness fonction=0.2609 80 itérations)

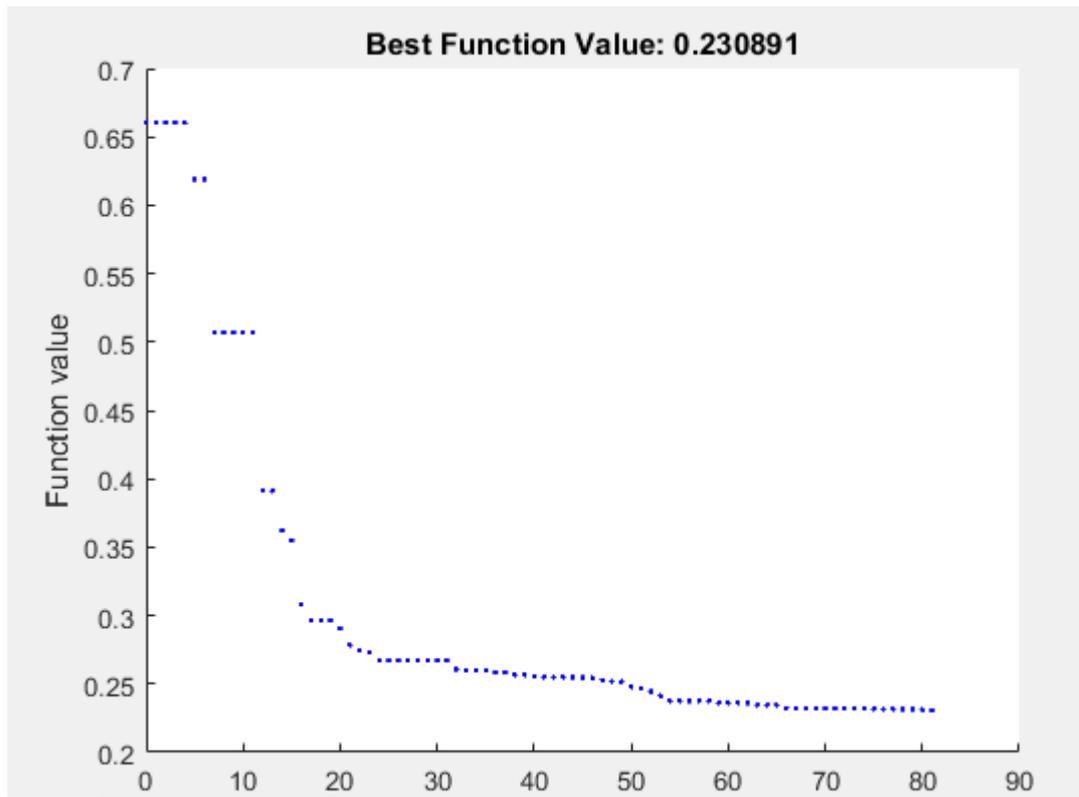


Figure 4. 4: Présente la convergence de la fonction objective avec PSO pour $im=0.1$ (best fonction value :0.230891 pour 80 itérations).

Deuxième cas pour $im=0.2$:

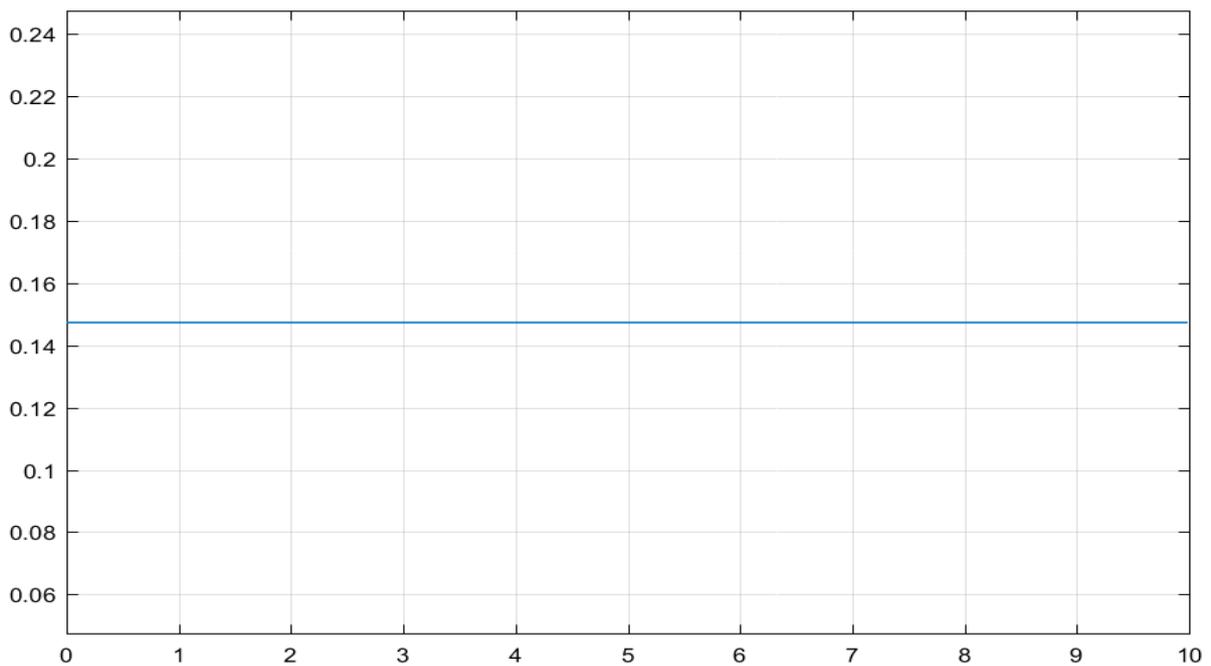
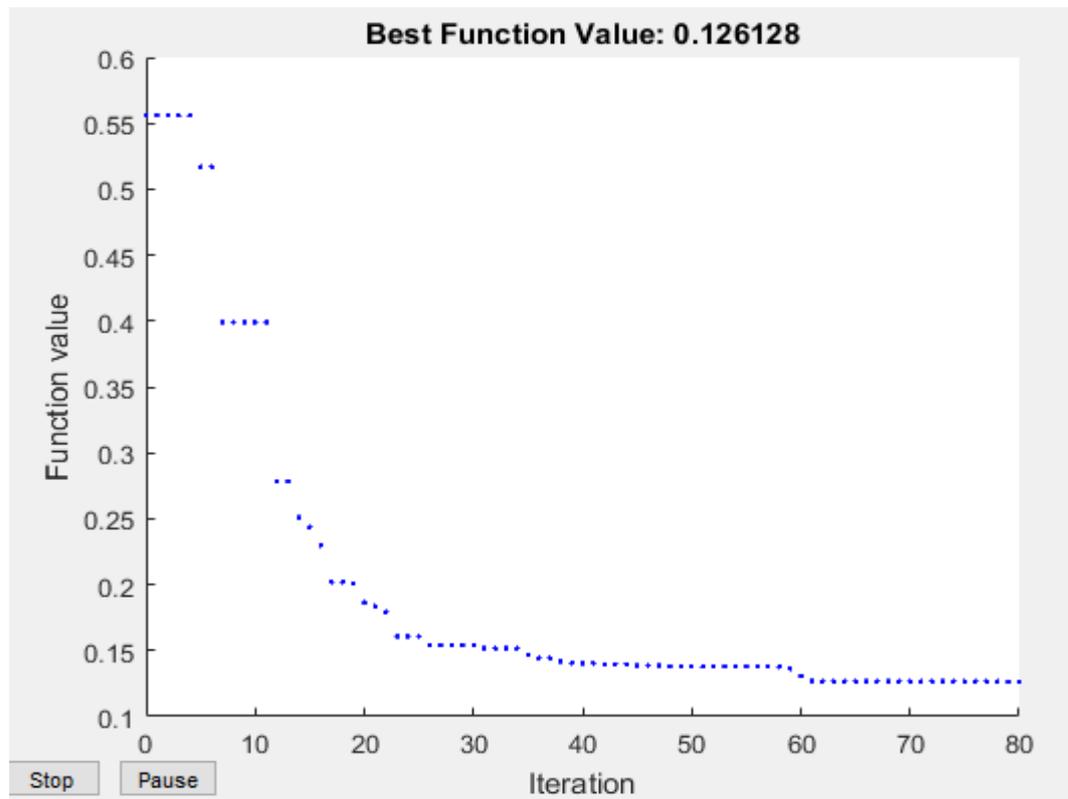


Figure 4. 5: la valeur de fonction objective sans PSO pour im=0.2.**Figure 4. 6: Présente la convergence de la fonction objective avec PSO pour im=0.2 (best fonction value :0.126128 pour 80 itérations).**

Troisième cas im=0.3 :

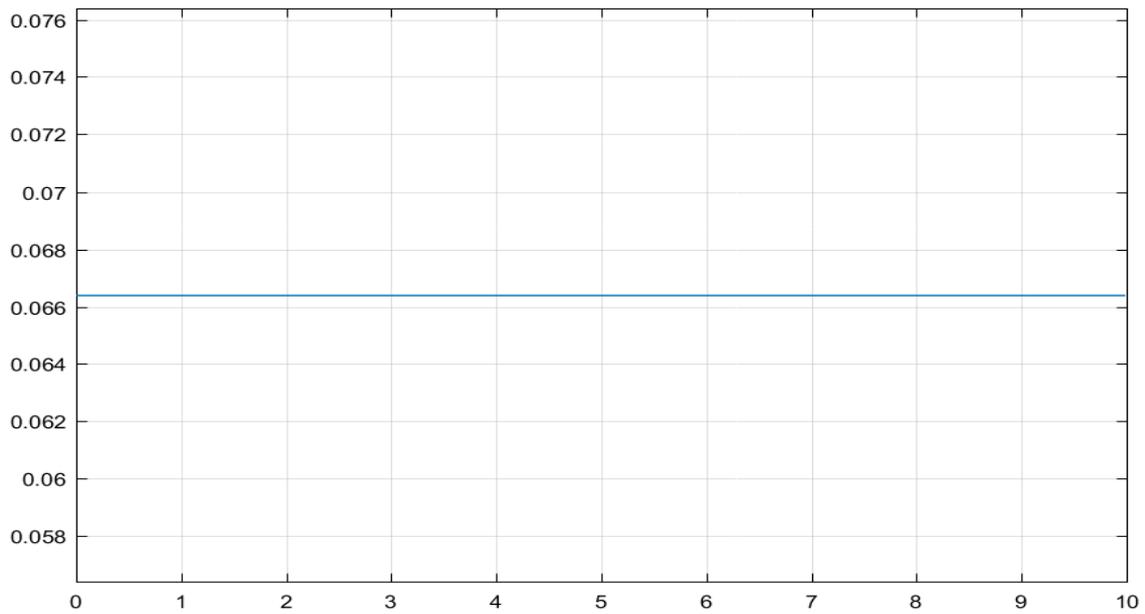


Figure 4. 7: la valeur de fonction objective sans PSO im=0.3 (Fitness fonction=0.0664)

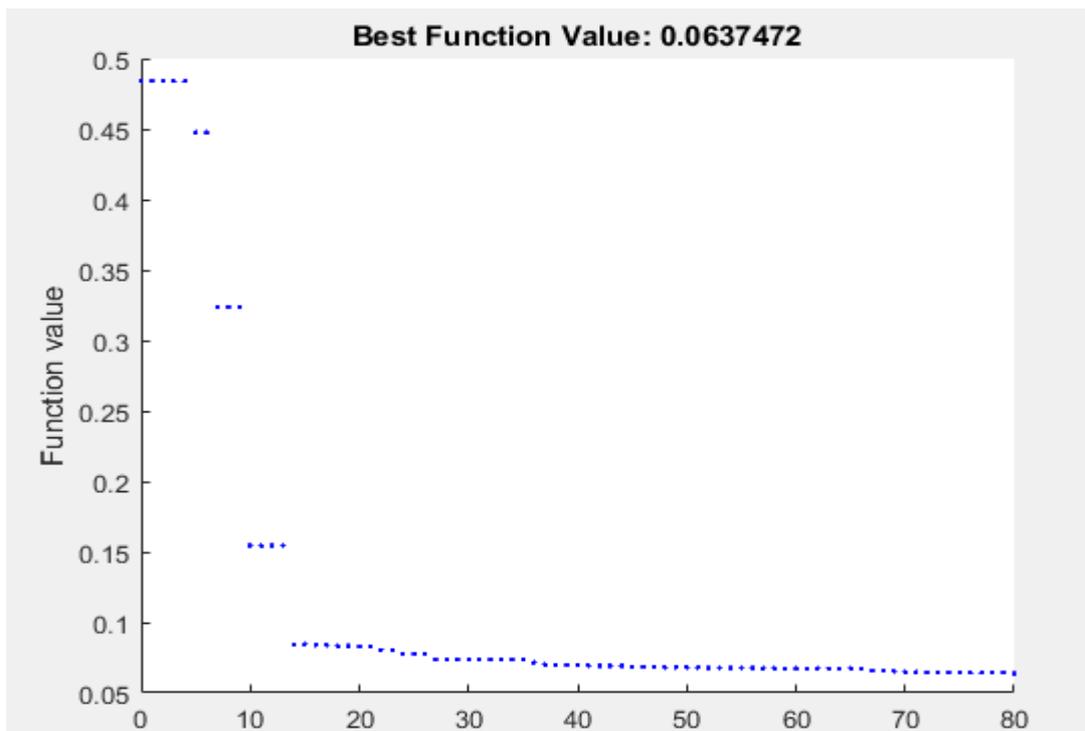


Figure 4. 8: la convergence de la fonction objective pour im=0.3 (best fonction value :0.0637472 pour 80 itérations).

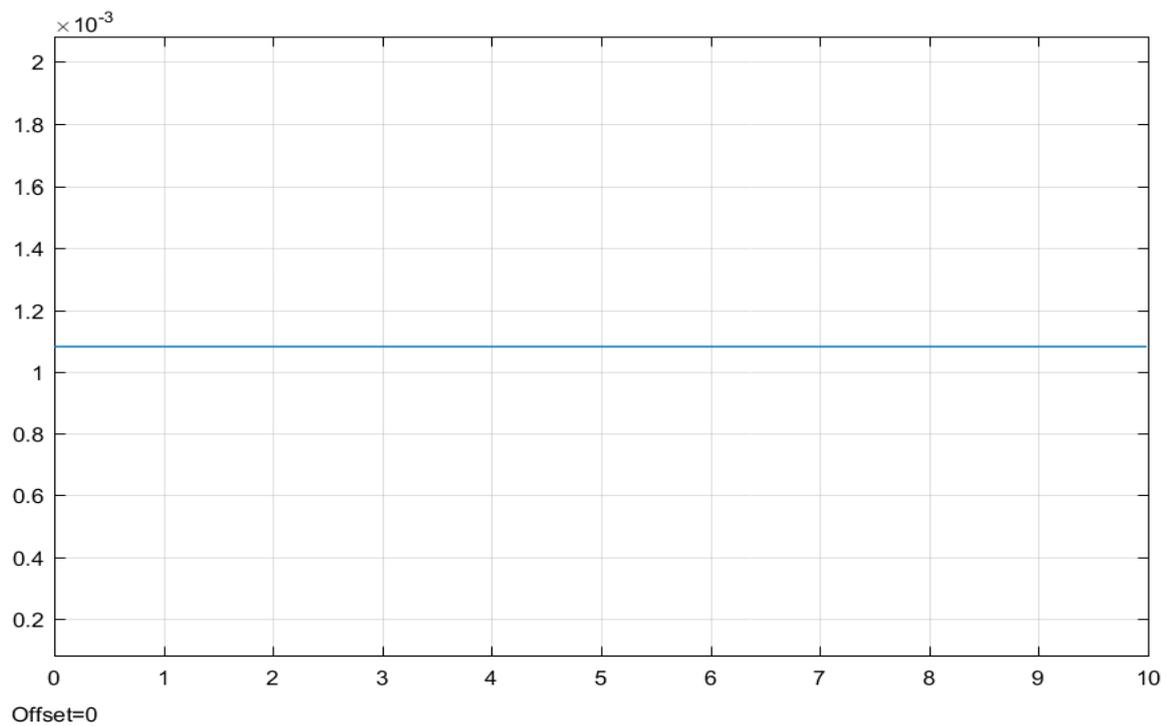
4^{ème} cas pour $im=0.5$:

Figure 4. 9: la convergence de la fonction objective pour $im=0.5$ (best fonction value :0.0637472 pour 80 itérations).

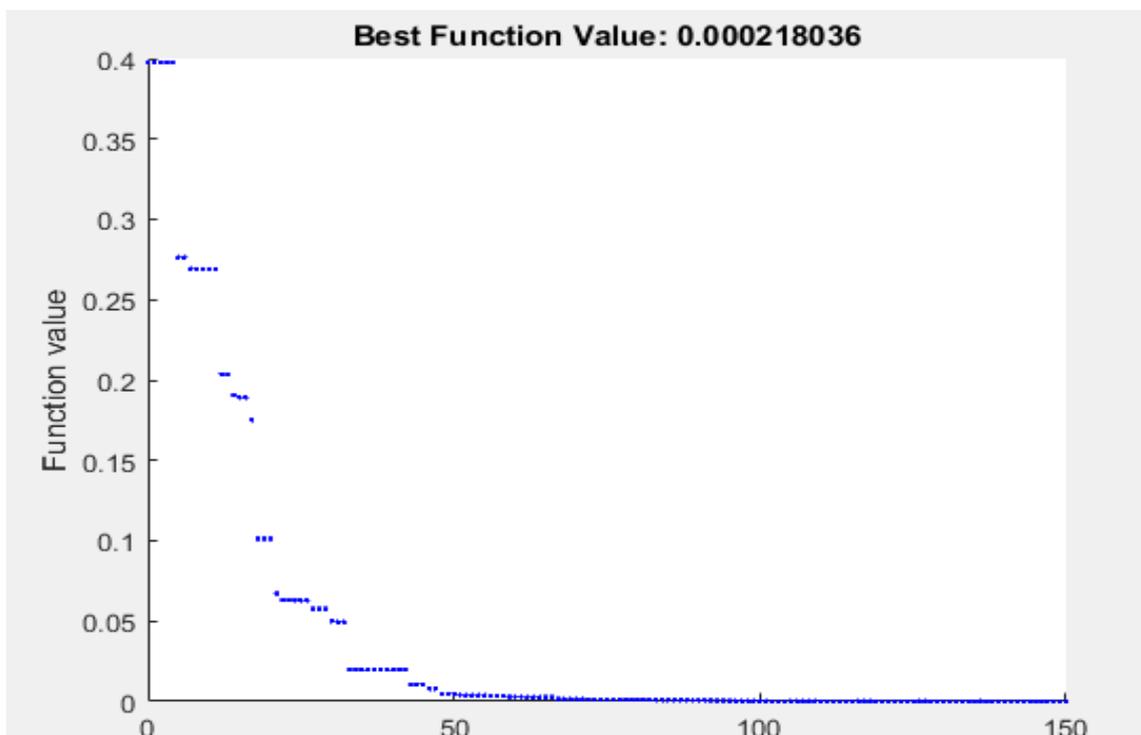


Figure 4. 10: la convergence de la fonction objective pour $im=0.5$ (best fonction value :0.000218036 pour 150 itérations).

5ème cas $im=0.8$:

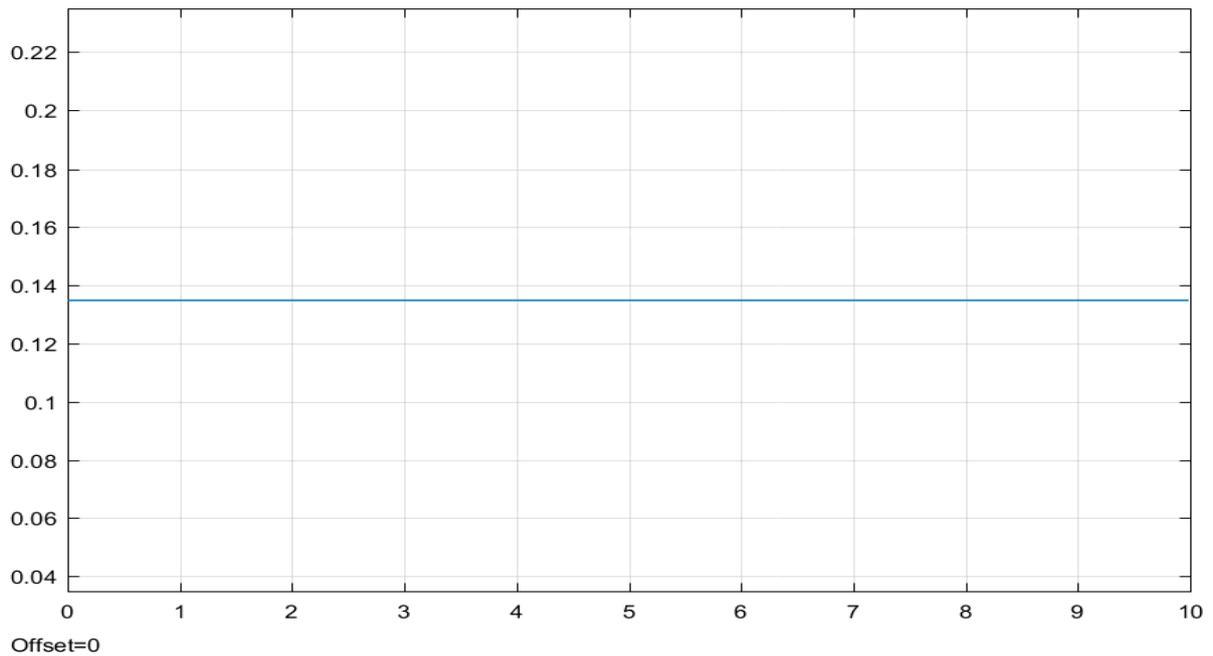


Figure 4. 11: la valeur de fonction objective sans PSO $im=0.8$ (Fitness fonction=0.1349)

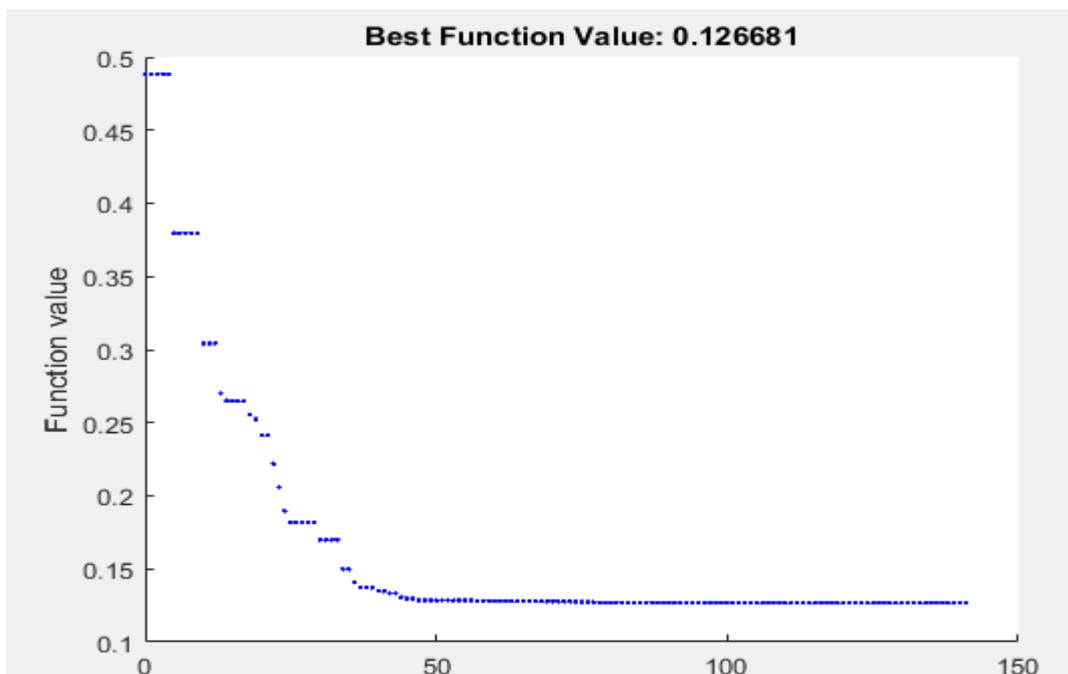


Figure 4. 12: la convergence de la fonction objective pour $im=0.8$ (best fonction value :0.126681 pour 140 itérations).

Donc va résumer les résultats sur un tableau avec tous les l'indice de modulation et les valeurs de la fonction objectif :

Index de modulation	Les valeurs exactes de la fonction objective	Les valeurs exactes de la fonction objective avec PSO
0.1	0.2609	0.230891 (80 itérations)
0.2	0.1475	0.126128 (80 itérations)
0.3	0.0664	0.0637472 (80 itérations)
0.4	0.03583	0.0144865 (140 itérations)
0.5	0.001082	0.000218036 (150 itérations)
0.6	0.01901	0.0119855 (140 itérations)
0.7	0.05479	0.0563276 (100 itérations)
0.8	0.1346	0.126681 (140 itérations)
0.9	0.2305	0.23127 (80 itérations)

Tableau 4. 2: les valeurs de la fonction objectif sans/avec PSO en fonctions de l'indice de modulation.

2eme résultat de programme (2) :

Dans ce programme en à choisir l'indice de modulation $im=0.5$ et les angles de commutation $m=8$:

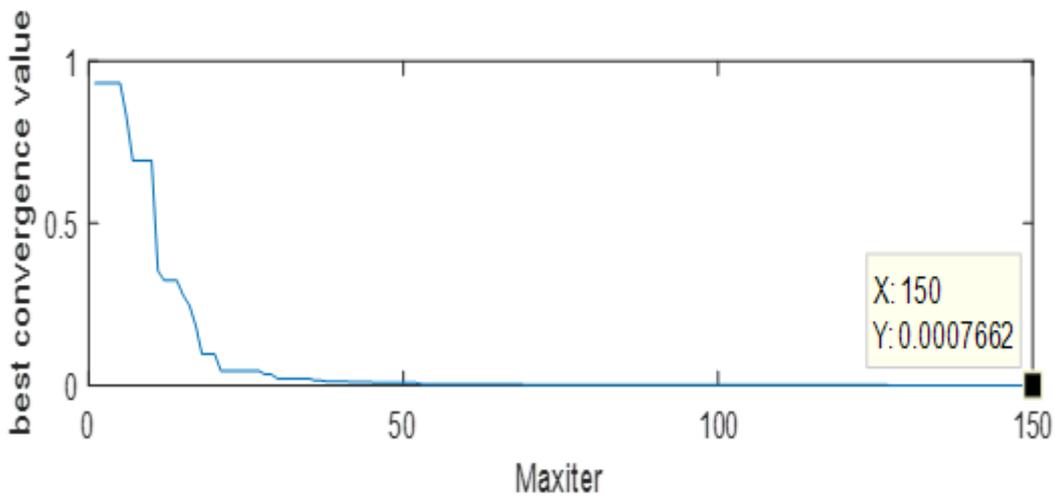


Figure 4.13: PSO Convergence graph $im=0.5$.

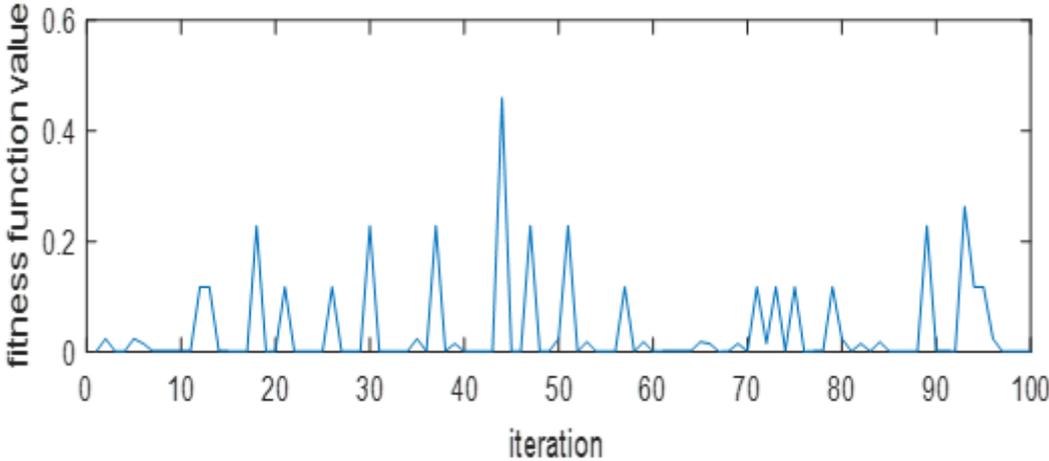


Figure 4.14: objective function graph.

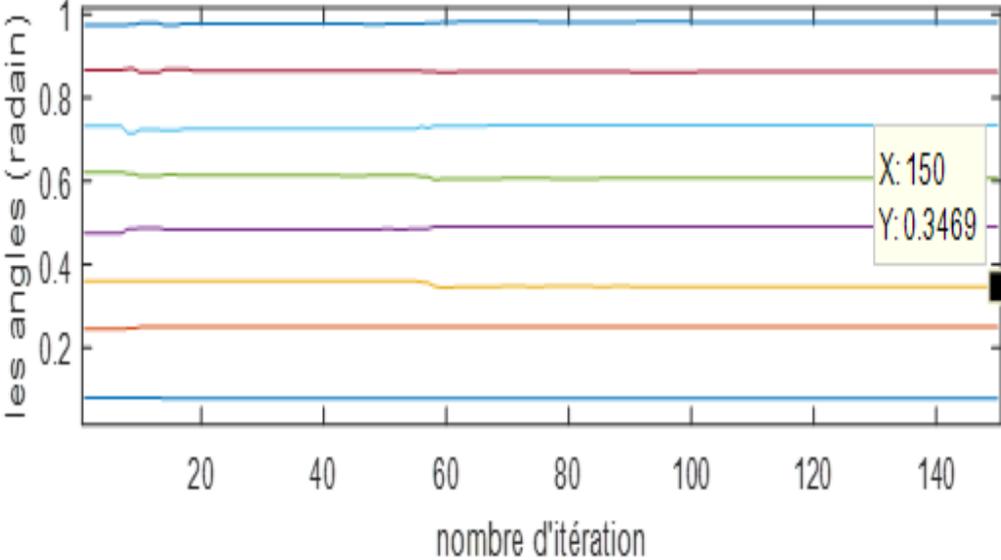


Figure 4.15: les angles de commutations pour chaque itération.

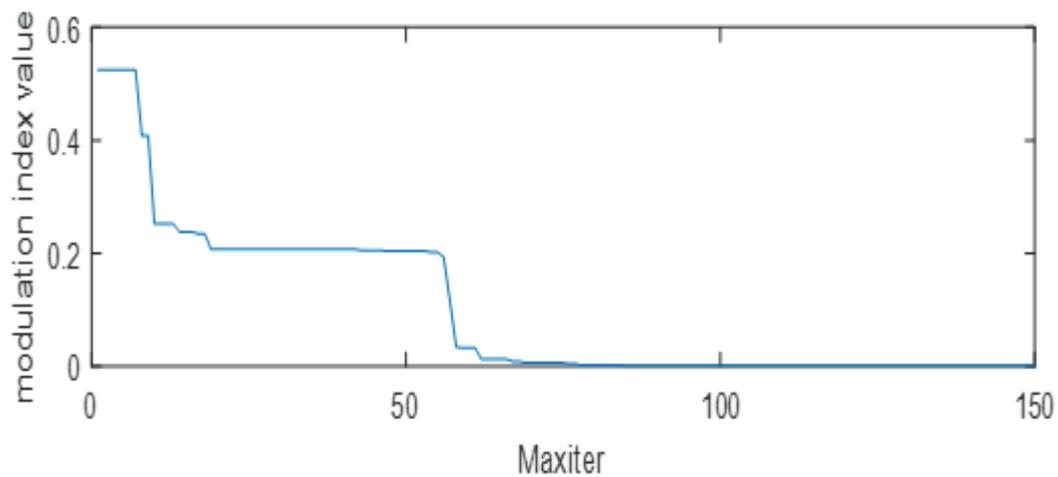


Figure 4.16 : évaluation de im pour chaque itération.

I.m	Alpha1	Alpha2	Alpha3	Alpha4	Alpha5	Alpha6	Alpha7	Alpha8
0.1	4.76	14.23	19.89	28.04	34.76	41.98	49.46	56.10
0.2	4.85	14.33	19.88	28.20	34.74	42.03	49.39	56.10
0.3	4.76	14.22	19.90	28.08	35	42.06	49.47	56
0.4	4.52	14.33	19.87	28.08	34.73	42	49.30	56.26
0.5	4.76	13.97	20.63	27.52	35.23	41.25	49.83	55.70
0.6	4.56	14.33	20	28.08	34.76	42	49.39	56.30
0.7	5.02	13.47	20.63	26.36	35.87	40.70	50.48	55.42
0.8	4.66	14.33	20.04	27.91	34.90	41.85	49.49	56.02
0.9	4.75	14	20.19	27.65	35.07	41.54	49.77	55.83

Tableau 4.3 : les angles de commutations en fonction de Im.

4. Conclusion :

La méthodologie adoptée dans ce chapitre consiste à transformer le problème de l'indice de modulation et élimination d'harmoniques en un problème d'optimisation. Un algorithme d'optimisation est mis en œuvre pour sa résolution. Il s'agit l'algorithme des essais particuliers PSO. Les résultats obtenus ont montré que la méthode a réussi d'atteindre l'objectif d'une manière très satisfaisante en termes de précision et de temps de calcul.

La stratégie d'élimination d'harmoniques offre un taux de distorsion harmonique faible. En outre, cette stratégie permet, non seulement le contrôle du fondamental mais également d'annuler les harmoniques les plus gênants. D'autant plus qu'elle réduit énormément les pertes par commutation ce qui augmente la longévité des composants de puissance.

Du fait la stratégie d'élimination d'harmoniques ne dépend pas de la topologie de l'onduleur utilisé, cette étude est applicable donc à d'autre topologie et peut être étendue facilement à d'autre niveaux de tension.

Conclusion Générale :

Le but principal de notre travail dans ce mémoire s'articule fondamentalement sur l'optimisation de la commande de l'onduleur triphasé par un algorithme intelligent PSO, et de conclure les paramètres de cette commande avec PSO.

Les essais de particules ont pour particularité d'être l'un des algorithmes métaheuristiques le plus simple en termes de complexité d'équation. Ainsi seule la mémorisation du meilleur global et du meilleur individuel est nécessaire pour le calcul de l'itération suivante en utilisant une seule équation. Cette particularité est intéressante dans le cadre d'une implémentation dans un système à faibles source.

La première partie de notre travail est portée sur deux titres, dans la première titre on a présenté le pompage photo voltaïque, en a vu la technique de pompage PV, ainsi on a expliqué brièvement les composantes d'un système pompage PV et le dimensionnement complet de l'installation de pompage et on a expliqué les méthodes de taille du générateur PV, et dans la deuxième titre on a introduire la machine asynchrone, on a parlé sur la commande de la machine et on a présenté la constitution de moteur asynchrone.

Dans la deuxième partie on a fait une définition sur l'onduleur de tension, on a donné la classification des onduleurs selon trois modes bien définis, après on a fait une étude théorique sur la commande SHE-PWM.

A travers la troisième partie, nous avons donné la présentation bien expliquée de l'algorithme intelligent d'optimisation par essaim particulaire (PSO).

Et dans la dernière partie on a donné les résultats de notre travail pour la commande de l'onduleur triphasé par l'optimisation essaim particulaire PSO qui consiste à déterminer le meilleur résultat, donc nous avons exploré la voie qu'offrent les essais particulaires appliqués à l'optimisation de la commande de l'onduleur triphasé. Cette méthode a l'avantage d'être beaucoup moins sensibles au point de départ et aux autres contraintes liées à la dérivation de la fonction à optimiser qui sont propres aux algorithmes d'optimisation classiques.

En effet, de façons générales les métaheuristiques démarrent avec un ensemble de points de départ éparpillés sur tout l'espace de recherche et identifient rapidement les sous domaines susceptibles de contenir le minimum global.

Conclusion Générale

Pour les perspectives de ce mémoire, nous proposons les idées suivantes :

- Développement de l'algorithme du PSO de l'optimum local pour la résolution des systèmes d'équations non linéaires.
- L'élimination d'un nombre élevé d'harmoniques nécessite des algorithmes d'optimisation plus puissants. L'algorithme du PSO de l'optimum local apparaît la solution la plus adaptée pour ce type de problème.

Bibliographie :

- [1] A. Labonne, « Alimentation d'une pompe à Burkina Faso », 2004.
- [2] J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des Ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.
- [3] <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM27/RM27c01.html>-google.
- [4] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996.
- [5] B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « Les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000.
- [6] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26.
- [7] S. LABED. « Le pompage photovoltaïque et le développement des régions sahariennes », Colloque International sur les Ressources en Eau Souterraines dans le Sahara (CIRESS) Ouargla - 12 et 13 décembre 2005. Pompage Photovoltaïque 'Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19-26.
- [8] M'hamed BOUNEKHLA, " Contribution à l'identification paramétrique de la machine asynchrone ", Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences ENP 2004
- [9] Lotfi BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", Notes de cours, IUFM de Lorraine, UHP 2005.
- [10] Ahmad abad: 'single phase inverter controlled using SPWM technique, VADODARI institute of engineering, December 2014-2015
- [11] Hidri imed : 'les convertisseurs DC-DC et DC-AC', Institute supérieurs des études technologiques de Nabeul, PDF.
- [12] Beloufa abbés : 'Polycopie de cours électronique de puissance', Université Mustapha Stambouli of Mascara, 2015.
- [13] Guy Séguier, France Labrique, Philippe Delarue : 'Electronique de puissance, 5 rue Laromiguière Paris, Dunod, 2011.
- [14] Khaled SAIDOUN, Mourad SI Moussi : 'commande MLI d'un onduleur multi-niveaux', mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzo, 2015.
- [15] Abdul Moeed Amjad, Zainal Salam, Ahmed Majed et Ahmed Saif, "Application of differential evolution for cascaded multilevel VSI with harmonics elimination PWM switching", Electrical Power and Energy Systems 64 (2015) 447–456

Bibliographie :

- [16] Mohamed S. A. Dahidah, Georgios Konstantinou et Vassilios G. Agelidis, " A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, NO. 8, August 2015 pp. 4091-4105
- [17] A. GOURDIN et M. BOUMAH RAT, 'Méthode numérique Appliquées', OPU, seconde édition, 1991.
- [18] J.A TAUF IQ, prof B.MELLITI and C.J.GOODMAN, 'novel algorithm for generating near optimal PWM waveforms for AC traction drives', IEE proceedings, vol.133,PT.B,No2, March 1986,pp85-94.
- [19] BAZI Smail, Contribution à la commande robuste d'une machine asynchrone par la technique PSO « particle swarm optimization », Mémoire de Magister de Université de Batna, 2009.
- [20] Christian Blum, Daniel Merkle, (Swarm Intelligence: Introduction and applications), Natural computing Series, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [21] Maurice Clerc, L'essaim de particules vu comme un système dynamique : convergence et choix des paramètres, http://www.particle swarm.net/oep_2003.
- [22] James Kennedy & Russell C. Eberhart, Swarm Intelligence, Academic Press, 2001.
- [23] ANDRIES P. Engelbrecht, Computational Intelligence, British Library, second Edition, 2007.
- [24] ZERDOUMI Zahra, Application des réseaux de neurones Artificiels a la poursuite des non Linéarités fluctuantes des systèmes Satellitaires, Mémoire de Magister de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila ,2006.
- [25] BAZI Smail, Contribution à la commande robuste d'une machine asynchrone par la technique PSO « particle swarm optimization », Mémoire de Magister de Université de Batna, 2009.
- [26] BARKAT Said, Modélisation et commande d'un onduleur à sept niveaux à diodes flottantes : Application à la conduite d'une machine asynchrone, Thèse de doctorat, de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [27] Mohamed Azab Harmonic Elimination in three-phase voltage source inverters by particle swarm optimization, article in journal of Electrical engineering and technology, May 2011.