

Département d'Electrotechnique

Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en
Electrotechnique

Thème

Optimisation des Systèmes de Mise à la
Terre par Colonies d'Abeilles Artificielles

Proposé et dirigé par :

Pr. M. TEGUAR

Réalisé par :

HAMADI Mohamed

MAADJOU DJ Djamel

Promotion : Juin 2014

Remerciements

Nos remerciements et gratitudes pour notre promoteur Monsieur M.TEGUAR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour son aide, sa disponibilité, ses conseils, son suivi, et ses qualités humaines élevées.

Nos remerciements et gratitudes pour Monsieur B. ALIK, Ingénieur et doctorant à l'Ecole Nationale Polytechnique, ce travail était réalisé avec sa collaboration et on suivant ses conseils.

Nos remerciements vont également à Monsieur A. MEKHALDI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui nous honorent en acceptant d'examiner notre travail.

Nous remercions également, Monsieur Y. KEMARI et Monsieur N. BENDEKKICHE, Ingénieurs et doctorants à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour leur aide et conseils.

Nous remercions tous les enseignants ayant contribué à notre formation.

Le diplôme décroché par ce travail n'aurait pas pu être acquis sans le soutien de nos familles.

Table des matières

Liste Des Figures.....	viii
Liste Des Tableaux.....	xi
Résumé.....	xiii
Introduction générale.....	1
I. Généralités sur la mise à la terre et conception selon la norme IEEE 80-2000	
I.1. Introduction.....	6
I.2. Définitions	
I.2.1. Mise à la terre.....	6
I.2.2. Terre de référence.....	7
I.2.3. Masse.....	7
I.2.4. Conducteur de terre.....	7
I.2.5. Réseau de terre.....	7
I.2.6. Prise de terre.....	8
I.2.7. Eléments d'une mise à la terre.....	8
I.2.8. Elévation du potentielle de terre.....	9
I.2.9. Tension de contact.....	9
I.2.10. Tension de pas.....	10
I.2.11. Tension de maille.....	10
I.2.12. Tension transféré.....	10
I.3. Effet du courant électrique sur le corps humain.....	11
I.4. Structures et caractéristiques de la terre.....	12
I.4.1 Structure de la planète Terre.....	12

I.4.2. Nature du sol.....	13
I.4.3. Caractéristiques électriques du sol.....	13
I.4.3.1. Résistivité.....	13
I.4.3.2. Permittivité.....	15
I.4.3.3. Perméabilité.....	15
I.5. Mesure de la résistivité du sol.....	15
I.5.1. Méthode de Wenner.....	16
I.5.2. Méthode de Schlumberger.....	17
I.5.3. Méthode de mesure à trois pôles.....	18
I.6. Régimes de neutre.....	19
I.6.1. Schémas de liaison à la terre en basse tension.....	19
I.6.2. Mise à la terre par neutre isolé.....	21
I.6.3. Mise à la terre directe.....	21
I.6.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance.....	22
I.6.5. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance.....	22
I.7. Matériaux utilisés pour la construction des systèmes de mise à la terre.....	22
I.8. Résistances des configurations de mise à la terre les plus utilisées.....	24
I.9. Conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80- 2000	
I.9.1. Introduction.....	25
I.9.2. Les différentes étapes de conception.....	26
I.9.2.1. Etape 1 : Détermination de la résistivité.....	26
I.9.2.2. Etape 2 : Dimensionnement des conducteurs.....	26

I.9.2.3. Etape 3 : Tensions de contact et de pas maximales admissibles.....	28
I.9.2.4. Etape 4 : La conception initiale.....	29
I.9.2.5. Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille.....	30
I.9.2.6. Etape 6 : Courant maximum I_G de la grille.....	30
I.9.2.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT).....	32
I.9.2.8. Etape 8 : Tensions de maille et de pas.....	32
I.9.2.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre E_t et E_{t50} et entre E_p et E_{Step50}	34
I.9.2.10. Etape 11 : Amélioration de la configuration initiale.....	34
I.9.2.11. Etape 12 : configuration final.....	35
I.10. Conclusion.....	36
II. Optimisation Méta-heuristiques	
II.1. Introduction.....	37
II.2. Optimisation.....	37
II.2.1. Optimisation : Concept et définition.....	38
II.2.2. Délimitation de l'espace de recherche.....	39
II.2.3. Différents critères d'optimalité pour différents types d'optimum.....	40
II.2.4. Classification des problèmes d'optimisation.....	41
II.2.5. Optimisation mono-objectif.....	42
II.2.6. Optimisation multi-objectif.....	43
II.2.7. Classification des méthodes d'optimisation.....	43
II.3. Caractéristiques.....	45

II.3.1. Sensibilité et robustesse d'une méthode d'optimisation.....	45
II.3.2. Opérateurs de recherches fondamentales.....	46
II.3.3. Mode de recherche de l'optimum.....	47
II.3.4. Ordre d'une méthode de résolution.....	47
II.4. Méthodes d'optimisation approchée.....	48
II.4.1. Optimisation difficile.....	48
II.4.2. Méthodes Heuristiques.....	49
II.4.3. Méthodes Méta-heuristiques.....	50
II.4.3.1. Principe de voisinage.....	51
II.5. Quelques méthodes Méta-heuristique.....	51
II.5.1. Algorithmes de colonies de fourmis.....	51
II.5.2. Algorithme à évolution différentielle.....	52
II.5.3. Algorithmes à estimation de distribution.....	52
II.5.4. Algorithmes Génétiques.....	53
II.5.5. Essaim particulière.....	55
II.6. Conclusion.....	57

III. Algorithmes Basés sur le Comportement des Abeilles

III.1. Introduction.....	58
III.2. Optimisation par Colonie d'abeilles.....	58
III.2.1. Abeilles en nature.....	59
III.2.2. Exploration des sources de nourriture chez les abeilles.....	60

III.2.3. Méthode de communication chez les abeilles.....	60
III.2.4. Optimisation naturelle : Directions fournies par les abeilles.....	63
III.2.5. Algorithmes inspirés du comportement des abeilles.....	63
III.3. Algorithmes d'abeilles basés sur la recherche de nourriture.....	66
III.3.1. Algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles virtuelle (VBA).....	67
III.3.2. Algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles (BCO).....	68
III.3.4. Algorithme d'optimisation par la danse d'abeille (DBO).....	69
III.3.5. Algorithmes d'abeilles basés sur d'autres comportements.....	70
III.4. Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielles (ABC).....	71
III.4.1. Historique de l'algorithme ABC.....	72
III.4.2. Principe général de l'algorithme ABC.....	72
III.4.2.1. Production initiale des sources de nourriture.....	73
III.4.2.2. Envoi des abeilles employées aux sites.....	73
III.4.2.3. Calcul de probabilité.....	74
III.4.2.4. Choix de la source à améliorer par les spectatrices.....	74
III.4.2.5. Critère pour abandonner une source : Limite et production de scoute.....	75
III.4.3. Paramètres de l'algorithme ABC.....	75
III.4.4. Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles Modifié.....	76
III.4.4.1. Fréquence de perturbation.....	76
III.4.4.2. Ampleur de perturbation.....	77
III.4.4.3. Choix de la solution.....	78

III.4.5. Etapes de l'algorithme ABC.....	78
III.4.6. Caractéristiques de l'algorithme ABC.....	82
III.5. Conclusion.....	82
IV. Applications et comparaison	
IV.1. Introduction	83
IV.2. Code de calcul CYMGrd.....	83
IV.3 Optimisation par colonie d'abeilles artificielles.....	84
IV.3.1. Fonction objectif.....	84
IV.3.2. Gestion des contraintes.....	86
IV.3.2.1. Algorithme ABC de base.....	86
IV.3.2.2. Algorithme ABC modifié.....	87
IV.3.3. Fonction fitness.....	87
IV.3.4. Taille de la population.....	88
IV.3.5. Nombre d'itérations.....	88
IV.4. Applications et validation.....	88
IV.4.1. Ouvrage énergétique de Labreg.....	89
IV.4.1.1. Optimisation par ABC de base.....	90
IV.4.1.2. Validation en utilisant CYMGrd.....	93
IV.4.1.3. Optimisation par la technique ABC modifiée.....	96
IV.4.2. Poste de transformation 60 /30 kV de Ain El-Melh.....	98
IV.4.2.1. Optimisation par la technique d'Algorithme ABC de base.....	99

IV.4.2.2. Validation des résultats obtenus par ABC en utilisant CYMGrd	102
IV.4.2.3. Optimisation par la technique d'Algorithme ABC modifié.....	104
IV.4.2.4. Validation des résultats obtenus par ABC modifié en utilisant CYMGrd.....	106
IV.5. Comparaison aux résultats d'optimisation obtenus antérieurement...	108
IV.6. Conclusion.....	111
Conclusion générale.....	114
Perspective.....	115
Bibliographie.....	116

Liste Des Figures

Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets).....	8
Figure I.2 : Tension de contact.....	9
Figure I.3: Tension de pas.....	10
Figure I.4 : Représentation des différentes tensions de sécurité.....	11
Figure I.5 : Section du globe terrestre.....	12
Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Wenner.....	16
Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger.....	17
Figure I.8 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles.....	18
Figure I.9 : Schéma de liaison à la terre en basse tension TT.....	20
Figure I.10 : Schéma de liaison à la terre en basse tension IT.....	21
Figure I.11.a : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-C.....	21
Figure I.11.b : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-S.....	22
Figure I.12 : La dimension d'un élément de mise à la terre.....	30
Figure I.13 : Le courant provenant du défaut et se refermant par le neutre local.....	31
Figure I.14 : Le courant de défaut retournant aux neutres lointains.....	31
Figure I.15 : Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000.....	35
Figure II.1: Modélisation et résolution pour l'optimisation.....	38
Figure II.2 : Espace de recherche.....	40
Figure II.3 : Espace de valeurs réalisables.....	40

Figure II.4 : Maximum global, local fort et local faible.....	41
Figure II.5 : Méthodes d'optimisation mono-objectif.....	44
Figure II.6 : Modèle de la boîte noire.....	45
Figure II.7 : Organigramme d'un AG standard.....	54
Figure II.8 : Déplacement d'une particule.....	56
Figure II.9 : Étapes d'un algorithme d'Essaim Particulaire.....	56
Figure III.1 : Danses des Abeilles.....	61
Figure III.2 : L'indication de la direction.....	62
Figure III.3 : Conception de modification de la position de la recherche par VBA.....	68
Figure III.4 : Organigramme pour l'algorithme ABC.....	82
Figure IV.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations.....	91
Figure IV.2 : Courbe de convergence du coût.....	91
Figure IV.3 : Topologie de la grille.....	92
Figure IV.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D.....	94
Figure IV.5 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	95
Figure IV.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	95
Figure IV.7 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations.....	96
Figure IV.8 : Courbe de convergence du coût.....	97
Figure IV.9 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations.....	100
Figure IV.10 : Courbe de convergence du coût.....	101
Figure IV.11 : Topologie de la grille selon ABC basique.....	101

Figure IV.12 : Topologie de la grille en 3D.....	103
Figure IV.13 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	103
Figure IV.14 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	104
Figure IV.15 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations.....	105
Figure IV.16 : Coût en fonction du nombre itérations.....	105
Figure IV.17 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	108
Figure IV.18 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	108
Figure IV.19 : Coût de construction du système optimisé de l'ouvrage énergétique de Labreg, en fonction du nombre d'itérations et ce pour toutes les technique.....	110
Figure IV.20 : Figure comparative entre les différentes courbes de cout du poste de transformation de Ain El-Melh	112

Liste Des Tableaux

Tableau I.1 : Résistivités moyennes des différents types de sol.....	14
Tableau I.2 : Signification des lettres des différentes configurations.....	19
Tableau I.3 : Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation.....	23
Tableau I.4 : Types et caractéristiques des matériaux des électrodes de terre.....	28
Tableau I.5 : Valeurs typiques de D_f	32
Tableau II.1. Classification des problèmes d’optimisation.....	42
Tableau III.1 : Algorithmes inspirés du comportement des abeilles.....	63
Tableau IV.1: Intervalles de variation des paramètres.....	85
Tableau IV.2 : Coûts unitaires des principaux matériaux de mise à la terre.....	85
Tableau IV.3 : Données à introduire dans les programmes développés.....	90
Tableau IV.4 : Paramètres optimaux obtenus par le biais de l’algorithme ABC de base.....	92
Tableau IV.5 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus à travers l’algorithme ABC de base.....	93
Tableau IV.6 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd.....	93
Tableau IV.7 : Valeurs optimales obtenues par l’optimisation ABC modifié.....	97

Liste des tableaux

Tableau IV.8 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus par ABC Modifié.....	98
Tableau IV.9 : Données du poste de transformation de Ain El-Melh.....	99
Tableau IV.10 : Paramètres optimaux selon ABC basique.....	101
Tableau IV.11 : Paramètres électriques optimaux obtenus par ABC de base.....	102
Tableau IV.12 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd.....	102
Tableau IV.13 : Valeurs optimales obtenues par l'optimisation ABC modifié.....	106
Tableau IV.14 : Paramètres électriques optimaux obtenus par ABC modifié.....	106
Tableau IV.15 : Valeurs optimales paramètres électriques obtenus par ABC modifié.....	107
Tableau IV.16 : Résultats des techniques appliqués relatifs au système de terre de l'Ouvrage énergétique de Labreg.....	109
Tableau IV.17 : Coût, nombre d'itérations et temps d'exécution obtenus en utilisant les différentes techniques d'optimisation.....	110

ملخص

يقدم هذا العمل الذي يأتي في إطار مشروع التخرج - مساهمة في تحديد الأمثلية لنظم التأسيس من أجل العثور على التكلفة الأمثل مع مراعاة كفاءة المنشأة من حيث ضمان سلامة الأشخاص و التجهيز المستعمل. للقيام بذلك، قمنا بتطوير تقنية من بين التقنيات المستعملة في تحديد الأمثلية. تستند التقنية على طريقة بحث النحل على مصدر الرحيق (ABC)، من أجل هذا تم تنفيذ البرنامج القائم على هذه التقنية تحت بيئة MATLAB مع الأخذ بعين الاعتبار مراحل التصميم والتوصيات الموافقة لـ IEEE 80-2000. وعليه اعتمدنا في تحديد الأمثلية على المنشآت التالية محطة توليد الكهرباء لبرق الواقعة بولاية سكيكدة أما الثانية فتتمثل في محطة المحولات الكهربائية المتواجدة بدائرة عين الملح التابعة لولاية المسيلة. قمنا في كل مراحل العملية بمواجهة النتائج المتحصل عليها بتلك التي وجدناها باستخدام برنامج CYMGrd. تحصلنا على توافق جيد بين النتائج.

الكلمات الرئيسية : التأسيس، تحديد الأمثلية، بحث النحل على مصدر الرحيق، دالة الهدف، شبكة التأسيس، أعمدة التأسيس، IEEE 80-2000.

Résumé

Dans le cadre du Projet de Fin d'Etudes, nous présentons une contribution à l'optimisation des systèmes de mise à la terre afin de trouver une installation optimale en matière de coût et efficace en matière de sécurité de personnes et de matériels. A cette fin, nous avons développé deux techniques d'optimisation basées sur le comportement des abeilles. La première est Colonie d'Abeilles Artificielles, et la deuxième est Colonie d'Abeilles Artificielles Modifiée. L'implémentation des programmes basés sur ces deux techniques a été faite sous environnement MATLAB, en tenant compte de la procédure de conception selon IEEE 80-2000. Nous nous sommes intéressés lors de notre optimisation, aux deux ouvrages électriques; l'ouvrage énergétique de Labreg situant à la Wilaya de Khenchela et le poste de transformation de Ain El-Melh situant à la Wilaya de M'Sila. Les résultats obtenus ont été validés on les confrontant à ceux trouvés en utilisant CYMGrd.

Mots clés : Mise à la terre, Optimisation, Algorithme Colonie d'Abeilles Artificielles, Fonction objectif, Réseau de terre, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grille, Piquets.

Abstract

Within the graduating project, we present a contribution to the optimization of grounding systems in order to find an optimal cost and efficient safety of people and materials. For this purpose, we have developed two optimization techniques based on behavior of bees. The first one is artificial bee colony, and the second is artificial bee colony modified. The implementation of programs based on these two techniques has been developed under MATLAB environment, taking into account the design procedure according to IEEE 80-2000. We were interested in our optimization, to the following power plants; the power plant of Labreg (W.Khenchela) and the substation of Ain El-Melh (W.M'sila). The results were validated by comparing them to CYMGRD ones.

Key words : Grounding, Optimization, artificial bee colony, objectif function, Gounding network, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grounding grid, Rods.

Introduction générale

Dans des conditions de défaut, le courant circule dans le sol à travers le système de mise à la terre, ce qui engendre une élévation de potentiel de terre (EPT), par rapport à une terre lointaine (potentiel de référence). L'élévation de potentiel affecte la sûreté des personnes en raison de tensions de contact et de pas, au moment où l'EPT affecte l'isolation des dispositifs de protection [UND 12]. Par conséquent, la conception d'un système de mise à la terre appropriée est l'un des paramètres les plus déterminants pour assurer la sécurité des personnes, des appareils et des équipements, et d'améliorer la qualité du service électrique [LEE 09]. En effet, les problèmes liés à la conception du système de mise à la terre attirent l'attention des ingénieurs et des concepteurs notamment avec le développement de l'industrie, la forte demande d'énergie électrique et l'augmentation importante du niveau tension [UND 12, NZU 09].

En outre, la demande de réduction des coûts de construction, pour résister à la concurrence économique mondiale, a incité les ingénieurs à chercher des méthodes d'optimisation permettant de concevoir des systèmes de mise à la terre fiables, efficaces et économiques. Les techniques d'optimisation, après avoir atteint un degré de maturité au cours des dernières années, sont largement utilisées dans l'industrie, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la chimie, l'électricité, la construction et les industries de fabrication [NZU 09]. Cependant, l'optimisation de la conception, si elle est faite manuellement, peut être extrêmement chronophage. En plus, il n'offre aucune garantie de résultats appropriés [NEZ 13].

Avec l'évolution rapide de la technologie informatique, les ordinateurs sont de plus en plus puissants, et en conséquence, la taille et la complexité des problèmes de conception des

systèmes de terre qui peuvent être résolus en utilisant des techniques d'optimisation sont également en augmentation. La caractéristique la plus importante d'un ordinateur à grande vitesse est sa capacité à exécuter efficacement les opérations itératives. Afin d'exploiter cette caractéristique de base, la plupart des algorithmes visant à résoudre les grands problèmes d'optimisation sont de nature itérative [DAV 08].

De nombreuses techniques, seules ou couplées avec des outils modernes de conception à base d'ordinateur, ont été mises au point dans le processus d'optimisation [RAO 09]. La conception optimale d'un système de mise à la terre est réalisée par minimisation de la fonction coût (appelée aussi fonction objectif) en se basant sur la décision optimale des paramètres géométriques tels que le nombre et le diamètre des conducteurs et des piquets, la profondeur d'enfouissement, l'espacement entre les conducteurs, ... [LEE 08]. Dans un tel système optimal de mise à la terre, les tensions de contact et de pas en un point quelconque de l'installation ne doivent pas dépasser les valeurs maximales admissibles [DAW 79].

Récemment, les méthodes modernes d'optimisation, également appelées méthodes d'optimisation non-traditionnelles, ont été émergées comme étant des techniques puissantes et populaires pour la conception de systèmes de mise à la terre. Beaucoup de problèmes d'optimisation liés à la conception de tels systèmes utilisent les approches méta-heuristiques pour minimiser les différents modèles mathématiques de la fonction de coût, en présence de diverses contraintes [GIO 85]. A titre d'exemple, la méthode du recuit simulé (RS) a été utilisée par Chou [CHO 98] pour optimiser une grille de mise à la terre ayant une surface de 3000m^2 d'un poste de 69 kV. La fonction de coût proposée dans cette investigation dépend à la fois du coût des matériaux et de l'installation, ainsi que sur des contraintes de sécurité. La conception optimale révèle l'efficacité de RS. En outre, une technique de stratégie évolutive a été élaborée par Ghoneim et al [GHO 07] afin d'optimiser la grille de mise à la terre (de 70m x 70m) sans tiges du poste 115/13kV de la norme ANSI/IEEE Std.80-2000 [IEE 00]. Les contraintes de sécurité de la dite norme consistant en la résistance à terre, l'élévation du potentiel de terre, et les tensions contact et de pas, ont été vérifiées.

Plusieurs travaux ont démontré l'efficacité des algorithmes génétiques (AGs) dans l'optimisation des systèmes de terre. Dans le but d'optimiser le réseau de mise à la terre des postes HT/MT de la Sicile (Italie), deux AGs interne et externe ont été mis au point par Covitti et al [COV 05] pour chercher respectivement la tension de contact maximale générée et le coût minimal. La conception optimale ainsi obtenue présente de meilleures performances

en termes de sécurité et coût relativement à ceux de la grille classique (actuelle) de mise à la terre. Yi-min et al [YIM 09] ont élaboré un AG permettant d'optimiser un réseau réel de mise à la terre enfouis dans un sol constitué en deux couches. Le coefficient de réflexion des deux couches du sol, l'épaisseur de la couche supérieure du sol, les conditions de sécurité de la norme ANSI / IEEE Std.80-2000 et la résistance de mise à la terre ont été pris en compte. La théorie du champ électromagnétique a été utilisée pour calculer la tension de contact et de pas maximales. Les auteurs ont comparé les résultats de l'AG à ceux obtenus en utilisant des expressions empiriques largement utilisées par la société d'électricité chinoise. Les résultats ainsi obtenus ont montré l'efficacité de l'AG offrant un grille optimale sécurisé et économique.

Roya et al [ROY 10] ont établi une technique hybride AG-RS pour la conception d'une grille optimale de terre d'une superficie de 30m x 30m et courant de défaut de 1,73 kA, en minimisant le coût de l'installation. La formulation électromagnétique basée sur la méthode complexe quasi statique des images combinée avec la fonction de Green a été utilisée pour calculer les paramètres de sécurité selon la norme ANSI/IEEE Std.80-2000.

Divers chercheurs utilisant l'optimisation par essaim particulaire (EP) pour l'optimisation des systèmes de mise à terre. L'EP a été développée par Lee et Shen [LEE 09] pour proposer une conception de grille de mise à la terre optimale au poste 115/13kV de la norme ANSI/IEEE Std.80-2000. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux utilisant à la fois un AG et les formules empiriques de la norme ANSI/IEEE. Une bonne concordance a été obtenue. En outre, la méthode d'EP offre un coût et temps de calcul inférieur par rapport à ceux de l'AG. La même technique a été élaborée par Nezhad et al [NEZ 13] pour concevoir le système de mise à la terre d'un poste caractérisé par une surface de 200m x 150m et un courant de défaut de 21 kA. La fonction de coût comprend le diamètre des conducteurs, l'espacement entre les conducteurs, le nombre, la longueur et le diamètre des tiges, la profondeur de la grille de terre et les différents coûts de matériels, d'excavation et les effets de soudage, en tenant les restrictions de sécurité concernant l'EPT ainsi que les tensions de contact et de pas considérées par la norme ANSI/IEEE Std. 80-2000.

Bendekkiche et Kemari [BEN 13] ont développé, lors de leur projet de fin d'études effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, deux techniques d'optimisation basées sur les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires. Ils se sont intéressés aux ouvrages électriques suivants : (1) le réseau de terre de la norme

ANSI/IEEE std.80-2000, (2) l'ouvrage énergétique de Labreg situé à la Wilaya de Khenchela et contenant une centrale à turbine à gaz (TG) d'une puissance nominale d'environ $2 \times 140,5$ MW, (3) le poste de transformation de Ain El-Melh situé à la wilaya de M'Sila est constitué d'un étage de 60 kV avec 02 transformateurs de puissance 60/30 kV, 40 MVA chacun.

Le but de notre travail, entrepris dans le cadre de ce projet de fin d'études, est de trouver une installation de mise à la terre optimale en matière de coût et efficace en matière de sécurité de personnes et de matériels. Une telle optimisation a été accomplie en développant, sous environnement Matlab, des algorithmes basés sur les Colonie d'Abeilles Artificielles (Artificial Bee Colony, ABC). De telles techniques ont prouvé leur efficacité dans beaucoup d'applications dans différents domaines [TEO 05]. En effet, deux algorithmes ABC, basique et modifié, ont été développés. Nous nous sommes intéressés lors de cette présente étude, aux mêmes ouvrages électriques précédemment cités [BEN 13]. Cette optimisation est basée sur la fonction objectif de coût. Cette dernière inclut le nombre et la longueur des conducteurs parallèles et verticaux, le diamètre des conducteurs, l'épaisseur de la couche superficielle, les contraintes sur les tensions de pas et de contact ainsi que l'espacement entre les électrodes. Nos résultats ont été validés en utilisant le code de calcul CYMGrd [CYM 06] et ont été comparés à ceux obtenus par Bendekkiche et Kemari [BEN 13] développant deux techniques basées sur les AG et EP.

Ainsi, notre mémoire s'articule sur quatre chapitres distincts. Le premier chapitre porte sur deux parties différentes. La première partie regroupe des généralités sur la mise à la terre des installations électriques. En effet, les différentes définitions relatives à ce domaine, les diverses structures ainsi que les caractéristiques du sol dans lequel est enfoui le système de terre, les méthodes les plus populaires permettant la mesure de la résistivité du sol ainsi que les différents régimes du neutre et schémas de liaisons à la terre y sont présentés. Les expressions des résistances des configurations de mise à la terre les plus utilisées, les matériaux utilisés dans la construction des systèmes de terre y sont également exposés. Dans la seconde partie, nous présentons la méthodologie relative à la conception des systèmes de mise à la terre selon la norme ANSI/IEEE std.80-2000.

Le deuxième chapitre englobe des généralités relatives à l'optimisation (sa définition, son concept, les différents critères d'optimalité, la classification des problèmes d'optimisation, ...). Les différentes méthodes d'optimisation approchées, plus particulièrement les techniques méta-heuristiques, ainsi que leurs caractéristiques y sont également présentées.

Nous présentons dans le troisième chapitre, la structure d'une colonie d'abeilles ainsi que la description du comportement des abeilles lors de la recherche de nourriture. Quelques algorithmes inspirés du comportement social des abeilles, leurs principes de fonctionnement et ses paramètres caractéristiques, y sont aussi exposés. Finalement, les algorithmes de base et modifié d'optimisation par Colonie d'Abeilles Artificielles (Artificial Bee Colony "ABC"), développés dans cette étude, y sont exposés d'une façon détaillée.

Le quatrième et le dernier chapitre est consacré à l'application des techniques d'optimisation par colonies d'abeilles artificielles sur l'ouvrage énergétique de Labreg et le poste de Ain El-Melh que nous avons considérés. Deux programmes type ABC, basique et modifié, ont été exposés. Le but est de minimiser la fonction coût et d'assurer la sécurité de chaque ouvrage. La validation de nos programmes ainsi que la confrontation de nos résultats à ceux trouvés par Bendikkiche et Kemari y sont également présentées.

Nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.

Chapitre I

*Généralités sur la mise à la terre
et conception selon la norme
IEEE 80-2000*

I.1. Introduction

La mise à la terre constitue le moyen de protection le plus élémentaire et le plus important pour les ouvrages (centrales, postes ...) constituant les réseaux électriques. En effet, à cause de sa capacité à évacuer le courant de défaut dans le sol, une mise à la terre permet d'assurer la sécurité des êtres vivants et la protection des ouvrages et des équipements électriques. En outre, elle est prise comme référence de potentiel absolu dans la production de l'énergie électrique.

Le réseau de terre d'une installation électrique doit donc assumer simultanément plusieurs fonctions: écouler dans le sol les courants de défaut et de foudre, assurer à tout moment le maintien de la sécurité des personnes et des biens et maintenir un potentiel de référence; la notion de l'équipotentialité est la première caractéristique recherchée de l'ensemble du réseau et du circuit de terre [EDF 84].

La mise à la terre dans les réseaux électriques paraît être relativement simple. Cependant elle n'a cessé de présenter des difficultés. Les progrès récents accomplis tant en électrotechnique qu'en électronique de puissance ont fait apparaître de nouveaux problèmes, encore non parfaitement résolus. De tels problèmes sont dus à la coexistence d'équipements électroniques sensibles avec des installations susceptibles de produire des courants de court-circuit de plusieurs dizaines de kilo ampère [EDF 84].

L'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol autour du réseau de terre. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité: la conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol [EDF 84].

I.2. Définitions

I.2.1. Mise à la terre

C'est relier la masse (une enveloppe métallique) ou le neutre d'une installation, un ouvrage ou un équipement électrique à une prise de terre.

I.2.2. Terre de référence

C'est la partie du sol, en particulier à la surface, localisée en dehors de la sphère d'influence de la prise de terre considérée, c'est-à-dire entre deux points quelconques pour lesquels il n'y a pas de tension perceptible résultant de la circulation du courant dans cette prise de terre. Le potentiel de la terre de référence est toujours considéré comme nul [NUZ 09].

I.2.3. Masse

C'est la partie conductrice d'un matériel électrique, qui n'est pas normalement sous tension, mais qui peut le devenir en cas de défaut d'isolement des parties actives de ce matériel [LEF 07].

Les différentes masses sont distinguées par leurs fonctions, par exemple la masse pour la protection des personnes, pour établir une surface équipotentielle pour le commun d'alimentation en électronique ...etc.

I.2.4. Conducteur de terre

C'est un conducteur qui relie une partie d'installation électrique, une partie conductrice accessible ou une partie métallique conductrice situées dans l'environnement électrique, à la prise de terre ou qui relie différentes prises de terre. Le conducteur de terre est installé sur le sol, mais s'il est enterré, il doit être isolé de la terre [NUZ 09].

I.2.5. Réseau de terre

C'est un ensemble de conducteurs non isolés qui constituent un réseau enterré, afin d'assurer l'écoulement efficace du courant de défaut en gardant le même potentiel en tout point du sol [NUZ 09].

I.2.6. Prise de terre

C'est un conducteur avec une partie enterrée qui assure une liaison électrique avec le réseau de terre (Grille, Piquet ...), les types de prise de terre sont distingués à partir de leur profondeur, la prise de terre de surface est de 0.80m à 1m de profondeur, la prise de terre de profondeur est de 3m et plus [LEF 07].

I.2.7. Eléments d'une mise à la terre

Deux types de systèmes de mise à la terre sont distingués selon la simplicité ou la complexité de ses éléments. Le système simple est un conducteur enterré. Par contre, le système complexe est un réseau de conducteurs maillés horizontale, en général, relié à des piquets verticaux (Figure I.1).

La forme de la prise de terre est normalement commandée par l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre. Par exemple, la prise de terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste [KLA 07].

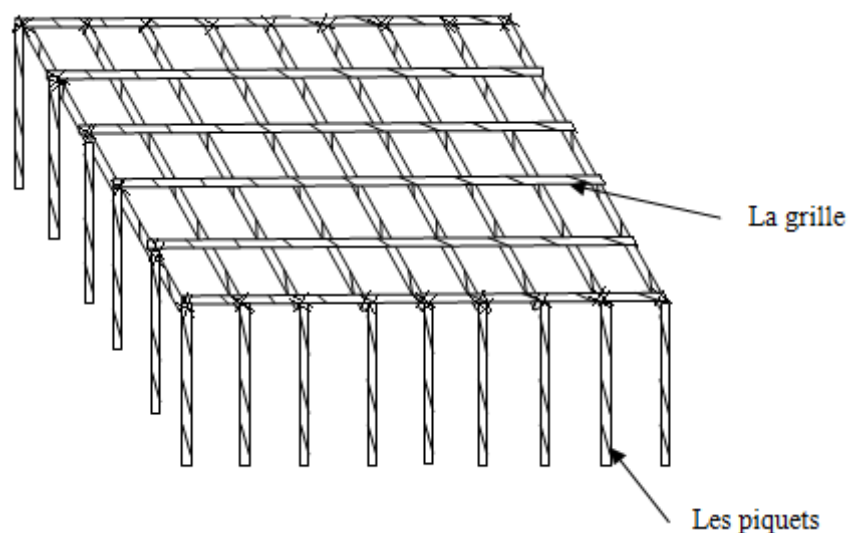


Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets)

I.2.8. Elévation du potentielle de terre

Lors de l'écoulement du courant de défaut dans le sol à travers les électrodes, une augmentation de différence de potentiel se développe entre la terre au voisinage de l'électrode et une terre lointaine avec un potentiel nul.

I.2.9. Tension de contact

La tension de contact appelée aussi la tension de toucher, est la différence de potentiel entre le point de contact de la main d'une personne touchant une structure mise à la terre, et le point de contact entre son pied et la terre (Figure I.2), et on distingue le contact direct et le contact indirect. Le contact direct est le contact d'une personne avec une partie active d'un matériel sous tension, ce contact peut avoir lieu avec une phase ou avec le neutre. Le contact indirect est le contact d'une personne avec une masse d'un récepteur mise accidentellement sous-tension à la suite d'un défaut d'isolement [BON 08].

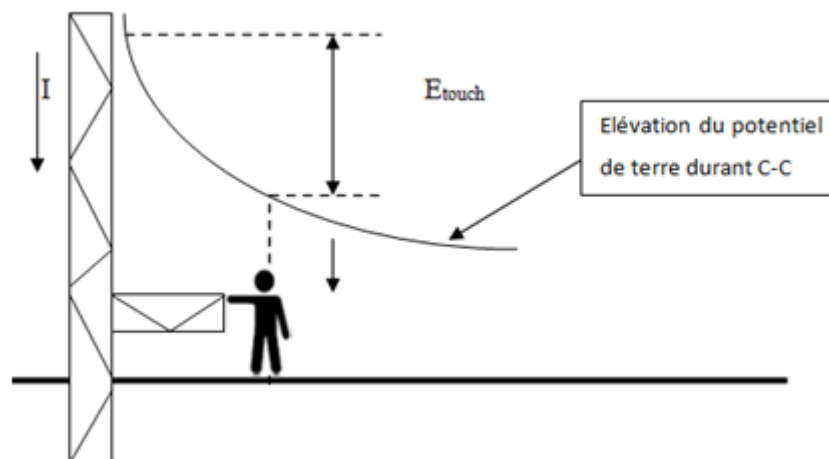


Figure I.2 : Tension de contact

I.2.10. Tension de pas

La tension de pas est la différence de potentiel entre deux points du sol, séparés par un pas humain, l'équivalent de plus ou moins 1m, dans la direction du gradient de potentiel croissant (Figure I.3) [BON 08].

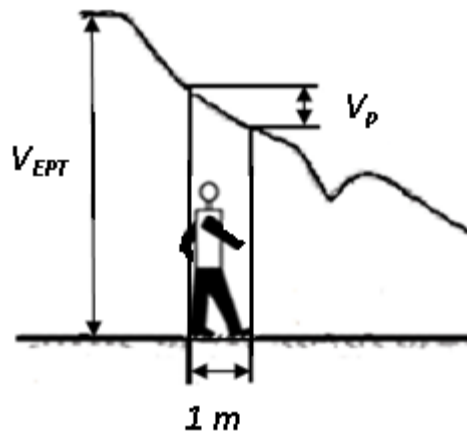


Figure I.3: Tension de pas

I.2.11. Tension de maille

La tension de maille est la différence de potentiel entre le centre d'une maille de la grille et un conducteur enterré de la même grille de mise à la terre [BON 08].

I.2.12. Tension transféré

Un cas spécial de la tension de contact dans laquelle on transfère une tension à l'extérieur d'une sous-station ou inversement, à l'aide d'un conducteur métallique référencé par terre. Ceci peut être une tension de contact très élevée [BON 08].

Les différentes tensions de sécurité sont montrées sur la figure suivante (les tensions : EPT, pas, contact, maille et transférée) :

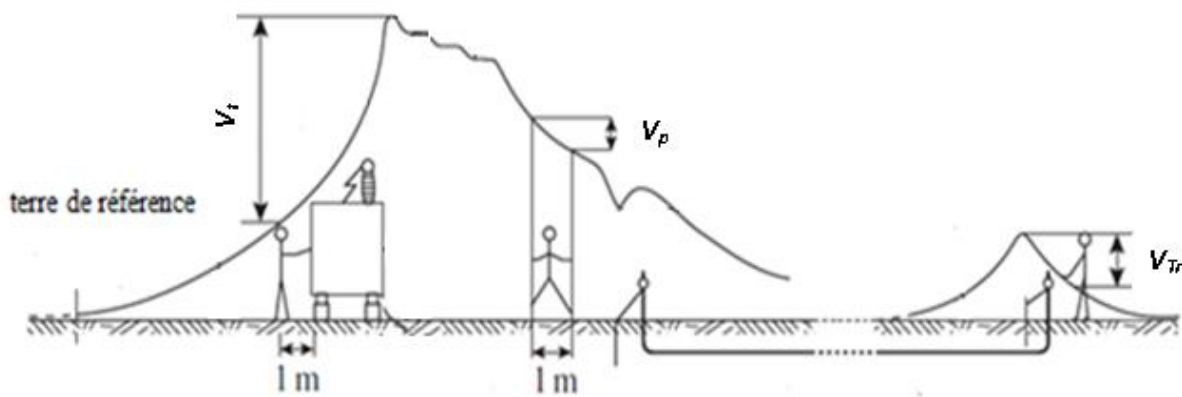


Figure I.4 : Représentation des différentes tensions de sécurité

I.3. Effet du courant électrique sur le corps humain

Le corps humain est un conducteur d'électricité en général, avec une résistance entre 1000Ω et 600000Ω . Cette résistance varie en fonction des personnes et la trajectoire du courant. Les dégâts causés par le déplacement des charges électriques dépendent de la fréquence, l'amplitude, la trajectoire du courant, la résistance du corps et le temps d'exposition [FRA 10].

Si on évalue les dégâts en fonction de l'amplitude du courant électrique, on peut constater les résultats suivants [FRA 10].

- Une sensation du courant à 0.5mA.
- Des contractions musculaire jusqu'à la tétanisation à 10mA.
- Une paralysie respiratoire à 30mA.
- Une fibrillation cardiaque irréversible à 75mA.
- Un arrêt cardiaque à 1A.

La constante empirique S_B qui caractérise l'énergie de décharge tolérée par le corps humain, s'écrit de la forme suivante [BON 08] :

$$S_B = (I_B)^2 t_c \quad (I.1)$$

I_B : le courant toléré par le corps humain en A.

t_c : duré d'exposition en s.

La tolérance du corps humain est limitée par :

- $\sqrt{S_B} = 0.116$ pour un corps de 50kg.
- $\sqrt{S_B} = 0.157$ pour un corps de 70kg.

I.4. Structures et caractéristiques de la terre

I.4.1 Structure de la planète Terre

Le rayon de la Terre est de 6370 km divisé en cinq couches (Figure I.5) :

- LITHOSPHERE à l'extérieur avec une résistivité variante entre 10^{-1} $\Omega.m$ jusqu'à 10^8 $\Omega.m$. Elle contient la Croute à la surface ;
- ASTHENOSPHERE et MESOSPHERE qui forment le Manteau, leur résistivité varie de 10^3 à 10^4 $\Omega.m$.
- NOYAU EXTERNE et INTERNE leur résistivité varie entre 10^{-4} et 10^{-3} $\Omega.m$.

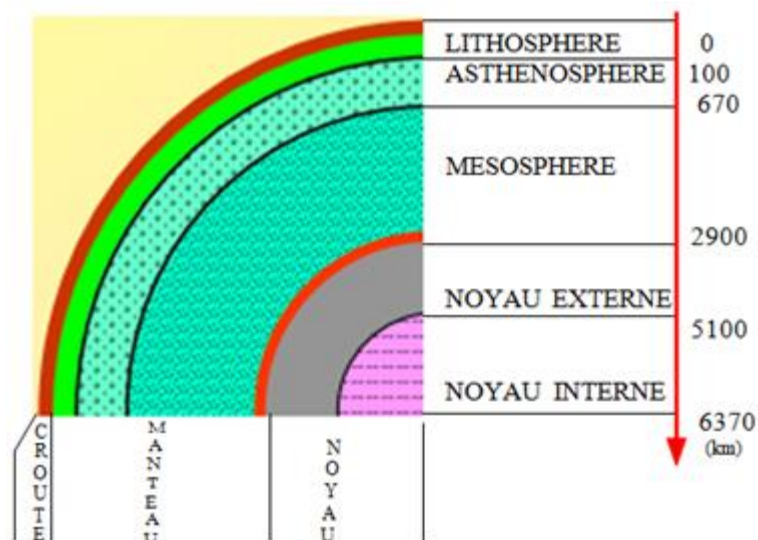


Figure I.5 : Section du globe terrestre

I.4.2. Nature du sol

Pour réaliser une étude parfaite d'un système de mise à la terre, il faut déterminer la nature du sol. Cette dernière dépend de la position géographique du sol en question. En effet, pour déterminer la nature des sols, il faut faire des forages. De tels forages sont caractérisés par des couts élevés. En outre, les caractéristiques électriques du sol ne sont pas toujours faciles à déterminer. On se contente, par conséquent, d'une mesure locale des paramètres électriques.

I.4.3. Caractéristiques électriques du sol

Le courant électrique dans le sol est le déplacement des charges électrique entre deux points de potentiel différent. On peut distinguer deux types de conduction ; la conduction électrolytique pour les corps à l'état soluble et la conduction électronique pour le déplacement des électrons libres [IEE 00].

Pour caractériser le comportement électrique du sol, il faut déterminer les trois grandeurs suivantes :

- La résistivité ;
- La permittivité ;
- La perméabilité.

I.4.3.1. Résistivité

La terre a la propriété de résister au déplacement des charges électriques, cette résistance R est caractérisée par la résistivité ρ . La résistivité est une quantité mesurable et elle dépend de plusieurs paramètres, entre autres, la nature du sol, la pression, la porosité, le pourcentage d'humidité, le pourcentage d'acides et de bases, la température

Le Tableau I.1 montre la résistivité des différents types du sol [EDF 84].

Nature du sol	Résistivité en Ωm
Tourbe humide	5 à 10
Humus	10 à 20
Limon	20 à 30
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 500
Calcaires fissurés	500 à 1000
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Calcaires compacts	1000 à 5000
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000

Tableau I.1 : Résistivités moyennes des différents types de sol

Pour une étude pratique et moins compliquée, on peut supposer que les sols avec une différence maximale de la résistivité entre leurs couches inférieure à 30% comme homogènes [TAY 08].

Si la condition précédente n'est pas vérifiée, on considère un sol à deux couches. Ce modèle équivalent pourrait être fiable pour obtenir une mise à la terre sûre. On peut décrire le changement brusque de résistivité par la formule suivante [TAY 08] :

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{I.2})$$

ρ_1 : résistivité de la couche supérieure ;

ρ_2 : résistivité de la couche inférieure.

Dans le d'un sol à plusieurs couches, on peut déterminer la résistivité apparente avec les deux formules suivantes [BON 08]:

$$\rho_a = \frac{\rho(a_1) + \rho(a_2) + \rho(a_3) + \dots + \rho(a_n)}{n} \quad (\text{I.3})$$

$\rho(a_1), \rho(a_2), \rho(a_3), \dots, \rho(a_n)$: les résistivités des différentes couches du sol.

$$\rho_a = \frac{\rho_a(\text{max}) + \rho_a(\text{min})}{2} \quad (\text{I.4})$$

$\rho_{a(\text{max})}, \rho_{a(\text{min})}$: résistivité apparente moyenne maximale et minimale des n couches du sol.

I.4.3.2. Permittivité

La permittivité ε , caractérise le comportement diélectrique des matériaux. Elle est en fonction de la permittivité propre de ses différents composants du sol.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la permittivité apparente du sol. Les plus populaires sont [FRA 10] :

- La méthode TDR (Time Domain Reflectometry), qui permet de déduire la permittivité en mesurant la vitesse de l'onde électromagnétique dans le sol.
- La méthode SCIP (Surface Capacitance Insertion Probe), qui permet de déduire la permittivité en mesurant la capacité C du condensateur créé entre deux plaques parallèles plongées dans le milieu.

I.4.3.3. Perméabilité

Comme la plupart des sols sont pauvres en oxyde de fer, ils sont considérés comme amagnétiques, donc on peut prendre la perméabilité $\mu = 1$ [TAY 08].

I.5. Mesure de la résistivité du sol

Les méthodes les plus courantes permettant la détermination de la résistivité du sol sont : la méthode de Wenner, la méthode de Schlumberger et la méthode de mesure à trois pôles. L'expression généralisée de résistivité apparente est donnée par [GEO 01] :

$$\rho(a) = \rho_i \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(2n\frac{e}{a}\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(2n\frac{e}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (I.5)$$

a : distance entre les électrodes ;

e : profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 ;

k : coefficient de réflexion.

I.5.1. Méthode de Wenner

On utilise quatre électrodes sur la même droite avec un espace entre les électrodes équidistant " a ", et enterrées verticalement, on mesure la résistivité au centre à une profondeur de " $3a/4$ ". On alimente les électrodes des extrémités par un courant I à l'aide d'un générateur 'G'. On branche un voltmètre aux bornes des deux électrodes du milieu et mesure V , puis on mesure la valeur de R à l'aide d'un telluromètre. La figure I.6 illustre le schéma du montage de la méthode de Wenner. On fait varier la distance ' a ' et obtenir un vecteur de valeur de R , puis on calcule sa valeur moyenne [TAY 08]. On peut tirer la valeur de résistivité (ρ) du point central pour un sol homogène avec la formule suivante [GAR 11] :

$$\rho = 2\pi \cdot R \cdot a \quad [\Omega \cdot m] \quad (I.6)$$

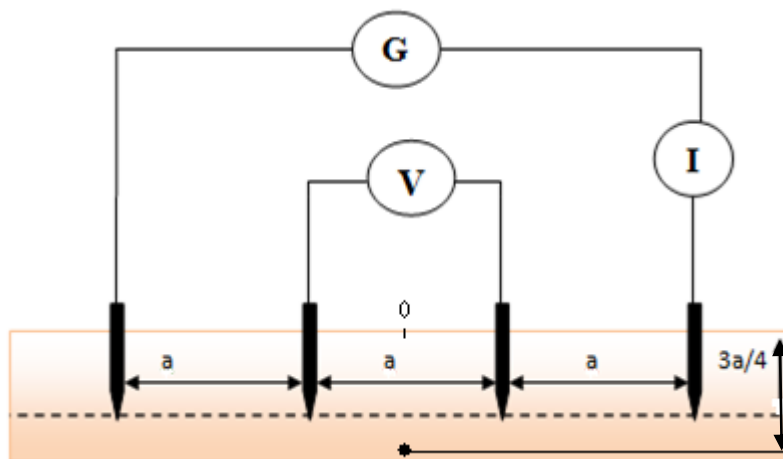


Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Wenner

I.5.2. Méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger est basée sur le même principe de mesure de Wenner. La seule différence consiste en les distances séparant les électrodes (Figure I.7) :

- la distance entre les piquets extrêmes est de '2d'.
- la distance entre les deux piquets intérieurs est de 'a'.

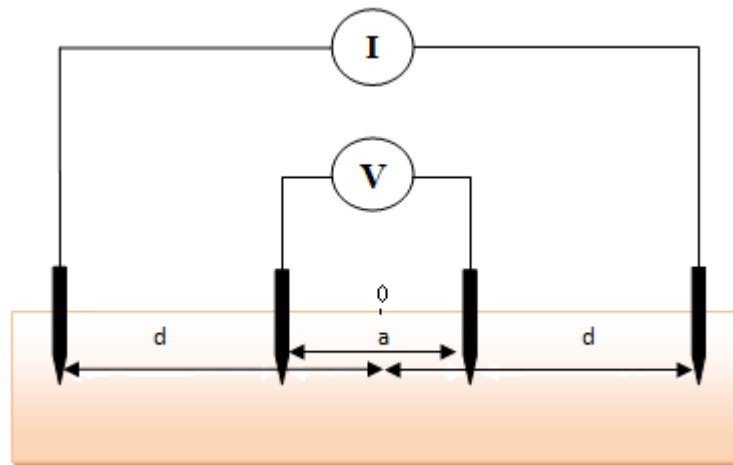


Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger

On peut calculer la résistivité en utilisant la valeur de la résistance mesuré [CHA 10] :

$$\rho = \frac{\pi \left(d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R}{4} \quad (\text{I.7})$$

La différence entre les distances des sondes dans la méthode de Schlumberger permet de garder les piquets du centre fixes, cette configuration nous fait gagner un temps considérable si nous voulions effectuer plusieurs mesures. La méthode de Schlumberger est utilisée souvent pour la stratification horizontale des terrains [CHO 06].

I.5.3. Méthode de mesure à trois pôles

La méthode de mesure à trois pôles emploie deux piquets S1 et S2, pour la circulation de courant injecté et servir comme une référence de potentiel respectivement. Le troisième pôle P est la prise de terre qu'on veut mesurer. Si la distance entre P et S2 est 'd', la distance entre P et S1 doit être de 62% de la distance 'd'. Cette disposition des sondes permet de minimiser les perturbations des pôles les uns sur les autres [TAY 08].

La mesure de la tension V et du courant I, nous permet de calculer la valeur de la résistance à l'aide de la loi d'Ohm.

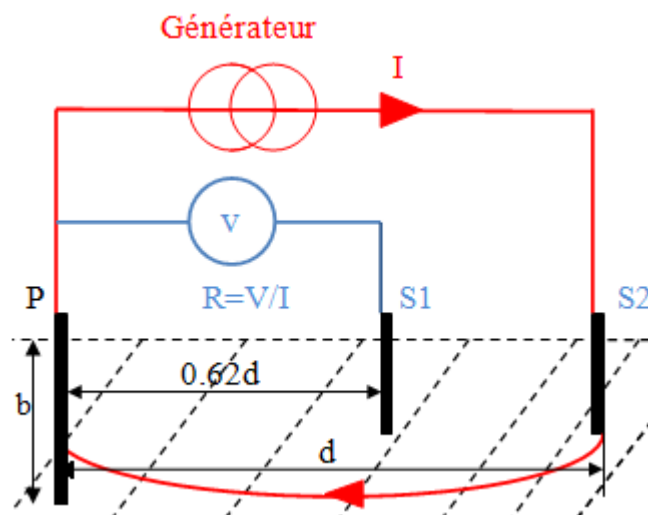


Figure I.8 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles

On calcule la résistivité par la formule suivante [GAR 11] :

$$\rho_a = \frac{2\pi bR}{\ln\left(\frac{2b^2}{d}\right)} \quad (\text{I.8})$$

b : la profondeur de P ;

d : la distance entre P et S2.

I.6. Régimes de neutre

Le régime de neutre est un symbole de l'état d'une installation électrique par rapport à la référence du potentiel (la terre).

I.6.1. Schémas de liaison à la terre en basse tension

Le schéma de liaison à la terre (SLT) illustre comment les neutres du transformateur d'alimentation et des masses des récepteurs sont reliés à la terre ou au neutre du réseau d'alimentation. On distingue trois schémas TT, IT et TN-C ou -S, qui correspondent respectivement au Figures (I.9, I.10, I.11.a, I.11.b) [LEF 07, PRE 05] :

1ère lettre	caractérise le point neutre du transformateur ou de la source	T : la liaison est directe du neutre à la Terre.
		I : la liaison est Isolée ou reliée à la terre à travers une Impédance (1 à 2 kΩ).
2ème lettre	caractérise les masses électriques des récepteurs	T : la liaison des masses est reliée à une prise de Terre
		N : la liaison des masses est reliée au Neutre.
3ème lettre	Elle décrit spécialement le régime TN	C : le conducteur de protection PE et le conducteur neutre N sont Confondus.
		S : le conducteur de protection PE et le conducteur Neutre sont Séparés.

Tableau I.2 : Signification des lettres des différentes configurations

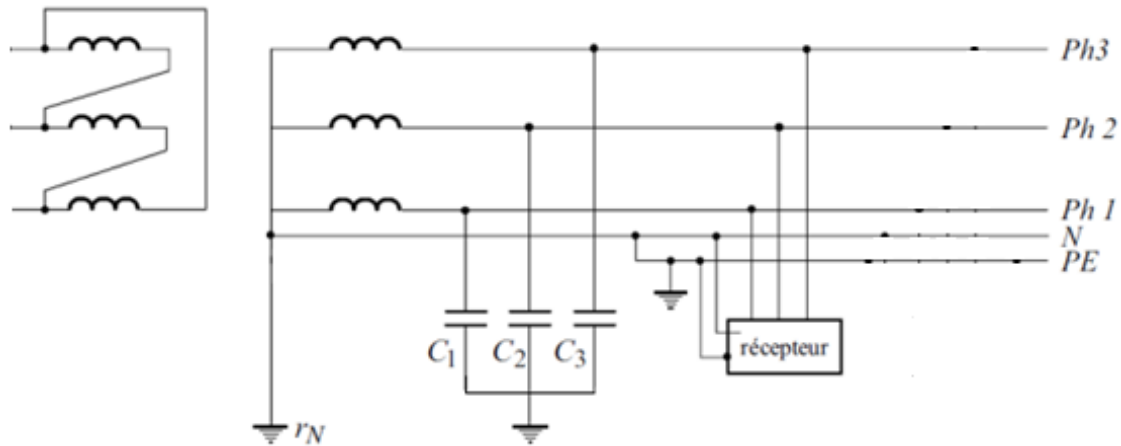


Figure I.11.b : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-S

L'objectif des SLT est d'assurer la sécurité du système d'exploitation et des personnes, en respectant les directifs de la norme CEI 60364-5-54 [CEI 02]. Pour faire le choix approprié entre les trois SLT, il faut que l'utilisateur et le concepteur précisent les caractéristiques de l'installation et les conditions d'exploitation [BEN 03].

I.6.2. Mise à la terre par neutre isolé

On ne raccorde jamais le point neutre et la terre, sauf par les appareils de mesure et de protection. Cette configuration existe dans les réseaux industriels, dont la tension est inférieure à 15 kV, juste pour assurer la continuité du service [SCH 08].

I.6.3. Mise à la terre directe

Cette configuration n'est pas utilisée dans les réseaux de haute tension, à cause des dégâts matériels, des importantes perturbations sur le réseau et le risque pour les personnes autour du défaut. Par contre, elle peut être utilisée quand le courant de court-circuit est relativement faible [SAU 91, SCH 08]. Une telle configuration limite au maximum les surtensions et assure un choix de protection d'une manière plus simple.

I.6.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance

On utilise cette configuration en moyenne tension, lorsque la résistance propre du transformateur d'alimentation est insuffisante pour limiter le courant de défaut à un seuil acceptable [EDF 59].

I.6.5. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance

Dans cette configuration, on distingue deux sous-configurations. La première est la réactance accordée (Bobine de Petersen). Elle est utilisée dans les réseaux de haute tension avec des relais sensibles au courant homopolaire pour la sélectivité. La deuxième est la réactance de limitation qui ne peut être appliquée que si l'impédance de limitation est faible. Dans le cas contraire, des surtensions très importantes sont provoquées [SAU 91, SCH 08].

I.7. Matériaux utilisés pour la construction des systèmes de mise à la terre

Pour garder un système de mise à la terre fiable le plus long temps possible, il faut éviter l'erreur classique d'ajouter des produits à base de sel afin de réduire la résistivité et obtenir un bon écoulement des courants de défaut. Cette solution fait perdre aux matériaux leurs caractéristiques [NUZ 09].

Le tableau (I.3) illustre les matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation [CEI 06].

Matériau	Utilisation			Corrosion		
	A l'air libre	Enterré	Sous béton	Résistance	Accrue	Peut être

					par	détruit par couplage galvanique avec
cuivre	Massif Torsadé	Massif Torsadé En revêtement	Massif Torsadé En revêtement	Bonne dans de nombreux environnements	Composés sulfureux Matériaux Organisés	-
Acier galvanisé à chaud	Massif Torsadé	Massif	Massif Torsadé	Acceptable dans l'air, le béton et en sol normal	Contenu important de chlorides	Cuivre
Acier inoxydable	Massif Torsadé	Massif Torsadé	Massif Torsadé	bonne dans de nombreux environnements	Solutions alcalines	-
Aluminium	Massif Torsadé	Pas bon	Pas bon	Bonne dans des atmosphères contenant des concentrations faibles de sulfure et de chlore	Sols acides	Cuivre
plomb	Massif En revêtement	Massif En revêtement	Pas bon	Bonne dans des atmosphères contenant des fortes concentrations de sulfates	Sols acides	Cuivre acier inox
<p>Note 1 : Ce tableau ne donne que des indications générales, dans des conditions particulières, à des considérations sur l'immunité contre la corrosion est requise.</p> <p>Note 2 : Les conducteurs torsadés sont plus vulnérables à la corrosion que les conducteurs massifs. les conducteurs torsadés sont aussi vulnérables s'ils entrent ou sortent du béton ou du sol. C'est pourquoi les conducteurs torsadés galvanisés ne sont pas recommandés dans le sol.</p> <p>Note 3 : L'acier galvanisé peut être corrodé dans des sols argileux ou humides.</p>						

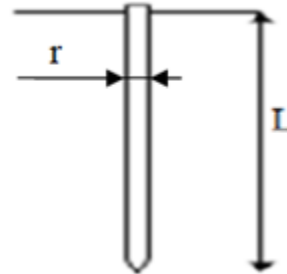
Tableau I.3 : Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation

I.8. Résistances des configurations de mise à la terre les plus utilisées

Les formules des résistances suivantes sont calculées en considérant un sol homogène de résistivité ρ [EDF 84].

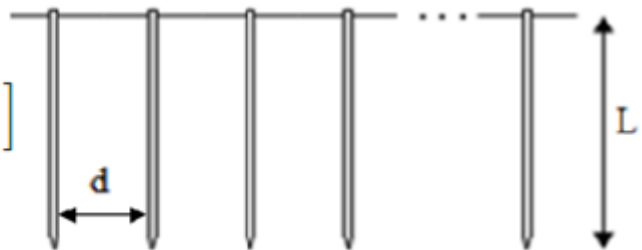
- Piquet de mise à la terre de longueur L et rayon r

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (I.9)$$



- Electrodes en ligne droite, distance entre les piquets d, longueur des piquets L et leur rayon r. ($d > 1m$)

$$R \approx \frac{1}{n} \left[\frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (I.10)$$



- Réseau maillé (P est le périmètre de la grille)

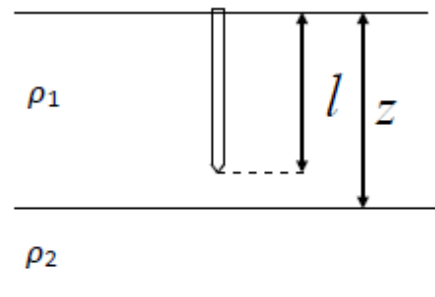
$$R \approx \frac{2\rho}{P} \quad (I.11)$$



Les formules suivantes donnent la résistance d'un piquet enterré dans un sol à deux couches stratifiées verticalement avec deux résistivités différentes [EDF 84]. Deux configurations se présentent :

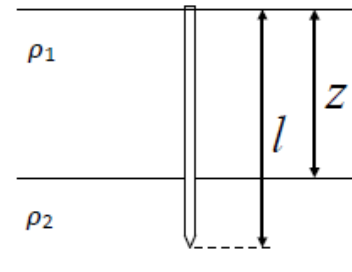
- Dans la première configuration, le piquet n'atteint pas la deuxième couche :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k^i}{2} \ln \left(\frac{\frac{iz}{l} + 1}{\frac{iz}{l} - 1} \right) \right] \quad (I.12)$$



- Dans la deuxième configuration, le piquet atteint la deuxième couche :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+k)}{[(1-k) + 2k \frac{z}{l}]} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{i=1}^{\infty} k^i \ln \left(\frac{2iz + l}{2z(i-1) + l} \right) \right] \quad (I.13)$$



I.9. Conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80- 2000

I.9.1. Introduction

La sûreté et la fiabilité sont les deux principaux piliers de la conception des systèmes mise à la terre, une conception efficace des systèmes mise à la terre assure la sécurité du personnel et les équipements, en s'assurant une résistance de terre faible pour minimiser l'élévation de potentiel EPT et pour éviter par conséquent des tensions dangereuses de contact et de pas. La planification, les calculs et les mesures des systèmes de mise à la terre

peuvent être effectuées selon des règles de la norme l'IEEE 80-2000, les valeurs de base pour ces procédures sont les courants de défaut maximum de la terre et la durée de défaut des différents niveaux de tension. La méthodologie de conception devrait également prendre en considération la minimisation des coûts de matériaux et l'installation [PIE 14].

I.9.2. Différentes étapes de conception [IEE 00]

I.9.2.1. Etape 1 : Détermination de la résistivité

La conception du système mise à la terre commence par des mesures de résistivité de terre, la méthode la plus utilisée pour mesurer la résistivité de la terre est la méthode de Wenner :

$$\rho_t = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad (\text{I.14})$$

Si on considère que $a \gg b$ on obtient l'équation simplifiée :

$$\rho_t = 2\pi aR \quad (\text{I.15})$$

ρ_t : Résistivité apparente de terre en Ω/m ;
 R : Résistance mesurée en ohms ;
 b : profondeur des électrodes en (m) ;
 a : distance entre les électrodes adjacentes en (m) ;

I.9.2.2. Etape 2 : Dimensionnement des conducteurs

La détermination de la taille minimale des conducteurs de grille de mise à la terre est nécessaire pour que la grille supporte le courant maximal de défaut I_f .

$$I_f = 3I_0 \quad (\text{I.16})$$

$$I_0 = \frac{V}{3R_{df} + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (\text{I.17})$$

R_0, R_1, R_2 : Résistances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω) ;
 X_0, X_1, X_2 : Réactances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω) ;
 V : tension simple entre phase et neutre ;

R_{df} : résistance de défaut (supposée nulle).

La section minimale du conducteur capable de résister l'élévation de température associé à un défaut à la terre est donné par la norme IEEE Std 80 par l'équation suivant :

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) + \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (I.18)$$

A_{mm^2} : section du conducteur en (mm^2) ;
 I : courant symétrique RMS (A) ;
 T_m : température maximale admissible par un conducteur ;
 α_r : coefficient thermique de résistivité ;
 $TCAP$: facteur de chaleur spécifique ;
 ρ_r : résistivité du conducteur à 20 °C

Sélection du conducteur :

Les conducteurs peuvent être de divers matériaux comprenant le cuivre, le cuivre - acier plaqué, l'aluminium, ou l'acier. Chaque type de conducteur a des avantages et des inconvénients :

Description	Conductivité (%)	α_r à 20 C° (1/C°)	K0 à 0 C°	Température de fusion Tm (C°)	ρ_r à 20C° ($\mu\Omega\text{cm}$)	TCAP capacité thermique [J/(cm ³ ·C°)]
Cuivre Recuit doux	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cuivre commercial Dur	97,0	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Plaque d'acier cuivrée, (grille)	40	0,00378	245	1084	4,40	3,85
plaque d'acier cuivrée, (piquet)	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85
Aluminium Grade EC	64,0	0,00403	228	657	2,86	2,56
Alliage d'aluminium 5005	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,60
Alliage d'aluminium 6001	52,5	0,00347	2268	654	3,28	2,6
acier recouvert d'aluminium (grill)	20,3	0,00360	258	657	8,48	3,58
Acier-1020	10,8	0,00160	605	1510	15,90	3,28
Acier inoxydable (piquet)	9,8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Acier galvanisée, (zinc)	6,8	0,00320	293	419	20,10	3,93
Acier inoxydable 304	2,4	0,00130	749	1400	72,00	4,03

Tableau I.4 : Types et caractéristiques des matériaux des électrodes de terre [IEE 00]

I.9.2.3. Etape 3 : Tensions de contact et de pas maximales admissibles

Les tensions maximales tolérables de pas et de contact peuvent être calculées de manière empirique à partir de la norme IEEE -80 pour un poids corporel de 50 kg et 70 kg:

$$V_{Tmax} = (R_B + \frac{R_f}{2}) I_b \quad (I.19)$$

La tension de contact admissible pour des personnes pesant 50 ou 70 kg; respectivement, est défini comme suit :

$$V_{Tmax50} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s)^{\frac{0.116}{\sqrt{t_c}}} \quad (I.20)$$

$$V_{Tmax70} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s)^{\frac{0.157}{\sqrt{t_c}}} \quad (I.21)$$

La tension de pas admissible est donnée par :

$$V_{Pmax} = (R_B + 2R_f) I_b$$

La tension de pas admissible pour des personnes pesant 50 et 70 kg respectivement, est définie comme suit :

$$V_{Pmax50} = (1000 + 6 C_s \rho_s)^{\frac{0.116}{\sqrt{t_c}}} \quad (I.22)$$

$$V_{Pmax70} = (1000 + 6 C_s \rho_s)^{\frac{0.157}{\sqrt{t_c}}} \quad (I.23)$$

I_b : Courant tolérable par le corps humain (A) ;

R_B : Résistance du corps humain (Ω) ($R_B = 1000 \Omega$) ;

R_f : Résistance de terre d'un pied (Ω) ;

ρ_s : Résistivité de la couche superficielle ($\Omega \cdot m$) ;

C_s : Facteur de réduction en présence de la couche superficielle

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho_t}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (I.24)$$

h_s : L'épaisseur du matériau de la couche de surface de haute résistivité en m.

I.9.2.4. Etape 4 : Conception initiale

L'analyse conceptuelle d'un réseau de terre commence habituellement par l'inspection du plan de disposition de sous-station, et dessiner la forme de mise à la terre (rectangulaires, triangulaires, forme en T, ou en forme de L). Les évaluations initiales d'espacement entre le conducteur et l'emplacement des piquets, devraient être basées sur le courant maximal de la grille I_G et la surface de la sous-station.

Dans cette démonstration, nous supposons une disposition préliminaire d'une grille de longueurs (L_x, L_y) suivant x et y, et (N_x, N_y) nombre de conducteur parallèle à x et y, (L_p, N_p) représente la longueur d'un piquet, nombre de piquet, avec l'espacement entre deux conducteurs successifs donné par l'équation suivant et une profondeur d'enterrement de grille h :

$$D = \frac{2L_x L_y}{L_c - L_x - L_y} \quad (\text{I, 25})$$

$$L_c = N_x L_x + N_y L_y \quad (\text{I, 26})$$

L_c : Longueur totale des conducteurs de terre.

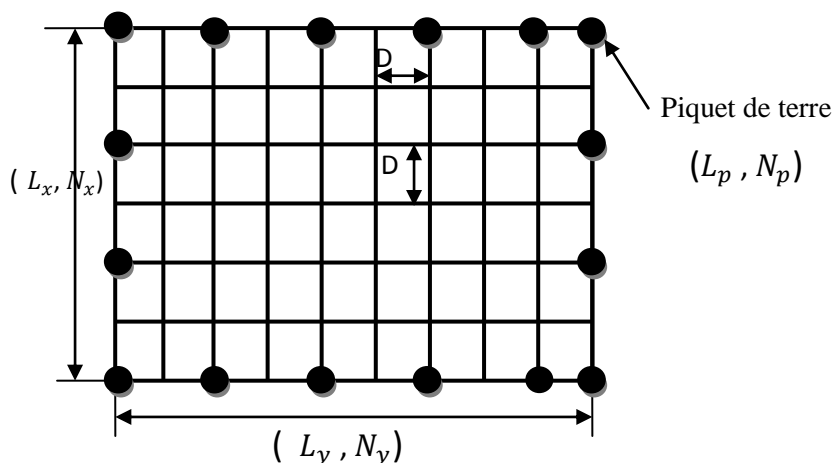


Figure I.12 : Dimension d'un élément de mise à la terre

I.9.2.5. Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille

Une bonne grille de mise à la terre a une basse résistance pour réduire au minimum l'élévation potentielle de terre (EPT) et pour éviter par conséquent des tensions dangereuses de contact et de pas, La résistance de grille de mise à la terre dépend principalement de la forme de grille de mise à la terre et longueur total des électrodes :

$$R_g = \rho_t \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (I.27)$$

ρ_t : Résistivité du sol ($\Omega \cdot m$).

I.9.2.6. Etape 6 : Courant maximum I_G de la grille

Pas la totalité du courant de défaut à la terre s'écoule à travers la terre, Une partie du courant de défaut à la terre peut avoir des voies de retours locaux, Par conséquent, un facteur de division de courant doit être appliqué pour tenir compte de la proportion du courant de défaut circulant à travers la terre,

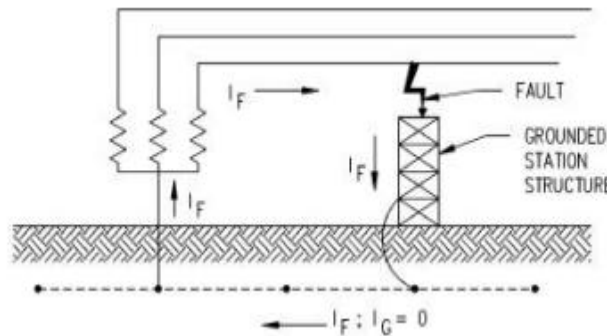


Figure I.13 : Courant provenant du défaut et se refermant par le neutre local [PIE 14]

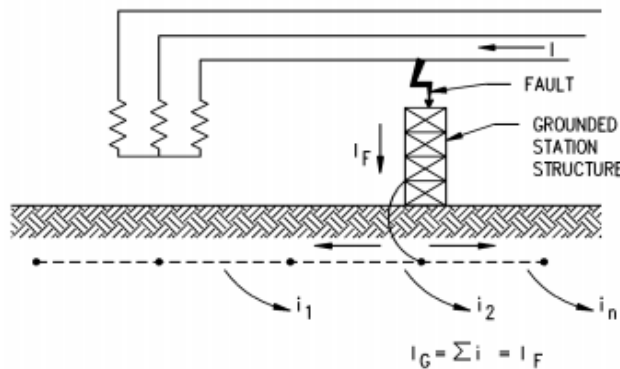


Figure I.14 : Courant de défaut retournant aux neutres lointains [PIE 14]

Courant symétrique de grille :

$$I_g = S_f (3I_0) \quad (I.28)$$

Le facteur S_f tenir compte que nom tout le courant de défaut emploie la terre comme chemin de retour.

Courant asymétrique :

Le courant de défaut asymétrique inclut les composants subtransitoires et transitoires :

$$I_F = D_f (3I_0) \quad (I.29)$$

Le facteur de décroissance elle en fonction de la durée de défaut et le rapport X/R, tel que Les composants de X et de R de l'impédance subtransitoire de défaut de système.

Durée de défaut (s)	D_f			
	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0,00833	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	1,232	1,378	1,426	1,515
0,1	1,125	1,323	1,316	1,378
0,2	1,064	1,125	1,181	1,232
0,3	1,043	1,085	1,125	1,163
0,4	1,033	1,064	1,095	1,125
0,5	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	1,018	1,035	1,052	1,068
1	1,013	1,026	1,039	1,052

Tableau I.5 : Valeurs typiques de D_f [IEE 00]

Courant maximum de grille :

Le courant maximum de grille est le courant qui traverse la grille à la terre est calculé par Equation :

$$I_G = D_f S_f (3I_0) \quad (I.30)$$

D_f : Facteur de décroissance pour la durée du défaut t_c ;

S_f : Facteur de division du courant de défaut.

I.9.2.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT)

L'élévation potentielle de terre (EPT) est calculée comme suite :

$$EPT = I_G R_g \quad (I.31)$$

I.9.2.8. Etape 8 : Tensions de maille et de pas :

Les deux tensions, de "pas" et de "contact", sont toutes les deux proportionnelles au courant de défaut et à la résistivité du terre, et inversement proportionnelles à une longueur caractéristique des électrodes verticales et horizontales [1].

$$E_m = \frac{\rho_t \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_m} \quad (I.32)$$

I_G : Courant maximum de la grille ;

K_i : Facteur d'irrégularité ;

L_m : Longueur totale des conducteurs et piquets enterrés

$$E_p = \frac{\rho_t \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_s} \quad (I.33)$$

L_c : Longueur totale des conducteurs (m) ;

L_R : Longueur totale des piquets de terre (m) ;

L_s : Longueur efficace enfouie dans la terre pour une grille (avec ou sans piquets) ;

K_m : Facteur de correction géométrique du circuit permettant de déterminer la tension de maille, donné par l'équation suivante :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (I.34)$$

$$K_{ii} = \begin{cases} \frac{1}{(2n)^2} & \text{sans piquets} \\ 1 & \text{avec piquets} \end{cases} \quad (I.35)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (I.36)$$

h : profondeur d'enfouissement (m) ;

$h_0=1m$: profondeur de référence (m) ;

D : espacement entre les conducteurs parallèles de la grille (m); n : facteur géométrique ;

d : diamètre des conducteurs de la grille (m) ;

K_s : Facteur de correction géométrique du circuit permettant de déterminer la tension de pas pour des profondeurs de la grille ne dépassant pas 2,5 m est donné par :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right) \quad (\text{I.37})$$

K_i : Coefficient d'irrégularité de la grille exprimé par la relation suivante :

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (\text{I.38})$$

n : facteur géométrique déterminé par l'équation suivante :

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (\text{I.39})$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (\text{I.40})$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (\text{I.41})$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x \times L_y}} \quad (\text{I.42})$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (\text{I.43})$$

A : Surface de la grille (m^2) ;

L_p : Longueur périphérique de la grille (m) ;

L_x : Longueur maximale de la grille en direction de x (m) ;

L_y : Longueur maximale de la grille en direction de y (m) ;

L_s : Longueur efficace enfouie dans la terre pour une grille (avec ou sans piquets) :

$$L_s = 0,75 \times L_c + 0,85 \times L_R \quad (\text{I.44})$$

L_R : Longueur total des piquets de terre (m) ;

L_c : Longueur total des conducteurs parallèles de la grille en (m) ;

$$L_m = L_c + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \quad (\text{I.45})$$

L_r : Longueur d'un piquet (m).

I.9.2.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre E_p et E_{touch50} et entre E_{set} E_{Step50}

Si les deux les tensions calculées de contact et de pas sont au-dessous des tensions tolérables, la conception a besoin seulement des améliorations exigées pour relier les équipements au système. Sinon, la conception préliminaire doit être mise à jour.

I.9.2.10. Etape 11 : Amélioration de la configuration initiale

Si les tensions de maille et de pas sont au-dessus des tensions de contact et de pas tolérées, alors la conception préliminaire doit être modifiée ;

- Diminuer la résistance totale de grille : Si la résistance de grille est diminuée, le maximum EPT est réduite.
- Diminution de l'espacement entre les conducteurs : en augmentant le nombre des conducteurs parallèles dans chaque direction. Ce que éliminer les potentiels dangereux.
- Augmenter l'épaisseur de la couche superficielle.
- Limitation du courant de défaut total, par conséquent la diminution de l'EPT.
- Détournement de la plupart du courant de défaut à d'autres chemins.

I.9.2.11. Etape 12 : configuration finale

Si les limites des tensions de pas et de contact sont réalisées, la conception finale peut être réalisée.

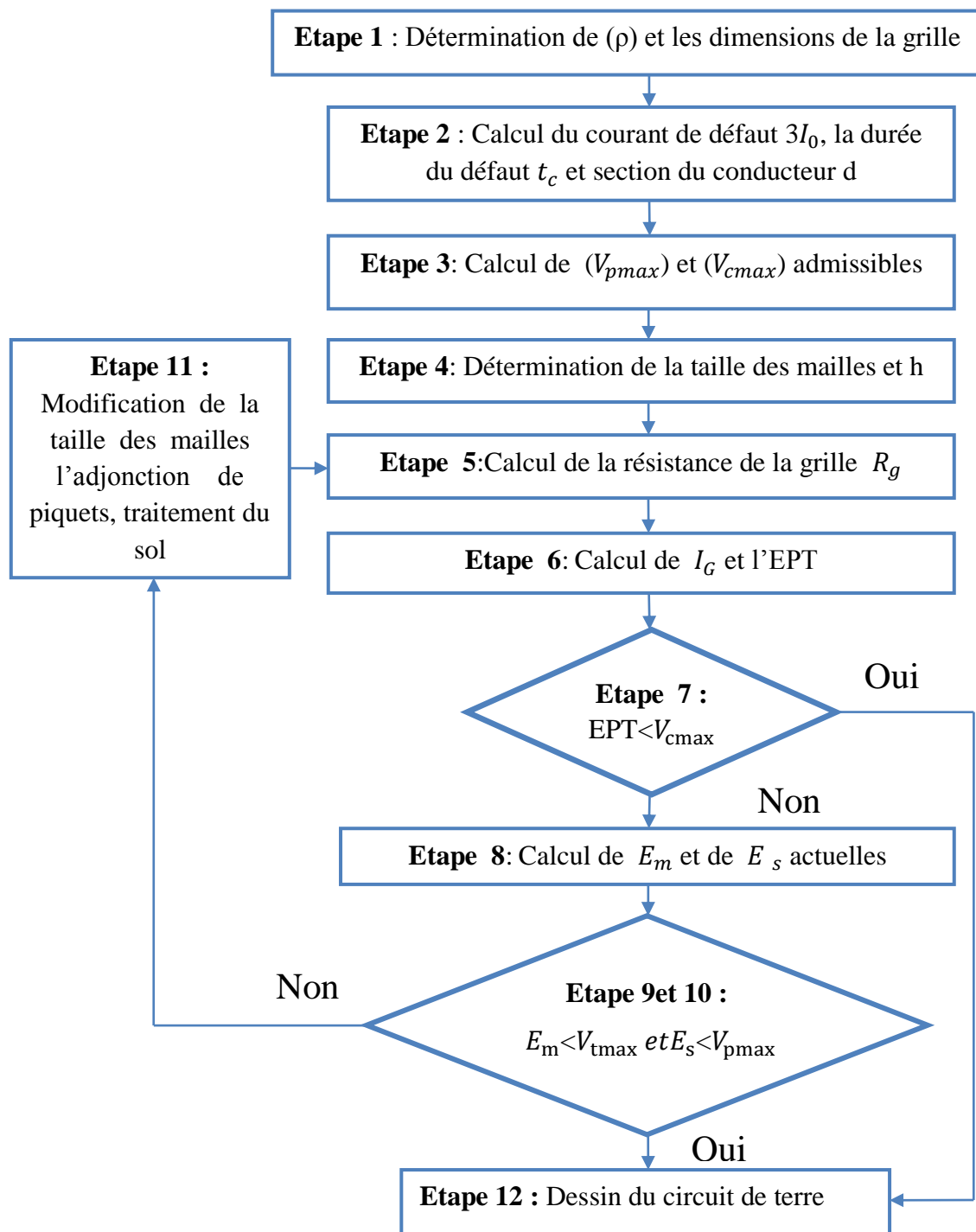


Figure I.15 : Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000 [IEE 00]

I.10. Conclusion

Pour assurer la sécurité des biens et des personnes, le système de mise à la terre doit être conçu pour évacuer la totalité des courants de défaut en toute malléabilité. Ce résultat recherché ne peut être atteint que lorsqu'on effectue une bonne mesure de résistance du sol, et choisit par conséquent la meilleure partie qui doit être exploitée à implanter le système de mise à la terre.

Le choix de la configuration et les caractéristiques des électrodes du système de mise à la terre doit être adéquat à la nature du sol et sa résistivité.

Chapitre II

*Méthodes d'Optimisation
Méta-heuristiques*

II.1. Introduction

La notion de l'optimisation est un mécanisme par lequel on trouve la valeur maximale ou minimale d'une fonction objectif. Ce mécanisme permet de résoudre des différents problèmes en utilisant une méthode de résolution. Dans ce chapitre, Nous présentons des méthodes évolutives qui dépendent des méthodes approchées (Méta-heuristiques).

Les méta-heuristiques se sont des heuristiques qui peuvent aller d'un simple algorithme de recherche local à une classe générale d'heuristique. Les heuristiques consistent à trouver une solution de l'optimum en un temps raisonnable.

Plusieurs algorithmes heuristiques modernes ont été développés pour résoudre les problèmes combinatoires et numériques d'optimisation. Ces algorithmes peuvent être classifiés dans différents groupes selon des critères basés sur la population, l'itération, la stochastique, le déterministe, etc. [MOU 12].

Un algorithme fonctionnant avec un ensemble de solutions qui subit des améliorations consécutives, est basé sur la population. Celui qui utilise des itérations multiples pour approcher la solution cherchée est appelé algorithme itératif. Si un algorithme utilise une règle de probabilité pour améliorer une solution, il est nommé probabiliste ou stochastique [MOU 12].

II.2. Optimisation

Visant un système performant, sécurisé et compétitif, nous nous intéressons particulièrement à l'optimisation pour en faire l'axe pivot de notre approche. Dans ce sens, offrir une qualité de service optimisée, si ce n'est optimal, prime sur tout autre objectif, concrétisant ainsi nos centres d'intérêts dans ce travail. L'optimalité de la qualité de service sous-entend une satisfaction des utilisateurs du système par l'intégration des fonctionnalités nécessaires.

II.2.1. Optimisation : Concept et définition

L'optimisation a été introduite dans un souci d'amélioration des services fournis, peu importe le domaine auquel ils s'appliquent. Un problème d'optimisation concerne l'exécution de méthodes spécifiques en quête d'un optimum. Ce dernier peut être une valeur maximisant ou minimisant une fonction f , dite fonction objectif ou fonction de coût ; elle est encore appelée critère d'optimisation.

Dans des travaux sur l'intégration de l'optimisation multi-objectifs pour les procédés de mise en forme [EJD 11], M. Ejday définit le concept d'optimisation comme comprenant deux phases. Celles-ci, telles que illustrées dans la Figure II.1 [BON 07], correspondent à :

- La première phase : une modélisation à travers laquelle la fonction coût serait définie, avec en plus, la détermination des variables principales d'optimisation ainsi que des contraintes d'inégalité et égalité.
- La deuxième phase : une résolution responsable de la recherche des valeurs optimisant la fonction coût et ce grâce à un algorithme d'optimisation élaboré à cet effet [BON 08].

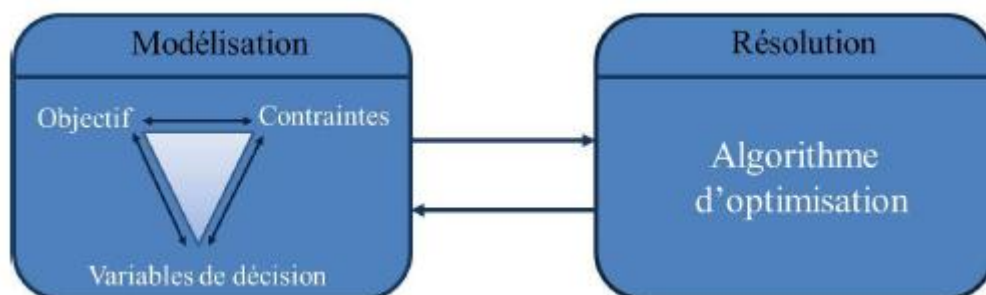


Figure II.1: Modélisation et résolution pour l'optimisation

Le concept d'optimisation a été intégré dans des services touchant à des domaines divers. Il s'agit de fournir aux utilisateurs de ces services le seuil de satisfaction requis et qui cadrerait avec leurs exigences. Par conséquent, la nécessité de fournir à l'utilisateur un système répondant au mieux à ses attentes est l'essence même de ce concept et dont découle le besoin d'amélioration cherchant à atteindre l'optimalité de la qualité de service. Le degré

de satisfaction des utilisateurs est quantifiable à travers de la fonction objectif f où l'on fait intervenir une ou plusieurs variables appelées variables de décision.

La recherche de l'optimum (maximum ou minimum) de f se fait de par la modification d'une composition de celles-ci. Pour ce qui est de la formalisation d'un problème d'optimisation, elle relève de la formulation mathématique de la minimisation d'une fonction $f(\vec{x})$ telle que $\vec{g}(\vec{x}) \leq 0$ et $\vec{h}(\vec{x}) = 0$, où :

$\vec{x} \in \mathbb{R}^n$: n variables de décision ;

$\vec{g} \in \mathbb{R}^m$: m contraintes d'inégalité ;

$\vec{h} \in \mathbb{R}^p$: p contraintes d'égalité.

Les contraintes sont initiées à l'ensemble des points \vec{x} pour lesquelles la valeur de f peut être déterminée. Ces contraintes sont ainsi utilisées pour en délimiter le champ d'application à un ensemble de points spécifique dit espace de recherche ou espace de valeurs réalisables. L'espace de recherche où s'appliquent les méthodes d'optimisation s'en trouve ainsi restreint aux limites imposées par les contraintes d'optimisation.

II.2.2. Délimitation de l'espace de recherche

L'espace de recherche où s'appliquent les méthodes d'optimisation pour trouver une solution optimale, est restreint et délimité grâce aux limites imposées par les contraintes d'optimisation. Nous distinguons deux types de contraintes d'inégalité :

- Celles de type $B_{i_{\text{inf}}} \leq x_i \leq B_{i_{\text{sup}}}$: elles définissent une plage de valeurs \vec{x} qui vérifient ces contraintes pour ainsi définir un espace de recherche où va s'exécuter l'algorithme d'optimisation. Un exemple en est illustré à la Figure II.2., où 2 variables de décisions sont considérées ($n = 2$) [ZGA 07].

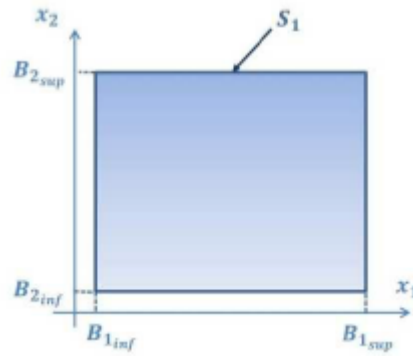


Figure II.2 : Espace de recherche

- Celles de type $c(\vec{x}) \leq 0$ ou $c(\vec{x}) \geq 0$: les valeurs pour lesquelles \vec{x} vérifie ces contraintes sont considérées comme l'ensemble définissant ce que l'on appelle un espace de valeurs réalisables [ZGA 07]. Un exemple où sont considérées $n = 2$ variables de décisions, illustre ce type de contraintes à la Figure II.3.

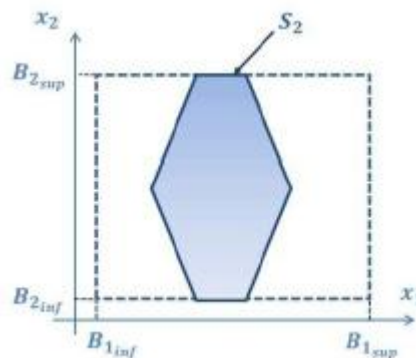


Figure II.3 : Espace de valeurs réalisables

II.2.3. Différents critères d'optimalité pour différents types d'optimum

Entre l'optimal et optimisé il existe une différence se référant au degré d'optimalité d'une valeur de f pour un point choisi dans un espace de recherche global et l'étendue de cette optimalité par rapport aux différentes valeurs de \vec{x} . Nous distinguons alors, selon le cas, trois types différents d'optimums (minima ou maxima). Considérons pour cela le cas d'une fonction f à maximiser, un point de l'espace de recherche \vec{x}^* est [ZGA 07] :

- Un maximum global de la fonction f s'il constitue la meilleure solution de façon absolue. Son optimalité s'étend de ce fait globalement à tout l'espace de recherche considéré, de manière à englober toutes les valeurs qui y sont incluses. \vec{x}^* est ainsi considérée comme la plus optimale de celles-ci maximisant $f(\vec{x}) : f(\vec{x}^*) > f(\vec{x}) \forall \vec{x}$ tel que : $\vec{x}^* \neq \vec{x}$. Le point M_1 de la Figure II.4 est relatif à un maximum global dans cette représentation.
- Un maximum local fort de la fonction f si son optimalité s'étend uniquement à son entourage, appelé plus formellement son voisinage $V(\vec{x}) : f(\vec{x}^*) > f(\vec{x}) \forall \vec{x} \in V(\vec{x}^*)$ tel que : $\vec{x}^* \neq \vec{x}$. Les points M_2 et M_3 sur la Figure II.4 sont des exemples de maxima locaux forts de la fonction $f(\vec{x})$ considérée.
- Un maximum local faible de la fonction f si son optimalité s'étend à un ensemble restreint de l'espace de recherche. Il reprend un peu la définition d'un maximum local fort avec cependant l'existence de points de l'espace ayant la même valeur de f que lui $f(\vec{x}^*) : f(\vec{x}^*) \geq f(\vec{x}) \forall \vec{x} \in V(\vec{x}^*)$ tel que : $\vec{x}^* \neq \vec{x}$ et $V(\vec{x}^*)$ est le voisinage de \vec{x}^* . Le point M_4 de la Figure II.4 vient concrétiser cette définition à travers l'exemple de $f(\vec{x})$ qui y est donnée et où est illustrée la courbe traçant les différentes valeurs de $f(\vec{x})$ pour l'ensemble des points de l'espace de recherche.

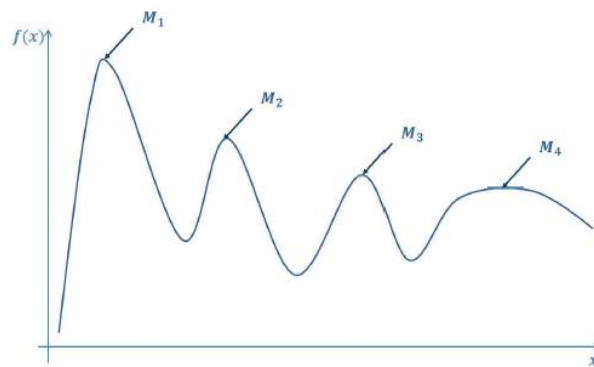


Figure II.4 : Maximum global, local fort et local faible

II.2.4. Classification des problèmes d'optimisation

On a une proposition de classification des problèmes d'optimisation tirée des différentes notions principales relatives aux définitions données dans un travail de H. Zgaya, illustré dans le Tableau II.1 suivant [ZGA 07] :

Caractéristiques du problème			Type du problème
Variables de Décision	Nombre	1	Mono-variable
		>1	Multi-variable
	Type	Nombre réel continu	Continu
		Nombre entier	Entier ou discret
Permutation sur un ensemble fini de nombres		Combinatoire	
Fonction Objectif	Type	Fonction linéaire des variables de décision	Linéaire
		Fonction quadratique des variables de décision	Quadratique
		Fonction non linéaire des variables de décision	Non linéaire
Formulation du problème	Type	Avec des contraintes	Contraint
		Sans contraintes	Non contraint

Tableau II.1. Classification des problèmes d'optimisation

Comme le montre le Tableau II.1, il existe différents types de problèmes d'optimisation qui dépendent essentiellement du nombre et type de variables de décision, du type de la fonction objectif et de la formulation du problème.

Outre ces caractéristiques, le nombre de critères d'optimisation entre en considération et subdivise les problèmes placés dans ce contexte en deux types essentiellement, l'optimisation mono-objectif et l'optimisation multi-objectif.

II.2.5. Optimisation mono-objectif

Implique le fait de considérer un seul critère à optimiser. Il s'agit ici d'une catégorie de problèmes d'optimisation « relativement faciles » à résoudre. Le terme facile est ici utilisé non pas pour désigner le degré de difficulté du problème mais par relativité aux problèmes multi-objectifs.

Cependant, plusieurs complications peuvent exister telles que par exemple une fonction objectif non linéaire ou que l'on ne peut exprimer analytiquement en fonction des paramètres. La principale difficulté que l'on peut rencontrer en optimisation mono-objectif réside ainsi dans le fait que modéliser le problème sous forme d'une équation unique peut

s'avérer une tâche très difficile. Par la suite, tenter de ramener la formulation du problème à une seule fonction objectif peut biaiser la modélisation. Un tel problème n'est pas rencontré dans le cas d'une optimisation multicritère où un certain degré de liberté est autorisé engendrant une certaine flexibilité qui manquait aux problèmes mono-objectif [COL 02].

II.2.6. Optimisation multi-objectif

L'optimisation multi-objectif est utilisée dans la considération d'une multitude de critères à prendre en compte en même temps, sachant qu'ils peuvent à fortiori être contradictoires et engendrer des conflits d'intérêts. Cette extension est d'autant plus nécessaire que les problèmes nécessitent la considération de manière simultanée d'une multitude d'objectifs. L'optimisation multicritère consiste donc à choisir parmi un ensemble infini d'alternatives une seule (ou plusieurs) lorsqu'une multitude de critères doivent être considérés [OTH 98]. Deux groupes distincts ont émergé pour réaliser la classification de celles-ci; le premier est constitué des méthodes qui s'appuient sur un critère unique de synthèse, lesquelles sont dites *classiques* ; alors que le deuxième inclue des méthodes réactives au sens où elles intègrent un processus interactif de décision [BOU 93].

II.2.7. Classification des méthodes d'optimisation

Selon le cas, un problème mono-variable ou multi-variable, continu ou discret, etc., une méthode d'optimisation adéquate est choisie avec soin, afin de bien cadrer avec le contexte et résoudre le problème de manière efficace. Les chercheurs ont à leur disposition une multitude de choix de méthodes d'optimisation pouvant être exactes, méta-heuristiques, hybrides ou autres. Toutes ces techniques ne sont pas adaptées au problème d'optimisation, un choix en adéquation avec les caractéristiques du problème doit être fait. Sur la Figure II.5 est donnée une large multitude de méthodes d'optimisation mono-objectif. Telles qu'elles sont illustrées, ces méthodes sont classées selon la nature du problème et sa complexité [COL 02].

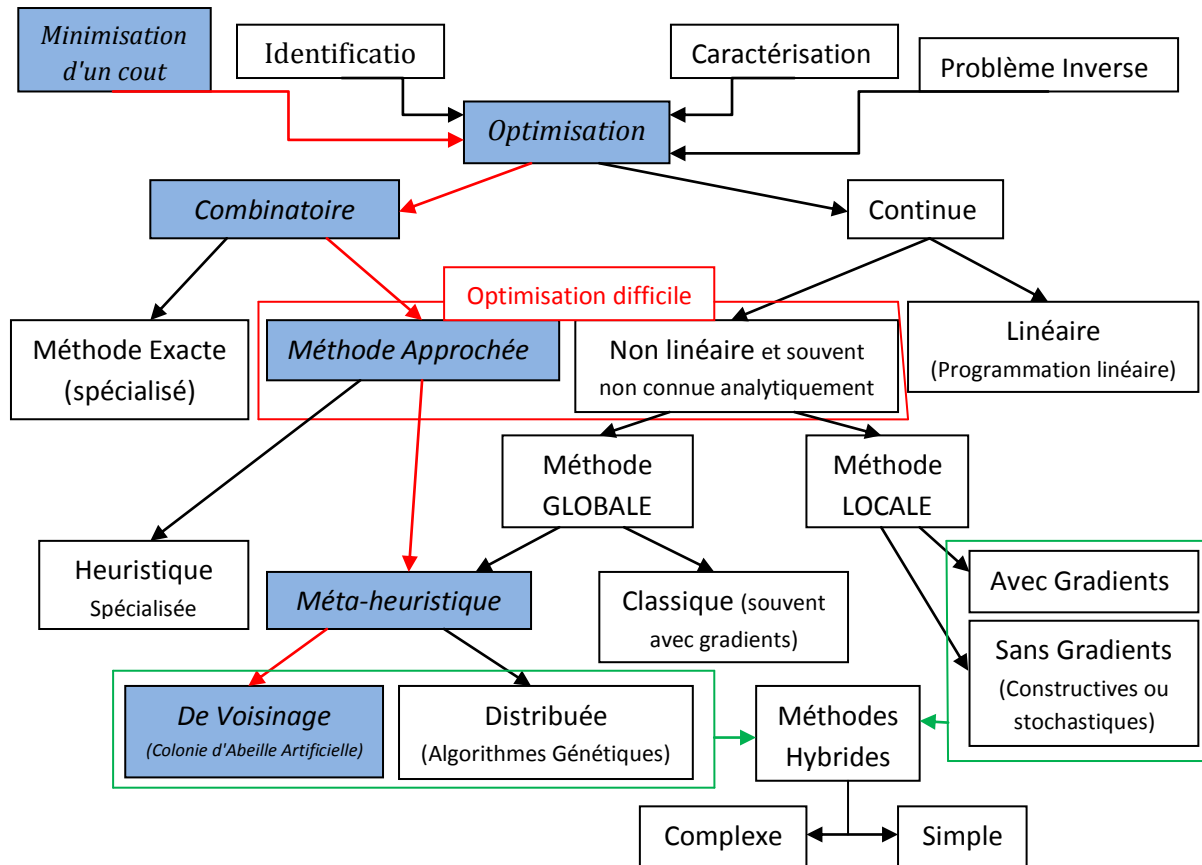


Figure II.5 : Méthodes d’optimisation mono-objectif

Les méthodes présentées sur la Figure II.5 sont principalement distinguées de par leur appartenance aux méthodes de résolution de problèmes continus ou combinatoires (discrets). Entre méthodes exactes dans le cas combinatoires et linéaires dans le cas continu, seule la nature du problème traité fait la différence. Leur correspondent respectivement les méthodes approchées et non linéaires dans le cas d'une optimisation difficile. Cette dernière caractérise les problèmes où il n'est pas connu un algorithme exact rapide (dans le cas combinatoire) ou permettant de repérer un optimum global en un nombre fini d'itérations (cas discret). Plusieurs variantes des méthodes approchées et non linéaires existent et ont été définies dans la référence [COL 02].

Il existe un arsenal important de méthodes classiques dites d'optimisation globale dans le cas de l'optimisation non linéaire (problème à variables continues). Cependant, ces techniques ont échoué là où la formulation du problème donnait lieu à la définition d'une

fonction objectif ne possédant pas de propriétés structurelles particulières, telle que la convexité par exemple. Parallèlement à l'optimisation continue, les efforts déployés dans le domaine de l'optimisation combinatoire ont abouti au développement d'un grand nombre d'heuristiques. Celles-ci ont pour mission principale de produire des solutions proches de l'optimum. Cependant, la plupart d'entre elles ont été conçues pour répondre de manière spécifique à un problème bien déterminé.

Compte tenu de cette spécificité des heuristiques, les chercheurs ont été amenés à considérer le développement de techniques génériques capables de s'adapter à n'importe quel domaine. Dans le but de réaliser cette généralité des méthodes, les efforts déployés dans ce sens ont mené à la conception d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation, nommées «méta-heuristiques». Ces dernières peuvent s'appliquer à toute sorte de problème à variables aussi bien discrètes que continues.

II.3. Caractéristiques

II.3.1. Sensibilité et robustesse d'une méthode d'optimisation

La méthode d'optimisation est conditionnée par des paramètres de contrôle et des conditions initiales (valeurs initiales des variables de conception, valeurs initiales des paramètres de contrôle, ...). Elle peut être caractérisée selon le modèle de la boîte noire illustré sur la figure II.6.

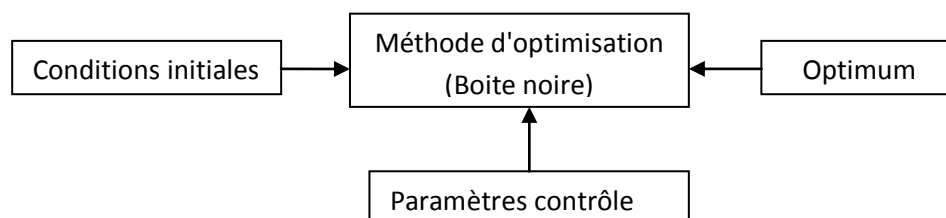


Figure II.6 : Modèle de la boîte noire

L'efficacité d'une méthode d'optimisation est liée à la sensibilité et à la robustesse par rapport aux paramètres de contrôle et aux conditions initiales. Lorsque les variables de conception doivent prendre une valeur bien précise pour que la méthode de résolution converge vers l'optimum d'une fonction donnée, la méthode est dite sensible aux conditions initiales. Une méthode d'optimisation est robuste si pour une même valeur des paramètres de contrôle et des conditions initiales, elle est capable de trouver l'optimum de fonctions très différentes [HAJ 03].

Une méthode parfaite devrait être totalement insensible aux conditions initiales et aux variables de conception et converger vers l'optimum quelles que soient la fonction objectif et les contraintes.

II.3.2. Opérateurs de recherches fondamentales

La recherche de l'optimum d'une fonction est généralement réalisée à l'aide de deux opérateurs fondamentaux, l'exploration et l'exploitation.

L'exploration permet une localisation imprécise de l'optimum global alors que l'exploitation affine cette solution en augmentant la précision de l'optimum.

Le succès et l'efficacité d'une technique de résolution dépendent la plupart du temps d'un compromis entre l'exploration et l'exploitation. Certaines méthodes toutefois n'utilisent qu'un seul de ces opérateurs pour parvenir à l'optimum. Ainsi, les méthodes déterministes, exploitant les dérivées de la fonction objectif et des contraintes pour atteindre rapidement et précisément l'optimum local le plus proche du point de départ, privilégient l'exploitation au détriment de l'exploration [HAJ 03].

Tout algorithme d'optimisation doit utiliser ces deux stratégies pour trouver l'optimum global; l'exploration pour la recherche de régions inexplorées de l'espace de recherche, et l'exploitation pour exploiter la connaissance acquise aux points déjà visités et ainsi trouver des points meilleurs. Ces deux exigences peuvent paraître contradictoires mais un bon algorithme de recherche doit trouver le bon compromis entre les deux. Une recherche purement aléatoire est bonne pour l'exploration mais pas pour l'exploitation, alors que la recherche dans le voisinage est une bonne méthode d'exploitation mais pas d'exploration [HAJ 03].

II.3.3. Mode de recherche de l'optimum

Lorsque l'évolution de la méthode de résolution est prévisible et ne laisse aucune place au hasard, celle-ci est qualifiée de déterministe. En revanche les méthodes dites stochastique s'appuient sur des mécanismes de transition probabiliste qui peuvent conduire à des résultats différents pour des conditions initiales et des paramètres de contrôle identiques [HAJ 03].

Les méthodes déterministes sont qualifiées de méthodes locales, c'est-à-dire qu'elles convergent vers un optimum dépendant uniquement du point de départ, qu'il soit local ou global. A l'opposé, les techniques stochastiques sont reconnues comme des méthodes globales qui permettent de localiser l'optimum global [HAJ 03].

II.3.4. Ordre d'une méthode de résolution

Les méthodes de résolution peuvent être classées à partir de leur ordre selon qu'elles nécessitent ou non le calcul des dérivées de la fonction objectif et des fonctions contraintes par rapport aux paramètres. Une méthode est dite d'ordre zéro si elle utilise uniquement la connaissance de la fonction objectif. Elle est d'ordre un si elle requiert le calcul des dérivées premières et d'ordre deux s'il lui faut aussi accéder aux dérivées secondes [HAJ 03].

Les méthodes d'ordre zéro sont en général peu précises et convergent plus lentement vers l'optimum. En revanche, elles offrent l'avantage d'éviter le calcul du gradient, ce qui est intéressant lorsque la fonction n'est pas différentiable ou que le calcul de son gradient représente un coût important ; c'est notamment le cas des modèles d'éléments finis [HAJ 03].

Les méthodes d'ordre un permettent d'accélérer la localisation de l'optimum, puisque le gradient donne l'information sur la direction de l'amélioration. Par contre, elles sont applicables seulement aux problèmes où les fonctions objectif et contraintes sont continûment différentiables.

II.4. Méthodes d'optimisation approchées

Les méthodes d'optimisation peuvent être classées en se basant sur plusieurs critères, le mode de recherche de l'optimum est l'un de ces critères, selon ce critère les méthodes sont divisés en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques [HAJ 03].

Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de variables, une fonction objectif f et un ensemble de contraintes d'inégalité (ou d'égalité) que les variables doivent satisfaire. L'ensemble des solutions possibles du problème forme l'espace de recherche E , où chaque dimension correspond à une variable. L'espace de recherche E est fini (le décideur précise le domaine de définition des variables entre autres pour des raisons de temps de calcul). Suivant le problème posé, nous cherchons à minimiser ou maximiser la fonction objectif f . Un problème d'optimisation peut être statique ou dynamique, mono-objectif ou multi-objectif, et avec ou sans contraintes [ELD 12].

Il existe de nombreuses méthodes déterministes (ou exactes) permettant de résoudre certains types de problèmes d'optimisation en un temps raisonnable. Ces méthodes nécessitent que la fonction objectif présente un certain nombre de caractéristiques telles que la convexité, la continuité ou la dérivabilité. Nous pouvons citer, parmi les méthodes les plus connues, les méthodes de programmation linéaire, quadratique et/ou dynamique, la méthode de Newton et la méthode du gradient [ELD 12].

II.4.1. Optimisation difficile

Les méthodes de résolution exacte ne sont pas adaptées à toutes les problématiques, et donc certains problèmes sont trop complexes à résoudre par ces méthodes. Parmi ces problématiques la discontinuité, l'absence de convexité stricte, la non-dérivabilité, la présence de bruit ou encore la fonction objectif peut ne pas être définie précisément (e.g. quand c'est un coût). En outre, les méthodes de résolution exacte peuvent avoir un temps de résolution trop long. Dans ce cas, le problème d'optimisation est dit difficile, car aucune méthode exacte n'est capable de le résoudre en un temps raisonnable. Il est alors nécessaire d'avoir recours à

des heuristiques de résolution dites méthodes approchées, qui fournissent un résultat sans garantie de l'optimalité [ELD 12].

L'optimisation difficile peut se diviser en deux types de problèmes : les problèmes à variables discrètes et les problèmes à variables continues :

- Un problème d'optimisation à variables discrètes consiste à trouver, dans un ensemble discret, une solution réalisable. Le problème majeur réside ici dans le fait que le nombre de solutions réalisables est généralement très élevé, donc il est très difficile de trouver la meilleure solution dans un temps « raisonnable ». L'utilisation d'algorithmes d'optimisation stochastiques, tels que les méta-heuristiques, permettant de trouver une solution approchée en un temps raisonnable est donc courante.
- Dans le deuxième type, les variables du problème d'optimisation sont continues. C'est le cas par exemple des problèmes d'identification, où l'on cherche à minimiser l'erreur entre le modèle d'un système et des observations expérimentales. Ce type de problèmes montre un certain nombre de difficultés, comme l'existence de variables présentant des corrélations non identifiées ou la présence de bruit. En effet, la grande majorité des méta-heuristiques ont été créées pour résoudre des problèmes à variables discrètes [DRO 03]. Cependant, la nécessité croissante de méthodes pouvant résoudre ce type de problèmes a poussé les chercheurs à adapter leurs méthodes au cas continu.

II.4.2. Méthodes Heuristiques

L'utilisation de méthodes exactes n'est pas toujours possible pour un problème donné à cause d'un certain nombre de contraintes, telles que le temps de calcul souvent important ou bien la difficulté, voire l'impossibilité dans certains cas, d'une définition séparée du problème. Pour faire face à ces contraintes, on utilise des méthodes approchées, appelées heuristiques. Il est à souligner ici qu'une méthode heuristique peut être déterministe ou stochastique.

Une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement une solution approchée et réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation difficile. Cette méthode approximative est le contraire d'un algorithme exact qui donne une solution optimale pour un problème donné [ELD 12].

Il y a une multitude d'heuristiques qui ont déjà été proposées dans la littérature. Nous pouvons citer des heuristiques très simples telles que les algorithmes gloutons ou les approches par amélioration itérative. La différence entre une méthode heuristique et une méthode exacte réside dans le fait qu'on n'impose plus que la solution soit optimale, on obtient donc un algorithme d'approximation [ELD 12].

II.4.3. Méthodes Méta-heuristiques

Des heuristiques plus poussées, adaptables à un grand nombre de problèmes différents, sans changements majeurs dans l'algorithme, ont été mises au point et ont donné naissance à une nouvelle famille d'algorithmes d'optimisation stochastiques : les méta-heuristiques. Le terme méta-heuristique a été inventé par Fred Glover en 1986, lors de la conception de la recherche taboue [GLO 86].

Les méta-heuristiques visent la résolution des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthodes classiques plus efficaces. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, d'où le qualificatif méta. Leur capacité à optimiser un problème à partir d'une quantité minimale d'informations est contrebalancée par le fait qu'elles n'offrent aucune garantie quant à l'optimum trouvée. Cependant, du point de vue de la recherche opérationnelle, ce constat n'est pas forcément un désavantage, puisque l'on préfère toujours une approximation de l'optimum global trouvée rapidement à une valeur exacte trouvée après un temps de calcul trop long [ELD 12].

La plupart des méta-heuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information. Les méta-heuristiques peuvent être considérées comme des algorithmes stochastiques itératifs, où elles manipulent une ou plusieurs solutions à la recherche de l'optimum. Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, consistant généralement d'atteindre un nombre d'itérations prédéterminé ou une précision demandée. Ces méthodes tirent leur intérêt de leur capacité à éviter les optima

locaux, soit en acceptant des dégradations de la fonction objectif au cours du traitement, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche [ELD 12].

Les méta-heuristiques sont souvent inspirées de processus naturels qui relèvent de la physique (l'algorithme du recuit simulé), de la biologie de l'évolution (les algorithmes génétiques) ou encore de l'éthologie (les algorithmes de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaim particulière).

En général, l'utilisateur demande des méthodes efficaces et rapides permettant d'atteindre un optimum avec une précision acceptable dans un temps raisonnable, mais il a besoin aussi des méthodes simples à utiliser. Un des enjeux des méta-heuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter au mieux à un problème posé [ELD 12].

II.4.3.1. Principe du voisinage

Le principe le plus utilisé dans l'élaboration des méta-heuristiques est celui de voisinage. À chaque solution S du problème, on associe un sous-ensemble $V(S)$ de solutions [SLI 09]. Une méthode de voisinage débute généralement avec une configuration initiale S à laquelle un processus itératif est appliqué, il cherche à améliorer la configuration courante en la remplaçant par une de ses voisines en tenant compte des résultats de la fonction objectif. Ce processus s'arrête et retourne à la meilleure solution trouvée lorsque le critère d'arrêt soit satisfait. La condition d'arrêt concerné est une limite pour le nombre d'itérations ou sur l'objectif à réaliser. Les méthodes de voisinage diffèrent principalement entre elles par le voisinage utilisé et la stratégie de parcours d'une solution voisine.

II.5. Quelques méthodes Méta-heuristiques

II.5.1. Algorithmes de colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis sont des algorithmes inspirés du comportement des fourmis et constituent une famille de méta-heuristiques d'optimisation pour résoudre naturellement des problèmes complexes. Une telle aptitude s'avère possible en

raison de la capacité des fourmis à communiquer entre elles indirectement, par le dépôt dans l'environnement de substances chimiques, appelées phéromones.

Si un obstacle est placé sur le trajet des fourmis, après une étape d'exploration, les fourmis finiront par emprunter le plus court chemin entre le nid et la source de nourriture [Goss 89]. Les fourmis qui sont retournées le plus rapidement au nid en passant par la source de nourriture sont celles qui ont emprunté le chemin le plus court. Il en découle que la quantité de phéromones déposées par unité de temps sur ce trajet est plus importante que sur les autres. De ce fait, le plus court chemin a une probabilité plus importante d'être emprunté par les fourmis que les autres chemins et sera donc, à terme, emprunté par toutes les fourmis.

II.5.2. Algorithmes à évolution différentielle

L'évolution différentielle (DE) est une méta-heuristique stochastique d'optimisation qui a été inspirée par les algorithmes génétiques et des stratégies évolutionnaires combinées avec une technique géométrique de recherche. Les algorithmes génétiques changent la structure des individus en utilisant la mutation et le croisement, alors que les stratégies évolutionnaires réalisent l'auto-adaptation par une manipulation géométrique des individus. Ces idées ont été mises en œuvre grâce à une opération simple, mais puissante, de mutation de vecteurs, proposée en 1995 par K. Price et R. Storn [STO 97]. Même si, à l'origine, la méthode de l'évolution différentielle était conçue pour les problèmes d'optimisation continus et sans contraintes, ses extensions actuelles peuvent permettre de traiter les problèmes à variables mixtes et gèrent les contraintes non linéaires [ELD 12].

Dans la méthode DE, la population initiale est générée par tirage aléatoire uniforme sur l'ensemble des valeurs possibles de chaque variable. Les bornes inférieures et supérieures des variables sont spécifiées par l'utilisateur selon la nature du problème. Après l'initialisation, l'algorithme effectue une série de transformations sur les individus, dans un processus appelé évolution.

II.5.3. Algorithmes à estimation de distribution

Les algorithmes à estimation de distribution forment une famille de méta-heuristiques inspirée des algorithmes génétiques. Ils sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation, à travers la manipulation d'un échantillonnage de la fonction décrivant la qualité des solutions possibles. Comme toutes les méta-heuristiques, ces algorithmes utilisent une population de points et système itératifs.

À l'inverse des algorithmes évolutionnaires "classiques", la caractéristique de la méthode (ED) consiste à estimer les relations entre les différentes variables d'un problème d'optimisation, grâce à l'estimation d'une distribution de probabilité, associée à chaque point de l'échantillon. Le (ED) n'emploie donc pas d'opérateurs de croisement ou de mutation, estimés à l'itération précédente, l'échantillon étant directement construit à partir des paramètres de distribution.

Le déroulement général de l'algorithme à estimation de distribution est comme suit :

1. Tirer au hasard M individus, pour former une population D_0 .

$i=0$

2. Tant que le critère d'arrêt n'est pas satisfait faire

$i=i+1$

Sélectionner N individus (avec $N < M$) de la population précédente D_{i-1} pour former une population D_{i-1}^S .

Estimer une distribution de probabilité $P_i(x)$, décrivant la répartition de la population D_{i-1}^S .

Tirer au hasard M individus dans $P_i(x)$

Fin de tant que

3. Retour à la meilleure solution

II.5.4. Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été adaptés à l'optimisation par John Holland. Par ailleurs, les travaux de David Goldberg ont largement contribué à enrichir de tels algorithmes [HAR 10].

Le vocabulaire utilisé est le même que celui de la théorie de l'évolution et de la génétique, on emploie le terme individu (solution potentielle), population (ensemble de solutions), génotype (une représentation de la solution), gène (une partie du génotype), parent, enfant, reproduction, croisement, mutation, génération, etc.

On part d'une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales, arbitrairement choisies. On évalue leur performance (Fitness) relative. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. Quelques individus se reproduisent, d'autres disparaissent et seuls les individus les mieux adaptés sont supposés survivre. On recommence ce cycle jusqu'à ce qu'on trouve une solution satisfaisante. En effet, l'héritage génétique à travers les générations permet à la population d'être adaptée et donc répondre au critère d'optimisation [HAR 10].

Le déroulement général de l'Algorithme Génétique est donné par diagramme suivant (Figure II.7) :

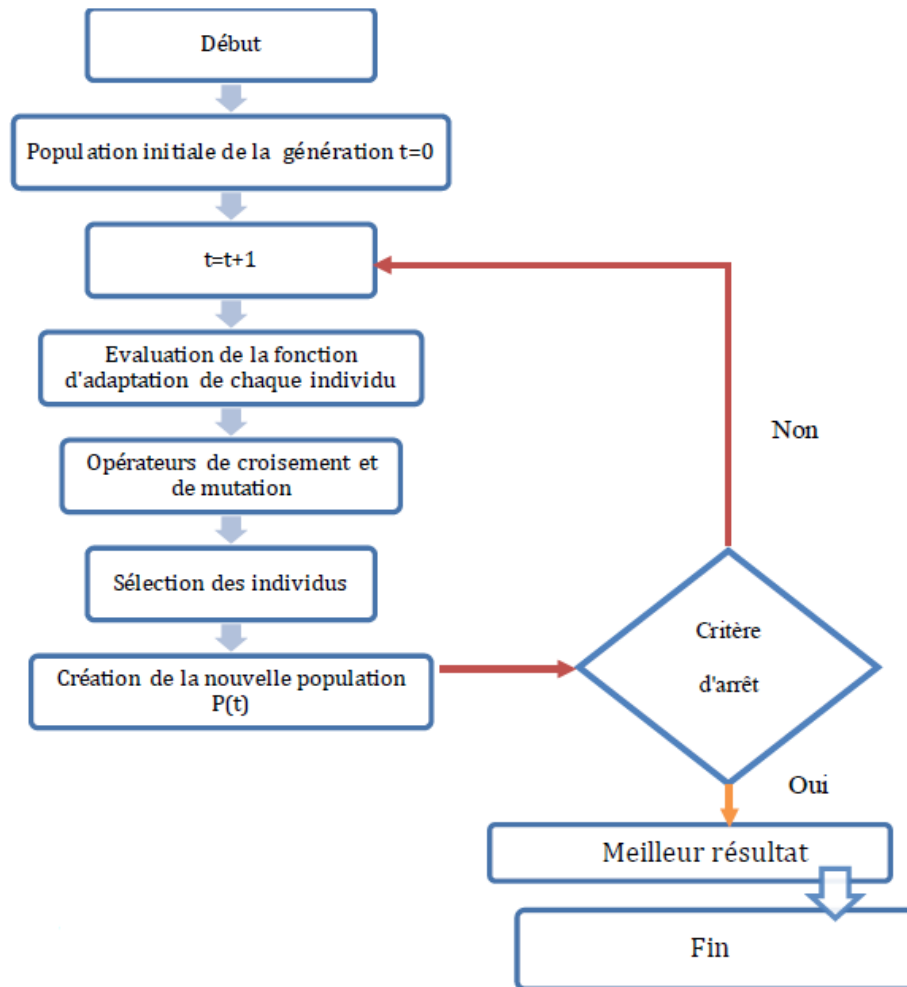


Figure II.7 : Organigramme d'un AG standard [BEN 13]

II.5.5. Essaim particulaire

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart et James Kennedy en 1995 [KEN 95]. Un tel algorithme est inspiré à l'origine du comportement social des animaux évoluant en essaim. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une "intelligence" limitée, et ne dispose que d'une connaissance locale de sa situation dans l'essaim.

L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que "rester proche des autres individus", "aller dans une même direction" ou "aller à la même vitesse", suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs [ELD 12].

L'essaim est composé de particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance et de la meilleure performance atteinte par les particules voisines (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, appelé son voisinage.

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles, balaye l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [ELD 12] :

1. Une composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
2. Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
3. Une composante sociale : la particule tend à se fier à ses congénères, donc elle se dirige vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée sur la figure (II.7).

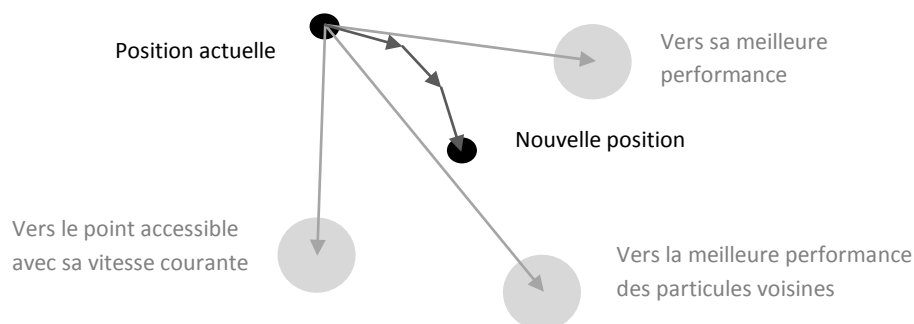


Figure II.8 : Déplacement d'une particule

Le déroulement général de l'Algorithme essaim particulaire est comme le diagramme qui suit (Figure II.8) :

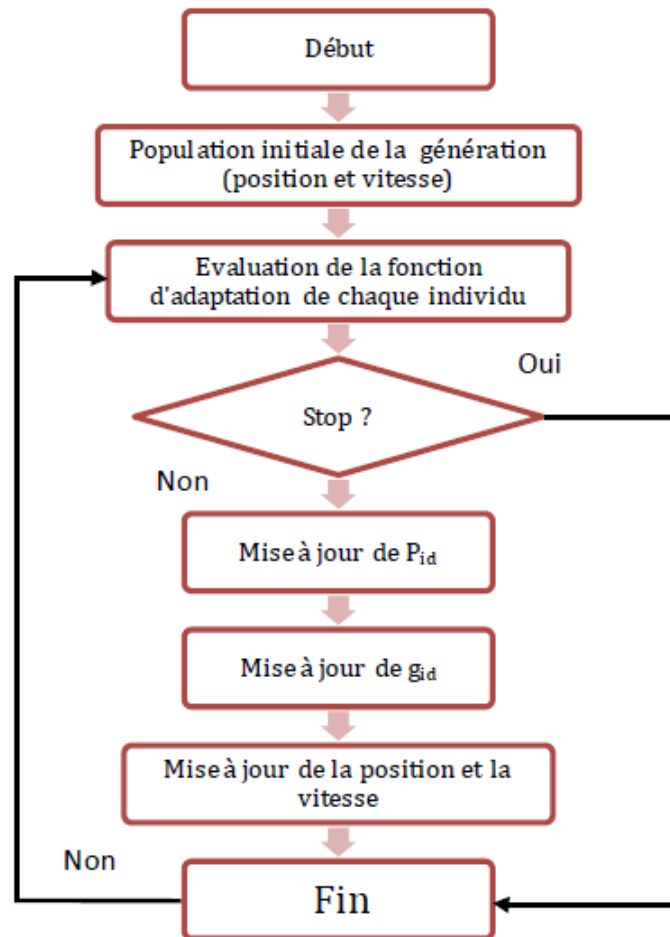


Figure II.9 : Étapes d'un algorithme d'Essaim Particulaire [BEN 13]

Ou : P_{id} est la meilleure position visitée par la particule i ;

g_{id} est la position du meilleur voisin de l'essaim.

II.6. Conclusion

L'optimisation est un concept très important qui a touché divers domaines. Les techniques d'optimisation ont connu un avancement considérable lors de la dernière décennie. Les méthodes méta-heuristiques récemment développées ont permis, entre autre, de réduire le temps de calcul, d'éliminer les exigences sur les fonctions objectifs comme la convexité par exemple, d'éviter l'utilisation des algorithmes spécifiques difficiles à élaborer, de surmonter l'obligation de faire des choix de méthodes délicats pour chaque problème, et finalement de résoudre le problème de la convergence vers un optimum local.

Chapitre III

*Algorithmes Basés sur le
Comportement des Abeilles*

III.1. Introduction

Dans la nature, plusieurs espèces sont caractérisées par leur comportement social. Les bancs de poissons, les nuées d'oiseaux, et les troupeaux d'animaux terrestres, sont le résultat du besoin biologique qui les pousse à vivre en groupe. Un mouvement collectif avec une réponse rapide aux changements de la direction et de la vitesse de leurs voisins les caractérise.

Ce comportement est également un des principales caractéristiques des insectes sociaux (abeilles, termites, fourmis...). De ces principes là, les chercheurs se sont inspirés pour développer des algorithmes basés sur le comportement de ces animaux, et ont donné naissance à ce que l'on appelle par Méta-heuristique.

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

Une des insectes les plus organisées et les plus rigoureuses est l'abeille. Les abeilles possèdent une très grande capacité de communication. En se basant sur leur comportement, une méthode appelée méthode des abeilles a été développée. Dans cette méthode, les abeilles artificielles représentent des agents qui collaborent les une avec les autres et résolvent des problèmes complexes d'optimisation combinatoire. D'un tel comportement, on tire l'idée de base de cette méthode : créer un système multi agent capable de résoudre avec efficacité les problèmes complexes.

La méthode des abeilles est une méthode approchée (Méta-heuristique) qui nous permet de résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire.

III.2. Optimisation par Colonies d'abeilles

L'optimisation par colonie d'abeilles est un ensemble d'algorithmes méta-heuristiques récemment développés. Son principe est basé sur le comportement des abeilles réelles. Cette approche de résolution fait l'objet de notre étude.

Dans ce contexte, nous allons donner la structure d'une colonie d'abeille, puis une description du comportement des abeilles lors de la recherche de nourriture, en fin nous allons présenter quelques algorithmes inspirés de leur comportement.

III.2.1. Abeilles en nature

Les abeilles possèdent des propriétés très intéressantes et assez différentes à celles des autres espèces. Elles vivent en colonies, en construisant leurs nids dans des troncs d'arbres ou d'autres espaces clos similaires [YAH 07]. Généralement, une colonie d'abeilles contient une reine reproductrice, quelques centaines de mâles connus sous le nom de faux-bourdon, et de 10.000 à 80.000 femelles stériles qui s'appellent les ouvrières.

La Reine : Dans une colonie d'abeilles, il y a une seule reine qui est la femelle reproductrice avec l'espérance de vie entre 3 et 5 ans. Son rôle principal est la reproduction. Elle pond jusqu'à 2000 œufs par jour. Les œufs fertilisés vont bien devenir femelles (ouvrières) et les œufs non-fertilisés deviennent mâles (bourdons) [HAR].

Les males (faux-bourdon) : Les faux-bourdons représentent les mâles des abeilles, variant entre 300 et 3000 dans une ruche. Selon la taille de l'alvéole, dans une grande cellule hexagonale, la reine dépose un œuf, l'œuf non fécondé donnera ainsi naissance à un faux-bourdon. Ce dernier a une espérance de vie de 90 jours [HAR].

Les ouvrières : Les ouvrières ou les abeilles femelles non reproductrices vivent de 4 à 9 mois dans une saison froide et leur nombre arrive jusqu'à 30.000 dans une colonie. Cependant, en été, leur durée de vie est de 6 semaines et leur nombre atteint jusqu'à 80.000. L'ouvrière est responsable de la défense de la ruche en utilisant sa piqûre barbelée, et elle meurt après avoir piquée. On peut énumérer les activités des ouvrières par le critère des jours de sa vie comme suit : nettoyage de cellules (jour 1-2), soigner les abeilles (jour 3-11), produire de la cire (jour 12-17), surveiller les autres abeilles (jour 18-21) et rechercher la nourriture (jour 22-42). L'ouvrière assure les activités habituelles de la colonie telles que l'emballage de pollen, éventer les abeilles, porter l'eau, déplacement des œufs, s'occuper de la reine, nourrir les bourdons et construire le nid [MEZ 10].

Couvées : les couvées sont les jeunes abeilles. Elles sont nées après que la reine pond un œuf fécondé dans des cellules spéciales du nid, appelées trames de couvée. L'œuf fécondé donne naissance à une abeille ou à une reine en fonction des soins apportés aux larves. Peu de larves femelles sont choisies pour être des futures reines. Les œufs non fertilisés donnent naissance aux couvées. Les jeunes larves tournent par le cocon, couvrant la cellule par les ouvrières les plus âgées. C'est l'étape de chrysalides. Puis, elles atteignent l'étape de développement dans laquelle elles reçoivent le nectar et le pollen des abeilles chercheurs jusqu'à ce qu'elles quittent la ruche et passent leurs vies comme chercheurs de nourriture [MEZ 10].

III.2.2. Exploration des sources de nourriture chez les abeilles

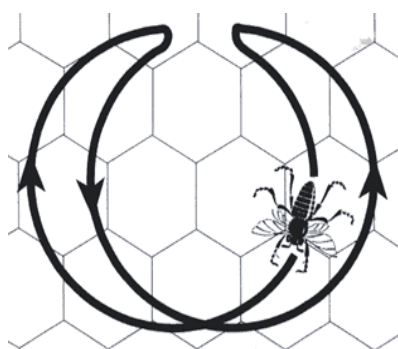
Les scientifiques ont effectué beaucoup de recherches et grand nombre d'études académiques afin de déterminer comment l'ordre est maintenu dans une colonie, où vivent des dizaines de milliers d'abeilles. Un éminent professeur à l'Université de Munich, le zoologiste autrichien Karl Von Frisch, a consacré un grand livre à la communication des abeilles, "The dance language and orientation of bees" (Le langage de la danse et l'orientation des abeilles) [YAH 07].

L'abeille qui cherche la nourriture, appelée « éclaireuse », se trouve devant une tâche importante. Elle quitte la ruche afin d'explorer de vastes zones en effectuant des longues distances de vols, pour trouver les bonnes sources de nourriture avant que les abeilles butineuses retournent à la ruche. Elle enregistre sa position par rapport à la ruche et dépose une odeur spéciale sur sa source de nourriture. Une fois qu'une source de nourriture a été localisée et marquée, elle retourne à la colonie pour informer les autres ouvrières de sa découverte. Pour cela, elle utilise une méthode pour indiquer la direction, la distance et la qualité de la source de nourriture. Ceci doit être fait de la façon la plus optimale.

III.2.3. Méthode de communication chez les abeilles

Karl Von Frisch a mené une expérience, en construisant une ruche avec une paroi en verre par laquelle il pouvait observer le comportement des abeilles à l'intérieur de la ruche. Il remarque que les abeilles employeuse exécutent une danse lors de leur retour. Si une seule

abeille l'exécute, ce n'est pas toute la ruche qui passe à l'action, mais juste un groupe d'éclaireuses quittent la ruche. Si ce groupe exécute la même danse à son retour, alors un groupe plus important d'abeilles se dirigera vers la source. Meilleure est la source de nourriture qu'elles trouvent, plus longtemps dure la danse et plus grand sera le nombre d'abeilles qui les suivent. De cette façon, l'attention des butineuses est toujours fixée sur la source la plus productive.



Danse en rond



Danse en huit

Figure III.1 : Danses des Abeilles [HAN 12]

Si la source de nourriture trouvée est très riche, la danse exécutée par l'abeille est très enthousiaste. Si la source est à proximité, elles décrivent son emplacement en exécutant la "danse en rond" (Figure III.1, gauche). Pour les sources de nourriture plus éloignées, elles exécutent "la danse en huit" (Figure III.1, droite), avec des mouvements frétilants [YAH 07].

Dans la danse frétilante, l'abeille tourne alternativement d'un côté et de l'autre effectuant un demi tour circulaire qui la ramène au point de départ. Les ouvrières suivent la danseuse au cours de ses déplacements, et elles la touchent par leurs antennes. Cette danse est très riche en information. En particulier, elle donne aux abeilles observatrices quatre indications essentielles : la direction, le sens, la distance à parcourir et la quantité de nourriture [MEZ 10].

Concernant la distance, plusieurs paramètres entrent en compte. Le plus important est le tempo de la danse, c'est-à-dire le nombre de tours effectués par l'abeille par unité de temps. Plus les mouvements de l'abeille sont durables, plus la source est riche. En ce qui concerne la direction, elle est donnée par rapport à l'azimut solaire (en plan horizontal). La position

angulaire de la source est indiquée par l'angle que fait la partie frétilante avec la verticale du rayon (Figure III.2) [YAH 07].

Dans le cas où la source de nourriture trouvée n'est pas intéressante, les abeilles dansent, mais d'une façon pas enthousiaste et pendant une brève durée. Cela se reflète sur les abeilles observatrices qui se dispersent rapidement et une nouvelle équipe quitte la ruche à la recherche de nourriture [YAH 07].

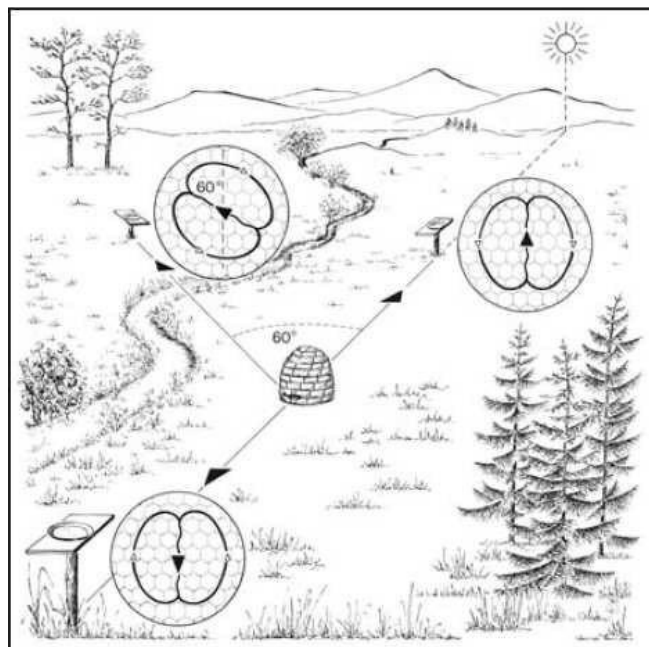


Figure III.2 : Indication de la direction [SAA 10]

- Si la source de nourriture se trouve exactement sur la direction du soleil, les frétillements seront verticaux sur le rayon.
- Si la source de nourriture est 80 degrés à gauche du soleil, cela est indiqué en faisant une trajectoire du frétillement à un angle de 80 degrés à gauche de la verticale.
- Si l'abeille suit une direction vers le haut durant son frétillement, elle signale que la source de nourriture se trouve dans le sens vers le soleil.
- Si elle se dirige droit vers bas, cela signifie que la source se trouve dans le sens opposé de celui du soleil.

III.2.4. Optimisation naturelle : Directions fournies par les abeilles

Les ouvrières observatrices quittent la ruche et se dirigent vers la source de nourriture, après avoir reçues les informations nécessaires. L'angle fourni par l'éclaireuse est basé sur la position du soleil. Cependant, le soleil n'est pas fixe dans le ciel, mais il change sa position de 1 degré toutes les 4 minutes. Si une abeille suivait la ligne d'origine, elle ne serait jamais capable de localiser son objectif à cause du changement de la position du soleil, sachant que le vol peut durer des dizaines de minutes. En réalité, les abeilles n'éprouvent aucune difficulté à trouver des sources de nourriture, et à tenir compte du mouvement du soleil et le changement des angles [SAA 10].

III.2.5. Algorithmes inspirés du comportement des abeilles

Peu d'algorithmes inspirés du comportement des abeilles sont apparus pendant la dernière décennie (Système d'Abeille, Algorithme BCO 'Bee Colony Optimization', Algorithme ABC 'Artificial Bee Colony', MBO 'Marriage in Honey Bees Optimization', Algorithme d'Abeilles, Algorithme de HBMO 'HiveBee Mating Optimization', BeeHive, algorithme VBA 'Virtual Bee Algorithm'). L'année de la publication, les noms des auteurs, les noms de l'algorithme et le problème étudié sont montrés dans le Tableau (III.1) [TEO 05].

Année	Auteurs	Algorithme	Problème étudié
1996	Yonezawa and Kikuchi	Algorithme Ecologique	Description de l'intelligence collective fondée sur le comportement des abeilles
1997	Sato and Hagiwara	Systèmes d'Abeille	Amélioration de l'Algorithme Génétique
2001	Lucic and Teodorovic	BCO	Le problème de voyageur de commerce
2001	Abbas	MBO	Problèmes de Satisfiabilité propositionnelle

2002	Lucic and Teodorovic	BCO	Le problème de voyageur de commerce
2003	Lucic and Teodorovic	BCO	Problème de routage de véhicules dans le cas d'une demande incertaine
2003	Lucic and Teodorovic	BCO	Le problème de voyageur de commerce
2004	Wedde, Farooq and Zhang	BeeHive	Protocoles de routage
2005	Teodorovic and Dell' Orco	BCO	Problème de jumelage
2005	Karaboga	ABC	Optimisation numérique
2005	Drias, Sadeg and Yahi	BSO	Problème de Satisfiabilité maximale Pondérée
2005	Yang	VBA	Les problèmes de la fonction objectif et son application en engineering
2005	Benatchba, Admane and Koudil	MBO	Problème de Satisfiabilité maximale
2006	Teodorovic, Lucic, Markovic and Dell' Orco	BCO	Le problème de voyageur de commerce et le problème de routage dans les réseaux
2006	Chong, Low, Sivakumar and Gay	Honey Bee Colony Algorithms	Problème d'ordonnancement du job-shop
2006	Pham, Soroka, Ghanbarzadeh and Koc	Bees Algorithm	L'optimisation de réseaux de neurones pour la détection des défauts du bois
2006	Basturk and Karabora	ABC	L'optimisation de la fonction numérique
2006	Navrat	Bee Hive Model	Recherche Web
2006	Wedde, Timm and Farooq	BeeHiveAIS	Les protocoles de routage

2007	Yang, Chen and Tu	MBO	Amélioration de l'algorithme MBO
2007	Koudil, Benatchba, Tarabetand and El Batoul Sahraoui	MBO	Les problèmes de partitionnement et d'ordonnancement
2007	Quijano and Passino	Honey Bee Social Foraging Algorithm	Résoudre les problèmes de répartition optimale de resouece
2007	Markovic, Teodorovic, and Acimovic-Raspopovic	BCO	Routage et affectation de longueur d'onde dans des réseaux optiques
2007	Wedde, Lehnhoff, B.van Bonn, Bay, Becker, Bottcher, Brunner, Buscher, Furst, Lazarescu, Rotaru, Senge, Steinbach, Yilmaz and Zimmermann	BeeHive	congestion atténuation de la circulation routière
2007	Karabora and Basturk	ABC	Problèmes d'optimisation numérique multi-dimensionnelle
2007	Karabora, Akay and Ozturk	ABC	Feed-forward la formation de réseaux de neurones
2007	Afshar, Bozorg Haddada, Marin and Adams	Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm	Problèmes d'optimisation et de l'exploitation de réservoir unique
2007	Baykasoglu, Ozbakyr and Tapkan	Artificial Bee Colony	Problème d'affectation généralisé
2007	Teodorovic and Selmic	BCO	problème p-médian
2008	Karabora and Basturk	ABC	Comparaison des performances de l'algorithme ABC avec les performances d'autres techniques basées sur la population

2008	Fathian, Amiri and Maroosi	Honeybee mating optimization algorithm	L'analyse typologique
2008	Teodorovic	BCO	Comparaison des performances de l'algorithme de BCO avec les performances d'autres techniques basées sur l'intelligence Swarm
2009	Pham, Haj Darwish and Eldukhr	Bees Algorithm	Le réglage des paramètres d'un régulateur à logique floue
2009	Davidovic, Selmic and Teodorovic	BCO	Ordonnancement statique de tâches indépendantes sur les systèmes multiprocesseurs homogènes

Tableau III.1 : Algorithmes inspirés du comportement des abeilles

III.3. Algorithmes d'abeilles basés sur la recherche de nourriture

Les algorithmes basés sur les insectes sociaux et l'intelligence d'essaim commencent à prouver leur efficacité dans beaucoup d'applications. En se basant sur les comportements des abeilles, les scientifiques ont développé plusieurs algorithmes puissants. Si nous utilisons seulement une partie de la recherche de nature ou du comportement des abeilles et ajoutons certaines nouvelles caractéristiques, nous pouvons concevoir une classe de nouveaux algorithmes. Dans ce qui suit, nous représentons quelques algorithmes, sans être exhaustif, basés sur le comportement des abeilles lors de la recherche de nourriture [KAR 07].

III.3.1. Algorithme d'optimisation par colonies d'abeilles virtuelles (VBA)

L'algorithme VBA (Virtual Bee Algorithm) a été développé par Xin-She Yang en 2005 pour la résolution des problèmes numériques d'optimisation. Ceci peut optimiser des fonctions et des problèmes discrets, bien que seulement des fonctions avec deux paramètres aient été données comme exemples. L'algorithme VBA commence par un groupe d'abeilles virtuelles. Chaque abeille se déplace aléatoirement dans l'espace de recherche. Dans la plupart des cas, l'espace de recherche contient une ou deux dimensions. Les étapes principales de l'algorithme d'abeilles virtuelles pour l'optimisation des fonctions sont [KHA 10] :

1. Création d'une population des multi-agents ou des abeilles virtuelles. Chaque abeille est associée à un vecteur de solution avec plusieurs paramètres à optimiser.
2. Codage des fonctions d'optimisation (fonctions objectifs) et conversion en nourriture virtuelle (virtual food).
3. Définition d'un critère pour communiquer la direction et la distance avec une manière similaire à l'aptitude physique des abeilles (la danse des abeilles).
4. Mettre à jour une population des individus dans de nouvelles positions pour la recherche de la nourriture virtuelle, faisant la danse virtuelle pour définir la distance et la direction; "la danse virtuelle de waggle" selon l'équation (III.2).
5. Après une certaine période d'évolution, le mode le plus élevé, dans le nombre des abeilles virtuelles ou l'intensité/fréquence des abeilles qui font la visite est élevée, correspond à la meilleure évaluation.
6. Décodage des résultats pour l'obtention de la solution du problème.

La position modifiée de chaque abeille peut être calculée en utilisant les équations suivantes [KHA 10] :

$$\begin{aligned}x_k^{i+1} &= x_k^i \cdot (1 - \beta) + x_{\text{best}} \cdot \beta + \alpha (\text{rand}(i) - 0.5) \\y_k^{i+1} &= y_k^i \cdot (1 - \beta) + y_{\text{best}} \cdot \beta + \alpha (\text{rand}(i) - 0.5)\end{aligned}\quad (\text{III.1})$$

où α et β sont des constantes positives appelées respectivement l'amplitude aléatoire et la vitesse de convergence, x_{best} , et y_{best} sont les meilleurs paramètres de la $i^{\text{ème}}$ itération et finalement $rand(i)$ est un nombre aléatoire dans l'intervalle $[0, 1]$.

La $i^{\text{ème}}$ abeille dans la colonie est représentée par un vecteur dimensionnel k tels que : $x^k = (x^1, x^2, x^3, \dots \dots \dots x^k)$ et d'autre coordonné de $y^k = (y^1, y^2, y^3, \dots \dots \dots y^k)$

La position actuelle (la recherche de point dans l'espace de solution) peut être modifiée par :

$$S_k^{i+1} = S_k^i + S_{best} + S_{rand} \tag{III.2}$$

où :

$$S_k^{i+1} = (x_k^{i+1}, y_k^{i+1})$$

$$S_k^i = (x_k^i, y_k^i)$$

$$S_{best} = (x_{best}, y_{best})$$

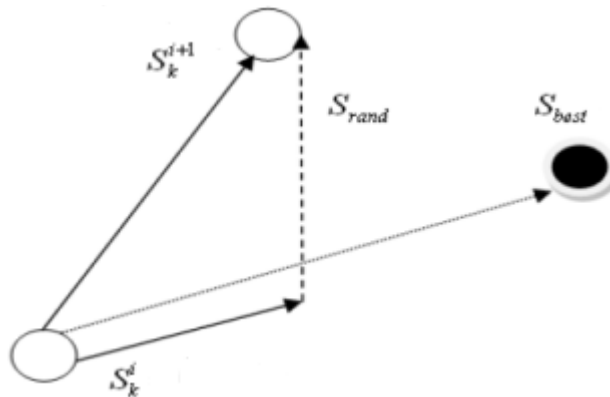


Figure III.3 : Conception de modification de la position de la recherche par VBA

III.3.2. Algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles (BCO)

L'algorithme BCO (Bee Colony Optimization) est introduit par Lucic et Teodorovic en 2001 afin de trouver la solution optimale pour un problème d'optimisation combinatoire difficile, comme le problème de routage dans les réseaux optiques par exemple [MEZ 10].

Chaque abeille génère une solution au problème. Il existe deux phases alternatives (le pas en-avant et le pas en-arrière) construisant une seule étape dans l'algorithme BCO. Dans

chaque pas en-avant, chaque abeille artificielle visite "NC" solutions, crée une solution partielle, et ensuite retourne vers la ruche. Les abeilles se réunissent dans la ruche et commencent le pas en-arrière. Lorsque toutes les solutions sont complétées, la meilleure est déterminée et donc utilisée pour mettre à jour la meilleure solution globale et comme ça qu'une itération de BCO est accomplie. A ce point, toutes les solutions sont supprimées, et une nouvelle itération prend naissance [MEZ 10].

Soit "B" le nombre des abeilles dans la ruche, et "NC" le nombre des déplacements constructifs en-avant. Au début de la recherche, toutes les abeilles sont dans la ruche. Le pseudo-code de l'algorithme BCO peut être décrit de la façon suivante [MEZ 10]:

1. Initialisation : une solution vide est assignée à chaque abeille
2. Pour chaque abeille // (pas en-avant)
 - a) $k = 1$ // (compter les déplacements constructives en-avant)
 - b) Evaluer tous les pas possibles
 - c) Choisir un pas
 - d) $k = k + 1$; If $k \leq NC$ Aller en b)
3. Retour de toutes les abeilles à la ruche // (pas en-arrière)
4. Evaluer la valeur de la fonction objective pour chaque abeille
5. Chaque abeille décide aléatoirement soit de continuer sa propre exploration et devenir une recruteuse, ou de devenir l'abeille qui fait la récolte.
6. Pour chaque suiveur, choisir une nouvelle solution à partir des recruteuses
7. Si les solutions ne sont pas complètes, aller à l'étape (2), sinon aller à l'étape (8).
8. Evaluer toutes les solutions et trouver la meilleure parmi elles.
9. Si le critère d'arrêt n'est pas vérifié, passer à l'étape (2), sinon aller à l'étape suivante.
10. Afficher la meilleure solution trouvée.

III.3.4. Algorithme d'optimisation par la danse d'abeille (DBO)

L'algorithme DBO (Danse Bee Optimization) a été développé par Laga et Nouioua en 2009 pour résoudre le problème de la T-Coloration des graphes. Cet algorithme est inspiré de comportement des abeilles lors de la recherche de nourriture [MEZ 10].

On commence l'algorithme par positionner aléatoirement les n abeilles dans l'espace de recherche. Après l'évaluation des fitness de ces abeilles, les m abeilles avec les meilleures fitness sont choisis pour la construction du voisinage.

Dans cette étape, l'algorithme guide la recherche dans le voisinage des meilleurs sites m trouvés par les abeilles ayant les meilleurs résultats. En effet, nep ce sont les abeilles recrutées pour chercher autour des meilleurs sites, c.à.d. suivre les meilleures danseuses, nsp sont aussi les abeilles recrutées pour suivre les autres ($m-e$) danseuses. Ce recrutement est l'opération clé de l'algorithme DBO. Pour chaque abeille recrutée (solution), on associe une méta-heuristique de voisinage pour chercher autour de cette solution. A la fin, dans chaque voisinage, seulement les meilleures, parmi de m abeilles (solutions) sont donc retenues pour former la population prochaine [MEZ 10].

On note qu'il n'y a pas une restriction similaire dans la nature. Cependant, cette restriction a été introduite dans l'algorithme pour réduire le nombre de solutions à explorer.

Pour récupérer la population d'abeilles dont les résultats sont mauvaises, les $(n-m)$ abeilles sont générées aléatoirement. A la fin de chaque itération, la colonie sera constituée d'une part, de m abeilles représentatives de chaque voisinage (pour améliorer le résultat) et d'autre part, de $(n-m)$ abeilles assignées aléatoirement (pour trouver de nouveaux sites). Ces étapes sont répétées jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt prédéfini (un nombre d'itérations ou un nombre de stagnation) [MEZ 10].

III.3.5. Algorithme basé sur le mariage d'abeilles

Avec la recherche inspirée du comportement des abeilles pour trouver la nourriture, il y a un autre algorithme basé sur le processus biologique de reproduction des abeilles appelé MBO (Marriage in Honey Bees Optimization). L'optimisation par mariage d'abeilles est apparue en 2001 [MEZ 10].

L'initialisation de l'algorithme MBO est liée à cinq paramètres :

1. nombre de reines,
2. nombre d'ouvrières,
3. nombre de couvées,
4. nombre de vols nuptiaux,

5. la capacité de reproduire de la reine.

Dans ce processus d'optimisation, les reines représentent les solutions, tandis que les ouvrières représentent l'heuristique employée pour la recherche locale ou l'amélioration. La capacité de reproduire représente le nombre d'accouplements par reine.

Au début, les ouvrières sont initialisées avec certaines heuristiques. Un ensemble de reines produit aléatoirement et leurs génotypes seront améliorés en utilisant une heuristique (ouvrière) pour préserver seulement les meilleures reines. Un ensemble de vols nuptiaux sont alors entrepris sachant que la vitesse et l'énergie de chaque reine sont initialisées aléatoirement à des valeurs appartenant à l'intervalle $[0,5 ; 1]$ pour s'assurer qu'elle volera pendant un certain nombre de fois. Les transitions effectuées par chaque reine sont en fonction de cette vitesse et cette énergie [MEZ 10].

A chaque itération correspondant à un vol, la reine s'accouple avec un bourdon rencontré durant sa trajectoire selon une probabilité. Quand toutes les reines ont terminé leurs vols, le procédé de création de couvée commence. Pour créer une nouvelle couvée, une reine est choisie selon le coût de son génotype. La mutation est alors appliquée à la nouvelle couvée pour l'améliorer, en utilisant les ouvrières. Les nouvelles couvées améliorées sont alors triées selon leur forme physique (fitness) et elles remplacent les reines de mauvaises qualités jusqu'à ce qu'il n'y ait aucune couvée soit meilleure qu'une reine. Les couvées restantes sont alors détruites et un nouveau vol nuptial est entrepris. Ceci est répété jusqu'à ce que tous les vols nuptiaux soient générés ou un critère d'arrêt soit vérifié [MEZ 10].

III.4. Algorithme d'optimisation de colonies d'abeilles artificielles (ABC)

Nous avons choisi l'algorithme d'optimisation "Colonie d'Abeilles Artificielles", parmi les algorithmes d'optimisation basés sur le comportement des abeilles, pour optimiser notre système de mise à la terre. Ce choix est basé sur les avantages et les caractéristiques de cet algorithme. Par conséquent, nous allons exposer cet algorithme d'une façon plus détaillée.

III.4.1. Historique de l'algorithme ABC

L'algorithme ABC (Artificiel Bee Colony) a été développé par Karaboga et Basturk en 2005, en inspectant les comportements des abeilles réelles pour trouver la source de nourriture, qui s'appelle le nectar, et partager l'information des sources de nourriture aux autres abeilles du nid [MEZU 10].

III.4.2. Principe général de l'algorithme ABC

Dans cet algorithme, les abeilles artificielles sont classifiées en trois groupes : les abeilles employées qui recherchent des sources de nourriture, les spectatrices (les abeilles observatrices) qui évaluent les sources trouvées et les scouts (éclaireuses) sont chargés de trouver de nouvelles sources nourritures [MEZU 10]. Les abeilles employées et spectatrices suivent le procédé d'exploitation dans l'espace de recherche d'une part et les scouts commandent le procédé d'exploration d'autre part. Une position de source de nourriture représente une solution possible au problème à optimiser.

Chaque cycle de recherche se compose de trois étapes principales : le déplacement des abeilles employées et des spectatrices sur les sources de nourriture, le calcul de leurs montants de nectar et enfin la détermination des sources abandonnées et charger les abeilles scouts de chercher des sources possibles de nourriture.

On associe pour chaque source de nourriture une abeille employée ; c'est-à-dire, le nombre d'abeilles employées est égal au nombre de sources de nourriture [KAR 07]. Si l'abeille employée, représentant une source de nourriture, n'est pas améliorée par un nombre prédéterminé d'épreuves, elle va être forcée de devenir une scout pour une recherche aléatoire de nouvelles sources de nourriture. Cette action (une abeille est choisie comme abeille scout) est commandée par un paramètre de commande appelé la « limite ».

Les abeilles employées partagent l'information avec les abeilles spectatrices dans la ruche de la sorte que les abeilles spectatrices puissent choisir une source de nourriture pour l'explorer. La quantité de nectar d'une source de nourriture correspond à la qualité de la solution [KAR 07].

Les spectatrices sont placées sur les sources de nourriture en employant un processus de sélection basé sur la probabilité. A mesure que la quantité de nectar d'une source de nourriture augmente, la valeur de probabilité, avec laquelle la source de nourriture est préférée par les spectatrices, augmente aussi.

III.4.2.1. Production initiale des sources de nourriture

Si l'espace de recherche est considéré comme l'environnement de la ruche qui contient les sources alimentaires, l'algorithme commence à produire de manière aléatoire des sources alimentaires qui correspondent aux solutions de l'espace de recherche. Sources alimentaires initiales sont produites au hasard dans l'intervalle des limites des paramètres [AKA 10].

$$X_{i,j} = X_j^{\min} + \phi_j (X_j^{\max} - X_j^{\min}) \quad (\text{III.3})$$

où : $i = 1 \dots SN$, $j = 1 \dots D$. SN est le nombre de sources d'alimentation et D représente le nombre de paramètres d'optimisation. En outre, un compteur qui stocke le nombre des essais de solutions sont remis à 0 dans cette phase. Après l'initialisation, les sources initiales de nourriture (solutions) sont soumises à des cycles répétitifs d'amélioration, les abeilles employées et les abeilles spectatrices explorent le voisinage et améliorent les solutions. Le critère d'arrêt de l'algorithme ABC pourrait être satisfait avec l'atteinte d'un nombre maximum de cycle ou répondre à une tolérance d'erreur (ϵ) [AKA 10].

III.4.2.2. Envoi des abeilles employées aux sites

Une abeille employée produit une modification de la position de la source d'alimentation (solution) dans sa mémoire en fonction de l'information locale (information visuelle) et trouve une source d'alimentation voisine, puis évalue sa qualité. Dans ABC, trouver une source de nourriture voisine est définie par (III.4) [AKA 10].

$$v_{i,j} = X_{i,j} + \phi_{i,j} (X_{i,j} - X_{k,j}) \quad (\text{formule de voisinage}) \quad (\text{III.4})$$

k : indice attribué aléatoirement de $[1, SN]$, k différent de i

ϕ : un facteur aléatoire entre $[-1,1]$

Comme on peut le voir à partir de l'équation (III.4), avec la diminution de la différence entre les paramètres $X_{i,j}$ et $X_{k,j}$, la perturbation de la position $X_{i,j}$ diminue. Ainsi, on se

rapproche de la solution dans l'espace de recherche, la longueur de pas est réduite de manière adaptative [AKA 10].

Si une valeur de paramètre produite dépasse ses limites prédéterminées, le paramètre peut être fixé à ses limites. Si $X_i > X_i^{\max}$ alors $X_i = X_i^{\max}$, Si $X_i < X_i^{\min}$ alors $X_i = X_i^{\min}$.

Une sélection est appliquée entre X_i et v_i le meilleur est choisi en fonction de la valeur de quantité de nectar des sources de nourriture de X_i et v_i . Si la source au v_i est supérieure à celle de X_i en termes de rentabilité, l'abeille employée mémorise la nouvelle position et oublie l'ancien. Sinon, la position précédente est conservée. Si X_i ne peut pas être améliorée, le nombre d'essais est incrémenté de 1, sinon, le compteur est remis à 0. Si le nombre d'essais atteint une valeur prédéterminée X_i est abandonnée [AKA 10]. L'évaluation est calculée par :

$$\text{Fitness}_i = 1 / f_i \quad (\text{III.5})$$

III.4.2.3. Calcul de probabilité

Après la phase des abeilles employées, ces derniers partagent leurs informations relatives aux quantités de nectar et les positions de leurs sources avec les abeilles spectatrices sur la piste de danse. C'est la caractéristique de l'interaction multiple des abeilles artificielles de ABC. Une abeille spectatrice évalue les informations de nectar pris de toutes les abeilles employées et choisit un site de source de nourriture avec une probabilité liée à sa quantité de nectar. Cette sélection est basée sur la valeur de la fitness [AKA 10]. La probabilité est donnée par :

$$P_i = \text{fitness}_i / \sum_{i=1}^{SN} \text{fitness}_i \quad (\text{III.6})$$

Dans ce schéma de sélection probabiliste, comme la quantité de nectar des sources de nourriture augmente, le nombre de spectatrices venant les visiter augmente aussi. C'est la fonction de rétroaction positive de ABC.

III.4.2.4. Choix de la source à améliorer par les spectatrices

Dans l'algorithme ABC, un nombre réel aléatoire dans l'intervalle [0,1] est généré pour chaque source. Si la valeur de probabilité (P_i) dans l'équation (III.6) associé à cette source est supérieure à ce nombre aléatoire, alors l'abeille spectatrice produit une modification de la position de cette source de nourriture à l'aide de l'équation. (III.4). Après que la source est évalué, l'abeille spectatrice, soit elle mémorise la nouvelle position et oublie l'ancienne, soit

elle garde l'ancienne. Si la solution X_i ne peut pas être améliorée, le compteur d'essais augmente de 1, sinon, le compteur est remis à 0. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les spectatrices soient réparties sur les sources alimentaires [AKA 10].

III.4.2.5. Critère pour abandonner une source : Limite et production de scoute

Dans un cycle complet, après les phases des abeilles employés et des abeilles spectatrices, l'algorithme vérifie pour voir si une source est épuisée pour l'abandonner. Afin de décider si une source est abandonnée, les compteurs qui ont été mis à jour lors de la recherche sont utilisés. Si la valeur du compteur est supérieure au paramètre de commande de l'algorithme ABC, appelée "Limite ", alors la source associée à ce compteur est supposée épuisée et doit être abandonnée. La source abandonnée par son abeille est remplacée par une nouvelle source de nourriture découverte par la scoute, ce qui représente le mécanisme de rétroaction négative et la propriété de fluctuation dans l'auto-organisation de ABC. L'action abandonner la source et charger une scoute de trouver une nouvelle source est simulée par le remplacement de la solution abandonnée par une solution produite d'une façon aléatoire. Cette opération peut être définie par (III.3). Dans l'ABC de base, on suppose que seule source puisse être épuisée dans chaque cycle, et une seule abeille peut être une scoute. Si plus d'un compteur dépasse la valeur "limite ", l'un des maxima pourrait être choisi par programme [AKA 10].

III.4.3. Paramètres de l'algorithme ABC

Les paramètres les plus importants qui caractérisent l'algorithme ABC sont les suivants [KAR 07] :

- La taille de l'essaim (Colony Size, CS)

La taille de l'essaim (population), c'est le nombre d'abeilles (agents) employées plus le nombre d'abeilles spectatrices. Cette taille est choisie en fonction du problème à optimiser. On peut modifier la taille de la population pour avoir des résultats meilleurs et une exécution du programme plus rapide.

- La limite

C'est le nombre limite de tentatives (itérations) attribué à une abeille employée pour améliorer sa fitness. Il est calculé comme suit :

$$L = (CS \times D)/2. \quad (\text{III.7})$$

D est la dimension de la fonction objectif

- Le nombre d'abeilles employées

La moitié de la population des abeilles est choisie comme employées, le même nombre est choisi comme nombre de sources de nourriture.

- Le nombre d'abeilles spectatrices

La moitié restante est prise comme des abeilles spectatrices. Les spectatrices sont attribuées, par pourcentage décroissant, aux employées en fonction de leur fitness.

- Le nombre d'abeilles scoutesses

Chaque abeille employée qui atteint la limite de tentatives d'amélioration sans succès, est convertie en scoutesse pour explorer de nouveaux sites

III.4.4. Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles Modifié

La version de base de l'algorithme ABC n'a qu'un seul paramètre de commande "limite" en dehors des paramètres de contrôle commun entre les algorithmes basés sur la population tels que la taille de la population (SN) et le nombre de cycle maximum (MCN). La version de base de l'algorithme ABC est très efficace pour les fonctions de base. Cependant, la vitesse de convergence de l'algorithme est plus faible lorsque l'on traite des problèmes avec contraintes, fonctions composites et certaines fonctions non séparables [KAR 10].

Dans le processus de variation, certains paramètres de recherche tels que la fréquence de perturbation ou l'ampleur de la perturbation est importante car elles affectent la distribution des nouvelles solutions. Afin d'améliorer le taux de convergence, certaines modifications ont été introduites dans le processus de perturbation de l'algorithme de base ABC [KAR 10].

III.4.4.1. Fréquence de perturbation

L'une des modifications de l'algorithme ABC est le contrôle de la fréquence de perturbation. Dans la version de base de l'algorithme ABC, la fréquence est fixée. Dans l'algorithme ABC de base, tout en produisant une nouvelle solution v_i en changeant seulement un paramètre de la solution mère X_i , ce qui donne un taux de convergence lent. Afin de remédier à ce problème, l'algorithme ABC est modifié par l'introduction d'un paramètre de contrôle (MR) le taux de modification. Grâce à cette modification, pour chaque paramètre $X_{i,j}$, un nombre aléatoire est distribué de façon uniforme, ($0 \leq R_{i,j} \leq 1$), si le nombre aléatoire est inférieur à MR le paramètre est modifié, comme suit [KAR 10]:

$$v_i = \begin{cases} X_{i,j} + \phi_{i,j} (X_{i,j} - X_{k,j}), & \text{si } R_{i,j} < MR \\ X_{i,j}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Le paramètre MR est une constante entre [0,1], une grande valeur de MR peut réduire la robustesse du programme d'une façon significative. Par contre, une valeur faible de MR rend la convergence plus lente.

III.4.4.2. Ampleur de perturbation

Une autre modification est liée à la variance de l'opérateur de l'algorithme de base ABC. Dans l'algorithme ABC de base, un échantillon aléatoire de perturbation qui évite de se coincer à des minima locaux, est ajouté à la solution en cours, afin de produire une nouvelle solution selon l'équation (III.4). Cette perturbation aléatoire est la différence des solutions (X_i et X_k), pondérée par un nombre réel aléatoire $\phi_{i,j}$. La valeur de $\phi_{i,j}$ varie dans l'intervalle [-1,1] dans l'algorithme ABC de base, alors qu'il varie dans l'intervalle [-SF, SF] dans l'algorithme ABC modifié [KAR 10].

Par conséquent, l'amplitude de la perturbation est contrôlée par un paramètre de commande appelé le facteur d'échelle (SF). Cette valeur est définie, avant l'exécution de l'algorithme. Une valeur inférieure de SF permet d'améliorer le processus de recherche à petits pas tout en provoquant une lente convergence. Une plus grande valeur de SF accélère la

recherche, mais elle réduit la capacité de l'exploitation du processus de perturbation [KAR 10].

Pour certaines classes de problèmes, de faibles valeurs de SF sont appropriées alors que pour d'autres, les plus élevés sont pratiques. Pour cette raison, l'algorithme modifié peut changer SF automatiquement lors de la recherche, appelé facteur d'échelle adapté (ASF). Le réglage automatique de SF est réalisé en utilisant le un cinquième de la règle de Rechenberg qui stipule que le rapport de mutations réussies à toutes les mutations devrait être de 1/5. La modification est effectuée selon l'équation suivante [KAR 10] :

$$SF(t+1) = \begin{cases} SF(t) \times 0.85 & \text{si } \phi(m) < 0.2 \\ SF(t)/0.85 & \text{si } \phi(m) > 0.2 \\ SF(t) & \text{si } \phi(m) = 0.2 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Si $\phi(m)$ est inférieur à 1/5, SF est diminuée. Si $\phi(m)$ est supérieur à 1/5, SF est augmentée afin d'accélérer la recherche.

III.4.4.3. Choix de la solution

L'exploitation d'un plus grand nombre de solutions, en laissant une certaine marge de tolérance, est une des caractéristiques de l'algorithme ABC modifié. Si les solutions dépassent les limites de leur intervalle, nous n'éliminons pas ces solutions immédiatement mais nous les laissons pour l'autocorrection pendant un certain nombre d'itérations prédéterminé pour voir l'évolution de l'amélioration. Le choix des solutions est basé sur les règles suivantes [KAR 10]:

- Toute solution possible ($X_i - X_j = \text{violation}_j \leq 0$), est préférable par rapport à toute solution impossible ($\text{violation}_{j+1} > 0$).
- Parmi deux solutions possibles ($\text{violation}_j \leq 0$ et $\text{violation}_{j+1} \leq 0$), la solution ayant la meilleure fonction objectif est préférable.
- Parmi deux solutions impossibles ($\text{violation}_j > 0$ et $\text{violation}_{j+1} > 0$), la solution ayant la plus faible violation est préférable.

III.4.5. Etapes de l'algorithme ABC

L'algorithme ABC de base est donné comme suit [KAR 10]:

- 1: Initialisation
 - 2: Evaluation
 - 3: cycle = 1
 - 4: répéter
 - 5: Phase d'Abeille Employée
 - 6: Calcul des Probabilités pour les Spectatrices
 - 7: Phase d'Abeille Spectatrice
 - 8: Phase d'Abeille Scout
 - 9: Mémoriser la meilleure solution
 - 10: cycle = cycle + 1
 - 11: jusqu'à cycle = Nombre de Cycle Max
- Initialisation [KAR 10]
 - 1: de $i = 1$ à $SN/2$ faire
 - 2: de $j = 1$ à D faire
 - 3: Générer des solutions X_i à l'aide de (III.3)
 - 4: fin
 - 5: fin

Pour l'algorithme ABC de base

- Phase d'Abeilles Employées [AKA 10]
 - 1: de $i = 1$ à $SN/2$ faire
 - 3: Production de nouvelles sources de nourriture à l'aide de (III.4)
 - 4: Evaluer la qualité de v_i .
 - 5: Processus de sélection entre v_i et X_i
 - 6: Si X_i n'est pas amélioré $L_i = L_i + 1$, sinon $L_i = 0$.
 - 7: fin
- Calcul de probabilité à l'aide de la formule (III.6)

- Phase d'Abeilles Spectatrices [AKA 10]
 - 1: $t = 0, i = 1$
 - 2: répéter
 - 3: Si $N_{\text{aléatoire}}[0,1] < P_i$ alors
 - 4: $t = t + 1$
 - 6: Production de nouvelles sources de nourriture a l'aide de (III.4)
 - 8: Processus de sélection entre v_i et X_i
 - 9: Si X_i n'est pas amélioré $L_i = L_i + 1$, sinon $L_i = 0$.
 - 10: $i = i + 1$
 - 11: fin
 - 13: jusqu'à $t = SN/2$

- Phase d'Abeille Scoute
 - 1: Si $\max(L_i) > \text{Limite}$ alors
 - 2: Remplacer X_i par une nouvelle source à l'aide de (III.3).
 - 3: fin

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles modifié possède les mêmes étapes principales que l'algorithme ABC de base. Les modifications apparaissent dans la phase Employées et Spectatrices ainsi que dans le calcul de probabilité. De telles modifications sont données comme suit :

- Phase d'Abeilles Employées [KAR 10]
 - 1: de $i = 1$ à $SN/2$ faire
 - 2: de $j = 1$ à D faire
 - 3: Production de nouvelles sources de nourriture a l'aide de (III.8)
 - 4: fin
 - 5: Si aucun paramètre n'a changé, alors changer un paramètre aléatoire par (III.4)
 - 6: Evaluer la qualité de v_i .
 - 7: Processus de sélection entre v_i et X_i
 - 8: Si X_i n'est pas amélioré $L_i = L_i + 1$, sinon $L_i = 0$.
 - 9: fin

- Phase d'Abeilles Spectatrices [KAR 10]
 - 1: $t = 0, i = 1$
 - 2: répéter
 - 3: Si $N_{\text{aléatoire}}[0,1] < P_i$ alors
 - 4: $t = t + 1$
 - 5: de $j = 1$ à D faire
 - 6: Production de nouvelles sources de nourriture a l'aide de (III.8)
 - 7: fin

- 8: Processus de sélection entre v_i et X_i
- 9: Si X_i n'est pas amélioré $L_i = L_i + 1$, sinon $L_i = 0$.
- 10: fin
- 11: $i = i + 1$
- 13: jusqu'à $t = SN/2$

- Calcul de probabilité [KAR 10]

- 1: de $i = 1$ à $SN/2$ faire
- 2: Calculer les valeurs de probabilité à l'aide de la formule suivante :

$$P_i = \begin{cases} 0.5 + \left(\frac{fitness_i}{\sum_{j=1}^{SN} fitness_j} \right) \times 0.5 & \text{si la solution est possible} \\ \left(1 - \frac{violation_i}{\sum_{j=1}^{SN} violation_j} \right) \times 0.5 & \text{si la solution est impossible} \end{cases} \quad (III.9)$$

La violation est la valeur de pénalité de des solutions X_i .

- 3: fin

La figure (III.4) illustre l'organigramme de l'algorithme ABC.

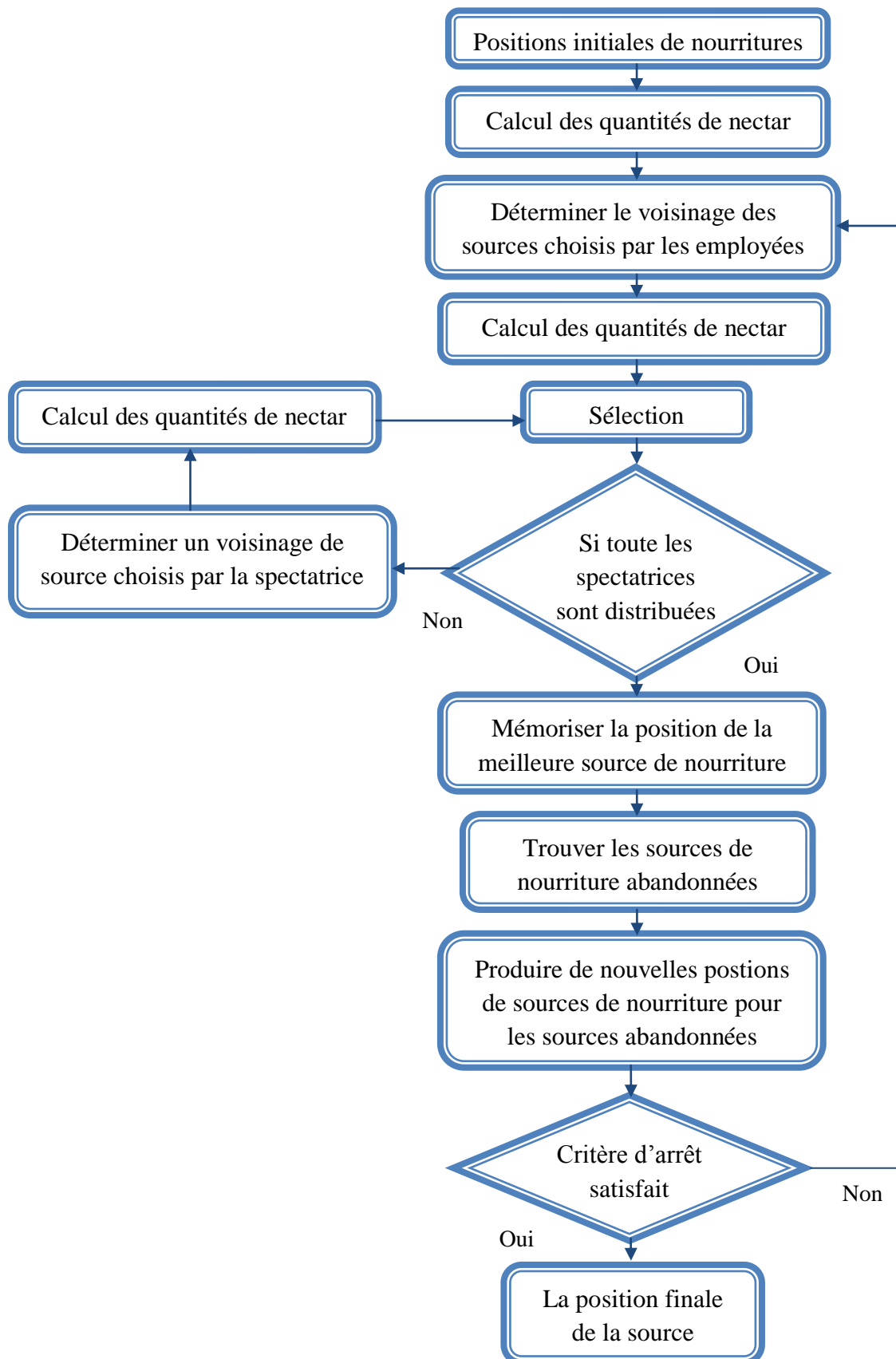


Figure III.4 : Organigramme pour l'algorithme ABC [AKA 10]

III.4.6. Caractéristiques de l'algorithme ABC

L'algorithme ABC a montré une efficacité remarquable dans la recherche des solutions optimales. Il surmonte le problème de l'optimum local. Il est facile à implémenter. Il utilise plusieurs paramètres réglables. En outre, l'algorithme a une robustesse remarquable, produisant des taux de réussite de 100% dans beaucoup de cas qu'il a traité. Sa technique c'est l'une des meilleures, concernant la rapidité de trouver l'optimum et la précision des résultats obtenus [KAR 07].

III.5. Conclusion

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

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

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

Chapitre IV

*Applications, Validation et
comparaison des résultats*

IV.1. Introduction

La solution d'un problème d'optimisation consiste à rechercher la solution optimale qui minimise la fonction de coût. En vue d'obtenir un système de terre fiable et sécurisé, certaines contraintes doivent être vérifiées. En effet, la sécurité des personnes et des biens est assurée en gardant la tension de pas, la tension de contact, l'élévation du potentiel de terre (EPT) et la résistance du réseau de terre dans des limites admissibles en se basant sur la norme IEEE 80-2000.

Ce chapitre présente des applications des algorithmes ABC, basique et modifié, inspirés de la colonie d'abeilles artificielles, afin de déterminer la forme de la grille de terre optimale. Cette optimisation est basée sur la fonction objectif de coût. Cette dernière inclut le nombre et la longueur des conducteurs parallèles et verticaux, le diamètre des conducteurs, l'épaisseur de la couche superficielle, les contraintes sur les tensions de pas et de contact ainsi que l'espacement entre les électrodes. Nos résultats ont été validés en utilisant le code de calcul CYMGrd [CYM 06]. Par ailleurs, une comparaison de nos résultats à ceux obtenus par Bendekkiche et Kemari [BEN 13] développant deux techniques se basant sur les AG et EP.

IV.2. Code de calcul CYMGrd

Le logiciel CYMGrd est un programme d'analyse et de conception d'installations de mise à la terre. Il a été développé afin d'aider les ingénieurs à concevoir des systèmes de mise à la terre grâce à des outils de repérage de zones à risque ou dangereuses. Le logiciel CYMGrd permet d'effectuer une analyse rapide des différentes alternatives de conception et de choisir la solution la plus économique pour n'importe quelle installation. Le programme répond aux normes IEEE 80-2000, IEEE 81-1983 et IEEE 837-2002 [CYM 06]. Nous utilisons ce logiciel afin de valider nos résultats d'optimisation.

IV.3 Optimisation par colonie d'abeilles artificielles

L'optimisation des systèmes de mise à la terre a été effectuée en se basant sur trois points essentiels:

- La fonction objectif ;
- Les paramètres de conception ;
- Les éventuelles contraintes liées au problème d'optimisation.

IV.3.1. Fonction objectif

Le but de cette étude est de minimiser la fonction de coût d'un système de mise à la terre. En s'inspirant des travaux antérieurs sur l'optimisation des réseaux de terre [BEN 13], nous proposons une fonction objectif à 6 variables consistant en le nombre de piquets, le nombre de conducteurs horizontaux suivant la largeur de l'ouvrage (l'axe x), le nombre de conducteurs horizontaux suivant la longueur de l'ouvrage (l'axe y), le nombre et la longueur des piquets, le diamètre des conducteurs horizontaux et l'épaisseur de la couche superficielle. En effet, l'expression de la fonction objectif est donnée comme suit :

$$f(N_x, N_y, N_p, L_p, h_s, d) = L_p N_p C_p \frac{\pi \cdot d^2}{4} + C_g (N_x L_y + N_y L_x) \frac{\pi \cdot d^2}{4} + C_c A h_s \quad (\text{IV.1})$$

Ou : N_x : nombre de conducteurs horizontaux suivant x ;

N_y : nombre de conducteurs horizontaux suivant y ;

N_p : nombre de piquets ;

L_p : longueur des piquets (m) ;

h_s : épaisseur de la couche superficielle (m) ;

d : diamètre des conducteurs horizontaux et le diamètre des piquets (m) ;

C_p : coût d'un piquet (DA/m³) ;

C_g : coût d'un conducteur horizontal (DA/m³) ;

C_c : coût de la couche superficielle (DA/m³).

En se basant sur la norme IEEE 80-2000, relative à la conception d'un système de mise à la terre, nous avons opté pour un espacement entre les conducteurs horizontaux de la grille suivants des 2 axes, compris entre deux valeurs limites : $D_{x\min} = D_{y\min} = 2,5$ m, et $D_{x\max} = D_{y\max} = 30$ m. Par ailleurs, nous avons choisi un espacement minimum D_p entre les piquets de terre de 5 m. Nous prenons le diamètre minimum de tous les conducteurs égal à 10,51 mm en raison de la résistance mécanique et la robustesse. Selon la norme, ce diamètre correspond à la section 86,75 mm².

Les intervalles de variation des différents paramètres sont cités dans le) tableau (IV.1) suivant :

Paramètre	Intervalle de variation
N_p : nombre de piquets	$[0 ; \frac{2 \cdot (L_x + L_y)}{D_p}]$
N_x : nombre de conducteurs horizontaux suivant x	$[1 + \frac{L_y}{D_{x\max}} ; 1 + \frac{L_y}{D_{x\min}}]$
N_y : nombre de conducteurs horizontaux suivant y	$[1 + \frac{L_x}{D_{y\max}} ; 1 + \frac{L_x}{D_{y\min}}]$
L_p : longueur des piquets (m)	[1,5 ; 3,05]
d : diamètre des conducteurs horizontaux et des piquets (m)	[0,01051 ; 0,05]
h_s : épaisseur de la couche superficielle (m)	[0,08 ; 0,3]

Tableau IV.1: Intervalles de variation des paramètres

Les coûts des principaux matériaux utilisés pour la mise à la terre sont donnés dans le tableau (IV.2) suivant. Nous avons choisi le cuivre recuit doux, à cause de ces caractéristiques électriques et mécaniques. Concernant la couche superficielle, nous avons choisi le gravier 8/15 :

Matériau	Coût (DA/m ³)
Cuivre Recuit doux	13.843.567,7
Gravier 8/15	1.560

Tableau IV.2 : Coûts unitaires des principaux matériaux de mise à la terre

IV.3.2. Gestion des contraintes

Lors de la conception des réseaux de terre, les paramètres caractérisés le système de mise à la terre sont la tension de contact E_t et la tension de pas E_p . Ces deux tensions doivent être strictement inférieures à un pourcentage spécifique α des valeurs admissibles correspondantes :

$$E_t < \alpha v_{tmax} \quad (IV.2)$$

$$E_p < \alpha v_{pmax} \quad (IV.3)$$

Dans notre modélisation, nous avons considéré que : $\alpha = 90\% = 0,9$.

E_t : tension de contact ou de maille (V) ;

E_p : tension de pas (V) ;

v_{tmax} : tension de contact maximale admissible (V) ;

v_{pmax} : tension de pas maximale admissible (V) ;

α : pourcentage spécifique de la valeur tolérable dépendant du besoin des utilisateurs.

IV.3.2.1. Algorithme ABC de base

L'algorithme ABC de base a été conçu pour des problèmes sans contraintes. Afin de l'adapter à notre problème, nous avons introduit les contraintes dans la fonction objectif sous la forme d'une fonction de pénalité h . Deux contraintes consistant en la tension de contact (touche) et la tension de pas ont été choisies. Les résultats obtenus montrent que ce choix est largement suffisant. La fonction de pénalité est donnée par l'expression (IV) suivante :

$$h = z_1 |E_t - \alpha v_{tmax}| + z_2 |E_p - \alpha v_{pmax}| \quad (IV.4)$$

z_1, z_2 : coefficients de pénalité réels positifs de valeurs dépendantes des coefficients de coûts.

Cette fonction de pénalité n'intervient que lorsque l'une des contraintes est violée.

De cette façon, notre problème initialement avec contraintes est modélisé comme étant un problème sans contraintes. En tenant compte du terme de pénalité, la nouvelle fonction objectif $F(x)$ devient :

$$F(N_x, N_y, N_p, L_p, h_s, d) = L_p N_p C_p \frac{\pi \cdot d^2}{4} + C_g (N_x L_y + N_y L_x) \frac{\pi \cdot d^2}{4} + C_c A h_s + z_1 |E_p - \alpha v_{pmax}| + z_2 |E_t - \alpha v_{tmax}| \quad (IV.5)$$

Dans ces conditions, quatre cas peuvent se présenter :

$$F(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si } E_t < \alpha v_{tmax} \text{ et } E_p < \alpha v_{pmax} \\ f(x) + z_1 |E_p - \alpha v_{pmax}| & \text{si } E_p \geq \alpha v_{pmax} \\ f(x) + z_2 |E_t - \alpha v_{tmax}| & \text{si } E_t \geq \alpha v_{tmax} \\ f(x) + h(x) & \text{si } E_t \geq \alpha v_{tmax} \text{ et } E_p \geq \alpha v_{pmax} \end{cases} \quad (IV.6)$$

Notons que le vecteur $x = (N_x, N_y, N_p, L_p, h_s, d)$.

IV.3.2.2. Algorithme ABC modifié

L'algorithme ABC modifié tient en compte les contraintes du problème d'optimisation. Il est modélisé, dans notre étude, avec une fonction objectif et deux fonctions d'inégalités relatives aux contraintes considérées :

$$F(x) = L_p N_p C_p \frac{\pi \cdot d^2}{4} + C_g (N_x L_y + N_y L_x) \frac{\pi \cdot d^2}{4} + C_c A h_s \quad (IV.7)$$

$$E_t < \alpha v_{tmax}$$

$$E_p < \alpha v_{pmax}$$

IV.3.3. Fonction fitness

La fonction de fitness représente la valeur de la forme physique de la solution i . La fitness est proportionnelle à la quantité de nectar de la source de nourriture en position i . En

effet, plus la valeur de fitness de la particule est élevée, plus la quantité de nectar est plus importante.

Pour l'algorithme ABC de base, la fonction fitness est donnée par :

$$\text{Fitness} (N_x, N_y, N_p, L_p, h_s, d) = \frac{1}{F(x)} = \frac{1}{f(x)+h} \quad (\text{IV.8})$$

Où : F(x) est la fonction objectif avec contraintes ou sans contraintes.

Pour l'algorithme ABC modifié :

$$\text{Fitness} (N_x, N_y, N_p, L_p, h_s, d) = \frac{1}{F(x)} = \frac{1}{f(x)} \quad (\text{IV.9})$$

IV.3.4. Taille de la population

La taille de population représente le nombre des abeilles utilisées dans le processus de recherche. Dans l'algorithme ABC, 50 % d'abeilles sont des employées et 50 % spectatrices. L'augmentation de la population donne une plus grande exploitation de l'espace de recherche. Ceci permet d'avoir une convergence plus rapide de la fonction objectif vers l'optimum global. Cependant, une taille excessive de population pourrait avoir un effet inverse. La taille que nous choisissons est 200 abeilles artificielles, La taille initiale de la solution est 100 solutions qui correspondent à 100 sources de nourriture.

IV.3.5. Nombre d'itérations

Après plusieurs exécutions des programmes que nous avons élaborés, le nombre d'itérations permettant l'obtention de l'optimum global a été fixé à 400 et 100 pour l'ouvrage énergétique de Labreg respectivement pour les algorithmes ABC de base et modifié, 5000 et 1400 pour le poste de transformation de Ain El-Melh respectivement pour les algorithmes ABC de base et modifié.

IV.4. Applications et validation

Dans cette section, nous allons effectuer deux applications pour la technique d'optimisation Colonie d'Abeilles Artificielles (versions classique et modifiée). Nous avons

choisi deux ouvrages énergétiques algériens à savoir l'ouvrage énergétique de Labreg et le poste de transformation 60/30 kV de Ain El-Melh.

IV.4.1. Ouvrage énergétique de Labreg

L'ouvrage de Labreg (situé à la wilaya de Khenchela) consiste en une centrale à turbine à gaz (TG) d'une puissance nominale d'environ $2 \times 140,5$ MW. Son système de mise à la terre est très complexe et coûteux. Cette présente étude est faite dans le but de trouver à la dite centrale, une configuration optimisée du réseau de terre à la fois performante et sécurisée.

❖ Les données du réseau de terre de l'ouvrage énergétique de Labreg :

▪ Dimensions de l'ouvrage :

Les dimensions adoptées pour la dite grille est de 435 m de longueur et 300 m de largeur. Ces dimensions correspondent exactement à celles du système de mise à la terre réel de l'ouvrage de Labreg.

▪ Hypothèses et paramètres de calculs :

Les hypothèses sont fournies par le constructeur après une étude du dossier de conception du réseau de terre en question. Ces hypothèses sont basés sur les paramètres contractuels suivants :

- Durée de court-circuit : $t_c = 0,5$ s ;
- Courant de court-circuit triphasé : $I_{cc} = 31500$ A ;
- Profondeur d'enfouissement du conducteur de terre : $h = 0,8$ m ;
- Résistivité du matériau de surface (Gravier) : $\rho_s = 4000$ $\Omega.m$;
- Nombre de départs lignes 220 kV : $n_a = 3$;
- Résistivité moyenne du terrain : $\rho_t = 30,875$ $\Omega.m$.

Le tableau (IV.3) récapitule les différents paramètres caractérisant l'ouvrage de Labreg. Ces valeurs vont être injectées dans les programmes élaborés.

La longueur du poste L_x (m)	435
La largeur du poste L_y (m)	300
La profondeur d'enfouissement de la grille (m)	0,8
La profondeur des piquets de terre (m)	0,8
La résistivité du sol ρ_t ($\Omega.m$)	30,875
La résistivité de la couche superficielle ($\Omega.m$)	4000
Le courant de défaut (A)	14900
Le facteur de décroissance	1
Le facteur de division du courant	1
La durée de défaut (s)	0,5
Les sources de nourriture initiales	100
Le nombre d'itérations ABC de base	400
Le nombre d'itérations ABC modifié	100

Tableau IV.3 : Données à introduire dans les programmes développés

IV.4.1.1. Optimisation par ABC de base

L'évaluation de la fitness moyenne donne l'information sur la performance de l'algorithme et la stratégie de recherche locale. La valeur de la fitness moyenne est donnée par l'expression (IV.10) suivante:

$$\text{Fitness}_{\text{moyenne}}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{\text{SN}} \text{Fitness}(k)}{\text{SN}} \quad (\text{IV.10})$$

SN : nombre de solutions initiales qui correspond à 50% de la taille de la population.

Les deux courbes (IV.1) et (IV.2) représentent respectivement la variation de la valeur de la fitness moyenne et la fonction de coût, en fonction du nombre d'itérations.

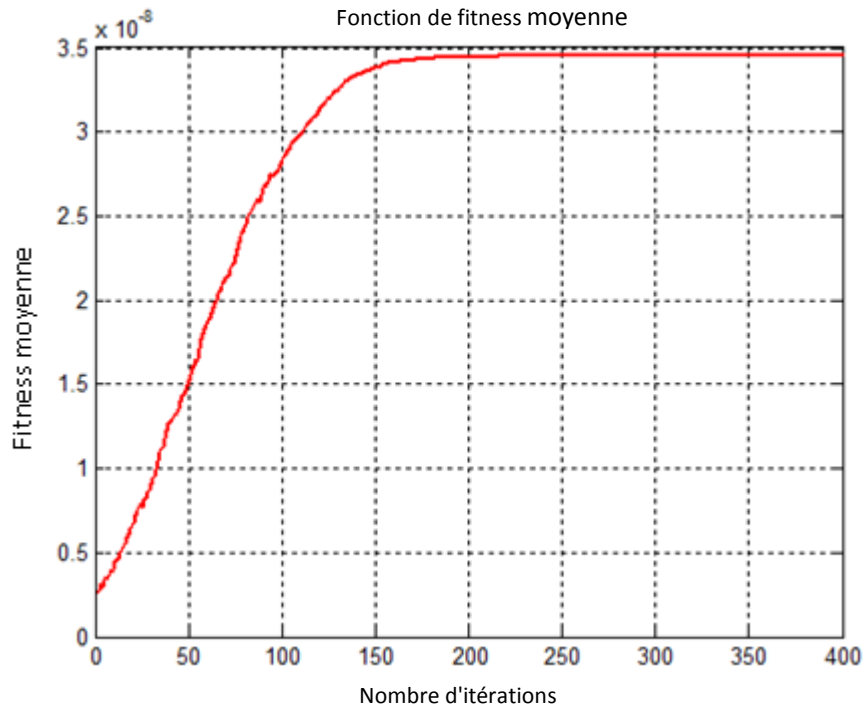


Figure IV.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations

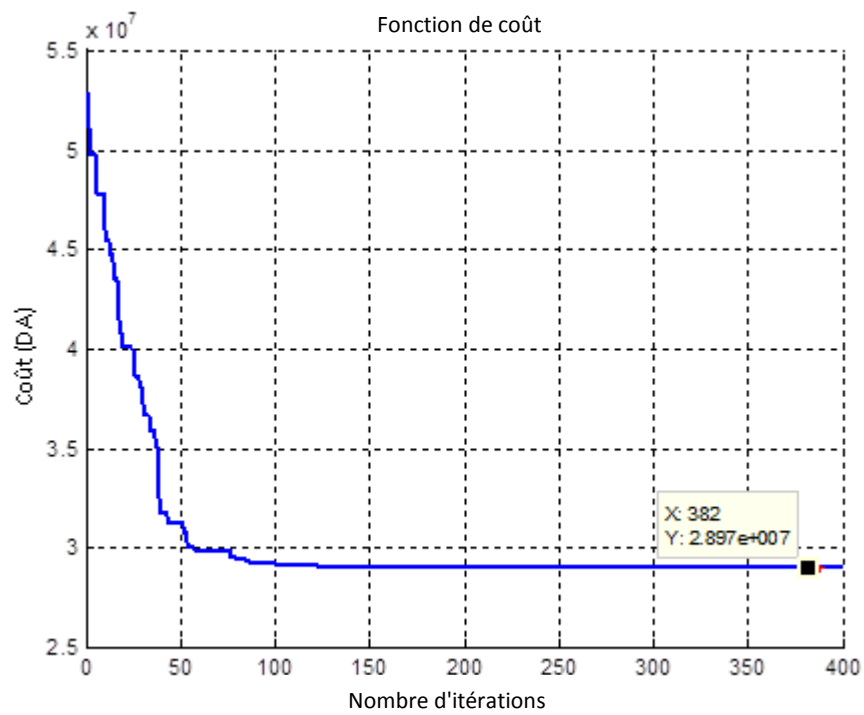


Figure IV.2 : Courbe de convergence du coût

Avec l'augmentation du nombre d'itérations, nous remarquons, d'après la figure (IV.1), que la fitness moyenne augmente rapidement dès les 80 premières itérations, puis lentement en tendant vers un palier constant.

Rappelons que la fitness moyenne est la somme des fitness partielles divisée par le nombre de sources de nourriture. Elle permet d'analyser la qualité de l'avancement de l'algorithme vers l'optimum global au cours des itérations. Etant donné que la courbe de la fitness moyenne de la technique ABC est lisse, la valeur de la fitness moyenne à une itération donnée est toujours meilleure que celle précédente. Par voie de conséquence, l'algorithme ABC avance graduellement vers l'optimum global.

Contrairement à l'évolution de la fonction de fitness, celle de coût diminue brusquement, puis lentement et tendant d'abord vers l'optimum dès les 80 premières itérations, avant de trouver l'optimum global (28.968.969, 78 DA).

Les paramètres différents optimaux obtenus par l'algorithme ABC sont présentés dans le tableau (IV.4). A partir de ces paramètres, le programme nous a proposé une topologie, relative au réseau de terre en rouge, optimisée et sans piquets, constituée uniquement de conducteurs horizontaux. En outre, les valeurs du diamètre des conducteurs et l'épaisseur de la couche superficielle respectent les limites inférieures et supérieures de leurs intervalles de variations respectifs.

Le nombre des piquets	0
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe x	12
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe y	16
La longueur du piquet (m)	0
Le diamètre des conducteurs (mm)	10,51
L'épaisseur de la couche superficielle (cm)	8
Le temps de calcul (s)	0,655
Le coût de l'installation (DA)	28.968.969, 78

Tableau IV.4 : Paramètres optimaux obtenus par le biais de l'algorithme ABC de base

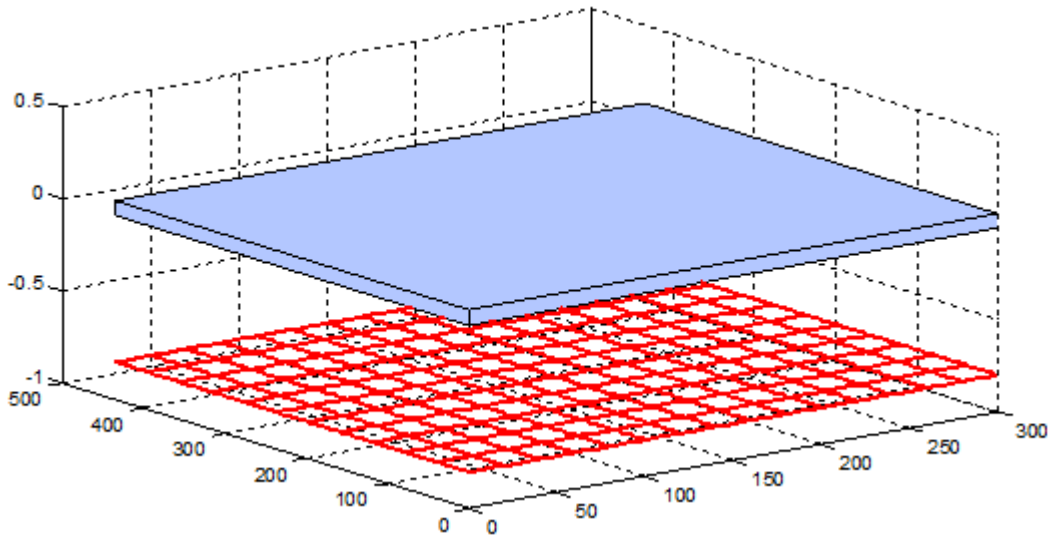


Figure IV.3 : Topologie de la grille

L'algorithme ABC nous a permis d'obtenir les paramètres électriques obtenus suivants:

Le facteur de réduction	0.6428
La tension de contact admissible (V)	796,7
La tension de pas admissible (V)	2694,8
Le courant maximum circulant dans la grille (A)	14900
La résistance de la grille (Ω)	0,0411
L'élévation du potentiel de terre EPT (V)	612,63
La tension de maille E_t (V)	136,9
La tension de pas E_p (V)	36,3

Tableau IV.5 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus à travers l'algorithme ABC de base

Notons que les deux tensions de pas et de maille sont au-dessous des tensions de pas et de contact (ou tension de maille) admissibles ; le système est bien donc optimisé et sécurisé.

IV.4.1.2. Validation en utilisant CYMGrd

Les paramètres électriques précédemment illustrés ont été confrontés à ceux obtenus en utilisant CYMGrd. Ces derniers sont présentés dans le tableau (IV.6). A l'exception de la

tension de pas, où CYMGrd présente une valeur légèrement plus petite à celle que trouvée par l'algorithme ABC basique, les autres paramètres sont proches, ce qui valide l'algorithme élaboré.

Le facteur de réduction	0,642779
La tension de contact admissible (V)	796,73
La tension de pas admissible (V)	2694,78
Le courant maximum s'écoulant dans la grille (A)	14900
La résistance de la grille (Ω)	0,04036
L'élévation du potentiel de terre EPT (V)	616,89
Le potentiel de surface (V)	583,58
La tension de maille Et (V)	146,13
La tension de pas Ep (V)	14,11

Tableau IV.6 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd

Par ailleurs, les tensions de pas $E_p = 13,79$ V et de contact $E_t = 141,15$ V obtenues en utilisant le logiciel CYMGrd sont largement inférieures aux tensions de pas admissible $E_{pas50} = 2694,78$ V et de contact admissible $E_{touch50} = 796,73$ V respectivement.

Les figures (IV.4), (IV.5) et (IV.6) présentent respectivement la topologie en 3D de la grille, le diagramme de contour de la tension de contact en 3D et finalement le diagramme des profils des tensions de contact et de pas. Bien que la tension de maille (de contact) atteint au niveau des coins une valeur maximale de 146,13 V. Cette dernière reste très inférieure à celle admissible maximale ; notre système de terre est largement sécurisé.

Nous remarquons que même le potentiel de surface $E_s = 583,58$ V, ne dépasse pas l'élévation du potentiel de terre = 616,89 V.

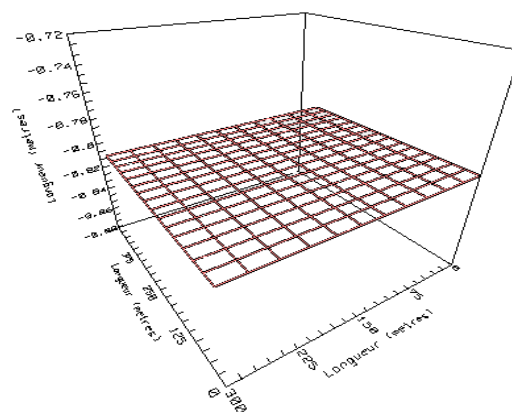


Figure IV.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D

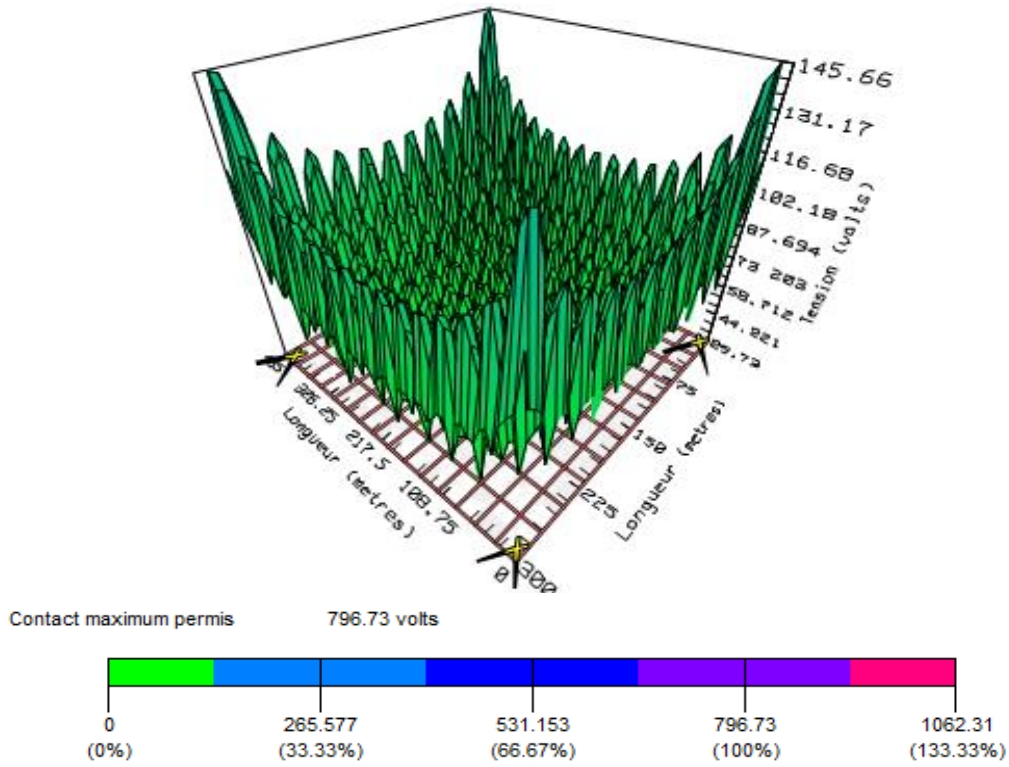


Figure IV.5 : Diagramme de contour de potentiel de contact

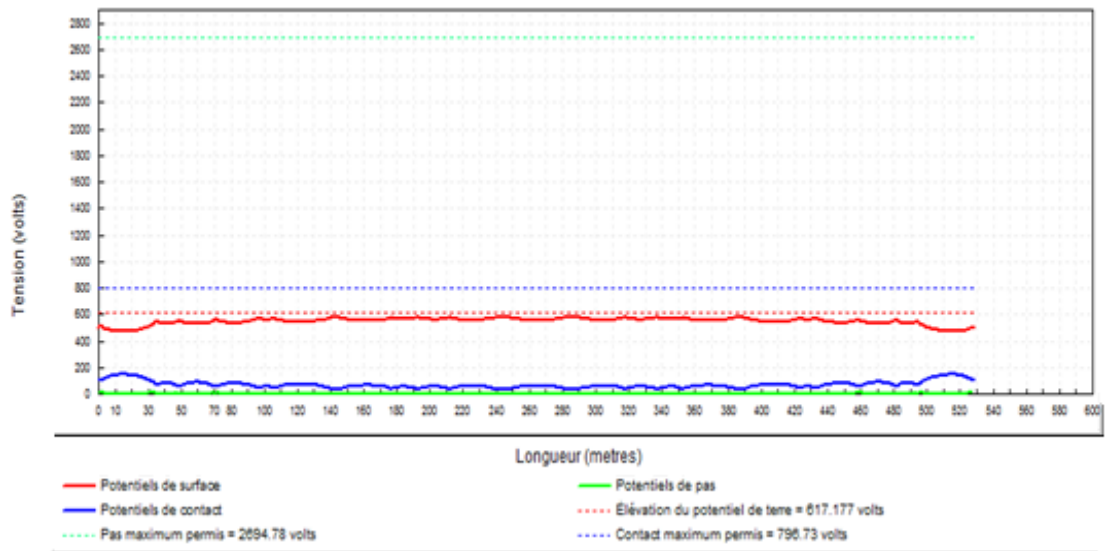


Figure IV.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

IV.4.1.3. Optimisation par la technique ABC modifié

L'exécution du programme ABC modifié a été effectuée en considérant un taux de perturbation $RM = 0,4$ et un facteur d'échelle $SF = 1$.

Relatif à l'algorithme ABC modifié, nous présentons sur la figure (IV.7) l'évolution de la fonction fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations. Par ailleurs, la figure (IV.8) illustre la variation de la fonction du cout en fonction de nombre d'itérations.

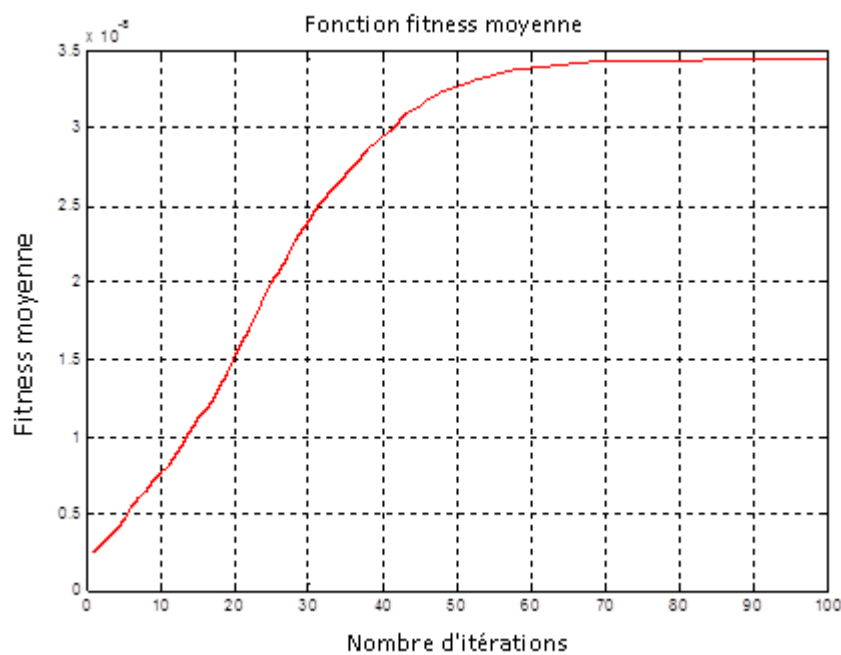


Figure IV.7 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations

De même que précédemment, quand le nombre d'itérations augmente, la fitness moyenne augmente et elle augmente rapidement durant les 50 premières itérations, puis lentement avant d'atteindre une valeur constante. Ainsi, l'algorithme ABC modifié avance toujours vers l'optimum plus rapidement que l'algorithme ABC basique.

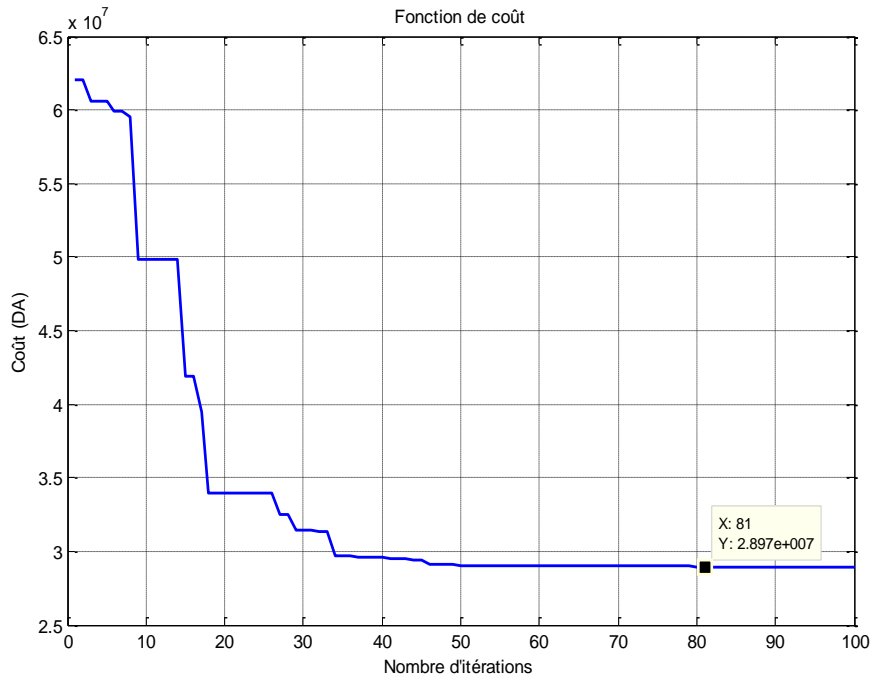


Figure IV.8 : Courbe de convergence du coût

Etant donné que la fonction de coût est inversement proportionnelle à celle de fitness, l'augmentation du nombre d'itérations engendre une brusque diminution de la fonction coût notamment dans les 50 itérations, puis une diminution lente permettant d'atteindre, après 80 itérations, l'optimum global de 28.968.969,78 DA.

Les paramètres optimaux obtenus par l'algorithme ABC modifié sont comme suit :

Le nombre des piquets	0
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe x	12
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe y	16
La longueur du piquet (m)	0
Le diamètre des conducteurs (mm)	10,51
L'épaisseur de la couche superficielle (cm)	8
Le temps de calcul (s)	0.36
Le coût de l'installation (DA)	28.968.969,78

Tableau IV.7 : Valeurs optimales obtenues par l'optimisation ABC modifié

Par ailleurs, les paramètres électriques obtenus par l'algorithme ABC modifié sont:

Facteur de réduction	0,6428
Tension de contact admissible (V)	796,73
Tension de pas admissible (V)	2694,77
Le courant maximum circulant dans la grille (A)	14900
Résistance de la grille (Ω)	0,0411
Élévation du potentiel de terre EPT (V)	612,63
Tension de maille E_t (V)	136,85
Tension de pas E_p (V)	36,28

Tableau IV.8 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus par ABC modifié

Notre système optimisé est bel et bien optimisé tant que les deux tensions de pas et de maille (de contact) sont au-dessous des valeurs admissibles.

IV.4.2. Poste de transformation 60 /30 kV de Ain El-Melh

Ce poste (situé à la wilaya de M'SILA) est de type extérieur. Il est constitué d'un étage de 60 kV avec 02 transformateurs de puissance 60/30 kV et 40 MVA chacun. Ce système est constitué d'une grille carrée en cuivre de $160 \times 160 \text{ m}^2$. Il est relié au réseau national par 02 départs aériens 60 kV, d'un poste de 30 kV pour l'alimentation de la région en énergie électrique. Il est caractérisé par :

- Puissance de court circuit du réseau 60 kV : $P_{cc} = 3500 \text{ MVA}$;
- Durée normalisée de court circuit : $t_c = 1 \text{ s}$;
- Courant de court-circuit : $I_{cc} = 31500 \text{ A}$.
- Résistivité de matériau de surface (Gravier) : $\rho_s = 3000 \Omega \cdot \text{m}$.
- Résistivité de la terre : $\rho_t = 50,8938 \Omega \cdot \text{m}$.
- Nombre de départs lignes 60 kV : $n_a = 2$.
- Surface du réseau maillé : $A = 25600 \text{ m}^2$.
- Profondeur d'enfouissement de la grille de mise à la terre en cuivre : $h = 0,5 \text{ m}$.

Nous pouvons résumer les caractéristiques de cet ouvrage dans le tableau suivant :

La longueur du poste L_x (m)	160
La largeur du poste L_y (m)	160
La profondeur d'enfouissement de la grille (m)	0,5
La profondeur des piquets de terre (m)	0,5
La résistivité du sol p_t ($\Omega.m$)	50,89
La résistivité de la couche superficielle ($\Omega.m$)	3000
Le courant de défaut (A)	31500
Le facteur de décroissance	1
Facteur de division du courant	0,6
La durée de défaut (s)	1
Les sources de nourriture initiales	100
Le nombre d'itérations ABC de base	5000
Le nombre d'itérations ABC modifié	1400

Tableau IV.9 : Données du poste de transformation de Ain El-Melh

IV.4.2.1. Optimisation par la technique d'Algorithme ABC de base

La figure (IV.9) (respectivement (IV.10)) montre la variation de la fonction fitness moyenne (respectivement la fonction de coût) en fonction du nombre d'itérations. Avec l'accroissement du nombre d'itérations, la fitness moyenne (respectivement le coût) augmente (respectivement diminue) brusquement dès les 200 premières itérations, puis lentement jusqu'à atteindre l'optimum global dont le coût est de 10.189.346,33 DA.

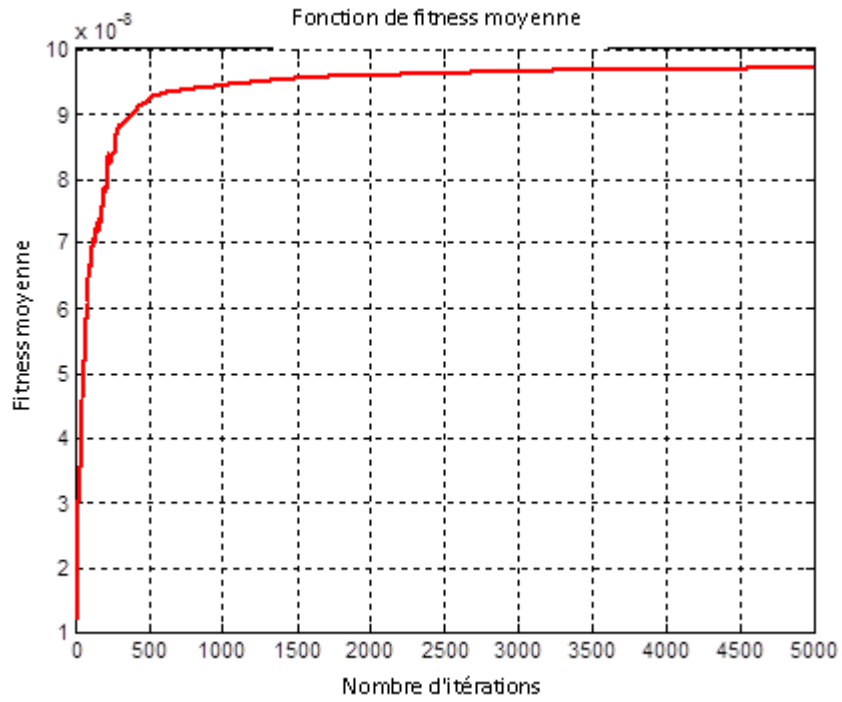


Figure IV.9 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations

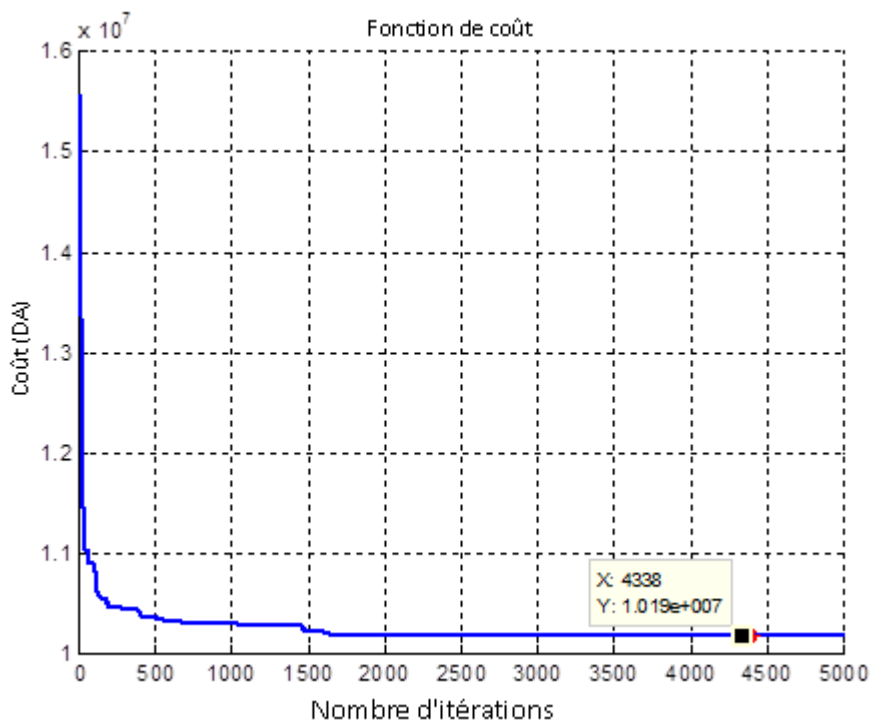


Figure IV.10 : Courbe de convergence du coût

L'algorithme ABC nous a permis d'obtenir les paramètres optimaux donnés dans le tableau (IV.10) et par la suite la topologie de la figure (IV.11). :

Le nombre des piquets	127
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe x	21
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe y	13
La longueur du piquet (m)	3,0224
Le diamètre des conducteurs et des piquets (mm)	10,5
L'épaisseur de la couche superficielle (cm)	8
Le temps de calcul (s)	6,833
Le coût de l'installation (DA)	10.189.346,33

Tableau IV.10 : Paramètres optimaux selon ABC basique

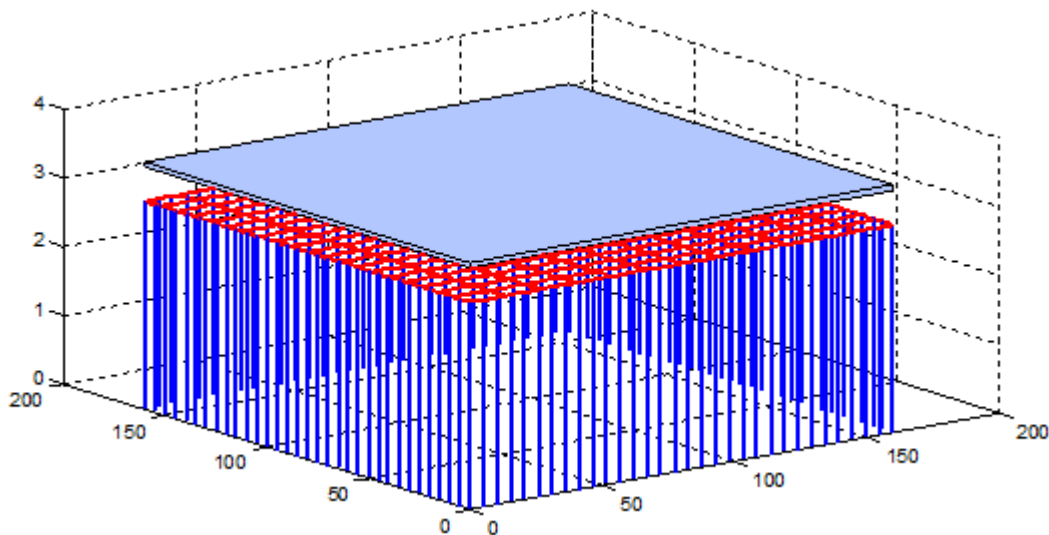


Figure IV.11 : Topologie de la grille selon ABC basique

Par ailleurs, le tableau (IV.11) présente les paramètres électriques obtenus par l'algorithme ABC de base.

Le facteur de réduction	0,6461
La tension de contact admissible (V)	453,3
La tension de pas admissible	1465,1
Le courant maximum circulant dans la grille (A)	18900
La résistance de la grille (Ω)	0,1500
L'élévation du potentiel de terre EPT (V)	2835,0
La tension de maille Et (V)	407,9
La tension de pas Ep (V)	262,4

Tableau IV.11 : Paramètres électriques optimaux obtenus par ABC de base

Les deux tensions de pas et de maille sont au-dessous des valeurs admissibles. Par conséquent, le système est à la fois optimisé et sécurisé.

IV.4.2.2. Validation des résultats obtenus par ABC en utilisant CYMGrd

CYMGrd nous a permis d'obtenir les paramètres électriques présentés dans le tableau (IV.12) suivant :

Le facteur de réduction	0,646
La tension de contact admissible (V)	453,27
La tension de pas admissible (V)	1465,07
Le courant maximum s'écoulant dans la grille (A)	18900
La résistance de la grille (Ω)	0,143
L'élévation du potentiel de terre EPT (V)	2742,54
Le potentiel de surface (V)	2702,64
La tension de maille Et (V)	415,45
La tension de pas Ep (V)	71,54

Tableau IV.12 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd

En comparant les deux résultats des tableaux (IV.11) et (IV.12), nous pouvons remarquer que les valeurs relatives aux paramètres électriques optimaux obtenues en utilisant CYMGrd sont proches à celles trouvées par le programme ABC de base.

En se basant sur les paramètres électriques ainsi trouvés, le code de calcul CYMGrd nous a permis d'obtenir la topologie en 3D correspondante au système de terre optimisé du poste de transformation de Ain El-Melh présentée sur la figure (IV.12), le diagramme de contour de la tension de contact en 3D sur la figure (IV.13) et finalement, les diagrammes de profils des tension de pas et de contact sur la figure (IV.14).

A partir des ces figures, les tensions de pas et de contact sont inférieures à celles maximales admissibles. Le diagramme de profil des potentiels de pas et de contact ne présente aucun dépassement, le système est à la fois optimisé est sécurisé.

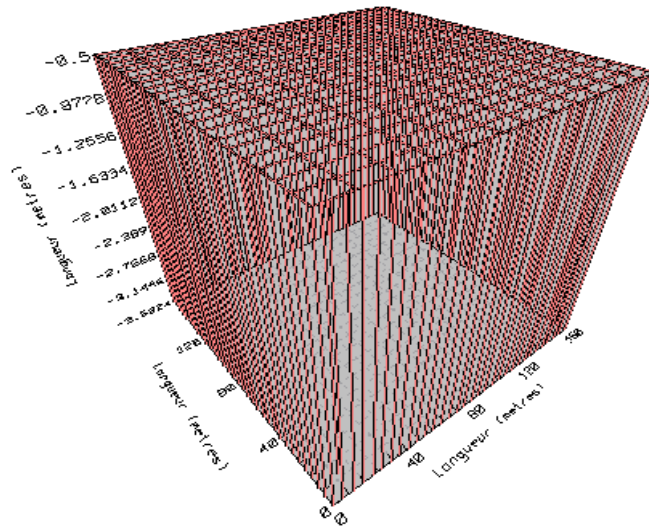


Figure IV.12 : Topologie de la grille en 3D

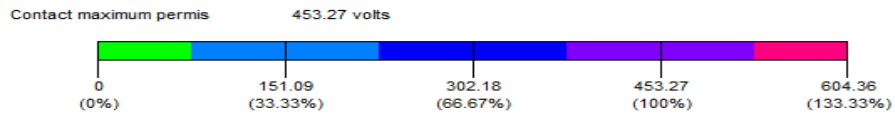
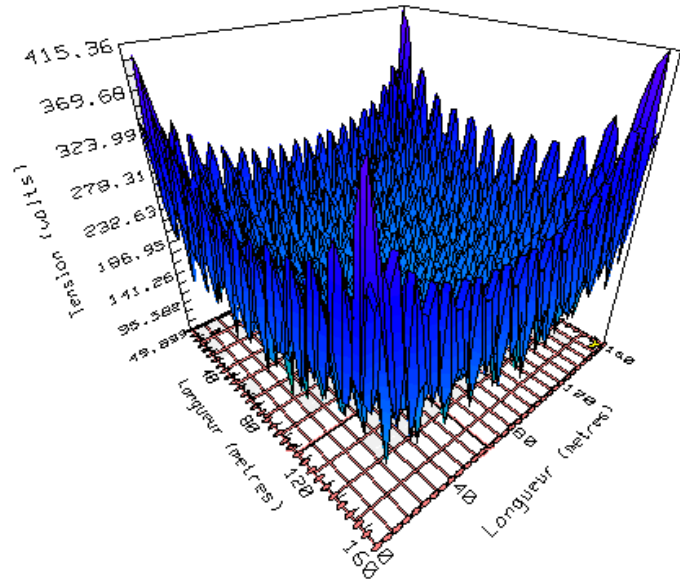


Figure IV.13 : Diagramme de contour de potentiel de contact

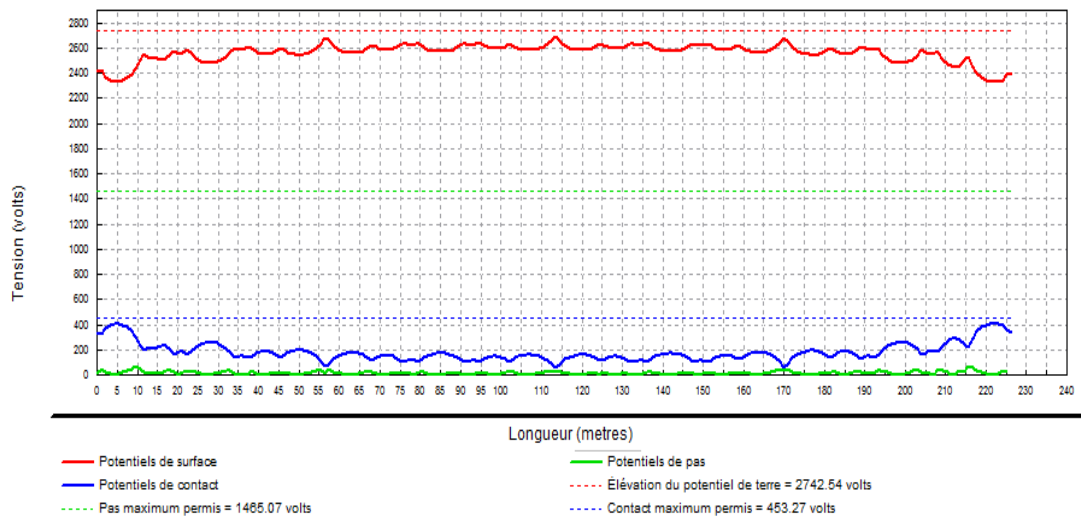


Figure IV.14 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

IV.4.2.3. Optimisation par la technique d'Algorithme ABC modifié

Les variations de la fonction fitness moyenne et de celle de coût en fonction du nombre d'itérations sont illustrées sur les figures (IV.15) et (IV.16) respectivement. Lorsque le nombre d'itérations est accru, la fitness moyenne augmente brusquement au moment où le coût diminue rapidement, puis lentement en atteignant un palier constant. Après 750 itérations, l'optimum global du coût de 10.189.349,51 DA est atteint.

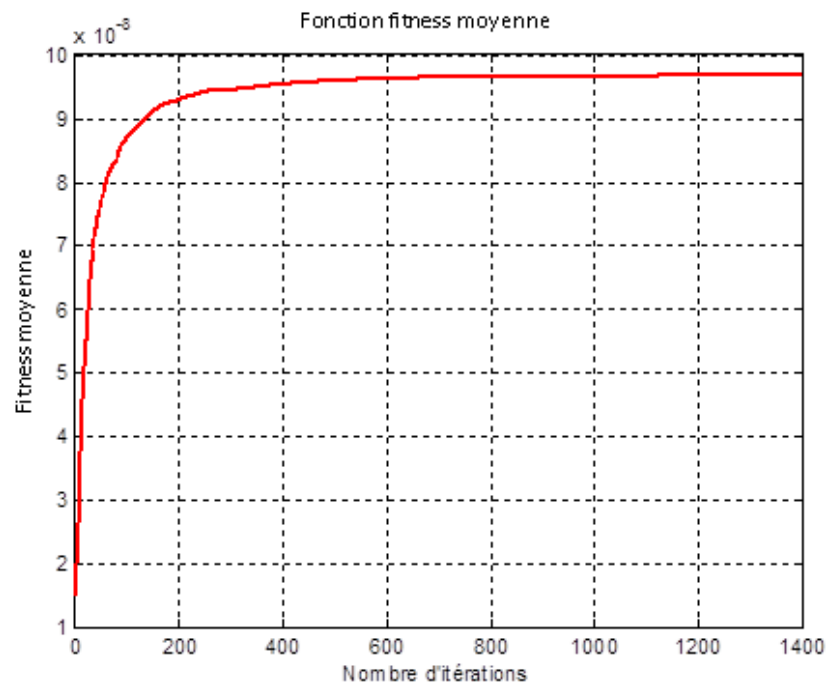


Figure IV.15 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations

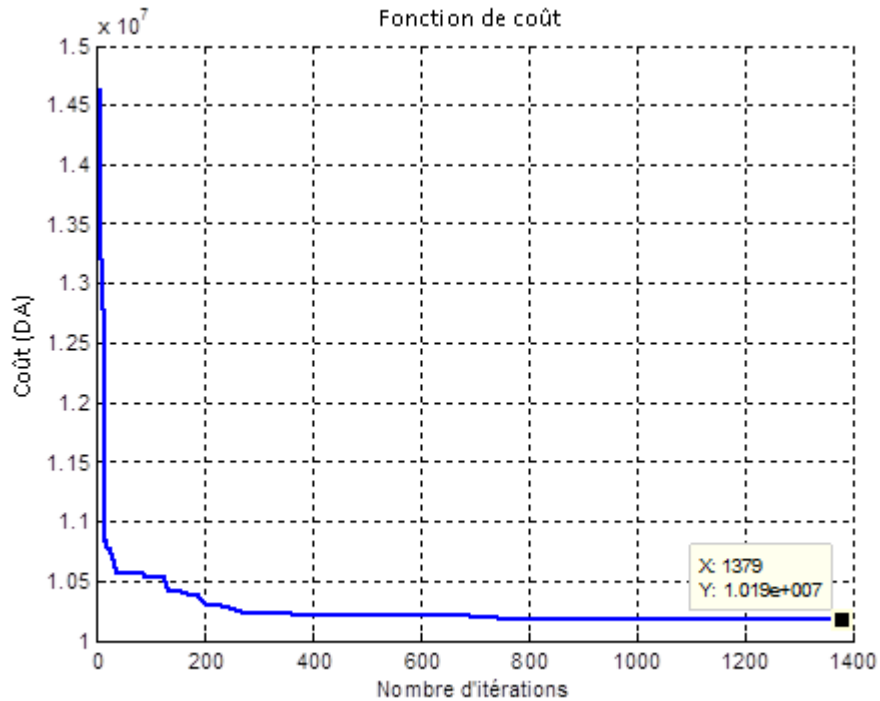


Figure IV.16 : Coût en fonction du nombre itérations

Les différentes paramètres obtenaient par l'algorithme abc modifié sont présentés dans le tableau suivant :

Le nombre des piquets	126
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe x	21
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe y	13
La longueur du piquet (m)	3,0462
Le diamètre des conducteurs et des piquets (mm)	10,51
L'épaisseur de la couche superficielle (cm)	8
Le temps de calcul (s)	3,9
Le coût de l'installation (DA)	10.189.349,51

Tableau IV.13 : Valeurs optimales obtenues par l'optimisation ABC modifié

Les paramètres électriques obtenus ainsi obtenus par l'algorithme ABC modifié et présentés dans le tableau (IV.14), montre que le système est sécurisé, puisque les deux tensions de pas et de maille sont au-dessous des valeurs admissibles.

Facteur de réduction	0,6461
Tension de contact admissible (V)	453,26
Tension de pas admissible (V)	1465,07
Le courant maximum circulant dans la grille (A)	18900
Résistance de la grille (Ω)	0,1500
Élévation du potentiel de terre EPT (V)	2835,0
Tension de maille E_t (V)	407,94
Tension de pas E_p (V)	262,432

Tableau IV.14 : Paramètres électriques optimaux obtenus par ABC modifié

IV.4.2.4. Validation des résultats obtenus par ABC modifié en utilisant CYMGrd

Le tableau (IV.15) présente les paramètres électriques trouvés en utilisant le code de calcul CYMGrd. Nous remarquons que les valeurs relatives aux paramètres électriques optimaux obtenues en utilisant notre algorithme ABC modifié et le code de calcul CYMGrd sont proches. Ceci est en faveur du programme relatif à ABC modifié que nous avons développé.

Le facteur de réduction	0,646107
La tension de contact admissible (V)	453,27
La tension de pas admissible (V)	1465,07
Le courant maximum s'écoulant dans la grille (A)	18900
La résistance de la grille (Ω)	0,143198
L'élévation du potentiel de terre EPT (V)	2742,09
Le potentiel de surface (V)	2685,18
La tension de maille E_t (V)	408,56
La tension de pas E_p (V)	70,86

Tableau IV.15 : Valeurs optimales paramètres électriques obtenus par ABC modifié

Tenant compte des paramètres électriques trouvés, CYMGrd permet l'obtention du diagramme de contour relatif à la tension de contact en 3D (Figure IV.17) ainsi que les diagrammes de profils des tensions de pas et de contact (Figure IV.18). Il est clair qu'à partir de ces résultats que notre grille correspondant au système de terre optimisé du poste de transformation 60/30 kV de Ain El-Melh est sécurisé puisque (i) les tensions de pas et de contact sont inférieures à celles maximales admissibles, (ii) le diagramme de profil des potentiels de pas et de contact ne présente aucun dépassement.

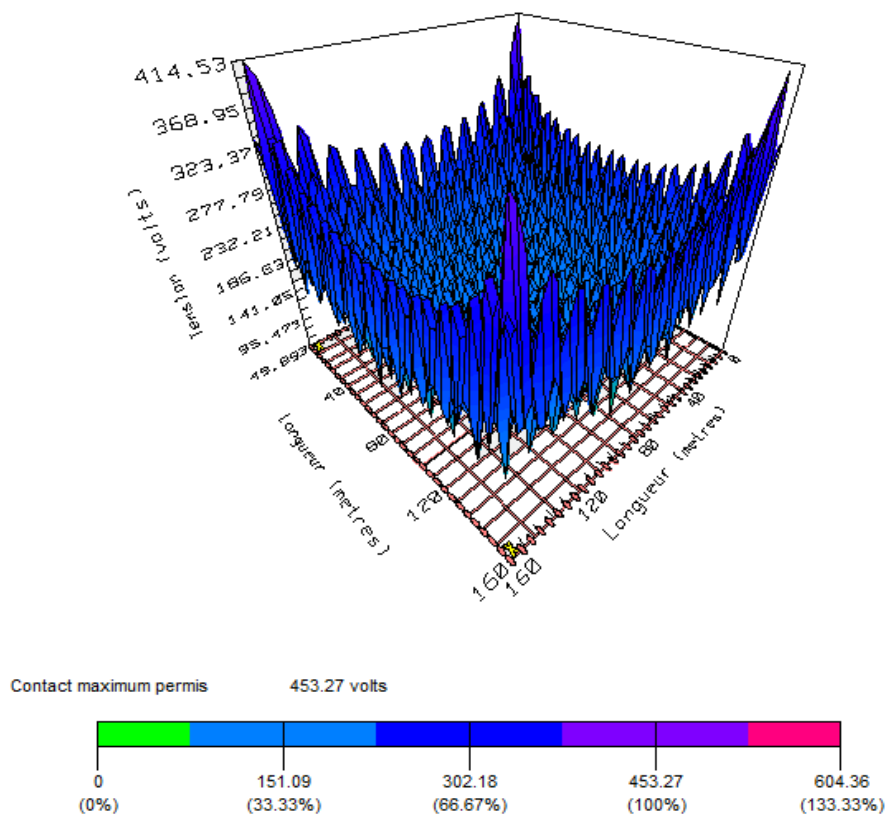


Figure IV.17 : Diagramme de contour de potentiel de contact

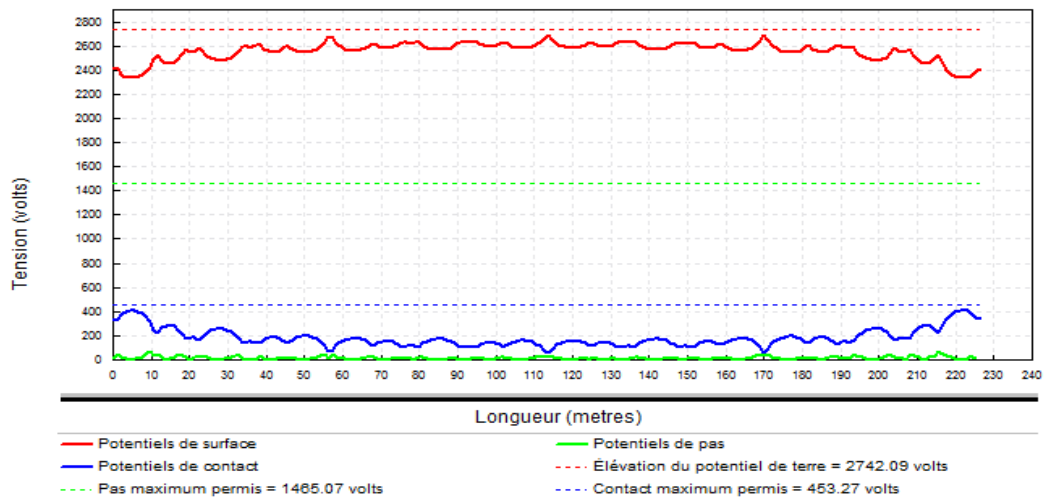


Figure IV.18 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

IV.5. Comparaison aux résultats d'optimisation obtenus antérieurement

Dans cette section, nous allons comparer les résultats que nous avons obtenus à ceux obtenus trouvés par Bendekkiche et Kemari [BEN 13] utilisant les techniques d'algorithme génétique et essaim particulaire. Ces techniques ont été appliquées sur les mêmes systèmes de mise à la terre et utilisant la même fonction de coût.

Le tableau (IV.16) illustre les résultats obtenus utilisant les différentes techniques d'optimisation (ABC de base, ABC modifiée, AG et EP) appliquées sur le système de mise à la terre de l'ouvrage énergétique de Labreg.

Techniques	ABC de base	ABC modifiée	AG	EP
Coût (DA)	28.968.969,78	28.969.023,19	33.730.043,26	32.018.616,94
Nombre d'itérations	400	100	800	800
Temps d'exécution	0,66	0,36	27,15	14,39

Tableau IV.16 : Résultats des techniques appliquées relatifs au système de terre de l'Ouvrage énergétique de Labreg

D'après les résultats exposés le coût de construction que nous avons trouvé (28.968.969,78 DA) est plus faible de (4.761.019 DA) que ceux obtenus par la technique AG et de (3.049.592 DA) que celle de EP. Nous avons réduit les coûts de AG de plus de 14%, et celui de EP de plus de 9.5%. Par ailleurs, le temps de calcul a été diminué de plus de 97% et le nombre d'itérations de 87%.

Sur la figure (IV.19), est illustrée l'évolution du coût de construction du système optimisé de l'ouvrage énergétique de Labreg, en fonction du nombre d'itérations et ce pour toutes les techniques précédemment citées (ABC de base, ABC modifiée, AG et EP).

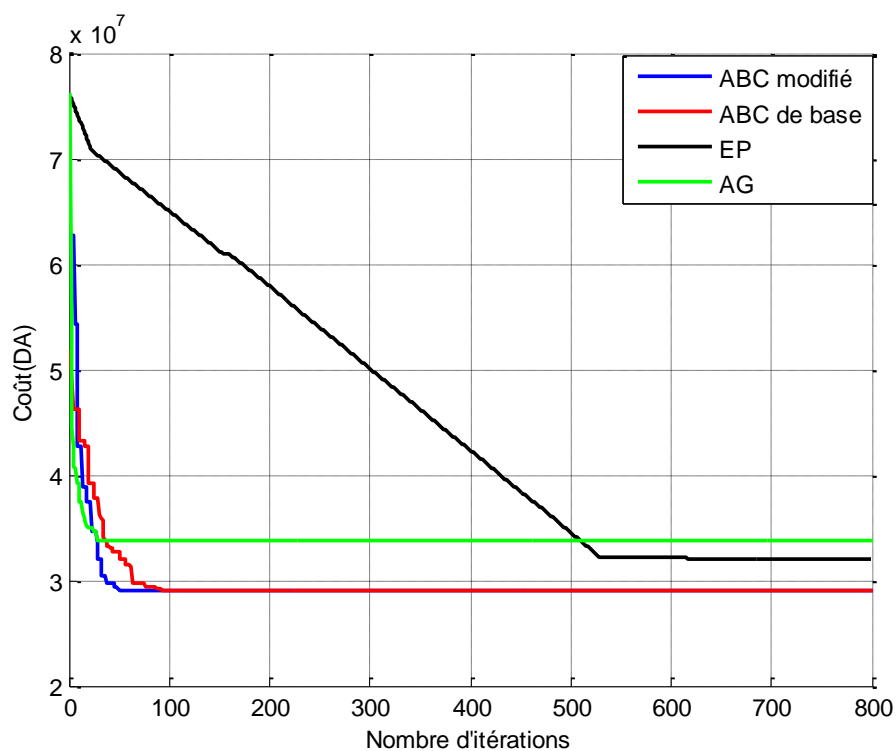


Figure IV.19 : Coût de construction du système optimisé de l'ouvrage énergétique de Labreg, en fonction du nombre d'itérations et ce pour toutes les techniques

Nous avons remarqué que la technique ABC modifiée converge plus rapidement que celle de ABC de base.

Le tableau (IV.17) suivant illustre les résultats relatifs au coût, nombre d'itérations et temps d'exécution obtenus en utilisant les différentes techniques d'optimisation appliquées sur le système de mise à la terre du poste de transformation 60 /30 kV de Ain El-Melh.

Techniques	ABC de base	ABC modifié	AG	EP
Coût (DA)	10.189.346,33	10.189.349,51	14.804.774,14	15.034.697,94
Nombre d'itérations	5000	1400	800	800
Temps d'exécution	6,83	3,9	24,46	15,30

Tableau IV.17 : Coût, nombre d'itérations et temps d'exécution obtenus en utilisant les différentes techniques d'optimisation

Les résultats obtenus sont en faveur de notre technique utilisant ABC modifié présentant un coût relatif au système de terre relatif au poste de transformation 60/30 kV de Ain El-Melh, de 10.189.349,51 DA, contre 14.804.774,14 DA et 15.034.697,94 DA obtenus respectivement par les techniques de AG et EP.

Il est à noter que la technique de ABC basique donne un coût très proche à celui présenté par ABC modifié. La rapidité des techniques est établie suivant l'ordre suivant, ABC modifié, ABC basique, EP, puis AG ayant un temps d'exécution de 3,9 ; 6,83 ; 15,30 et 24,46 secondes respectivement.

L'inconvénient majeur des techniques ABC basique et ABC modifié est qu'elles nécessitent un nombre important d'itérations pour trouver l'optimum global (5000 et 1400 contre 800 itérations pour EP et AG).

D'après ce dernier tableau les résultats exposés le coût de construction que nous avons trouvé (10.189.349,51DA) est plus faible que ceux obtenus par la technique AG de (14.804.774,14 DA) et celle de EP de (15.034.697,94 DA). Nous avons réduit les coûts de AG de plus de 31%, et celui de EP de plus de 32%. Par ailleurs, le temps de calcul a été diminué de plus de 74.5%.

La variation de la fonction de coût en fonction du nombre d'itérations, pour toutes les techniques précédemment citées (ABC de base, ABC modifiée, AG et EP) est présentée sur la figure (IV.20). Ces courbes confirment nos propos relatifs aux coûts de construction du système optimisé du poste de transformation de Ain El-Melh, précédemment évoqués.

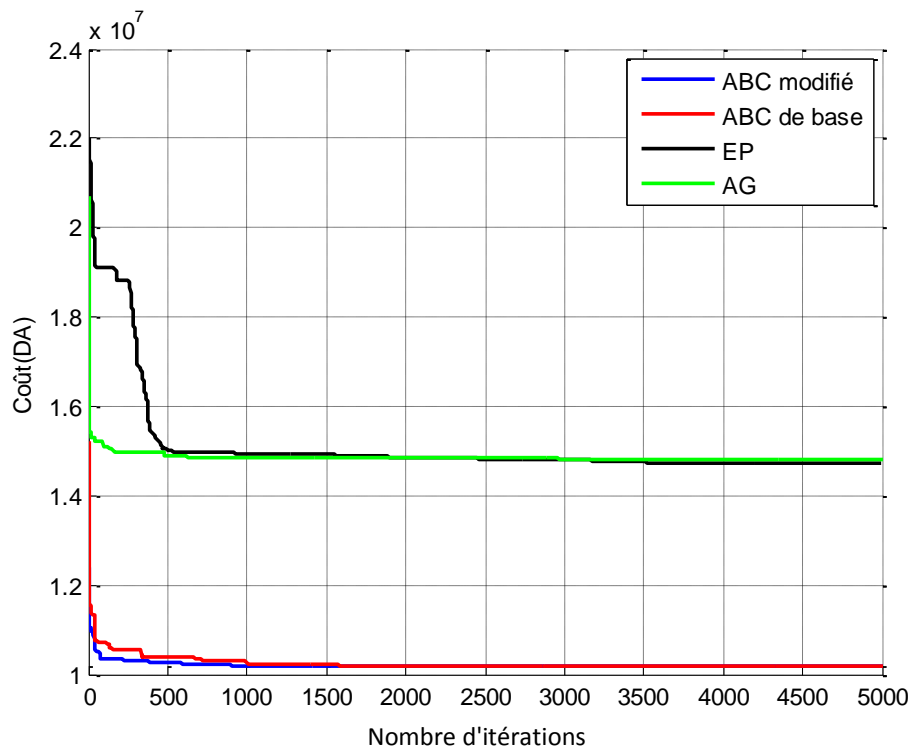


Figure IV.20 : Figure comparative entre les différentes courbes de cout du poste de transformation de Ain El-Melh

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons optimisé deux systèmes par deux algorithmes basés sur la technique de colonie d'abeilles artificielles. Il ressort de cette étude les conclusions suivantes :

- l'algorithme ABC modifié est plus rapide que l'algorithme ABC de base.
- l'algorithme ABC de base est plus robuste que l'algorithme ABC modifié. Cette robustesse est due à l'exploitation intensive des solutions.
- L'algorithme ABC explore plus d'espace de recherche que les algorithmes AG et EP.

- L'algorithme ABC est plus rapide que les algorithmes AG et EP.
- La technique ABC donne des résultats plus proches de l'optimum global (concernant les systèmes étudiés) que les techniques AG et EP.
- L'algorithme ABC modifié met moins de temps pour trouver la configuration optimale.
- La fitness moyenne de la technique ABC est toujours meilleure que la fitness moyenne précédente, ce qui résulte un avancement vers l'optimum global plus stable et plus rapide.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail, consiste à optimiser les systèmes de mise à la terre des deux ouvrages électriques algériens. Il s'agit de l'ouvrage énergétique de Labreg et du poste de transformation 60/30 kV de Ain El-Melh. Pour cela, deux algorithmes, de base et modifié, fondés à partir des Colonies d'Abeilles Artificielles (Artificial Bee Colonies, ABC) ont été développés. Une telle optimisation a été effectuée en minimisant la fonction objectif de coût, incluant le nombre et la longueur des conducteurs parallèles et verticaux, le diamètre des conducteurs, l'épaisseur de la couche superficielle, les contraintes sur les tensions de pas et de contact ainsi que l'espacement entre les électrodes. Les contraintes ont été introduites dans la fonction objectif en termes de pénalité.

Les résultats relatifs aux principaux paramètres électriques ainsi obtenus ont été confrontés à ceux trouvés en utilisant le code de calcul CYMGrd. Une très bonne concordance a été obtenue. Par ailleurs, les systèmes que nous avons optimisés sont largement sécurisés. Cela est la conséquence directe du fait que les tensions de contact et de pas estimées en appliquant les techniques ABC, sont inférieures aux tensions maximales admissibles respectives calculées en utilisant les expressions recommandées par la norme IEEE 80-2000.

Quant au temps d'exécution, l'algorithme ABC modifié prend un temps presque deux fois moins par rapport à celui de base pour atteindre le même optimum. Ceci est évident vu que la technique modifiée était conçue pour des problèmes avec contraintes, en plus cette technique possède un facteur d'échelle auto-adaptable (ASF) qui permet d'accélérer la recherche.

La comparaison entre la technique ABC et les techniques AG et EP, en matière de coût et temps d'exécution, a permis de distinguer d'une façon très claire la performance et l'efficacité des algorithmes ABC basique et modifié dans la recherche de l'optimum global.

Perspectives

En perspective, nous envisagerons l'étude du :

- Optimisation des systèmes de mise à la terre par des algorithmes hybrides.
- Utilisation d'autres types d'algorithmes méta-heuristiques pour l'optimisation des réseaux de terre.
- Application des méthodes semi-analytiques (Eléments finis) dans la simulation des systèmes de mise à la terre.
- Comportement des systèmes de mise à la terre en HF.

Bibliographies

[AKA 10] Akay B., Karaboga D., « A modified Artificial Bee Colony algorithm for real-parameter optimization », Inform. Sci. (2010), doi: 10.1016/j.ins.2010.07.015.

[BEN 03] Bensoam M., « Qualité de la prise de terre et sécurité des personnes », Cours, Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, octobre 2003.

[BEN 07] Benabid R., « Optimisation Multi-objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Magister, Département Génie Electrique, Université de Laghouat, 2007, Algérie.

[BEN 13] BENDEKKICHE N. et KEMARI Y., « Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Mise à la Terre par Algorithme Génétique & Essaim Particulaire », PFE, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2013, Algérie.

[BON 07] Bonte, M. H. A., Boogaard, A. H. Van den et Huétink, and J. « A metamodel based optimisation algorithm for metal forming processes », [éd.] Banabic D. Advanced methods in material forming. pp. 55-72, 2007.

[BON 08] Bonte, M. H. A., Boogaard, A. H. Van den et Huétink, and J. « An optimisation strategy for industrial metal forming processes : Modelling, screening and solving of optimisation problems in metal forming », Structural and Multidisciplinary optimization, , Vol. 35, pp. 571–586, 2008.

[BON 08] Bonnefoy M. & Lepeut P., « Risques Physiques : Les Schémas de Liaisons à la Terre ou Les régimes des neutres », 2008,
www.cnam.fr/physique/.../LES_REGIMES_DES_NEUTRES_2008_JJB.pdf

[BOU 93] Bouyssou B., Roy D., « Aide multicritère à la décision : méthodes et cas ». Economica, 1993.

[BUL] Bulletin 1724E-300.

[CHA 10] Chauvin Arnoux Group, « Guide de la Mesure de Terre : Contrôleurs de Terre et/ou de Résistivité », Catalogue de produits, Première édition 2010. Site internet : www.chauvin-arnoux.fr

[CEI 02] CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Electrical installations of buildings-Part 5 :Selection and erection of electrical equipement – chapitre 54 : Earthing arrangements and protective conductors», CEI 60364-5-54, 2ème édition 2002-06.

[CEI 06] CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Protection Contre la Foudre- Partie 1: Principes Généraux », CEI 62305-01, Première édition 2006-01.

[CHO 98] Chou C., « Optimal design of large grounding grids based on simulated annealing method », Chung Yuan Journal, 26, (3), pp.77-85, 1998.

- [CHO 06] Chouteau M. & Giroux B., « Géophysique appliquée II : Méthodes électriques », Notes de cours, Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 148, 2006.
- [COL 02] Collette Y., Siarry P., Optimisation multi-objectif. [éd.] Eyrolles. 2212111681.
- [COV 05] Covitti A., Delvecchio G., Fusco A., Lerariand F., Neri F., « Two Cascade Genetic Algorithms to Optimize Unequally Spaced Grounding Grids with Rods » Proc. Int.Conf.Computer as a Tool, EUROCON, 2, pp.1533-1536, Nov.2005, Belgrade, Serbia & Montenegro.
- [CYM 06] CYMGRD 6.3, « User's Guide And Reference Manual », Manuel d'utilisation, Copyright CYME International T&D Inc., Octobre 2006.
- [DAV 08] David G., Yinyu Y., « Linear and Nonlinear Programming » (Springer Science Press, 2008, 2nd edition).
- [DAW 79] Dawalibi F., Mukhedkar D., « Parametric analysis of grounding grids », IEEE Trans. PAS, Oct. 1979, 98, (5), pp. 1659-1668.
- [DRO 03] J. Dréo, A. Pérowski, P. Siarry, and E. Taillard. « Méta-heuristiques pour l'Optimisation Difficile », Eyrolles, 2003.
- [EDF 59] EDF (Electricité De France), « La mise à la terre du neutre des réseaux MT aériens et souterrains », Electricité de France, Centre de Normalisation, H 80, Avril 1959.
- [EDF 84] EDF (Electricité De France), « Principes de conception et de réalisation des mises à la terre », Electricité de France, Centre de Normalisation, H 115, Janvier 1984.
- [ELD 12] El Dor A., « Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d'images et en électronique », Thèse de doctorat, ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES ET STIC, UNIVERSITÉ PARIS-EST, 2012, France.
- [EJD 11] Ejday M., « Optimisation Multi-Objectifs à base de Métamodèle pour les procédés de mise en forme ». Thèse de doctorat, École des MINES ParisTech, p. 136, 2011, France.
- [FRA 10] FRANK D. PETRUZELLA, « Electric Motors and Control Systems », higher education, first edition, 2010.
- [GAR 11] Gary Gilbert, « High Voltage Grounding Systems, 2011 », Thèse de Doctorat en Philosophie dans l'engineering en électricité et programmation, Waterloo, Ontario, Canada, 2011.
- [GIO 85] Giordano R., Mark D. A., Rotkowski C. J., Schalland B., Sommer K. O., «Computer assisted design of substation grounding », IEEE Trans. PAS, Jul.1985, 104, (7), pp. 1864-1867.

Bibliographies

[GHO 07] Ghoneim S., Hirsch H., Elmorshedy A., Amer R., « Optimum grounding grid design by using an evolutionary algorithm », IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp.1-7, 2007.

[GEO 01] Georges S., « Evaluation de l'Effet de la Mer et du Contrepoids sur le Profil de la Tension d'un Système de Mise à la Terre d'une Ligne de Transport d'Energie à Haute Tension dans un Sol Résistif », Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Septembre 2001.

[GLO 86] Glover F., « Future paths for integer programming and links to artificial intelligence». Computers and Operations Research, Vol. 13, pp. 533–549, 1986.

[HAJ 03] Hajji O., « Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception n des dispositifs électrotechniques », thèse de Doctorat, Laboratoire L2EP, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2003.

[HAN 12] Hanane N.H., « Conception d'un Classifieur Foul Utilisant Colonie D'abeille Pour Diagnostic Médical », UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID, FACULTÉ DE SCIENCE, DÉPARTEMENT INFORMATIQUE, PFE, 2012.

[HAR] Harun Y., <http://jlpetitlaurent.free.fr/abeille/>, <http://lerucherdulac.free.fr>

[HAR 10] HarbadjiW., « Optimisation de l'écoulement de puissance environnemental par la méthode du algorithme Génétique », PFE, Département Génie Electrique, Université de Sétif, 2010, Algérie.

[IEE 00] IEEE Standard 80-2000, « IEEE guide for safety in AC substation grounding », Revision of IEEE Std 80-1986, New York, USA, 2000.

[KAR 07] Karaboga D., Basturk B., « A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm », J. Global Optimization, Vol. 39, pp. 459-471, 2007.

[KAR 10] Karaboga D., Akay B., « A modified Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems », Erciyes University, The Department of Computer Engineering, 38039 Melikgazi, Kayseri, Turkiye, 2010.

[KEN 95] Kennedy J. and Eberhart R. C., « Particle Swarm Optimization ». In : Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV, pp. 1942–1948, Perth, November 1995, Australia.

[KHA 10] Khan L., IkramUllah, Saeed T., « Virtual Bees Algorithm Based Design of Damping Control System for TCSC », Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 4, no. 1, pp. 1-18, 2010 .

[KLA 07] Klajn A. & Markiewicz H., « Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre », Leonardo Energy, France, Août 2007. www.leonardo-energy.org

Bibliographies

- [LEE 08] Lee K. Y., El-Sharkawi M. A., « Modern heuristic optimization techniques with applications to power systems », IEEE Power Engineering Society (Wiley-IEEE Press, New York, 2008, USA).
- [LEE 09] Lee C. Y., Shen Y. X., « Optimal planning of ground grid based on particle swarm algorithm », World Academy of Sci. Eng. and Technol., 36, pp. 30-37, 2009.
- [LEF 07] Lefouili M., « Caractérisation Numérique d'une Prise de Terre à Géométrie Complexes », Thèse de Doctorat, Département d'Electrotechnique, Université de Ferhat Abbas, Setif, Juillet 2007.
- [MEZ 10] Mezhoudi H.E., « Résolution du problème d'affectation de fréquence dynamique en utilisant un algorithme basé sur le comportement des abeilles », 2010.
- [MEZU 10] Mezura-Montes E., Damián-Araoz M., and Cetina-Domínguez O., « Smart Flight and Dynamic Tolerances in the Artificial Bee Colony for Constrained Optimization », Sep. 2010.
- [MOU 12] Mouassa S., « Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode méta-heuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS », Magister, Département Génie Electrique, UNIVERSITE Ferhat ABBAS SETIF, 2012, Algérie.
- [NEZ 13] Nezhad N. K., Fallahi M. H., Dozein M. G., « An optimal design of substation grounding grid considering economic aspects using particle swarm optimization », Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., 6, (12), pp. 2159-2165, 2013.
- [NUZ 09] Nzuru N. J. P., « Contribution à l'Analyse et à la Réalisation des Mises à la Terre des Installations Electriques dans les Régions Tropicales », Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009.
- [NZU 09] Nzuru N. J. P., « Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales ». Ph.D. Thesis, Belgique, Liège University, Février, 2009.
- [OTH 98] Othmani I., « Optimisation multicritère : fondements et concepts », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenobles. p. 118, 1998, Grenoble.
- [PIE 14] PIERRAT, L., « Performance Assessment And Modeling Of Grounding Grid », Université Bulletin-ISSUE No.16- Vol. (1), Février, 2014.
- [PRE 05] Prévé C., « Les Réseaux Electriques Industriels1 », Hermes Science, Lavoisier, ISBN 2-7462- 1102-5, Paris, 2005.
- [RAO 09] Rao S., « Engineering Optimization: Theory and Practice » (Singiresu Press, Inc Copyright © 2009, 4nd edition).
- [ROY 10] Roya S., Hesamedin S. H., Moini R., « A Hybrid Genetic- Simulated Annealing Algorithm for Optimal Design of Grounding Grids with Rods », IEEE Trans. PAS, Jul. 2010, 49, (4), pp. 1883-1889.

Bibliographies

[SAA 10] Saab M. S., El-Omari N. K. T., Owaied H. H., « DEVELOPING OPTIMIZATION ALGORITHM USING ARTIFICIAL BEE COLONY SYSTEM », Ubiquitous Computing and Communication Journal, Vol. 4, no 5, p. 16, 2010.

[SAU 91] Sautriau F., « Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension », Cahier Technique Merlin Gerin n° 62, édition septembre 1991.

[SCH 08] Schneider Electric Industries, « Protection des réseaux électriques : Guide de la protection », ART.065191, France, première édition, 2008. Site internet : www.schneider-electric.com

[SLI 09] Slimani L., « Contribution à l'application de l'optimisation par des méthodes méta-heuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité dérégulé », Thèse de Doctorat, Département Génie Electrique, UNIVERSITE Ferhat ABBAS SETIF, 2009, Algérie.

[STO 97] Storn R. and Price K., « Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces ». Journal of Global Optimization, Vol. 11, No. 4, pp. 341–359, 1997.

[TAY 08] Taylor & Francis Group, LLC, « Substation Grounding Design Considerations », 2008.

[TEO 05] Teodorovic D., « Bee Colony Optimization (BCO) », University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, Serbia, 2005.

[UND 12] Unde M. G., Kushare B. E., « Grounding grid performance of substation in two layer soil – a parametric analysis », International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies (IJESET), 1, (2), pp. 69-76, 2012.

[YAH 07] YAHYA H., « The Miracle of the honeybee », G. M. D. Cd., Ed. Okmeydani-Istanbul-Turkey, March 2007.

[YIM 09] Yi-min Y., Min-fang P., Hai-Tao and H., Yue-Hua Y., « Optimal Design of Grounding Grids Based on Genetic Algorithm », Proc. Int. Conf. Genetic and Evolutionary, pp. 129-132, Oct.2009, Guilin, Chine.

[ZGA 07] Zgaya H., « Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine : Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des services liés au transport », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille. p. 240, 2007, France.