

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



وزارة التعليم العالي
و البحث العلمي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département d'Electrotechnique
Laboratoire de recherche en Electrotechnique

Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :

MAADJOU DJamel

Intitulé

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

Directeur du mémoire :

M.TEGUAR

Professeur

ENP

Jury :

A. BOUBAKEUR (Président)

Professeur

ENP

A. MEKHALDI

Professeur

ENP

S.MEKHTOUB

Professeur

ENP

Promotion : Juin 2014

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

Remerciements

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

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

Nous remercions également Monsieur B. ALIK, 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.....	vi
Liste Des Tableaux.....	vii
Résumé.....	viii
Introduction générale.....	1
I. Généralités sur la mise à la terre et conception	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définitions	
I.2.1. Mise à la terre.....	4
I.2.2. Terre de référence.....	4
I.2.3. Masse.....	4
I.2.4. Réseau de terre.....	5
I.2.5. Prise de terre.....	5
I.2.6. Eléments d'une mise à la terre.....	5
I.2.7. Elévation du potentielle de terre.....	5
I.2.8. 1.Tension de contact.....	6
I.2.8.2. Tension de pas.....	6
I.2.11. Tension de maille.....	7
I.2.12. Tension transféré.....	7
I.3. Mesure de la résistivité du sol.....	7
I.3.1. Méthode de Wenner.....	8
I.3.2. Méthode de Schlumberger.....	9
I.3.3. Méthode de mesure à trois pôles.....	9
I.4. Les différentes étapes de conception [IEE 00]	11
I.4.1. Etape 1 : Détermination de la résistivité.....	11
I.4.2. Etape 2 : Dimensionnement des conducteurs.....	11

I.4.3. Etape 3 : Tensions de contact et de pas maximales admissibles.....	12
I.4.4. Etape 4 : La conception initiale.....	13
I.4.5. Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille.....	13
I.4.6. Etape 6 : Courant maximum I_G de la grille.....	13
I.4.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT).....	14
I.4.8. Etape 8 : Tensions de maille et de pas.....	15
I.4.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre E_m et E_{t50} et entre E_{set} et E_{Step50}	16
I.4. 10. Etape 11 : Amélioration de la configuration initiale.....	16
I.4.11. Etape 12 : configuration final.....	17
I.5.Conclusion.....	18
II. Algorithmes Basés sur le Comportement des Abeilles	
II.1. Introduction.....	19
II.2. Optimisation par Colonie d'abeilles Artificielle	19
III.3. Historique de l'algorithme ABC.....	19
II.4. Principe général de l'algorithme ABC.....	19
II.4.1. Production initiale des sources de nourriture.....	20
II.4.2. L'envoi des abeilles employées aux sites.....	21
II.4.3. Calcul de probabilité.....	22
II.4.4. Le choix de la source à améliorer par les spectatrices.....	22
II.4.5. Critère pour abandonner une source : Limite et production de scoute.....	22
II.5. Paramètres de l'algorithme ABC.....	23
II.6. Etapes de l'algorithme ABC.....	24
II.7. Conclusion.....	26
III Applications&validation	
III.1. Introduction.....	27
III.2. Code de calcul CYMGrd.....	27

III.3 Optimisation par colonie d'abeilles artificielles.....	27
III.3.1. Fonction objectif.....	27
III.3.2. Gestion des contraintes.....	29
III.3.3. Fonction fitness.....	30
III.3.4. Taille de la population.....	31
III.3.5. Nombre d'itérations.....	31
III.4.Applications et validation (Ouvrage énergétique de Labreg).....	31
III.4.1. Optimisation par ABC	33
III.4.2. Validation en utilisant CYMGrd.....	36
III.5.Conclusion.....	39
IV .Conclusion générale	40
V. Bibliographie	41

Liste Des Figures

Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets).....	5
Figure I.2 : Tension de contact.....	6
Figure I.3: Tension de pas.....	6
Figure I.4 : Représentation des différentes tensions de sécurité.....	7
Figure I.5 : Schéma du montage de la méthode de Wenner.....	8
Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger.....	9
Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles.....	10
Figure I.8 : Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000.....	17
Figure II.1 : Organigramme pour l'algorithme ABC.....	25
Figure III.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations.....	34
Figure III.2 : Courbe de convergence du coût.....	35
Figure III.3 : Topologie de la grille.....	36
Figure III.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D.....	37
Figure III.5 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	38
Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	39

Liste Des Tableaux

Tableau III.1: Intervalles de variation des paramètres.....	29
Tableau III.2 : Coûts unitaires des principaux matériaux de mise à la terre.....	29
Tableau III.3 : Données à introduire dans les programmes développés.....	33
Tableau III.4 : Paramètres optimaux obtenus par le biais de l’algorithme ABC	35
Tableau III.5 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus à travers..... l’algorithme ABC	36
Tableau III.6 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd.....	37

يقدم هذا العمل الذي يأتي في إطار مشروع التخرج - مساهمة في تحديد الأمثلية لنظم التأريض 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 (CBA)، من أجل هذا تم تنفيذ البرنامج القائم على هذه التقنية تحت بيئة BAL TAM 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 drGMYC. تحصلنا على توافق جيد بين النتائج.

الكلمات الرئيسية : التأريض، تحديد الأمثلية ، بحث النحل على مصدر الرحيق ، دالة الهدف ، شبكة التأريض ، أعمدة التأريض، 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 basée sur le comportement des abeilles. La technique Colonie d'Abeilles Artificielles, L'implémentation des programmes basés sur ces deux techniques a été faite sous MATLAB (R-2010) et en tenant compte de la procédure de conception selon IEEE 80-2000. Nous nous sommes intéressés lors de notre optimisation, aux un ouvrage énergétique; l'ouvrage énergétique de LABREG situant à la Wilaya de Khenchela et. Les résultats obtenus ont été validés sur le code de calcul CYMGrd.

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

Abstract

Within the thesis of Master, presents 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 technique is artificial bee colony,. The implementation of programs based on this techniques has been developed under (R-2010) MATLAB, 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) The results were validated using the computer code CYMGRD.

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

Introduction générale

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

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

De nombreuses techniques, seules ou couplés 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 ce 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].

.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 basique a été développé. Nous nous sommes intéressés lors de cette présente étude à l'ouvrage énergétique de Labreg [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] .

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. Les expressions des résistances des configurations de mise à la terre les plus utilisées. 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.

Nous présentons dans le deuxième chapitre, le principes de fonctionnement et ses paramètres caractéristique, l'algorithme de base d'optimisation par Colonie d'Abeilles Artificielles (Artificial Bee Colony "ABC"), développés dans cette étude, y sont exposés d'une façon détaillée.

Le troisième et le dernier chapitre est consacré à l'application des techniques d'optimisation par colonies d'abeilles artificielles sur l'ouvrage énergétique de Labreg. Le but est de minimiser la fonction coût et d'assurer la sécurité de l'ouvrage. La validation de nos programmes par CYMGrd .

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

I.1. Introduction

Un circuit de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés dans le sol et reliés entre eux électriquement en vue d'obtenir un plan horizontal qui serait idéalement équipotentiel. En cas de court-circuit de forte intensité ou de coup de foudre, il a pour but de faciliter l'écoulement et la diffusion, au sein du sous-sol, des courants de défaut correspondants et de limiter les différences de potentiel transitoires entre certains points à des valeurs acceptables. Dans ces conditions, un circuit de terre doit assurer essentiellement :

- la sécurité des êtres vivants (personnes et animaux),
- la protection des équipements électriques,
- le maintien d'un potentiel de référence;

I.2. Définitions

I.2.1. Mise à la terre

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

I.2.2. Terre de référence

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

I.2.3. Masse

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

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

I.2.4. Réseau de terre

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

I.2.5. Prise de terre

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

I.2.6. Eléments d'une mise à la terre :

En général, une sous-station électrique s'appuie sur une dalle en béton de forme géométrique rectangulaire, d'épaisseur comprise entre 10 et 30 cm. Le circuit de terre correspondant est constitué d'une grille horizontale conductrice, enterrée sous la dalle à une profondeur comprise entre 0.5 m et 1.0 m et comportant des mailles identiques, carrées ou rectangulaires. Des piquets verticaux sont répartis sur le pourtour de cette grille et raccordés aux nœuds des mailles. [PIE]

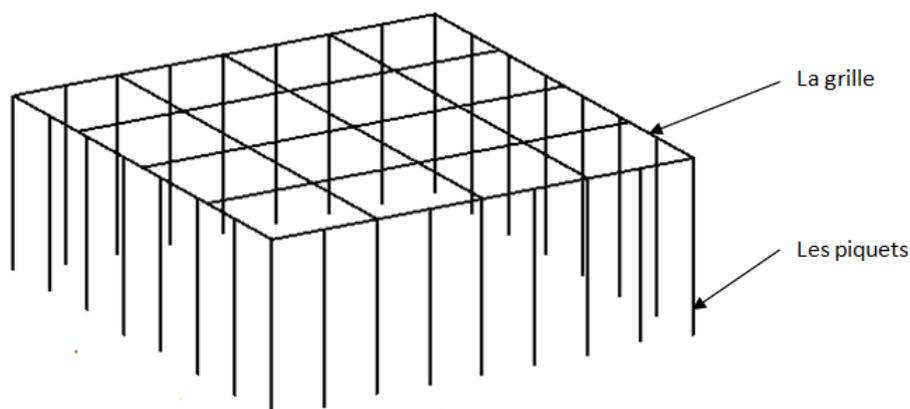


Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets)

I.2.7. Elévation du potentielle de terre

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

I.2.8. Tensions de sécurité :

Les tensions admissibles sont définies par la sensibilité du corps humain aux courants électriques :

I.2.8.1 Tension de contact

Correspondant à la différence de potentiel entre une structure métallique mise à la terre et un point de la surface du sol situé à une distance horizontale maximale (soit 1 m, entre un bras tendu et les pieds posés sur le sol). [PIE]

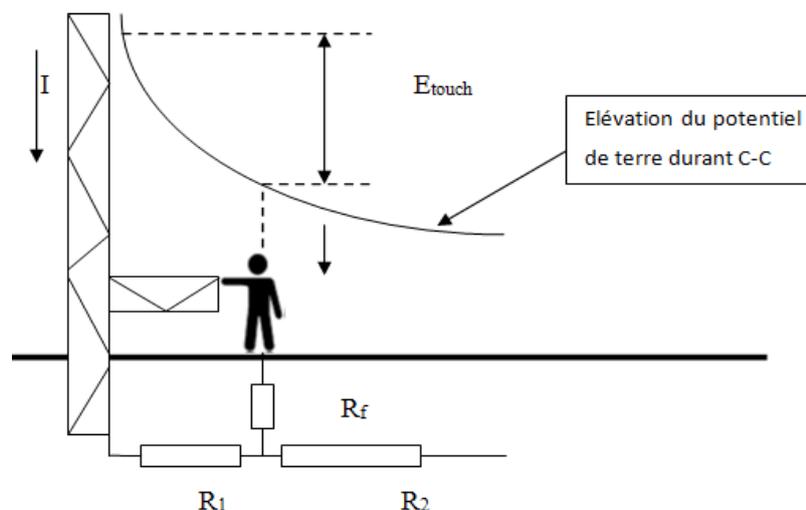


Figure I.2 : Tension de contact

I.2.8. 2. Tension de pas

Correspondant à la différence de potentiel, dans le sens du gradient de potentiel croissant, entre deux points du sol distants horizontalement de 1m (entre les deux pieds). [PIE]

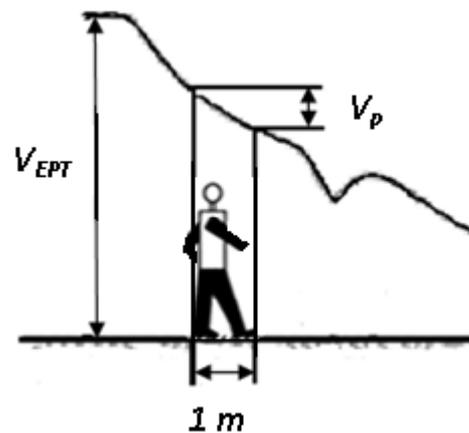


Figure I.3: Tension de pas

I.2.9. 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.2.10. Tension transféré

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

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

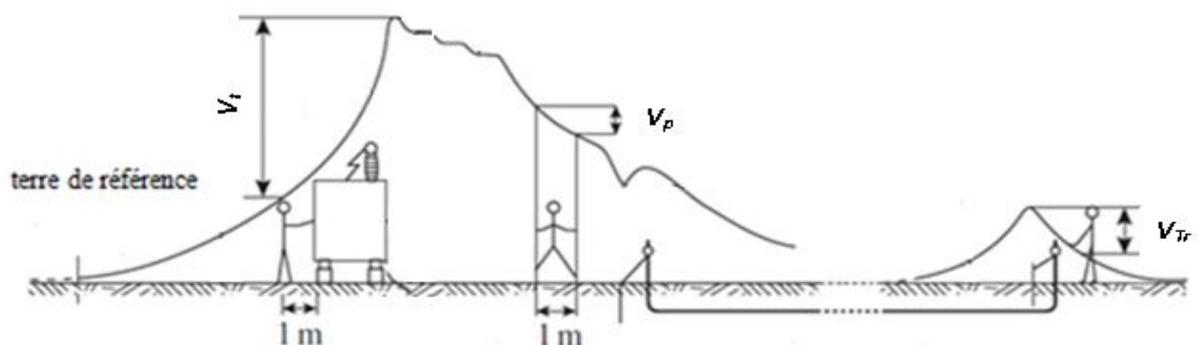


Figure I.4 : Représentation des différentes tensions de sécurité

I.3. Mesure de la résistivité du sol

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

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

a : distance entre les électrodes ;

e : profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 ;

k : coefficient de réflexion.

I.3.1. Méthode de Wenner

On utilise quatre électrodes sur la même droite avec un espace entre les électrodes équidistant "a", et enterrés 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.5 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] :

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

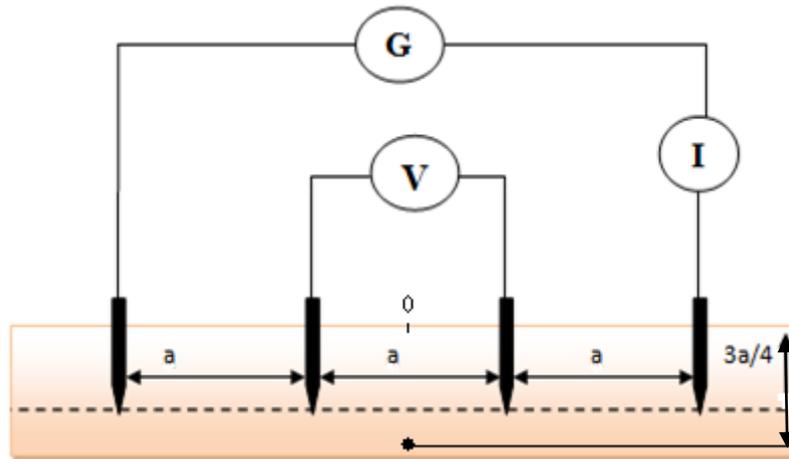


Figure I.5 : Schéma du montage de la méthode de Wenner

I.3.2. 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 '.

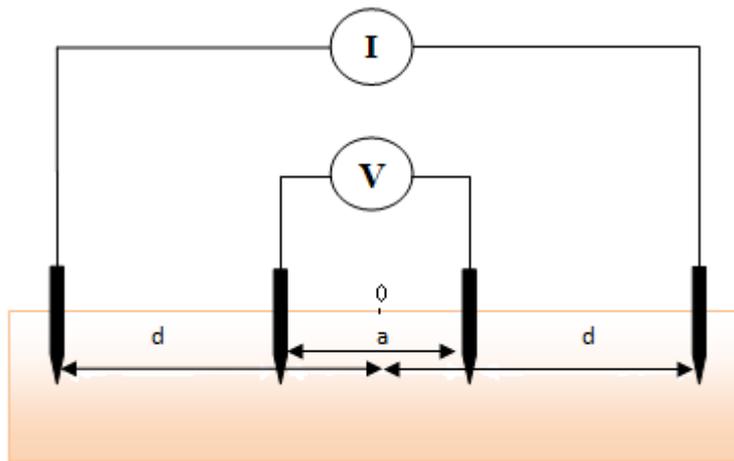


Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger

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

$$\rho = \frac{\pi(d^2 - \frac{a^2}{4})R}{4} \quad (\text{I.3})$$

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.3.3. 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.

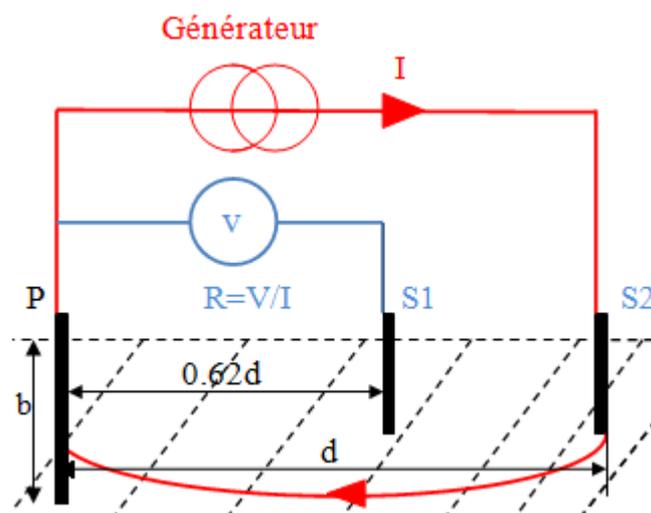


Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles

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

$$\rho_a = \frac{2\pi b R}{\ln\left(\frac{2b^2}{d}\right)} \quad (\text{I.4})$$

b : la profondeur de P ;

d : la distance entre P et S2.

I.4. Conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80- 2000

Les différentes étapes de conception [IEE 00] :

I.4.1. 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 :

$$\rho_t = 2\pi aR \quad (I.5)$$

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.4.2. 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 .

$$I_f = 3I_0 \quad (I.6)$$

$$I_0 = \frac{V}{3R_{df} + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (I.7)$$

R_0, R_1, R_2 : Résistances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω) ;

X_0, X_1, X_2 : Réactances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω) ;

V : tension simple entre phase et neutre ;

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

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

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) + \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (I.8)$$

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

I.4.3. 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 :

La tension de contact admissible est donnée par :

$$V_{Tmax} = \left(R_B + \frac{R_f}{2}\right) I_b \quad (I.9)$$

La tension de pas admissible est donnée par :

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

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.

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho_t}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (I.10)$$

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

I.4.4. 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.

$$D = \frac{2L_x L_y}{L_c - L_x - L_y} \quad (\text{I, 11})$$

$$L_c = N_x L_x + N_y L_y \quad (\text{I, 12})$$

I.4.5. 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 :

$$R_g = \rho_t \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\text{I.13})$$

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

I.4.6. 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,

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

$$I_G = D_f S_f (3I_0) \quad (\text{I.14})$$

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

S_f : Facteur de division du courant de défaut.

I.4.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT)

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

$$\text{EPT} = I_G R_g \quad (\text{I.15})$$

I.4.8. 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].

$$E_m = \frac{\rho_t \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_m} \quad (\text{I.16})$$

I_G : Courant maximum de la grille ;

K_i : Facteur d'irrégularité ;

L_m : Longueur totale des conducteurs et piquets enterrés

$$E_p = \frac{\rho_t \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_s} \quad (\text{I.17})$$

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 :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (\text{I.18})$$

$$K_{ii} = \begin{cases} \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} & \text{sans piquets} \\ 1 & \text{avec piquets} \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (\text{I.20})$$

h : profondeur d'enfouissement (m) ;

$h_0=1\text{m}$: profondeur de référence (m) ;

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

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

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right) \quad (\text{I.21})$$

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

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (\text{I.22})$$

n : facteur géométrique déterminé par l'équation suivante :

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (\text{I.23})$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (\text{I.24})$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (\text{I.25})$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x \times L_y}} \quad (\text{I.26})$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (\text{I.28})$$

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

L_p : Longueur périphérique de la grille (m) ;

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

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

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

$$L_s = 0,75 \times L_c + 0,85 \times L_R \quad (I.29)$$

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

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

$$L_m = L_c + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \quad (I.30)$$

L_r : Longueur d'un piquet (m).

I.4.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre E_p et $E_{\text{touch } 50}$ et entre E_{set} et $E_{\text{Step } 50}$

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

I.4.10. Etape 11 : Amélioration de la configuration initiale

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

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

I.4.11. Etape 12 : configuration finale

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

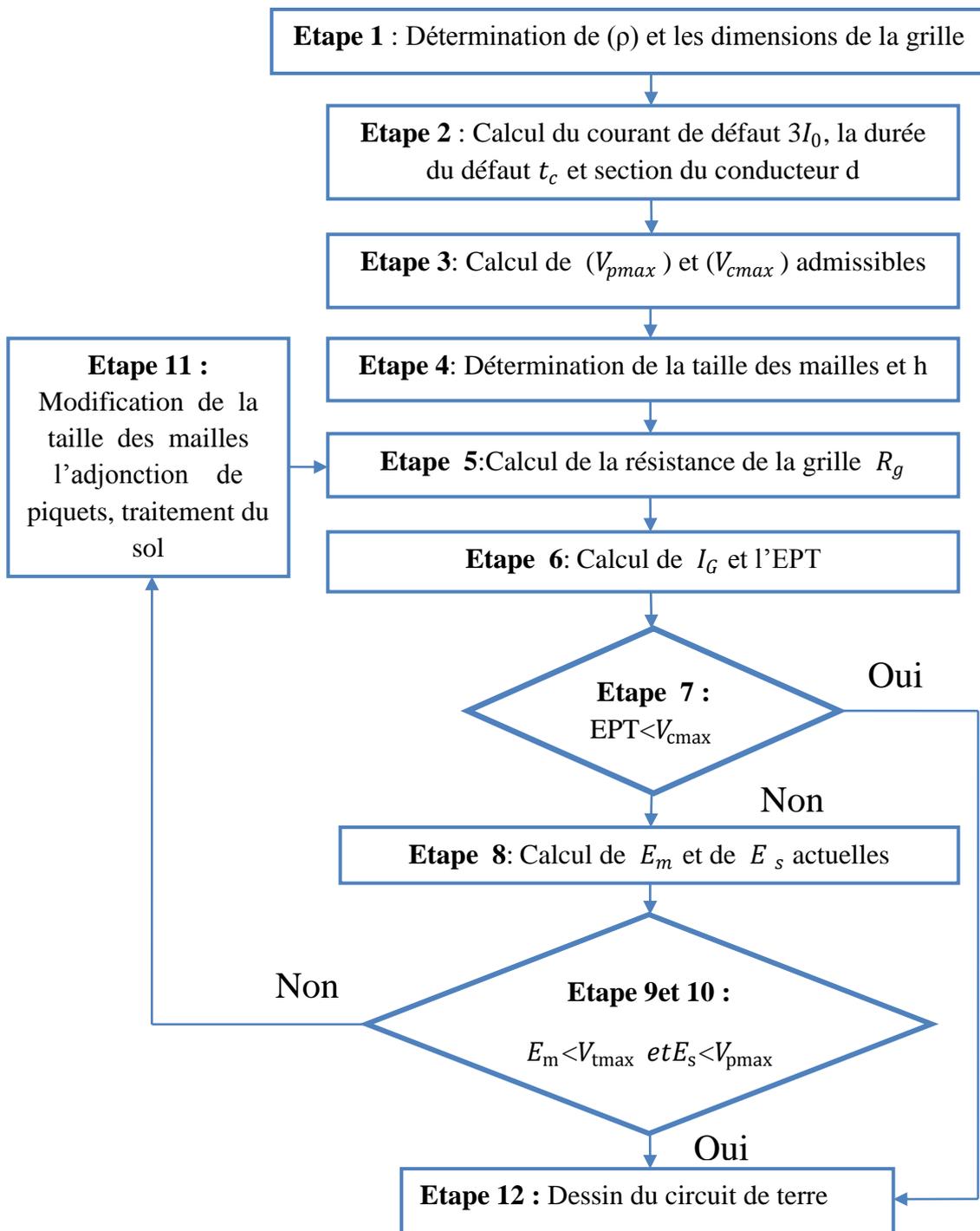


Figure I.8 : Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000 [IEE 00].

I.5.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.

II.1. Introduction

Les problèmes d'optimisation se posent dans de très nombreux domaines de recherche et d'application. Que ce soit pour l'aide à la décision, l'apprentissage automatique et la classification, la reconnaissance d'objets dans des images, que ce soit pour réguler et contrôler des systèmes de production, ou bien pour préciser les dimensions et paramètres de dispositifs matériels.

Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de variables, une fonction objectif et un ensemble de contraintes, Un problème d'optimisation consiste à rechercher la meilleure solution qui minimise ou maximise la fonctions objectifs du problème posé.

Parmi les méthodes utilisées pour l'optimisation, La méthode des abeilles que l'un des méthodes approchée (Méta-heuristique) qui nous permet de résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire.

II.2. Optimisation par Colonies d'abeilles Artificielle

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

II.3.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.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 scouts de chercher des sources possibles de nourriture.

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

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

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

II.4.1. 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].

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

Ou : $i = 1 \dots SN$, $j = 1 \dots D$. 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. Envoi des abeilles employées aux sites

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

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

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

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

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

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

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

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

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

II.4.3. Calcul de probabilité

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

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

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

II.4.4. Choix de la source à améliorer par les spectatrices

Dans l'algorithme ABC, un nombre réel aléatoire dans l'intervalle [0,1] est généré pour chaque source. Si la valeur de probabilité (P_i) dans l'équation (III.6) associé à cette source est supérieure à ce nombre aléatoire, alors l'abeille spectatrice produit une modification de la position de cette source de nourriture à l'aide de l'équation. (III.4). Après que la source est évalué, l'abeille spectatrice, soit elle mémorise la nouvelle position et oublie l'ancienne, soit elle garde l'ancienne. Si la solution X_i ne peut pas être améliorée, le compteur d'essais augmente de 1, sinon, le compteur est remis à 0. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les spectatrices soient réparties sur les sources alimentaires [AKA 10].

III.4.5. Critère pour abandonner une source : Limite et production de scoute

Dans un cycle complet, après les phases des abeilles employés et des abeilles spectatrices, l'algorithme vérifie pour voir si une source est épuisée pour l'abandonner. Afin de décider si une source est abandonnée, les compteurs qui ont été mis à jour lors de la recherche sont utilisés. Si la valeur du compteur est supérieure au paramètre de commande de l'algorithme ABC, appelée "Limite ", alors la source associée à ce compteur est supposée

épuisée et doit être abandonné. La source abandonnée par son abeille est remplacée par une nouvelle source de nourriture découverte par la scoute, ce qui représente le mécanisme de rétroaction négative et la propriété de fluctuation dans l'auto-organisation de ABC. L'action abandonner la source et charger une scoute de trouver une nouvelle source est simulée par le remplacement de la solution abandonnée par une solution produite d'une façon aléatoire. Cette opération peut être définie par (III.3). Dans l'ABC de base, on suppose que seule source puisse être épuisée dans chaque cycle, et une seule abeille peut être une scoute. Si plus d'un compteur dépasse la valeur "limite", l'un des maxima pourrait être choisi par programme [AKA 10].

II.5. 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 :

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

D est la dimension de la fonction objectif

- Le nombre d'abeilles employées

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

- Le nombre d'abeilles spectatrices

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

- Le nombre d'abeilles scoutes

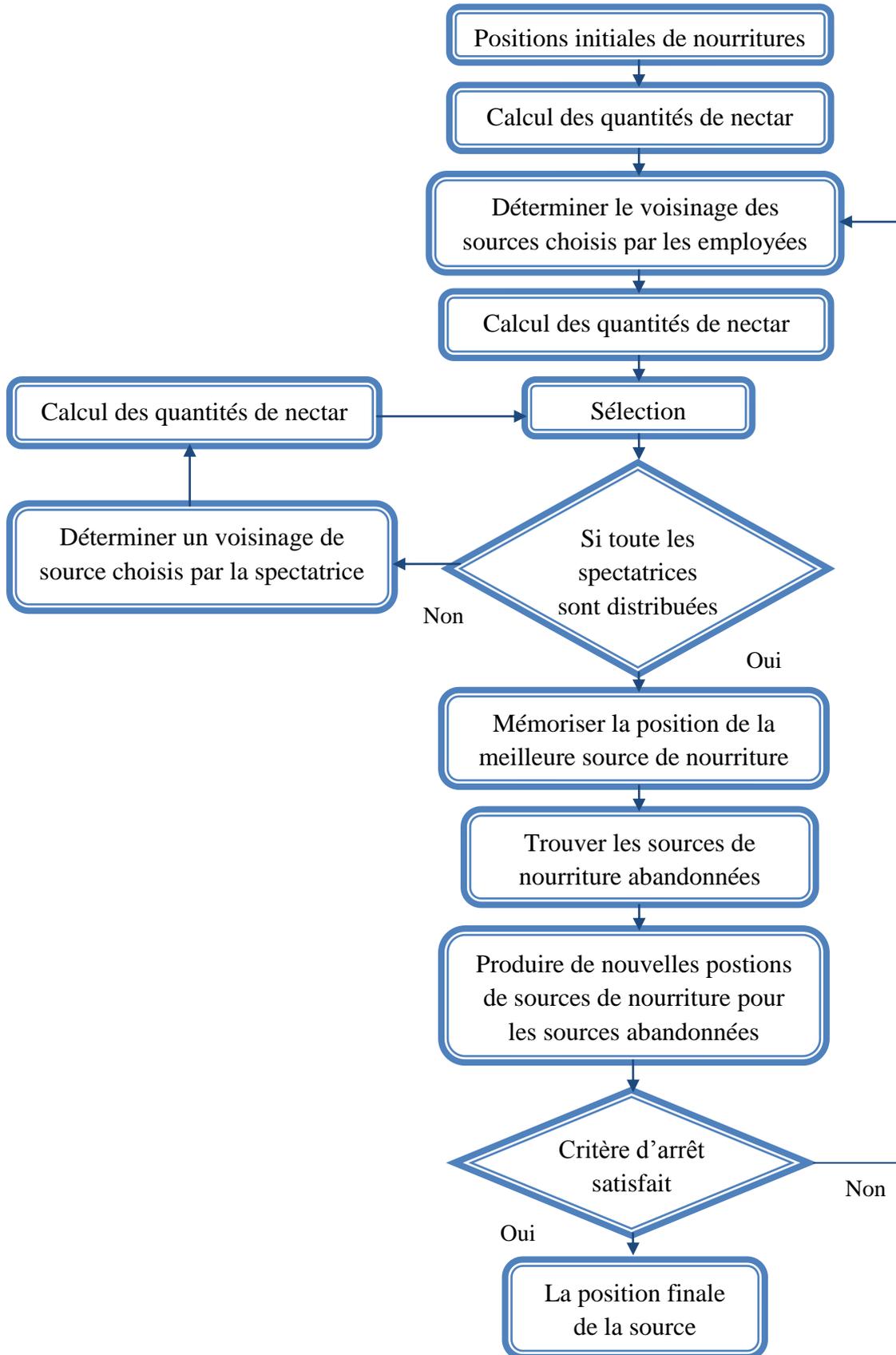
Chaque abeille employée qui atteint la limite de tentatives d'amélioration sans succès, est convertie en scoute pour explorer de nouveaux sites

II.6. Etapes de l'algorithme ABC

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

- Initialisation [KAR 10]
 - 1: de $i = 1$ à $SN/2$ faire
 - 2: de $j = 1$ à D faire
 - 3: Générer des solutions X_i à l'aide de (III.3)
 - 4: fin
 - 5: fin
- Phase d'Abeilles Employées [AKA 10]
 - 1: de $i = 1$ à $SN/2$ faire
 - 3: Production de nouvelles sources de nourriture a l'aide de (III.4)
 - 4: Evaluer la qualité de v_i .
 - 5: Processus de sélection entre v_i et X_i
 - 6: Si X_i n'est pas amélioré $L_i = L_i + 1$, sinon $L_i = 0$.
 - 7: fin
- Calcul de probabilité à l'aide de la formule (III.6)
- Phase d'Abeilles Spectatrices [AKA 10]
 - 1: $t = 0, i = 1$
 - 2: répéter
 - 3: Si $N_{\text{aléatoire}}[0,1] < P_i$ alors
 - 4: $t = t + 1$
 - 6: Production de nouvelles sources de nourriture a l'aide de (III.4)
 - 8: Processus de sélection entre v_i et X_i
 - 9: Si X_i n'est pas amélioré $L_i = L_i + 1$, sinon $L_i = 0$.
 - 10: $i = i + 1$
 - 11: fin
 - 13: jusqu'à $t = SN/2$
- Phase d'Abeille Scoute
 - 1: Si $\max(L_i) > \text{Limite}$ alors
 - 2: Remplacer X_i par une nouvelle source à l'aide de (III.3).
 - 3: fin

La figure (III.1) illustre l'organigramme de l'algorithme ABC :



II.7.conclusion

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

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

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

III.1. Introduction

Ce chapitre présente des applications des algorithmes ABC, 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].

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 (III.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 (III.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 :

Matière	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

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

$$E_t < \alpha v_{tmax} \tag{III.2}$$

$$E_p < \alpha v_{pmax} \tag{III.3}$$

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

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

E_p : tension de pas (V) ;

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

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

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

Les contraintes concernant les tensions de pas et de contact sont représentées par une fonction de pénalité h . Cette dernière est introduite dans la fonction objectif f . L'expression de h est donnée par :

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

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

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

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

Dans ces conditions, quatre cas peuvent se présenter :

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

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

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 de base, la fonction fitness est donnée par :

$$\text{Fitness } (N_x, N_y, N_p, L_p, h_s, d) = \frac{1}{F(x)} = \frac{1}{f(x)+h} \quad (\text{III.7})$$

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 400 pour l'ouvrage énergétique de Labreg .

III.4. Applications et validation (Ouvrage énergétique de Labreg)

Dans cette section, nous allons effectuer une application pour la technique d'optimisation Colonie d' Abeilles Artificielles, on choisit l'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 (III.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	400

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

III.4.1. Optimisation par ABC

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

$$\text{Fitness}_{\text{moyenne}}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{\text{SN}} \text{Fitness}(k)}{\text{SN}} \quad (\text{III.8})$$

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.

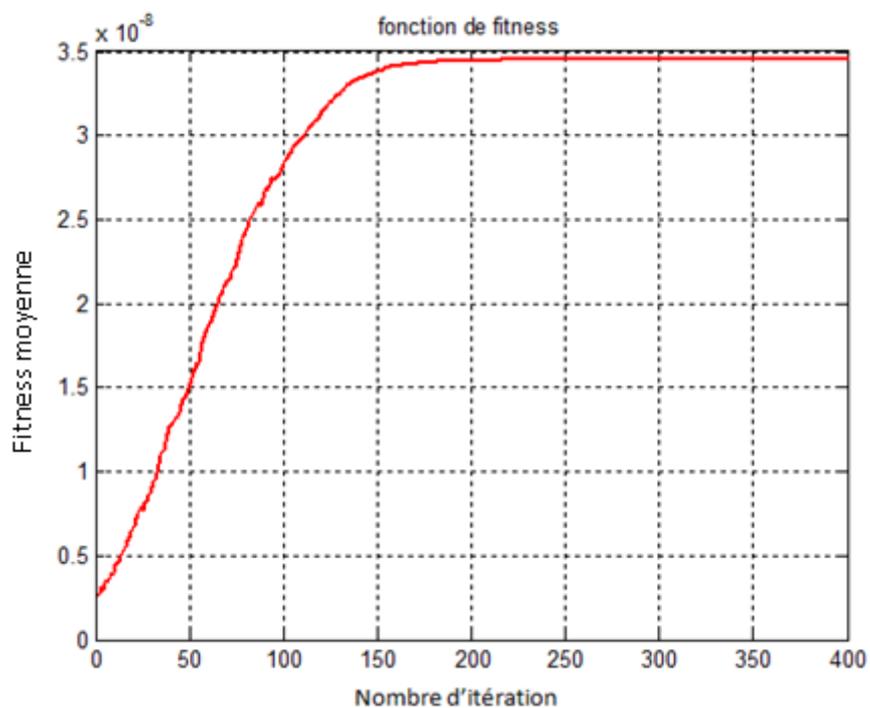


Figure III.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations

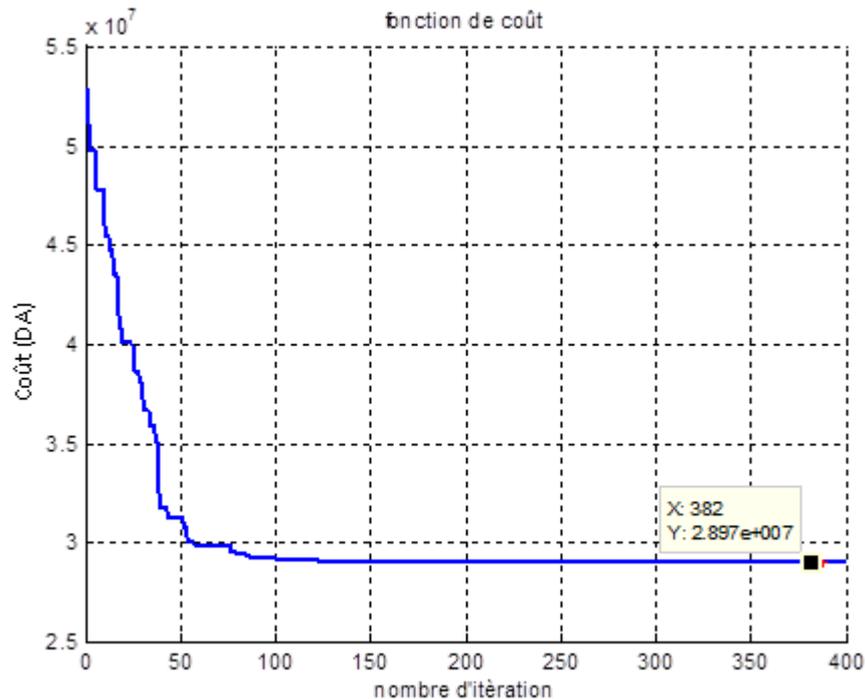


Figure III.2 : Courbe de convergence du coût

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

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

Les paramètres différents optimaux obtenus par l'algorithme ABC sont présentés dans le tableau (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)	0,655
Le coût de l'installation (DA)	28.968.969, 78

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

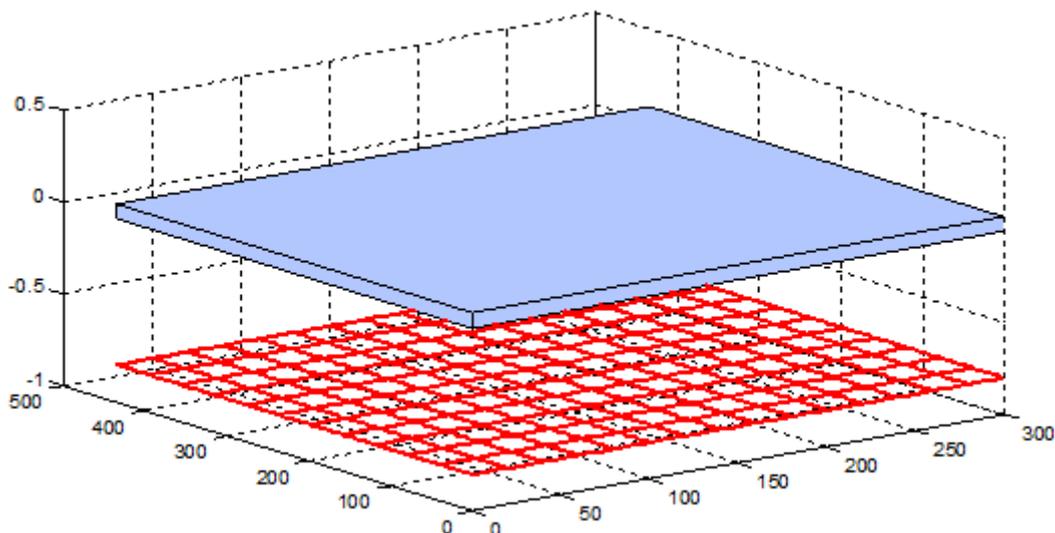


Figure III.3 : Topologie de la grille

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

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

La tension de maille E_t (V)	136,9
La tension de pas E_p (V)	36,3

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

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.4.2. 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 (III.6). A l'exception de la tension de pas, où CYMGrd présente une valeur légèrement plus petite à celle que trouvée par l'algorithme ABC basique, les autres paramètres sont proches, ce qui valide l'algorithme élaboré.

Le facteur de réduction	0,642779
La tension de contact admissible (V)	796,73
La tension de pas admissible (V)	2694,78
Le courant maximum s'écoulant dans la grille (A)	14900
La résistance de la grille (Ω)	0,04036
L'élévation du potentiel de terre EPT (V)	616,89
Le potentiel de surface (V)	583,58
La tension de maille E_t (V)	146,13
La tension de pas E_p (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 $E_s = 583,58 \text{ V}$, ne dépasse pas l'élévation du potentiel de terre = $616,89 \text{ V}$

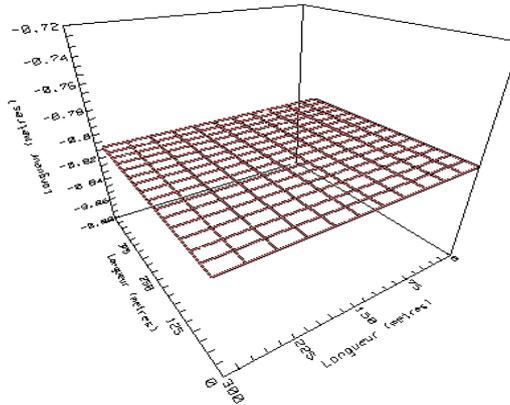


Figure III.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D

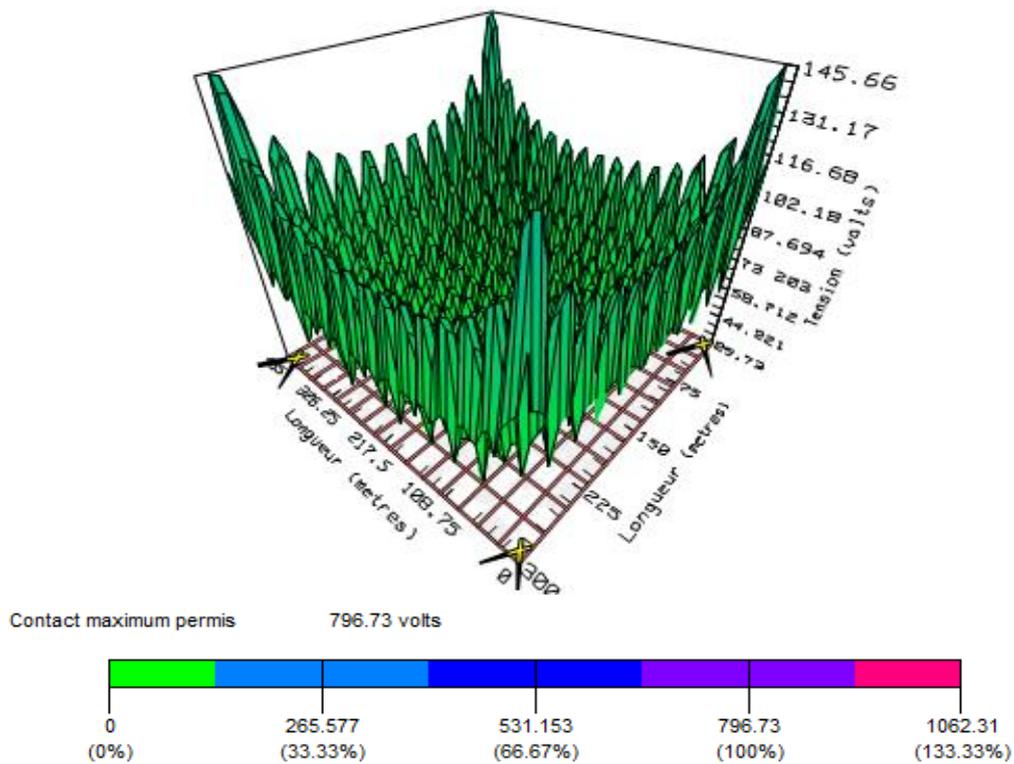


Figure III.5 : Diagramme de contour de potentiel de contact

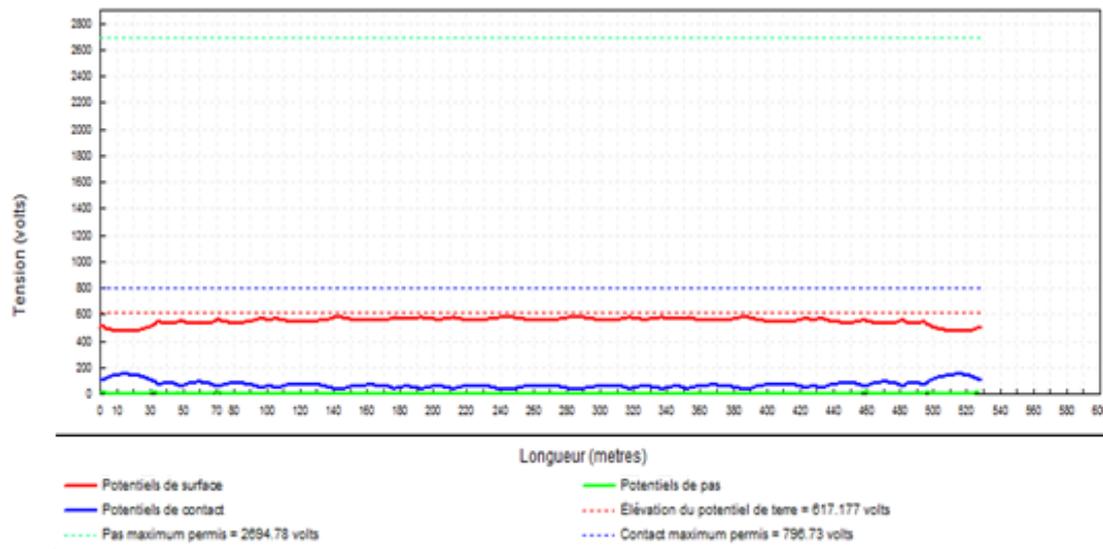


Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons optimisé un système par l'algorithme basé sur la technique de colonie d'abeilles artificielles. Il ressort de cette étude les conclusions suivantes :

- l'algorithme ABC de base est robuste. Cette robustesse est due à l'exploitation intensive des solutions.
- L'algorithme ABC explore plus d'espace de recherche.
- La fitness moyenne de la technique ABC est toujours meilleure que la fitness moyenne précédente, ce qui résulte un avancement vers l'optimum global plus stable et plus rapide.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail, consiste à optimiser les systèmes de mise à la terre d'un ouvrage électrique algérien. Il s'agit de l'ouvrage énergétique de Labreg. Pour cela, un algorithme, de Colonie d'Abeille Artificielle (Artificial Bee Colonies, ABC) a été développé. Une telle optimisation a été effectuée en minimisant la fonction objectif de coût, incluant le nombre et la longueur des conducteurs parallèles et verticaux, le diamètre des conducteurs, l'épaisseur de la couche superficielle, les contraintes sur les tensions de pas et de contact ainsi que l'espacement entre les électrodes. Les contraintes ont été introduites dans la fonction objectif en termes de pénalité.

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

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 06] Chouteau M. & Giroux B., « Géophysique appliquée II : Méthodes électriques », Notes de cours, Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 148, 2006.

[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.

[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.

[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.

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

Bibliographies

[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.

[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.*

[NEZ 13] Nezhad N. K., Fallahi M. H., Dozein M. G., « An optimal design of substation grounding grid considering economic aspects using particle swarm optimization », *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 6, (12), pp. 2159-2165, 2013.

[NUZ 09] Nzuru N. J. P., « Contribution à l'Analyse et à la Réalisation des Mises à la Terre des Installations Electriques dans les Régions Tropicales », *Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009.*

[NZU 09] Nzuru N. J. P., « Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales ». *Ph.D. Thesis, Belgique, Liège University, Février, 2009.*

[PIE 14] PIERRAT, L., « Performance Assessment And Modeling Of Grounding Grid », *Université Bulletin–ISSUE No.16- Vol. (1), Fevrier, 2014.*

[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 (IJESSET)*, 1, (2), pp. 69-76, 2012..