

Département d'Electrotechnique
Laboratoire de recherche en Electrotechnique

Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
HAMADI Mohamed

Intitulé

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

Directeur du mémoire :

M.TEGUAR

Professeur

ENP

Jury :

A. BOUBAKEUR (Président)

Professeur

ENP

A. MEKHALDI

Professeur

ENP

R.TAHMI

Professeur

ENP

Promotion : Juin 2014

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger. Algérie.

Remerciements

Nos remerciements et gratitude 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 gratitude 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, Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur R.TAHMI, 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.....	vii
Liste Des Tableaux.....	ix
Résumé.....	x
Introduction générale.....	1
I. Généralités sur la mise à la terre et conception selon la norme IEEE 80-2000	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Mise à la terre.....	5
I.3. Terre de référence.....	5
I.4. Masse.....	6
I.5. Conducteur de terre.....	6
I.6. Elévation du potentielle de terre.....	7
I.7. Tension de contact.....	7
I.8. Tension de pas.....	7
I.9. Tension de maille.....	8
I.10. Tension transféré.....	8
I.11. Résistivité.....	9
I.12. Mesure de la résistivité du sol.....	9
I.12.1. Méthode de Wenner.....	10
I.12.2. Méthode de Schlumberger.....	10
I.12.3. Méthode de mesure à trois pôles.....	11
I.13. Régimes de neutre.....	12
I.13.1. Schémas de liaison à la terre en basse tension.....	12

I.13.2. Mise à la terre par neutre isolé.....	15
I.13.3. Mise à la terre directe.....	15
I.13.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance.....	15
I.13.5. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance.....	15
I.14. Résistances des configurations de mise à la terre les plus utilisées.....	15
I.15. Conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80- 2000	
I.15.1. Etape 1 : Détermination de la résistivité.....	16
I.15.2. Etape 2 : Dimensionnement des conducteurs.....	17
I.15.3. Etape 3 : Tensions de contact et de pas maximales admissibles.....	18
I.15.4. Etape 4 : La conception initiale.....	19
I.15.5. Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille.....	19
I.15.6. Etape 6 : Courant maximum I_G de la grille.....	20
I.16.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT).....	21
I.17.8. Etape 8 : Tensions de maille et de pas.....	21
I.15.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre E_t et E_{t50} et entre E_p et E_{Step50}	23
I.15.10. Etape 11 : Amélioration de la configuration initiale.....	23
I.15.11. Etape 12 : configuration final.....	23
I.16. Conclusion.....	24
II. Optimisation Méta-heuristiques et Colonie d'Abeilles Artificielles	
II.1. Introduction.....	25
II.2. Optimisation.....	25

II.2.1. Optimisation mono-objectif	26
II.2.2. Classification des problèmes d'optimisation	26
II.3. Méthodes d'optimisation approchées.....	27
II.3.1. Méthodes Heuristiques.....	28
II.3.2. Méthodes Méta-heuristiques.....	28
II.3.3. Principe de voisinage.....	29
II.4. Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielles (ABC).....	29
II.4.1. Historique de l'algorithme ABC.....	29
II.4.2. Principe général de l'algorithme ABC.....	30
II.4.2.1. Production initiale des sources de nourriture.....	31
II.4.2.2. Envoi des abeilles employées aux sites.....	31
II.4.2.3. Calcul de probabilité.....	32
II.4.2.4. Choix de la source à améliorer par les spectatrices.....	32
II.4.2.5. Critère pour abandonner une source : Limite et production de scoute.....	33
II.4.3. Paramètres de l'algorithme ABC.....	33
II.4.4. Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles Modifié.....	34
II.4.4.1. Fréquence de perturbation.....	34
II.4.4.2. Ampleur de perturbation.....	35
II.4.4.3. Choix de la solution.....	36
II.4.5. Etapes de l'algorithme ABC.....	36
II.4.6. Caractéristiques de l'algorithme ABC.....	39
II.5. Conclusion.....	39

III. Applications et comparaison	
III.1. Introduction	40
III.2. Code de calcul CYMGrd	40
III.3 Optimisation par colonie d’abeilles artificielles	40
III.3.1. Fonction objectif	41
III.3.2. Gestion des contraintes	42
III.3.3. Fonction fitness	43
III.3.4. Taille de la population	43
III.3.5. Nombre d'itérations	43
III.4. Applications et validation	44
III.4.1. Ouvrage énergétique de Labreg	44
III.4.1.1. Résultats obtenus par la technique ABC modifiée	45
III.4.1.2. Validation en utilisant CYMGrd	48
III.4.2. Poste de transformation 60 /30 kV de Ain El-Melh	51
III.4.2.1. Optimisation par la technique ABC modifiée	52
III.4.2.2. Validation des résultats obtenus par ABC en utilisant CYMGrd	55
III.5. Comparaison aux résultats d'optimisation obtenus antérieurement	57
III.6. Conclusion	60
Conclusion générale	61
Perspective	62
Bibliographie	63

Liste Des Figures

Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets).....	6
Figure I.2 : Tension de contact.....	7
Figure I.3: Tension de pas.....	8
Figure I.4 : Représentation des différentes tensions de sécurité.....	8
Figure I.5 : Schéma du montage de la méthode de Wenner.....	10
Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger.....	11
Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles.....	12
Figure I.9 : Schéma de liaison à la terre en basse tension TT.....	13
Figure I.10 : Schéma de liaison à la terre en basse tension IT.....	14
Figure I.11.a : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-C.....	14
Figure I.11.b : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-S.....	14
Figure I.12 : Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000.....	24
Figure II.1: Méthodes d'optimisation mono-objectif	27
Figure II.2 : Organigramme pour l'algorithme ABC	38
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.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations.....	46
Figure III.2 : Courbe de convergence du coût.....	46
Figure III.3 : Topologie de la grille selon ABC modifié.....	48
Figure III.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D.....	49
Figure III.5 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	50
Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	50
Figure III.7 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations.....	52
Figure III.8 : Courbe de convergence du coût.....	53
Figure III.9 : Topologie de la grille selon ABC modifié.....	54
Figure III.10 : Topologie de la grille en 3D.....	56
Figure III.11 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	56
Figure III.12 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	57
Figure III.13 : Coût de construction du système optimisé de l'ouvrage énergétique de Labreg, en fonction du nombre d'itérations et ce pour toutes les technique.....	58
Figure III.14 : Figure comparative entre les différentes courbes de cout du poste de transformation de Ain El-Melh	60

Liste Des Tableaux

Tableau I.1 : Signification des lettres des différentes configurations	13
Tableau I.2 : Types et caractéristiques des matériaux des électrodes de terre	18
Tableau III.1: Intervalles de variation des paramètres.....	42
Tableau III.2 : Coûts unitaires des principaux matériaux de mise à la terre.....	42
Tableau III.3 : Données à introduire dans le programme développé.....	45
Tableau III.4 : Paramètres optimaux obtenus par le biais de l’algorithme ABC modifié.....	47
Tableau III.5 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus à travers l’algorithme ABC modifié.....	48
Tableau III.6 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd.....	49
Tableau III.7 : Données du poste de transformation de Ain El-Melh.....	51
Tableau III.8 : Paramètres optimaux selon ABC modifié.....	53
Tableau III.9 : Paramètres électriques optimaux obtenus par ABC modifié.....	54
Tableau III.10 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd.....	55
Tableau III.11 : Résultats des techniques appliquées relatifs au système de terre de l’Ouvrage énergétique de Labreg.....	57
Tableau III.12 : Coût, nombre d’itérations et temps d’exécution obtenus en utilisant les différentes techniques d’optimisation Paramètres électriques optimaux obtenus par ABC modifié.....	59

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 Modifié)، 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 de Mémoire de Master, 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 une technique d'optimisation basées sur le comportement des abeilles, la technique Colonie d'Abeilles Artificielles Modifiée. L'implémentation des programmes basés sur cette technique 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 Modifié, Fonction objectif, Réseau de terre, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grille, Piquets.

Abstract

Within the thesis of Master, 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 an optimization technique based on behavior of bees, the artificial bee colony modified. The implementation of programs based on this technique 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, A modified 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 d'industrie [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.

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.

Divers chercheurs utilisant l'optimisation par essaim particulière (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 mémoire de Master, 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, un algorithme basé sur les Colonies d'Abeilles Artificielles (Artificial Bee Colony, ABC). Une telle technique a prouvé son efficacité dans beaucoup d'applications dans différents domaines [TEO 05]. En effet, un algorithme ABC modifié, a été développé. 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 trois 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, la classification des problèmes d'optimisation, ...). Les différentes méthodes d'optimisation approchées, plus particulièrement les techniques méta-heuristiques, ainsi que leurs caractéristiques. Nous présentons également dans ce chapitre l'algorithme d'optimisation Colonie d'Abeilles Artificielles modifié (Modified Artificial Bee Colony "ABC"), développés dans cette étude, d'une façon détaillée.

Le troisième et le dernier chapitre est consacré à l'application de la technique d'optimisation colonies d'abeilles artificielles modifiée sur l'ouvrage énergétique de Labreg et le poste de Ain El-Melh que nous avons considérés. 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 N.Bendikkiche et Y.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].

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. 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.3. 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.4. 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.5. 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].

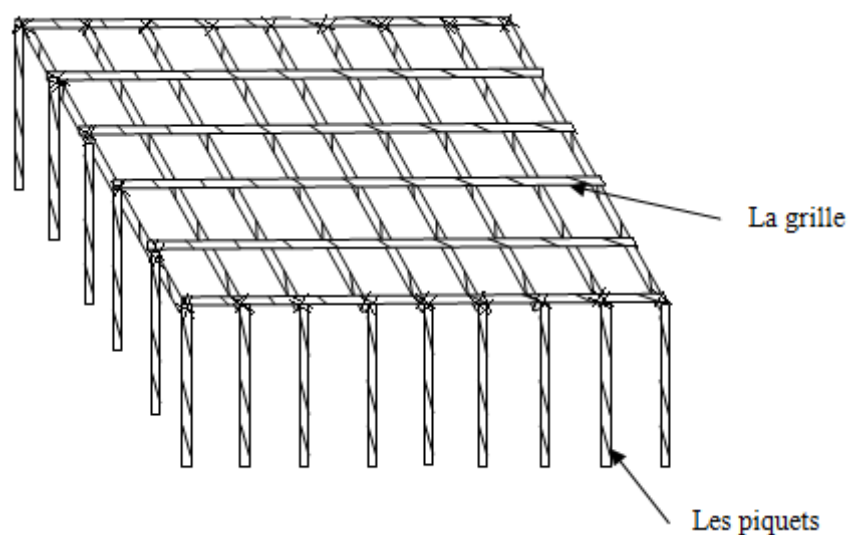


Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets)

I.6. 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.7. 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].

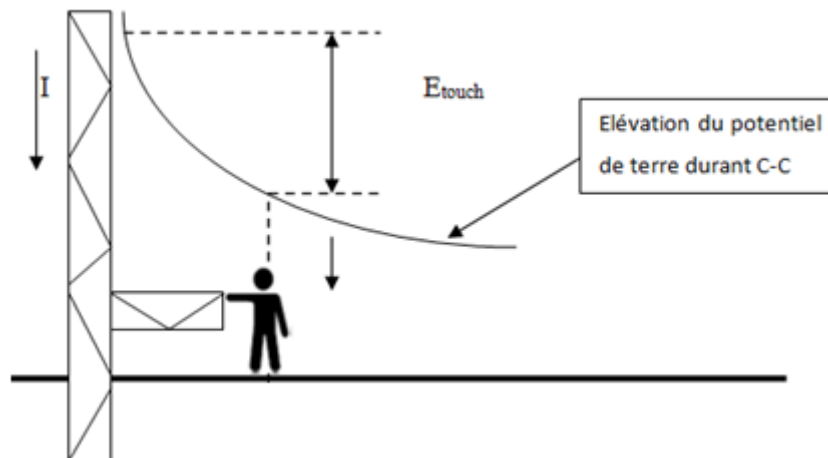


Figure I.2 : Tension de contact

I.8. 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].

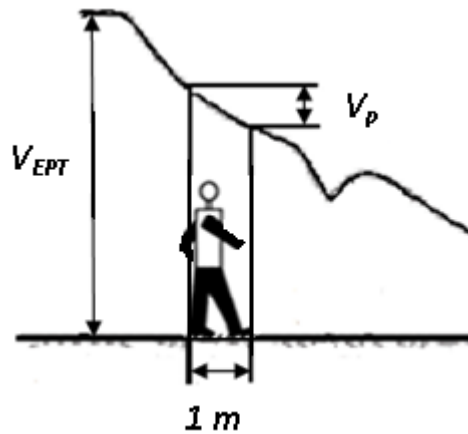


Figure I.3: Tension de pas

I.9. 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.10. Tension transférée

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) :

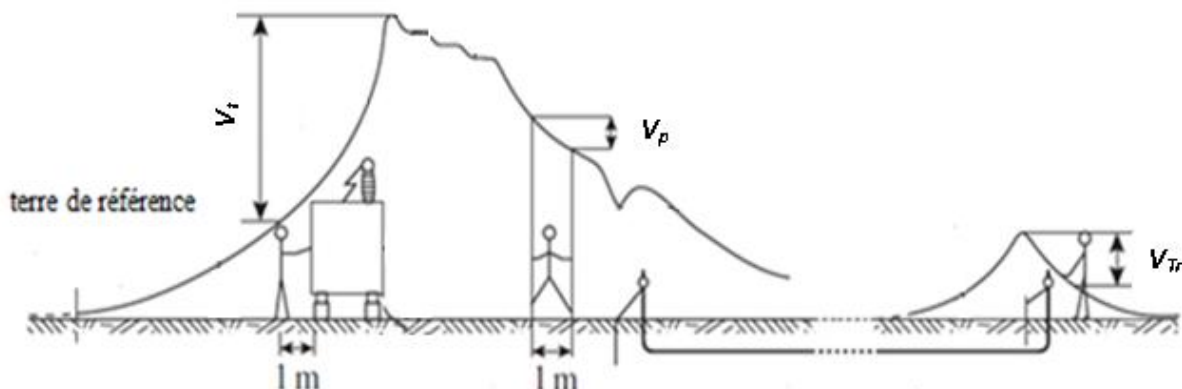


Figure I.4 : Représentation des différentes tensions de sécurité

I.11. 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

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] :

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{I.1})$$

ρ_1 : résistivité de la couche supérieure ;

ρ_2 : résistivité de la couche inférieure.

I.12. 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] :

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

a : distance entre les électrodes ;

e : profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 ;

k : coefficient de réflexion.

I.12.1. 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] :

$$\rho = 2\pi \cdot R \cdot a \quad [\Omega \cdot m] \quad (I.3)$$

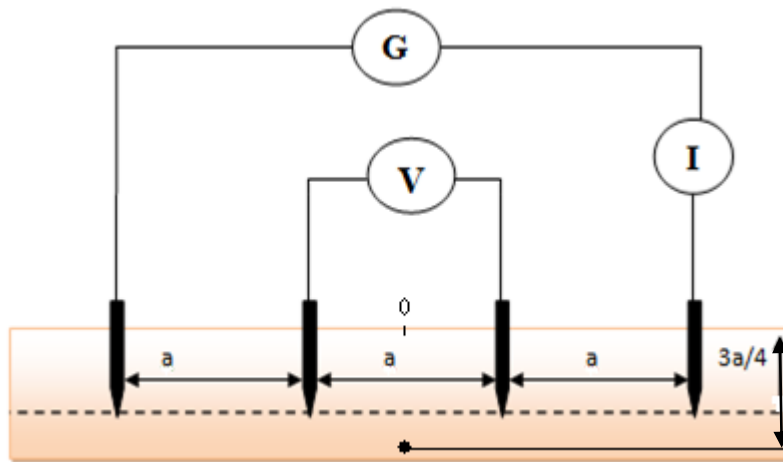


Figure I.5 : Schéma du montage de la méthode de Wenner

I.12.2. 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.6) :

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

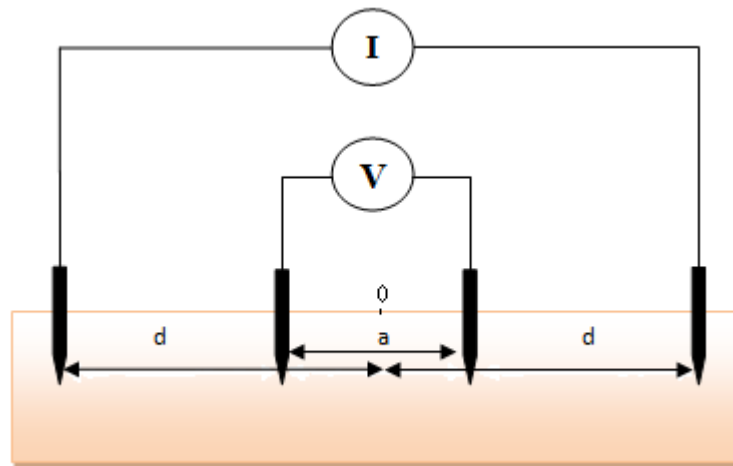


Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger

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

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

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.12.3. 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.

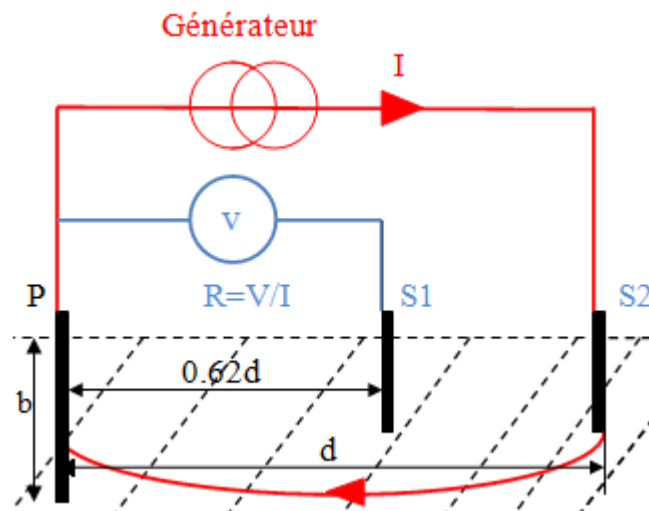


Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles

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

$$\rho_a = \frac{2\pi b R}{\ln\left(\frac{2b^2}{d}\right)} \quad (\text{I.5})$$

b : la profondeur de P ;

d : la distance entre P et S2.

I.13. 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.13.1. 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.1 : Signification des lettres des différentes configurations

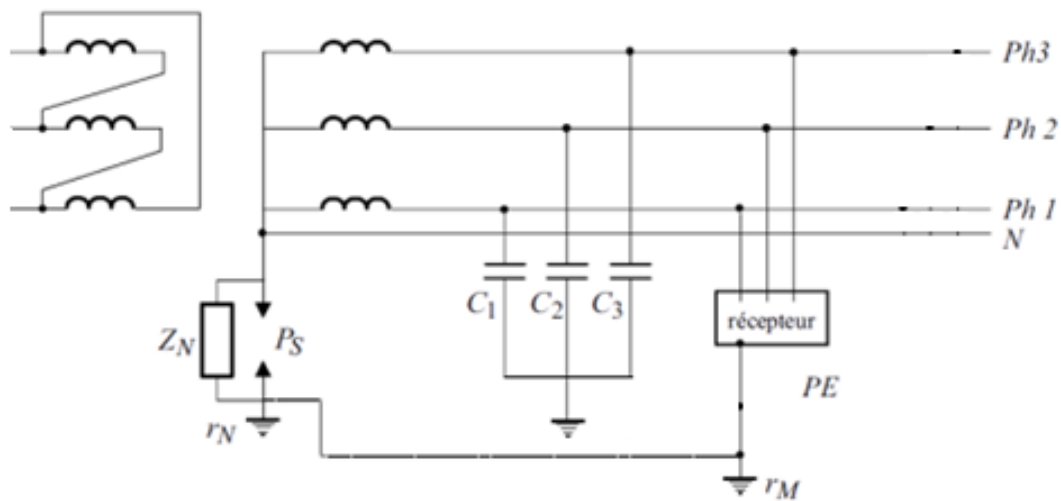


Figure I.8 : Schéma de liaison à la terre en basse tension TT

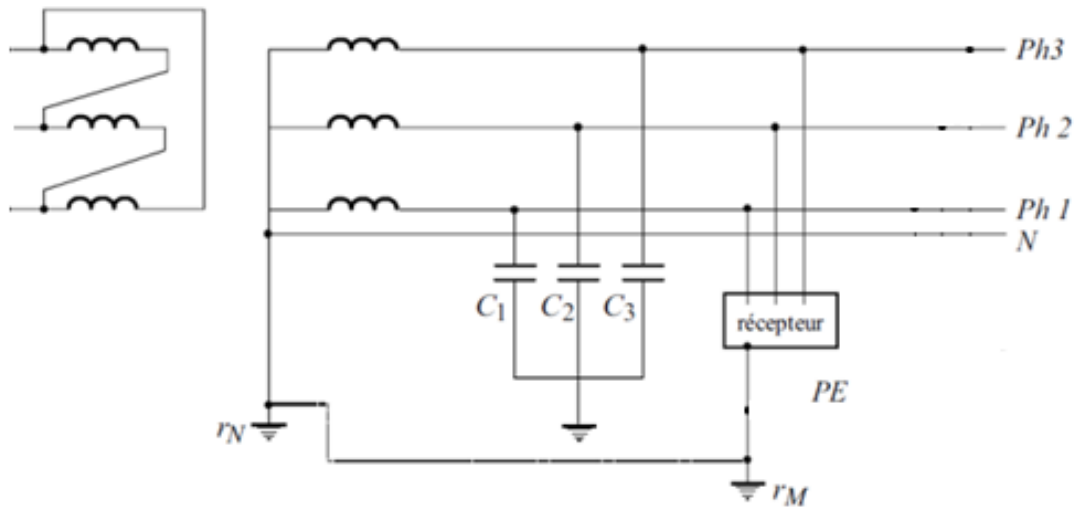


Figure I.9 : Schéma de liaison à la terre en basse tension IT

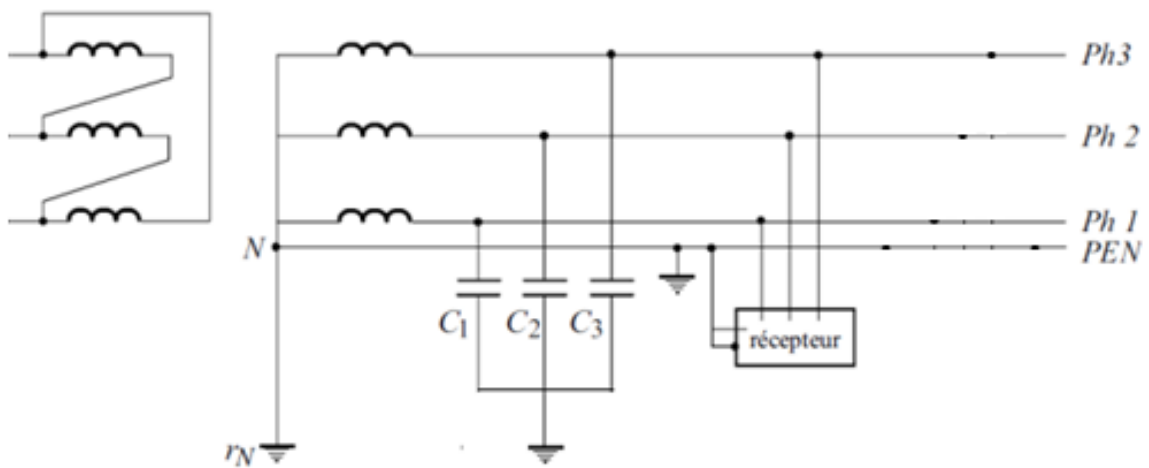


Figure I.10.a : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-C

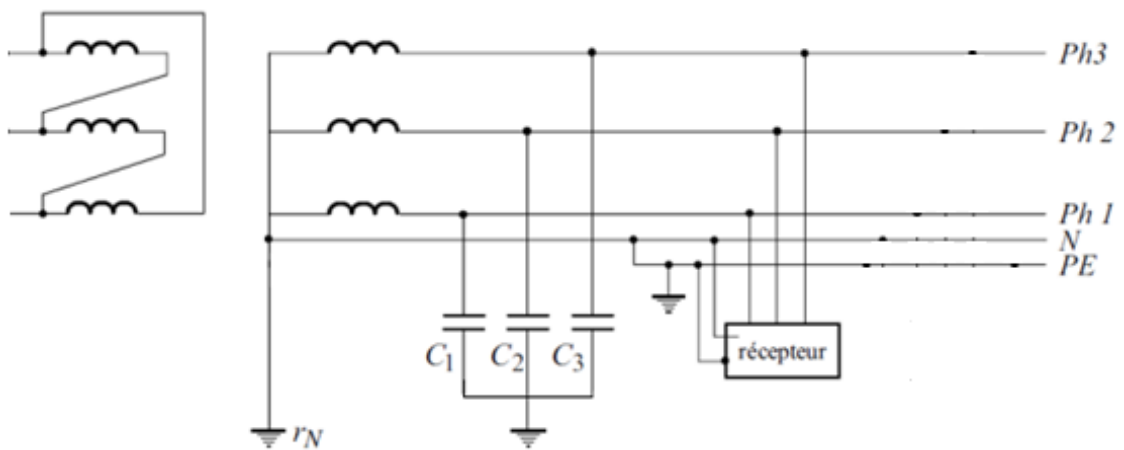


Figure I.10.b : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-S

I.13.2. 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.13.3. 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.13.4. 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.13.5. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance

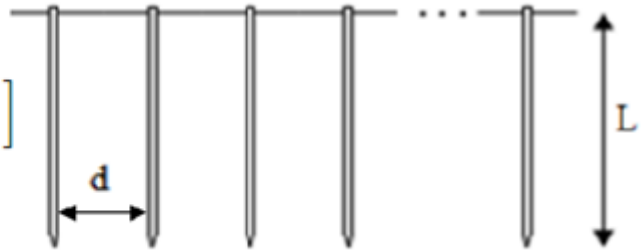
Dans cette configuration, on distingue deux sous-configurations. La première est la réactance accordée (Bobine de Petersen). Elle est utilisée dans les réseaux de haute tension avec des relais sensibles au courant homopolaire pour la sélectivité. La deuxième est la réactance de limitation qui ne peut 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.14. 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].

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

$$R \approx \frac{1}{n} \left[\frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (I.6)$$



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

$$R \approx \frac{2\rho}{P} \quad (I.7)$$



I.15. Conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80- 2000 [IEE 00]

I.15.1. 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 :

$$\rho_t = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad (I.8)$$

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

$$\rho_t = 2\pi aR \quad (I.9)$$

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.15.2. 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 .

$$I_f = 3I_0 \quad (\text{I.10})$$

$$I_0 = \frac{V}{3R_{df} + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (\text{I.11})$$

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 :

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) + \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (\text{I.12})$$

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°)	K_0 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
Aluminium Grade EC	64,0	0,00403	228	657	2,86	2,56

Tableau I.2 : Types et caractéristiques des matériaux des électrodes de terre [IEE 00]

I.15.3. 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:

$$V_{T\max} = (R_B + \frac{R_f}{2}) I_b \quad (\text{I.13})$$

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

$$V_{T\max50} = (1000 + 1,5C_s \rho_s)^{\frac{0.116}{\sqrt{t_c}}} \quad (\text{I.14})$$

$$V_{T\max70} = (1000 + 1,5C_s \rho_s)^{\frac{0.157}{\sqrt{t_c}}} \quad (\text{I.15})$$

La tension de pas admissible est donnée par :

$$V_{P\max} = (R_B + 2R_f) I_b \quad (\text{I.16})$$

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

$$V_{P\max50} = (1000 + 6C_s \rho_s)^{\frac{0.116}{\sqrt{t_c}}} \quad (\text{I.17})$$

$$V_{P_{max70}} = (1000 + 6C_s \rho_s)^{\frac{0.157}{\sqrt{t_c}}} \quad (I.18)$$

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

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho_t}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (I.19)$$

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

I.15.4. 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 :

$$D = \frac{2L_x L_y}{L_c - L_x - L_y} \quad (I, 20)$$

$$L_c = N_x L_x + N_y L_y \quad (I, 21)$$

L_c : Longueur totale des conducteurs de terre.

I.15.5. 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 :

$$R_g = \rho_t \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (I.22)$$

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

I.15.6. 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,

Courant symétrique de grille :

$$I_g = S_f (3I_0) \quad (I.23)$$

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 :

$$I_F = D_f (3I_0) \quad (I.24)$$

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.

Courant maximum de grille :

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

$$I_G = D_f S_f (3I_0) \quad (I.25)$$

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

S_f : Facteur de division du courant de défaut.

I.15.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT)

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

$$EPT = I_G R_g \quad (I.26)$$

I.15.8. 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].

$$E_m = \frac{\rho_t \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_m} \quad (I.27)$$

I_G : Courant maximum de la grille ;

K_i : Facteur d'irrégularité ;

L_m : Longueur totale des conducteurs et piquets enterrés

$$E_p = \frac{\rho_t \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_s} \quad (I.28)$$

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 :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (I.29)$$

$$K_{ii} = \begin{cases} \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} & \text{sans piquets} \\ 1 & \text{avec piquets} \end{cases} \quad (I.30)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (I.31)$$

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 :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right) \quad (I.32)$$

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

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (I.33)$$

n : facteur géométrique déterminé par l'équation suivante :

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (I.34)$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (I.35)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (I.36)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x \times L_y}} \quad (I.37)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (I.38)$$

A : Surface de la grille (m²) ;

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) :

$$L_s = 0,75 \times L_c + 0.85 \times L_R \quad (I.39)$$

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

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

$$L_m = L_c + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \quad (I.40)$$

L_r : Longueur d'un piquet (m).

I.15.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre E_t et E_{touch50} et entre E_p et E_{Step50}

Si les deux 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.15.10. 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 qui élimine 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.15.11. Etape 12 : configuration finale

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

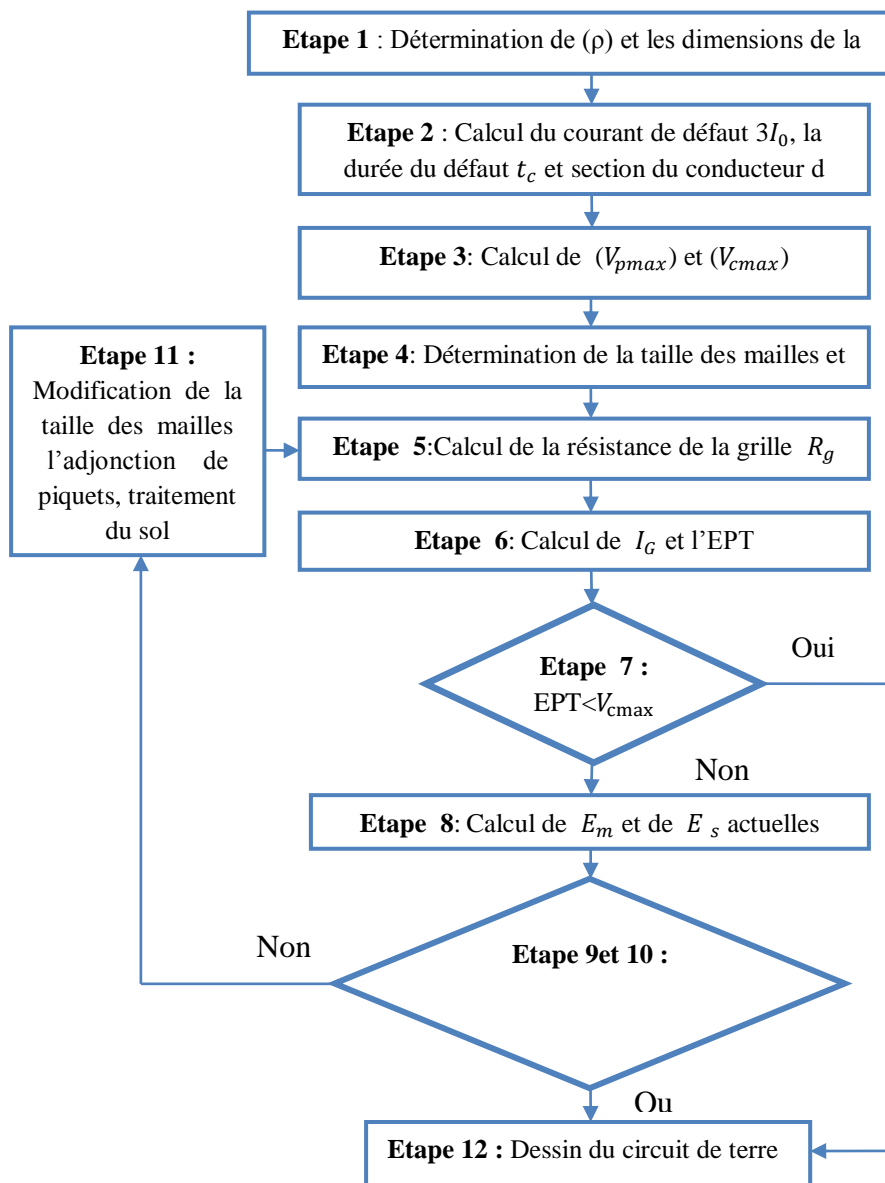


Figure I.11 : Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000 [IEE 00]

I.16. 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

*Optimisation Méta-heuristiques
et Colonie d'Abeilles Artificielles*

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.

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].

Dans la nature, plusieurs espèces sont caractérisées par leur comportement social. Un mouvement collectif avec une réponse rapide aux changements de la direction, de la vitesse de leurs voisins...etc. 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.

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 à 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.

II.2. Optimisation

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.

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.2.1. Optimisation mono-objectif

Implique le fait de considérer un seul critère à optimiser. 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 [COL 02].

II.2.2. Classification des méthodes d'optimisation

Selon le cas, une méthode d'optimisation adéquate est choisie, afin de 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. la Figure II.5 des méthodes d'optimisation mono-objectif sont classées, ces méthodes sont classées selon la nature du problème et sa complexité [COL 02].

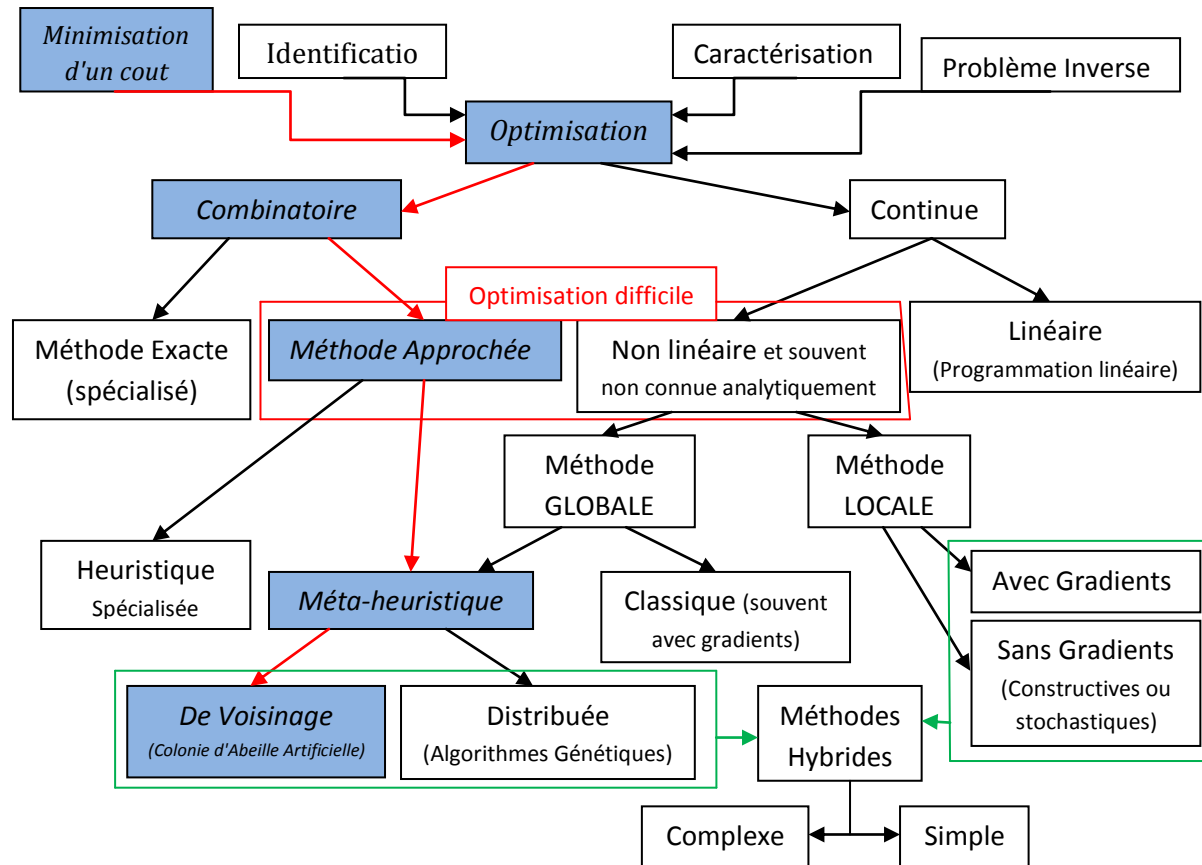


Figure II.1 : Méthodes d’optimisation mono-objectif

II.3. 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.3.1. 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].

II.3.2. 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 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 [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).

II.3.3. 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.4. Algorithme d'optimisation 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.

II.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].

II.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 scoutesses (éclaireuses) sont chargées 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 scoutesses 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 scoutesses 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 scoutesse pour une recherche aléatoire de nouvelles sources de nourriture. Cette action (une abeille est choisie comme abeille scoutesse) 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.

II.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].

$$X_{i,j} = X_j^{\min} + \phi_j (X_j^{\max} - X_j^{\min}) \quad (\text{II.1})$$

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].

II.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].

$$v_{i,j} = X_{i,j} + \phi_{i,j} (X_{i,j} - X_{k,j}) \quad (\text{formule de voisinage}) \quad (\text{II.2})$$

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 :

$$\text{Fitness}_i = 1 / f_i \quad (\text{II.3})$$

II.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 modifié. 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 :

$$P_i = \begin{cases} 0.5 + \left(\frac{\text{fitness}_i}{\sum_{j=1}^{SN} \text{fitness}_j} \right) \times 0.5 & \text{si la solution est possible} \\ \left(1 - \frac{\text{violation}_i}{\sum_{j=1}^{SN} \text{violation}_j} \right) \times 0.5 & \text{si la solution est impossible} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

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 modifié.

II.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 (II.4) 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. (II.2). 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].

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

Dans un cycle complet, après les phases des abeilles employées 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 (II.1). 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].

II.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 :

$$L = (CS \times D)/2. \quad (II.5)$$

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

II.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].

II.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]:

$$v_i = \begin{cases} X_{i,j} + \phi_{i,j} (X_{i,j} - X_{k,j}), & \text{si } R_{i,j} < MR \\ X_{i,j}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

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.

II.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.2). 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] :

$$SF(t+1) = \begin{cases} SF(t) \times 0.85 & \text{si } \phi(m) < 0.2 \\ SF(t)/0.85 & \text{si } \phi(m) < 0.2 \\ SF(t) & \text{si } \phi(m) = 0.2 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

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.

II.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.

II.4.5. Etapes de l'algorithme ABC modifié

L'algorithme ABC modifié 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 (II.1)
 - 4: fin
 - 5: fin

- 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 (II.6)
 - 4: fin
 - 5: Si aucun paramètre n'à changer, alors changer un paramètre aléatoire par (II.2)
 - 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

- 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 (II.4)
La violation est la valeur de pénalité de des solutions X_i .
 - 3: 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 (II.3)
 - 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 $t = SN/2$

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

La figure (II.2) illustre l'organigramme de l'algorithme ABC.

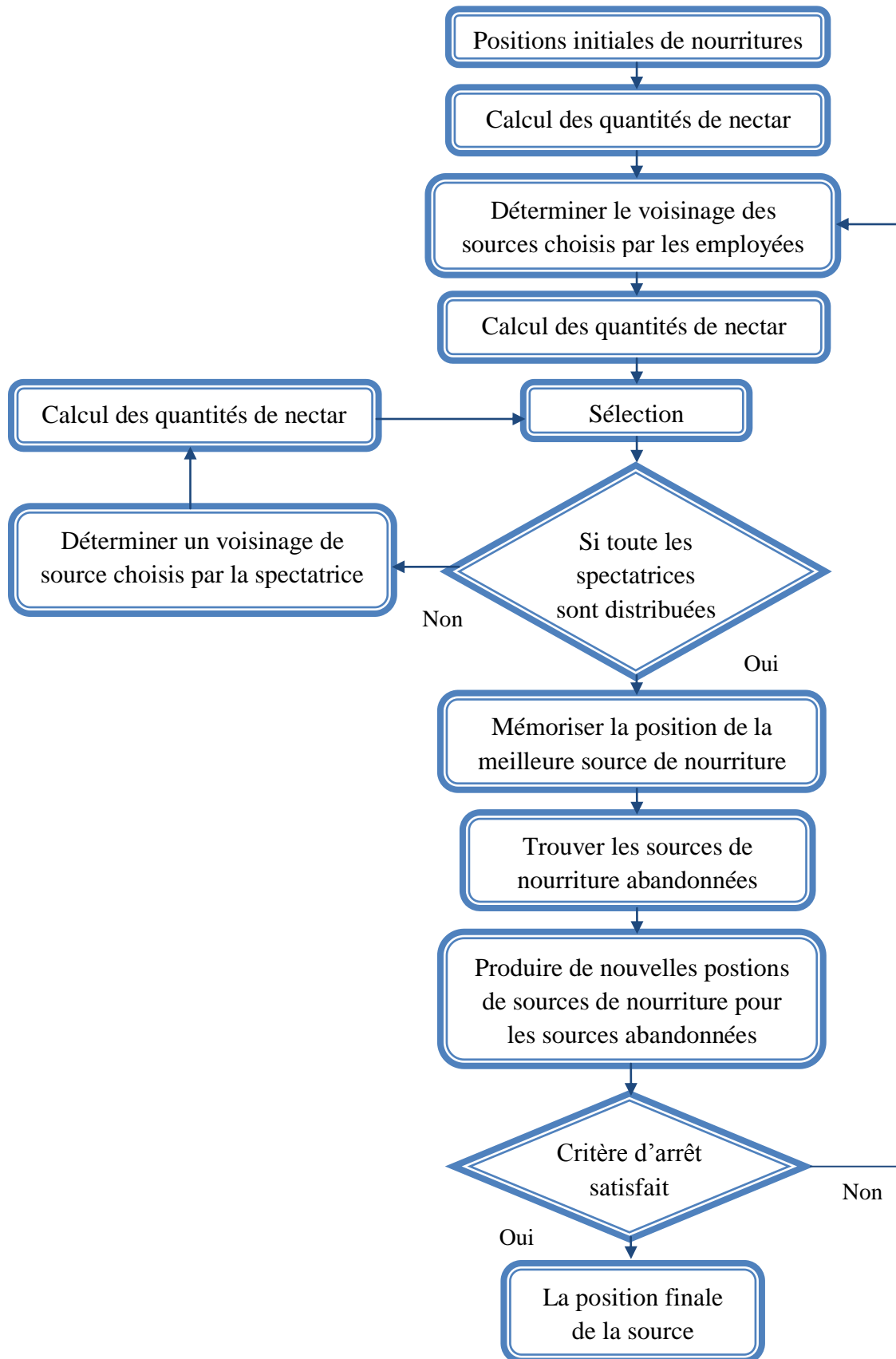


Figure II.2 : Organigramme pour l'algorithme ABC [AKA 10]

II.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].

II.5. 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.

La méthode d'optimisation par colonie d'abeilles artificielles modifiée est l'une des récentes méthodes d'optimisation. Elle est représentée par un algorithme pouvant être appliqué à de nombreux problèmes d'optimisation (avec contraintes) 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 III

*Applications, Validation et
comparaison des résultats*

III.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 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.

III.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.

III.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.

III.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 :

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

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	$[1 + \frac{L_y}{D_{xmax}} ; 1 + \frac{L_y}{D_{xmin}}]$
N_y : nombre de conducteurs horizontaux suivant y	$[1 + \frac{L_x}{D_{ymax}} ; 1 + \frac{L_x}{D_{ymin}}]$
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 III.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 III.2 : Coûts unitaires des principaux matériaux de mise à la terre

III.3.2. Gestion des contraintes

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 :

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

$$E_t < \alpha v_{tmax} \quad (\text{III.3})$$

$$E_p < \alpha v_{pmax} \quad (\text{III.4})$$

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

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

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) ;

III.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 modifié :

$$\text{Fitness} (N_x, N_y, N_p, L_p, h_s, d) = \frac{1}{F(x)} = \frac{1}{f(x)} \quad (\text{III.5})$$

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

III.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.

III.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 100 itérations pour l'ouvrage énergétique de Labreg, et 1400 itérations pour le poste de transformation de Ain El-Melh.

III.4. Applications et validation

Dans cette section, nous allons effectuer deux applications pour la technique d'optimisation Colonie d'Abeilles Artificielles 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.

III.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 modifié	100

Tableau III.3 : Données à introduire dans le programme développé

III.4.1.1. Résultats obtenus par la technique ABC modifiée

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 (III.6) suivante:

$$\text{Fitness}_{\text{moyenne}}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{\text{SN}} \text{Fitness}(k)}{\text{SN}} \quad (\text{III.6})$$

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

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

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

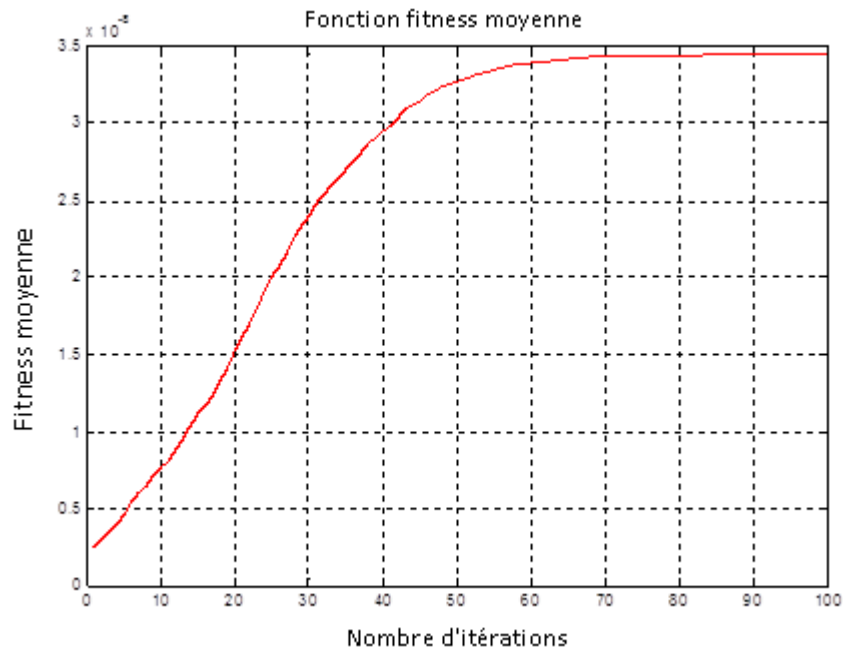


Figure III.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations

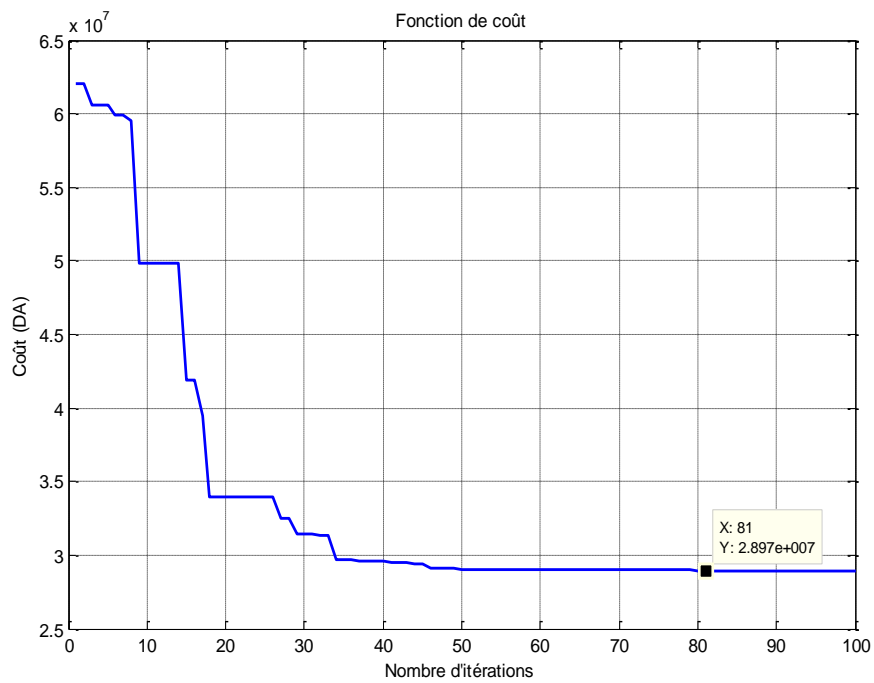


Figure III.2 : Courbe de convergence du coût

Avec l'augmentation du nombre d'itérations, nous remarquons, d'après la figure (III.1), que la fitness moyenne augmente rapidement dès les 50 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 modifiée 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 modifié 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 50 premières itérations, avant de trouver l'optimum global (28.968.969,78 DA).

Les paramètres différents optimaux obtenus par l'algorithme ABC modifié sont présentés dans le tableau (III.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)	0.36
Le coût de l'installation (DA)	28.968.969,78

Tableau III.4 : Paramètres optimaux obtenus par le biais de l'algorithme ABC modifié

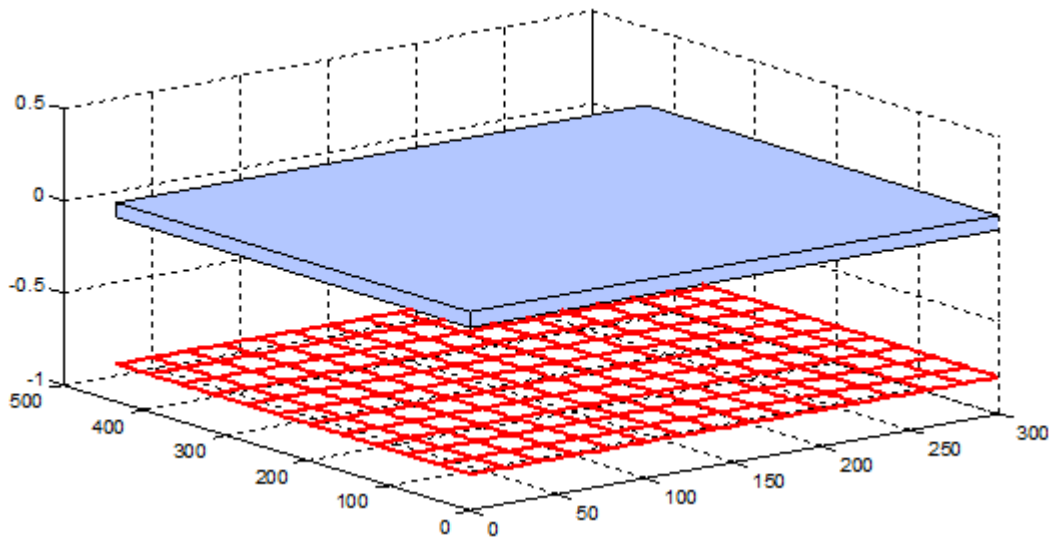


Figure III.3 : Topologie de la grille

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

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 III.5 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus à travers l'algorithme ABC modifié

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.

III.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 modifié, 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 III.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 (III.4), (III.5) et (III.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.

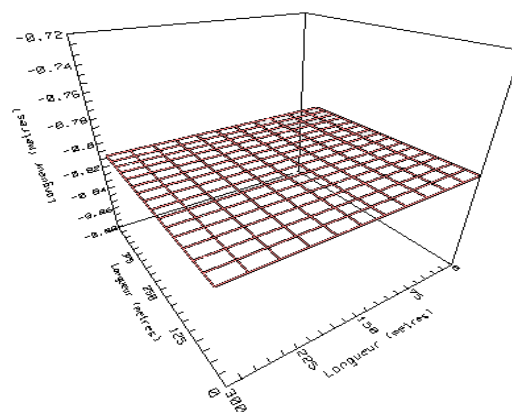


Figure III.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D

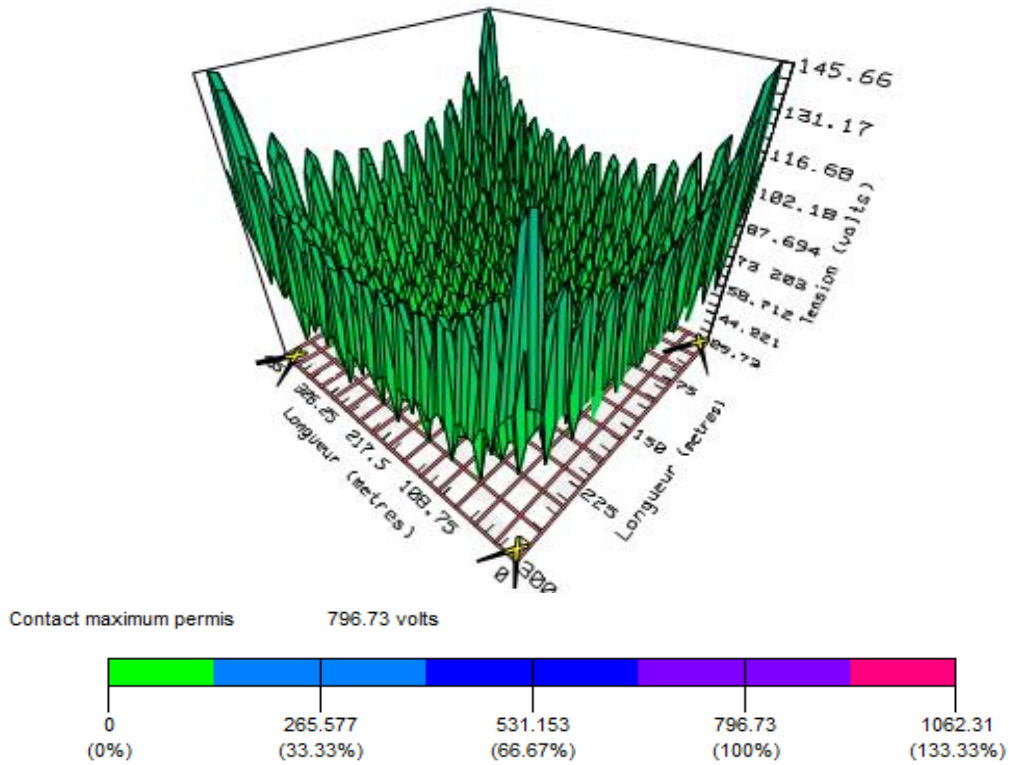


Figure III.5 : Diagramme de contour de potentiel de contact

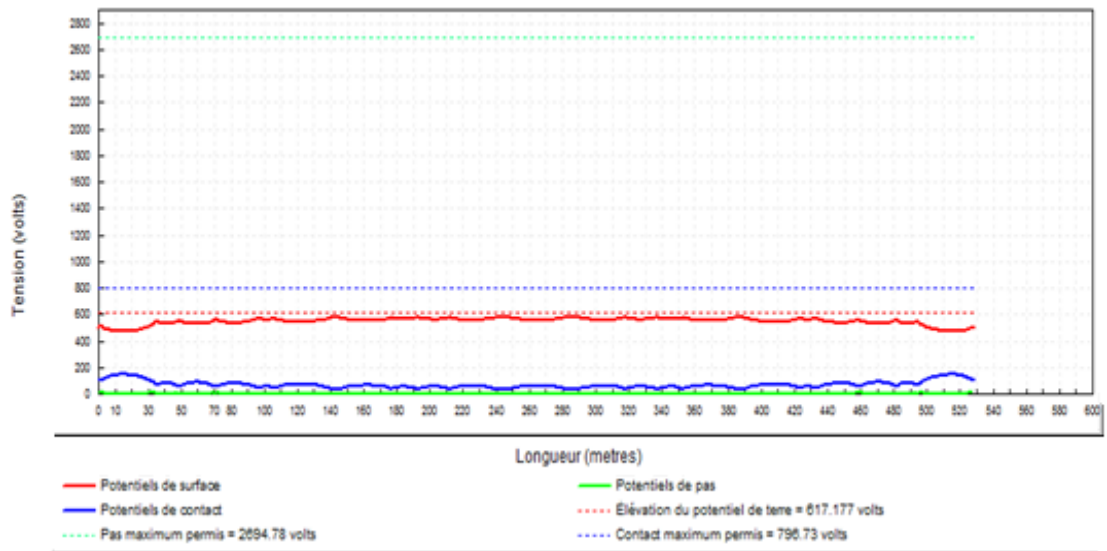


Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

III.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 160x160 m². 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 : $P_{cc} = 3500$ MVA ;
- Durée normalisée de court circuit : $t_c = 1$ s ;
- Courant de court-circuit : $I_{cc} = 31500$ A.
- Résistivité de matériau de surface (Gravier) : $\rho_s = 3000$ Ω .m.
- Résistivité de la terre : $\rho_t = 50,8938$ Ω .m.
- Nombre de départs lignes 60 kV : $n_a = 2$.
- Surface du réseau maillé : $A = 25600$ m².
- Profondeur d'enfouissement de la grille de mise à la terre en cuivre : $h = 0,5$ 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 (Ω .m)	50,89
La résistivité de la couche superficielle (Ω .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 modifié	1400

Tableau III.7 : Données du poste de transformation de Ain El-Melh

III.4.2.1. Optimisation par la technique ABC modifiée

La figure (III.7) (respectivement (III.8)) 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 10.189.349,51 DA.

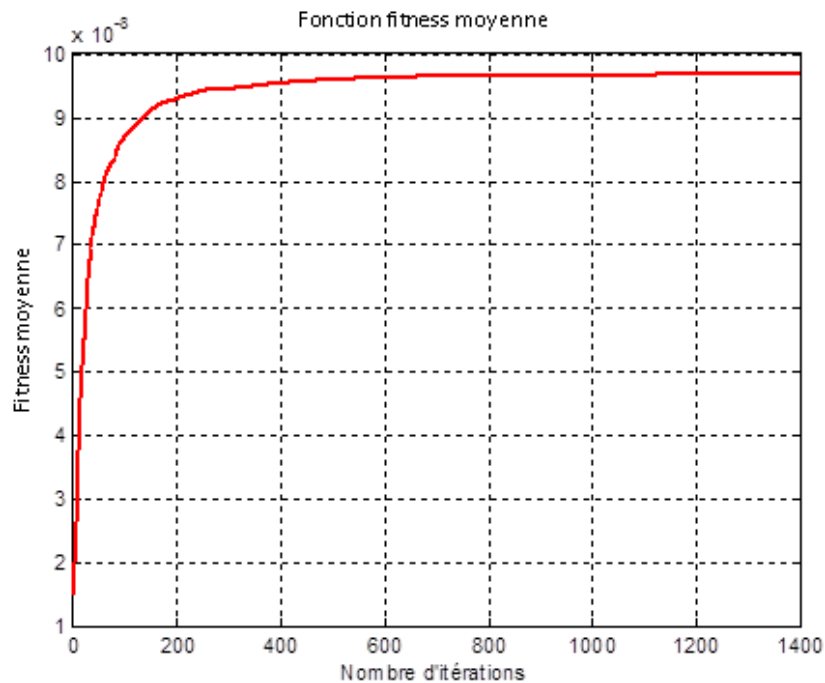


Figure III.7 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations

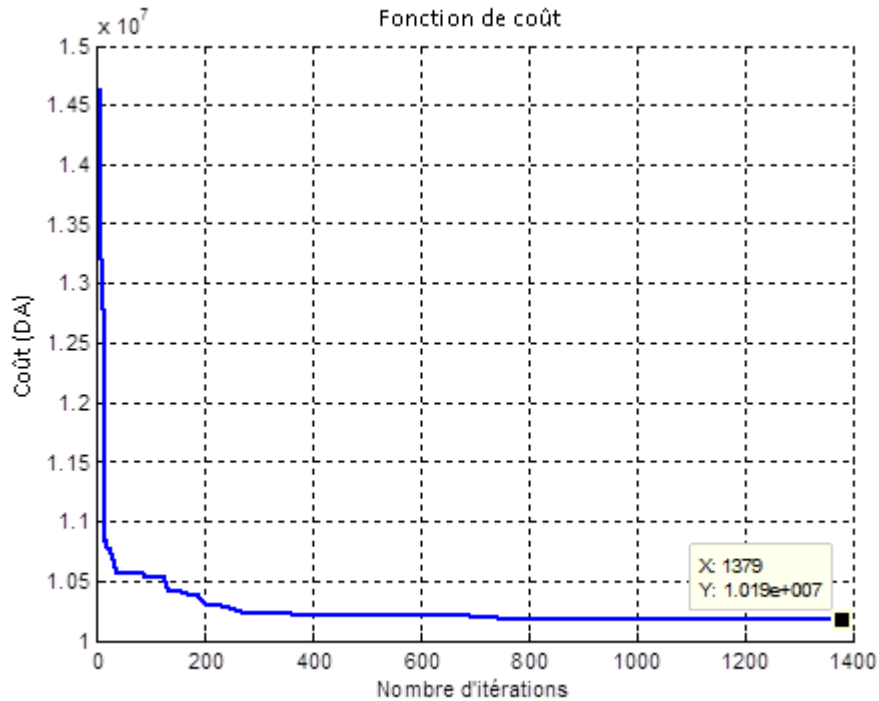


Figure III.8 : Courbe de convergence du coût

L'algorithme ABC modifié nous a permis d'obtenir les paramètres optimaux donnés dans le tableau (III.8) et par la suite la topologie de la figure (III.9). :

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 III.8 : Paramètres optimaux selon ABC modifié

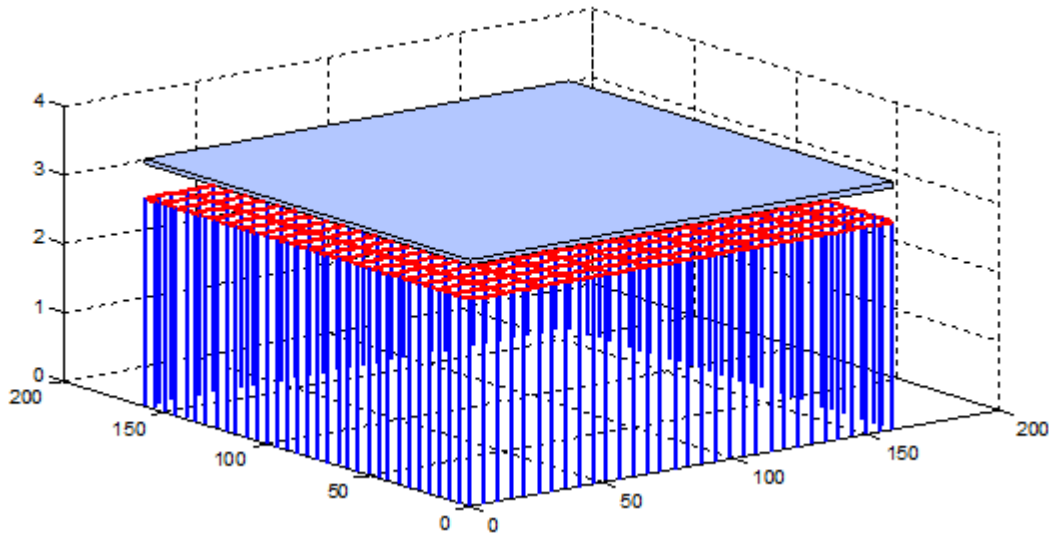


Figure III.9 : Topologie de la grille selon ABC modifié

Par ailleurs, le tableau (III.9) présente les paramètres électriques obtenus par l'algorithme ABC modifié.

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 III.9 : Paramètres électriques optimaux obtenus par ABC modifié

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.

III.4.2.2. Validation des résultats obtenus par ABC modifié en utilisant CYMGrd

Le tableau (III.10) 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 Et (V)	408,56
La tension de pas Ep (V)	70,86

Tableau III.10 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd

Tenant compte des paramètres électriques trouvés, CYMGrd permet l'obtention du diagramme de contour relatif à la tension de contact en 3D (Figure III.10), le diagramme de contour de potentiel de contact (Figure III.11) ainsi que les diagrammes de profils des tensions de pas et de contact (Figure III.12). 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.

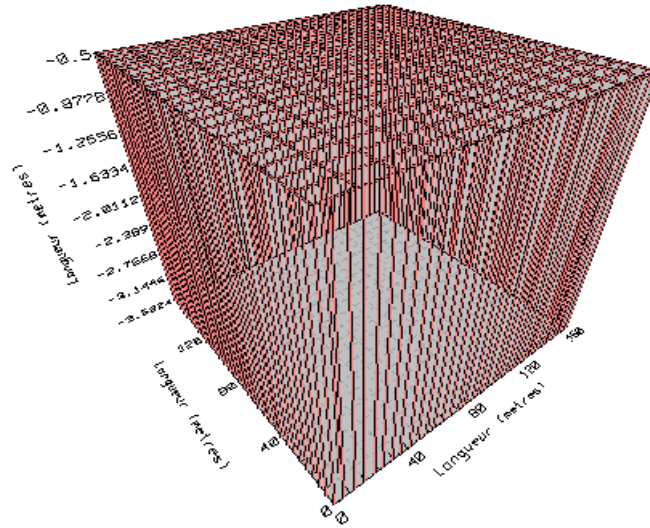


Figure III.10 : Topologie de la grille en 3D

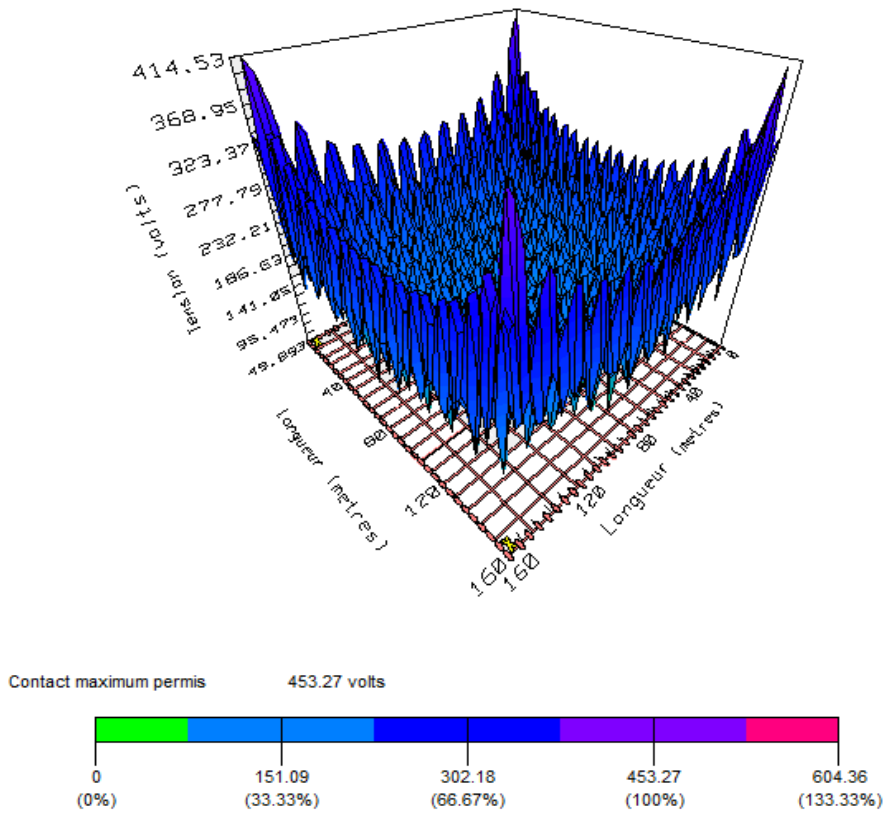


Figure III.11 : Diagramme de contour de potentiel de contact

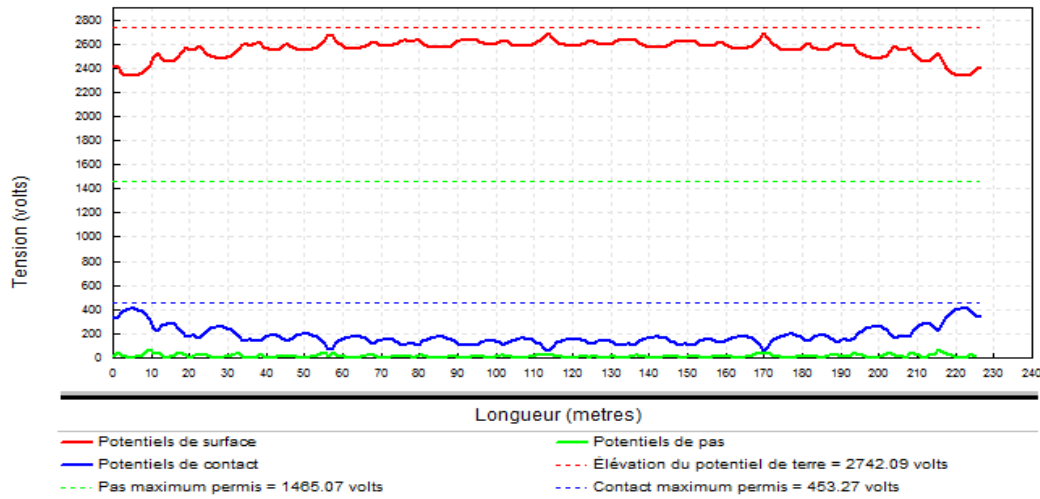


Figure III.12 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

III.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 (III.11) illustre les résultats obtenus utilisant les différentes techniques d'optimisation (ABC modifiée, AG et EP) appliquées sur le système de mise à la terre de l'ouvrage énergétique de Labreg.

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

Tableau III.11 : 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 (III.13), 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 modifiée, AG et EP).

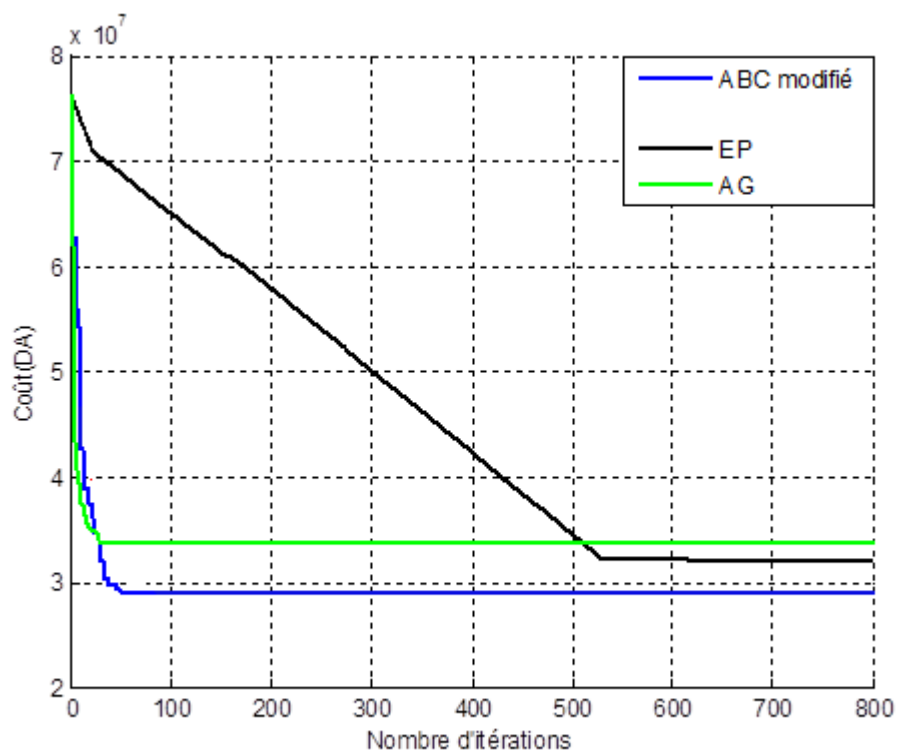


Figure III.13 : Coût de construction du système optimisé de l'ouvrage énergétique de Labreg, en fonction du nombre d'itérations et ce pour toutes les techniques

Le tableau (III.12) 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 modifié	AG	EP
Coût (DA)	10.189.349,51	14.804.774,14	15.034.697,94
Nombre d'itérations	1400	800	800
Temps d'exécution	3,9	24,46	15,30

Tableau III.12 : 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.

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 ; 15,30 et 24,46 secondes respectivement.

Le seul inconvénient constaté de technique ABC modifiée (dans cette application) est qu'elles nécessitent un nombre d'itérations légèrement important pour trouver l'optimum global (1400 contre 800 itérations pour EP et AG).

D'après ce dernier tableau es 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 (4.615.427 DA) et celle de EP de (4.845.348 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 modifiée, AG et EP) est présentée sur la figure (III.14). Ces courbes confirment nos propos relatifs aux coûts de construction du système optimisé du poste de transformation de Ain El-Melh, précédemment évoqués.

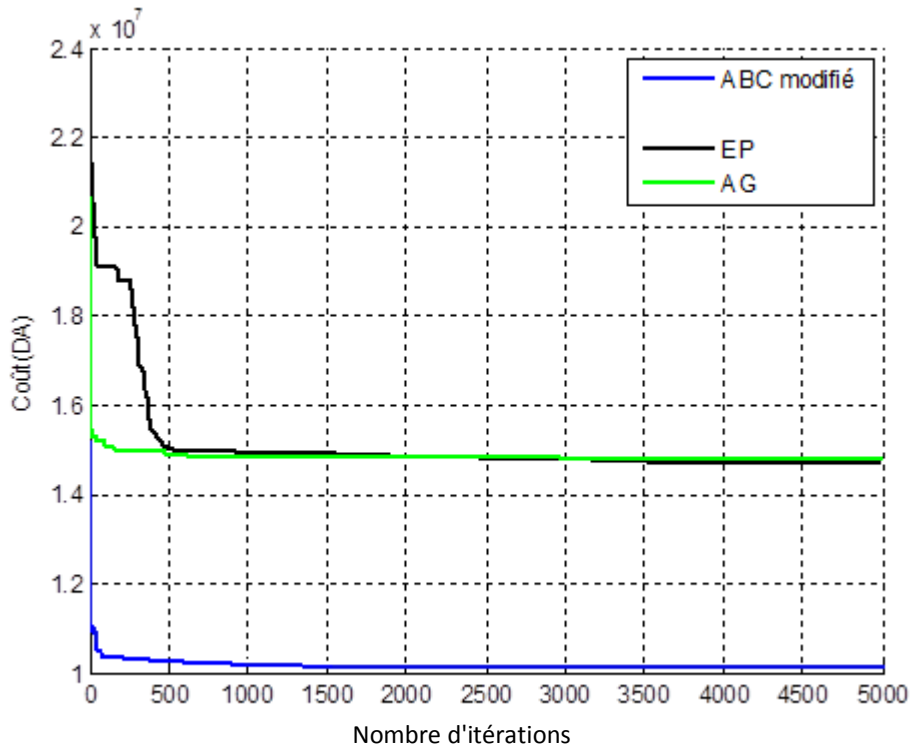


Figure III.14 : Figure comparative entre les différentes courbes de cout du poste de transformation de Ain El-Melh

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 explore plus d'espace de recherche que les algorithmes AG et EP.
- L'algorithme ABC est extrêmement rapide par rapport les algorithmes AG et EP pour trouver la configuration optimale.
- La technique ABC modifiée donne des résultats plus proches de l'optimum global (concernant les systèmes étudiés) que les techniques AG et EP.
- La fitness moyenne de la technique ABC modifiée 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 la technique ABC modifiée, 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 trouve la configuration optimale dans un temps quasiment négligeable par rapport à celui des techniques AG et EP. Ceci est évident vu que 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 de l'algorithme ABC 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 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 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

[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

[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.

[DAW 79] Dawalibi F., Mukhedkar D., « Parametric analysis of grounding grids », IEEE Trans. PAS, Oct. 1979, 98, (5), pp. 1659-1668.

[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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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
- [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.

[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).

[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

[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.

[YIM 09] Yi-min Y., Min-fang P., Hai-Taoand 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.