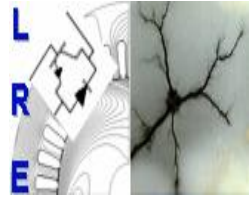




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**BENDEKKICHE Nidal eddine**

Intitulé

# Optimisation des Systèmes de mise à la terre par Algorithme Génétique

Directeur du mémoire :

TEGUAR Majid                      Professeur                      ENP

Jury :

R. IBTIOUEN                      Professeur                      ENP  
O.TOUHAMI (Président)                      Professeur                      ENP  
S. MEKHTOUB                      Professeur                      ENP

**ENP 2013**

## Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir prêté la vie, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je voudrais remercier notre promoteur M.TEGUAR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour ces précieux conseils, son suivi constant et pour nous avoir laissé la liberté dans la réalisation de ce travail, sans oublier les efforts qui a fait afin de m'encadrer et je le remercie surtout pour ses qualités humaines.

Mes remerciements et grâces à "o c'ho kng."o gu'co ku gv'tous ceux qui ont contribués de loin ou de proche à l'amélioration de ce travail.

N. BENDEKKICHE

## ملخص:

يقدم هذا العمل , مساهمة في تحديد الأمثلية لنظم التأريض من أجل العثور على التكلفة الأمثل مع مراعاة كفاءة المنشأة من حيث سلامة الأشخاص و التجهيز المستعمل. للقيام بذلك قمنا بتطوير تقنية مستعملة في تحديد الأمثلية. هذه التقنية تتمثل في الخوارزميات الجينية. من أجل هذا تم تنفيذ البرنامج القائم على هذه التقنية تحت البيئة (MATLAB (R-2009 مع الأخذ بعين الاعتبار مراحل التصميم و التوصيات الموافقة ل IEEE 80-2000 و عليه تم التطبيق على كل من المنشأة المستوحاة من IEEE 80-2000 اضافة محطة المحولات الكهربائية الواقعة في عين الملح بولاية مسيلة. قمنا بمواجهة النتائج المتحصل عليها بتلك التي وجدناها باستخدام CYMGrd. تحصلنا على توافق جيد بين النتائج.

## Résumé :

Ce travail, présente une contribution à l'optimisation des systèmes de mise à la terre afin 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. Pour cela, nous avons développé une technique d'optimisation basée sur les Algorithmes Génétiques. L'implémentation de programme basé sur cette technique a été faite sous environnement MATLAB (R-2009) et ce en tenant compte de la procédure de conception selon IEEE 80-2000. Nous nous sommes intéressés, lors de l'optimisation, au site inspiré de la norme IEEE80-2000 et au poste de transformation de AIN EL MELH situé à la Wilaya de M'Sila. Les résultats ainsi obtenus ont été confrontés à ceux trouvés en utilisant le code de calcul CYMGrd. Une bonne concordance a été obtenue.

**Mots clés :** Mise à la terre, Optimisation, Algorithmes Génétiques, Fonction objectif, Réseau de terre, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grille, Piquets.

## Abstract

This work, 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 genetic algorithms. The implementation of the program based on this technique has been developed under (R-2009) MATLAB environment, taking into account the design procedure according to IEEE 80-2000. We were interested in the optimization, to the grounding network inspired from the IEEE 80-2000 and the substation of AIN EL MELH (W.M'sila). The results thus obtained were confronted to those found using the calculation code CYMGrd. A good concordance was obtained.

**Key words :** Grounding, Optimization, genetic algorithms, objectif function, Grounding network, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grounding grid, Rods.

# Table des Matières

Résumé.....	iii.
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Introduction.....	1

## Chapitre I : Généralités sur la mise a la terre

I.1 Mise à la terre.....	2
I.2 Masse.....	2
I.3 Terre de référence.....	3
I.4 Tensions de sécurité.....	3
I.4.1 Tension de contact.....	3
I.4.2 Tension de pas.....	4
I.4.3 Tension de maille.....	4
I.4.4 Tension transféré.....	4
I.4.5 Elévation du potentiel de terre (EPT) .....	5
I.5 Objets et éléments de mise à la terre.....	5
I.5.1 Prises de terre des masses.....	5
I.5.2 Prises de terre du neutre.....	5

## Chapitre II : Les Clgorithmes I énétiqes

II.1 Etapes de l’algorithme génétique .....	8
II.2 Opérateurs génétiques.....	8
II.2.1 Opérateur de croisement.....	9
II.2.2 Opérateur de mutation.....	10
II.2.3 Opérateur de sélection.....	10
II.3 Critère d’arrêt.....	11
II.4 Convergence de l’algorithme génétique et ajustement des paramètres.....	11

## **Chapitre III : Optimisation des systèmes de mise à la terre par algorithme génétique**

III.1 Fonction objectif.....	13
III.2 Gestion des contraintes .....	14
III.3 Fonction fitness.....	15
III.4 Codage des données.....	15
III.5 Croisement.....	16
III.6 Mutation.....	16
III.7 Sélection.....	16
III.8 Site inspiré de la norme IEEE 80-2000.....	16
III.8.1 Validation des résultats obtenus par AG en utilisant CYMGrd.....	21
III.9 Poste de transformation 60 / 30 kv de AIN EL MELH.....	23
III.9.1 Validation des résultats obtenus par AG en utilisant CYMGrd.....	27
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>30</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>31</b>

# Liste des Figures

## Chapitre I : Généralités sur la mise a la terre

Figure I.1 : Tension de contact.....	3
Figure I.2 : Tension de pas.....	4
Figure I.3: Représentation des différentes tensions de sécurité.....	5

## Chapitre II : Les Clgorithmes I énétiqes

Figure II.1 : Organigramme d'un AG standard.....	8
Figure II.2 : Croisement avec un point.....	10
Figure II.3 : Exemple d'une mutation.....	10

## Chapitre III : Optimisation des systèmes de mise à la terre par algorithme génétique

Figure III.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre itérations. ....	18
Figure III.2 : Courbe de convergence du coût.....	18
Figure III.3 : Topologie de la grille.....	20
Figure III.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D.....	22
Figure III.5 : Diagramme de contour du potentiel de contact.....	22
Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	23
Figure III.7 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations.....	25
Figure III.8 : Courbe de convergence du coût.....	25
Figure III.9 : Topologie de la grille.....	26
Figure III.10 : Topologie de la grille en 3D.....	28
Figure III.11 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	29
Figure III.12 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	29

# Liste des Tableaux

III.1 : Caractéristiques du poste de transformation 115/13 kV.....	17
III.2 : Données du poste de transformation à insérer dans le programme AG.....	17
III.3 : Valeurs obtenues après l'exécution du programme d'optimisation par AG.....	19
III.4: Valeurs des principaux paramètres électriques du système optimal obtenus par l'AG.....	20
III.5 : Paramètres électriques essentiels calculés en utilisant CYMGrd.....	21
III.6 : Les données du poste de transformation de AIN EL MELH.....	24
III.7 : Valeurs optimales obtenues après exécution du programme d'optimisation par AG.....	26
III.8 : Principaux paramètres du système optimisé obtenus par l'AG.....	27
III.9 : Principaux paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd.....	28

# Introduction

Le système de mise à la terre, ou le raccordement intentionnel d'une masse ou d'un conducteur neutre à la terre, a pour but de maintenir les tensions de sécurité, de pas et de contact, dans des limites prévisibles [1]. En effet, un tel système doit recevoir l'inspection périodique et l'entretien, si nécessaire, pour maintenir son efficacité. L'entretien continu ou périodique est facilité par la bonne conception et le bon choix des matériaux et techniques appropriées d'installation. Par conséquent, la réparation minimale est nécessaire pour maintenir l'efficacité durant toute la vie de la structure de terre [2].

Dans le cas des basses fréquences (fréquences industrielles), les réseaux de terre sont caractérisés par des résistances. La résistance d'un réseau de terre et la répartition du potentiel dans le sol dépendent des caractéristiques électriques du terrain, spécialement de sa résistivité. C'est pourquoi la conception du réseau de terre d'une installation électrique doit débiter par une étude de la nature du sol sur lequel il sera réalisé [3].

Plusieurs logiciels et code de calcul ont été élaborés pour l'analyse des systèmes de mise à la terre [4,5]. Parmi eux, CYMGrd qui a été développé pour aider les ingénieurs à optimiser la conception de leurs nouvelles grilles et à renforcer les grilles de toute géométrie déjà existantes, grâce à des outils intégrés de repérage de zones à risque ou dangereuses et à sa facilité d'utilisation [6]. En plus, et grâce au développement d'outils de modélisation, d'algorithmes et de moyens de calcul de plus en plus rapides et performants, d'autres techniques d'optimisation basées sur l'intelligence artificielle ont été développées. Le but de ce travail, entrepris dans le cadre de Master II, 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.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- ✓ Chapitre I : Ce chapitre regroupe des généralités sur la mise à la terre des installations électriques et des définitions relatives à ce domaine.
- ✓ Chapitre II : Présente la technique d'optimisation par Algorithmes Génétiques, ainsi que le principe de fonctionnement et les paramètres caractéristiques.
- ✓ Chapitre III : Consacré à l'application de la technique d'optimisation par Algorithme Génétique sur deux ouvrages énergétiques considérés.

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



# Chapitre I

## Généralités sur la mise à la terre

---

### I.1 Mise à la terre

C'est l'ensemble des moyens et des mesures par lesquelles un élément d'un circuit électrique, une pièce métallique d'un équipement électrique (partie conductrice accessible) ou une pièce conductrice placée au voisinage d'une installation électrique sont reliées à la terre.

La mise à la terre d'une installation électrique consiste à relier les masses ou le neutre de celle-ci à une prise de terre par l'intermédiaire d'un ou plusieurs conducteurs de terre. La prise de terre est constituée d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux.

Pour une installation ou une structure de faible étendue, on emploie l'expression « prise de terre », en réservant le terme « réseau de terre » aux installations importantes telles que celles des postes électriques [7].

### I.2 Masse

La masse 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 [8].

La masse se distingue par les fonctions suivantes :

- Surface équipotentielle pour le système de commun d'alimentation de l'électronique ;
- Equilibrage du potentiel et protection contre les surtensions pour toutes les installations en métal, les installations électriques, les dispositifs parafoudre et la mise à la terre ;
- Fonction de protection pour les personnes : le potentiel de la masse est maintenu à un niveau tellement bas par rapport au potentiel terrestre qu'une personne ne peut pas se blesser en touchant les pièces de l'installation ;

- Dérivation des surtensions (en cas de dysfonctionnement du système, de foudre) [15].

### 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 [4].

### I.4 Tensions de sécurité

Le fait de toucher un objet relié à une prise de terre ou de se trouver à proximité de celle-ci au moment précis où elle écoule un courant de défaut peut, dans certaines conditions, constituer un risque.

Le risque d'électrocution est lié non à la valeur de l'élévation de potentiel de terre, mais au courant traversant le corps.

#### I.4.1 Tension de contact

La tension de contact (ou de toucher), selon la norme IEEE, est la différence de potentiel entre la main d'une personne, touchant une structure mise à la terre, et son pied (Figure I.1) On distingue deux types de contacts : le contact direct et le contact indirect [9].

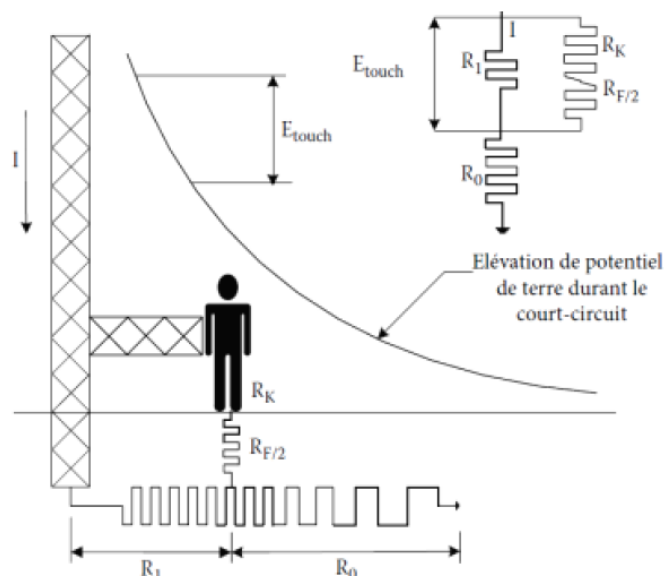


Figure I.1 : Tension de contact

### I.4.2 Tension de pas

La tension de pas est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'environ 1 m correspondant à un pas humain, dans la direction du gradient de potentiel maximum (Figure I.2) [10].

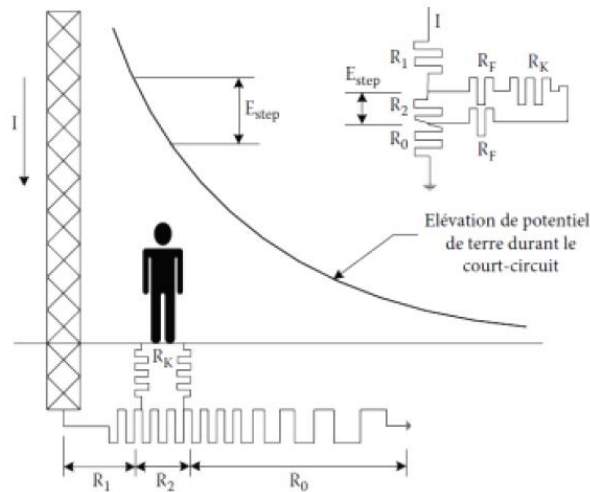


Figure I.2 : Tension de pas

### I.4.3 Tension de maille

Tension de maille ( $E_m$ ) est la différence de potentiel de surface maximale entre un conducteur de la grille et un point entre deux conducteurs de cette grille. Il pourrait également être la tension de contact maximale trouvée à l'intérieur de la grille de sol [10].

### I.4.4 Tension transféré

Un cas spécial de la tension de contact dans laquelle une personne dans une sous-station pour une certaine distance touche un conducteur relié à la grille de mise à la terre, à l'aide d'un conducteur métallique référencé par terre. Ceci peut être une tension de contact très élevée [9]. La figure I.3 suivante représente les tensions de sécurité :

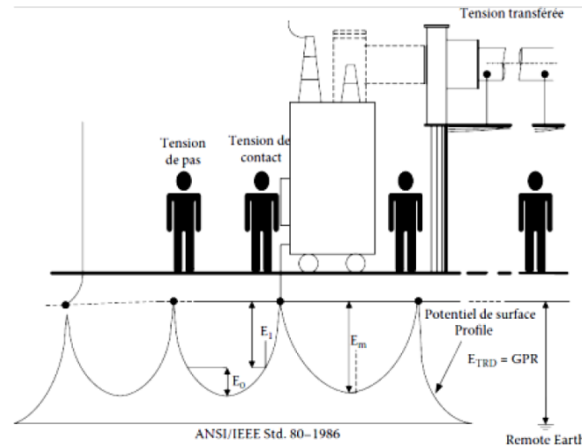


Figure I.3: Représentation des différentes tensions de sécurité

### I.4.5 Elévation du potentiel de terre (EPT)

Le potentiel électrique maximum qu'une grille de terre peut atteindre relativement à un point au sol éloigné assumé pour être au potentiel de la terre à distance. Cette tension, EPT, est égale au courant maximum de la grille multiplié par la résistance de la grille. [9]

## I.5 Objets et éléments de mise à la terre

### I.5.1 Prises de terre des masses

La prise de terre de masse a pour but essentiel la protection des personnes intervenantes ou s'approchant au voisinage des installations.

Ces personnes doivent être protégées contre les risques dont ils résulteraient par le contact simultané entre deux points portés à des potentiels différents. Il faut donc fixer à un même potentiel, celui de la terre, l'ensemble des parties métalliques d'une installation.

Les mises à la terre des éclateurs et parafoudre sont destinées à assurer la protection du matériel en évitant les conséquences sur l'appareillage (isolateurs, transformateurs, disjoncteurs) des amorçages entre circuit électrique et masses provoqués par des surtensions d'origine atmosphérique [7].

### I.5.2 Prises de terre du neutre

Pour cela deux aspects sont considérés [8] :

**Aspect « protection des personnes »**

La protection des personnes contre les courants indirects doit être assurée par la mise à la terre, directement ou par l'intermédiaire d'une impédance de faible valeur du point neutre des ouvrages.

**Aspect «amplitude de court circuit monophasé »**

L'amplitude maximale du courant de court circuit monophasé dépend du mode de mise à la terre du neutre. Les réseaux THT sont exploités à neutre directement à la terre. Lorsque le poste comprend plusieurs transformateurs, on s'attache à réaliser la condition  $Z_d < Z_o < 3Z_d$  où  $Z_d$  et  $Z_o$  sont respectivement les impédances directes et homopolaires du réseau, en reliant une partie seulement des neutres des transformateurs en service, ou en intercalant une inductance dans la mise à la terre. Dans ce cas, le courant de court circuit monophasé est compris entre 0,6 et 1 fois le courant de court circuit triphasé.

# Chapitre II

## Les Algorithmes Génétiques

---

Les Algorithmes Génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été initialement développés par John Holland (1975). C'est au livre de Goldberg (1989) que nous devons leur popularisation. Leurs champs d'applications sont très vastes [11].

L'algorithme génétique est une classe d'algorithme stochastique inspiré du processus de l'évolution observé dans la nature. Pour ce faire, un système artificiel contenant une population d'individus représentée par des chromosomes est créé. Les meilleurs individus ont plus de chances de survivre et par conséquent de transmettre leurs gènes à la génération suivante. Un AG opère sur une population d'individus codés par des chaînes de symboles appelées chromosomes. Ces chaînes sont munies d'une fonction d'évaluation appelée fonction fitness, qui correspond à une mesure d'adaptation au milieu. Dans notre cas, cette mesure d'adaptation au milieu correspond à la fonction de coût.

Un Algorithme Génétique (AG) exécute une multitude d'itérations où chaque itération consiste à tirer au sort deux parents selon une distribution favorisant les individus les plus adaptés. Un opérateur de croisement combine ensuite les deux chromosomes parent pour construire deux enfants, pouvant à leur tour être modifiés aléatoirement par un opérateur de mutation. Les enfants servent à construire la génération suivante ou remplacent directement des individus de la population. Le processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt, défini par l'utilisateur, soit vérifié.

## II.1 Etapes de l'Algorithme Génétique

L'organigramme de la figure II.1 illustre les étapes à suivre lors de l'application d'un Algorithme Génétique.

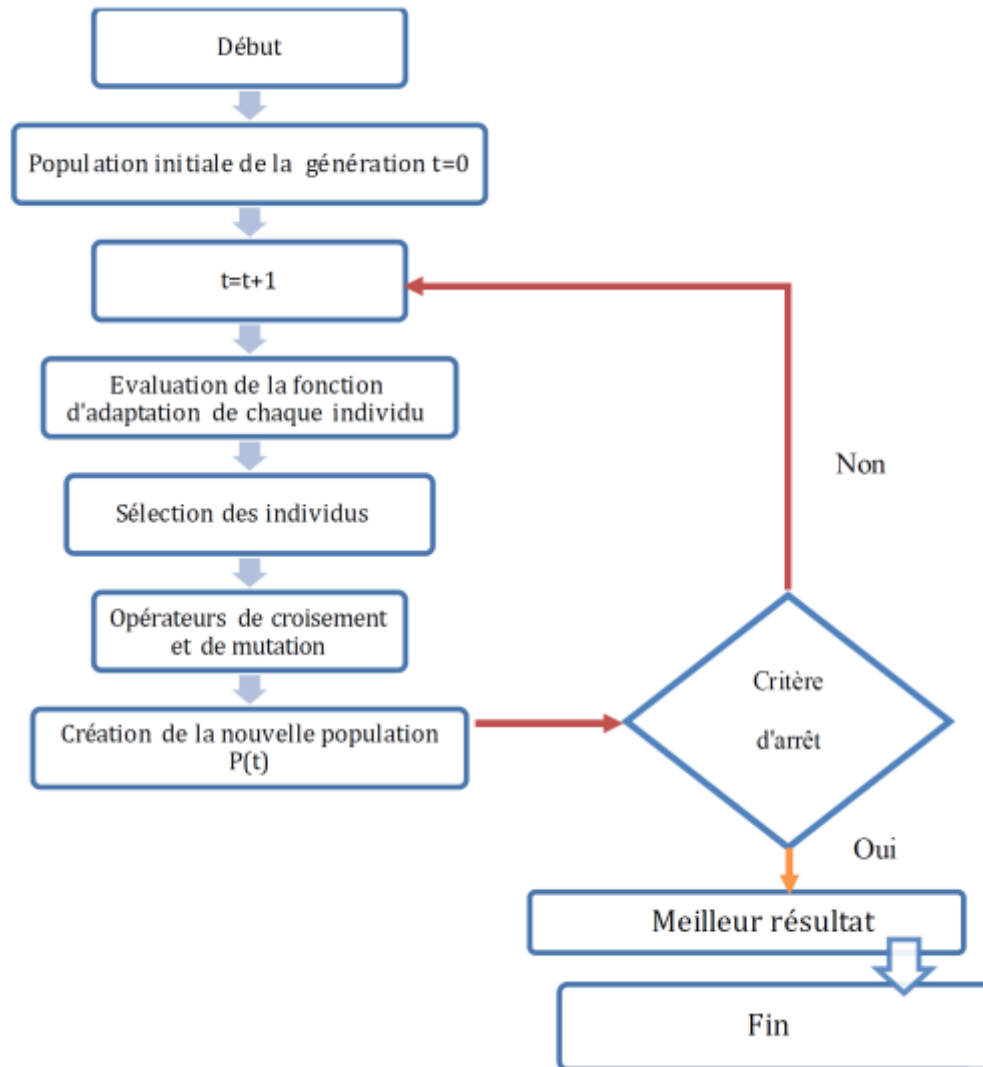


Figure II.1 : Organigramme d'un AG standard

## II.2 Opérateurs génétiques

Les deux principaux opérateurs utilisés dans les Algorithmes Génétiques sont le croisement et la mutation. Le croisement réalise une opération qui nécessite deux parents. La mutation est une opération unaire, utilisée pour introduire une faible variation dans la solution. Les opérateurs génétiques se distinguent suivant le type de codage, binaire ou réel.

Les parents sélectionnés sont introduits dans le bassin de reproduction où ils sont choisis aléatoirement pour subir des transformations par opérateurs génétiques.

### II.2.1 Opérateur de croisement

Le croisement utilisé par les Algorithmes Génétiques est la transposition informatique du mécanisme qui permet, dans la nature, la production de chromosomes qui héritent partiellement des caractéristiques des parents. On applique le croisement séquentiellement à des couples de parents pris au hasard dans la population.

Si  $P > P_c$ , le croisement n'aura pas lieu et les parents sont recopiés dans la nouvelle génération.

Si  $P < P_c$ , le croisement se fait et les chromosomes des parents sont croisés pour donner deux enfants qui remplaceront leurs parents dans la nouvelle génération.

$P$  : valeur aléatoire de probabilité prenant valeur de l'intervalle  $[0;1]$ ;

$P_c$  : Probabilité de croisement.

On peut noter que le nombre de points de croisements ainsi que la probabilité de croisement  $P_c$  permettent d'introduire plus ou moins de diversité. En effet, plus le nombre de points de croisements sera grand, plus la probabilité de croisement sera élevée, plus il y aura d'échange de segments, donc d'échange de paramètres, d'information. Plus le nombre de points de croisements sera petit et plus la probabilité de croisement sera faible, moins le croisement apportera de diversité [12]. On peut donc espérer, en combinant les caractéristiques des solutions performantes, obtenir des solutions encore plus performantes.

#### Croisement simple

Pour chaque couple, un point de croisement est choisi au hasard. Les composantes situées à gauche de ce point sont conservées et celles à droite sont échangées entre les deux individus. Un exemple de croisement simple est illustré sur la figure II.2.



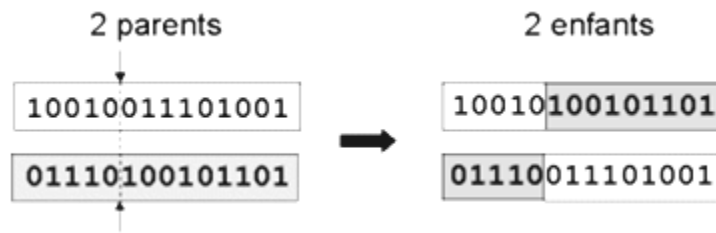


Figure II.2 : Croisement avec un point

### II.2.2 Opérateur de mutation

Cet opérateur consiste à changer la valeur d'un gène avec une probabilité  $P_m$  très faible. Cette probabilité peut être prise  $P_m = 1/L$ , où  $L$  est la longueur de la chaîne de bits codant le chromosome.

L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de la population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur", il introduit du "bruit" au sein de la population [12].

Le croisement n'est effectué que lorsqu'une probabilité aléatoire  $P$  est inférieure à  $P_m$ . Dans le cas contraire, le fils de la génération suivante sera lui-même le parent de la génération actuelle.

L'opération de mutation peut être appliquée sur un seul bit de l'individu, sur plusieurs points distincts ou sur tous les bits de l'individu (ce dernier cas est quasiment impossible surtout lorsque la longueur de l'individu est grande, si ça se produit ça veut dire que la probabilité attribuée à chaque bit est inférieure à  $P_m$  qui est lui-même de valeur faible). Cela dépend de la façon dont l'opération est programmée.

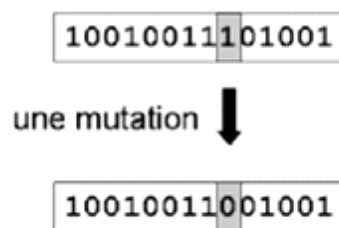


Figure II.3 : Exemple d'une mutation

### II.2.3 Opérateur de sélection

La sélection joue le rôle de filtre de la population : les meilleurs individus sont retenus où leur nombre est accru et les plus faibles sont éliminés où leur nombre est diminué.

Pratiquement il faudrait que chaque individu soit retenu ou écarté en fonction de sa fitness. Pour ce faire, il existe de nombreuses façons de procéder [13].

### **La sélection par Roue de Roulette (Roulette wheel)**

C'est le mode de sélection le plus classique introduit dès l'origine par Goldberg. Chaque individu de la population se voit attribué une probabilité d'être choisie égale à sa fitness divisée par la fitness totale. Les probabilités sont cumulées de façon que chaque individu se voit attribué un sous-intervalle propre de  $[0;1]$  de longueur égale à sa probabilité. Ensuite, on génère  $N_i$  nombres aléatoires ( $i=1, \dots, m$ ) entre 0 et 1 et les individus dont les intervalles contiennent les  $N_i$  sont sélectionnés. Certains individus "chanceux" et/ou de grande fitness sont retenus plusieurs fois. Les non-retenues disparaissent de la nouvelle population.

## **II.3 Critère d'arrêt**

Le critère d'arrêt indique que la solution est suffisamment approchée de l'optimum. Plusieurs critères d'arrêt de l'algorithme sont possibles. On peut arrêter l'algorithme après un nombre de générations suffisant pour que l'espace de recherche soit convenablement exploré. Ce critère peut s'avérer coûteux en temps de calcul si le nombre d'individus à traiter dans chaque population est important.

L'algorithme peut aussi être arrêté lorsque la population n'évolue plus suffisamment rapidement. On peut aussi envisager d'arrêter l'algorithme lorsque la fonction d'adaptation d'un individu dépasse un seuil fixé au départ [14].

Comme les opérateurs génétiques utilisent des facteurs aléatoires, un AG peut se comporter différemment pour des paramètres et population identiques. Afin d'évaluer correctement l'algorithme, il faut l'exécuter plusieurs fois et analyser statistiquement les résultats.

## **II.4 Convergence de l'AG et ajustement des paramètres**

L'élaboration d'un Algorithme Génétique nécessite le réglage de certains paramètres. Ce réglage a une influence sur la convergence de l'Algorithme Génétique et les résultats obtenus. Cependant, il n'existe pas de règles spécifiques pour ajuster ces paramètres, ils sont souvent choisis de manière empirique. Quelques remarques sont alors à soulever [15]:

- Probabilité de croisement : La probabilité de croisement a une influence considérable sur la vitesse de convergence d'un Algorithme Génétique. Plus, elle est grande et plus elle favorise la recombinaison des individus tout en favorisant de tomber dans un optimum local. Les valeurs usuelles pour ce paramètre varient entre 0,6 à 0,95.
  
- Probabilité de mutation : Elle doit être assez faible par rapport à celle du croisement de manière à ne pas perturber l'évolution de l'algorithme. Une valeur élevée transformera l'algorithme en une recherche aléatoire. Alors qu'une valeur très faible rendra impossible l'extraction des optima locaux. Les valeurs usuelles pour ce paramètre varient de 0,001 à 0,2.
  
- Taille de la population : Augmenter la taille de la population permet d'augmenter sa diversité et réduit la probabilité d'une convergence prématurée vers un optimum local. Cependant, elle augmente le temps nécessaire pour converger vers les régions optimales de l'espace de recherche.

# Chapitre III

## Optimisation des systèmes de mise à la terre par Algorithme Génétique

---

Le principe de cette étude est de minimiser une fonction de coût d'un système de mise à la terre. Ce dernier est caractérisé par les conducteurs de la grille, piquets et couche superficielle. En s'inspirant des travaux antérieurs sur l'optimisation des réseaux de terre [16,17], la fonction objectif est proposée.

### III.1 Fonction objectif :

Nous proposons une fonction objectif à 6 variables. Ces derniers consistent 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), la longueur des piquets, le diamètre des conducteurs horizontaux et l'épaisseur de la couche superficielle.

L'expression de la fonction coût est donnée comme suit :

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

où :

$N_p$ : nombre de piquets;

$N_x$ : nombre de conducteurs horizontaux suivant x;

$N_y$ : nombre de conducteurs horizontaux suivant y;

$L_p$ : longueur des piquets (m);

$d$ : diamètre des conducteurs horizontaux (m);

- $e_s$  : épaisseur de la couche superficielle (m);  
 $C_p$  : coût d'un piquet (DA/m<sup>3</sup>);  
 $C_g$  : coût d'un conducteur horizontal (DA/m<sup>3</sup>);  
 $C_c$  : coût de la couche superficielle (DA/m<sup>3</sup>).

En se basant sur les recommandations de la norme IEEE 80-2000 [9] relatives 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 les 2 axes, compris entre deux valeurs limites : (i) minimale :  $D_{x\min} = D_{y\min} = 2,5$  m, (ii) maximale :  $D_{x\max} = D_{y\max} = 30$  m. Par ailleurs, nous avons choisi un espacement minimum  $D_p$  entre les piquets de terre de 5 m. Notons que la longueur des piquets de terre utilisés est généralement comprise entre 1,5 et 3,05 m [18,19].

### III.2 Gestion des contraintes:

Lors de la conception des réseaux de terre, les principaux paramètres à mesurer sont la tension de contact  $E_m$  et la tension de pas  $E_s$ . Ces deux grandeurs doivent être strictement inférieures aux valeurs maximales admissibles. Dans notre modélisation, nous avons pris comme contraintes :

$$E_m < 0,9 V_{T\max} \quad (\text{III.2})$$

$$E_s < 0,9 V_{S\max} \quad (\text{III.3})$$

où :

$E_m$  : tension de contact ou de maille (V);

$E_s$  : tension de pas (V);

$V_{T\max}$  : tension de contact maximale admissible (V);

$V_{S\max}$  : tension de pas maximale admissible (V);

Les expressions de calcul de ces différentes tensions ont été déjà exposées dans le chapitre II.

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 :

$$h = z_1 |V_{p\max} - E_p| + z_2 |V_{c\max} - E_c| \quad (\text{III.4})$$

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

Cette fonction de pénalité n'agirait que lorsque l'une des contraintes est violée. Le problème d'optimisation avec contraintes est transformé en un problème d'optimisation sans contraintes. En tenant compte de telles contraintes, la nouvelle fonction objectif  $F$  devient :

$$F(N_p, N_X, N_Y, L_p, d, e_s) = L_p N_p (Cp_i + Cp) \frac{\pi \cdot d^2}{4} + (Cg_i + Cg)(N_X L_Y + L_X N_Y) \frac{\pi \cdot d^2}{4} + e_s A (Cc_i + Cc) + z_1 |Vp_{max} - E_p| + z_2 |Vc_{max} - E_c| \quad (III.5)$$

Dans ces conditions, quatre cas peuvent se présenter :

$$F(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si } E_m < V_{Tmax} \text{ et } E_s < V_{smax} \\ f(x) + z_1 |Vp_{max} - E_p| & \text{si } E_s \geq V_{smax} \\ f(x) + z_2 |Vc_{max} - E_c| & \text{si } E_m \geq V_{Tmax} \\ f(x) + h(x) & \text{si } E_m \geq V_{Tmax} \text{ et } E_s \geq V_{smax} \end{cases} \quad (III.6)$$

$$x = (N_p, N_X, N_Y, L_p, d, e_s)$$

Rappelons que  $f(x)$  est la fonction objectif sans contraintes.

### III.3 Fonction fitness:

Chaque particule est estimée par la fonction fitness. Si la valeur de fitness de la particule est élevée, cette dernière est mieux adaptée. En tenant compte des deux contraintes, la fonction fitness peut être donnée par l'expression suivante :

$$Fitness(N_p, N_X, N_Y, L_p, d, e_s) = \frac{1}{F(x)} = \frac{1}{f(x) + h} \quad (III.7)$$

où :

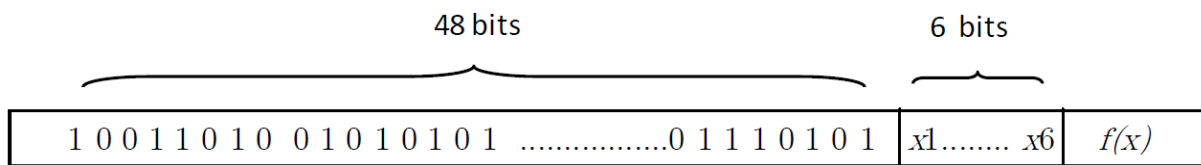
$F(x)$  est la fonction objectif avec contraintes.

### III.4 Codage des données

Les variables de la fonction objectif ; nombre de piquets, nombre de conducteurs horizontaux suivant la largeur de l'ouvrage (l'axe x), nombre de conducteurs horizontaux suivant la longueur de l'ouvrage (l'axe y), longueur des piquets, diamètre des conducteurs horizontaux et épaisseur de la couche superficielle, sont codés sous forme binaire de

chromosomes. Ce type de codage a pour avantage la création d'opérateurs de croisement et de mutation simples par des opérations de masque et des opérations booléennes. Le maximum de chaque variable peut se coder au minimum en 8 bits, donc la totalité pour 6 variables est 48 bits.

Six (6) autres bits à la droite de ces 48 bits sont loués pour les valeurs réelles des 6 variables ( $x_1, \dots, x_6$ ) et un 7<sup>ème</sup> bits pour la valeur de fitness  $f(x)$ .



### III.5 Croisement

La probabilité  $P_c$  de croisement prise dans notre algorithme est choisie égale à 0,9. Un tel choix est justifié par le fait que plus la probabilité est grande, et plus la recombinaison des individus est favorisée.

### III.6 Mutation

Pour ne pas perturber l'exécution de notre algorithme, nous avons choisi la probabilité  $P_m$  de mutation égale à 0,05. Une valeur élevée peut rendre la recherche de l'algorithme aléatoire. Par ailleurs, une valeur très faible rendra impossible l'extraction des optima locaux.

### III.7 Sélection

La sélection joue le rôle de filtre de la population. Nous avons choisi la sélection par Roue de Roulette vue sa simplicité et rapidité. Cette sélection est une roue de la fortune classique sur laquelle chaque individu est représenté par une portion proportionnelle à son adaptation. Nous effectuons ensuite un tirage au sort homogène sur cette roue. Pour éviter de perdre des gènes meilleurs, nous conservons l'individu optimal à une nouvelle population.

### III.8 Site inspiré de la norme IEEE80-2000 :

L'objectif principal est de trouver la forme carrée optimale de l'ouvrage en question, en présence d'un défaut dans le cas d'un transformateur 115 /13 kV raccordé en triangle - étoile. Les données de conception de ce réseau de terre sont montrées dans le tableau III.1.

Durée du défaut	0,5 s
Impédance de la séquence positive du système équivalent $Z_1$ - côté 115 kV	$4 + j10\Omega$
Impédance homopolaire du système équivalent $Z_0$ - côté 115 kV	$10 + j40\Omega$
Facteur de division du courant	0,6
Résistivité du sol	400 $\Omega.m$
Résistivité de pierres concassées (humide) $\rho_s$	2500 $\Omega.m$
Profondeur d'enfouissement de la grille	0,5 m
Superficie du site	70m×70m
Impédance du transformateur – côté 13kV	$0,034 + j1,014 \Omega$
Courant du défaut	3180 A

Tableau III.1 : Caractéristiques du poste de transformation 115/13 kV

En plus de la taille de la pollution et le nombre d'itérations, nous injectons, parmi tous les paramètres présentés dans le tableau précédent, les valeurs de la durée du défaut, du facteur de division du courant, de la résistivité du sol, de la résistivité de pierres concassées (humide), de la profondeur d'enfouissement de la grille et de la superficie du site dans nos programmes développés en utilisant les techniques AG et EP. Les valeurs ainsi adoptées sont présentés dans le tableau III.2.

La longueur du poste $L_x$ (m)	70
La largeur du poste $L_y$ (m)	70
Profondeur d'enfouissement de la grille (m)	0,5
Profondeur des piquets de terre (m)	0
Résistivité du sol ( $\Omega.m$ )	400
Résistivité de la couche superficielle ( $\Omega.m$ )	2500
Le courant de défaut (A)	3180
Facteur de décroissance $D_f$	1,026
Facteur de division du courant $S_f$	0,6
La durée de défaut (s)	0,5
La taille de la population initiale	100
Le nombre d'itérations	800

Tableau III.2 : Données du poste de transformation à insérer dans le programme AG



L'injection des paramètres du tableau précédent dans le programme élaboré, nous a permis d'obtenir à la fois l'évolution de la fitness moyenne de toute la population pour chaque itération et celle de la meilleure fitness. Ces variations sont représentées aux Figures III.1 et III.2 respectivement.

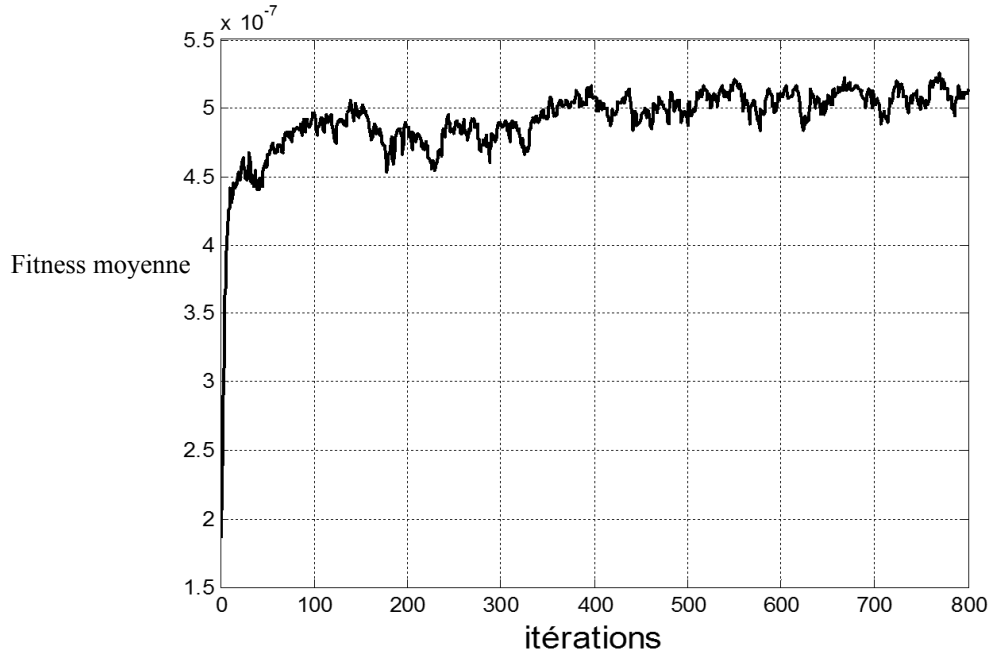


Figure III.1 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations

La figure III.2 illustre l'évolution du coût du système de mise à la terre en fonction du nombre d'itérations. En général, le coût diminue avec l'augmentation du nombre d'itérations. En effet, plus on avance dans le nombre d'itérations, plus les individus se rapprochent de l'optimum. Dans notre cas, deux optima, correspondant aux paliers à coût pratiquement constant, se présentent. Le premier palier (coût = 3.758.314,9 DA) représente l'optimum local, tandis que le deuxième (coût = 3.627.648,80 DA) correspond à l'optimum global.

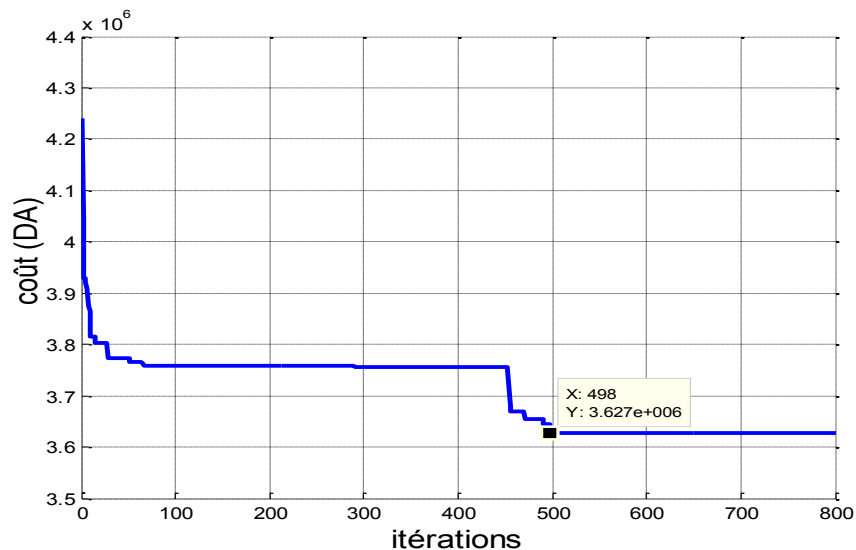


Figure III.2 : Courbe de convergence du coût

D'après la figure III.2, la population se rapproche instinctivement vers la solution optimale locale après 70 itérations et reste constant jusqu'à la 450<sup>ème</sup> itération. Par la suite, le coût diminue encore une fois pour atteindre sa valeur minimale globale à la 498<sup>ème</sup> itération.

Par ailleurs, le programme que nous avons développé nous a permis d'obtenir les différentes valeurs optimales présentées dans le Tableau III.3. Il s'agit des 6 variables ( $N_p, N_y, L_p, d, e_s$ ), la longueur totale des conducteurs enterrés, le temps d'exécution du programme et le coût global de l'installation. Il est à noter que les valeurs optimales du diamètre des conducteurs et l'épaisseur de la couche du gravier (comme couche superficielle) estimées correspondent aux limites inférieures de leurs intervalles de variation injectés dans le programme.

Le nombre des piquets	55
La longueur du piquet (m)	2,97
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe x	9
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe y	24
diamètre des conducteurs horizontaux (mm)	10,51
L'épaisseur de la couche superficielle (cm)	8
Longueur totale des conducteurs enterrés (m)	2476,3
Le temps de calcul (s)	22,65
Le coût (DA)	3.627.648,80

Tableau III.3 : Valeurs obtenues après l'exécution du programme d'optimisation par AG

La topologie optimale donnée après l'exécution du programme est présentée sur la figure III.3. Cette figure illustre la grille du réseau de terre en rouge, les piquets en noire ainsi la couche superficielle en gris.

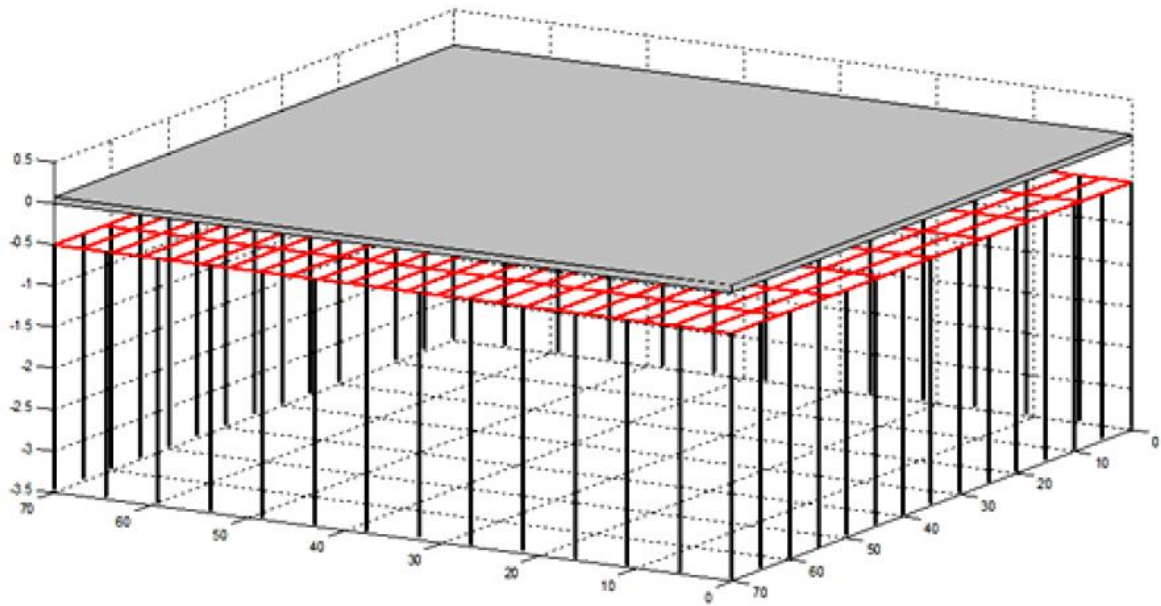


Figure III.3 : Topologie de la grille

Nous avons également calculé le facteur de réduction, la tension de contact admissible 50 kg, la tension de pas admissible 50 kg, le courant maximum circulant dans la grille, la résistance de la grille, l'élévation du potentiel de terre EPT, la tension de maille et la tension de pas. Les valeurs sont présentées dans le tableau III.4 suivant :

Facteur de réduction $C_s$	0,697
Tension de contact admissible $E_{\text{touch}50}$ (V)	593,20
Tension de pas admissible $E_{\text{step}50}$ (V)	1880,7
Courant maximum circulant dans la grille (A)	1908
Résistance de la grille ( $\Omega$ )	2,67
Élévation du potentiel de terre EPT (V)	5109,0
Tension de contact $E_m$ (V)	535,84
Tension de pas $E_s$ (V)	569,18

Tableau III.4: Valeurs des principaux paramètres électriques du système optimal obtenus par l'AG

Etant les tensions de contact  $E_m$  et de pas  $E_s$  estimées sont inférieures à celles de contact et de pas maximales admissibles ( $E_m = 535,84 \text{ V} \ll E_{\text{touch}50} = 593,2 \text{ V}$  et  $E_s = 569,18 \text{ V} \ll E_{\text{step}50} = 1880,7 \text{ V}$ ), le système optimisé est sécurisé.

### III.8.1 Validation des résultats obtenus par AG en utilisant CYMGrd

En introduisant les paramètres relatifs à la topologie du réseau de terre optimisée à savoir, les valeurs optimales des 6 variables, ainsi que les valeurs de la durée du défaut, du facteur de division du courant, de la résistivité du sol, de la résistivité de pierres concassées (humide), de la profondeur d'enfouissement de la grille et de la superficie du site dans le code de calcul CYMGrd, nous avons pu obtenir les principales grandeurs électriques présentées dans le tableau III.5.

Les tensions de pas  $E_s = 555,9 \text{ V}$  et de contact  $E_m = 555,9 \text{ V}$  obtenues en utilisant le code de calcul CYMGrd sont inférieures aux tensions de pas admissible  $E_{\text{step}50} = 1880,66 \text{ V}$  et de contact admissible  $E_{\text{touch}50} = 593,2 \text{ V}$  respectivement.

Facteur de réduction $C_s$	0,6976
Tension de contact admissible $E_{\text{touch}50}$ (V)	593,2
Tension de pas admissible $E_{\text{step}50}$ (V)	1880,66
Le courant maximum s'écoulant dans la grille $I_G$ (A)	1908
Résistance de la grille ( $\Omega$ )	2,50122
Elévation du potentiel de terre EPT (V)	4813,1
Tension de contact $E_m$ (V)	555,9
Tension de pas $E_s$ (V)	555,9

Tableau III.5 : Paramètres électriques essentiels calculés en utilisant CYMGrd

En confrontant les résultats obtenus en appliquant l'AG à ceux trouvés en utilisant CYMGrd, les valeurs des tensions de pas et de contact admissibles obtenues à l'aide du code de calcul CYMGrd sont exactement les mêmes valeurs que celles trouvées en utilisant le programme d'optimisation par AG. Ceci est évident, car le code de calcul CYMGrd se repose

sur la norme IEEE 80-2000. Par ailleurs, les tensions de pas et de contact actuelles sont très proches.

Ainsi, la topologie de la grille obtenue par le logiciel CYMGrd est illustrée sur la figure III.4. Il est tout à fait évident que cette est la même que celle trouvée précédemment. En outre ce code de calcul, permet l'obtention du diagramme de contour de potentiel de contact en 3D (Figure III.5), ainsi que le diagramme de profil des tensions de pas et de contact du réseau de terre (Figure III.6).

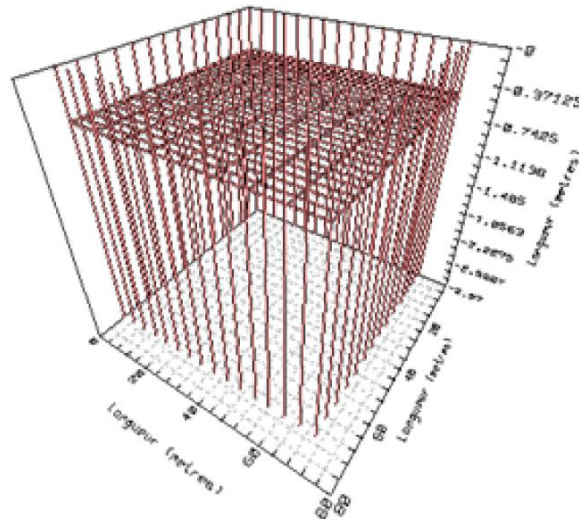


Figure III.4 : Topologie de la grille par CYMGrd en 3D

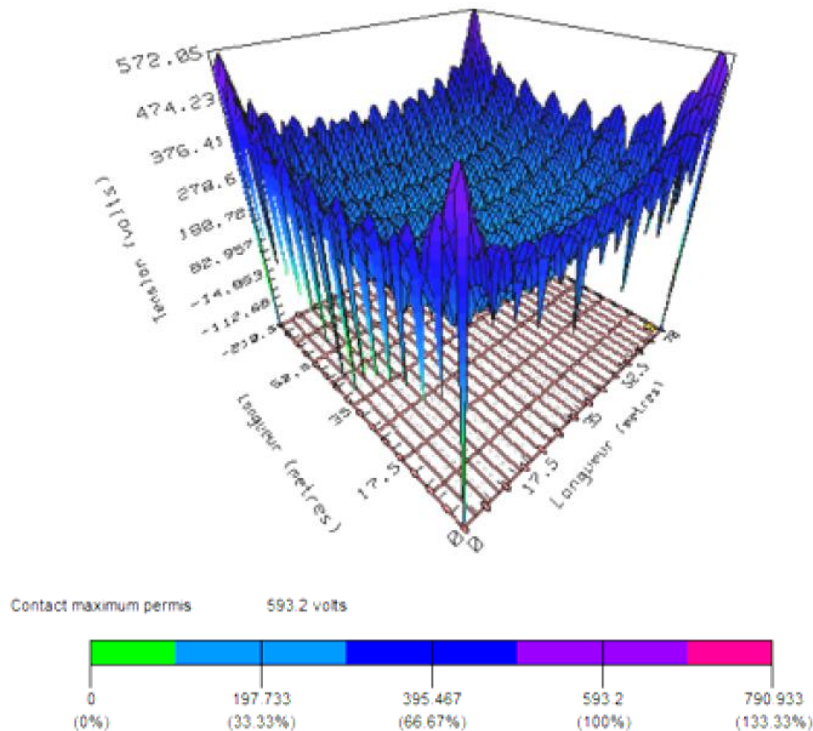


Figure III.5 : Diagramme de contour du potentiel de contact

La couleur en bleu montre que la valeur de la tension de contact du système de terre est légèrement inférieure (de 10%.) à la valeur maximale admissible.

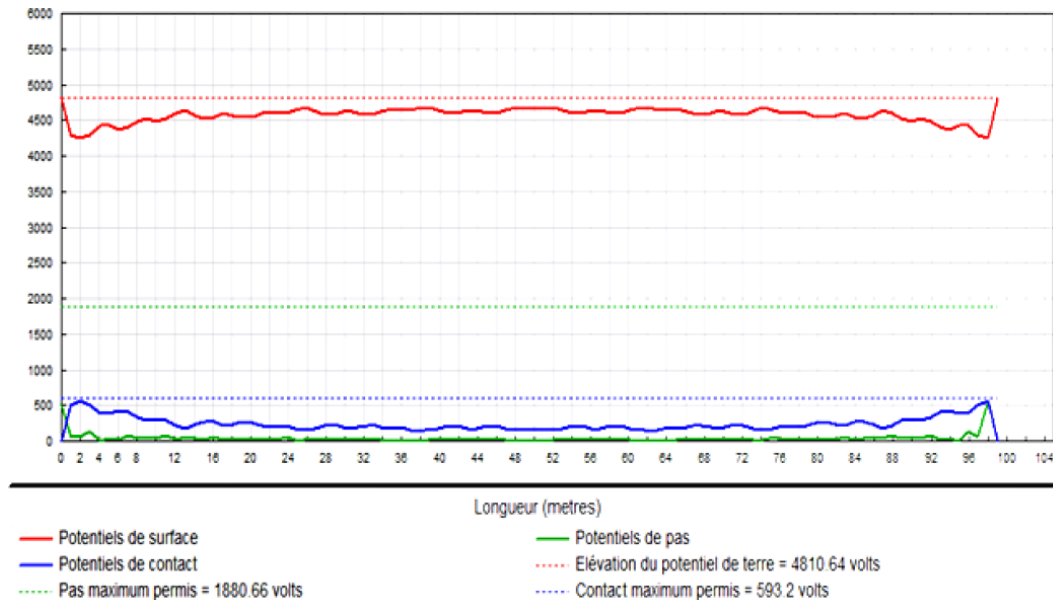


Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

Le diagramme de contour du potentiel du contact en 3D, présenté sur la figure III.5 ainsi que le diagramme de profil des potentiels de pas et de contact de la figure III.6 montrent qu'aucun dépassement n'est affiché. Dans ces conditions, le système optimal est sécurisé. Les tensions de pas et de contact ainsi que la tension de surface présentent des maxima aux niveaux des extrémités du réseau de terre dû à l'effet de pointe.

### III.9 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 40 MVA chacun. Ce système est constitué d'une grille carrée en cuivre de 160x160 m<sup>2</sup>. 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 :  $I_{cc} = 31,5 \text{ kA}$  ;
- Résistivité de matériau de surface (Gravier) :  $\rho_s = 3000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  ;
- Nombre de départs lignes 60 kV :  $n_a = 2$  ;
- Surface du réseau maillé :  $A = 25600 \text{ m}^2$  ;
- Profondeur d'enfouissement de la grille de mise à la terre en cuivre :  $h = 0,5 \text{ m}$  ;
- Résistance maximale de l'impédance de terre :  $Z_0 = 1 \text{ } \Omega$ .

La mesure de la résistivité du sol est effectuée selon la méthode des quatre piquets de Wenner avec une distance entre piquets de mesure  $a = 15 \text{ cm}$ . La valeur moyenne de la résistance  $R$  lue sur l'appareil pour l'ensemble du site trouvée est :  $R = 0,54 \text{ } \Omega$ . La résistivité est calculée par la formule suivante [11]:

$$\rho = 2 \pi a R$$

où :

$\rho$  : résistivité [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] ;

$a$  : distance entre les sondes [m] ;

L'application numérique donne :  $\rho = 50,8938 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ .

Le tableau III.6 comporte les paramètres à introduire dans nos programmes. Ils sont constitués de grandeurs relatives à l'ouvrage étudié, de la taille des individus/particules et le nombre d'itérations.

La longueur du poste $L_x$ (m)	160
La largeur du poste $L_y$ (m)	160
Profondeur d'enfouissement de la grille (m)	0,5
Profondeur des piquets de terre (m)	0
Résistivité du sol ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	50,89
Résistivité de la couche superficielle ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	3000
Le courant de défaut (A)	31500
Facteur de décroissance $D_f$	1
Facteur de division du courant $S_f$	0,6
La durée de défaut (s)	1
La taille de la population initiale	100
Le nombre d'itérations	800

Tableau III.6 : Les données du poste de transformation de AIN EL MELH

Après l'exécution du programme, nous obtenons sur les figures III.7 et III.8 correspondant respectivement à l'évolution de la fitness moyenne et celle du coût (et donc de la meilleure fitness de toute la population) en fonction du nombre d'itérations.

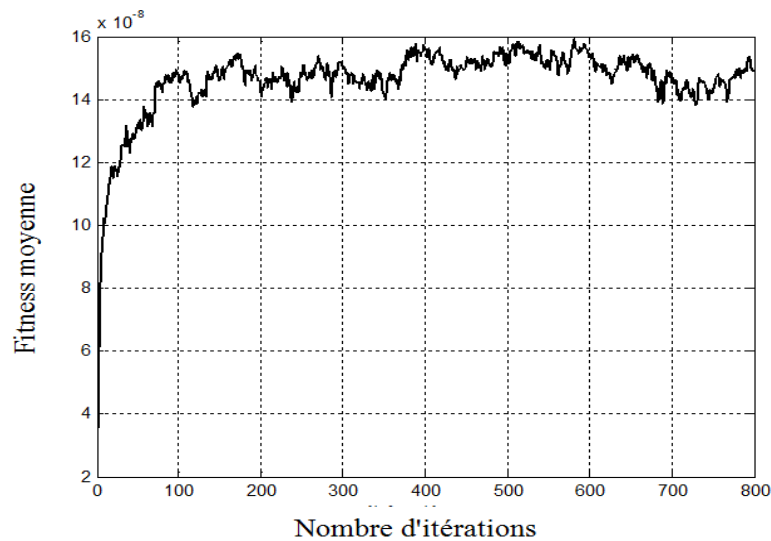


Figure III.7 : Fitness moyenne en fonction du nombre d'itérations

Avec l'augmentation du nombre d'itérations, la courbe de tendance de la fitness moyenne augmente rapidement, avant de tendre, après 100 itérations, vers un palier constant.

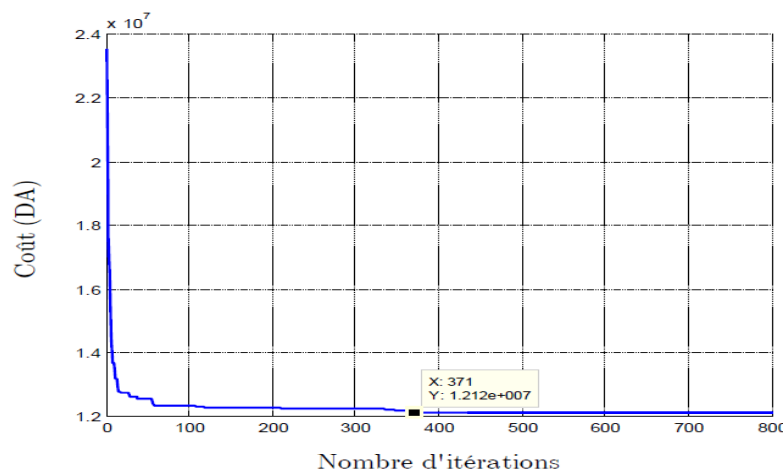


Figure III.8 : Courbe de convergence du coût

La courbe du coût converge rapidement vers la solution optimale globale. Cette dernière vaut 14.804.774,14 DA. Elle est obtenue à l'itération 371.

Les grandeurs optimisées concernant les 6 variables ( $N_p, N_X, N_Y, L_p, d, e_s$ ), la longueur totale des conducteurs enterrés, le temps d'exécution du programme et le coût, sont données dans le tableau III.7.



Le nombre des piquets	128
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe x	23
Le nombre des conducteurs parallèles à l'axe y	7
La longueur du piquet (m)	3,0
Le diamètre des conducteurs horizontaux (mm)	14,08
L'épaisseur de la couche superficielle (cm)	8,25
Longueur totale des conducteurs enterrés (m)	5185,1
Le temps de calcul (s)	24,46
Le coût (DA)	14.804.774,14

Tableau III.7 : Valeurs optimales obtenues après exécution du programme d'optimisation par AG

La topologie optimale obtenue est présentée sur la figure III.9 suivante :

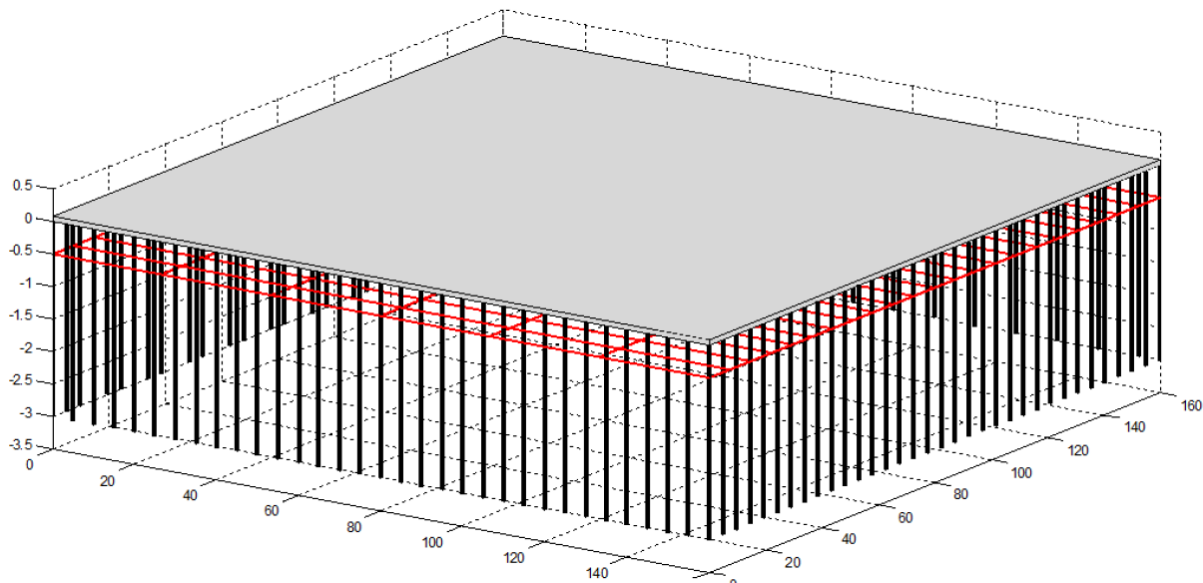


Figure III.9 : Topologie de la grille

Dans cette topologie de la grille, nous constatons que les piquets (de 3 m) installés sont plus nombreux que les conducteurs horizontaux de grille. Ceci facilite l'écoulement du courant de défaut dont la valeur est importante ( $I_{cc}=31,5$  kA) dans le sol profond.

En outre, la valeur du diamètre des conducteurs a été estimée à 14,08 mm contre 10,51 mm trouvée par tous les programmes précédents. Alors que l'épaisseur de la couche

superficielle a été augmentée de 0,25 cm (de 8 cm, obtenue par les programmes précédemment présentés, à 8,25 cm).

Le programme actuel calcule également les paramètres électriques essentiels du système de terre ainsi optimisé. Ce calcul est basé sur la norme IEEE 80-2000. Les paramètres correspondants sont cités dans le tableau III.8.

Facteur de réduction Cs	0,6533
Tension de contact admissible $E_{\text{touch50}}$ (V)	457,01
Tension de pas admissible $E_{\text{step50}}$ (V)	1480,1
Le courant maximum circulant dans la grille (A)	18900
Résistance de la grille ( $\Omega$ )	0,1511
Elévation du potentiel de terre EPT (V)	2855,3
Tension de maille $E_m$ (V)	418,77
Tension de pas actuelle $E_s$ (V)	261,51

Tableau III.8 : Principaux paramètres du système optimisé obtenus par l'AG

Du moment que les valeurs des tensions de pas ( $E_s = 261,51$  V) et de contact ( $E_m = 418,77$  V) obtenues sont inférieures à celles maximales admissibles ( $E_{\text{step50}} = 1480,1$  V et  $E_{\text{touch50}} = 457,01$  V), le système optimisé est alors sécurisé.

### III.9.1 Validation des résultats obtenus par AG en utilisant CYMGrd

L'insertion des paramètres cités dans le tableau III.6, nous avons déterminés via le logiciel CYMGrd, les principales grandeurs présentées dans le tableau III.9 suivant :

Facteur de réduction $C_s$	0.653
Tension de contact admissible $E_{\text{touch}50}$ (V)	456,89
Tension de pas admissible $E_{\text{step}50}$ (V)	1479,56
Le courant maximum s'écoulant dans la grille $I_G$ (A)	18900
Résistance de la grille ( $\Omega$ )	0,144
Élévation du potentiel de terre EPT (V)	2757,74
Tension de maille $E_m$ (V)	410,92
Tension de pas actuel $E_s$ (V)	306.50

Tableau III.9 : Principaux paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd

Une constatation similaire a été observée : les valeurs obtenues en utilisant CYMGrd sont proches à celles trouvées via le programme d'optimisation par AG.

La figure III.10 illustre la topologie de la grille affichée par CYMGrd. D'autre part, les figures III.11 et III.12 concernent respectivement les diagrammes de contour de potentiel de contact en 3D et de profil des tensions de pas et de contact de système de mise à la terre.

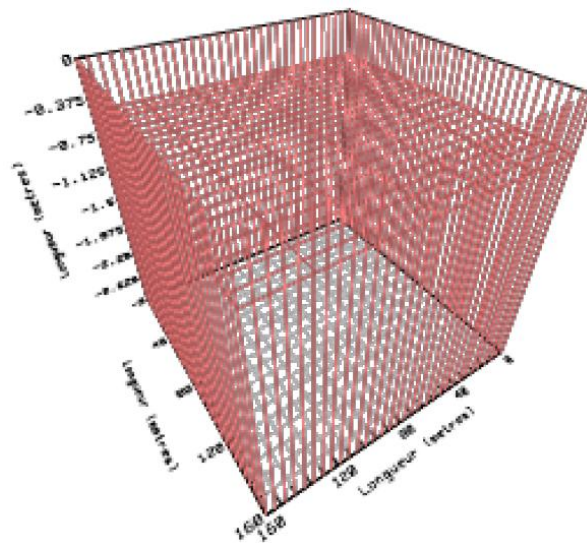


Figure III.10 : Topologie de la grille en 3D

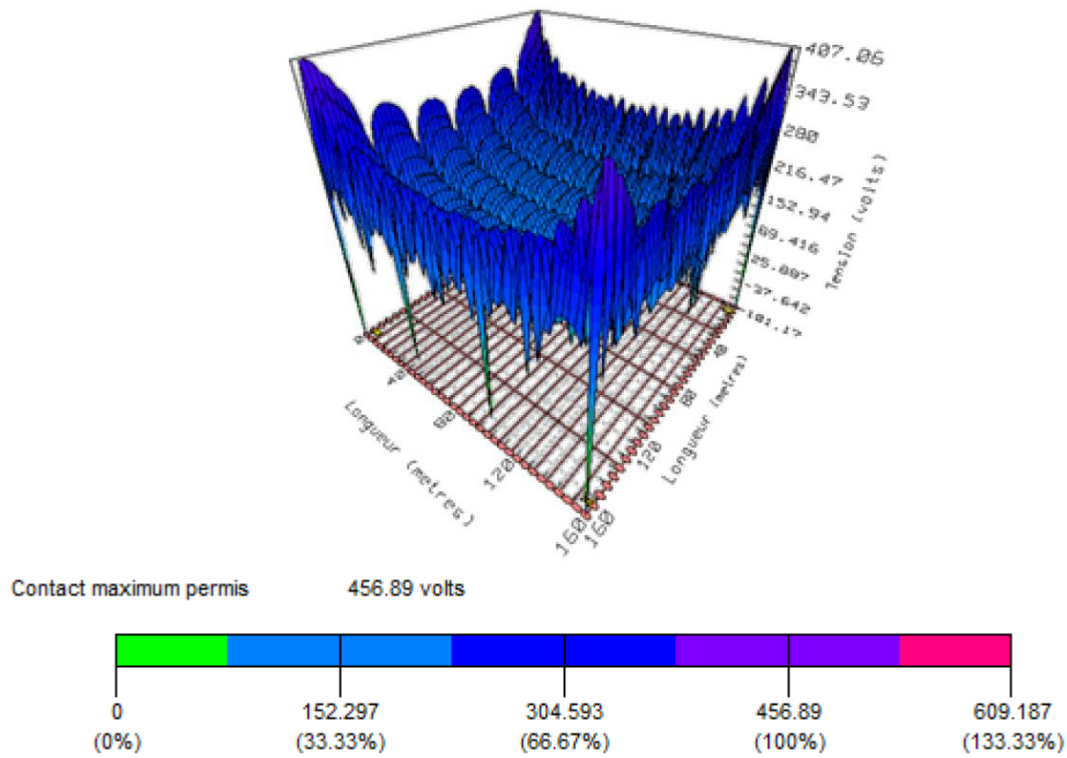


Figure III.11 : Diagramme de contour de potentiel de contact

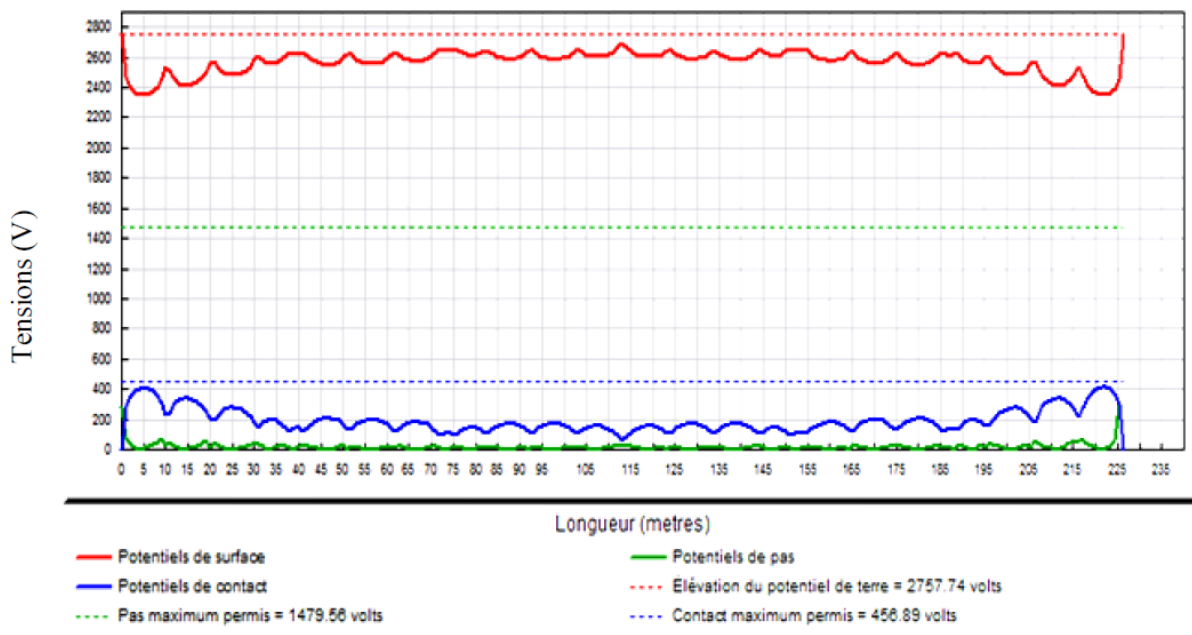


Figure III.12 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

Les tensions de pas et de contact sont inférieures à celles maximales admissibles. Le diagramme de profil des potentiels de pas et de contact ne présente aucun dépassement. Ceci est évident, du moment que le système optimisé est sécurisé.

---

# Conclusion

L'objectif principal de ce travail, consiste en la recherche d'un réseau de terre optimal correspondant au coût minimum, en satisfaisant les contraintes de sûreté des personnes et de matériels imposées. Deux ouvrages énergétique ont fait l'objet de cette étude. Il s'agit d'un site inspiré de la norme IEEE 80-2000 et le poste de transformation 60/30 kV de AIN EL MELH.

Pour cela, un programme basé sur la technique d'optimisation à savoir l'algorithme génétique, a été élaboré sous environnement MATLAB (R-2009). Le but principal est de trouver la solution optimale.

Les systèmes que nous avons optimisés ainsi que ceux obtenus en utilisant le code de calcul CYMGrd sont sécurisés. Cela est la conséquence directe du fait que les tensions de contact et de pas estimées en appliquant les deux techniques, sont inférieures à celles maximales admissibles respectives calculées en utilisant les expressions recommandées par la norme IEEE 80-2000.

# Bibliographie

---

- [1] IEEE Std 142-1991, « Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems », page 139, Juin 1991.
- [2] Keith Switzer W., « Practical Guide to Electrical Grounding », Livre de ERICO PUBLICATIONS, Première Edition, Ohio USA, Août 1999.
- [3] 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](http://www.leonardo-energy.org).
- [4] 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.
- [5] Georges S., « Evaluation de l'Effet de la Mer et du Contrepoids sur le Profil de la Tension d'un Système de Mise à la Terre d'une Ligne de Transport d'Energie à Haute Tension dans un Sol Résistif », Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Septembre 2001.
- [6] CYMGRD 6.3, « User's Guide And Reference Manual », Manuel d'utilisation, Copyright CYME International T&D Inc., Octobre 2006.
- [7] L.BLANCHET, Y.MAUGAIN, « principes de mise à la terre des ouvrages du service du transport et des télécommunications, guide d'application de la note H115 », Electricité de France EDF, Septembre 1991.
- [8] EDF (Electricité De France), « Prises de Terre pour Réseaux Electriques de Distribution », Electricité de France, Centre de Normalisation, HN 64-S-55, Avril 1997.
- [9] IEEE Std 80-2000, «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding », Janvier 2000.
- [10] Taylor & Francis Group, LLC, «Substation Grounding Design Considerations », 2008.
- [11] Thomas Vallée & Murat Yıldızoğlu, « Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en Economie », v. 4.2, Décembre 2003.
- [12] Souquet A. & Radet F-G., « Algorithmes Génétiques », TE de fin d'année, Université de Nice Sophia Antipolis, France, Juin 2004.

- [13] « Algorithmes Génétiques », Cours, <http://ebookbrowse.com/pa/partie-3-algorithmes-genetiques> , 2010.
- [14] Optimisation des structures par les algorithmes génétiques, <http://theses.fpms.ac.be/ETD-db/collection/available/FPMSetd-04162008-095857/unrestricted/Chapitre4.pdf> , Avril 2008.
- [15] KARTOBI L., « Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques », Mémoire de Magister, Laboratoire de Recherche en Electrotechnique, ENP d'Alger, Novembre 2006.
- [16] ELECKTRON, Les effets du courant électrique sur l'Humain, [http://www.elecktron.com/courant\\_humain.html](http://www.elecktron.com/courant_humain.html).
- [17] Das S. & Abraham A. & Konar A., «Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms: Technical Analysis, Applications and Hybridization Perspectives », Livre de “Advances of Computational Intelligence in Industrial Systems », pp 1-38, 2008.
- [18] TLT mise à la terre et liaisons équipotentielle, générateur de prix. Réhabilitation. Algérie, CYPE Ingénierons, S.A.
- [19] Wire, Cables, Cords, [www.platt.com](http://www.platt.com).