

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 البليدة

Université Saad Dahleb Blid

كلية التكنولوجيا

Faculté de technologie

قسم الآلية و الكهروتقني

Département d'Automatique et d'Électrotechnique



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Électrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Thème

Technique SHEPWM par ABC pour une
application photovoltaïque

Présenté par :

ISSA TRAORE ET KRITLI RIAD

Encadré par :

KAHLANE HAMZA

Année Universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Tout d'abord nous disons merci au **Bon Dieu**, Le TOUT PUISSANT, de nous avoir donné la

force, le courage, la patience et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre Promoteur
Monsieur **KAHLANE HAMZA**.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs en particulier Mr **MESSAOUD BELAAZOUK**, notre chef de spécialité qui n'a pas hésité de nous orienter durant toutes ses années d'université, pour ses interventions pendant la réalisation de ce mémoire et aussi à Mr **BOUNEKHLA MOHAMED** et Mme **KHMESSI**, cheffe de département.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et au membre du jury examinateur qui nous font l'honneur de participer à la composition de ce jury.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

A mon cher Père **Mahamane Bilaly TRAORE** et à ma chère Mère **Djénéba TRAORE**, en témoignage et en reconnaissance de leur dévouement, de leur soutien permanent et inconditionnel durant toutes mes années d'études même dans les moments les plus difficiles auxquels j'ai dû faire face, leurs sacrifices et leurs privations, leurs réconforts moraux, eux qui sans demimesure ont tant consenti pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre après tant d'années, ce but d'être un jour diplômé,

A mes chers frères et sœur : Bilal et sa famille, Bassirou et sa famille, Aboubacar, et Aicha,

A mes chers amis : Ousseynou, Aziz, Sidi, Gaoussou,

A mon cher binôme, pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passés ensemble et à sa famille,

A tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à ce travail,

Que ce travail soit l'accomplissement de vœux, et le fruit de votre soutien indéfectible.

Merci d'avoir été et de continuer à être là toujours pour moi.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à qui me sont les plus chers :

A ma très chère mère, mon père, à ma grand-mère, à mes chers frères Farès
et Nabile

A toute la famille et à Issa mon binôme et à tous mes amis Moussa, Anes,
Brahim, Ahmed, Zakaria, Houseme

A tous qui me sont chères

الملخص :

في العقود الأخيرة ظهر اهتمام كبير بالآلات الكهربائية التي تستخدم الطاقة الشمسية ، ولا سيما المضخات الكهروضوئية في المناطق الصحراوية أو القاحلة نظرًا لأن التحكم في سرعة المضخات الشمسية يمكن أن يتم تشغيله بواسطة محرك يمكن أن يكون بديلاً جذابًا (SHE PWM) غير متزامن ، فإن حذف المركبات التوافقية عن طريق تغيير عرض النبضة للتحكم في سرعة المحرك غير المتزامن. ومع ذلك ، لا يمكن استخدامه في تطبيقات الوقت الفعلي ، حيث لا يمكن حساب زوايا التبديل ثم إنشائها عبر الإنترنت وفي الوقت الفعلي. لحل هذه المشكلة ، في هذه الأطروحة نقترح خوارزمية تعتمد جنبًا إلى جنب مع تقنية حذف المركبات التوافقية عن طريق (ABC) على نظرية تحسين مستعمرة النحل الاصطناعية لأول مرة بعد ABC تم وصف ومحاكاة خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية SHE PWM تغيير عرض النبضة ذلك ، يتم إجراء تحليل شامل لأخطاء حساب زوايا التبديل للتحقق من دقة هذه الخوارزمية. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الخوارزمية تتحكم في سعة الأساسي وتزيل التوافقيات المختارة بدقة وفي الوقت الفعلي ،

الكلمات المفتاحية

(ABC) ، مستعمرة النحل الاصطناعية SHE PWM حذف المركبات التوافقية عن طريق تغيير عرض النبضة :
الوقت الحقيقي ، الضخ الكهروضوئي ، المحرك غير المتزامن ، العاكس ثلاثي الطور

Résumé : dans ce mémoire nous proposons un algorithme basé sur la théorie d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle (ABC) en combinaison avec la technique SHE PWM. L'algorithme ABC est d'abord décrit et simulé. Ensuite, une analyse approfondie des erreurs de calcul des angles de commutation est effectuée afin de vérifier la précision de cet algorithme. Les résultats obtenus montrent que l'algorithme (ABC) proposé calcul efficacement les angles de commutation de l'onduleur triphasé en minimisant la fonction objectif et éliminer les harmoniques sélectionnés.

Mots clés- SHE PWM, Artificiel Bee Colony (ABC), temps réel, Pompage Photovoltaïque, moteur asynchrone, onduleur triphasé.

Abstract: Over the past decades, great interest has been shown in the speed control of electric vehicles driven by an asynchronous motor. Pulse Width Modulation with Selective Harmonic Elimination (SHE PWM) is an attractive alternative for controlling the speed of an asynchronous motor. However, its use is impossible in real-time applications, such as that of electric vehicles, since the switching angles cannot be calculated and then generated on-line and in real time. To solve this problem, in this thesis we propose an algorithm based on artificial bee colony (ABC) optimization theory in combination with the SHE PWM

technique. In this thesis, the ABC algorithm is first described and simulated. Then, a thorough analysis of the switching angle calculation errors is performed in order to verify the accuracy of this algorithm. The results obtained show that the algorithm controls the amplitude of the fundamental and eliminates the harmonics selected with precision.

Keywords- SHE PWM, Artificial Bee Colony (ABC), real time, Electric Vehicle, asynchronous motor, inverter

Table des matières

Liste des Figures	vi
Liste des Tableaux	vii
Notations et Abréviations	viii
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Pompage photovoltaïque

Introduction.....	4
1 Généralité et étude d'un système photovoltaïque.....	5
1.2 Effet photovoltaïque.....	5
1.3 Constitution d'un système de pompage solaire.....	6
1.4 Groupe motopompe.....	7
1.4.1 Moteur.....	7
1.4.2 Pompe	7
1.5 Types de pompes.....	7
1.6 Principe de fonctionnement.....	8
1.7 la pompe centrifuge	8
1.7.1 Présentation de la pompe centrifuge.....	9
1.7.2 Fonctionnement de la pompe centrifuge.....	10
1.7.3 Modélisation de la pompe centrifuge	10
1.8 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque	11
1.8.1 les avantages.....	11
1.8.2 les inconvénients.....	11
1.2 La machine asynchrone	12
1.2.1 Définition, constitution et principe de fonctionnement	12

1.3 Commande des moteurs asynchrones	13
1.3.1 La commande scalaire.....	13
1.3.2 Contrôle en V/f constant.....	13
1.3.3 Contrôle du courant.....	15
Conclusion	15

Chapitre 2 : MLI par élimination sélective d'harmonique (SHE PWM)

Introduction	16
2 Les onduleurs	16
2.1 Définition et principe.....	16
2.2 Classification	17
2.2.1 Onduleur autonome	17
2.2.2 Onduleur non autonome	17
2.3 Types d'onduleurs de tension	17
2.3.1 Les Onduleurs monophasés.....	17
2.3.2 Les onduleurs triphasés	18
2.3.3 Les onduleurs multi-niveaux.....	19
2.4 La commande des onduleurs.....	19
2.4.1 Commande symétrique	20
2.4.2 Commande décalée.....	21
2.4.3 La commande MLI sinus-triangle.....	21
2.5 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	22

2.6	les	harmoniques	
électriques.....			24
2.7	Causes	des	
harmoniques.....			26
			ii
2.8	les harmoniques sur les convertisseurs.....		27
2.9	Problèmes d'harmoniques		27
2.10	La technique SHE PWM		28
2.10.1	Principe de la MLI-ESH (SHE PWM)		29
2.10.2	Série de Fourier.....		29
2.10.3	La MLI par élimination sélective d'harmoniques Unipolaire (MLI ESH-U).....		30
2.10.4	La MLI par élimination sélective d'harmoniques bipolaire (MLI ESH-B)		31
Conclusion			32

Chapitre 3 : ABC (Algorithme de colonie d'abeille artificielle)

Introduction	33
3.1.Problèmes d'optimisation.....	33
3.2 Les méthodes d'optimisations approchées	34
3.2.1 Heuristiques	34
3.2.2 Métaheuristiques.....	34
3.3 Optimisation par essaim de particules.....	34
3.3.1 L'algorithme PSO	35
3.4 L'algorithme génétique	36
3.4.1 Principe de l'algorithme.....	37
3.5 Les réseaux neurones artificiels.....	41
3.5.1 Le neurone biologique	41
3.5.2 Le modèle Mathématique d'un neurone artificiel	42

3.6 Colonie d'abeille artificielle.....	44
3.6.1 L'essaim d'abeilles.....	44
3.6.2 Auto-organisation	45
3.6.3 Modèle de comportement d'abeille.....	45
3.6.4 Analogie entre la nature et l'optimisation.....	47
3.6.5 Modèle comportemental à essaim d'abeilles	48
	iii
3.7 L'algorithme de colonies d'abeilles artificielles.....	50
3.7.1 Structure algorithmique	50
3.7.2 Modèle de base de l'algorithme ABC.....	51
3.8 Domaines d'application.....	55
Conclusion	55

Chapitre 4 : Simulation sous environnement Matlab

Introduction.....	56
4 Simulation de l'algorithme (ABC).....	56
4.1 Programme Matlab.....	56
4.2 Simulation de l'onduleur.....	64
4.3 Interprétation des résultats.....	67
Conclusion.....	67
Conclusion générale.....	68
Bibliographie.....	69

Annexe A

Annexe B

Liste des Figures

Figure (1.1) : Schéma d une cellule photovoltaïque.....	5
Figure (1.2) : Schéma d un système de pompage photovoltaïque.....	7
Figure (1.3) : constitution dune pompe centrifuge.....	9
Figure (1.4) : Le couple moteur T max en fonction de la fréquence avec le rapport V/f constant puis avec V constant.....	14
Figure (2.1) : Schéma des onduleurs monophasés : a- demi-pont, b- pont complet.....	18
Figure (2.2) : Structure d'un onduleur monophasé sous Matlab.....	18
Figure (2.3) : Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.....	19
Figure (2.4) : Structure-generale-de-londuleur-a-cinq-niveaux.png.....	19
Figure (2.5) : Commande en pleine d'onde (symétrique).....	20
Figure (2.6) : commande décalée.....	21
Figure (2.7) : La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle.....	22
Figure (2.8) : Schéma synoptique de la commande en MLI (triphase).....	23
Figure (2.9) : Un signal déformé par la cinquième et la septième harmoniques.....	24
Figure (2.10) : Histogramme des harmoniques et du fondamentale.....	26
Figure (2.11) : courant et tension dan un charge linéaires et charge non linéaires.....	26
Figure (2.12) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (unipolaire).....	30
Figure (2.13) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (bipolaire).....	31

Figure (3.1) : Croisement 1-point.....	38
Figure (3.2) : Croisement 2-points.....	39
Figure (3.3) : Mutation.....	39
Figure (3.4) : Représentation d'un neurone biologique.....	42
Figure (3.5) : Modèle mathématique d'un neurone artificiel.....	43
Figure (3.6) : La danse en rond qu'effectue l'abeille en fonction de la direction de la source de nourriture.....	44
Figure (3.7) : La danse frétilante, appelée aussi en huit.....	46
Figure (3.8) : Illustration d'une abeille en « Waggle dance »	46
Figure (3.9) : Le comportement d'une abeille lors du fourragement.....	48
Figure (3.10) : Le comportement d'une abeille lors du fourragement.....	49
Figure (3.11) : Organigramme de base de l'algorithme ABC.....	54
Figure (4.1) Positions des abeilles.....	57
Figure (4.2) :Fonction Objectif (fx).....	58
Figure (4.3) :Fonction Fitness (fx1).....	59
Figure (4.4) : fnc-obj pour M=0.1.....	61
Figure (4.5) : fnc-obj pour M=0.2.....	62
Figure (4.6) : fnc-obj pour M=0.5.....	62
Figure (4.7) : fnc-obj pour M=0.6.....	63
Figure (4.8) : fnc-obj pour M=0.7.....	63
Figure (4.9) : min fnc-obj pour M=0.8.....	64
Figure (4.10) Schéma de montage de la commande (SHE-PWM).....	65
Figure (4.11) Allure de la tension de sortie en fonction du temps M=0.5.....	65
Figure (4.12) Spectre d'harmonique de la tension (charge RLC) et THD pour M=0.5.....	66

Figure (4.13) Allure de la tension de sortie en fonction du temps $M=0.8$66

Liste des Tableaux

Tableau (1.1) : Caractéristiques des principales technologies photovoltaïques	6
Tableau (2.1) : l'ordre des harmoniques générés par certains types de convertisseurs.....	27
Tableau (3.1) Algorithme PSO.....	36
Tableau (3.2) : Analogie entre le neurone biologique et le neurone artificiel.....	42
Tableau (3.3) : Analogie entre les abeilles en nature et les abeilles en optimisation.....	47
Tableau (3.4) Structure de l'algorithme ABC.....	50
Tableau (3.5) : L'algorithme de colonies d'abeilles artificielles (ABC).....	53
Tableau (4.1) Valeurs des différents paramètres de ABC.....	57
Tableau (4.2) : Angles de commutation calculés basés sur PSO pour éliminer les harmoniques à $M= 0,5$	59
Tableau (4.3) : Angles de commutation calculés basés sur ABC pour éliminer les harmoniques 5, 7, 11, 13, 15, 19 et 23 à $M= 0,5$	60
Tableau (4.4) : Valeurs numériques des angles de commutation.....	61

Notations et abréviations

DC : Courant Continu

AC : Courant Alternatif

HMT : Hauteur Manométrique Totale

Q : Débit

MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion

PWM: Pulse Width Modulation

SPWM: Sinus Pulse Width Modulation

SHEPWM: Selective Harmonic Eliminated Pulse Width Modulation

SVM : Space Vector Modulation

MLP : Topologie multicouche

MAS : Moteur Asynchrone

MCC : Moteur à Courant Continu

MLI ESH : Modulation à Largeur d'Impulsion à Elimination Selective d'Harmonique

ABC : Artificiel Bee Colony

D'autres notations spécifiques vont être définies dans les chapitres, s'il y a lieu.

De nos jours, de nombreux actionneurs associant des machines à courant alternatif et des convertisseurs statiques manifestent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'entraînement à vitesse variable. Les progrès conjoints de l'électronique de puissance et de l'électronique numérique permettent aujourd'hui d'aborder la commande à vitesse variable dans des applications à faibles puissances. Avec l'apparition de composants interrupteurs rapides et le développement des technologies numériques de commande, il est possible de choisir une structure de commande beaucoup plus évoluée. Ainsi, on peut mettre en inscription des principes de contrôle permettant d'obtenir des performances équivalentes à celle de la machine à courant continu.

Pour obtenir une vitesse variable, ce moteur est alimenté à partir d'un onduleur MLI (Modulation à Largeur d'Impulsions). La sortie de ce dernier est variable en tension et en fréquence avec le rapport V/f constant pour maintenir le flux constant. Vu la présence d'harmoniques dans le signal de sortie dans ce genre d'onduleur, le fonctionnement du moteur sera accompagné de pulsations de couple et d'échauffement de celui-ci à cause des pertes. Les pulsations de couple sont très gênantes, surtout aux faibles vitesses. Pour pallier à ces inconvénients, on doit donc éliminer correctement les harmoniques. Autrement dit, on doit calculer les angles de commutation du signal MLI avec une plus grande précision.

La consommation excessive d'énergie et l'épuisement des ressources fossiles ainsi que la pollution et le réchauffement climatique, qui sont principalement causés par les véhicules à moteur à combustion, sont derrière l'intérêt récent donné par de nombreux chercheurs et de constructeurs de privilégier l'utilisation des énergies renouvelables. L'objectif principal est de permettre aux populations des pays en voie de développement qui n'ont pas un accès sûr à l'eau potable de pouvoir profiter de cette dernière. La solution pour atteindre ces objectifs est d'utiliser l'énergie solaire à travers des panneaux photovoltaïques pour alimenter le pompage d'eau. Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée "pompe au fil du soleil", utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Les moteurs des pompes solaires de petite puissance (petite HMT et faible débit journalier) sont généralement en courant continu. Cependant, ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompes solaires à cause de la

diminution du coût de l'onduleur, sa simplicité, sa robustesse et son faible coût, de ce fait il est nécessaire de développer des onduleurs de tension efficaces et à faibles coûts. En principe, pour commander la vitesse d'un moteur asynchrone il est nécessaire d'utiliser un onduleur de tension triphasé avec une sortie sinusoïdale variable en tension et en fréquence. Dans la pratique, les stratégies de commande produisent des harmoniques indésirables dans la sortie variable de l'onduleur de tension. Ces harmoniques ont de nombreux effets indésirables sur le fonctionnement du moteur, tels que l'échauffement du moteur qui est dû à l'augmentation des pertes et les pulsations de couple qui deviennent gênantes surtout aux faibles vitesses.

Une solution bien connue pour résoudre le problème des harmoniques indésirables est l'utilisation de la commande en modulation à largeur d'impulsion avec élimination sélective des harmoniques (SHE PWM). La commande (SHE PWM) qui a été initialement développée par Patel et Hoft offre plusieurs avantages par rapport à la commande (PWM) sinusoïdale classique (SPWM) : meilleure élimination des harmoniques indésirables, pertes de commutation moindres, la limite minimale de largeur d'impulsion peut être atteinte facilement et la sur-modulation est possible. Compte tenu de ces avantages, la commande (SHE PWM) pourrait être une alternative intéressante à la commande (SPWM).

Cependant, l'utilisation de la commande (SHE PWM) n'est pas évidente puisque le système d'équations utilisé pour calculer les angles de commutation est non-linéaire limitant cette stratégie de contrôle au calcul off-line en utilisant des techniques de calcul numériques telles que la méthode de Newton-Raphson. Cette dernière peut entraîner beaucoup de cycles d'itération si les valeurs initiales ne sont pas choisies correctement et dans certains cas la solution peut ne pas converger du tout. En supposant que tous les angles (SHE PWM) sont calculés off-line avec succès en utilisant une technique de calcul numérique ; ils sont ensuite stockés dans des mémoires (look-up tables) et appelés à chaque fois que la forme d'onde (PWM) doit être construite. Cette approche est connue sous le nom de commande (SHE PWM) programmée ou calculée. Bien que simple, elle nécessite une large mémoire pour stocker tous les angles calculés et atteindre une bonne précision. Pour un onduleur qui a une fréquence fixe et une tension de sortie fixe comme dans les applications utilitaires, l'utilisation de la commande (SHE PWM) programmée est acceptable. Cependant, dans des applications où la fréquence et la tension nécessitent des changements fréquents, comme dans une application de pompage photovoltaïque, l'utilisation de cette technique est difficile et pas efficace.

Cet inconvénient a poussé les chercheurs à explorer d'autres méthodes permettant le calcul des angles de commutation on-line et en temps réel ; évitant ainsi la nécessité d'une grande mémoire de stockage et le calcul off-line compliqué tout en améliorant les performances globales du moteur. Le travail le plus important a été publié par Taufiq et Al qui transforment le système d'équations non linéaires en un système d'équations linéaires en utilisant une approximation sinusoïdale. Avec cette méthode, le système d'équations d'angles de commutation (SHE PWM) est réduit à une forme linéaire.

L'objectif de ce travail est relatif à l'étude de la technique de commande des onduleurs à (SHE PWM) par la méthode d'optimisation par colonie des abeilles artificielles (ABC) pour la commande de vitesse du moteur (MAS) d'un pompage photovoltaïque.

Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé de la manière suivante :

- Dans Le premier chapitre, nous commençons par des généralités sur le pompage photovoltaïque et sur la machine asynchrone.
- Dans Le deuxième chapitre, nous allons étudier la technique de modulation à largeur d'impulsions avec élimination sélective d'harmoniques (SHE PWM).
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'algorithme d'optimisation par colonie des abeilles artificielles (ABC) avec quelques rappels sur des algorithmes comme (GA, ANN, PSO).
- Et le quatrième chapitre est consacré à la partie simulation et résultats du travail sous environnement Matlab.

Ce travail s'achève avec une conclusion générale qui résume tout le travail et qui donne une synthèse des différents résultats faites dans cette étude avec quelques perspectives.

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre jusqu'à les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majorité du territoire national, soit près de 1700KWh/m² /an au Nord et 2263 kWh/m² /an au Sud du pays.

L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante, et son utilisation offre un approvisionnement en énergie inépuisable. Etant donné que l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques et d'irrigation reste le souci quotidien des habitants des zones enclavées et sahariennes, les systèmes de pompage photovoltaïque sont particulièrement bien adaptés pour l'alimentation en eau à partir des puits ou des forages. Le pompage photovoltaïque est l'une des applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les sites isolées. Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. La première génération des systèmes de pompage solaires utilisée des moteurs à courant continu à aimant permanent, surtout pour les applications à des basses et moyennes hauteurs. Ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompage solaire à cause de sa simplicité, sa robustesse et sa fiabilité (cout & rendement).

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 [1].

Les techniques de commande d'entraînements du moteur asynchrone sont bien traitées dans la littérature. Dans la pratique, ces stratégies de commande produisent des harmoniques indésirables dans la sortie de l'onduleur. Une solution bien connue pour résoudre le problème des harmoniques indésirables est l'utilisation de la commande en modulation de largeur d'impulsion avec élimination sélective des harmoniques (SHE PWM).

1. Généralité et étude d'un système photovoltaïque

1.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire. L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P [2]

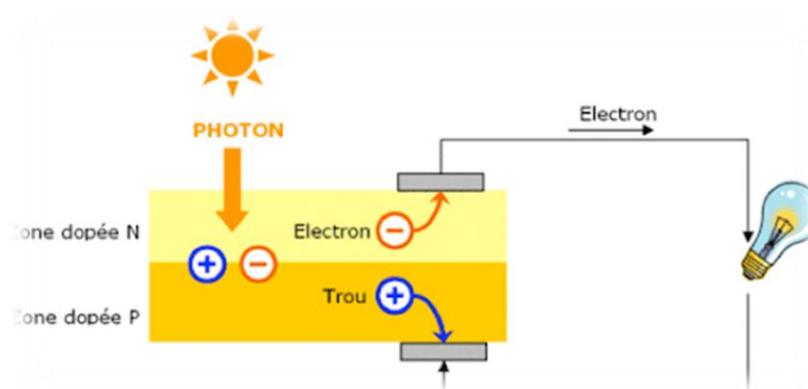


Figure (1.1) : Schéma d'une cellule photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens de cellules généralement à base de silicium cristallin. Le silicium est le matériau le plus utilisé dans la plupart des générateurs photovoltaïques.

Le tableau 1.1 cite les caractéristiques des principales technologies photovoltaïques.

Matériau	Rendement	Surface m/kWc	Caractéristiques
Silicium monocristallin	12 à 18 %	8	Très performant Stabilité de production
Silicium poly cristallin	11 à 15 %	10	
Amorphe	5 à 8 %	16	Fonctionne en faible luminosité.

Tableau (1.1) : Caractéristiques des principales technologies photovoltaïques

Avant d'installer un champ photovoltaïque et selon la situation géographique, l'inclinaison et l'orientation des panneaux est parmi les tâches préliminaires. Ensuite il faut éviter le maximum possible les conditions qui influencent sur le rayonnement tel que les grains de poussières, l'humidité, l'ombrage causée par les arbres ou par les immeubles. Par ailleurs le raccordement des panneaux en série permet d'augmenter la tension et celui en parallèle permet d'augmenter le courant.

A noté que le rayonnement est maximal lorsque les capteurs sont inclinés par un angle qui est égale à la latitude.

1.3 Constitution d'un système de pompage solaire

Les performances d'un système de pompage solaire de l'eau dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température, situation géographiques, ...), et des caractéristiques des équipements (rendement, durée de vie, ...). Le système de pompage photovoltaïque est constitué de voir Figure (1.2) :

1- Des panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent les rayonnements solaires en énergie électrique, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu.

2- Une unité de commande et contrôle de puissance, constituée d'un régulateur de charge, d'une batterie et un convertisseur(onduleur), capable d'assurer des tensions à amplitudes et fréquences réglables en fonction de la puissance disponible de générateur solaire.

- 3- Un groupe électropompe immergé, constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.
- 4- Un câblage électrique, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité.
- 5- Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau du puits, jusqu'aux points de distribution.

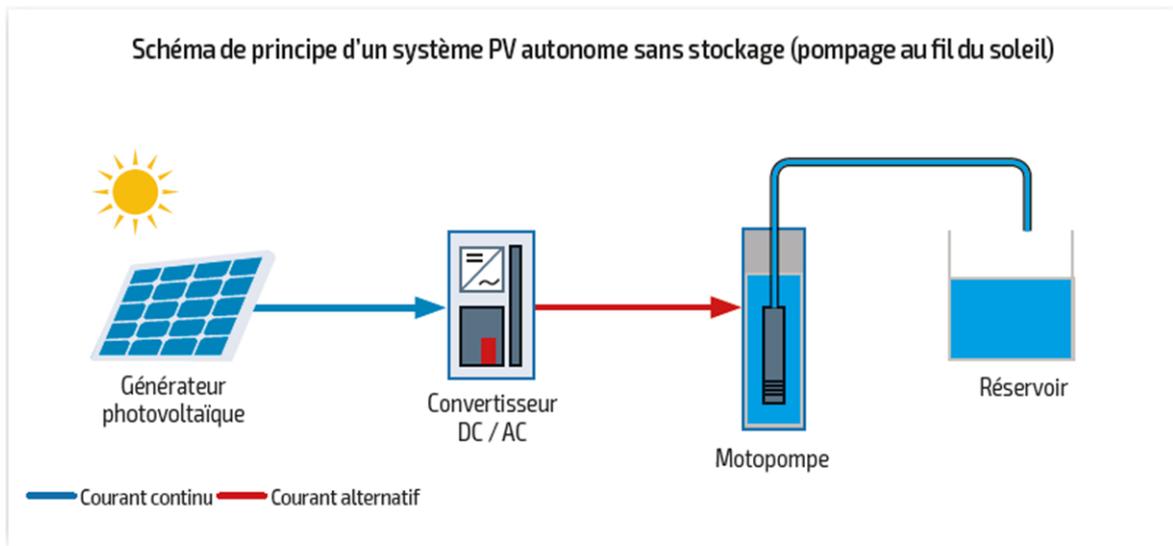


Figure (1.2) : Schéma d un système de pompage photovoltaïque

1.4 Groupe motopompe

1.4.1 Moteur

Les moteurs utilisés pour le pompage photovoltaïque sont des moteurs à courant alternatif mono ou triphasé ou à courant continu ou qui peuvent être immergés ou non immergés. Si le moteur est à courant continu, le couplage de générateur est direct. Lorsque le moteur est à courant alternatif il est nécessaire d'intégrer un convertisseur (DC-AC)

1.4.2 Pompe

Les pompes sont généralement choisies selon la hauteur manométrique totale du puits (HMT).

1.5 Types de pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement : elles sont soit de type volumétrique ou bien de type centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de

l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe à aspiration et pompe à refoulement.

- **Pompe centrifuge :** La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).
- **Pompe volumétrique :** La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.
- **Pompe de surface :** La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes de surface sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. [3]

1.6 Principe de fonctionnement

Les pompes peuvent être directement alimentées par les panneaux solaires pour un fonctionnement « au fil du soleil » dans ce cas le système est composé d'un ou plusieurs panneaux solaires photovoltaïques et de la pompe avec son contrôleur.

Les panneaux photovoltaïques génèrent sous le soleil un courant électrique qui alimente directement le contrôleur de la pompe. C'est le mode de fonctionnement le plus simple, le plus fiable et le plus économique.

Une citerne peut être placée en sortie de la pompe pour un stockage de l'eau permettant d'avoir une réserve utilisable même sans soleil. Les pompes peuvent aussi fonctionner en rajoutant des batteries. Dans ce cas un parc batterie est rajouté dans l'installation, ainsi qu'un régulateur de charge qui gère la charge des batteries. Les panneaux solaires chargent les batteries en journée et la pompe peut être utilisée pendant la nuit.

1.7 la pompe centrifuge :

La pompe la plus utilisée est : La pompe centrifuge

1.7.1 Présentation de la pompe centrifuge :

La pompe centrifuge qui est le type le plus utilisé dans le pompage photovoltaïque. La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe.

Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur.

La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à $Q \cdot HMT$, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [pompe]

Constitution de la pompe centrifuge :

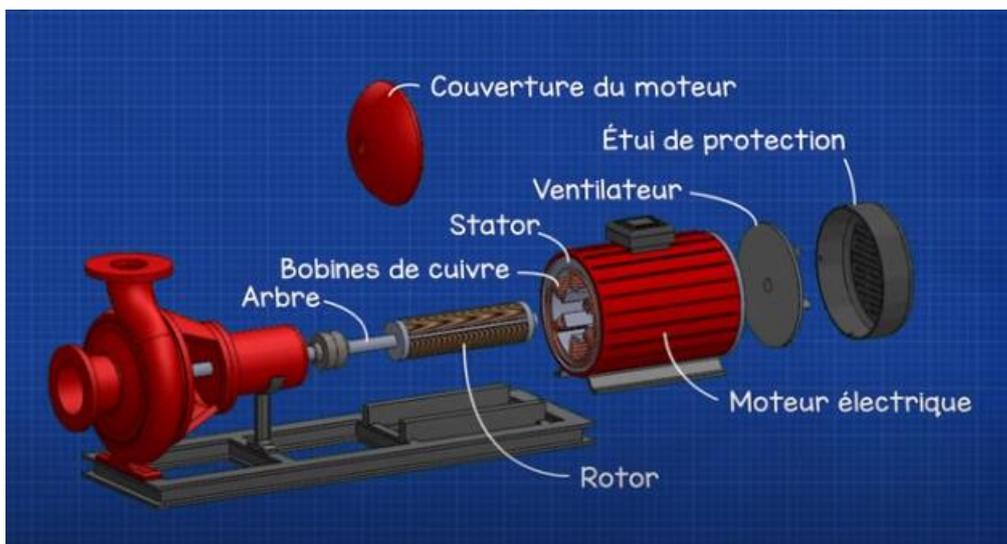


Figure (1.3) : constitution d'une pompe centrifuge

La pompe se compose de deux éléments essentiels :

Une roue qui impose au liquide un mouvement de rotation. Celle-ci est montée sur un arbre porté par des paliers et entraîné par un moteur. Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous plus haute pression. Le corps de pompe comprend une tubulure d'aspiration et une tubulure de refoulement, supporte les paliers et l'ensemble du rotor. [Constitution]

1.7.2 Fonctionnement de la pompe centrifuge :

La théorie du fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmentée, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique, cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenu dans une pièce placée à l'intérieur de la roue appelée limaçon, celle-ci se termine par une cône divergente .

1.7.3 Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 03 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse. Équations caractéristiques : D'une façon générale, les constructeurs de pompes ne donnent pas les paramètres physiques de la pompe. Seule la caractéristique de performance $H = f(Q)$ est donnée par le constructeur. Ainsi, connaissant les valeurs de la vitesse, hauteur de charge et débit de référence [modélisation pompe], il est possible de déterminer celles du système à l'aide des formules empiriques suivantes :

$$N_{sq} = \frac{1000 \left(\frac{N}{60}\right) \sqrt{Q}}{\left(\frac{g^{11}}{N_{ep}}\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (1.1)$$

$$Q = K_{sp} N (D_f)^3 \quad (1.2)$$

$$C_r = K_{sp} \cdot \omega^2 \quad (1.3)$$

Avec :

$$K_{sp} = \frac{P_m}{\omega^3} \quad (1.4)$$

N_{sq} : Vitesse spécifique du rotor

N_{ep} : Nombre d'étages de la pompe

H : Hauteur de charge effective en m

g : L'accélération de la pesanteur = 9.81 N/s²

ω : Vitesse de l'arbre en rad/s

Q : débit de la pompe en l/s

D_f : Diamètre du forage (ou du puits) en dm

K_{sp} : Constante

N : vitesse de l'arbre du rotor en tr/min

C_r : Couple résistant

1.8 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients

1.8.1 Les Avantages

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

1.8.2 Les Inconvénients

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 %. L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.

- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

1.2 La machine asynchrone

La MAS a de nombreux avantages par rapport aux autres types de machines électriques tournantes, parmi lesquelles nous pouvons citer : la robustesse, le prix relativement bas et l'entretien facile et moins fréquent. La MAS est aujourd'hui la plus utilisée dans les applications industrielles où la variation de vitesse, la haute précision de régulation et les hautes performances en couple sont requises. Cependant il faut noter que ces avantages ont longtemps été inhibés par la complexité de la commande due au couplage non linéaire existant entre le flux magnétique et le couple moteur. L'utilisation à grande échelle à l'heure actuelle est due à l'évolution technologique, notamment en matière de semi-conducteurs (MOSFET, IGBT, ...etc.) et circuits électroniques programmables (DSP, FPGA, etc.) [6].

1.2.1 Définition, constitution et principe de fonctionnement

Le moteur asynchrone, ou moteur à induction, est une machine électrique alimentée en alternatif. La robustesse, le faible coût, les performances et la facilité d'entretien font l'intérêt de ce moteur. Il est utilisé aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion de navires,) et dans l'industrie (machines-outils). Un moteur asynchrone est une machine à $2p$ pôles, alimentée à partir du réseau alternatif de fréquence f et qui ne tourne pas exactement à la vitesse synchrone N définie par :

$$N = f / p = \omega / 2\pi p \text{ [tr/s]} \quad (1.5)$$

Le moteur asynchrone est formé d'un stator, relié à la source triphasée, et d'un rotor constitué d'un enroulement polyphasé en court-circuit. Le stator crée un flux tournant à la vitesse angulaire synchrone :

$$\Omega = \omega / p. \quad (1.6)$$

Ce flux tournant balaie les enroulements du rotor et y induit des courants. L'interaction entre le flux statorique et les courants induits rotoriques crée le couple de rotation du rotor. Si

le rotor tournait à la même vitesse que le flux tournant, le flux à travers les enroulements du rotor ne varie plus et il n'y aurait plus de courants induits dans le rotor, donc il n'y aurait pas de couple. Cependant, à cause des forces de frottements, le rotor n'atteindra jamais la vitesse de synchronisme. En conséquence, 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 :

$$g = \frac{\Omega - \Omega'}{\Omega} = \frac{\omega - \omega'}{\omega} = \frac{N - N'}{N} \quad (1.7)$$

Avec : $N = \Omega / 2\pi$ et $N' = \Omega' / 2\pi$ (t/s)

1.3 Commande des moteurs asynchrones

On distingue deux types de commandes : les commandes scalaires et les commandes vectorielles. La commande scalaire est basée sur le modèle en régime permanent, elle est simple à implanter avec une dynamique lente. Elle contrôle les grandeurs en amplitude. La commande vectorielle est basée sur le modèle transitoire, elle est précise et rapide, elle permet le contrôle du couple à l'arrêt ; elle est cependant chère car elle requiert un encodeur incrémental ou un estimateur de vitesse, un DSP etc..... Elle contrôle les grandeurs en amplitude et en phase [7] et [8].

1.3.1 La commande scalaire

Plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension. Elles dépendent surtout de la topologie de l'onduleur utilisé (onduleur de tension ou de courant). Actuellement, l'onduleur de tension est le plus utilisé en petite et moyenne puissance avec une commande en V/f constant [7].

1.3.2 Contrôle en V/f constant

Son principe est de maintenir V/f constant, ce qui est équivalent à garder le flux maximal constant. Le contrôle du couple se fait par l'action sur le glissement.

En effet, d'après le modèle établi en régime permanent, le couple maximum s'écrit [7] et [9] :

$$T_{max} = \frac{3pV^2}{4\pi f (R_s + \sqrt{R_s^2 + [2\pi f (L_s + L_{re})]^2})^2} \quad (1.8)$$

Avec R_s et L_s respectivement la résistance et l'inductance du stator, L_{re} l'inductance du rotor ramenée au stator, p le nombre de paires de pôles, V la tension efficace d'entrée du moteur (d'une phase) et f est la fréquence de la tension d'alimentation.

Sachant que, dans l'équation, les paramètres R_s , L_s , p et L_{re} sont constants, alors le couple T_{max} est fonction seulement des variations de V et f .

En conséquence, pour faire varier la vitesse du MAS, il faut faire varier la fréquence et la valeur efficace des tensions d'alimentation conjointement. Le rapport V/f doit varier en fonction de la fréquence, de la façon suivante :

- Pour des fréquences en dessous de la fréquence nominale f_r , le rapport V/f doit être maintenu constant pour que le flux totalisé reste approximativement constant. Dans ce cas on obtient un couple de sortie maximum T_{max} constant. La tension d'entrée du moteur V devrait être à la valeur maximale V_r quand f est égale à la fréquence nominale f_r .
- Pour des fréquences supérieures à la fréquence nominale f_r , la tension V est maintenue constante à la valeur nominale V_r . Dans ce cas, le couple est proportionnel à $1/f^2$.

En effet, dans notre étude, on s'intéresse à la région située en dessous de la fréquence nominale f_r .

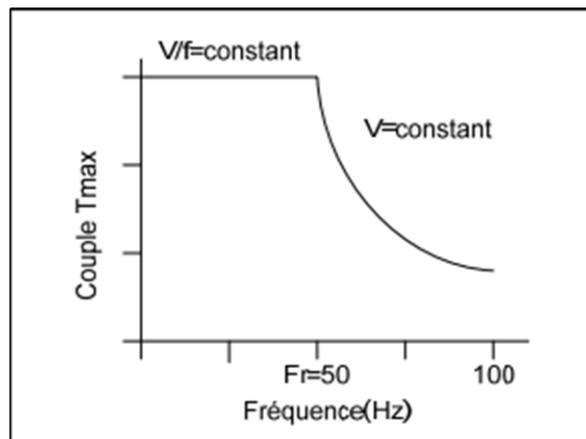


Figure (1.4) : Le couple moteur T_{max} en fonction de la fréquence avec le rapport V/f constant puis avec V constant

1.3.3 Contrôle du courant

Cette commande est appliquée dans un onduleur de courant. On impose directement des courants dans les phases de la machine. La valeur du courant I_d (courant continu) est égale, à une constante près, à la valeur efficace du courant imposé I_s . Cette valeur est imposée par régulation à l'aide d'un pont redresseur contrôlé.

Conclusion

Le pompage photovoltaïque au fil du soleil reste la technologie la plus utilisée car il utilise les réservoirs pour le stockage à la place des batteries et ça peut réduire le coût d'investissement.

La technologie photovoltaïque présente aujourd'hui d'énormes avantages par le fait que l'installation est simple et adaptée à des besoins énergétiques divers et les coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits. L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire. Le système de pompage photovoltaïque comporte également des systèmes de purification de l'eau basés sur l'injection de chlore. Le chlore est injecté à la sortie de la pompe juste avant l'entrée du réservoir.

Afin d'améliorer la qualité de la tension de sortie de l'onduleur, différentes stratégies de modulation de largeurs d'impulsions (MLI) ont été proposées. La plus connue est la stratégie triangulo-sinusoïdale, elle pousse les harmoniques vers les rangs élevés, en ayant recours à des porteuses de fréquence élevée. Pour les applications de moyenne tension, les composants de puissance sont limités en fréquence et en tension inverse. Pour remédier cet inconvénient, la technique de MLI par élimination sélective d'harmonique MLI-ESH est la plus adaptée, L'idée de cette dernière a été introduite pour la première fois par Trumbull en 1967 puis développée par Patel et Hoft en 1973. Cette technique permet l'annulation des harmoniques de bas ordre tout en contrôlant le fondamental et avec l'avantage d'une faible fréquence de commutation des composants de puissance.

La qualité de la tension de sortie des onduleurs dépend fortement de la technique de commande utilisée, plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer une tension de sortie ayant le moins d'harmoniques possibles, on rencontre plusieurs stratégies de commande, tels que la pleine onde, la MLI triangulo-sinusoïdale et la MLI-ESH.

La MLI-ESH est reconnue comme étant la plus performante et la plus utilisée pour les applications à faible nombre de commutation des interrupteurs de puissance ce qui a comme conséquence de l'amélioration de rendement de point de vue la durée de vie de l'onduleur.

L'objectif de MLI-ESH est de calculer les angles adéquats d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de l'onduleur, pour contrôler le fondamental et annuler les harmoniques indésirables. Pour calculer les angles de commutation il faut d'abord formuler un modèle mathématique de l'amplitude des harmoniques, basé sur la décomposition en séries de Fourier du profil de la tension souhaitée, on obtient un système d'équations à des termes trigonométrique.

2 Les onduleurs

2.1 Définition et principe

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés pour :

Fournir des tensions ou courants alternatifs avec une fréquence et une amplitude variable. Ces onduleurs servent à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner avec une vitesse variable.

Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. Ces onduleurs sont appliqués, en particulier, dans les alimentations de sécurité destinées à se substituer au

réseau en cas de défaillance de celui-ci. On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et on la trouve dans la plupart des systèmes industriels et dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [6].

2.2 Classification

2.2.1. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou d'autres semi-conducteurs. Dans ce cas nous commandons la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes : • Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue. • Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue. [10]

2.2.2. Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO. [10]

2.3 Types d'onduleurs de tension

2.3.1 Les Onduleurs monophasés

Ce type d'onduleurs est destiné à alimenter des charges alternatives monophasées, on distingue deux configurations de base : en demi-point ou en pont complet.

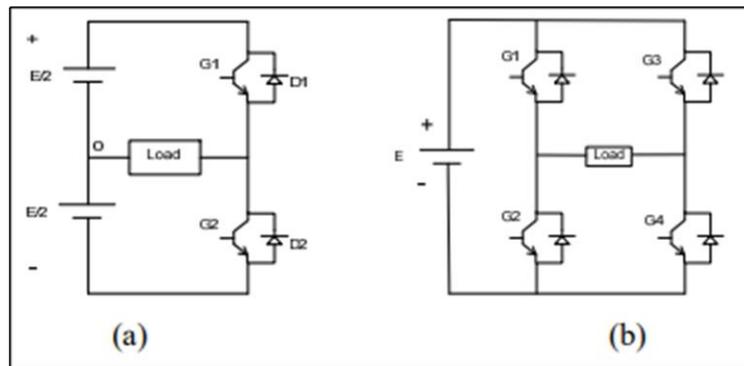


Figure (2.1) : Schéma des onduleurs monophasés : a- demi-pont, b- pont complet

Sous Matlab/Simulink l'onduleur utilisé pour simuler les différentes techniques de commande, il est représenté par la figure ci-dessous.

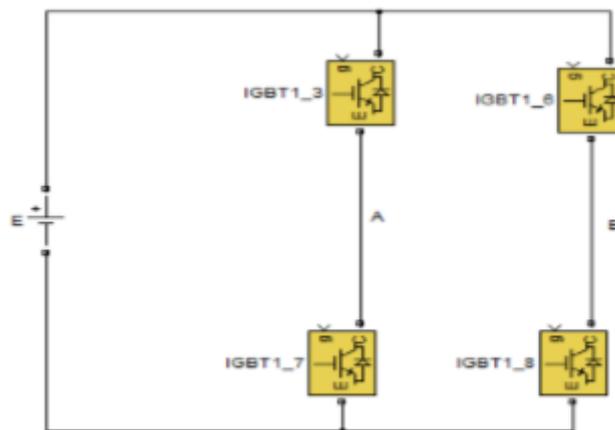


Figure (2.2) : Structure d'un onduleur monophasé sous Matlab

2.3.2 Les onduleurs triphasés

Les onduleurs monophasés sont utilisés pour des applications de faible puissance, alors que les onduleurs triphasés couvrent la gamme des moyennes et des fortes puissances. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables. Dans notre étude on a utilisé cette topologie. La figure (2.3) montre une MAS commandée par un onduleur triphasé [6].

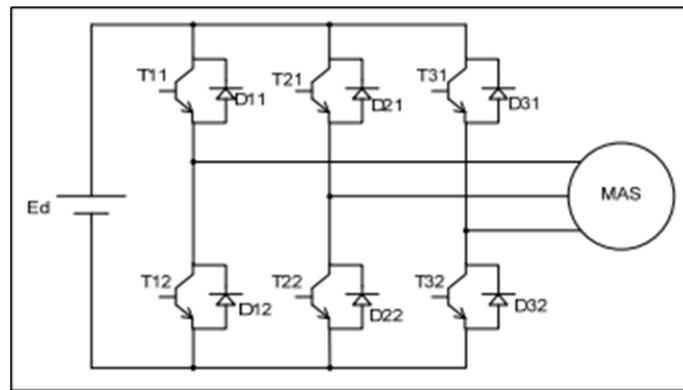


Figure (2.3) : Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension

2.3.3 Les onduleurs multi-niveaux

Par définition, l'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Dans la littérature on trouve plusieurs topologies multiniveaux, les plus utilisées sont la topologie à diode de bouclage, la topologie au condensateur flotteur et la topologie en cascade.

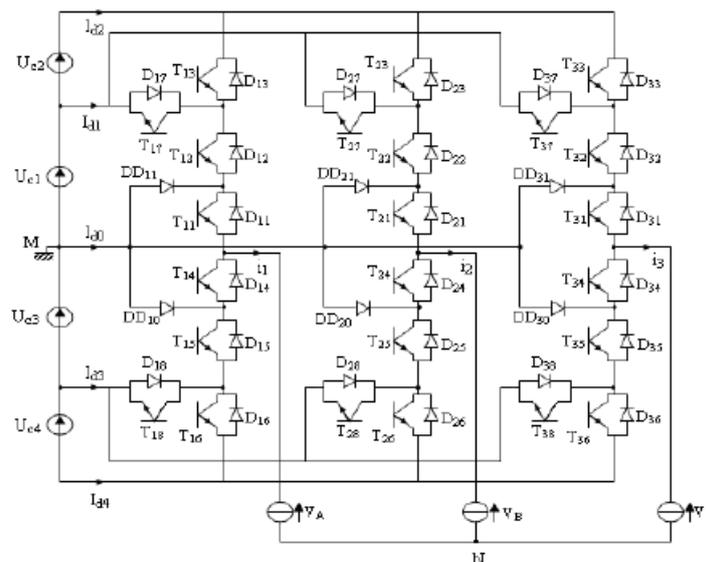


Figure (2.4) : Structure-generale-de-l'onduleur-a-cinq-niveaux.png

2.4 La commande des onduleurs

Le rôle de la fonction de commande est de déterminer les instants de commutation et les ordres de commande logique des interrupteurs afin d'obtenir une séquence de commutation de ces derniers. Le choix d'une stratégie de modulation peut s'effectuer en fonction des performances souhaitées par l'utilisateur. Toutes les stratégies ont des avantages et des inconvénients et peuvent être réalisées par programmation logicielle ou matérielle. Plusieurs

stratégies de commande des onduleurs ont été développées dans la littérature dont les principes consistent soit [7] et [8] :

- La génération des signaux de commande des interrupteurs de puissance par l'asservissement de la tension de sortie de l'onduleur à une référence de tension sinusoïdale : c'est la commande dite implicite, technique analogique telle que principalement la MLI engendrée, la modulation Delta.
- La détermination des instants de commutation des composants de puissance formant l'onduleur par le biais du développement en série de Fourier des formes d'onde souhaitées en sortie répondant à des critères bien définies (taux d'harmoniques, valeur du terme fondamental.). C'est la commande dite explicite où la commande des interrupteurs peut être analogique ou numérique telle que la technique de la Sortie Sinusoïdale Synthétisée ou la modulation programmée.

2.4.1 Commande symétrique

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180 °, Figure (2.5) Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K1 est fermé pendant une demi période (180°), et K'1 est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ par rapport au premier bras. Figure (2.5) :

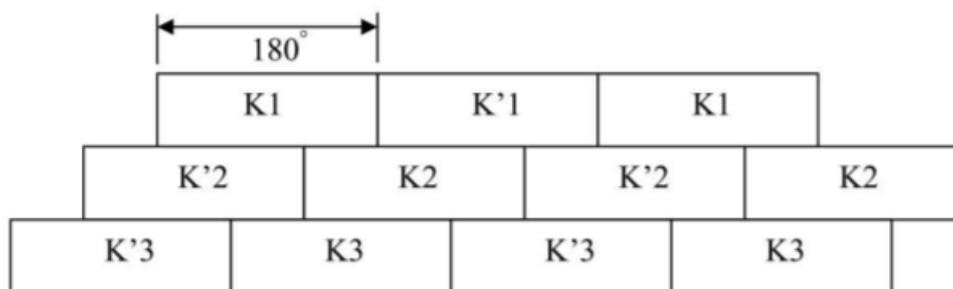


Figure (2.5) : Commande en pleine d'onde (symétrique)

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

2.4.2 Commande décalée

Dans ce cas, la Figure 2.6, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120° .

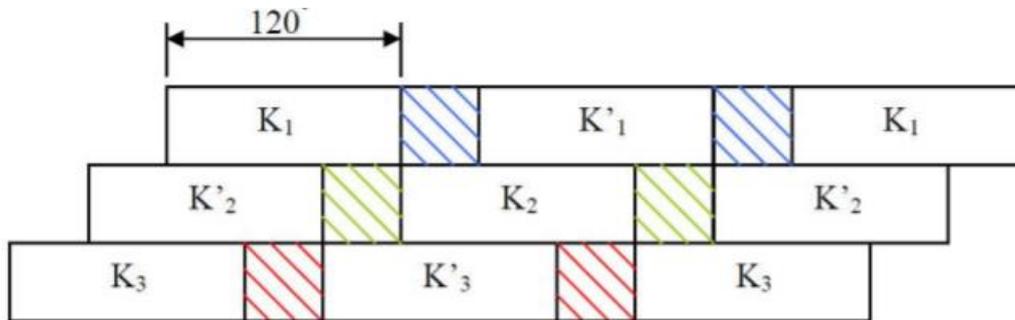


Figure (2.6) : commande décalée

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant 120° , telle que la séquence est K_1, K_2 puis K_3 successivement. De même pour les interrupteurs K'_1, K'_2 et K'_3 avec un décalage de 60° par rapport à K_1, K_2, K_3 . [10]

2.4.3 La commande MLI sinus-triangle

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes ; la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée ; appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie ; appelée référence, comme la figure (2.7) présente. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence). [24]

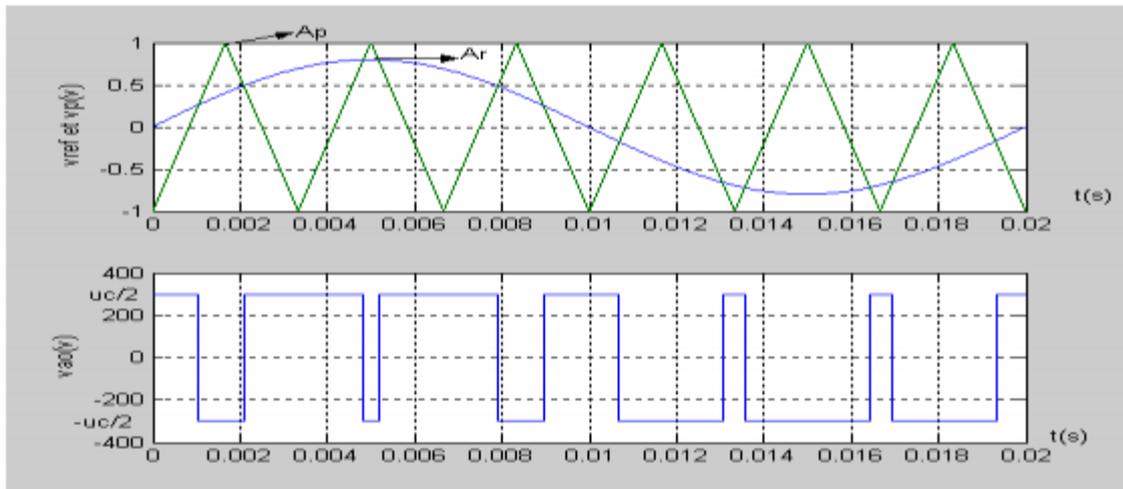


Figure (2.7) : La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle

2.5 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI)

- Les paramètres essentiels de la MLI sont :

- La fréquence de la modulation : f_p

- L'indice de modulation : $m = \frac{f_p}{f_r}$ ou f_r est la fréquence de la référence.

- Le coefficient de réglage en tension r : $r = \frac{A_r}{A_p}$

Avec :

A_r : Amplitude de la référence.

A_p : Amplitude de la porteuse.

La modulation montre que plus « m » est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de r la plus élevée possible [9].

- La modulation est dite synchrone si « m » est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie « U' » qui se reproduit identiquement à elle-même tout les $T = \frac{1}{f}$

- Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quant à la fréquence de modulation donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence. Pour le choix de « m », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente.

- On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à « 1 », car il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras. - Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire- sinusoïdale triphasé est donnée par la Figure (2.8).

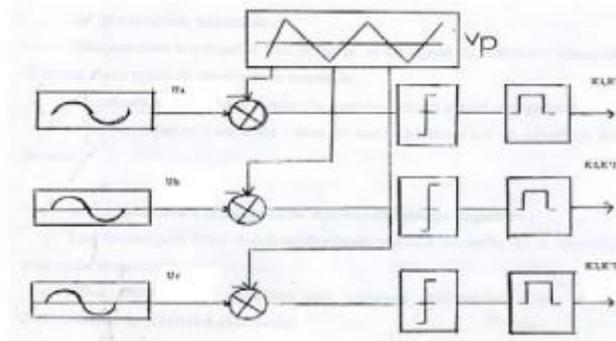


Figure (2.8) : Schéma synoptique de la commande en MLI (triphase)

Un générateur d'onde délivre l'onde triangulaire aux trois phases (porteuse commune), par contre la référence est propre à chaque phase, les trois références étant déphasées de 120° .

L'objectif de la technique (PWM) pour commander un onduleur de tension est d'avoir une réponse rapide et des performances élevées. Le choix de la technique dépend aussi du type de la machine à commander, du type des semiconducteurs, de la puissance mise en jeu et la simplicité ou la complexité d'algorithmes à implanter. Il existe plusieurs techniques (PWM). Une brève description de l'ensemble de ces techniques est résumée dans les paragraphes suivants.

a. 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.

b. 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.

c. 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. Parmi ces techniques on trouve la technique SHE PWM (selective harmonics elimination PWM) qui consiste à éliminer les premiers harmoniques et à contrôler le fondamentale. Cette technique sera détaillée dans la section suivante.

2.6 Les harmoniques électriques

L'énergie électrique est souvent distribuée sous forme de trois ondes de tension qui forment un système sinusoïdal triphasé. Une caractéristique de ce système est sa forme d'onde, qui doit toujours rester aussi proche que possible d'une onde sinusoïdale pure, et en raison des charges non linéaires connectées au réseau, ces signes deviennent comme la figure ci-dessous

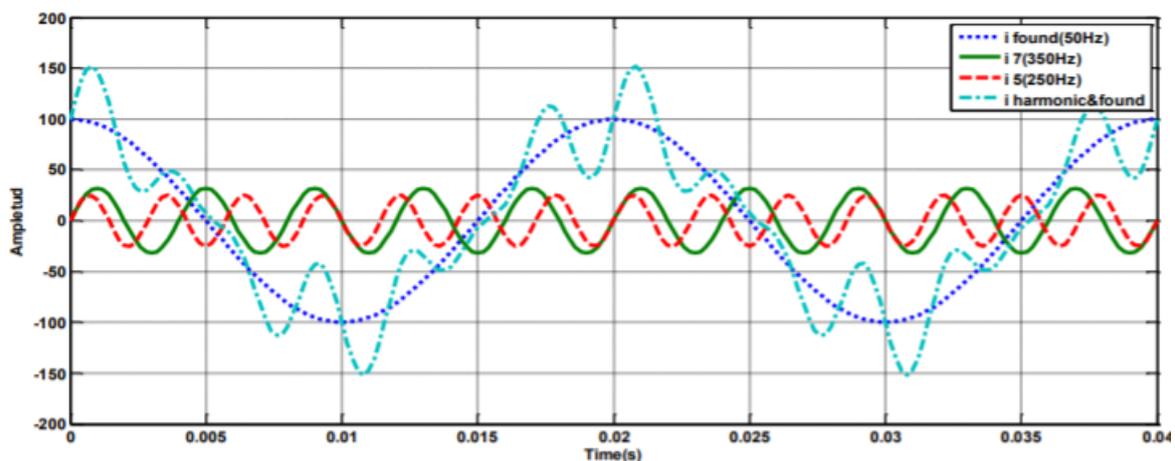


Figure (2.9) : Un signal déformé par la cinquième et la septième harmonique

Le signal déformé est constitué de la composante fondamentale du courant d'une fréquence de 50 Hz et d'un ensemble d'harmoniques de fréquences multiple de la fréquence fondamentale, Chaque harmonique est nommée en fonction de sa fréquence et non de sa quantité. Par

exemple, si nous disons harmonique 3, cela signifie que sa fréquence est de $3 * 50 = 150$ Hz, et si nous disons harmonique 5, cela signifie qu'il a une fréquence de $5*50 = 250$ hz et aussi pour le reste des harmoniques et il peut être décrit selon Fourier [1,2,5,4] par la relation : [11]

$$i(t) = I_{H1} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Hn} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2.1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{Hn} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2.2)$$

I_0 : L'amplitude de la composante continue est ordinairement nulle dans les fonctions périodiques alternées lorsque le signal est symétrique Par Rapport à l'axe du temps.

I_{Hn} : la valeur efficace des harmoniques d'ordre n.

I_{H1} : La valeur efficace de l'harmonique fondamentale.

$\omega = 2\pi f$: la fréquence angulaire de la composante fondamentale.

φ_1 : L'angle de déphasage entre les signaux de courant et de tension des composantes fondamentales.

φ_{n1} : L'angle de déphasage entre le courant du nième composé harmonique et la tension.

Les harmoniques sont généralement exprimées par un spectre harmonique, le diagramme du spectre d'amplitude est tracé avec des lignes verticales à chaque harmonique d ordre (n)

Pour que ces lignes représentent les amplitudes des harmoniques formées pour la fonction périodique et apparaissent sous forme de graphique comme sur la figure (2.10).

Ces diagrammes sont utilisés pour montrer l'effet de chaque harmonique, pour que nous masquons l'effet des harmoniques de grandes amplitudes indésirable en concevant des filtres pour compenser ces harmoniques.

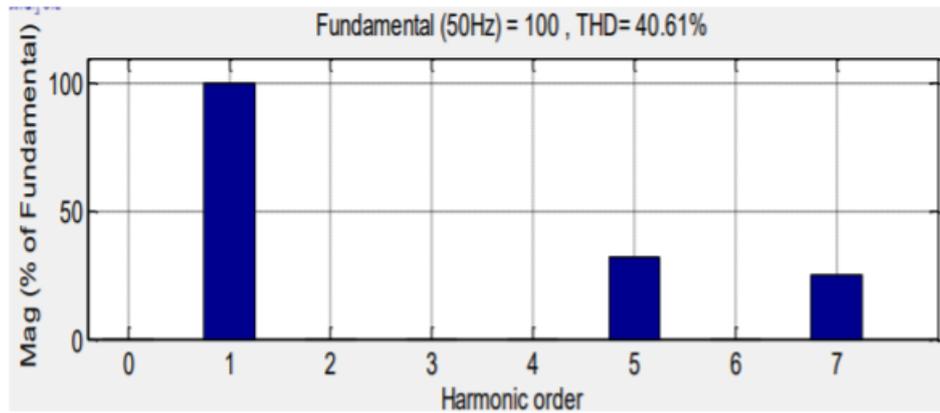


Figure (2.10) : Histogramme des harmoniques et du fondamentale

2.7 Causes des harmoniques

Les harmoniques apparaissent dans les systèmes d'alimentation électrique généralement en raison de la présence de charges **non linéaires** et ces charges sont complètement différentes des charges linéaires en ce qui concerne le courant qui les traverse n'aura pas de relation linéaire avec la tension à cette charge, comme nous le notons dans la figure (2.11) que l'onde de courant dans une charge linéaire est similaire à une forme d'onde Tension avec déphasage

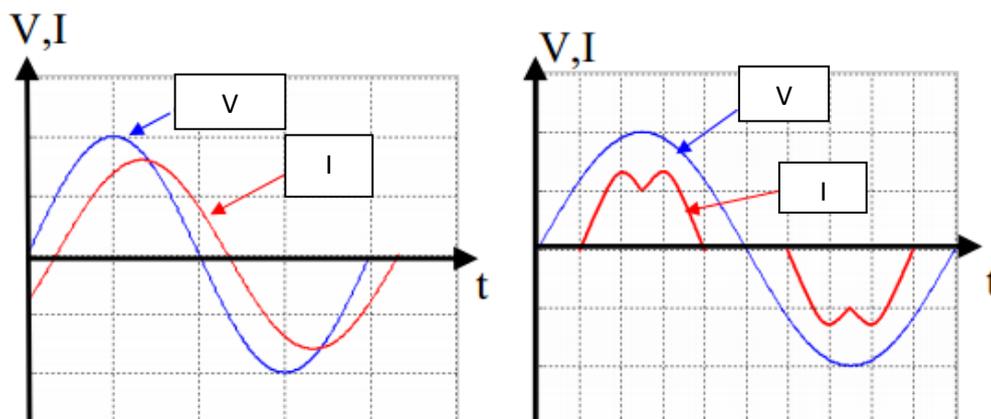


Figure (2.11) : courant et tension dan un charge linéaires et charge non linéaires

Parmi les sources les plus importantes d'harmoniques : régulateurs et commutateurs électroniques, équipement de soudage électrique, fours à arc Électricité, ampoules à gaz, transformateurs et moteurs électriques....

L'un des effets négatifs des harmoniques est le brouillage. Ondulation, vibration mécanique des moteurs, bruit et interférence dans les circuits Contrôle et de communications, panne de condensateurs, chauffage de transformateur, chauffage de câble, faux travail d'équipement de protection et l'avertissement.....

2.8 les harmoniques sur les convertisseurs

Les convertisseurs statique sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, qui peu de convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre, c'est-à-dire de la forme alternative à la forme continue ou le contrer, tous ses convertisseur produisent un courant avec des composantes harmoniques et l'ordre de ces harmonique varie d'un convertisseur a l'autre ou les rangs des harmoniques générés sont donnés avec la relation suivante : [12]

$$N=pk+1 \quad (2.3)$$

K : nombre entier positif supérieur à zéro

P ; Nombre d'impulsions de courant dans un seul cycle

A partir de la relation précédente, nous constatons que la troisième harmonique n'apparaît qu'avec les interrupteurs monophasés et n'apparaît pas avec les interrupteurs triphasés.

Le tableau montre l'ordre des harmoniques générés par certains types de convertisseurs électriques

L'ordre d'harmonique	Nombre de pulsation	Type de convertisseurs
2 ;3 ;4 ;5 ;6 ; 7...	1	Demi-onde
3 ;5 ;7 ; 9...	2	Pleine-onde
5 ;7 ;11 ;13 ;17 ;19	6	Triphasé pleine-onde
11 ;13 ;23 ;35 ;37	12	Triphasé pleine-onde (2)

Tableau (2.1) : l'ordre des harmoniques générés par certains types de convertisseurs électriques

2.9 Problèmes d'harmoniques :

Il y a plusieurs problèmes causés par les harmoniques de tension et de courant :

1 - Une résonance se produit entre les inductances et les condensateurs du réseau, ce qui conduit au passage d'un courant élevé pouvant provoquer le travail des relais et des disjoncteurs de protection et la séparation des parties du réseau sans aucune erreur.

2 - Réduire l'efficacité des appareils électriques tels que les transformateurs et les machines tournantes, cela est du a l'augmentation des pertes fer car elles sont directement proportionnelles au carré de la fréquence.³ Le passage d'un courant élevé dans le fil de liaison

dû aux harmoniques homopolaires. Parce que la somme vectorielle des courants homopolaires n'est pas égale à zéro, mais est égale à trois

4 - Diminution de la réactance des condensateurs en augmentant la fréquence et donc en augmentant le courant qui les traverse, ce qui peut entraîner leur endommagement

5 - Apparition de vibrations et de bruits, car le courant avec des harmoniques entraîne la production de forces dynamiques qui provoquent des bruits et des vibrations sonores, en particulier dans les dispositifs électromagnétiques tels que les transformateurs et les réacteurs.

6 - harmoniques de courant à séquence négative affectent sur le travail des générateurs et des moteurs car ils génèrent un flux magnétique qui tourne dans le sens inverse du mouvement, ce qui provoque une augmentation de la vitesse des générateurs et une diminution de la vitesse des moteurs.

7 - Les sous-harmoniques dans la gamme 30 Hz 1 Hz affectent l'éclairage dans les lampes à décharge de gaz, provoquant ce que l'on appelle (scintillement lumineux) ou scintillement lumineux, et cela est plus clair à une fréquence de 8,8 Hz, car l'œil humain est très sensible à cette fréquence

8 - Facteur de puissance faible en raison d'une défaillance des condensateurs de correction du facteur de puissance

9 - Perturbation du fonctionnement des systèmes de commande, des appareils de mesure et des relais qui dépendent de la fréquence de base de leur travail.

10 - conducteurs haute température

11 - Augmenter l'inductance des lignes de transmission et ainsi réduire la quantité de puissance maximale que la ligne peut transmettre, ce qui affecte négativement la stabilité du réseau

12 - Désactiver les appareils qui fonctionnent avec le microprocesseur

13 - Distorsion dans les ondes des systèmes de contrôle

14 - un chevauchement se produise dans les communications et les ordinateurs [12]

2.10 La technique SHE PWM

La technique de modulation par élimination d'harmoniques SHE PWM a été introduit pour la première fois par Turnbull en 1964 puis développé par Patel et Hoft. Cette technique consiste

à former l'onde de sortie d'une succession de créneaux de largeurs variables et contrôlables. Les angles de commutation sont déterminés de façon à éliminer certains harmoniques gênants dans l'onde de sortie. Améliorant ainsi le rendement du système onduleur-machine par la réduction des ondulations du couple, ainsi que des pointes de courant et des pertes dans la machine. Malgré la difficulté de calcul des angles de commutation, la technique (SHE-PWM) présente plusieurs avantages par rapport à la (PWM) engendrée à modulation sinusoïdale (SPWM). Meilleure élimination des harmoniques indésirables, pertes de commutation moindres, la limite minimale de largeur d'impulsion peut être atteinte facilement et la surmodulation est possible [6].

La MLI-ESH est reconnue comme étant la plus performante et la plus utilisée pour les applications à faible nombre de commutation des interrupteurs de puissance ce qui a comme conséquence de l'amélioration de rendement de point de vue la durée de vie de l'onduleur [13]

2.10.1 Principe de la MLI-ESH (SHE PWM) :

La mise en œuvre de la MLI-ESH nécessite d'abord d'imposer un profil de la tension, ensuite il faut extraire l'expression générale de l'amplitude du fondamentale et des harmoniques en fonction des angles de commutation α_i en se servant de la série de Fourier. La dernière étape consiste à calculer les angles de commutation par la résolution des systèmes d'équation non linéaires [14].

2.10.2 Série de Fourier

Le principe des séries de Fourier est introduit par Jean Baptiste Joseph Fourier. Les séries de Fourier sont des séries de fonctions périodiques. L'objectif est de décomposer un signal périodique en somme de sinus et de cosinus de fréquences égales et multiples de la fréquence du signal de base. Ceci peut être exprimé d'une manière mathématique par la relation suivante [15].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t) \quad (2.4)$$

Ou $n \in \mathbb{N}^*(1,2,3, \dots)$.

Les paramètres a_0 , a_n , et b_n sont dits : coefficients de Fourier.

Leur valeur donne des indications sur la nature du signal. On note aussi que f_0 est appelée la fréquence fondamentale et les multiples de $(2f_0, 3f_0, \dots)$ les fréquences harmoniques. La fonction $f(t)$ est donc une superposition continue de sinusoides dont les fréquences prennent leur valeur dans l'intervalle $[0, \infty]$.

Les coefficients $a_0, a_n,$ et b_n sont déterminés à partir des relations suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (2.5)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(2\pi f_0 t) dt \quad (2.6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(2\pi f_0 t) dt \quad (2.7)$$

Avec : T : la période du signal $f(t)$.

De l'équation, il est clair que le coefficient a_0 n'est autre que la valeur moyenne du signal $f(t)$ à décomposer.

2.10.3 La MLI par élimination sélective d'harmoniques Unipolaire (MLI ESH-U)

Au contraire de la stratégie précédente, la tension de sortie entre le point milieu d'un bras de l'onduleur et le point milieu de la source bascule entre les valeurs $(0, \text{ et } E \text{ ou } E \text{ et } 0)$ et $(0 \text{ et } -E \text{ ou } -E \text{ et } 0)$, ce qui donne une valeur crête-à-crête de cette tension égale à E .

Un avantage de cette stratégie par rapport à la MLI-ESH-B est qu'elle produit moins de perturbations électromagnétiques à cause de passage de la tension de sortie de la valeur E (0) à la valeur 0 $(-E)$.

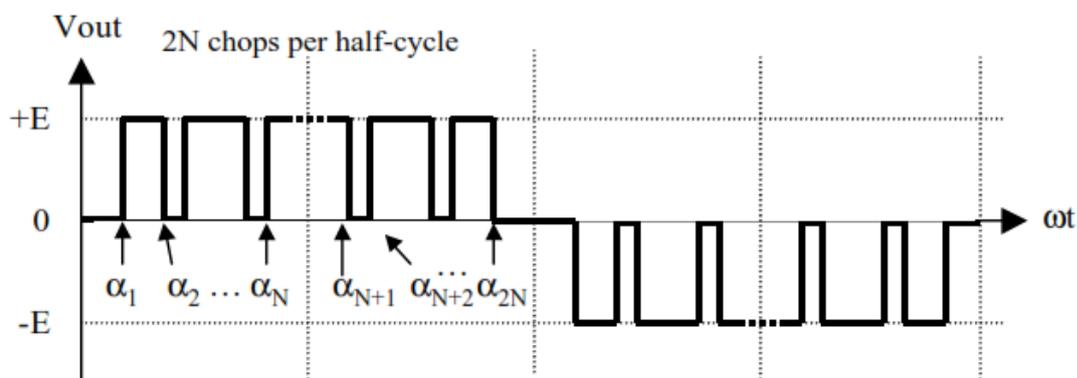


Figure (2.12) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (unipolaire)

Pour annuler (N-1) harmoniques et contrôler le fondamentale on a besoin de N angles α_i . La décomposition en série de Fourier de la tension ne contient que les harmoniques impairs en sinus. L'amplitude de l'harmonique de rang n est donnée par l'expression suivante :

$$a_n = \frac{4}{n \cdot \pi} \left[\sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n \cdot \alpha_i) \right] \quad (2.8)$$

Avec la contrainte sur les angles :

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_N \leq \frac{\pi}{2}$$

Comme exemple on considère que N=5

$$\begin{cases} a_1 = \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) - \cos(\alpha_4) + \cos(\alpha_5) - M = 0 \\ a_3 = \cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) - \cos(3\alpha_4) + \cos(3\alpha_5) = 0 \\ a_5 = \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) - \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5) = 0 \\ a_7 = \cos(7\alpha_1) - \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) - \cos(7\alpha_4) + \cos(7\alpha_5) = 0 \\ a_9 = \cos(9\alpha_1) - \cos(9\alpha_2) + \cos(9\alpha_3) - \cos(9\alpha_4) + \cos(9\alpha_5) = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

2.10.4 La MLI par élimination sélective d'harmoniques bipolaire (MLI ESH-B)

Pour cette stratégie, la tension de sortie entre le point milieu d'un bras de l'onduleur et le point milieu de la source bascule entre la valeur E et $-E$ ou $-E$ et E , donc la valeur crête-à-crête de cette tension est égale à $2.E$ figure (2.13)

Un inconvénient lié à cette stratégie est le problème des interférences magnétiques engendrées par le passage brusque de la tension de l'onduleur de la valeur $(-E)$ à la valeur (E) [8].

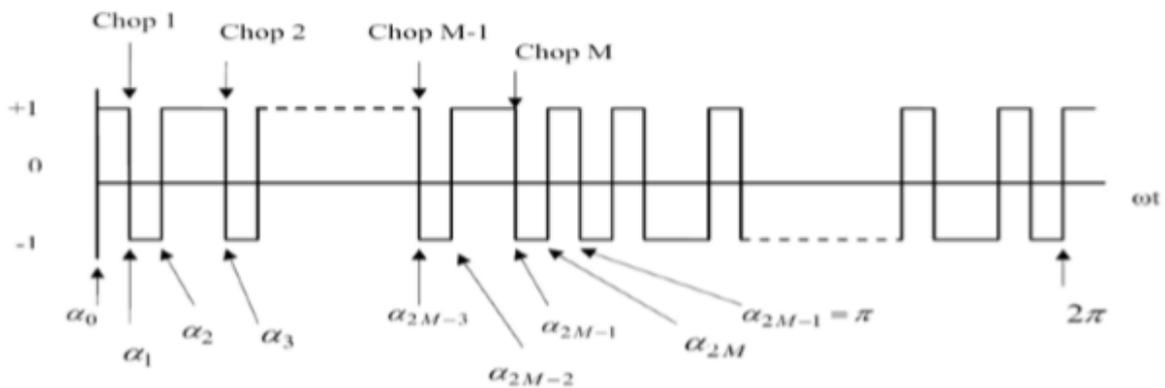


Figure (2.13) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (bipolaire)

Pour annuler (N-1) harmoniques et contrôler le fondamental, on a besoin de N angles α_i . La décomposition en série de Fourier de la tension ne contient que les harmoniques impaires en sinus, l'amplitude de l'harmonique de range n est donnée par l'expression suivante :

$$a_n = \frac{4}{n \cdot \pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^N (-1)^i \cos(n \cdot \alpha_i) \right] \quad (2.10)$$

Avec la contrainte sur les angles :

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_N \leq \frac{\pi}{2}$$

Comme exemple on considère que N=5

$$\begin{cases} a_1 = 1 + 2 \cdot (-\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) - \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_4) - \cos(\alpha_5)) - M = 0 \\ a_3 = 1 + 2 \cdot (-\cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) - \cos(3\alpha_3) + \cos(3\alpha_4) - \cos(3\alpha_5)) = 0 \\ a_5 = 1 + 2 \cdot (-\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) - \cos(5\alpha_3) + \cos(5\alpha_4) - \cos(5\alpha_5)) = 0 \\ a_7 = 1 + 2 \cdot (-\cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) - \cos(7\alpha_3) + \cos(7\alpha_4) - \cos(7\alpha_5)) = 0 \\ a_9 = 1 + 2 \cdot (-\cos(9\alpha_1) + \cos(9\alpha_2) - \cos(9\alpha_3) + \cos(9\alpha_4) - \cos(9\alpha_5)) = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Avec : $M = \pi \cdot r / 4$

Conclusion :

D'après ce chapitre, on conclut que les problèmes environnementaux et la consommation d'énergie sont derrière l'intérêt récent et croissant donné par de nombreux chercheurs et de constructeurs aux applications photovoltaïques. En raison de sa robustesse, entretien moindre, coût moindre par rapport à la puissance, la MAS est le meilleur choix possible pour ses applications photovoltaïques. Compte tenu de ses avantages, meilleure élimination des harmoniques indésirables, pertes de commutation moindres, la limite minimale de largeur d'impulsion peut être atteinte facilement et possibilité de la sur-modulation, la commande (SHE-PWM) semble être candidate idéale pour commander la vitesse d'une machine Asynchrone dans un pompage photovoltaïque. Cependant, le calcul des valeurs exactes des angles de commutation, lors de l'utilisation de cette technique, exige la résolution d'un système de n équations non linéaires à n inconnues.

Dans ce mémoire, on propose l'algorithme basé sur la théorie d'optimisation par colonies d'abeille (Artificiel Bee Colony (ABC)) et la commande (SHE-PWM) permettant de calculer les angles de commutation et générer les signaux de commande PWM on-line et en temps réel. Vu que l'algorithme proposé est basé sur l'optimisation des colonies d'abeille, on a jugé utile d'introduire un chapitre pour expliquer le principe de cette théorie.

Dans la nature, plusieurs espèces sont caractérisées par le comportement social. Les bancs de poissons, les nuées d'oiseaux, et les troupeaux d'animaux terrestres, sont le résultat du besoin biologique qui leur pousse à vivre en groupe.

Ce comportement est également une des principales caractéristiques des insectes sociaux (abeilles, termites, fourmis...). De ces principes-là, les chercheurs se sont inspirés pour développer des méthodes basées sur les comportements de ces animaux, et ont donné naissance à ce que l'on appelle par **Métaheuristique**.

Ce mot concerne toutes les méthodes qui modélisent l'interaction des agents (animaux) qui sont en mesure de s'auto-organiser. Elles représentent des méthodes de résolution de problèmes combinatoires qui consistent à répéter certains processus jusqu'à obtenir la solution optimale.

L'une des insectes les plus organisées et les plus rigoureuses dans leur travail est l'**abeille**. Les abeilles possèdent une très grande capacité de communication. Et grâce à son intelligence, une méthode appelée méthode des abeilles a été développée. Dans cette méthode, les abeilles artificielles représentent des agents qui en collaborant les unes avec les autres, résolvent des problèmes complexes d'optimisation combinatoire.

On tire de cette information l'idée de base de cette méthode : créer un système multi agent capable de résoudre avec succès les problèmes complexes.

L'optimisation par colonie d'abeilles est une famille très récente des métaheuristicques. Son principe est basé sur le comportement des abeilles réelle dans la vie. Cette approche de résolution fait l'objet de notre étude.

3.1 Problèmes d'optimisation

Dans la majorité des cas, les problèmes technologiques, comme le dimensionnement des circuits intégrés analogique, peuvent être formulés sous forme d'un problème d'optimisation, dans lequel on définit les fonctions objectifs qu'on cherche à maximiser ou à minimiser. Ces fonctions sont souvent soumises à des contraintes qui doivent être accomplies afin qu'une ou plusieurs solutions soient retenues. Selon le nombre d'objectifs qu'on cherche à optimiser, on distingue deux sortes de problème d'optimisation : une optimisation mono-objectif et une optimisation multi-objectifs.

3.2 Les méthodes d'optimisations approchées

3.2.1 Heuristiques

Le mot heuristique vient du grec eurisko qui signifie « je trouve » d'où le célèbre Eureka d'Archimède. Contrairement aux algorithmes exacts ou aux algorithmes d'approximation, une

heuristique, ou méthode approximative, est un algorithme approché qui fournit rapidement (en temps polynomial) une solution réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation. Une méthode heuristique est généralement conçue pour un problème particulier, en s'appuyant sur sa structure propre [16]

3.2.2 Métaheuristiques :

Les métaheuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes Génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essais particuliers). Ces techniques métaheuristiques peuvent être classées en deux groupes : les méthodes à population de solutions connues sous le nom d'algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétiques...etc., ainsi que les méthodes à solution unique comme le recuit simulé. Les méthodes métaheuristiques ont prouvé leurs efficacités dans le domaine de l'optimisation mono-objectif. Actuellement les recherches qui utilisent ces algorithmes sont développées pour la résolution des problèmes d'optimisation multi objectif, en tenant compte de plusieurs contraintes et de nouvelles configurations des réseaux électriques surtout à l'associations de sources des énergies renouvelables où la résolution de ce system complexe est un défi.

3.3 Optimisation par essaim de particules

La méthode d'optimisation par essaim de particules PSO est une méthode d'optimisation fondée sur une population stochastique de points initialement repartis sur un domaine de recherche. Cette méthode a été publiée la première fois par Kennedy et Eberhart en 1995 [17]. Elle s'inspire fortement des relations grégaires des oiseaux migrateurs qui doivent parcourir des longues distances et qui doivent donc optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, comme par exemple la formation en V.

3.3.1 L'algorithme PSO :

L'algorithme PSO génère un essaim de particules dont chaque membre est une solution éventuelle du problème d'optimisation. Cet essaim vole dans l'espace de recherche et chaque membre de celui-ci est attiré par sa meilleure solution et celle de ses voisins. Chacune de ces particules est dotée [18] :

- D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition.

- D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale [18].

- D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère.

A tout instant, chaque particule connaît :

- Sa meilleure position visitée. On retient essentiellement la valeur du critère calculée ainsi que ses coordonnées

- La position du meilleur voisin de l'essaim qui correspond à l'ordonnement optimal.

- La valeur qu'elle donne à la fonction objectif car à chaque itération il faut une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

Dans les algorithmes d'optimisation PSO, les membres de la population (particules) se déplacent sur l'espace de recherche comme suit [19] :

$$v(m+1) = v(m) + a(m+1) \quad (3.1)$$

$$X(m+1) = x(m) + v(m+1) \quad (3.2)$$

Où a ; v ; x et t sont l'accélération, la vitesse, la position et le temps (compteur d'itérations), Respectivement. Les particules possèdent une mémoire des meilleurs (par rapport à une fonction objectif) endroits qu'elles ont visités dans le passé ; leurs meilleures positions personnelles ou p_{best} et de leurs valeurs de la fonction coût <fitness> meilleur emplacement de toute autre particule de leur voisinage, habituellement désigné comme le meilleur voisinage ou g_{best} meilleur des meilleurs endroits dans son voisinage. Chaque particule partage des informations avec toutes les autres particules dans l'essaim fin qu'il y ait un seul meilleur attracteur global g_{best}

Dans l'ensemble, l'accélération de la i ème particule dans l'équation (3.3) est donnée par [35] :

$$\alpha_i = \gamma [c\delta_1(P_g - X_i) + c\gamma_2(P_i - X_i)] - (1 - \gamma)v_i \quad (3.3)$$

Où δ_1 et δ_2 sont des vecteurs de nombres aléatoires tirés de la distribution uniforme sur [0 ; 1], $c > 2$ est la constante de rappel et p_i et p_g sont les attracteurs personnels et global respectivement. Cette formulation de la dynamique des particules souligne le resserrement comme une force de frottement, de sens opposé et proportionnelle à la vitesse.

Les valeurs standard sont : $c = 2.05$ et $\gamma = 0,729843788$ [35].

Structure algorithmique :

L'algorithme complet PSO pour optimiser une fonction objectif f se résume comme suit :

Pour chaque particule i

Initialiser aléatoirement $v_i, x_i = p_i$

Evaluer $f(p_i)$

$p_g = \operatorname{argmax}f(p_i)$

Répéter

Pour chaque particule i

Mettre à jour la position des particules x_i selon les équations (3.1), (3.2) et (3.3)

Evaluer $f(p_i)$

Mettre à jour la meilleure position personnelle

***si* $f(x_i) > f(p_i)$ Alors**

$p_i = x_i$

Mettre à jour la meilleure position globale

***si* $f(x_i) > f(p_g)$ Alors**

$p_g = \operatorname{argmax}f(p_i)$

Jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint

Tableau (3.1) Algorithme PSO

3.4 L'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques (Genetic Algorithm GA) sont des algorithmes d'optimisation inspirés de la théorie de l'évolution des espèces de Charles Darwin. Les premiers travaux de John Holland remontent aux années 1960 et ont trouvé un premier aboutissement en 1975 avec la publication de « Adaptation in Natural and Artificial Systems ». C'est cependant l'ouvrage de David Goldberg qui a largement contribué à développer les algorithmes génétiques. Un algorithme génétique est basé sur une population d'individus dont chacun est une solution candidate du problème. Chaque solution doit être codée. Cette représentation codée est appelée chromosome, et est composée de gènes. Le degré d'adaptation d'un individu à l'environnement est exprimé par la valeur de la fonction coût (fonction objectif) correspondante. La taille de la population reste constante tout au long de l'algorithme génétique. La recherche de la solution est réglée par trois opérateurs qui sont appliqués successivement. La phase de coopération est gouvernée par un opérateur de sélection et un opérateur de croisement alors que la phase d'adaptation individuelle fait appel à un opérateur

de mutation. La création d'une nouvelle génération est obtenue par itération de l'algorithme génétique qui va créer de nouveaux individus et en détruire d'autres (mécanisme de sélection naturelle) ce qui permet le renouvellement de la population (l'ensemble des solutions courantes). L'exploration de l'espace de recherche est alors réalisée par les opérateurs de mutation et assure la diversification des individus de la population (et donc des solutions). L'exploitation, quant à elle, est assurée par les opérateurs de croisement, qui recombinent les solutions, afin de les améliorer en conservant leurs meilleures caractéristiques [19].

3.4.1 Principe de l'algorithme

Les algorithmes génétiques sont la combinaison de deux domaines la biologie et l'informatique. Pour définir le fonctionnement d'un algorithme génétique, on commence par définir les mots techniques utilisés :

Genèse : c'est la première phase de l'algorithme, il s'agit d'une population initiale de taille N.

Chromosome : c'est une chaîne représentant les caractéristiques de l'individu.

Phénotype : c'est un ensemble de paramètres ou une structure décodée.

Evaluation : c'est la phase de calcul de la fonction de fitness.

Sélection : c'est le choix des individus qui vont se reproduire.

Croisement : c'est la phase de production des descendants.

Mutation : c'est la modification d'un chromosome dans le but d'améliorer les caractéristiques de l'individu.

➤ L'algorithme se compose de cinq étapes

1. Initialisation de la situation.
2. Sélection pour la reproduction
3. Croisement des individus sélectionnés
4. Mutation des individus sélectionnés
5. Sélection pour le remplacement
6. Si la condition d'arrêt est vérifiée STOP, $S = \{\text{les meilleurs individus}\}$ Sinon retour à l'étape (2)

➤ **Elitisme**

A la création d'une nouvelle population, il y a de grandes chances que les meilleurs chromosomes soient perdus après les opérations d'hybridation et de mutation. Pour éviter cela, on utilise la méthode d'élitisme. Elle consiste à copier un ou plusieurs des meilleurs chromosomes dans la nouvelle génération. Ensuite, on génère le reste de la population selon l'algorithme de reproduction usuel. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de ne pas perdre les meilleures solutions.

➤ **Opérateurs de croisement**

Le croisement consiste à générer deux enfants à partir de deux parents avec une probabilité P_x appelé probabilité de croisement ceci dans le but d'enrichir la diversité de la population. Les opérateurs sont de deux types ; croisement par point et croisement bipoint.

➤ **Opérateur à un point**

Il consiste à diviser chacun de deux parents en deux parties à la même position, choisie au hasard. Le premier enfant est composé de deux parties des deux parents. La première partie est celle du premier parent et la deuxième partie est celle du deuxième parent et le deuxième enfant est composé de deux parties, une première partie du deuxième parent et la deuxième partie du premier parent.

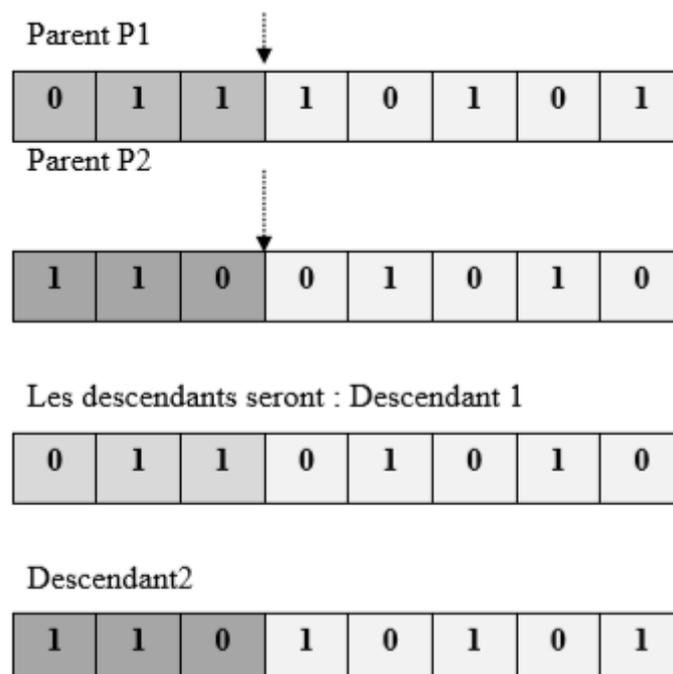


Figure (3.1) : Croisement 1-point

➤ Opérateur à deux points

Cette méthode consiste à fixer deux positions, le premier enfant sera la copie du premier parent en remplaçant sa partie entre les deux positions par celle du deuxième parent. La même opération sera appliquée pour déterminer le deuxième enfant en inversant les rôles du premier parent et du deuxième parent.

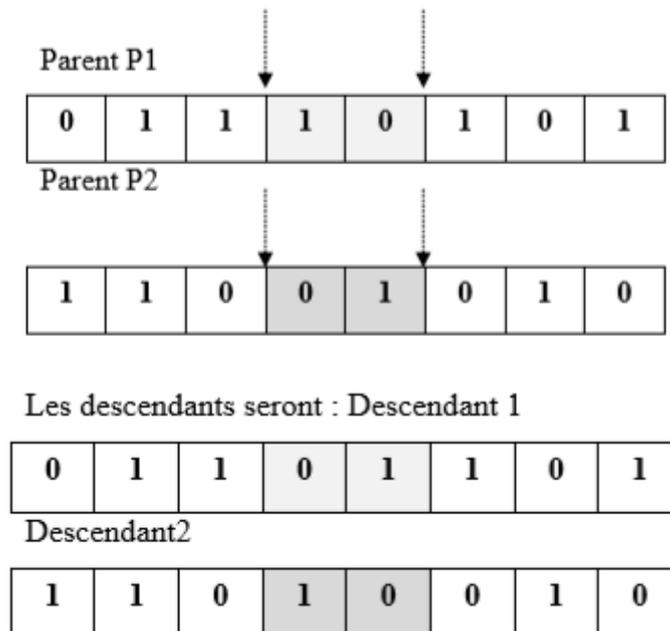


Figure (3.2) : Croisement 2-points

➤ Opérateur de mutation

Conformément à la mutation naturelle, Cet opérateur permet de changer la valeur d'un chromosome dans le but d'améliorer les caractéristiques de l'individu. Elle permet à l'algorithme génétique d'explorer efficacement l'espace de recherche. Il garantit aussi une susceptibilité d'atteindre la plupart des points du domaine réalisable.

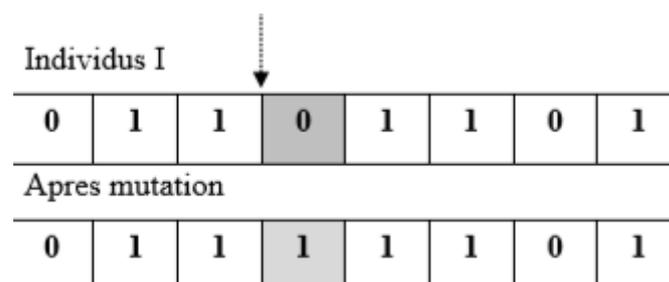


Figure (3.3) : Mutation

Algorithme I.2 : Pseudo-code d'un algorithme génétique

Initialiser la population de NAG chromosomes aléatoirement;

Evaluer la fitness (χ_i) de chaque individu (chromosome);

Nouvelle population créer une nouvelle population en répétant les étapes suivantes jusqu'à l'accomplissement de la nouvelle population :

Sélection sélectionner deux chromosomes parents à partir de la population en fonction de leur fitness (la meilleure fitness a une grande chance d'être sélectionnée);

Croisement Croiser les parents pour former des enfants;

Mutation avec une probabilité de mutation, muter les nouveaux individus (enfants);

Remplacement utiliser la nouvelle population générée pour une future génération de l'algorithme;

Tester si le critère d'arrêt est atteint, stopper;

Boucle revenir à l'étape d'évaluation de fitness

3.5 Les réseaux neurones artificiels

L'arrivée des ordinateurs permet à l'homme d'effectuer diverses tâches avec deux capacités : la rapidité et la précision. Cependant l'exécution d'une tâche par un ordinateur nécessite sa programmation préalable par l'homme. Cette caractéristique fait apparaître les ordinateurs comme des machines exécutant des ordres. La poursuite de construire des machines ressemblant à des humains intelligents, capables d'apprendre, de raisonner et de réfléchir sans intervention, a mené à la naissance de réseaux de neurones artificiels (ANN). Ce sont des recherches basées sur le fonctionnement du cerveau qui ont constituées le point de départ. Ensuite, des recherches en neurobiologie ont montré que le cerveau est constitué d'un nombre extrêmement élevé d'unités de traitement élémentaire de l'information, les neurones biologiques, fortement interconnectées. En conséquence, les réseaux de neurones artificiels sont inspirés de l'étude du système nerveux et leur fonctionnement imite celui des réseaux de neurones biologiques. Après l'arrivée de cette technique, beaucoup de travail basé sur des

simulations dans l'ordinateur a démontré la capacité des ANN de mapper, modéliser, et de classer les systèmes non linéaires. Les caractéristiques particulières des ANN telles que la capacité d'apprentissage à partir des bases de données, les adaptations, le parallélisme, la robustesse au bruit, et la tolérance aux défauts ont ouvert leur application à divers domaines de l'ingénierie, la science, l'économie, etc. [6].

Pour cette partie on présente des généralités sur les réseaux de neurones artificiels. Au début, on montre un bref historique sur le développement de cette technique. Après, on explique rapidement les bases biologiques dont elle est originaire. Ensuite, on présente le modèle mathématique d'un neurone artificiel et les différentes topologies des réseaux de neurones artificiels. Par la suite, on décrit l'étape d'apprentissage qui est l'étape la plus importante dans le développement d'un modèle ANN. Enfin, on cite les différents domaines d'application des ANN.

3.5.1 Le neurone biologique

Avant de commencer la présentation des réseaux de neurones artificiels, on a jugé utile d'introduire une section pour expliquer très brièvement les bases biologiques dont ils sont originaires. Le neurone est le processeur élémentaire du cerveau, chaque neurone traite l'information qui lui parvient localement, puis transmet aux autres neurones qui lui sont connectés l'information qu'il a traitée ; ces cellules peuvent apprendre en changeant l'intensité de leurs connexions avec d'autres cellules ou détruire ou même créer de nouvelles connexions, elles peuvent aussi changer leurs règles de traitement de l'information. Ce processus de changement est appelé apprentissage et joue un rôle fondamental dans le comportement du neurone [6]. D'après la figure (3.4), nous pouvons constater que le neurone est composé des parties suivantes :

Le Corps Cellulaire : Il contient le noyau de neurone et effectue la transformation biochimique nécessaire à la synthèse des enzymes et d'autres molécules qui assurent la vie de neurone. Sa forme est pyramide ou sphérique dans la plupart des cas.

Les Dendrites : Chaque neurone possède une chevelure de dendrites celle-ci est de fines extensions tubulaires de quelques dizaines de micros. Elles sont les récepteurs principaux d'un neurone pour capter les signaux qui lui parviennent.

L'axone : L'axone sert de moyen de transport pour les signaux émis par le neurone. En effet il est généralement plus long que la dendrite.

La synapse : Représente la jonction entre un axone et une dendrite.

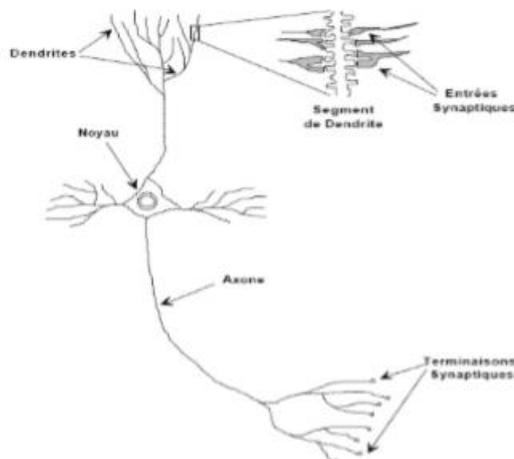


Figure (3.4) : Représentation d'un neurone biologique

3.5.2 Le modèle Mathématique d'un neurone artificiel

Dans la section précédente on a montré la structure de base d'un neurone biologique qui est l'origine d'un neurone artificiel. En se basant sur cette structure, en 1943, MCCulloch et Walter Pitts ont inventé le neurone formel qui symbolise le modèle mathématique simplifié du neurone biologique [6]. Ces deux chercheurs montrèrent que des réseaux de neurones formels simples peuvent théoriquement réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes. Le tableau (3.2) montre la correspondance entre le neurone biologique et le neurone artificiel. De plus la figure (3.5) représente le modèle mathématique d'un neurone artificiel.

Neurone biologique	Neurone artificiel
Corps cellulaire (Somma)	Fonction d'activation
Axones	Signal de sortie
Synapses	Poids synaptiques (connexions)
Dendrites	Signal d'entrée

Tableau (3.2) : Analogie entre le neurone biologique et le neurone artificiel

Comme il est illustré sur la figure III.3.2, chaque neurone est un processeur élémentaire qui reçoit un nombre variable d'entrées x_i en provenance des neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w . Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique y ,

qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. En conséquence, le neurone formel est un processeur élémentaire qui réalise une somme pondérée des entrées. La valeur de cette sommation est comparée à un seuil et la sortie de ce réseau est une fonction en générale non linéaire donnée par l'équation (3.4), cette fonction est appelée fonction d'activation.

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta\right) \quad (3.4)$$

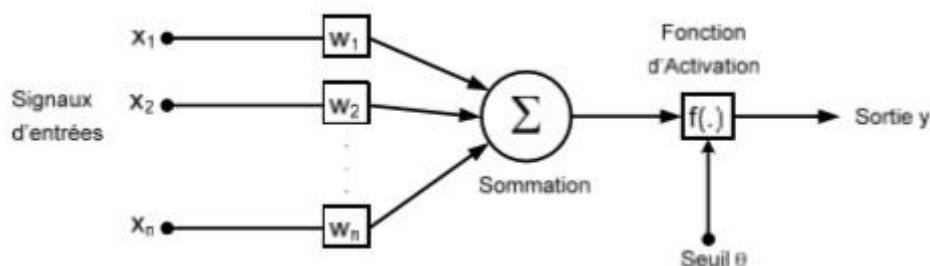


Figure (3.5) Modèle mathématique d'un neurone artificiel.

3.6 Colonie d'abeille artificielle

Les abeilles sont des insectes sociaux qui vivent en colonies, elles sont très organisées et très rigoureuses. Dans une colonie d'abeilles, les individus sont organisés pour effectuer les différentes tâches nécessaires à la survie de la colonie. En effet, ils sont engagés dans plusieurs activités : la recherche de nourriture, l'accouplement, la défense de la ruche, l'essaimage, etc. D'une manière générale, la colonie d'abeilles caractérise un système où le travail collectif des entités interagissant entre-elles, fait émerger un comportement complexe global. La coopération entre les individus est réalisée d'une manière distribuée sans aucun mécanisme de contrôle centralisé, ce qui rend les modèles de l'intelligence en essaim assez manipulables. [20]

3.6.1 L'essaim d'abeilles

Un essaim d'agents de nature quelconque désigne plus généralement toute collection d'espèces vivantes (insectes, oiseaux, cellules,) en interaction. L'exemple d'un essaim d'abeilles est visiblement cette formation de groupes ou de colonies que ces insectes esquissent autour de leur ruche. Deux concepts fondamentaux sont à l'origine de la caractérisation d'un comportement intelligent en essaim : le concept d'auto-organisation et le concept de la répartition de tâches.

Ces concepts sont bien évidemment déterminants quant à la vie d'une colonie d'abeilles et constituent en fait la source de développement de toute sorte de mécanismes de résolution à caractère distribué. L'auto-organisation dans un essaim d'abeilles peut être définie comme un ensemble de mécanismes dynamiques qui conduisent à construire des colonies (modèles, structures) à travers une série d'interactions entre ses différentes composantes.

Ces mécanismes établissent des règles de base qui régissent le comportement collectif des abeilles de la même colonie. Les règles établies font en sorte que les interactions sont exécutées sur la base des informations recueillies localement (niveau bas), sans aucun rapport avec le modèle global de l'essaim (niveau haut).

A l'intérieur d'un essaim, des agents (abeilles) "spécialisés" accomplissent des tâches différentes et de manière simultanée. La répartition des tâches au sein de la colonie trouve son efficacité dans le traitement distribué de ces tâches, qui est loin d'être nécessairement séquentiel. La performance collective de l'essaim d'abeilles est exclusivement basée sur ces deux concepts.



Figure (3.6) : Essaim d'abeilles

Dans leur comportement intelligent, les abeilles utilisent deux concepts fondamentaux : l'auto-organisation et la division de travail [21].

3.6.2 Auto-organisation

Peut être définie comme un ensemble des mécanismes dynamiques qui établissent les règles de bases concernant l'interaction entre les composantes du système. Les règles font en sorte que les interactions soient exécutées sur la base des informations purement locales sans aucun rapport avec le schéma global. Les quatre propriétés fondamentales sur lesquels repose l'auto-organisation des abeilles dans la ruche sont :

a. **Rétroaction positive :**

Comme la quantité de nectar des sources de nourritures augmente, le nombre de leurs visites par les abeilles augmente aussi.

b. Rétroaction négative :

Le processus d'exploitation des sources de nourriture pauvres est arrêté par les abeilles.

c. Fluctuations :

Les scouts mènent un processus de recherche aléatoire pour découvrir des nouvelles sources de nourriture.

d. Interaction multiple :

Les abeilles partagent leurs informations sur les sources de nourriture avec les onlookers sur la piste de danse.

3.6.3 Modèle de comportement d'abeille :

Comme les fourmis, les abeilles sont des insectes sociaux. Elles sont obligées de vivre en colonie très organisée, formée d'ouvrières, de faux-bourdon et d'une seule reine, et où chacune a un travail bien précis à faire.

Les abeilles se nourrissent essentiellement de pollen et de miel. Elles vont butiner les fleurs pour prendre le nectar.

Au cours de sa courte vie (environ 45 jours), l'ouvrière fait plusieurs métiers : elle nettoie les cellules, nourrit les larves, elle range le pollen et le nectar dans les alvéoles, elle ventile la ruche en agitant rapidement ses ailes, elle construit les rayons avec la cire qu'elle produit, elle garde le trou de vol pour chasser les intrus, elle devient butineuse, porteuse d'eau et récolte du pollen et du nectar jusqu'à la fin de sa vie.

L'abeille est capable, par la danse ou par la production de substances chimiques appelées « phéromone », de communiquer aux autres abeilles l'endroit où elle a découvert de la nourriture. Elle **danse en rond** (Figure 3.7) quand elle a trouvé du pollen à faible distance (moins de 25 mètres). Elle utilise une danse très compliquée dite la **danse frétillante** (Figure 3.8), ou danse en huit, si la nourriture se trouve à moins de 10 kilomètres. La direction de la nourriture est exprimée par rapport à la position du soleil. La distance est exprimée par le nombre et la vitesse des tours effectués par l'abeille sur elle-même. Afin de survivre à l'hiver, les abeilles doivent recueillir et stocker environ 15 à 50 Kg de nectar.

Les faux bourdons ne servent que pour la reproduction. Ils sont incapables de se nourrir eux-mêmes (les ouvrières les nourrissent) et ils n'ont pas de dard pour protéger la ruche.

Il n'y a qu'une seule reine dans la colonie. Quelques jours après sa naissance, elle s'envole pour la seule fois de son existence pour être fécondée par quelques faux-bourdons. Elle occupera le reste de ses jours (4 à 5 ans) à pondre jusqu'à 2000 œufs par jour.

Les abeilles adultes (âgées de 20 à 40 jours) deviennent habituellement des butineuses. Les abeilles butineuses jouent en général l'un des trois rôles suivants : butineuses actives, butineuses éclaireuses et butineuses inactives.

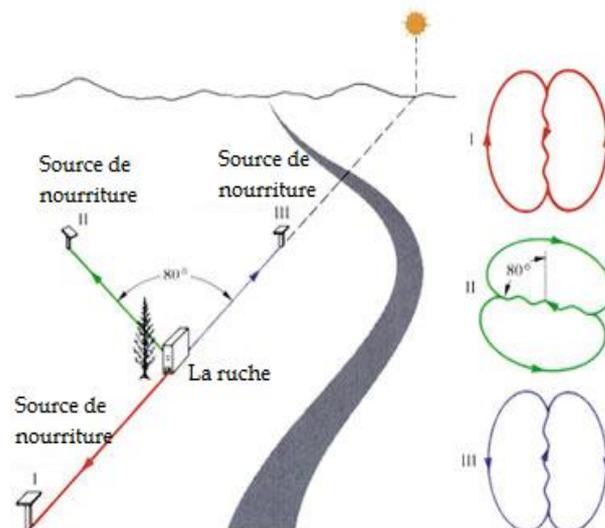


Figure (3.7) : La danse en rond qu'effectue l'abeille en fonction de la direction de la source de nourriture.

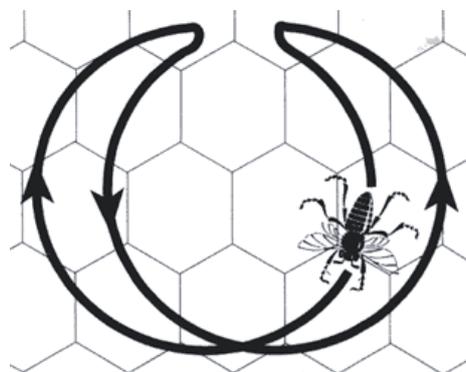


Figure (3.8) : La danse frétilante, appelée aussi en huit

Le modèle qui décrit le comportement des abeilles se compose de trois éléments essentiels : les sources de nourriture, les abeilles employées et les abeilles non employées et il définit deux modes principaux du comportement : le recrutement d'une source de nectar et l'abandon d'une source.

Sources de nourriture :

La valeur d'une source de nourriture dépend de nombreux facteurs tels que sa proximité de la ruche, sa richesse, le goût de son nectar ou la concentration de son énergie et la facilité d'extraction de cette énergie [21]. Par souci de simplicité, le modèle comportemental peut utiliser un descripteur unique (fonction d'adéquation) pour évaluer la rentabilité d'une source de nourriture [22].

Abeilles employées :

Elles sont associées à des sources de nourriture particulière dont elles en sont actuellement exploitantes, elles transportent avec elles et partagent avec une certaine probabilité des informations à propos de cette source, sa direction, sa distance de la ruche et la rentabilité [21].

Abeilles non employées :

Elles cherchent sans cesse des sources de nourriture à exploiter. Il existe deux types des abeilles non employées : les éclaireuses(scouts) qui recherchent dans l'environnement entourant la ruche pour des nouvelles sources de nourriture et les spectatrices(onlookers) qui attendent dans la ruche et choisissent une source de nourriture par le biais des informations partagées par les abeilles employées.

3.6.4 Analogie entre la nature et l'optimisation :

Pour faire l'analogie entre les abeilles à la recherche de nourriture dans la nature et les abeilles dans les problèmes d'optimisation, les principales idées utilisées pour la conception du métaheuristique sont identifiées dans le tableau (3.1).

Nature	Optimisation
Abeilles butineuses (Scout)	Recherche aléatoire
Abeilles actives (employed)	Meilleures solutions
Abeilles réceptives (onlookers)	Solution issue de la recherche au voisinage des meilleures solutions
Dance frétilante	Communiquer les espaces promoteurs pour une recherche locale
Source de nourriture	Une solution
Abondance de la source de nourriture	Abandonner l'espace de recherche en absence d'amélioration de solution
Qualité proximité et facilité d'extraction de la source de nourriture	Fitness de la solution

Tableau (3.3) : Analogie entre les abeilles en nature et les abeilles en optimisation

Ces analogies permettent d'adapter les caractéristiques naturelles d'auto-organisation et de partage de rôles aux problèmes d'optimisation pour garantir la performance globale de la colonie d'abeilles artificielles.

3.6.5 Modèle comportemental à essaim d'abeilles :

L'échange d'informations entre les différentes catégories d'abeilles décrites ci-dessus constitue la phase la plus importante dans la formation de la connaissance collective. Cet échange qui vise à partager des éléments clés relatifs à la source de nourriture à exploiter s'effectue à travers des mécanismes naturels propres aux abeilles. Parmi ces mécanismes, on distingue un phénomène très particulier identifié sous le nom de « Waggle Dance ». La Figure (3.9) : Illustration d'une abeille en « Waggle dance » illustre schématiquement ce phénomène.

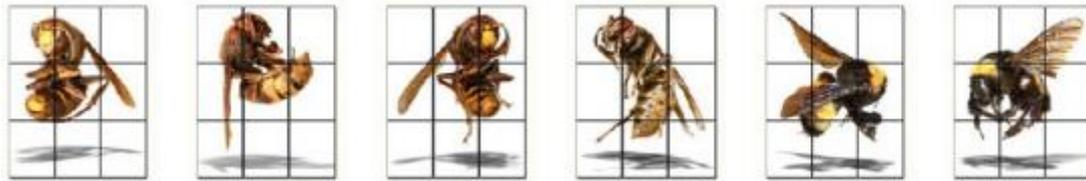


Figure (3.9) : Illustration d'une abeille en « Waggle dance »

Dès que les informations sur toutes les sources sont disponibles aux abeilles Onlooker à travers l'analyse des différentes danses, la décision concernant l'exploitation du site le plus profitable est rapidement prise. Afin de mieux appréhender le comportement de base des abeilles, on propose d'examiner la Figure (3.10).

Considérons les deux sites de nourriture A et B. Initialement, une abeille de la colonie dépourvue de tâches spécifiques peut être appelée à accomplir l'un des rôles suivants :

- Elle peut être une scout et commence à prospecter spontanément le voisinage de la ruche à la recherche d'une éventuelle source de nourriture. Ce comportement peut être à l'origine de certaines motivations internes ou externes (représentées par des flèches orientées "S").
- Elle peut être appelée pour exploiter une source de nourriture "R", et ce après avoir reçue les informations correspondantes.

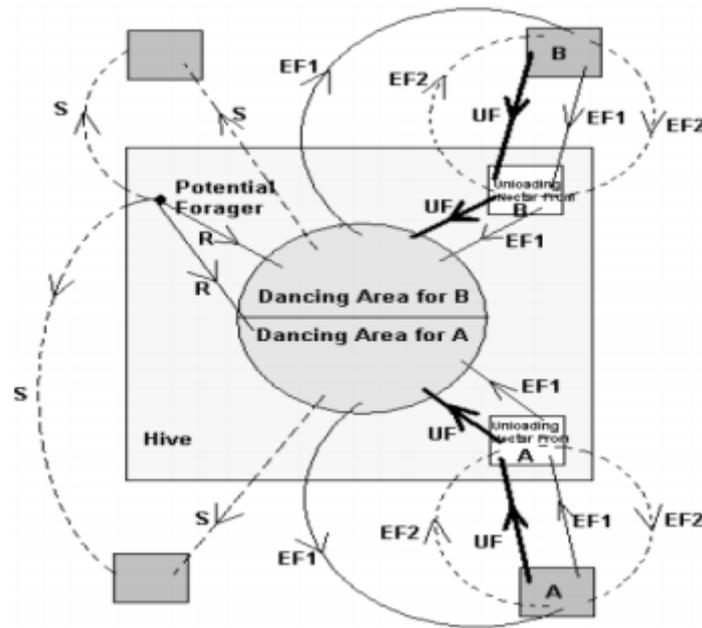


Figure (3.10) : Le comportement d'une abeille lors du fourragement

Après avoir localisé la source de nourriture, l'abeille utilise sa propre capacité d'apprentissage pour mémoriser son emplacement, ensuite passe immédiatement à la phase d'exploitation.

Ainsi, l'abeille en question deviendra une abeille "Employed" et pourra se manifester selon des figures décrites ci-après :

- Elle n'aura aucune tâche spécifique après l'abandon de la source de nourriture (UF).
- Elle transmettra les informations sur la source découverte aux autres abeilles de la colonie et repartira pour l'exploitation de la même source (EF1).
- Elle continue à exploiter la source de nourriture qu'elle a découverte sans revenir à la ruche (EF2).

Il est important de noter que les expériences ont confirmé que seulement une partie des abeilles de la colonie s'engagent dans la prospection de nourriture et non toutes les abeilles simultanément [22].

3.7 L'algorithme de colonies d'abeilles artificielles

En 2005, Karaboga et al [22] ont développé un nouvel algorithme d'optimisation dit « l'algorithme ABC (Artificial Bee Colony Algorithm) ». L'algorithme, qui a été initialement appliqué à des problèmes d'optimisation de fonctions numériques, s'inspire du modèle comportemental des abeilles lors du fourragement. Chaque solution représente une position de nourriture potentielle dans l'espace de recherche et la qualité de la solution correspond à la

qualité de la position alimentaire. Agents (abeilles artificielles) recherche d'exploiter les sources de nourriture dans l'espace de recherche

3.7.1 Structure algorithmique

Dans l'algorithme de colonies d'abeilles artificielles (ABC), la population d'individus ou d'agents est assimilée à une colonie d'abeilles au sein de laquelle on distingue trois catégories d'abeilles : les abeilles "Employed", les "Onlooker" et les "Scouts". La colonie est équitablement répartie entre abeilles Employed et abeilles Onlooker. Pour chaque source de nourriture, une seule abeille est affectée. En d'autres termes, le nombre d'abeilles Employed est égal au nombre de sources de nourriture autour de la ruche. L'abeille Employed dont la source de nourriture est épuisée devient une abeille scoute. La Tableau (3.4) illustre sommairement les différentes phases de l'algorithme ABC.

<p>1. Initialisation</p> <p>2. REPETER</p> <ul style="list-style-type: none">- Phase Employed : Envoyer les abeilles Employed aux sources de nourriture et actualiser chaque solution- Phase Onlooker : Réaliser une sélection basée sur la fonction d'adéquation puis actualiser chaque solution- Phase Scout : Repérer la solution la plus inactive (épuisement de site), et la remplacer par une nouvelle solution générée aléatoirement. <p>3. JUSQU'A (satisfaire les conditions d'arrêt)</p>
--

Tableau (3.4) Structure de l'algorithme ABC.

Comme représenté en Tableau (3.4)), chaque cycle de recherche se fonde sur trois étapes : la phase Employed, la phase Onlooker et la phase Scout.

Dans cette structure, une position donnée de la source de nourriture représente une solution potentielle au problème d'optimisation. La quantité de nectar d'une source de nourriture correspond à la qualité de la solution représentée par cette source de nourriture. Les Onlookers sont affectées aux sources de nourriture en se basant sur un processus de sélection dite "gourmande" qui utilise un mécanisme probabiliste. La teneur en nectar d'une source est élevée d'autant que sa probabilité de sélection par les Onlookers augmente. Chaque colonie possède des scouts qui sont les explorateurs de la colonie. Les scouts n'ont pas d'orientation

particulière, elles se contentent de prospecter le voisinage de la ruche à la recherche d'éventuelles sources.

Dans l'algorithme ABC une abeille "Employed" est remplacée par une scout lorsque la solution représentée par cette abeille n'est pas améliorée. Cette situation fait référence à l'épuisement de la source de nourriture qui est contrôlée par un paramètre de contrôle appelé "limit". En d'autres termes, au cas où une solution représentant une source de nourriture donnée n'est pas améliorée après un nombre prédéterminé d'essais ou d'itérations, cette source de nourriture sera alors abandonnée par l'abeille Employed qui deviendra par la suite une scout. Le nombre d'essais nécessaire à l'abandon d'une source de nourriture est égal à la valeur de seuil "limit" qui est un paramètre de contrôle important de l'algorithme ABC.

3.7.2 Modèle de base de l'algorithme ABC

Dans l'algorithme ABC, la population est constituée d'un ensemble de solutions possibles x_i représentées par les positions des sources de nourriture dont la teneur en nectar correspond à la qualité de la solution associée.

Soit $x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}, i = 1, 2, \dots, SN$, la source de nourriture i dans la population, où SN désigne la taille de la population et D la dimension du problème d'optimisation. La population initiale de SN solutions est générée aléatoirement à partir de l'équation suivante :

$$x_{ij} = x_{min}^j + rand(0.1)(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (3.4)$$

Où x_{min}^j et x_{max}^j sont les limites inférieures et supérieures du j^{eme} paramètres de la solution i .

Une abeille "Employed" effectue par la suite une modification de la position de la source de nourriture qu'elle mémorise et trouve une source avoisinante selon l'équation (3.5) :

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3.5)$$

Où ϕ_{ij} est un nombre aléatoire compris entre $[-1, 1]$, v_i est une nouvelle position d'une source de nourriture potentielle, x_i est la position de la source de nourriture actuelle, x_k est une position de source de nourriture voisine avec $k = 1, 2, \dots, SN$ et $k \neq i$ pour tout $j \in \{1, 2, \dots, D\}$. Une fois la position v_i évaluée, elle est comparée à x_i . Un processus de sélection dite "gourmande" est appliqué : lorsque la teneur en nectar de la nouvelle position est plus élevée

que celle de la précédente, l'abeille mémorise la nouvelle position et abandonne l'ancienne. Dans le cas contraire, elle préserve la position de la précédente source. Après que toutes les abeilles Employed complètent le processus de recherche, elles reviennent à la ruche et partagent toutes ces informations (position et teneur en nectar) avec les abeilles Onlooker en manifestant une danse particulière dite " Waggle dance". Le choix d'une source de nourriture est réalisé de manière probabiliste par l'évaluation de la probabilité p_i , qui dépend de la teneur en nectar de la source de nourriture i :

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \quad (3.6)$$

Où fit_i est la valeur de la fonction d'adéquation de la solution i qui est proportionnelle à la teneur en nectar de la source de nourriture i . Elle peut être calculée par :

$$fit_i = \frac{1}{1 + f_i} \quad (3.7)$$

Où f_i est la valeur de la fonction objectif de la solution associée i .

Dans l'algorithme ABC de base, le processus de sélection est généralement basé sur le mécanisme de « roulette and wheel » [22].

D'autres mécanismes peuvent être cependant utilisés tels que la sélection par rang, la sélection steady-state, la sélection par tournoi, la sélection par élitisme, et la sélection uniforme [23].

Lorsque le nectar d'une source de nourriture est épuisé par les abeilles Employed et Onlookers, l'abeille Employed de cette même source devient une abeille scoute et détermine une nouvelle source de nourriture aléatoirement par l'équation (3.5). Afin de décider si une source de nourriture est abandonnée ou pas, le paramètre de contrôle "limit" est utilisé. A la fin des itérations, des valeurs limites sont comparées avec le nombre d'essais non améliorés de chaque solution. Il y'a un compteur pour chaque solution qui est incrémenté par la valeur "1" après chaque échec ou est mis à zéro à la suite d'un essai mené avec succès, soit par une abeille Employed ou une abeille Onlooker. Les principales étapes de l'algorithme ABC de base sont explicitées en Tableau (3.5), l'organigramme correspondant est donné en Figure

(3.11).

1. Générer la population initiale $X_i, i = 1, \dots, SN$ par l'équation (3.4)
2. Évaluer la population initiale par l'équation (3.7)
3. Cycle = 1
4. Répéter
5. Pour chaque abeille Employed {
 Produire une nouvelle solution v_i par l'équation (3.5)
 Calculer la valeur de la fonction d'adéquation fit_i par l'équation (3.7)
 Appliquer la sélection gourmande}
6. Calculer la probabilité p_i associée à la solution x_i par l'équation (3.6)
7. Pour chaque abeille Onlooker {
 Sélectionner une solution x_i en fonction de p_i
 Produire une nouvelle solution v_i
 Calculer la valeur de la fonction d'adéquation fit_i
 Appliquer la sélection gourmande}
8. S'il y'a une solution abandonnée
 Alors remplacer la avec une nouvelle solution qui sera produite aléatoirement par l'équation (3.4)
9. Mémoriser la meilleure solution trouvée
10. $cycle = cycle + 1$
11. Jusqu'à $cycle = cyclemax$

Tableau (3.5) L'algorithme de colonies d'abeilles artificielles (ABC)

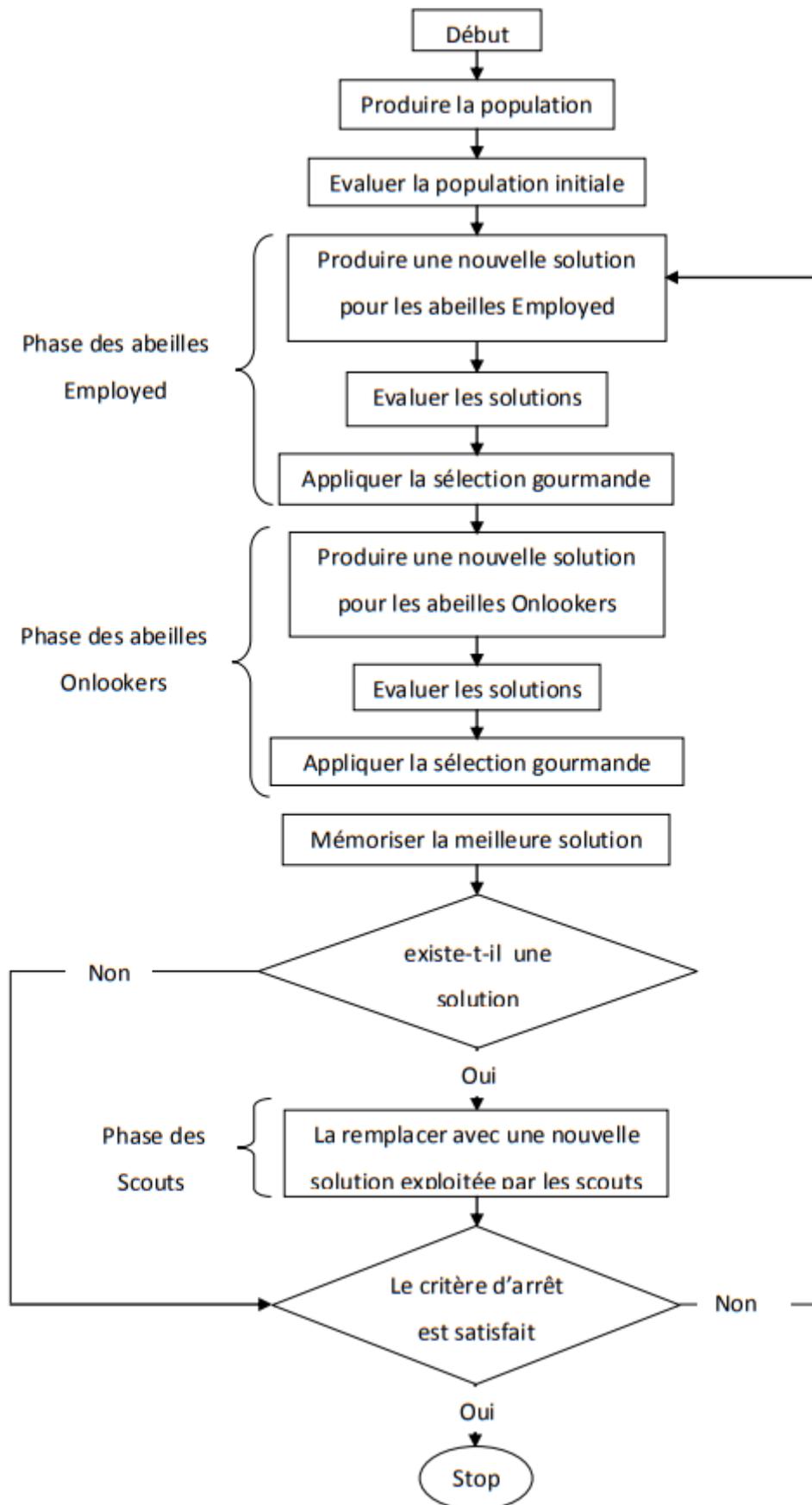


Figure (3.11) : Organigramme de base de l'algorithme ABC

3.8 Domaines d'application

Nombreux sont les domaines d'application des algorithmes d'abeilles, citons quelques-unes :

- L'optimisation de fonction.
- La résolution du problème du voyageur de commerce (TSP) qui a été faite par Lucic et Teodorovic et qui a donné de très bons résultats.
- L'apprentissage des réseaux de neurones tels que MLP, RBF, SNN, LVQ.
- Conception électroniques et mécanique.
- Optimisation de filtre digital.
- Clustering de données.
- Contrôle de robot.
- L'ordonnancement de tâches.
- La prédiction de structure de protéine.

La majorité des problèmes qui ont été résolus par cette méthode, ont donné de très bons résultats concernant la valeur de la fonction objectif, et le temps d'exécution qui a été acceptable.

Conclusion

La méthode d'optimisation par colonie d'abeille est l'une des récentes méthodes d'optimisation. Elle est représentée par un algorithme qui peut être appliqué à de nombreux problèmes d'optimisation dans le management, l'ingénierie, et le contrôle.

Elle est basée sur le concept de coopération qui rend les abeilles plus efficaces et ainsi arrivées à leurs buts rapidement. Cette méthode a la capacité, grâce à l'échange d'informations et le processus de recrutement d'intensifier la recherche dans les régions prometteuses de l'espace de solutions.

Des résultats préliminaires ont montré que le développement de nouveaux modèles basés sur les principes des abeilles doit certainement contribuer dans des problèmes assez complexes.

Comme énoncé au chapitre 2, le calcul des angles de commutation pour la commande (SHE-PWM) se fait par la résolution de systèmes d'équations non linéaires à n équations et n inconnus.

De ce fait nous nous sommes proposés de résoudre un tel système d'équations non linéaires par une nouvelle technique pour la détermination de ses angles de commutation précédemment évoqués, cette technique sera basée sur l'algorithme de colonie d'abeille artificielle. Par conséquent, le programme Matlab de l'algorithme (ABC) se chargera de résoudre les équations non linéaires ainsi pour calculer les angles de commutation.

4 Simulation de l'algorithme (ABC)

4.1 Programme Matlab

L'algorithme (ABC) comme mentionné au chapitre 3, est un algorithme qui permet d'optimiser des équations mathématiques.

Dans notre travail nous avons des équations non linéaires, l'objectif est de minimiser la fonction objectif (4.1) Les résultats obtenus de la fonction objectif et les angles de commutation ont été comparés à autres résultats déjà disponibles avec d'autres méthodes d'optimisation telle que l'algorithme (PSO).

La fonction objectif étant représenté par :

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

Avec $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4 < \alpha_5 < \alpha_6 < \alpha_7 < \alpha_8 < \frac{\pi}{2}$

Les étapes pour déterminer $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$, sont énumérées ci-dessous. De plus, l'organigramme de cet algorithme est illustré à la figure (3.11).

Début de l'algorithme proposé (ABC)

Étape 1 : Dans la première étape, on procède à l'énumération des paramètres requis de l'algorithme (ABC) tels que le nombre de taille de la colonie (le nombre d'abeilles ou encore

population), la valeur de limite (le nombre d'itérations pour libérer une source de nourriture), la dimension sont établis préalablement comme indiquer dans le tableau (4.1)

Paramètre ABC	Valeurs
Nombre des abeilles	100
Dimension	8
Nombre de population	50
Itérations	10000

Tableau (4.1) Valeurs des différents paramètres de ABC

Pour une population d'abeilles de 100 individus et un nombre d'itération de 10000, on a :

Étape 2 : Initialisation de la population selon l'équation (4.2)

$$x_{ij} = x_{min}^j + rand(0.1)(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (4.2)$$

La position des abeilles est calculée par l'équation d'initialisation de la population et les bornes inférieure et supérieure dans la figure (4.1)

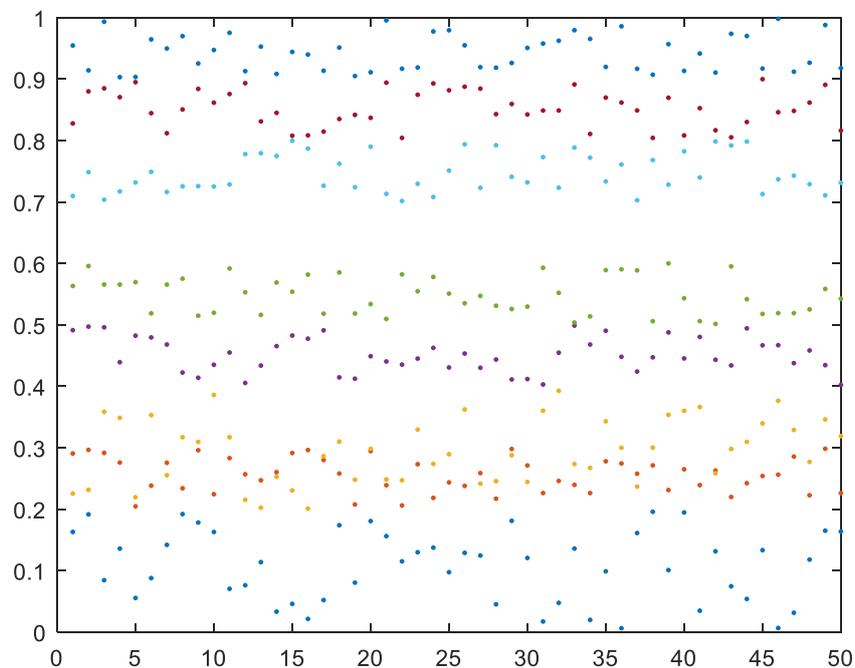


Figure (4.1) Positions des abeilles dans l'espace de recherche établi

Étape 3 : Dans la troisième étape de l'optimisation à travers l'algorithme, la fonction objectif nommé **fx** est déterminée par l'équation (4.1) dont l'objectif est de minimiser cette dernière pour pouvoir procéder à l'élimination d'harmoniques.

On procède après au calcul de la fonction fitness nommé **fx1** toujours selon l'équation (4.3) pour être maximiser.

$$fx1 = \frac{1}{1 + fx} \quad (4.3)$$

Où fx désigne la fonction objectif dans l'algorithme proposé (ABC).

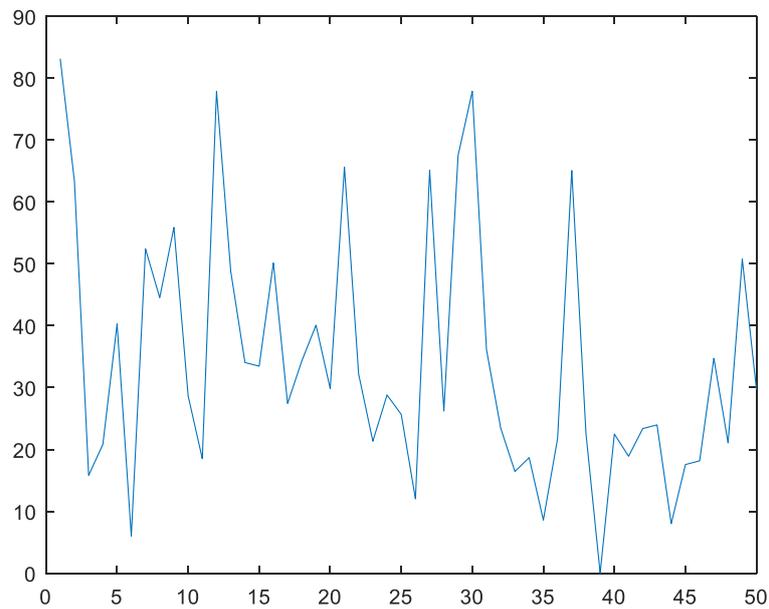


Figure (4.2) : Fonction Objectif (fx)

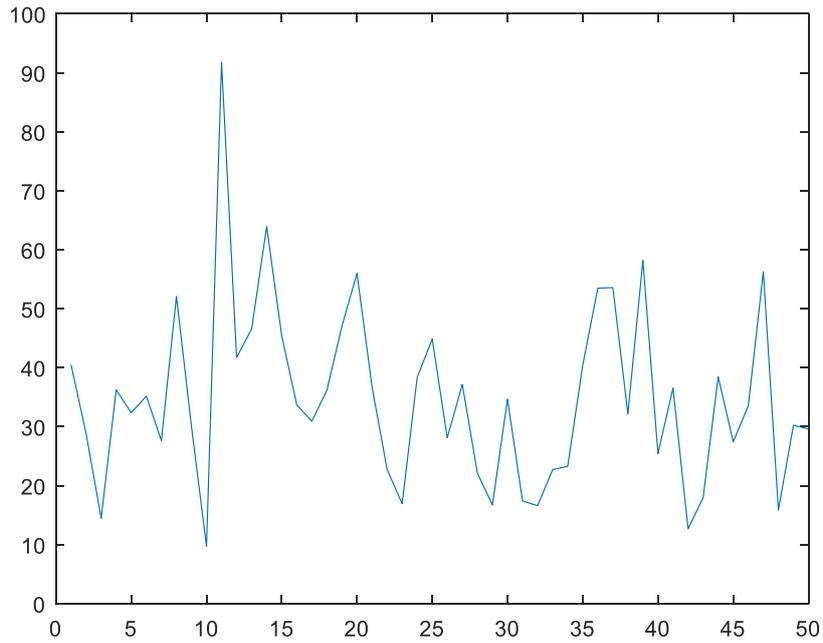


Figure (4.3) : Fonction Fitness (fx1)

Étape 4 : Phase des abeilles "Employed"

Lors de cette phase comme énoncé dans le chapitre 3, les abeilles effectuent par la suite une modification de la position de source de nourriture qu’elles mémorisent selon l’équation (4.4)

$$X_{new} = X + \phi_{ij}(X - X_p) \quad (4.4)$$

Avec $\phi_{ij} = [-1 \ 1]$.

On calcul ainsi les valeurs des angles de commutation alpha appelé (Xnew) dans l’algorithme et la valeur de la fonction objectif selon le tableau (4.2) et on a comparé avec les résultats du tableau (4.3).

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
2.42	11.90	21.93	26.96	32.37
α_6	α_7	α_8	Obj-fun	
41.9004	46.7877	55.1300	0.03213	

Tableau (4.2) : Angles de commutation calculés basés sur ABC pour éliminer les harmoniques 5, 7, 11, 13, 15, 19 et 23 à M= 0,5.

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
4.68	14.20	19.99	27.92	34.86
α_6	α_7	α_8	Obj-fun	
41.86	49.52	56.06	0.96	

Tableau (4.3) : Angles de commutation calculés basés sur PSO pour éliminer les harmoniques 5, 7, 11, 13, 15, 19 et 23 à $M=0,5$ []

D'après les résultats des deux tableaux, on remarque que l'algorithme (ABC) minimise plus la fonction objectif que les autres méthodes d'optimisation notamment l'algorithme (PSO).

Les résultats du programme Matlab proposé de l'algorithme (ABC) sont pertinents et permet ainsi de calculer les angles de commutation plus fiables et avec plus de faciliter.

Étape 5 : Phase des abeilles onlooker :

On calcule la probabilité selon l'équation (4.5)

$$prob = \frac{fx}{\sum_{i=1}^{SN} fx} \quad (4.5)$$

On choisit un nombre aléatoire appelé r qui se situe entre 0 et 1.

Si la probabilité est supérieure a r on répète l'étape précédente (phase des abeilles "Employed").

Étape 6 : Phase des abeilles "scout"

Il y'a un compteur pour chaque solution qui est incrémenté par la valeur "1" après chaque échec ou est mis à zéro à la suite d'un essai mené avec succès, soit par une abeille Employed ou une abeille Onlooker.

A la fin on retrouve les différentes valeurs de la fonction objectif minimisée comme mentionné dans les figures (4.2) (4.3), (4.4), (4.5).

Avec un indice de modulation M choisit aléatoirement entre 0 et 1, On résume les différentes valeurs de la fonction objectif dans le tableau (4.3).

M	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8
Alpha (1)	11.4592	6.7323	11.1727	9.2876	7.89	2.13
Alpha (2)	13.0348	13.2067	12.6280	12.9947	15.16	15.85
Alpha (3)	13.6307	12.9603	13.4187	12.7254	13.49	22.16
Alpha (4)	25.9435	27.5020	26.6196	24.1502	24.29	24.05
Alpha (5)	30.0803	34.0853	34.3775	33.0998	33.42	30.87
Alpha (6)	44.1750	40.4795	41.7056	42.7140	42.54	44.58
Alpha (7)	48.3920	50.4031	47.1315	46.6674	50.44	48.08
Alpha (8)	52.7809	56.6140	54.1674	51.8928	55.81	52.24

Tableau (4.4) : Valeurs numériques des angles de commutation

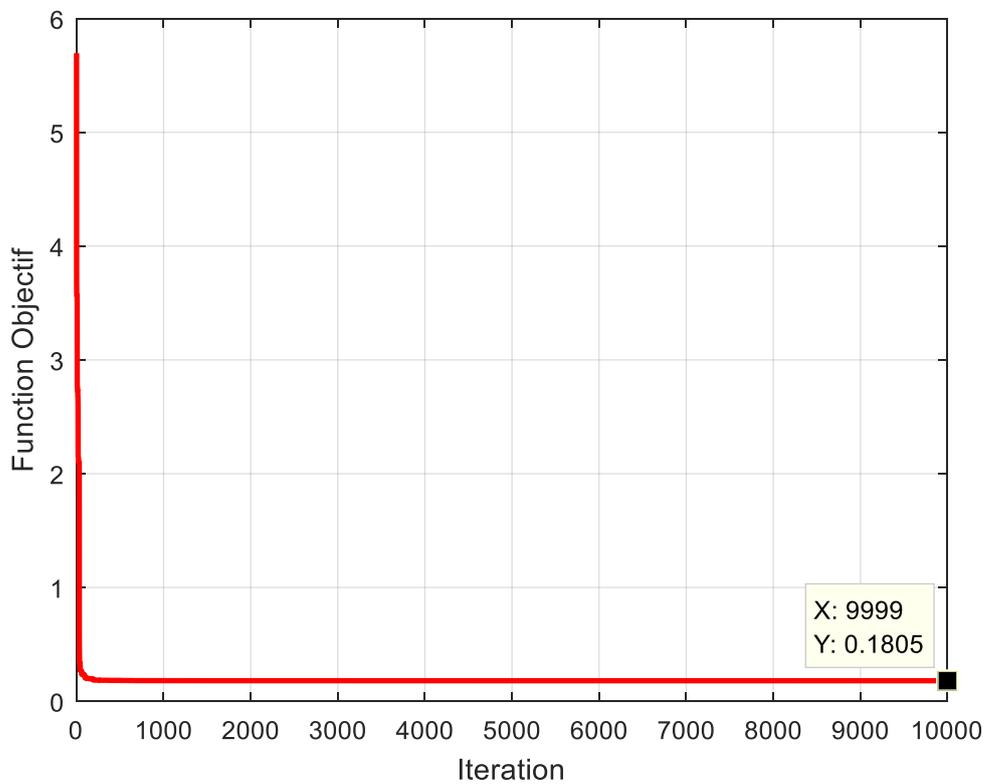


Figure (4.4) fnc-obj pour M=0.1

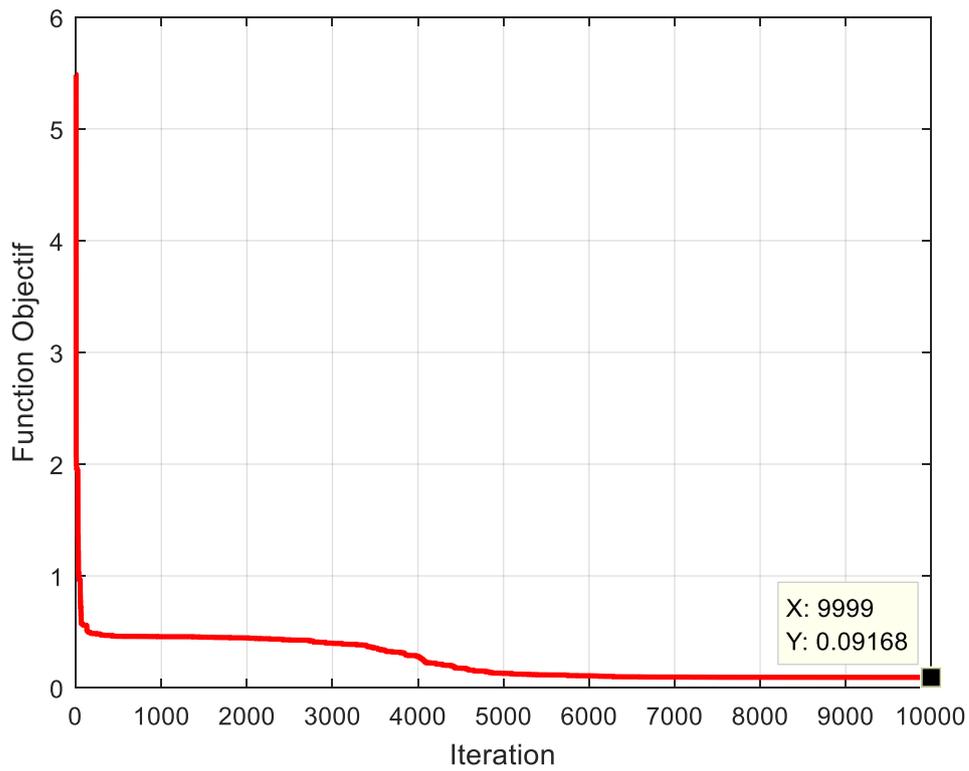


Figure (4.5) fnc-obj pour M=0.2

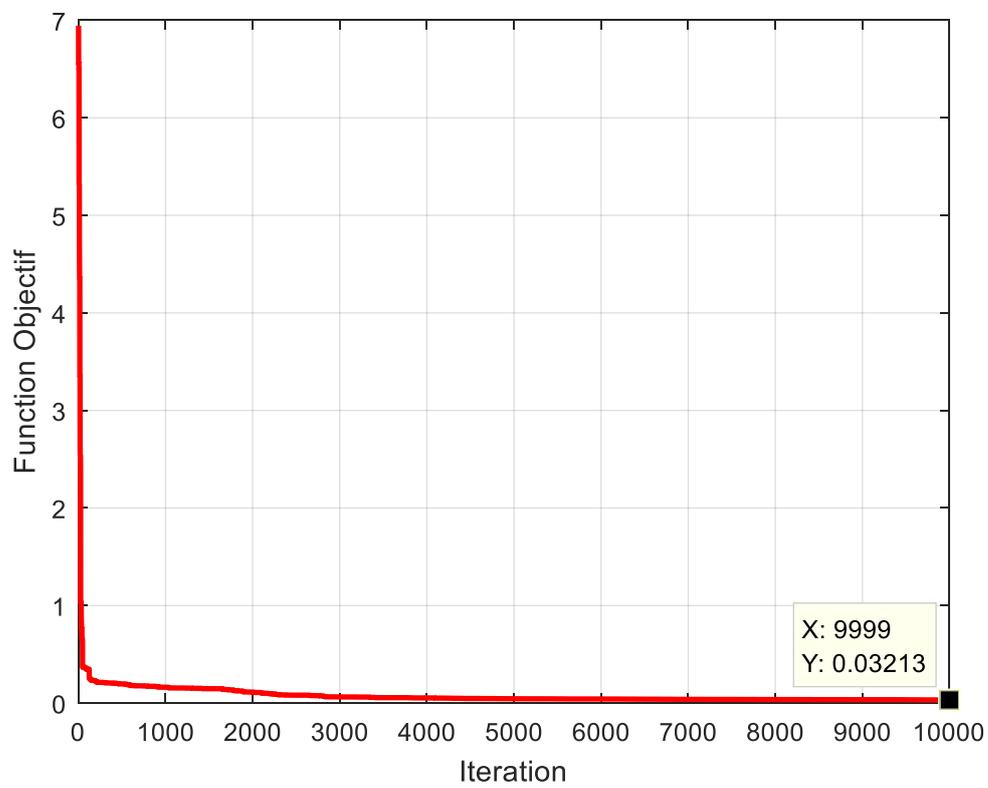


Figure (4.6) fnc-obj pour M=0.5

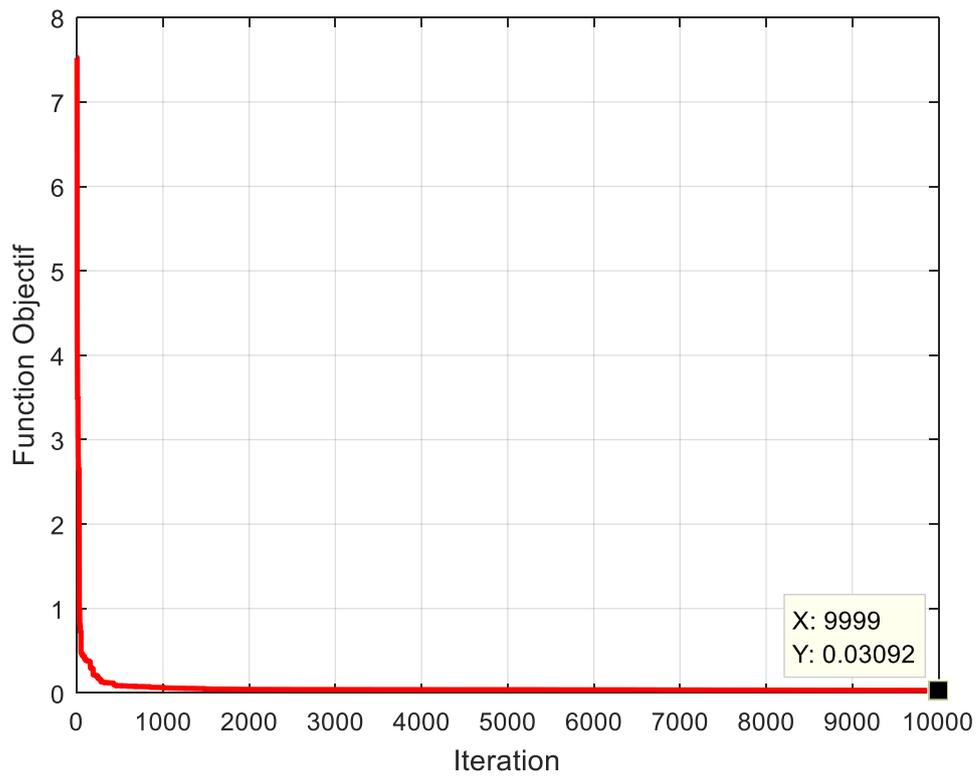


Figure (4.7) fnc-obj pour M=0.6

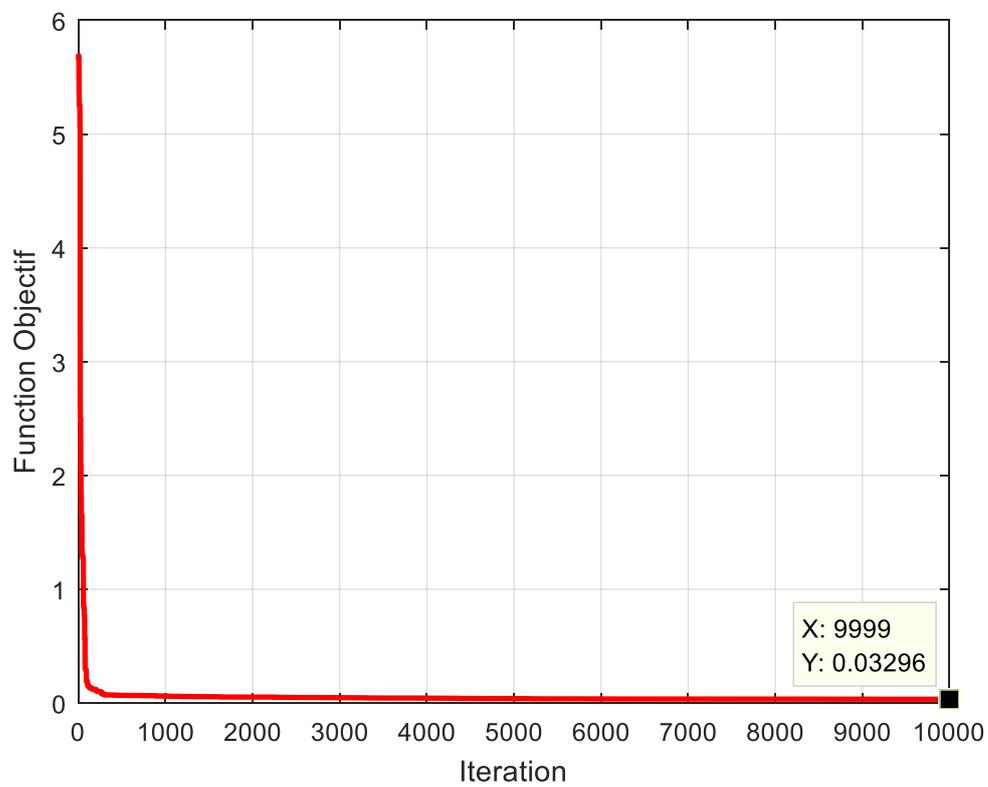


Figure (4.8) fnc-obj pour M=0.7

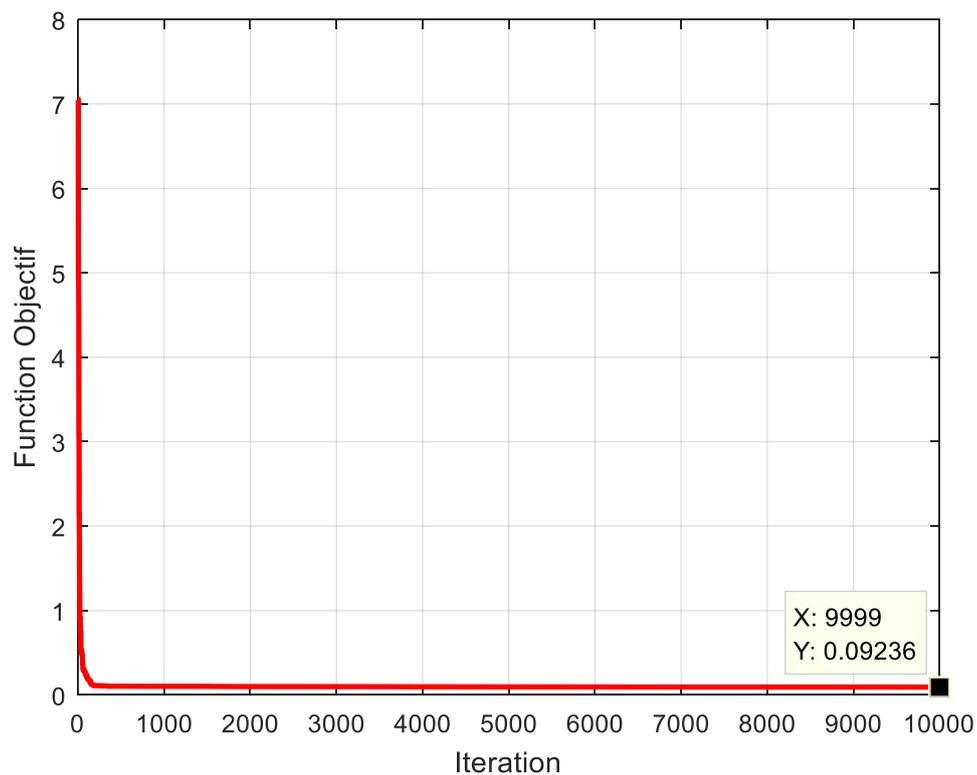


Figure (4.9) min fnc-obj pour M=0.8

4.2 Simulation de l'onduleur

Les tensions obtenues aux bornes des onduleurs triphasés présentent plusieurs harmoniques. Il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour cela on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Cette méthode consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables.

A rappeler que les angles de commutation sont calculés avec l'algorithme (ABC).

On présente l'allure de la tension et leur spectre d'harmoniques pour différents coefficients de modulation. Le schéma de la technique (SHE-PWM) sur Simulink est le suivant :

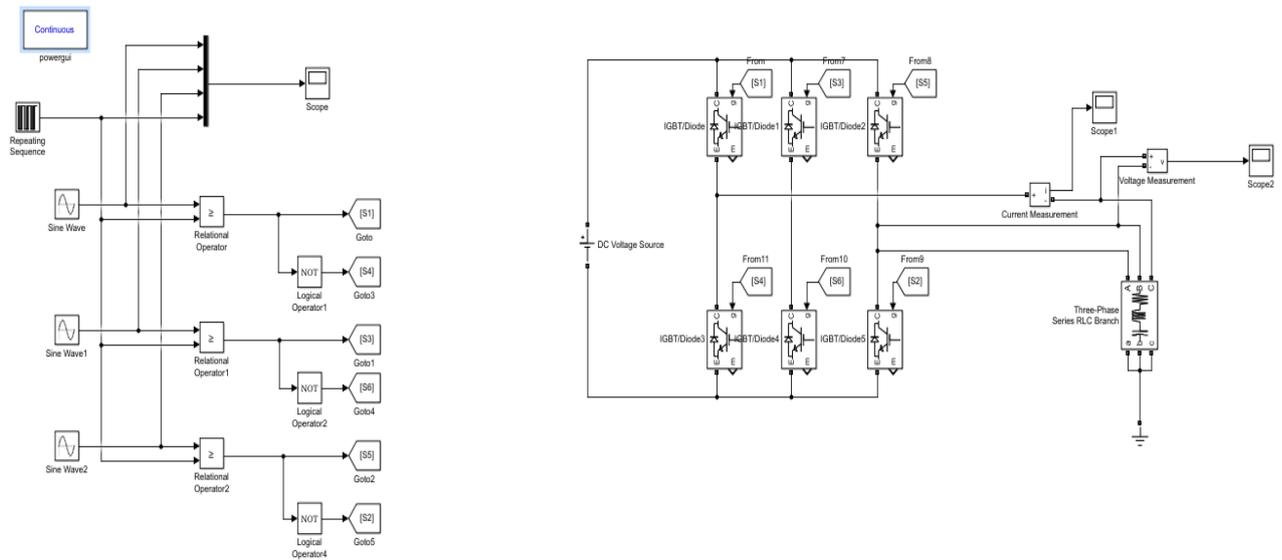


Figure (4.10) Simulink (SHE-PWM)

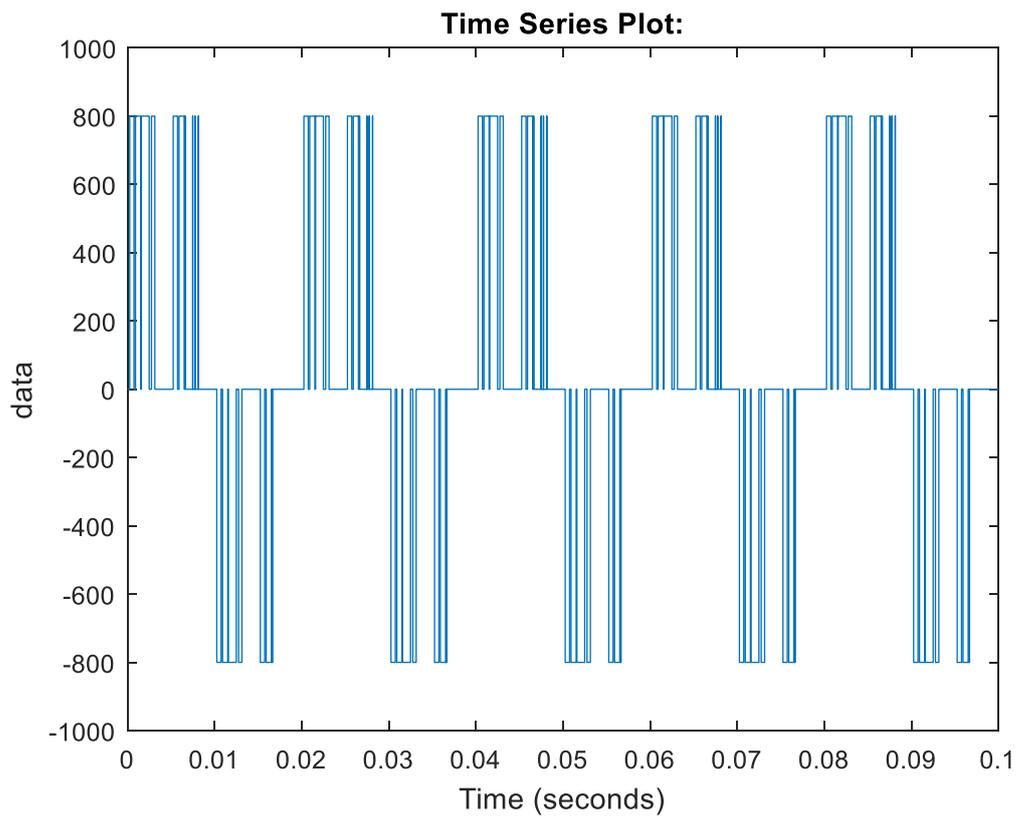


Figure (4.11) Tension pour M=0.5

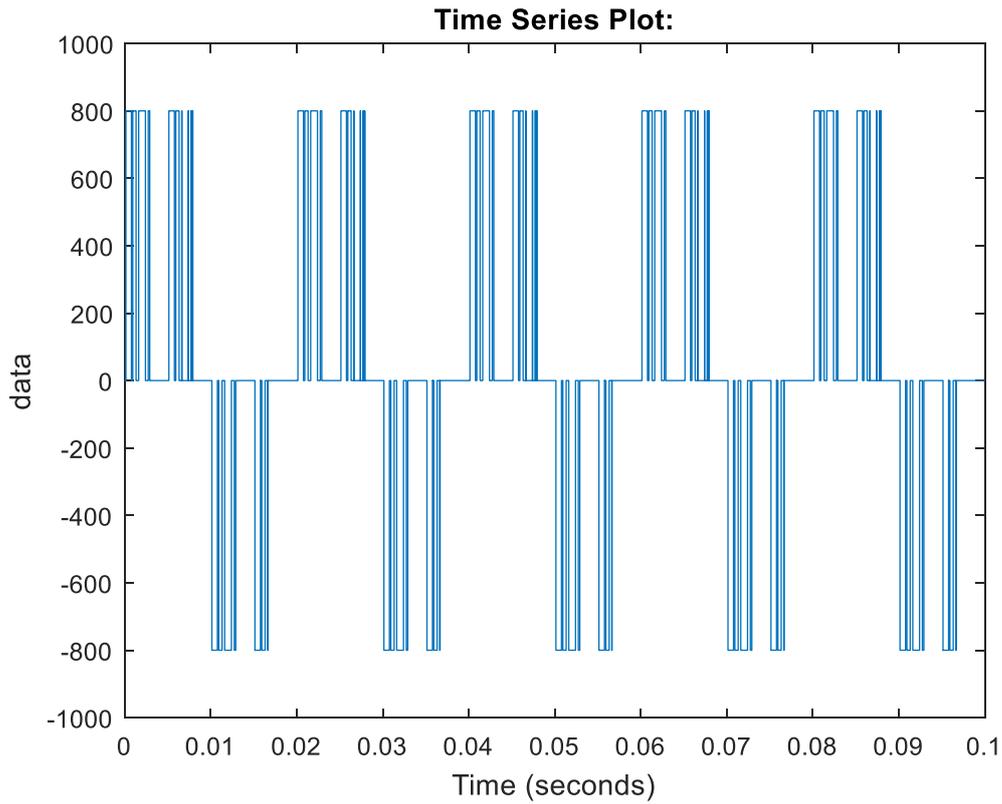


Figure (4.12) Tension pour M=0.8

Comparaison avec la Commande (SPWM) :

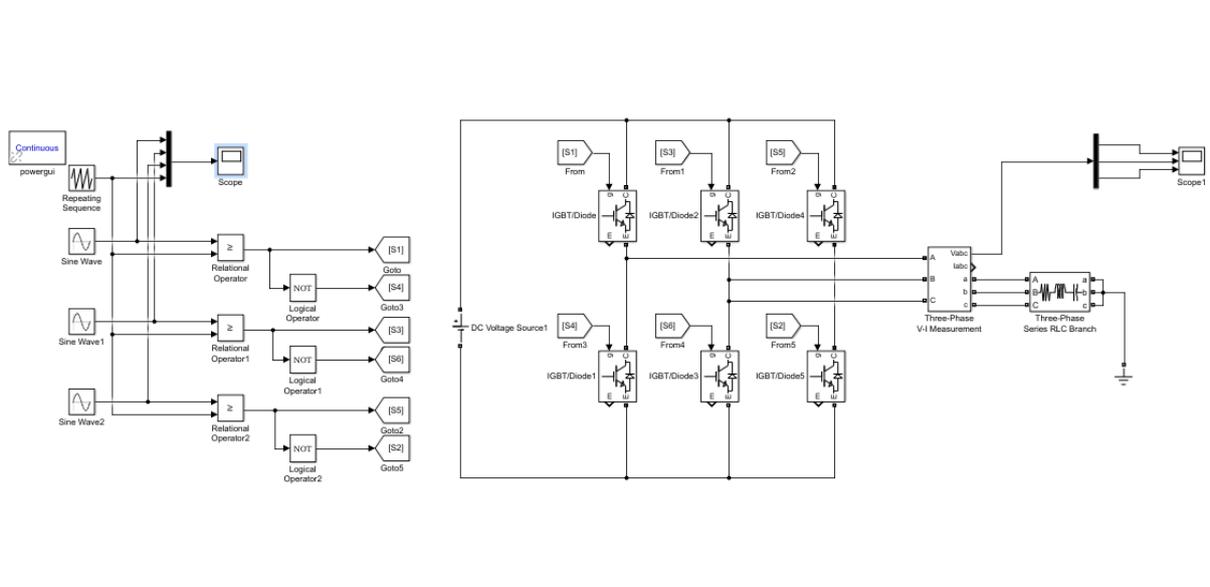


Figure (4.13) Simulink (SPWM)

Par rapport à la commande SHE-PWM, la commande SPWM élimine moins d'harmoniques.

4.3 Interprétation des résultats

Dans ce travail, la méthode d'élimination des harmoniques est présentée pour éliminer les harmoniques d'ordre faible dans le MLI. L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles est proposé pour déterminer les angles de commutation optimaux des MLI, et il est implémenté par le logiciel MATLAB. Les résultats de la simulation montrent qu'ABC est capable de trouver les angles de commutation optimaux pour générer la tension souhaitable. De plus, l'algorithme proposé est comparé à PSO avec les mêmes valeurs initiales. Sur la base de tous les critères de convergence et de précision, ABC est supérieur aux autres algorithmes. De plus, pour confirmer la validité des résultats, le nombre d'itérations a été modifiée plusieurs fois. La modification du nombre d'itérations a également confirmé les résultats précédents. Les résultats susmentionnés sont également corroborés en modifiant le nombre d'itérations. Enfin, les résultats expérimentaux vérifient les résultats de la simulation.

Conclusion

La technique SHE est une technologie PWM qui permet d'abaisser la fréquence de commutation de l'appareil de puissance, d'éliminer l'harmonique d'ordre faible, et d'augmenter leur tension. Les critères usuellement retenus sont :

- Elimination d'harmoniques de rang spécifié par sélection ;
- Elimination d'harmoniques dans une bande de fréquence spécifiée ;
- Minimisation d'un critère d'harmoniques global ;
- La minimisation de la distorsion harmonique et les pertes ;
- Elle permet aussi le contrôle de l'amplitude du fondamental.

L'augmentation du nombre d'angles de commutation ne réduit pas forcément la distorsion harmonique totale THD, c'est-à-dire que le THD varie d'une manière arbitraire en fonction du nombre d'angles de commutation. D'une manière générale, la distorsion harmonique totale de la tension de sortie de l'onduleur, est inversement proportionnelle au taux de modulation (que ce soit pour la tension simple ou pour la tension composée) ; La commande (SHE-PWM) présente un inconvénient coté THD de la tension (élevé) plus les angles de commutation sont élevés contrairement au THD du courant.

Le travail mené dans ce mémoire a été consacré à l'étude et à la simulation du calcul des angles de commutations de l'onduleur triphasé de la commande (SHE-PWM) par la méthode d'optimisation de colonies d'abeilles artificielles. Pour les besoins de l'étude, nous avons procédé à l'écriture d'un algorithme issu de (ABC) pour le calcul des différents angles de commutations selon les différents paramètres.

Nous nous sommes intéressés dans le premier chapitre à une étude de l'application photovoltaïque que nous allons faire fonctionner avec l'onduleur triphasé. Notre choix s'est porté sur le pompage photovoltaïque pour notamment ses caractéristiques importantes pour les zones arides et désertiques.

Puis dans le second et troisième chapitre, nous avons procédé à l'étude de l'onduleur triphasé en exposant brièvement les différents types de commandes pour la variation du signal de sortie de l'onduleur triphasé. La simulation de la commande (SHE-PWM) a été réalisée à travers l'algorithme (ABC) en calculant systématiquement les différents angles de commutation avec un taux de modulation choisit au préalable.

Le quatrième chapitre a été consacré à la validation de ces modèles par des simulations sous Simulink/Matlab.

En effet, nous avons mis en évidence plusieurs cas de tester de l'algorithme (ABC) en procédant à plusieurs itérations et en choisissant un taux de modulation différent pour le calcul des angles de commutation de l'onduleur.

Avec l'aide des résultats obtenus par simulation nous avons pu démontrer la fiabilité de notre algorithme (ABC) pour le calcul des angles de commutations de l'onduleur.

En perspectives, il nous semble important :

- De prendre en compte un modèle de la MAS du pompage photovoltaïque entraine par un onduleur dédié à l'étude de défaut triphasé
- D'étudier d'autre méthode d'optimisation pour le calcul des angles de commutations
- D'étudier d'autre méthode de commande PWM pour la commande de système photovoltaïque

Références bibliographiques

- [1] M'hamed BOUNEKHLA, " Contribution à l'identification paramétrique de la machine asynchrone ", Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences ENP 2004.
- [2] : M.Djeroui Salim « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » université Abbes Farhat de Sétif 2011..Chapitre 1. Page (5,6)
- [3] [FPO-TEER-Stage-Professionnel-2016-2017-Boudouar-Melouard.pdf](#)
- [4] Mohamed Azab, [Harmonic Elimination in Three-Phase Voltage Source](#)
- [5] Etude des harmoniques produit par des fours en arc électrique projet pour obtenir des degrés de commutation en génie électrique.
- [6] Guellal Amar, « Contribution à l'étude et à l'implémentation des commandes en temps réel pour MAS », Thèse de doctorat en Electronique, sous la direction de Larbes Chérif, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2015, 95p.
- [7] Khider M, "commande de vitesse en temps réel d'un moteur asynchrone triphasé " mémoire de Magister 2003, Ecole Nationale Polytechnique, Algiers, Algeria.
- [8] Guellal Amar "Implémentation sur FPGA d'une commande MLI on-line basée sur le principe des réseaux de neurones" mémoire de Magister 2010, Ecole Nationale Polytechnique, Algiers, Algeria.
- [9] Zhu Z.Q. and Howe D. "Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles", Proceedings of the IEEE, vol. 95, n° 4, April 2007, p. 746-765.
- [10] T. Wildi, Electrotechnique, 3rd ed. Louvain-la-Neuve (Belgique): De Boeck, 1999
- [11] Design and Simulation of a Special Active Filter's Control System to Improve Electric Power Quality Using MATLAB
Dr. Mohsen Khateeb* Dr. Their Ibrahim** Douha Jdeed***
(Received 4 / 12 / 2012. Accepted 18 / 6 / 2013)
- دراسة التوافقية الناجمة عن افران القوس الكهربائي مشروع مقدم لنيل درجة البكالوريوس في الهندسة الكهربائية [12]
- [13] S. Hadji, «correction du facteur de puissance dans les systèmes de traction alimentés en courant alternatif monophasé », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2007.

- [14] K. Imarazene, «Application des Réseaux de Neurones à la Commande par Elimination d'Harmoniques des Onduleurs Multi niveaux», mémoire de MAGISTER, Nationale Polytechnique, Alger 2005.
- [15] K. J. McKenzie, « Eliminating harmonics in a cascaded H-bridges multilevel inverter using resultant theory, symmetric polynomials, and power sums », master of science, The University of Tennessee, Knoxville, 2004.
- [16] Boudouani Yacine , Contribution a la synthese automatiques des systemes flous par aproche metha heuristique, Mémoire de Magister Université M'hamed Bougara Boumerdes 2015.
- [17] Blum, C. and D. Merkle, Swarm Intelligence, Introduction and Applications. 2008, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [18] Bendahou Djamel et Bourouis El-Abbes. Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l'optimisation par essaim de particules. Mémoire de master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, Blida, 2013.
- [19] Boudjema Mohammed, Belhaouas Nasreddine : 'Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones et implémentation sur FPGA et DSP', Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [20] Thèse de Doctorat HARFOUCHI Fatima Filière : Génie électrique Option : Commande automatique
- [21] RAIHANI Hind, Adaptation de l'algorithme des colonies d'abeilles pour l'optimisation et le dimensionnement des circuits intégrés analogiques, mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah FES MAROC
- [22] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," Technical Report, Kayseri/Türkiye , 2005.
- [23] R. Poli and W. B. Langdon, Foundations of Genetic Programming.: Springer , 2002.
- [24] K. HOUACINE, « Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaine de propulsion d'un véhicule électrique», Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, le 5 Juin 2016.

[25] C.DEPATURE, «Commande par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateur», Université du Québec, 23 Avril 2017.

[26] Grellier, G. Clerc "Actionneurs Electriques, Principe, Modèles, Commande" Collection Electrotechnique. Edition Eyrolles 2000

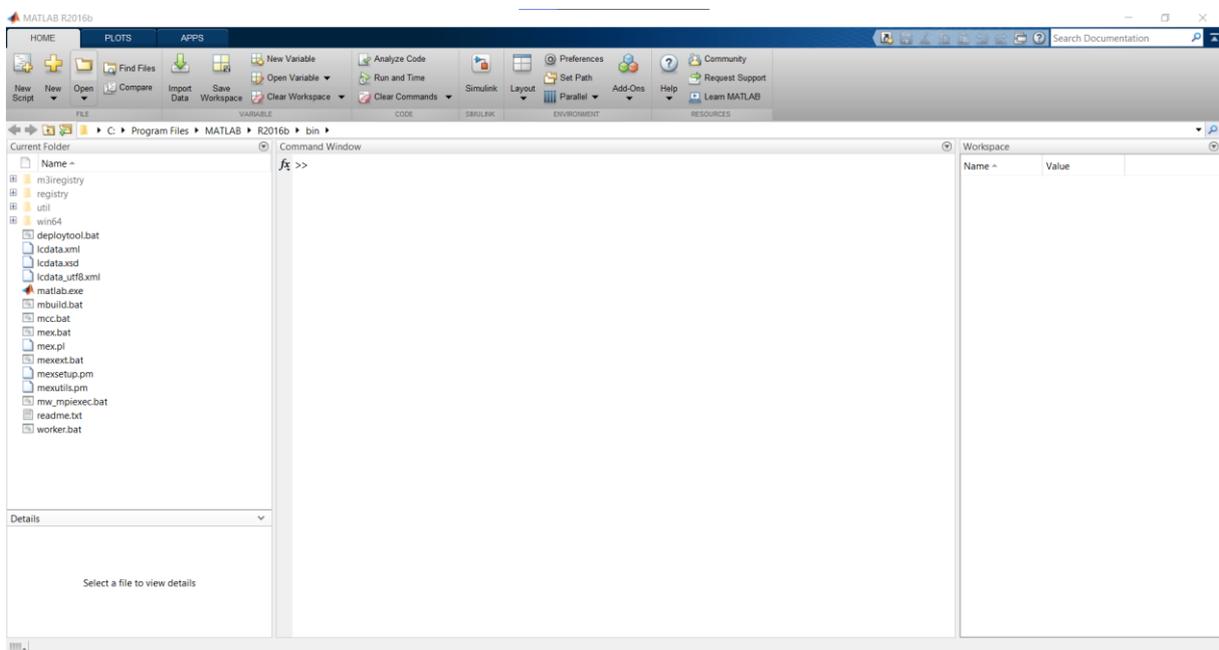
[27] Harmonic Elimination in Three-Phase Voltage Source Inverters by Particle Swarm Optimization Mohamed Azab

Annexe A

Matlab est un logiciel de calcul numérique commercialisé par la société MathWorks1. Il a été initialement développé à la fin des années 70 par Cleve Moler, professeur de mathématique à l'université du Nouveau-Mexique puis à Stanford, pour permettre aux étudiants de travailler à partir d'un outil de programmation de haut niveau et sans apprendre le Fortran ou le C.

Matlab signifie Matrix laboratory. Il est un langage pour le calcul scientifique, l'analyse de données, leur visualisation, le développement d'algorithmes. Son interface propose, d'une part, une fenêtre interactive type console pour l'exécution de commandes, et d'autre part, un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation d'applications.

Matlab trouve ses applications dans de nombreuses disciplines. Il constitue un outil numérique puissant pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation de modèles mathématiques, la conception et la validation (tests en simulation et expérimentation) d'applications. Le logiciel de base peut être complété par de multiples toolboxes, c'est-à-dire des boîtes à outils. Celles-ci sont des bibliothèques de fonctions dédiées à des domaines particuliers. Nous pouvons citer par exemple : l'Automatique, le traitement du signal, l'analyse statistique, l'optimisation...



Environnement Matlab

Annex B

Newton Raphson Method

If $f(x)=0$, find $x=?$.. Assume initial guess of $x=x_0$

$$1^{\text{st}} \text{ iteration} \rightarrow x_1 = x_0 - [f(x_0)/f'(x_0)]$$

$$2^{\text{nd}} \text{ iteration} \rightarrow x_2 = x_1 - [f(x_1)/f'(x_1)]$$

$$3^{\text{rd}} \text{ iteration} \rightarrow x_3 = x_2 - [f(x_2)/f'(x_2)]$$

Example:

$f(x)=x^2 -4x-7=0$, find $x=?$ Assume $x_0 =5$

Solution:

$$f'(x)=2x-4$$

$$\rightarrow x_1 = 5 - [(5^2 - 4(5) - 7)/(2(5) - 4)] = 5.33$$

$$\rightarrow x_2 = 5.33 - [(5.33^2 - 4(5.33) - 7)/(2(5.33) - 4)] = 5.3166 \dots \text{ etc}$$

System des equation non linier

Si $f_1(x, y)=0$ et $f_2(x_0, y_0)=0$

1^{er} iteration

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - (J)^{-1}_{x_0, y_0} \begin{bmatrix} f_1(x_0, y_0) \\ f_2(x_0, y_0) \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{bmatrix}$$

pour eliminer la 3em et la 5em harmonique

$$f_1(\alpha_1, \alpha_2) = [1 - 2 \cos 3\alpha_1 + 2 \cos 3\alpha_2] = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$f_2(\alpha_1, \alpha_2) = [1 - 2 \cos 3\alpha_1 + 2 \cos 3\alpha_2] = 0 \dots \dots \dots (2)$$

Propose $\alpha_{1(0)} = 20$, $\alpha_{2(0)} = 30$

1^{er} iteration

$$\begin{bmatrix} \alpha_{1(1)} \\ \alpha_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1(0)} \\ \alpha_{2(0)} \end{bmatrix} - ([J]^{-1})_{\alpha_{1(0), \alpha_{2(0)}}} \begin{bmatrix} f_1(\alpha_{1(0)}, \alpha_{2(0)}) \\ f_2(\alpha_{1(0)}, \alpha_{2(0)}) \end{bmatrix}$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{bmatrix}$$

	Fun initial	[J]	alpha new(rad)	alpha new(°)
1	-0.0000	5.1962 6.0000	0.4188	23.9951
2	-0.3848	9.8481 5.0000	0.5840	33.4599