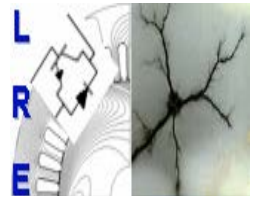




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**KEMARI Youcef**

**Intitulé**

# **Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Mise à la Terre par Essaim Particulaire**

<b>Directeur du mémoire :</b>	M.Teguar	Professeur	ENP
<b>Président :</b>	H. Sahraoui	Docteur	ENP
<b>Examineurs:</b>	M.O. Mahmoudi	Professeur	ENP
	L.Nezli	Professeur	ENP

**ENP 2013**

# Table des matières

Liste Des Figures.....	iv
Liste Des Tableaux.....	v
Résumé.....	vi
Introduction générale.....	1
<b>I. Généralités sur la mise à la terre</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Définitions sur la mise à la terre.....	4
I.2.1 Mise à la terre.....	4
I.2.2 Masse.....	4
I.2.3 Éléments d'une mise à la terre .....	4
I.2.4 Tensions de sécurité.....	5
I.2.4.1 Tension de contact.....	5
I.2.4.2 Tension de maille.....	7
I.2.4.3 Tension de pas .....	8
I.2.4.4 Elévation du potentiel de terre (EPT).....	10
I.3 Résistivité et structure du sol .....	11
I.3.3 Mesure de résistivité de sol.....	12
I.3.3.1 Méthode de Wenner.....	12
I.3.3.2 Méthode de Schlumberger.....	13
I.3.3.3 Méthode de mesure à 3 pôles.....	13
I.4 Etapes de conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80-2000.....	14
I.5 Code de calcul CYMGrd.....	16
I.5.1 Présentation de CYMGrd.....	16
I.5.2 Fonctions analytiques.....	16
I.6 Conclusion.....	17
<b>II. Technique d'Optimisation par Essaim Particulaire</b>	
II.1 Introduction.....	18
II.2 Historique.....	18
II.3 Caractéristiques de l'EP.....	19
II.4 Éléments de la technique d'EP.....	19

II.5 Fonctionnement.....	20
II.6 Topologie de voisinage.....	22
II.7 Configuration des paramètres.....	23
II.7.1 Vitesse maximale.....	23
II.7.3 Coefficients de confiance .....	23
II.7.4 Facteur de constriction.....	24
II.7.5 Taille de l'essaim.....	25
II.7.6 Limite de la vitesse.....	25
II.7.8 Critère d'arrêt.....	26
II.8 Contraintes d'optimisation.....	26
II.8.1 Formulation des contraintes.....	27
II.8.2 Gestion des contraintes.....	27
II.8.3 Fonction de pénalité.....	27
II.9 Conclusion.....	28
<b>III. Optimisation des systèmes de mise à la Terre par Essaim Particulaire</b>	
III.1 Introduction.....	29
III.2 Présentation du programme d'optimisation par EP.....	30
III.2.1 Fonction objectif.....	30
III.2.2 Gestion des contraintes.....	32
III.2.3 Fonction fitness.....	33
III.2.4 La taille de la population.....	33
III.2.5 nombre d'itérations.....	33
III.2.6 Topologie de voisinage .....	33
III.2.7 Coefficients de confiance .....	34
III.2.8 Vitesse maximale.....	34
III.2.9 Facteur d'inertie .....	35
III.3 Application de la technique d'optimisation par Essaim Particulaire.....	35
III.3.1 Présentation du poste de transformation 60 /30 kV de AIN EL MELH .....	35
III.3.2 Exécution du programme EP .....	37
III.3.3 Validation des résultats obtenus par EP en utilisant CYMGrd .....	39
III.4 Conclusion .....	41
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>42</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>43</b>

# Liste Des Figures

## Chapitre I : Généralité sur la mise à la terre

Figure I.1 : Éléments d'une mise à la terre (grille et piquets).....	5
Figure I.2 : Tension de contact.....	6
Figure I.3 : Tension de pas.....	8
Figure I.4 : Schéma de principe de la méthode de Wenner .....	12
Figure I.5 : Schéma de principe de la méthode de Schlumberger.....	13
Figure I.6 : Schéma de principe de la méthode de mesure à 3 pôles.....	14
Figure I.7 : Organigramme de la conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80-2000.....	15
Figure I.8 : Disposition des fenêtres dans CYMGrd lors de l'ouverture d'un projet.....	17

## Chapitre II : Technique d'Optimisation par Essaim Particulaire

Figure II.1 : Compromis entre deux déplacements possibles.....	21
Figure II.2 : Étapes d'un algorithme d'Essaim Particulaire.....	21
Figure II.3 : Topologies de voisinage.....	22

## Chapitre III : Optimisation des Systèmes de Mise à la Terre par Essaim Particulaire

Figure III.1 : Topologie de type étoile.....	34
Figure III.2 : Courbe de convergence du coût.....	37
Figure III.3 : Topologie de la grille.....	38
Figure III.4 : Topologie de la grille en 3D affichée par CYMGrd.....	40
Figure III.5 : Diagramme de contour de potentiel de contact.....	40
Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact.....	41

# Liste Des Tableaux

## Chapitre III : Optimisation des Systèmes de Mise à la Terre Par Essaim Particulaire

Tableau III.1 : Intervalles de variation des paramètres.....	31
Tableau III.2 : Coûts unitaires (par m <sup>3</sup> ) des principaux matériaux de mise à la terre.....	31
Tableau III.3 : Caractéristiques du cuivre recuit doux.....	32
Tableau III.4 : Les données du poste de transformation de AIN EL MELH.....	36
Tableau III.5: Valeurs optimales obtenues après exécution du programme d'optimisation par EP.....	38
Tableau III.6 : Principaux paramètres électriques du système optimisé obtenus par la technique EP.....	39
Tableau III.7 : Principaux paramètres électriques calculés avec CYMGrd.....	39

يقدم هذا العمل مساهمة في تحديد الأمثلية لنظم التّأريض من أجل العثور على التكلفة الأمثل مع مراعاة كفاءة المنشأة من حيث ضمان سلامة الأشخاص والتّجهيز المستعمل. للقيام بذلك ، قمنا بتطوير تقنية من بين التقنيات المستعملة في تحديد الأمثلية ، تستند على الأسراب الجسيمية. من أجل هذا تم تنفيذ البرنامج القائم على هاته التقنية تحت بيئة MATLAB (R-2009) مع الأخذ بعين الاعتبار مراحل التصميم والتوصيات الموافقة لـ IEEE 80-2000. وعليه اعتمدنا في تحديد الأمثلية على نظام التّأريض لمحطة المحولات الكهربائية المتواجدة بدائرة عين الملح التابعة لولاية المسيلة . قمنا في بمواجهة النتائج المتحصّل عليها بتلك التي وجدناها باستخدام برنامج CYMGrd. تحصلنا على توافق جيد بين النتائج.

الكلمات المفتاحية : التّأريض ، تحديد الأمثلية ، الأسراب الجسيمية ، دالة الهدف، شبكة التّأريض ، أعمدة التّأريض ،  
IEEE 80-2000 ، CYMGrd

## Résumé

Notre travail présente 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. Pour cela, nous avons développé une technique d'optimisation basée sur les Essaims Particulaires. L'implémentation du programme basé sur cette technique a été faite sous environnement MATLAB (R-2009) et c'en tenant compte de la procédure de conception selon IEEE 80-2000. Nous nous sommes intéressés lors de notre optimisation 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, Essaim Particulaire, Fonction objectif, Réseau de terre, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grille, Piquets.

## Abstract

Our 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 particle swarms. 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 our optimization, to the grounding network of the substation 60/30 kV located in 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, objectif function, Particle Swarm, Gounding network, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grounding grid, Rods.

# Introduction Générale

---

La terre est la matière qui constitue notre planète, elle est plus ou moins conductrice de l'électricité. Le seul rôle de la terre est d'évacuer dans le sol les courants de fuite des équipements électriques et électroniques, les courants de foudre et les courants parasites. Lors de l'écoulement de tels courants par une prise ou un réseau de terre, des différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points, ou entre deux masses métalliques, par exemple entre la prise de terre et le sol qui l'entoure, ou entre deux points du sol.

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. La résistance d'un réseau de terre est proportionnelle à la résistivité du sol dans lequel il est enterré. 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 [1].

La résistivité des terrains naturels est extrêmement variable d'un endroit à un autre selon la nature du sol. En outre, la résistivité des couches superficielles d'un terrain présente des variations saisonnières sous l'effet de la sécheresse ou de l'humidité ; la sécheresse engendre l'augmentation de la résistivité, et l'humidité la diminue [2].

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la résistivité de terre. Les plus populaires sont la méthode de Wenner, la méthode de Schlumberger et la méthode de mesure à trois pôles [6]. Les méthodes les plus utilisées pour déterminer la résistivité du sol sont celles des 'quatre électrodes' ; la méthode de Wenner et celle de Schlumberger [3].

Plusieurs logiciels et codes de calcul ont été développés pour l'analyse des systèmes de mise à la terre [4,5]. Parmi eux, CYMGrd a été développé pour aider les ingénieurs à optimiser la conception de leurs nouvelles grilles [6]. En plus, d'autres techniques d'optimisation basées sur l'intelligence artificielle ont été développées. Ces techniques sont

développées pour trouver les valeurs optimales (maxima ou minima, selon le cas) d'une fonction définie préalablement et appelée fonction objectif [7].

Nous l'utiliserons pour la recherche d'une valeur minimum de coût de système de mise à la terre constitué de grille, piquets et couche superficielle dont la fonction de coût est formulée selon la nature de problème d'optimisation.

Le but de notre travail 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. Pour cela, nous avons développé une technique d'optimisation basée sur les Essaims Particulaires [8].

Le présent manuscrit est structuré en trois chapitres distincts.

Le premier chapitre regroupe des généralités sur la mise à la terre des installations électriques et des définitions relatives à ce domaine. Nous y présentons les caractéristiques électriques ainsi que les méthodes de mesure de la résistivité du sol. Nous y retrouvons également le principe de conception d'un système de mise à la terre selon la norme IEEE 80-2000 [9] et les étapes de calcul des paramètres de tels systèmes selon la même norme.

Nous présentons dans le deuxième chapitre la technique d'optimisation par Essaim Particulaire, ainsi que le principe de fonctionnement et les paramètres caractéristiques de cette technique. Nous présentons aussi la procédure relative au traitement des contraintes à prendre en considération lors de l'optimisation.

Le troisième et le dernier chapitre est consacré à l'application de la technique d'optimisation par Essaim Particulaire (EP) sur le réseau de terre du poste de transformation 60/30 kV de AIN EL MELH situé à la wilaya de M'Sila.

Le but est de minimiser la fonction coût et d'assurer la sécurité de l'installation. Pour cela, nous avons développé le programme basé sur la technique EP sous environnement MATLAB (R-2009b). Les résultats ainsi obtenus ont été confrontés à ceux trouvés en utilisant le code de calcul CYMGrd. Une étude comparative y est présentée.

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



# Chapitre I

## Généralités sur la mise à la terre

---

### I.1 Introduction

Les installations de mise à la terre comprennent d'une part le réseau de terre constitué de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux, et d'autre part des conducteurs non enterrés, généralement isolés du sol. Ces derniers sont raccordés d'un côté au réseau de terre, de l'autre, aux masses mécaniques et masses électriques (si elles existent) [7].

La conception des prises et réseaux de terre doit permettre d'assurer le maintien de [8]:

- La sécurité des personnes et des animaux.
- La protection des installations de puissance et les équipements sensibles.
- Le maintien d'un potentiel de référence.

De manière générale, tout système de mise à la terre doit répondre aux critères suivants [11] :

**Foudre et court-circuit :** le système de mise à la terre des masses métallique doit protéger les occupants et prévenir des dommages directs comme les incendies, les phénomènes de claquages ou encore les explosions dus a la foudre, ainsi que les échauffements engendrés par un court-circuit provoqué par un défaut d'isolement.

**Sécurité :** la mise à la terre des masses métalliques doit être en mesure de canaliser les courants de foudre et de court-circuit provoqués par un défaut d'isolement sans introduire des tensions de pas ou de contact dangereuses.

**Protection des équipements et fonctionnalité :** l'interconnexion des masses doit protéger les équipements électroniques contre les sources de perturbation qui pourraient affecter le bon fonctionnement des équipements.

## I.2 Définitions sur la mise à la terre

### I.2.1 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 [8].

### I.2.2 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 [12].

### I.2.3 Éléments d'une mise à la terre

La mise à la terre d'un système se fait en établissant de manière volontaire une connexion entre la ligne d'alimentation (en général la ligne neutre) et une électrode placée dans le sol (prise de terre).

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales (piquets) ou horizontales (grilles) comme illustrées dans la figure I.1. La forme de la prise de terre est normalement commandée par l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre.

Les prises de mise à la terre se composent des deux éléments suivants :

- Contact entre le conducteur de terre et l'électrode.
- Electrode (piquet de terre, prise de terre profondément enterrée).

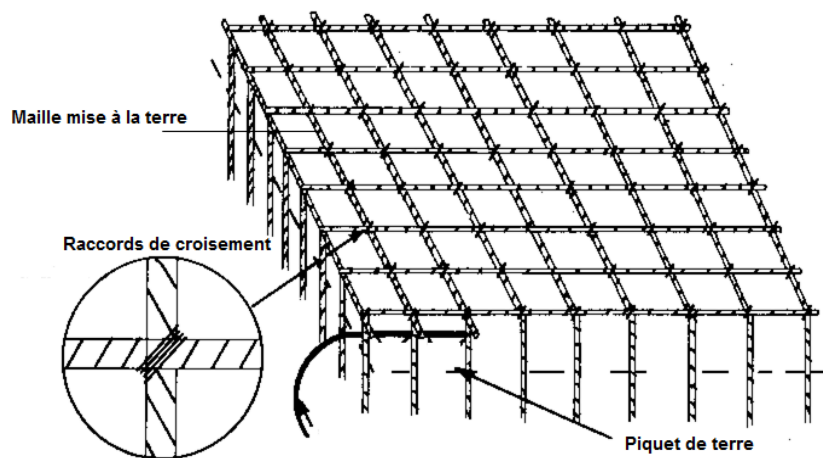


Figure I.1 : Éléments d'une mise à la terre (grille et piquets)

## I.2.4 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.2.4.1 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.2). On distingue deux types de contacts : le contact direct et le contact indirect [9].

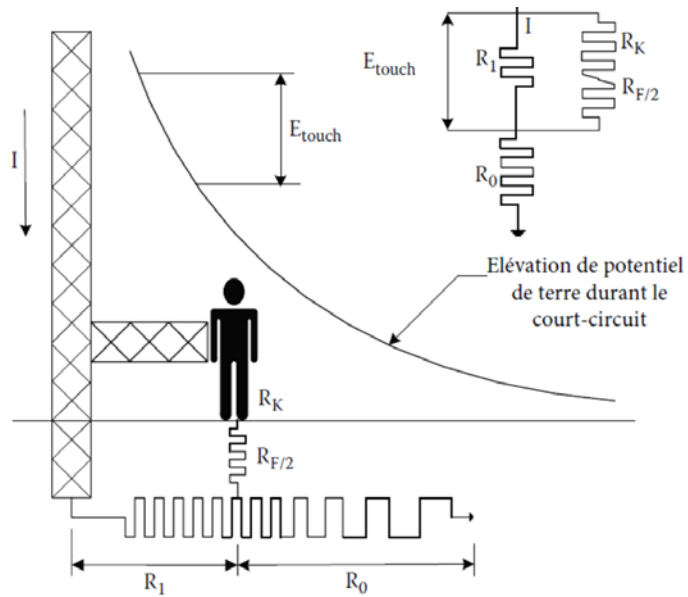


Figure I.2 : Tension de contact

La tension de contact admissible pour des personnes pesant 50 ou 70 kg; respectivement, est défini comme suit [9]:

$$V_{S_{max50}} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (I. 1)$$

$$V_{T_{max70}} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_c}} \quad (I. 2)$$

où

$t_c$  : durée du choc pour déterminer le courant tolérable traversant le corps humain (s) ;

$\rho_s$  : résistivité de la couche superficielle ( $\Omega.m$ ) ;

$C_s$  : facteur de réduction en présence de la couche superficielle:

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (I. 3)$$

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

### I.2.4.2 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 [9].

La tension de maille est donnée par :

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (I.4)$$

où :

$I_G$  : courant maximum de la grille ;

$K_i$  : facteur d'irrégularité ;

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16ed} + \frac{(D+2+e)^2}{8De} - \frac{e}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (I.5)$$

où :

$K_{ii}$  est donnée par l'équation (I.6) :

$$K_{ii} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad \text{sans piquets} \\ \text{ou} \\ 1 \quad \text{avec piquets} \end{array} \right\} \quad (I.6)$$

Par ailleurs,  $K_h$  est tel que :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{e}{e_0}} \quad (I.7)$$

$e$  : profondeur d'enfouissement (m) ;

$e_0 = 1$  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) ;

$L_M$  : la longueur effective des conducteurs de terre. Pour les grilles sans piquet de terre, ou quelques uns situés le long du périmètre ou dans les coins :

$$L_M = L_C + L_R \quad (I.8)$$

Pour les grilles avec des piquets le long du périmètre et au long de la grille, ainsi que dans les coins, la longueur effective,  $L_M$ , est donnée par :

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (I.9)$$

$L_R$  : La longueur d'un piquet (m);

$L_C$  : La longueur des conducteurs horizontaux (m).

### I.2.4.3 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.3) [11].

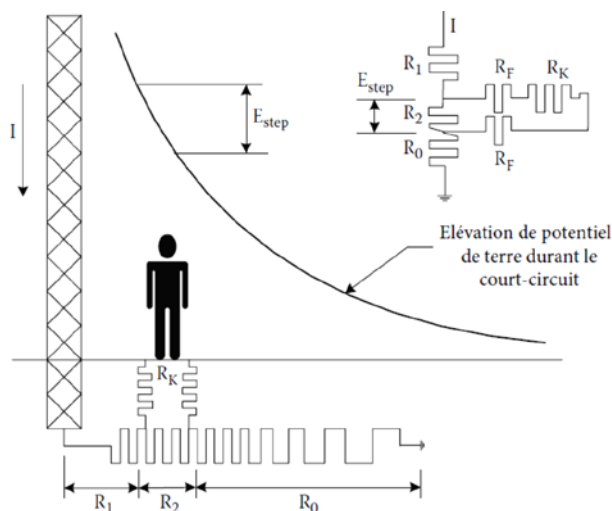


Figure I.3 : Tension de pas

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

$$V_{S \max 50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{I.10})$$

$$V_{S \max 70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{I.11})$$

La tension de pas actuel est donnée par :

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (\text{I.12})$$

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

$K_s$  : 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 :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2e} + \frac{1}{D+e} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right) \quad (\text{I.13})$$

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

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (\text{I.14})$$

$n$  : facteur géométrique déterminé par l'équation suivante :

$$n = n_a \times n_b \times n_d \times n_c \quad (\text{I.15})$$

$$n_a = \frac{2Lc}{Lp} \quad (\text{I.16})$$

$$n_b = \sqrt{\frac{Lp}{4\sqrt{A}}} \quad (\text{I.17})$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x L_y}} \quad (\text{I.18})$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (\text{I.19})$$

A : surface de la grille (m<sup>2</sup>) ;

L<sub>p</sub> : longueur périphérique de la grille (m) ;

L<sub>x</sub> : longueur maximale de la grille en direction de x (m) ; L<sub>y</sub> : longueur maximale de la grille en direction de y (m) ;

L<sub>s</sub> : longueur efficace enfouie dans la terre pour une grille (avec ou sans piquets), donnée par :

$$L_s = 0,75 \times L_c + 0,85L_R \quad (I.20)$$

#### I.2.4.4 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 I<sub>G</sub> multiplié par la résistance de la grille R<sub>g</sub> [9]:

$$EPT = I_G R_g \quad (I.21)$$

La résistance de la grille peut être déterminée par l'équation suivante :

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

où:

ρ : résistivité du sol (Ω.m) ;

L<sub>T</sub> : longueur totale des conducteurs de réseau de terre (m) ;

e : profondeur d'enfouissement (m);

A : surface de la grille (m<sup>2</sup>).

Le courant I<sub>G</sub> est déterminé par l'équation :

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

D<sub>f</sub> : facteur de décroissance pour la durée du défaut t<sub>f</sub> ;

S<sub>f</sub> : facteur de division du courant de défaut;

I<sub>0</sub> : courant de défaut homopolaire.



### I.3 Résistivité et structure du sol

La résistance est la propriété d'un conducteur électrique qui s'oppose à la circulation du courant lorsqu'une tension est appliquée entre ses deux extrémités. L'unité de mesure de résistance est l'ohm ( $\Omega$ ), et le symbole couramment utilisé est R. La résistance de terre dépend de [13] :

- Type de sol (argile, limon, grès, granit...)
- L'humidité: la résistivité peut tomber rapidement si le taux d'humidité augmente, mais après une valeur d'environ 20%, le taux de variation de la résistivité est beaucoup moins.
- Composition chimique et la concentration de sels dissouts.
- La stratification de couches de différentes résistivités.
- La température.

Le calcul de la résistance de terre nécessite une bonne connaissance des propriétés du sol, en particulier sa résistivité  $\rho$ . Cependant, il y a plusieurs couches de sol, chacun ayant une résistivité différente, dans ce cas, le sol est dit non-uniforme. En général, les modèles du sol uniforme et en deux couches de résistivités différentes sont les plus utilisés. Les mesures montrent que la résistivité,  $\rho$ , est principalement fonction de la profondeur [10].

Le sol peut être considéré comme homogène si la différence entre les deux valeurs extrêmes de la résistivité apparente est inférieure à 30% [14]. Dans la plupart des cas, la représentation d'une grille de terre basée sur un modèle de la terre à deux couches équivalent est suffisante pour la conception d'un système de mise à la terre en toute sécurité. Les changements brutaux de la résistivité aux limites de chaque couche peuvent être décrits au moyen d'un facteur de réflexion [15] :

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{I. 24})$$

$\rho_1$ : résistivité de la couche supérieure ;

$\rho_2$ : résistivité de la couche profonde du sol.

Dans le cas de sol en plusieurs couches de résistivités différentes, on peut considérer le sol comme uniforme en lieu et place du sol en plusieurs couches de résistivités différentes. La résistivité apparente  $\rho_a$  du sol supposé homogène peut, dans ce cas, être trouvée par un des deux relations suivantes [9] :

$$\rho_a = \frac{\rho(a_1) + \rho(a_2) + \rho(a_3) + \dots + \rho(a_n)}{n} \quad (\text{I. 25})$$

$\rho(a_1), \rho(a_2), \rho(a_3), \dots, \rho(a_n)$  sont les résistivités de n différentes mesures avec la méthode de 4 électrodes.

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} \quad (\text{I.26})$$

où :  $\rho_{a(\max)}$  et  $\rho_{a(\min)}$  sont les valeurs respectivement maximale et minimale de la résistivité des différentes couches du sol.

### I.3.3 Mesure de résistivité de sol

Les mesures de résistivité du sol sont utilisées pour obtenir un modèle de sol équivalant à la performance électrique de la terre. Des facteurs tels que la profondeur de la sonde maximale, des longueurs de câbles requis, l'efficacité de la technique de mesure, le coût, et la facilité d'interprétation des données doivent être considérés lors du choix du type de test. Les méthodes de mesure les plus utilisées sont : la méthode de Wenner à 4 pôles, la méthode de Schlumberger et la méthode de mesure à 3 pôles (62%).

#### I.3.3.1 Méthode de Wenner

Quatre électrodes sont disposées en ligne sur le sol et équidistantes d'une longueur a. Entre les deux électrodes extrêmes, on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur. Entre les deux électrodes centrales, on mesure le potentiel V grâce à un voltmètre (Figure I.4).

L'appareil de mesure utilisé est un ohmmètre de terre classique qui permettra l'injection d'un courant et la mesure de V

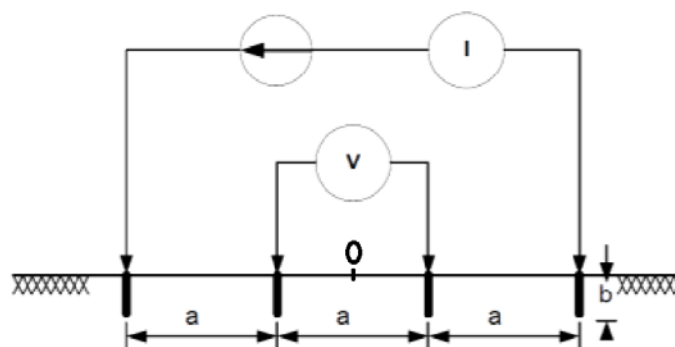


Figure I.4 : Schéma de principe de la méthode de Wenner [3]

La valeur de la résistance R permet de calculer la résistivité ( $\rho$ ) au point situé sous le point O, par l'expression simplifiée suivante obtenue dans le cas d'un sol homogène [3]:

$$\rho = 2 \pi a R \quad (I. 27)$$

où :

$\rho$  : résistivité ( $\Omega\text{m}$ ) ;

a : distance entre les sondes (m) ;

R : résistance affichée sur l'appareil de mesure de terre ( $\Omega$ ).

### I.3.3.2 Méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger est basée sur le même principe de mesure de Wenner. La seule différence se situe au niveau du positionnement des électrodes (Figure I.5) [3] :

- La distance entre les deux électrodes extrêmes de courant [ $C_1, C_2$ ] est  $2d$ ;
- La distance entre les deux électrodes centrales de potentiel [ $P_1, P_2$ ] est a.

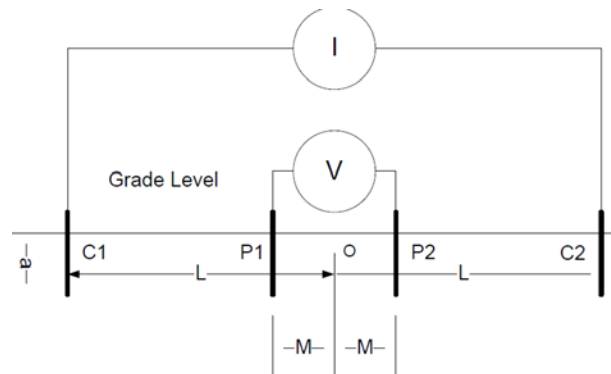


Figure I.5 : Schéma de principe de la méthode de Schlumberger [3]

La valeur de résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule suivante [16]:

$$\rho = \frac{\left[ \pi \left( d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R \right]}{4} \quad (I. 28)$$

### I.3.3.3 Méthode de mesure à 3 pôles

Cette méthode de mesure consiste à utiliser trois éléments ; le premier est une prise de terre C1, les deux autres sont des piquets de terre. Le deuxième piquet est la sonde de tension

P1 qui permet de mesurer le potentiel V. La sonde de tension doit être positionnée entre la prise de terre et la sonde auxiliaire selon la règle des 62 % (Figure I.6). Connaissant la différence de potentiel et le courant, on calcule la résistance de terre à l'aide de la loi d'ohm [17].

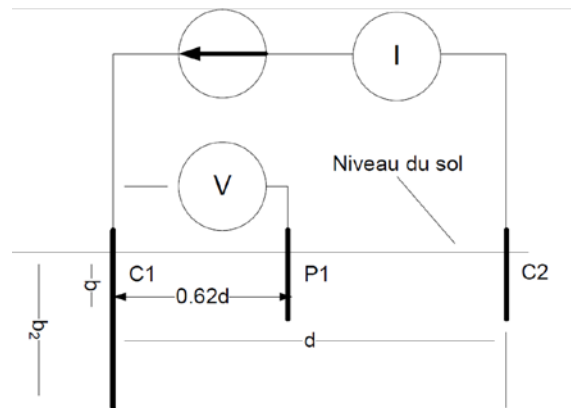


Figure I.6 : Schéma de principe de la méthode de mesure à 3 pôles [3]

La résistivité est déterminée par l'équation :

$$\rho_a = \frac{2\pi b_2 R}{\ln\left(\frac{2b_2}{d}\right)} \quad (I.29)$$

$\rho_a$  : résistivité apparente ( $\Omega.m$ ) ;

$b_2$  : longueur de la tige entraînée en contact avec la masse (M) ;

$d$  : distance entre les capteurs de courant (m) ;

$R$  : résistance mesurée ( $\Omega$ ).

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

Un bon système de mise à la terre a une faible résistance pour réduire au minimum l'élévation de potentielle de terre (EPT). En outre, une analyse complète doit être faite pour considérer tous les différents aspects tels que l'endroit des électrodes, les caractéristiques de sol, la surface, etc ... [18].

L'organigramme de la figure I.7 illustre la démarche à suivre dans la conception d'un réseau de terre pour une sous-station selon les 12 étapes de la norme IEEE 80-2000 :

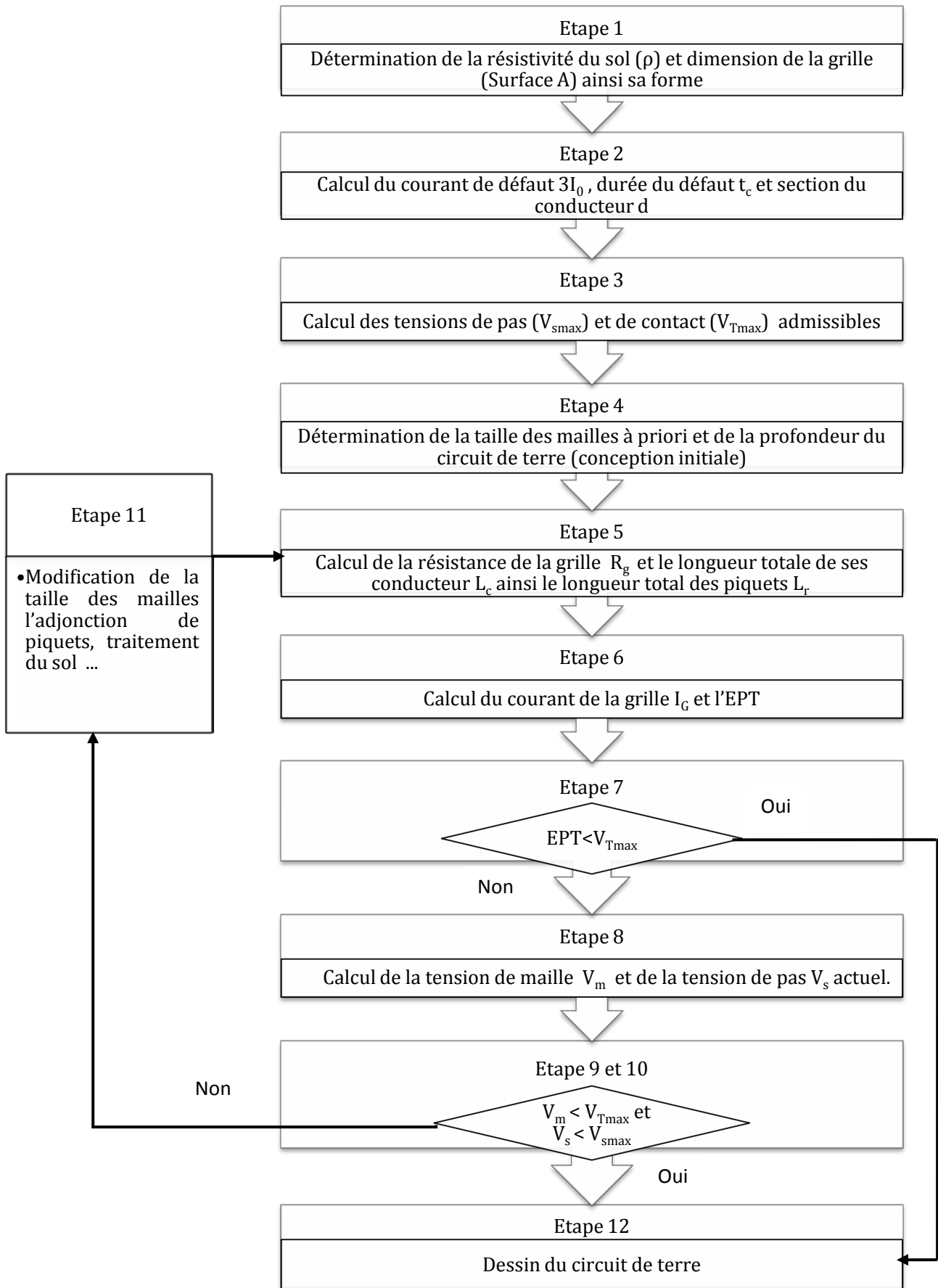


Figure I.7 : Organigramme de la conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80-2000 [9]

## I.5 Code de calcul CYMGrd

### I.5.1 Présentation de CYMGrd

Le logiciel CYMGrd est un programme d'analyse et de conception d'installations efficaces de mise à la terre 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].

### I.5.2 Fonctions analytiques

- Analyse d'éléments finis pour la grille de mise à la terre, pour l'agencement des piquets de terre et pour l'assemblage des électrodes de mise à la terre.
- Calcul de la résistance du poste électrique et de l'élévation du potentiel à la surface du sol
- Calcul des potentiels de pas et de contact maximum admissibles, à l'intérieur et à l'extérieur du périmètre de la grille, et représentation en 2D ou 3D et affichage en couleurs.
- Analyse de la tension de pas.
- Modélisation de sols uniformes ou stratifiés en deux couches de résistivités différentes à partir des mesures prises sur le terrain ou des valeurs définies par l'utilisateur.
- Calcul du facteur de réduction ( $C_s$ ).
- Bibliothèque comportant les matériaux les plus courants à la surface du sol et bibliothèque de valeurs typiques de résistivité du sol dans un poste.
- Module d'analyse de la sécurité calculant les potentiels de pas et de contact maximum admissibles, selon la norme IEEE 80-2000.
- Facteur de division du courant ( $S_f$ ) estimé à partir des données de configuration du poste, selon la norme IEEE 80-2000.
- Calcul du facteur de décrémentation ( $D_f$ ) à partir du rapport ( $X/R$ ) de la barre et des données sur la durée du choc, conformément à la norme IEEE 80-2000.
- La prise en compte, lors du calcul, de la composante du courant de défaut asymétrique.
- Analyse des électrodes pour le dimensionnement optimal des conducteurs et des piquets basés sur les matériaux utilisés pour les électrodes les plus utilisés, tel que stipulé dans les normes IEEE 80-2000 et IEEE 837-2002.
- Support des grilles de conducteurs symétriques ou asymétriques de toute forme.

- Piquets de terre placés de façon arbitraire.
- Modélisation d'électrodes absorbant les courants de retour à la terre (électrodes de retour) et différents types d'électrodes.
- Possibilité de modéliser des électrodes enrobées de béton.
- Calcul du courant de défaut monophasé à terre admissible pour une grille déterminée.

La figure I.8 illustre l'interface de CYMGrd subdivisée en fenêtres dédiées placées à des endroits spécifiques .

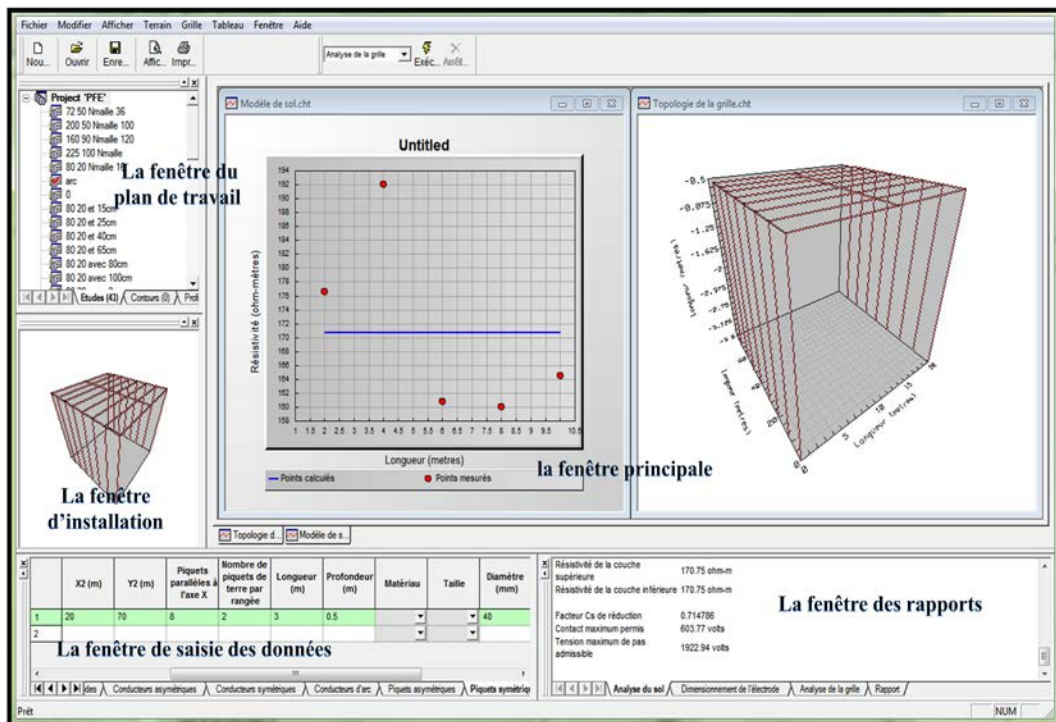


Figure I.8 : Disposition des fenêtres dans CYMGrd lors de l'ouverture d'un projet

## I.6 Conclusion

La mise à la terre est un élément nécessaire dans la conception d'une sous-station. Cette conception peut se faire en plusieurs étapes selon des critères bien déterminés en utilisant la norme IEEE 80-2000.

La résistivité du sol joue un rôle essentiel dans la conception des systèmes de mise à la terre. Lorsque sa valeur est élevée, le potentiel engendré par un courant de défaut drainé au sol par une prise de terre peut dépasser les limites sécuritaires. Ainsi, la mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre.

# Chapitre II

## *Technique d'Optimisation par Essaims Particulaires*

---

### **II.1 Introduction**

Les problèmes d'optimisation occupent actuellement une place importante dans la communauté des ingénieurs, des scientifiques et des décideurs grâce au développement d'outils de modélisation, d'algorithmes et de moyens de calcul.

Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de variables, une fonction objectif et un ensemble de contraintes. Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver la ou les meilleures solutions (en minimisant et/ou en maximisant la/les fonctions objectifs du problème posé), tout en satisfaisant un ensemble de contraintes définies au préalable par l'utilisateur.

Parmi les méthodes approchées : les heuristiques et les métaheuristiques destinées à résoudre ces problèmes, plus précisément les problèmes à variables continues, l'optimisation par Essaim Particulaire [19].

### **II.2 Historique**

En 1995, Russel Eberhart, ingénieur en électricité et James Kennedy, socio-psychologue, s'inspirent du monde du vivant pour mettre en place une métaheuristique : l'optimisation par



Essaim Particulaire. Chaque particule se déplace et à chaque itération, la plus proche de l'optimum communique aux autres sa position pour qu'elles modifient leur trajectoire. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents puisse posséder une organisation globale complexe [20].

Initialement, ces deux concepteurs cherchaient à modéliser des interactions sociales entre des « agents » devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun. Un modèle simple fut alors élaboré. Dès les premières simulations, le comportement collectif de ces agents évoquait celui d'un essaim d'êtres vivants convergeant parfois en plusieurs sous-essaims vers des sites intéressants. Finalement, le modèle s'est révélé être trop simple pour vraiment simuler un comportement social, mais par contre très efficace en tant qu'outil d'optimisation [21].

### II.3 Caractéristiques de l'EP

La méthode d'Essaim Particulaire présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- Elle est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué ;
- Elle est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution).

### II.4 Eléments de la technique d'EP

Pour appliquer l'EP, il faut définir un espace de recherche constitué de particules et une fonction objectif à optimiser. Le principe de la technique est de déplacer ces particules afin qu'elles trouvent l'optimum. Chacune de ces particules est dotée [20]:

- D'une **position**, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définitions.
- D'une **vitesse** qui permet à chaque particule d'évoluer en fonction de son meilleur voisinage, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une position optimale.

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

À tout instant, chaque particule connaît :

- Sa **meilleure position visitée**  $P_i(t)$ . On retient essentiellement la valeur du critère calculée (valeur de la fonction objectif) ainsi que ses coordonnées.
- La **position du meilleur voisin de l'essaim**  $g_i(t)$  qui correspond à l'ordonnement optimal.
- La **valeur qu'elle donne à la fonction objectif**  $f(P_i(t))$ , car à chaque itération il faut une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

## II.5 Fonctionnement

L'algorithme de base de l'EP travaille sur une population, appelée essaim, de solutions possibles, elles-mêmes appelées particules. La vitesse de la particule est calculée à partir de la formule suivante :

$$V_{id}(t + 1) = \omega V_{id}(t) + C_1 r_1 (P_{id}(t) - X_{id}(t)) + C_2 r_2 (g_{id}(t) - X_{id}(t)) \quad (\text{II.1})$$

où

$V_{id}$  : vitesse de déplacement de la particule  $i$  ;

$X_{id}$  : Position de la particule  $i$  ;

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

$g_{id}$  : position du meilleur voisin de l'essaim ;

$\omega$  : facteur d'inertie ;

$C_1$  : coefficient de confiance (auto confiance - self confidence) ;

$C_2$  : coefficient de confiance (confiance en essaim - swarm confidence) ;

$r_1, r_2$  : valeurs aléatoires de l'intervalle  $[0;1]$  ;

$d$  : dimension de la particule.

On peut ensuite, déterminer la position suivante de la particule grâce à la vitesse :

$$X_{id}(t + 1) = X_{id}(t) + V_{id}(t + 1) \quad (\text{II.2})$$

On voit alors que la bio-inspiration à l'origine de l'optimisation par Essaim Particulaire ressort dans l'algorithme sous la forme d'une intelligence collective : coordination du groupe, instinct individuel et interaction locale entre les individus (grognements, phéromones, ...) [20]. Un déplacement entre deux points est expliqué sur la figure II.1.

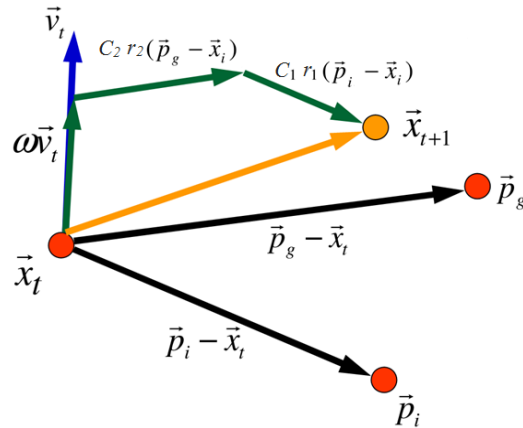


Figure II.1: Compromis entre deux déplacements possibles

L'organigramme de la figure II.2 illustre les étapes d'un algorithme d'EP.

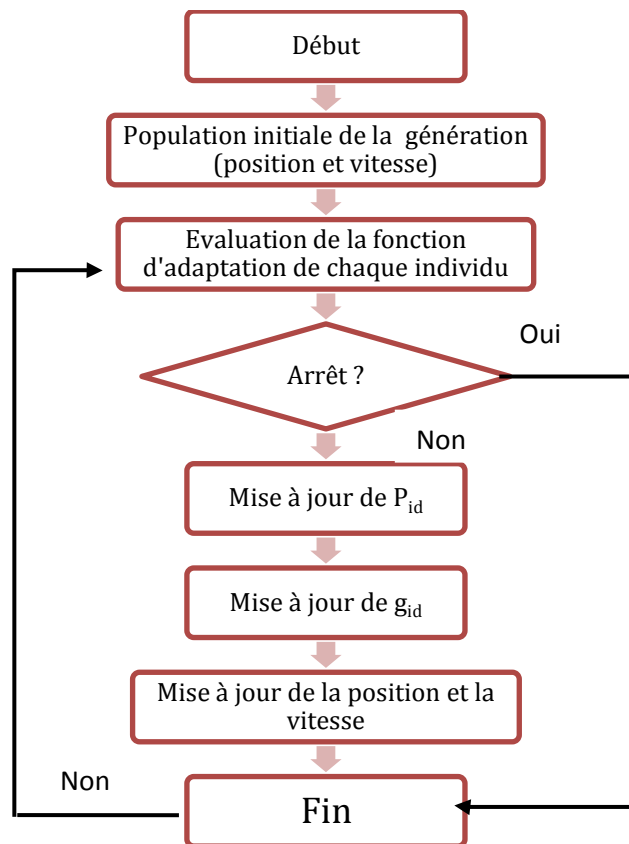


Figure II.2 : Étapes d'un algorithme d'Essaim Particulaire

## II.6 Topologie de voisinage

Le comportement social des particules est modélisé pour guider les particules durant le processus de déplacement. Le choix d'une topologie (le réseau de communication entre les particules) a donc une influence importante sur les performances de l'algorithme [22].

Les EP utilisés généralement sont de version globale ou version locale. La version globale d'EP représente un réseau entièrement relié, dans lequel chaque particule a accès à l'information de tous les autres membres dans la communauté. Tandis que dans la version locale d'EP, chaque particule a accès à l'information correspondant à ses voisins immédiats. Chaque vitesse de particule est ajustée selon sa meilleure position personnelle et la meilleure position réalisée par son voisinage.

Kennedy prétendait qu'une optimisation par EP avec de petits voisinages pourrait donner des résultats mieux sur des problèmes complexes, tandis qu'une EP avec de grand voisinage donnerait des résultats mieux pour des problèmes simples [23]. Les deux topologies les plus communes de la version locale sont la topologie d'anneau, dans laquelle chaque particule est reliée à deux voisins, et la topologie de roue, dans laquelle les individus sont isolés les uns des autres, et toute l'information est communiquée à un individu central.

Kennedy et Mendes ont proposé que la configuration de Von Neumann puisse donner des résultats mieux que d'autres topologies, même la version globale [24].

Sur la figure II.3, des topologies de voisinage utilisées dans l'optimisation avec Essaim Particulaire [19] :

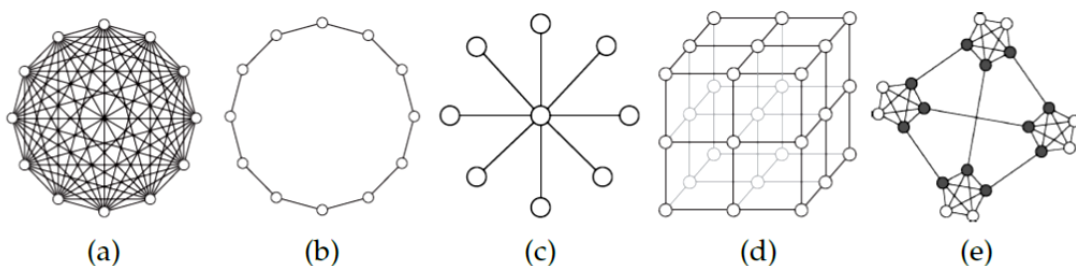


Figure III.13 : Topologies : (a) Topologie étoile (global best), (b) Topologie en anneau (ou Ring), (c) Topologie en rayon (ou Wheel), (d) Topologie Von Neumann et (e) Topologie Four-clusters

## II.7 Configuration des paramètres

Les paramètres principaux du modèle d'optimisation par EP sont :  $\omega$  (Facteur d'inertie),  $C_1$ ,  $C_2$  (coefficients de confiance) et  $V_{\max}$  (vitesse maximale) et la taille d'essaim. Les arrangements de ces paramètres déterminent les orientations de recherche de l'optimum dans l'espace de recherche.

### II.7.1 Vitesse maximale

La vitesse maximale  $V_{\max}$  détermine le changement maximum de la particule que peut subir dans ses coordonnées de position, pendant une itération. À l'origine,  $V_{\max}$  a été introduite pour éviter l'explosion et la divergence. Cependant, avec l'utilisation du facteur de constriction  $\chi$  ou d'inertie  $\omega$  dans la formule de la vitesse,  $V_{\max}$ , à certains degrés, est devenue inutile ; au moins la convergence peut être assurée sans elle [23].

### II.7.2 Facteur d'inertie

Le rôle du facteur d'inertie  $\omega$  est considéré important pour le comportement de la convergence de la technique. Le facteur d'inertie est utilisé pour commander l'impact des vitesses précédentes sur la vitesse courante [23].

Si  $\omega \ll 1$ , seulement peu de vitesse est préservé de l'étape précédente. Ainsi, des changements rapides de la direction sont possibles avec cet arrangement.

Si  $\omega > 1$ , les particules peuvent à peine changer leur direction et tourner autour, qui naturellement implique un plus grand domaine d'exploration aussi bien qu'une hésitation contre la convergence vers l'optimum.

Ainsi, ce paramètre règle la différence entre la capacité globale (étendu) et locale (voisine) d'exploration de l'essaim. Un grand poids d'inertie facilite l'exploration (la recherche de nouveaux secteurs) [25].

Les études menées par Shi et Eberhart indiquent une meilleure convergence pour  $\omega$  appartenant à  $[0,8 ; 1,2]$ . Au delà de 1,2, l'algorithme tend à avoir certaines difficultés à converger.

Enfin, il est également possible de faire diminuer le facteur d'inertie au cours du temps selon l'expression (II.5). De bons résultats ont été trouvés pour une valeur décroissant linéairement de 0,9 à 0,4 [26].

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \left( \frac{\text{iter}}{\text{max}_{\text{iter}}} \right) \quad (\text{II.3})$$

où

$\omega_{\max}$  : Valeur maximale de  $\omega$  (valeur de début) ;

$\omega_{\min}$  : Valeur minimale de  $\omega$  (valeur finale) ;

iter : Itération courante ;

$\text{max}_{\text{iter}}$  : Nombre maximum d'itérations à effectuer.

### II.7.3 Coefficients de confiance

Les constantes  $C_1$  et  $C_2$  de confiance, dites aussi d'accélération, représentent la pondération des limites stochastiques d'accélération qui tirent chaque particule vers la meilleure position globale et locale. Les premières expériences avec l'optimisation par Essaim Particulaire ont mené de prendre les constantes  $C_1$  et  $C_2$  chacune égale à 2,0 pour presque toutes les applications [21].

Cependant, d'autres arrangements ont été également employés dans différentes études. Ratnaweera et al. ont récemment étudié l'effet de varier ces coefficients avec le temps. Les auteurs ont adapté  $C_1$  et  $C_2$  avec du temps de la façon suivante [22] :

$$\begin{aligned} C_1 &= (C_{1f} - C_{1i}) \frac{\text{iter}}{\text{MAXITER}} + C_{1i} \\ C_2 &= (C_{2f} - C_{2i}) \frac{\text{iter}}{\text{MAXITER}} + C_{2i} \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

$C_{1i}$ ,  $C_{1f}$ ,  $C_{2i}$ , et  $C_{2f}$  sont des constantes, iter est le nombre d'itérations courantes et MAXITER est le nombre d'itérations maximales. L'objectif de cette modification est d'amplifier la recherche globale sur l'espace de recherche entier dans un premier temps de l'optimisation, et d'encourager les particules à converger aux optimums globaux à la fin de la recherche [22].

### II.7.4 Facteur de constriction

En 2002, Clerc et Kennedy ont proposé un modèle adaptatif d'OEP qui utilise un nouveau paramètre ' $\chi$ ' appelé le facteur de constriction. Le modèle a également exclu le coefficient d'inertie  $\omega$  et la vitesse maximale  $V_{\max}$ . La formule de la vitesse proposée par Clerc peut être exprimée pour la dimension  $d$  de la particule  $i$  comme suit [23] [27]:

$$V_{id}(t+1) = \chi \left[ V_{id}(t) + C_1 r_1 (P_{id}(t) - X_{id}(t)) + C_2 r_2 (g_{id}(t) - X_{id}(t)) \right] \quad (\text{II.5})$$

où :

$$\chi = \frac{2}{|4 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (\text{II.6})$$

$C_1, C_2$  : coefficients de confiance.

$\varphi = C_1 + C_2 > 4$

$\chi$  : facteur de constriction

### II.7.5 Taille de l'essaim

Van den Bergh et Engelbrecht ont prouvé que bien qu'il y ait une légère amélioration de la valeur optimale avec l'augmentation de taille d'essaim, un plus grand essaim augmente le nombre d'évaluations de fonction qui converge à une limite d'erreur. Eberhart et Shi ont illustré que la taille de population à peine un effet sur la performance de la méthode d'OEP [23].

### II.7.6 Limite de la vitesse

Les positions des particules dépassent l'espace de recherche après mise à jour, elles devraient être limitées aux bornes de l'espace de recherche. Afin de commander le déplacement erré excessif des particules en dehors de l'espace de recherche, chaque vitesse de particule devrait avoir les limites de la vitesse [28].

À chaque étape d'itération, l'algorithme procède en ajustant la distance (vitesse) que chaque particule déplace en chaque dimension de l'hyperm espace de problème. La vitesse de la particule est une variable stochastique et est, donc, sujet à créer une trajectoire non contrôlée,

faisant la particule suivre des cycles plus larges dans l'espace de problème. Afin d'atténuer ces oscillations, des limites supérieures et inférieures peuvent être définies pour la vitesse [24].

$$\begin{aligned} \text{Si } V_{id} > V_{\max} & \text{ donc } V_{id} = V_{\max} \\ \text{Si } V_{id} < -V_{\max} & \text{ donc } V_{id} = -V_{\max} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Eberhart et Shi ont considéré une valeur  $V_{i\max}$  de la variable  $i$ , de 10 à 20 % de la longueur de l'intervalle de variation de cette variable [27].

### II.7.8 Critère d'arrêt

La convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure, même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itérations. L'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivants n'a pas été atteint [26]:

- Le nombre maximum d'itérations a été atteint ;
- La variation de la vitesse est proche de 0 ;
- La fitness de la solution est suffisant.

### II.8 Contraintes d'optimisation

Ces contraintes sont exprimées en fonction des charges qui sollicitent la structure, de la géométrie et des variables de conception, sous forme d'égalité ou d'inégalité.

Les contraintes de conception peuvent être de différentes natures [31]:

- Contraintes de dimensionnement exprimant les limites de performances que l'on attend de la structure telle que la contrainte maximale (au sens large) créée dans la structure, la plus petite charge qui provoque une instabilité de l'un de ses éléments ou la plus grande flèche ;
- Contraintes géométriques qui concernent généralement la topologie de la structure ;
- Contraintes technologiques qui ont pour rôle de rendre possible ou de faciliter la réalisation de la structure notamment au niveau des assemblages.



### II.8.1 Formulation des contraintes

Soient  $\vec{X}$  un vecteur de  $n$  variables de conception appartenant à un espace de recherche  $R$  et  $f$  une fonction à minimiser sous  $m$  contraintes d'inégalités  $g_j$  et  $p$  contraintes d'égalités  $h_k$ . De manière formelle, un problème d'optimisation sous contraintes peut être décrit par la formulation générale suivante :

$$\begin{cases} \vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \min f(\vec{X}) & f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \\ g_i(\vec{X}) \leq 0 & g_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad j = 1, 2, \dots, m \\ h_k(\vec{X}) = 0 & h_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad k = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

### II.8.2 Gestion des contraintes

Pour appliquer ces contraintes, il faut faire en sorte que l'ensemble des opérateurs les tienne compte et qu'aucune solution violant ces contraintes ne puisse être construite, ou bien laisser les opérateurs construire des solutions ne respectant pas les contraintes, mais, les pénaliser au niveau de la fitness pour qu'elles aient moins de chances d'être choisies lors de l'application de l'opérateur de sélection.

En général la deuxième solution est préférée. Cela implique évidemment de construire des fonctions de pénalisation et de réaliser un équilibre dans la fitness entre la fonction objectif et la ou les pénalisations [30].

### II.8.3 Fonction de pénalité

La méthode de pénalisation est un processus de pénalisation très populaire dans le domaine de l'optimisation. L'intérêt de cette méthode est la simplicité de son principe et sa relative efficacité pratique. Le concept de base est de transformer la résolution du problème sous contraintes en une suite de résolutions de problèmes sans contraintes en associant à la fonction objectif une pénalité dès qu'une contrainte est violée.

Il s'agit d'écartier les solutions non réalisables en attribuant à la fonction de transformation une valeur très élevée en cas de minimisation, ou une valeur nulle en cas de maximisation [31].

La fonction objectif du problème est alors remplacée par la fonction suivante à minimiser :

$$\varphi (X,r) = f(X) + r \cdot h(X) \quad (\text{II.9})$$

$h(x)$  est la fonction pénalité, continue, dépendant des contraintes d'égalité et d'inégalité,  $r$  est un coefficient de pénalité, toujours positif. La fonction de pénalité est choisie de telle façon que la possibilité de réalisation soit garantie dans tous les processus de recherche de l'optimum.

## II.9 Conclusion

Les ingénieurs se heurtent quotidiennement à des problèmes technologiques de complexité grandissante, qui surgissent dans des domaines très divers, comme dans les transports, l'électronique, les réseaux électriques, etc... La plupart de ces problèmes peuvent être formulés comme des problèmes d'optimisation.

Les métaheuristiques (essentiellement; les Essaims Particulaires) forment un ensemble d'algorithmes utilisés en recherche opérationnelle pour résoudre ce type de problèmes. En effet, l'utilisation de ces techniques a fait l'objet d'un intérêt croissant du fait de leurs applications (notamment dans la conception des réseaux de terre) qui ont connu un succès particulier ces dernières années grâce à l'augmentation de la puissance des ordinateurs.

# Chapitre III

## *Optimisation des Systèmes de Mise à la Terre par Essaim Particulaire*

---

### **III.1 Introduction**

Le but de construire un système de mise à la terre optimisé est de réduire au minimum le coût de l'installation tout en respectant les facteurs de sûreté.

La sûreté des personnes est souvent examinée en calculant les paramètres principaux, y compris les tensions de pas et de contact, l'élévation du potentiel de terre (EPT) et la résistance du réseau de terre, en se basant sur la norme IEEE 80-2000.

Ce chapitre présente des applications relatives à l'optimisation en utilisant un essaim particulaire, pour déterminer la forme de la grille de terre optimale. Cette optimisation est basée sur la fonction objectif de coût. Cette fonction inclut le nombre et la longueur des conducteurs parallèles et verticaux, le diamètre de la section transversale 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.

Nous nous intéressons dans notre application au poste de transformation 60/30 kV de AIN EL MELH. Les résultats ainsi obtenus par l'algorithme génétique et par la technique d'essaim particulaire sont discutés et comparés.

## III.2 Présentation du programme d'optimisation par EP

### III.2.1 Fonction objectif

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 [32,22], 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.

Son expression 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<sup>2</sup>);

$e_s$  : 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 [6] 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 [33,35].

Pour tous les conducteurs que nous avons choisis, nous prenons le diamètre minimum égal à 10,51 mm en raison de la résistance mécanique et la robustesse. Ce diamètre correspond à la section 86,75 mm<sup>2</sup> donc le type 3/0 AWG.

Les intervalles de variation des différents paramètres sont cités dans le tableau III.1 :

	<b>Paramètre</b>	<b>Intervalle de variation</b>
1	$N_p$ : nombre de piquets	$[0 ; \frac{2 \cdot (L_x + L_y)}{D_p}]$
2	$N_x$ : nombre de conducteurs horizontaux suivant x	$[1 + \frac{L_y}{D_{xmax}} ; 1 + \frac{L_y}{D_{xmin}}]$
3	$N_y$ : nombre de conducteurs horizontaux suivant y	$[1 + \frac{L_x}{D_{ymax}} ; 1 + \frac{L_x}{D_{ymin}}]$
4	$L_p$ : longueur des piquets (m)	[1,5 ; 3,05]
5	d : diamètre des conducteurs horizontaux (m)	[0,001051; 0,005]
6	$e_s$ : épaisseur de la couche superficielle (m).	[0,08 ; 0,3]

Tableau III.1 : Intervalles de variation des paramètres

Les coûts des principaux matériaux, cuivre recuit doux et acier cuivré, utilisés pour les mises à la terre sont donnés dans le tableau III.2. Dans notre étude, nous avons choisi le cuivre recuit doux à cause de ces meilleures caractéristiques électriques et mécaniques [6]. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau III.3. Concernant la couche superficielle, nous avons choisi le gravier 8/15.

<b>Matière</b>	<b>Coût (DA/m<sup>3</sup>)</b>
Cuivre Recuit doux	13.843.567,7
Acier cuivré	4.486.265,03
Gravier 8/15	1.560
Gravier 15/25	1.980

Tableau III.2 : Coûts unitaires (par m<sup>3</sup>) des principaux matériaux de mise à la terre [33-35]

Description	Conductivité (%)	$\alpha_r$ à 20C° (1/ C°)	K0 à 0 C°	Température de fusion Tm (C°)	$\rho_r$ 20 C° ( $\mu\Omega$ - cm)	TCAP capacité thermique [J/(cm <sup>3</sup> · C°)]
Cuivre Recuit doux	100,0	0,00393	234	1083	1,72	3,42

Tableau III.3 : Caractéristiques du cuivre recuit doux

### III.2.2 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 :

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

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

où :

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

$E_s$  : tension de pas (V);

$V_{Tmax}$  : tension de contact maximale admissible (V);

$V_{Smax}$  : tension de pas maximale admissible (V).

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

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 :

$$h = z_1 |Vp_{max} - E_p| + z_2 |Vc_{max} - E_c| \quad (III.4)$$

$z_1, z_2$  : 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 :

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

### III.2.3 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 :

$$Fitness(N_p, N_X, N_Y, L_p, d, e_s) = \frac{1}{F(x)} = \frac{1}{f(x) + h} \quad (III.6)$$

où :

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

### III.2.4 La taille de la population

L'augmentation de la taille de la population permet d'augmenter sa diversité, de réduire la probabilité d'une convergence prématurée vers un optimum local, et d'augmenter le temps nécessaire pour converger vers les régions optimales de l'espace de recherche. Dans notre programme, nous avons choisi une taille de 100 particules.

### III.2.5 nombre d'itérations

Après plusieurs essais, nous avons fixé le nombre d'itérations à 800. Ceci permet d'assurer la convergence des deux techniques.

### III.2.6 Topologie de voisinage

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. Dans notre programme, nous avons choisi la topologie

de type étoile présentée sur la figure III.1. Une tel que le réseau social est complet, donc une communication complète et une attirance vers la meilleure particule.

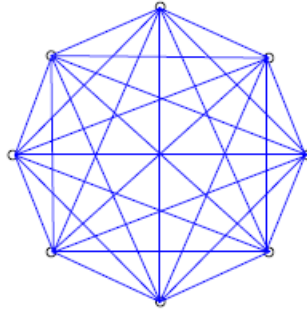


Figure III.1: Topologie de type étoile

### III.2.7 Coefficients de confiance

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. Les variables aléatoires  $r_1$  et  $r_2$  suivent une loi uniforme sur  $[0 ; 1]$  et  $c_1$  et  $c_2$  sont constantes représentant une accélération positive, avec  $c_1 + c_2 \leq 4$ .

Afin de chercher l'optimum de la fonction fitness, nous avons pris  $c_1 = c_2 = 2$  (accélération positive maximale).

### III.2.8 Vitesse maximale

Pour éviter que les particules se déplacent trop rapidement d'une région à une autre dans l'espace de recherche, la vitesse peut être limitée par une valeur maximale. Plusieurs expressions relatives à cette vitesse ont été proposées [21,22]. Dans notre programme, nous avons défini la vitesse maximale  $V_{max}$  pour chaque un des 6 variables  $x_i$  ( $i=1,\dots,6$ ) à partir de la longueur de ses intervalles de variation par l'expression :

$$V_{max}(x_i) = \frac{1}{x_{imax} - x_{imin}} \quad (\text{III. 7})$$

où:

$x_{imax}$  : valeur maximale de la variable  $x_i$ ;



$x_{imin}$  : valeur minimale de la variable  $x_i$ ;

$i=1, \dots, 6$  et  $x = (N_p, N_X, N_Y, L_p, d, e_s)$ .

### III.2.9 Facteur d'inertie

Le facteur d'inertie  $\omega$  introduit par Shi et Eberhart [21,22] permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de la méthode. Une grande valeur de  $\omega$  ( $> 1$ ) est synonyme d'une grande amplitude de mouvement d'exploration globale. Cependant, une faible valeur de  $\omega$  ( $< 1$ ) est synonyme de faible amplitude de mouvement d'exploration locale. Le paramètre  $\omega$  influe sur la vitesse. Nous l'avons fixé à "1" après plusieurs essais afin de trouver un compromis entre l'exploration locale et celle globale.

## III.3 Application de la technique d'optimisation par Essaim Particulaire

### III.3.1 Présentation du 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. Son système de mise à la terre, déjà existant, est très complexe et coûteux. Il est constitué d'une grille carrée en cuivre de  $160 \times 160 \text{ m}^2$ . Il est relié au réseau national par 02 départs aériens 60 kV, d'un poste de 30 kV pour l'alimentation de la région en énergie électrique. Il est caractérisé par :

- Puissance de court circuit du réseau 60 kV :  $P_{cc} = 3500 \text{ MVA}$  ;
- Durée normalisée de court circuit :  $t_c = 1 \text{ s}$  ;
- Courant de court-circuit :  $I_{cc} = 31,5 \text{ kA}$  ;
- Résistivité de matériau de surface (Gravier) :  $\rho_s = 3000 \Omega.m$  ;
- 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 :  $h = 0,5 \text{ m}$  ;

La mesure de la résistivité du sol est effectuée selon la méthode des quatre piquets de Wenner avec une distance entre piquets de mesure  $a = 15 \text{ cm}$ . Après trois mesures effectuées sur chaque plateforme (60 kV et 30 kV), la valeur moyenne de la résistance  $R$  lue sur

l'appareil pour l'ensemble du site trouvée est :  $R = 0,54 \Omega$ .

Ceci implique la considération d'un sol homogène. La résistivité est calculée par la formule suivante [9]:

$$\rho = 2 \pi a R \quad (\text{III.8})$$

où :

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

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

$R$  : résistance affichée sur l'appareil de mesure de terre [ $\Omega$ ]

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

Le tableau III.4 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.

Longueur du poste $L_x$ (m)	160
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 ( $\Omega\text{.m}$ )	50,89
Résistivité de la couche superficielle ( $\Omega\text{.m}$ )	3000
Courant de défaut (A)	31500
Facteur de décroissance $D_f$	1
Facteur de division du courant $S_f$	0,6
Durée de défaut (s)	1
Taille de la population initiale	100
Nombre d'itérations	800

Tableau III.4 : Les données du poste de transformation de AIN EL MELH

### III.3.2 Exécution du programme EP

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'application du programme d'optimisation par essaim particulaire. L'algorithme s'exécute 800 fois avant de s'arrêter, pour une taille initiale de 100 particules.

Nous représentons sur la figure III.2 la courbe de convergence du coût et son évolution au cours de l'exécution du programme par EP :

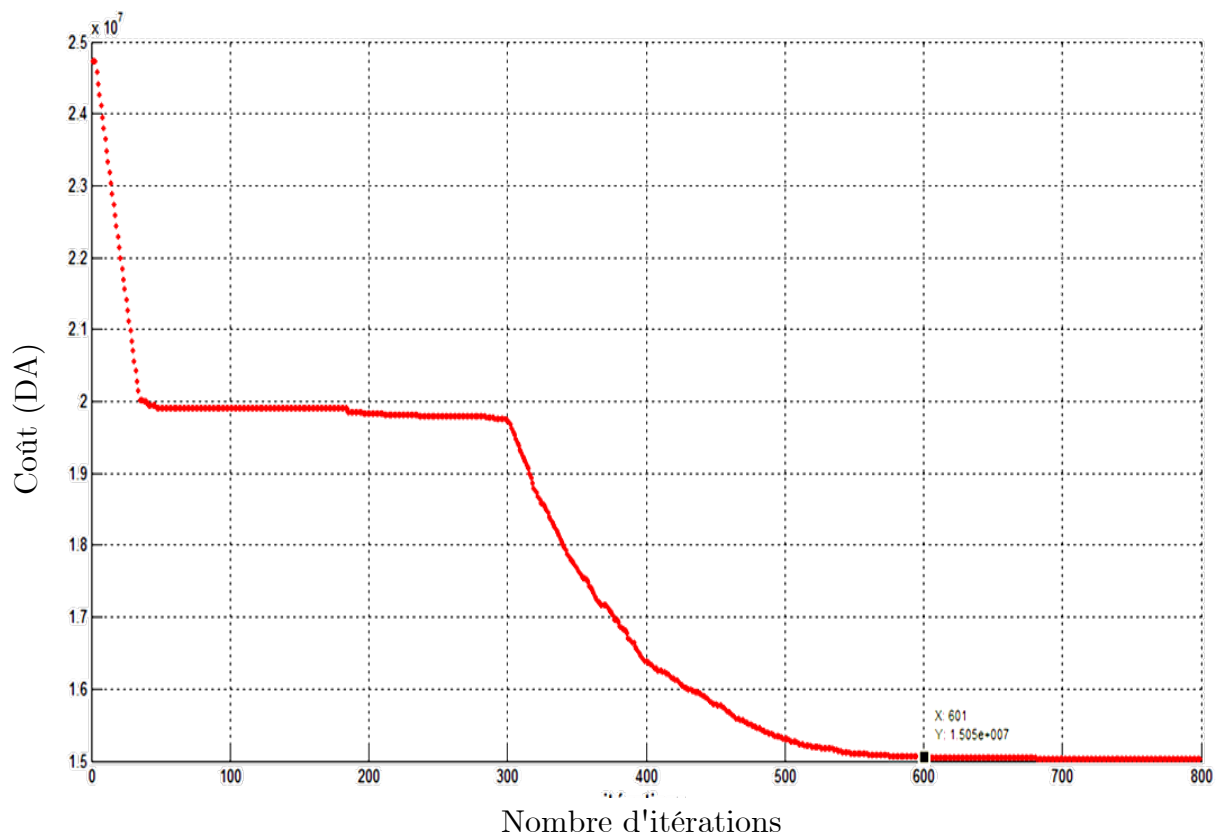


Figure III.2 : Courbe de convergence du coût

La courbe donnant le coût en fonction du nombre d'itérations, met en évidence deux paliers distincts. Le premier correspond au minimum local. Sa valeur est de 19.794.243,8 DA. Le deuxième, correspondant au minimum global, vaut 15.034.697,94 DA. Ce dernier a été atteint après 600 itérations.

Le tableau III.5 comporte les valeurs optimisées concernant les 6 variables, le temps d'exécution et le coût global, que nous trouvées par le biais du programme d'optimisation par EP.

Nombre des piquets " $N_p$ "	128
Longueur des piquets (m)	3,05
Nombre des conducteurs parallèles à l'axe x " $N_x$ "	18
Nombre des conducteurs parallèles à l'axe y " $N_y$ "	13
Longueur totale des conducteurs enterrés (m)	5 339,2
Diamètre des conducteurs horizontaux (mm)	14,08
Epaisseur de la couche superficielle (cm)	8,073
Temps de calcul (s)	15,30
Coût de l'installation (DA)	15.034.697,94

Tableau III.5: Valeurs optimales obtenues après exécution du programme d'optimisation par EP

La topologie optimale donnée le même programme est présentée sur la figure III.3 suivante :

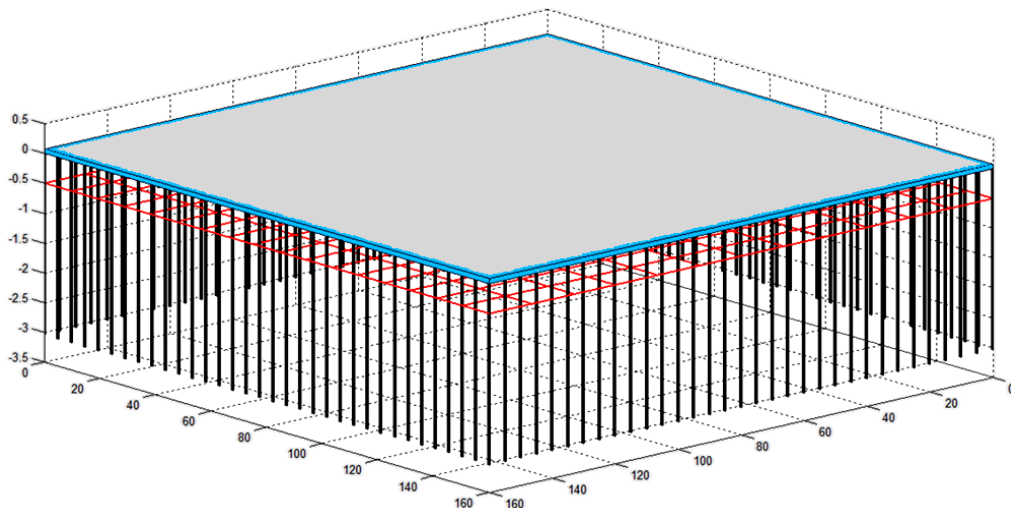


Figure III.3: Topologie de la grille

Dans cette topologie de la grille, nous constatons que les piquets (de 3,05 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. Alors que l'épaisseur de la couche superficielle obtenue égale à 8,073 cm.

Les valeurs des paramètres électriques essentiels du système obtenus sont citées dans le tableau III.6 suivant :

Facteur de réduction $C_s$	0,6481
Tension de contact admissible $E_{touch50}$ (V)	454,33
Tension de pas admissible $E_{step50}$ (V)	1469,3
Courant maximum s'écoulant dans la grille $I_G$ (A)	18900
Résistance de la grille ( $\Omega$ )	0,1505
Elévation du potentiel de terre EPT (V)	2845
Tension de maille $E_m$ (V)	408,89
Tension de pas actuel $E_s$ (V)	260,88

Tableau III.6: Principaux paramètres électriques du système optimisé obtenus par EP

Dans ce tableau, les tensions de pas ( $E_s = 260,88$  V) et de contact ( $E_m = 408,89$  V) obtenues avec la technique d'essaim particulière sont inférieures à celles maximales admissibles ( $E_{step50} = 1469,3$  V et  $E_{touch50} = 454,33$  V). Le système optimisé est ainsi sécurisé.

### III.3.3 Validation des résultats obtenus par EP en utilisant CYMGrd

Les paramètres du tableau III.5 permettent au CYMGrd de calculer les principales grandeurs électriques. Ces dernières sont regroupées dans le tableau III.7.

Facteur de réduction $C_s$	0,6481
Tension de contact admissible $E_{touch50}$ (V)	454,34
Tension de pas admissible $E_{step50}$ (V)	1469,3
Courant maximum s'écoulant dans la grille $I_G$ (A)	18900
Résistance de la grille ( $\Omega$ )	0,1440
Elévation du potentiel de terre EPT (V)	2756,62
Tension de maille $E_m$ (V)	395,0
Tension de pas actuel $E_s$ (V)	313,37

Tableau III.7: Principaux paramètres électriques calculés avec CYMGrd

Ainsi CYMGrd propose la topologie de la grille (Figure III.4), le diagramme de contour de potentiel de contact en 3D (Figure III.5) et le diagramme de profil des tensions de pas et de contact (Figure III.6) du système de mise à la terre.

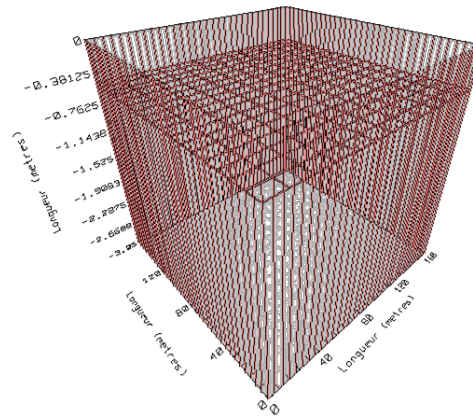


Figure III.4 : Topologie de la grille en 3D affichée par CYMGrd

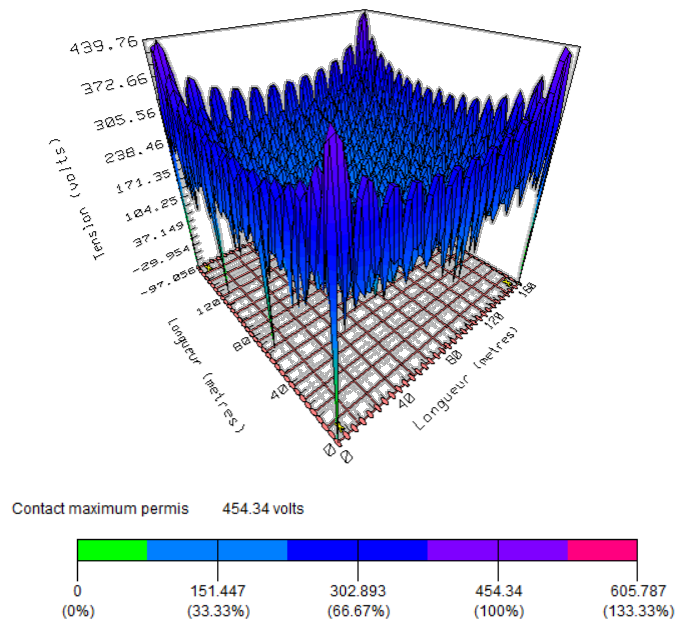


Figure III.5: Diagramme de contour de potentiel de contact

La topologie de la grille est identique à celle obtenue lors de l'application de la technique EP. La couleur en bleu, sur le diagramme de contour de la tension de contact, montre que la tension correspondante ( $E_m = 395 \text{ V}$ ) est inférieure à la tension admissible ( $E_{\text{touch}50} = 454,34 \text{ V}$ ); aucun dépassement n'est affiché. Ce qui confirme que circuit de terre optimisé est sécurisé.

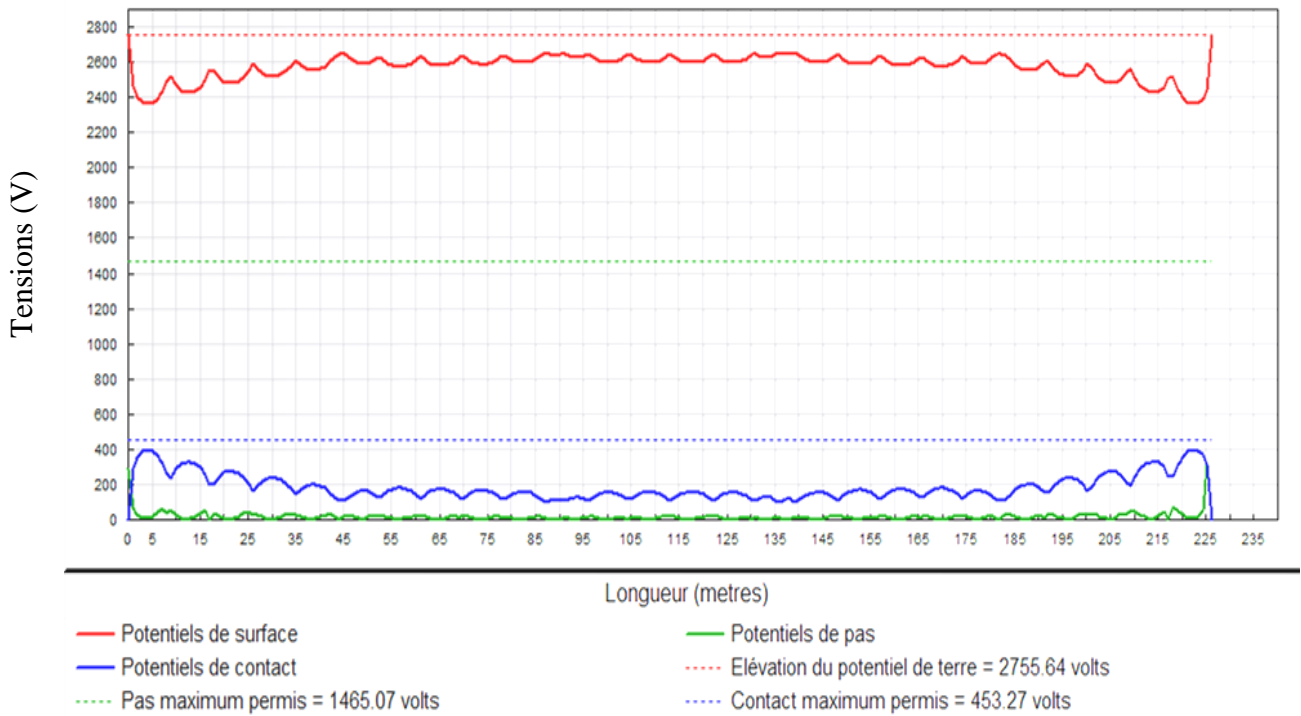


Figure III.6 : Diagramme de profil des potentiels de pas et de contact

### III.4 Conclusion

Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- Le système de mise à la terre du poste de AIN EL MELH que nous avons optimisé en appliquant la technique EP, est sécurisé. Cela se traduit par le fait que les tensions de contact et de pas sont inférieures à celles de maximales admissibles respectives.
- L'exécution de la technique d'essai particulière est rapide.
- CYMGrd permet de fournir des informations supplémentaires, outre que celles présentées par les deux techniques. Ces informations concernent le diagramme de contour de potentiel de contact en 3D et le diagramme de profil des tensions de pas et de contact du réseau de terre.

# Conclusion générale & perspectives

---

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. Un ouvrage énergétique ont fait l'objet de cette étude. Il s'agit du réseau de terre du poste de transformation 60/30 kV de AIN EL MELH.

Pour cela, un programme basé sur la technique d'optimisation par essaim particulière, a été élaboré sous environnement MATLAB (R-2009). Le but principal est de trouver la solution optimale. Cette technique, décrit le comportement du mouvement de particules basé sur une équation mathématique simple.

Le système que nous avons optimisé ainsi que celui obtenu 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.

Quant au temps d'exécution, la technique EP présente un temps très court. Ceci est évident vu la simplicité de la programmation basé sur cette technique.

En plus des informations extraites lors de l'application des techniques d'optimisation citées, CYMGrd permet de fournir les diagrammes de contour de potentiel de contact en 3D et de profil des tensions de pas et de contact du réseau de terre.

En perspective, nous envisagerons l'étude du :

- Optimisation des systèmes de mise à la terre par des algorithmes hybrides et d'autre type d'algorithmes métaheuristiques.
- Application des méthodes semi-analytique (Eléments finis) dans la simulation des systèmes de mise à la terre.
- Diagnostique d'état de corrosion du réseau de terre en utilisant la technique d'Essaim Particulaire.



# Bibliographie

---

- [1] 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).
- [2] Groupe de travail " Terre ", direction de l'électricité de France EDF, «Principes de conception et de réalisation des mises à la terre H115», Janvier 1984.
- [3] Gary Gilbert, « High Voltage Grounding Systems, 2011», Thèse de Doctorat en Philosophie dans l'engineering en électricité et programmation, Waterloo, Ontario, Canada, 2011.
- [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] Iyengar N. G. R., « Optimisation in structural design », Livre, pp. 41-48.
- [8] 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.
- [9] IEEE Std 80-2000, «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding », Janvier 2000.
- [10] CHAMPIOT G-G. « Compatibilité électromagnétique Modes de transmission », Technique d'ingénieur, Traité génie électrique, D1 305.
- [11] Reyer Venhuizen, « Mise à la terre & CEM, Mise à la terre approche globale», European Copper Institute (ECI), Mai 2002.
- [12] EDF (Electricité De France), « Prises de Terre pour Réseaux Electriques de Distribution », Electricité de France, Centre de Normalisation, HN 64-S-55, Avril 1997.
- [13] Chong Kiat Ng, «simplified numerical based method for calculation of DC ground electrode resistance in multi layered earth », Thèse de Master de Science, Université de Manitoba Winnipeg, Manitoba, Canada, 2000.
- [14] ELECKTRON, Les effets du courant électrique sur l'Humain, [http://www.elecktron.com/courant\\_humain.html](http://www.elecktron.com/courant_humain.html).
- [15] Taylor & Francis Group, LLC, «Substation Grounding Design Considerations », 2008.
- [16] 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](http://www.chauvin-arnoux.fr)
- [17] Electrotechnique-fr, « Mesure de la Prise de Terre : la Méthode », [www.electrotechnique-fr.com](http://www.electrotechnique-fr.com).
- [18] Inna Baleva, «substation grounding», a project for the degree of Master of Science in electrical and electronic engineering, California state university, Sacramento, 2012.
- [19] EL DOR Abbas, « Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d'images et en électronique », Thèse de Doctorat en informatique, Université Paris-Est, France, Décembre 2012.

- [20] BOMBRUN M. & SENE A., « L'optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d'ordonnancement », Rapport d'ingénieur Projet de 2<sup>ème</sup> année, Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications, Aubière, France, Mars 2011.
- [21] Clerc M. & Siarry P., « Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile: la méthode des essais particuliers », <http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2004007> , Vol 3, 2004.
- [22] 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.
- [23] Del Valle Y. & Venayagamoorthy G. K. & Mohagheghi S. & Hernandez J.-C. & Harley R. G. «Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems » , IEEE Transactions On Evolutionary Computation, Vol. 12, No. 2, Avril 2008.
- [24] Parsopoulos K. E. & Vrahatis M. N. , «Particle Swarm Optimization Method for Constrained Optimization Problems », pp. 214-220, IOS Press (Frontiers in Artificial Intelligence and Applications series, Vol. 76), Patras, Grèce, 2002.
- [25] CALAS G., « Optimisation par essaim particulaire », Ecole d'Ingénieurs en Informatique EPITA, Kremlin-Bicêtre, France, 2009
- [26] Eberhart R. C. & Shi Y., «Particle Swarm Optimisation: Developments, Applications and Resources », IEEE *Xplore* Digital Library, 2001.
- [27] Yao C. & Shen Y-X., « Optimal Planning of Ground Grid Based on Particle Swam Algorithm », Article, Académie Mondiale de Science, Ingénierie et Technologie 39, 2009.
- [28] Macherel P., « Optimisation sous contraintes en prédimensionnement de produit à l'aide d'algorithmes génétiques », Stages d'excellence L2 mathématiques informatique, Département de Génie Industriel, Université Joseph Fourier, GRENOBLE INP, Juillet 2012.
- [29] Optimisation des structures par les algorithmes génétiques, <http://theses.fpms.ac.be/ETD-db/collection/available/FPMSsetd-04162008-095857/unrestricted/Chapitre4.pdf> , Avril 2008.
- [30] REYNES C., « Etude des Algorithmes Génétiques et Application aux Données de Protéomique », Thèse de Doctorat, UFR Des Sciences Pharmaceutiques, Université Montpellier I, Juin 2007.
- [31] HAJJI O., « Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception n des dispositifs électrotechniques », thèse de Doctorat, Laboratoire L2EP, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2003.
- [32] Yao C. & Shen Y-X., « Optimal Planning of Ground Grid Based on Particle Swam Algorithm », Article, Académie Mondiale de Science, Ingénierie et Technologie 39, 2009.
- [33] TLT mise à la terre et liaisons équipotentielles, générateur de prix. Réhabilitation. Algérie, CYPE Ingénierons, S.A.
- [34] Farid Sid, Directeur, I.B.O, Algérie, fourniture et transport d'agrégats à excellent prix à Tipaza et Alger, Opportunités d'affaires et Carrières en Algérie.
- [35] Wire, Cables, Cords, [www.platt.com](http://www.platt.com).