



**Ecole Nationale Polytechnique**  
Département de Génie Electrique  
**Laboratoire de Recherche en Electrotechnique**



# Thèse de Doctorat

Présentée par :

**Benamrane ALIK**

Master en Electrotechnique

Pour l'obtention du titre de  
**Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Electrotechnique**  
**Option : Techniques de la Haute Tension**

Thème

*Optimisation des systèmes de mise à la terre par  
Essaim Particulaire et/ou Algorithme  
Génétique*

Soutenue publiquement, le

<b>Président :</b>	<b>BOUBAKEUR Ahmed</b>	<b>Professeur, ENP</b>
<b>Directeurs :</b>	<b>TEGUAR Madjid</b>	<b>Professeur, ENP</b>
	<b>MEKHALDI Abdelouahab</b>	<b>Professeur, ENP</b>
<b>Examineurs :</b>	<b>MOULAI Hocine</b>	<b>Professeur, USTHB</b>
	<b>TAHMI Redouane</b>	<b>Professeur, ENP</b>
	<b>ZIANI Abderrahmane</b>	<b>Professeur, USTHB</b>

**ENP 2016**





**Ecole Nationale Polytechnique**  
Département de Génie Electrique  
**Laboratoire de Recherche en Electrotechnique**



# Thèse de Doctorat

Présentée par :

**Benamrane ALIK**

Master en Electrotechnique

Pour l'obtention du titre de  
**Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Electrotechnique**  
**Option : Techniques de la Haute Tension**

Thème

*Optimisation des systèmes de mise à la terre par  
Essaim Particulaire et/ou Algorithme  
Génétique*

Soutenue publiquement, le

<b>Président :</b>	<b>BOUBAKEUR Ahmed</b>	<b>Professeur, ENP</b>
<b>Directeurs :</b>	<b>TEGUAR Madjid</b>	<b>Professeur, ENP</b>
	<b>MEKHALDI Abdelouahab</b>	<b>Professeur, ENP</b>
<b>Examineurs :</b>	<b>MOULAI Hocine</b>	<b>Professeur, USTHB</b>
	<b>TAHMI Redouane</b>	<b>Professeur, ENP</b>
	<b>ZIANI Abderrahmane</b>	<b>Professeur, USTHB</b>

**ENP 2016**

ملخص

في هذا العمل الذي يأتي في إطار مشروع الدكتوراه- تم تطوير ثلاث تقنيات ميتاارشادية تستعمل في تحديد الأمثلية لنظم تأريض المنشآت التالية : محطة توليد الكهرباء لبرق الواقعة بولاية خنشلة، محطة المحولات الكهربائية المتواجدة بدائرة بئر خادم التابعة لولاية الجزائر. تستند هذه التقنيات على طريقة الخوارزميات الجينية AG، طريقة الأسراب الجسيمية EP و طريقة الهجن بين الخوارزميات الجينية و الأسراب الجسيمية HEPAG. تمت برمجة هذه التقنيات تحت بيئة Matlab. تعمل البرامج على تحديد الأمثلية لدالة الهدف عن طريق الخيار الأمثل للمتغيرات الداخلة في تصميم شبكة التأريض مع الأخذ بعين الاعتبار التوصيات الموافقة لـ ANSI/IEEE Std. 80-2000. لهذا، فإننا نقترح نموذجا رياضيا جديدا لدالة التكاليف تشمل عدد النواقل وابعادها، عمق دفن الشبكة، عدد الأعمدة وطولها وكذا المساحة الإجمالية لأعمال الحفر والتغطية. تعرض نتائج HEPAG أقل قيم للثمن مقارنة مع تلك المتحصل عليها بواسطة EP و AG. قمنا في كل مراحل العملية بمواجهة النتائج المتحصل عليها بتلك التي وجدناها باستخدام برنامج CYMGrd. تحصلنا على توافق جيد بين النتائج.

الكلمات الرئيسية: تحديد الأمثلية، دالة الهدف، شبكة التأريض، أعمدة التأريض طريقة الأسراب الجسيمية EP، طريقة الخوارزميات الجينية AG، الهجن بين الخوارزميات الجينية و الأسراب الجسيمية HEPAG، IEEE Std. 80-2000.

**Abstract**

In this work, three meta-heuristic techniques have been developed to propose a safe and economic grounding systems for energy structures consisting in the power plant of Labreg situated in Khenchela city, the substation of Ain El-Melh located in M'sila city and the substation of Birkhadem sited in Algiers city. The optimization programs, under Matlab environment, have been elaborated based on particle swarm (PS), genetic algorithm (GA) and hybrid particle swarm-genetic algorithm (HPSGA). The aim is to minimize the cost function of each grounding system basing on the optimal decision of its geometrical and construction parameters in accordance with the security restrictions required by the ANSI/IEEE Std. 80-2000. For this, a new mathematical model has been proposed for the cost function. This later includes the number and the dimension of conductors, the grid depth, the number and the length of rods and the total area of excavation and revetment. Results show that HPSGA technique presents lower values of the cost than those obtained using GA and PS methods. The good accordance between safety parameters and CYMGrd code ones confirms the efficiency of proposed algorithms.

**Key words :** Grounding, Optimization, genetic algorithm, swarm particle, hybridization, objectif function, Gounding network, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grounding grid, Rods.

**Résumé**

Dans ce travail, trois techniques méta-heuristiques ont été développées pour proposer des systèmes de mise à la terre sécurisés et économiques pour les ouvrages énergétiques de Labreg situé à la Wilaya de Khenchela, du poste de transformation de Ain El-Melh situé à la Wilaya de M' Sila et celui du poste de transformation de Bir-Khadem situé à la Wilaya d'Alger. Les programmes d'optimisation, sous environnement Matlab, ont été élaborés en se basant sur un algorithme génétique (AG), l'essaim particulaire (EP) et un algorithme d'hybridation essaim particulaire-algorithme génétique (HEPAG). L'objectif est de minimiser la fonction de coût de chaque système de mise à la terre en se basant sur une décision optimale de ses paramètres géométriques et de construction conformément aux restrictions de sécurité exigées par IEEE Std. 80-2000. Pour cela, nous proposons un nouveau modèle mathématique pour la fonction de coût. Celle-ci comporte le nombre de conducteurs et leur dimension, la profondeur d'enfouissement de la grille, le nombre de piquets ainsi que leur longueur et la superficie totale des travaux d'excavation et de revêtement. Les résultats montrent que la technique HEPAG donne des valeurs du coût plus faibles relativement à celles trouvées par les méthodes AG et EP. La bonne concordance obtenue entre les paramètres de sécurité et ceux trouvés en utilisant CYMGrd confirme l'efficacité des algorithmes proposés.

**Mots clés :** Mise à la terre, Optimisation, Algorithme Génétique, Essaim Particulaire, Hybridation, Fonction objectif, Réseau de terre, IEEE 80-2000, CYMGrd, MATLAB, Grille, Piquets.

## REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En premier lieu, je tiens à remercier Messieurs **Madjid Tegar** et **Abdelouahab Mekhaldi**, Professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour avoir accepté de diriger et de suivre ce travail avec disponibilité, patience et bienveillance.

En second lieu, je suis très reconnaissant envers Monsieur **Ahmed Boubakeur**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Aussi, je tiens à remercier, Monsieur **Hocine Moulai**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Monsieur **Abderahmane ZIANI**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Monsieur **Redouane TAHMI** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de participer à ce jury de thèse.

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants ayant contribué à ma formation et ce depuis le tronc commun jusqu'à la dernière année de graduation, sans oublier l'ensemble de mes camarades de la promotion 2012.

Enfin, je ne saurais clore ce volet sans remercier mes parents, qui sans eux, mes études et ce travail n'aurait jamais abouti. Je ne les remercierai jamais assez pour leur patience, courage, conseils, exemples et dévouement.

A toute ma famille, mes parents, ainsi que tous mes amis.

# Table des matières

Liste Des Figures

Liste Des Tableaux

Résumé

Introduction générale.....16

## I. Généralités

I.1. Introduction.....21

### I.2. Définitions

I.2.1. Mise à la terre.....21

I.2.2. Terre de référence.....22

I.2.3. Masse.....22

I.2.4. Conducteur de terre.....22

I.2.5. Réseau de terre.....22

I.2.6. Prise de terre.....22

I.2.7. Eléments d'une mise à la terre.....23

I.2.8. Elévation du potentielle de terre.....23

I.2.9. Tension de contact.....24

I.2.10. Tension de maille .....24

I.2.11. Tension de contact métal sur métal .....24

I.2.12. Tension de pas .....24

I.2.13. Tension transférée .....24

I.3. Effet du courant électrique sur le corps humain.....25

<b>I.4. Caractéristiques de la terre .....</b>	<b>26</b>
<b>I.4.1. Caractéristiques électriques du sol.....</b>	<b>27</b>
<b>I.4.1.1. Résistivité.....</b>	<b>27</b>
<b>I.4.1.2. Permittivité.....</b>	<b>28</b>
<b>I.4.1.3. Perméabilité.....</b>	<b>29</b>
<b>I.5. Mesure de la résistivité du sol.....</b>	<b>29</b>
<b>I.5.1. Méthode de Wenner.....</b>	<b>29</b>
<b>I.5.2. Méthode de Schlumberger.....</b>	<b>30</b>
<b>I.5.3. Méthode de mesure à trois pôles.....</b>	<b>31</b>
<b>I.6. Résistances des configurations de mise à la terre les plus utilisées.....</b>	<b>32</b>
<b>I.7. Régimes de neutre.....</b>	<b>36</b>
<b>I.7.1. Schémas de liaison à la terre en basse tension.....</b>	<b>36</b>
<b>I.7.2. Mise à la terre par neutre isolé.....</b>	<b>37</b>
<b>I.7.3. Mise à la terre directe.....</b>	<b>38</b>
<b>I.7.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance.....</b>	<b>38</b>
<b>I.7.5. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance.....</b>	<b>38</b>
<b>I.8. Conclusion.....</b>	<b>39</b>
<b>II. Conception d'un système de mise à la terre selon IEEE 80- 2000</b>	
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>II.2. Différentes étapes de conception.....</b>	<b>40</b>
<b>II.2.1. Etape 1 : Détermination de la résistivité.....</b>	<b>40</b>
<b>II.2.2. Etape 2 : Dimensionnement des conducteurs.....</b>	<b>41</b>

II.2.3. Etape 3 : Tensions de contact et de pas maximales admissibles.....	42
II.2.4. Etape 4 : Conception initiale.....	45
II.2.5. Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille.....	46
II.2.6. Etape 6 : Courant maximum $I_G$ de la grille.....	46
II.2.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT).....	48
II.2.8. Etape 8 : Tensions de maille et de pas.....	48
II.2.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre $E_t$ et $E_{t50}$ et entre $E_p$ et $E_{Step50}$ .....	50
II.2.10. Etape 11 : Amélioration de la configuration initiale.....	50
II.2.11. Etape 12 : configuration final.....	50
II.3. Conclusion.....	51
<b>III. Algorithmes d'optimisation</b>	
III.1. Introduction.....	53
III.2. Théorie d'optimisation.....	55
III.2.1. Concept et définition.....	56
III.2.2. Délimitation de l'espace de recherche.....	56
III.2.3. Différents critères d'optimalité pour différents types d'optimum.....	57
III.2.4. Classification des problèmes d'optimisation.....	58
III.2.5. Optimisation mono-objectif.....	59
III.2.6. Optimisation multi-objectif.....	59
III.2.7. Classification des méthodes d'optimisation.....	60
III.3. Caractéristiques.....	61



III.3.1. Sensibilité et robustesse d'une méthode d'optimisation.....	61
III.3.2. Opérateurs de recherches fondamentales.....	62
III.3.3. Mode de recherche de l'optimum.....	63
III.3.4. Ordre d'une méthode de résolution.....	63
III.4. Optimisation des systèmes de mise à la terre dans littérature .....	63
III.5. Conclusion.....	65

#### **IV. Applications d'AG pour optimisation des SMALT**

IV.1. Introduction .....	66
IV.2. Formulation du problème d'optimisation.....	66
IV.2.1. Fonction objectif.....	66
IV.2.2. Paramètres de conception.....	69
IV.2.3. Gestion des contraintes.....	69
IV.3. Optimisation par algorithmes génétiques (AG).....	71
IV.3.1. Principe général.....	71
IV.3.2. Terminologie.....	72
IV.3.3. Etapes de l'AG.....	73
IV.3.3.1. Initialisation de la population.....	73
IV.3.3.2. Fonction objectif (ou fonction d'adaptation).....	74
IV.3.3.3. Opérateurs génétiques.....	76
IV.3.3.4. Critère d'arrêt.....	80
IV.4. Applications et validation.....	81
IV.4.1. Poste de transformation 60/30kV de Ain El-Melh.....	81

IV.4.2. Résultats et interprétations.....	81
IV.5. Validation en utilisant CYMGrd.....	88
IV.6. Conclusion.....	91
<b>V. Optimisation par Essaim Particulaire</b>	
V.1. Introduction .....	92
V.2. Optimisation par Essaim Particulaire (OEP).....	92
V.2.1. Principe général.....	92
V.2.2. Caractéristiques de l'EP .....	92
V.2.3. Paramètres d'un EP .....	93
V.2.4 Etapes de l'Algorithme d'essaim particulaire.....	94
V.2.4.1. Initialisation de la population.....	95
V.2.4.2. Fonction objectif (ou fonction d'adaptation).....	96
V.2.4.3. Mise à jour de la position et de la vitesse .....	97
V.2.5. Configuration des paramètres.....	97
V.2.5.1. Facteur d'inertie.....	98
V.2.5.3. Coefficients de confiance.....	99
V.2.5.4. Taille de l'essaim.....	99
V.2.6. Critère d'arrêt.....	99
V.3. Applications et validatio.....	100
V.4. Validation en utilisant CYMGrd.....	106
V.5. Conclusion.....	108
<b>V.I. Optimisation par EP, AG et HEPAG</b>	

<b>VI.1. Introduction .....</b>	<b>109</b>
<b>VI.2. Principe général.....</b>	<b>109</b>
<b>VI.3. Algorithme hybride HEPAG .....</b>	<b>112</b>
<b>VI.3.1. Initialisation de la population.....</b>	<b>112</b>
<b>VI.3.2. Fonction fitness.....</b>	<b>113</b>
<b>VI.3.3. Hybridation.....</b>	<b>113</b>
<b>VI.4. Application et validation.....</b>	<b>113</b>
<b>VI.4.1. Présentation de l'ouvrage énergétique de Labreg.....</b>	<b>114</b>
<b>VI.4.2. Résultats et discussion.....</b>	<b>115</b>
<b>VI.5. Utilisation de CYMGrd - Validation des résultats.....</b>	<b>125</b>
<b>VI.6. Conclusion.....</b>	<b>129</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>130</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>133</b>

# Liste Des Tableaux

<b>Tableau I.1 : Résistivités moyennes des différents types de sol.....</b>	<b>27</b>
<b>Tableau I.2 : Signification des lettres des différentes configurations..</b>	<b>21</b>
<b>Tableau II.1. Constantes caractéristiques des matériaux.....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau II.2. Valeurs typiques de <math>D_f</math> relative au rapport X/R .....</b>	<b>45</b>
<b>Tableau III.1 : Classification des problèmes d'optimisation.....</b>	<b>59</b>
<b>Tableau IV.1: Intervalles de variation des paramètres.....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau IV.2 : Coûts unitaires des principaux matériaux de SMALT.....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau IV.3 : Exemple d'une sélection de type Roue de Roulette .....</b>	<b>79</b>
<b>Tableau IV.4 : Paramètres optimaux par AG.....</b>	<b>85</b>
<b>Tableau IV.5 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus par AG.....</b>	<b>87</b>
<b>Tableau IV.6 : Comparaison des principaux paramètres électriques .....</b>	<b>88</b>
<b>Tableau V.1 : Paramètres optimaux par EP.....</b>	<b>103</b>
<b>Tableau V.2 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus par EP.....</b>	<b>105</b>
<b>Tableau V.3 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd .....</b>	<b>105</b>
<b>Tableau VI.1 : Données relatives aux programmes d'optimisation .....</b>	<b>113</b>

## *Liste des tableaux*

---

<b>Tableau VI.2 : Paramètres optimaux obtenus lors de l'optimisation par EP, AG et HEPAG .....</b>	<b>123</b>
<b>Tableau VI.3 : Valeurs optimales des paramètres électriques obtenus .....</b>	<b>124</b>
<b>Tableau VI.3 : Comparaison des principaux paramètres électriques, pour une taille de population de 10000.....</b>	<b>125</b>

# Liste Des Figures

Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets).....	23
Figure I.2 : Représentation des différentes tensions de sécurité.....	25
Figure I.3 : Sol homogène.....	28
Figure I.4 : Sol à 2 couches de résistivités différentes.....	28
Figure I.5 : Schéma du montage de la méthode de Wenner.....	30
Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger.....	30
Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles.....	31
Figure I.8 : Résistance de quelques configurations en sol homogène .....	32
Figure I.9 : Electrode se situant dans la couche supérieure.....	34
Figure I.10 : Electrode pénétrant dans la couche inférieure.....	35
Figure I.11 Electrode horizontale dans un sol en deux couches.....	35
Figure I.12 : Schéma de liaison à la terre en basse tension IT.....	36
Figure I.13 : Schéma de liaison à la terre en basse tension TT.....	37
Figure I.14.a : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-C.....	37
Figure I.14.b : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN-S.....	37
Figure II.1: Exposition à la tension de contact.....	42
Figure II.2 : Impédances du circuit de la tension de contact.....	42
Figure II.3 : Circuit de la tension de contact.....	43
Figure II.4 : Exposition de la tension de pas.....	44

<b>Figure II.5 : Circuit de la tension de pas .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure II.6 : Disposition d'un SMALT .....</b>	<b>46</b>
<b>Figure II.7 : Organigramme de la conception de SMALT .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure III.1: Modélisation et résolution pour l'optimisation.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.2 : Espace de recherche.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.3 : Espace de valeurs réalisables.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.4 : Maximum global, local fort et local faible.....</b>	<b>58</b>
<b>Figure III.5 : Méthodes d'optimisation .....</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.6 : Modèle de la boîte noire.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV.1: Organigramme de l'AG élaboré .....</b>	<b>73</b>
<b>Figure IV.2 : Croisement avec un point .....</b>	<b>73</b>
<b>Figure IV.3 : Croisement avec 2 points .....</b>	<b>74</b>
<b>Figure IV.4 : Exemple d'une mutation .....</b>	<b>74</b>
<b>Figure IV.5 : Schéma d'une Roue de Roulette.....</b>	<b>75</b>
<b>Figure IV.6 : Fitness moyenne et fitness optimale en fonction du nombre d'itérations pour différentes taille de la population .....</b>	<b>83</b>
<b>Figure IV.7 : Courbes de convergence du Coût (\$) pour différentes taille de la population .....</b>	<b>84</b>
<b>Figure IV.8 : Topologies de la grille en 3D pour différentes tailles de la population .....</b>	<b>87</b>
<b>Figure IV.9 : Diagramme de profil de potentiels de contact pour différents tailles de la population.....</b>	<b>88</b>

<b>Figure V.1: Étapes d'un algorithme d'essaim particulaire.....</b>	<b>93</b>
<b>Figure V.2 : Déplacements possibles entre deux points.....</b>	<b>95</b>
<b>Figure V.3 : Fitness moyenne et fitness optimale en fonction du nombre d'itérations pour différentes tailles de population .....</b>	<b>96</b>
<b>Figure V.4 : Courbe de convergence du coût .....</b>	<b>97</b>
<b>Figure V.5 : Topologies de la grille en 3D pour différentes tailles de la population .....</b>	<b>105</b>
<b>Figure V.9 : Diagramme de profil de potentiels de contact pour différents tailles de la population.....</b>	<b>106</b>
<b>Figure VI.1: Étapes de l'algorithme HEPAG.....</b>	<b>111</b>
<b>Figure VI.2 : Fitness moyenne et fitness optimale en fonction du nombre d'itérations pour différentes tailles de population .....</b>	<b>116</b>
<b>Figure VI.3: Courbe de convergence de coût en fonction du nombre d'itérations, pour différentes tailles de population .....</b>	<b>119</b>
<b>Figure VI.4: Fonction de coût en fonction du nombre d'itérations pour différentes techniques.....</b>	<b>119</b>
<b>Figure VI.5 : Topologies de la grille en 3D obtenues pour une taille de population de 10000.....</b>	<b>123</b>
<b>Figure VI.6: Profils de tension de contact pour les conceptions optimales, pour une taille de population de 10000.....</b>	<b>126</b>



# *Introduction générale*

Dans des conditions de défaut, le courant circule dans le sol à travers le système de mise à la terre, ce qui engendre une élévation de potentiel de terre (EPT) par rapport à une terre lointaine (potentiel de référence). L'élévation de potentiel affecte la sûreté des personnes en raison de tensions de contact et de pas, au moment où l'EPT affecte l'isolation des dispositifs de protection [UND 12, ALI 14]. Par conséquent, la conception d'un système de mise à la terre appropriée est l'un des paramètres les plus déterminants pour assurer la sécurité des personnes, des appareils et des équipements, et d'améliorer la qualité du service électrique [LEE 09]. En effet, les problèmes liés à la conception du système de mise à la terre attirent l'attention des ingénieurs et des concepteurs notamment avec le développement de l'industrie, la forte demande d'énergie électrique et l'augmentation importante du niveau de tension [UND 12, NZU 09].

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

Avec l'évolution rapide de la technologie informatique, les ordinateurs sont de plus en plus puissants, et en conséquence, la taille et la complexité des problèmes de conception des systèmes de terre qui peuvent être résolus en utilisant des techniques d'optimisation sont

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

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

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

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

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

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

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

Notre travail présente une contribution aux problèmes d'optimisation des SMALT afin de trouver une installation à la fois optimale, économique et sécurisée. En fait, l'optimisation de trois réseaux de terre correspondant à l'ouvrage énergétique de Labreg, au poste de transformation d'Ain El-Melh et au poste de transformation de Bir-Khadem ont fait l'objet de ce travail.

Pour parvenir à une telle optimisation, deux techniques d'optimisation basées sur l'algorithme génétique (AG) et l'essai particulaire (EP) ont été élaborées. Basée sur les avantages de ces techniques, une nouvelle stratégie d'hybridation (HEPAG) des essais particulaires et des algorithmes génétiques a été également développée. En fait, la technique HEPAG initie un espace de recherche par une population des particules dont la position est codé en binaire. Chaque particule se déplace dans l'espace de recherche suivant deux mouvements ; l'un utilise la vitesse et la position de l'EP et l'autre emploie les opérateurs de l'AG (mutation, croisement et sélection). Enfin, la particule optimale sera sélectionnée dans la suivante génération.

Le problème d'optimisation des SMALT est parvenu en minimisant la fonction de coût. Pour cette fonction, nous sommes arrivés, après une recherche approfondie, à proposer une nouvelle fonction mathématique incluant tous les paramètres géométriques et de construction cités dans la littérature.

L'implémentation des programmes relatifs aux techniques susmentionnées tient compte de la procédure de conception des systèmes de mise à terre citée dans la norme IEEE Std.80-2000 [IEE 00]. Pour cela, les restrictions de sécurité liées à la limitation des tensions de contact et de pas, et de la résistance de mise à la terre requises par la norme IEEE Std. 80-2000 ont été respectées. Les résultats ainsi obtenus ont été comparés, discutés et confrontés à ceux trouvés en utilisant le code de calcul CYMGrd.

Ainsi, notre mémoire s'articule sur six chapitres distincts. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la mise à la terre des installations électriques. En effet, les différentes définitions relatives à ce domaine, les diverses structures ainsi que les caractéristiques du sol dans lequel est enfoui le système de terre, les méthodes les plus populaires permettant la mesure de la résistivité du sol ainsi que les différents régimes du neutre et schémas de liaisons à la terre y sont présentés. Les expressions des résistances des configurations de mise à la terre les plus utilisées ainsi que les matériaux de construction des systèmes de terre y sont également exposés.

Dans le deuxième chapitre, Nous présentons la méthodologie relative à la conception des systèmes de mise à la terre selon la norme IEEE std.80-2000.

Le troisième chapitre englobe les généralités relatives à l'optimisation (sa définition, son concept, les différents critères d'optimalité, la classification des problèmes d'optimisation,

...). Les différentes méthodes d'optimisation approchées, plus particulièrement les techniques méta-heuristiques, ainsi que leurs caractéristiques y sont également présentées.

Nous présentons dans le quatrième chapitre, la formulation du problème d'optimisation d'un SMALT de la technique des algorithmes génétiques (AGs). Le but est de minimiser la fonction de coût que nous avons proposée et d'assurer la sécurité de l'ouvrage électrique. Une application pour optimiser le SMALT du poste de Ain El-Melh y est présentée.

Le cinquième chapitre est consacré à l'application des techniques d'optimisation par essaim particulaire (EP) pour la conception du SMALT de l'ouvrage énergétique de Bir-Khadem. L'objectif est de déterminer les paramètres optimaux aussi bien géométriques que de construction correspondant à la configuration optimisé.

Dans le sixième et dernier chapitre, nous proposons une nouvelle stratégie d'hybridation EP-AG (HEPAG) pour la conception optimale du SMALT de l'ouvrage énergétique de Labreg. Les résultats ainsi obtenus sont comparés et discutés par rapport à ceux trouvés lors de l'application des techniques EP et AG. Par ailleurs, la validation de nos programmes élaborés en se basant sur les trois techniques ainsi que la confrontation de nos résultats à ceux trouvés par CYMGrdy sont également présentées.

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

## I.1. Introduction

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

Le réseau de terre d'une installation électrique doit donc assurer simultanément plusieurs fonctions: écouler dans le sol les courants de défaut et de foudre, assurer à tout moment le maintien de la sécurité des personnes, des biens et maintenir un potentiel de référence; la notion de l'équipotentialité est la première caractéristique recherchée de l'ensemble du réseau et du circuit de terre [KLA 07].

La mise à la terre dans les réseaux électriques paraît être relativement simple. Cependant elle n'a cessé de présenter des difficultés. Les progrès récents accomplis tant en électrotechnique qu'en électronique de puissance ont fait apparaître de nouveaux problèmes, encore non parfaitement résolus. De tels problèmes sont dus à la coexistence d'équipements électroniques sensibles avec des installations susceptibles de produire des courants de court-circuit de plusieurs dizaines de kilo ampère [EDF 84, FRA 10].

L'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol autour du réseau de terre. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité: la conception du réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol [TAY 08].

## I.2. Définitions

### I.2.1. Mise à la terre

C'est relier la masse un équipement électrique (i.e., enveloppe métallique) ou le neutre d'une installation à une prise de terre [EDF 97].

### I.2.2. Terre de référence

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

### I.2.3. Masse

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

### I.2.4. Conducteur de terre

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

### I.2.5. Réseau de terre

C'est un ensemble de conducteurs non isolés qui constituent un réseau enterré dont le but est d'assurer l'écoulement efficace du courant de défaut en gardant le même potentiel en tout point du sol [IEE 00].

### I.2.6. Prise de terre

C'est un conducteur avec une partie enterrée qui assure une liaison électrique avec le réseau de terre (grille, piquets,...). Les types de prise de terre sont distingués à partir de leur rôle. La prise de terre de masse a pour but essentiel de protéger les personnes contre les risques dont ils résulteraient par le contact simultané entre deux points portés à des potentiels différents. Il faut donc fixer la masse à un même potentiel, celui de la terre [LEF 07]. Les mises à la terre des éclateurs et parafoudres 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 [EDF 97].

### I.2.7. Eléments d'une mise à la terre

Deux types de systèmes de mise à la terre sont distingués selon la simplicité ou la complexité de ses éléments. Le système simple est un conducteur enterré. Par contre, le système complexe est un réseau horizontal de conducteurs maillés (grille), comportant, en général, des piquets verticaux (Figure I.1) [KLA 07].

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. A titre d'exemple, la prise de terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste [KLA 07].

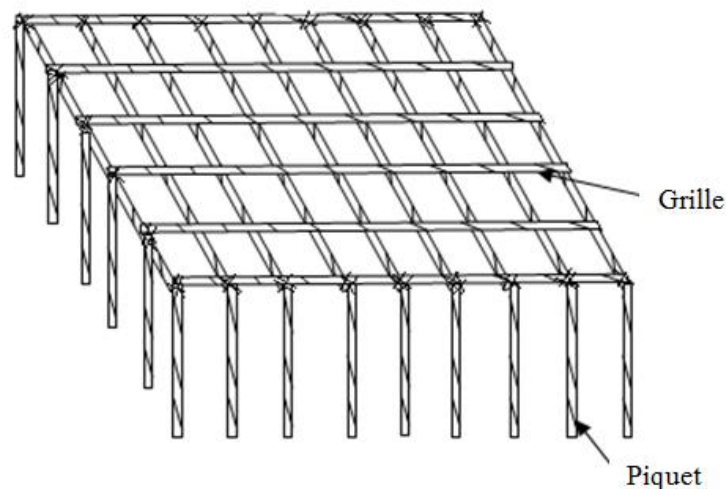


Figure I.1 : Système complexe d'une mise à la terre (grille et piquets)

### I.2.8. Elévation du potentielle de terre EPT (ou GPR)

Lors de l'écoulement du courant de défaut dans une électrode de terre, l'EPT présente l'élévation du potentiel qui se développe entre cette électrode de terre et une terre lointaine (à potentiel nul) [IEE 00].



### I.2.9. Tension de contact ( $V_t$ )

La tension de contact (ou de toucher), selon la norme IEEE Std. 80-2000, est la différence de potentiel entre la main d'une personne, touchant une structure mise à la terre, et son pied. On distingue deux types de contacts : le contact direct et le contact indirect [IEE 00, BON 08].

Le contact direct est le contact d'une personne avec une partie active d'un matériel sous tension. Ce contact peut avoir lieu avec une phase ou avec le neutre. Le contact indirect est le contact d'une personne avec une masse d'un récepteur mise accidentellement sous-tension suite à un défaut d'isolement [IEE 00, BON 08].

### I.2.10. Tension de maille ( $V_m$ )

La tension de maille est définie comme étant la différence de potentiel entre le centre d'une maille de la grille et une structure aux conducteurs enterrés de la même grille de mise à la terre. Il s'agit du plus mauvais cas de la tension de contact [BON 08].

### I.2.11. Tension de contact métal sur métal ( $V_{mm}$ )

La tension de contact métal sur métal est la différence du potentiel entre les objets métalliques reliés accidentellement par main-à-main ou main-à-pieds.

### I.2.12. Tension de pas ( $V_s$ )

La tension de pas ( $V_s$ ) 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 [IEE 00].

### I.2.13. Tension transférée ( $V_{trd}$ )

Un cas spécial de la tension de contact dans laquelle on transfère une tension d'un conducteur relié à la terre à une structure métallique située à l'extérieure de la sous-station. Ceci peut être une tension de contact très élevée dont la résultante peut égaler, le plein GPR lors d'un défaut [GEO 01].

Une illustration des différentes tensions (GPR, pas, contact, maille et transférée) est représentée sur la figure I.2.

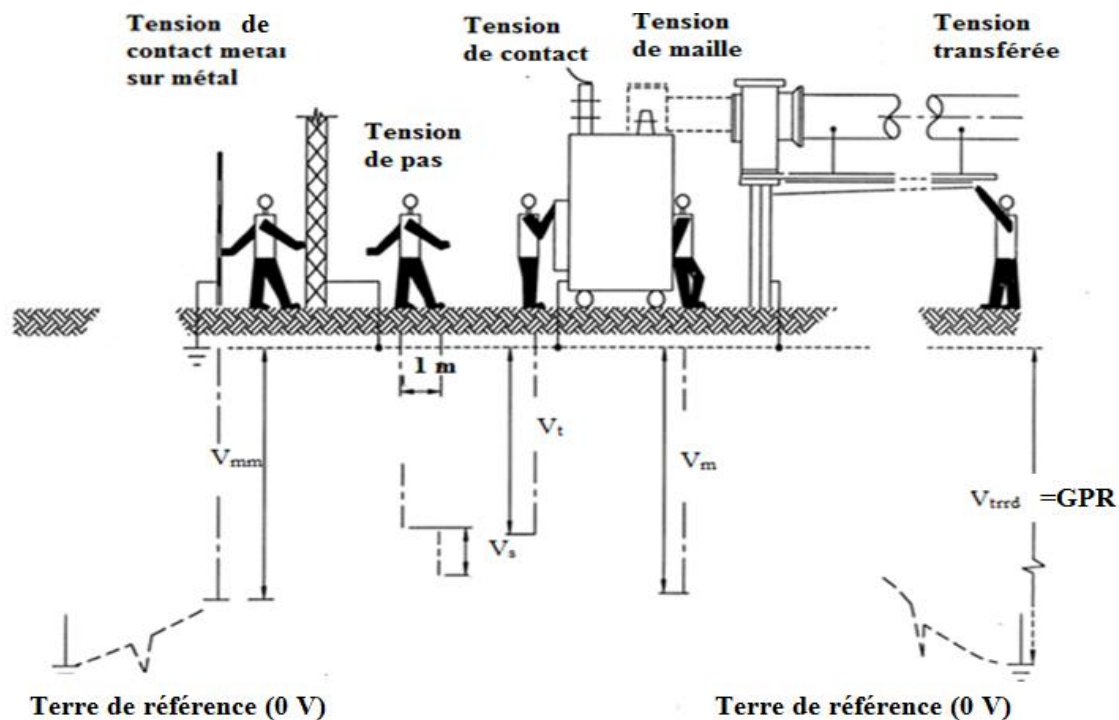


Figure I.2 : Représentation des différentes tensions de sécurité

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

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

Si on évalue les dégâts en fonction de l'amplitude du courant électrique, on peut faire les constatations suivantes [FRA 10] :

- Une sensation du courant à 0,5mA.
- Des contractions musculaires jusqu'à la tétanisation à 10mA.
- Une paralysie respiratoire à 30mA.
- Une fibrillation cardiaque irréversible à 75mA.
- Un arrêt cardiaque à 1A.

La constante empirique  $S_B$  qui caractérise l'énergie de décharge tolérée par le corps humain, s'écrit de la forme suivante [IEE 00]:

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

$I_B$ : le courant toléré par le corps humain en A;

$t_c$ : durée d'exposition en s.

Dalziel et al. [DAL 41, DAL 56] ont constaté que l'énergie de choc qui peut être survécue par 99,5% de personnes pesant approximativement 50kg (respectivement 70kg) a comme conséquence une valeur de  $S_B$  de 0,0135; puisque  $\sqrt{S_B} = 0,116$  (respectivement de 0,0246, car  $\sqrt{S_B} = 0,157$ ). En effet, le courant tolérable limite pour des poids corporels de 50 kg et 70 kg sont respectivement donné par [IEE 00]:

$$I_b = \sqrt{\frac{S_B}{t_c}} = \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \text{ (A) pour un corps de 50kg} \quad (\text{I.2})$$

$$I_b = \sqrt{\frac{S_B}{t_c}} = \frac{0,157}{\sqrt{t_c}} \text{ (A) pour un corps de 70kg} \quad (\text{I.3})$$

En fait, la tension n'est pas une indication de l'intensité de choc parce que la résistance du corps change tellement considérablement qu'il est impossible de prévoir combien de courant résultera d'une tension donnée. La quantité de courant qui passe par le corps et la durée d'exposition sont les deux critères les plus importants pour déterminer le degré de danger d'un défaut.

#### I.4. Caractéristiques de la terre

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

### I.4.1. Caractéristiques électriques du sol

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

Pour caractériser le comportement électrique du sol, il faut déterminer les trois grandeurs suivantes [EDF 84]:

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

#### I.4.1.1. Résistivité

La terre a la propriété de résister au déplacement des charges électriques. Cette résistance  $R$  est caractérisée par la résistivité  $\rho$ . La résistivité est une quantité mesurable et elle dépend de plusieurs paramètres, entre autres, la nature du sol, la pression, la porosité, le pourcentage d'humidité, la stratification de couches de différentes résistivités, le pourcentage d'acides et de bases, la température,... Le Tableau I.1 montre la résistivité des différents types de sol [EDF 84].

Nature du sol	Résistivité en $\Omega\text{m}$
Tourbe humide	5 à 10
Humus	10 à 20
Limon	20 à 30
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Calcaires tendres	100 à 500
Calcaires fissurés	500 à 1000
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Calcaires compacts	1000 à 5000
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000

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

Pour une étude pratique et moins compliquée, on peut supposer qu'un sol avec une différence maximale de la résistivité entre leurs couches inférieure à 30% comme sol

homogènes (Figure I.3), si non, on le considère comme un sol à deux couches (Figure I.4) [BEN 14].

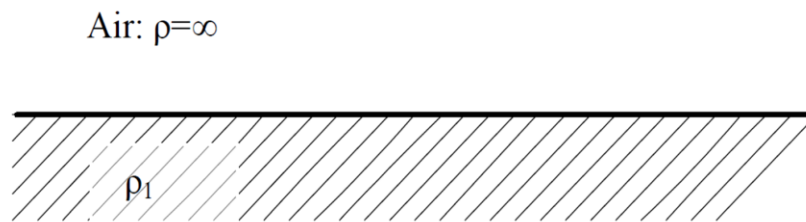


Figure I.3 : Sol homogène

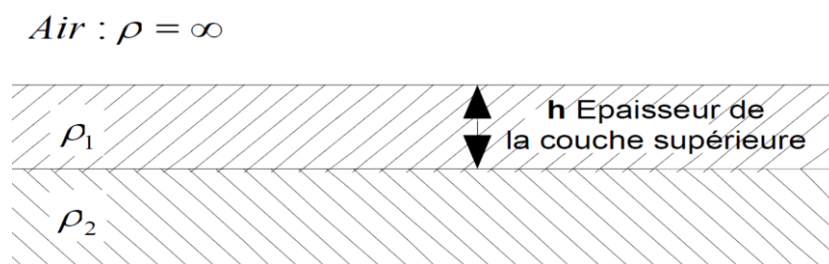


Figure I.4 : Sol à 2 couches de résistivités différentes

Le modèle de sol en deux couches pourrait être fiable pour obtenir une mise à la terre sûre. On peut décrire le changement brusque de résistivité par la formule suivante [TAY 08] :

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{I.4})$$

$\rho_1$ : résistivité de la couche supérieure;  
 $\rho_2$ : résistivité de la couche inférieure;  
 $k$ : coefficient de réflexion.

Dans d'un sol à plusieurs couches, on peut déterminer la résistivité apparente par la formule suivante [BON 08]:

$$\rho_a = \frac{\rho_{(a1)} + \rho_{(a2)} + \rho_{(a3)} + \dots + \rho_{(an)}}{n} \quad (\text{I.5})$$

$\rho_{(a1)}, \rho_{(a2)}, \rho_{(a3)}, \dots, \rho_{(an)}$  : les résistivités des différentes couches du sol.

### I.4.1.2. Permittivité

La permittivité  $\epsilon$  caractérise le comportement diélectrique des matériaux. Elle est en fonction des permittivités propres des différents composants du sol.

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

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

### I.4.1.3. Perméabilité

Comme la plupart des sols sont pauvres en oxyde de fer, ils sont considérés comme amagnétiques. Dans ces conditions, on peut considérer que la perméabilité égale à l'unité [TAY 08].

## I.5. Mesure de la résistivité du sol

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

$$\rho(a) = \rho_i \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{e}{a}\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{e}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (\text{I.6})$$

$a$ : distance entre les électrodes;

$e$ : profondeur de la couche supérieure de résistivité  $\rho_1$ ;

$k$ : coefficient de réflexion donné par I.4.

### I.5.1. Méthode de Wenner

On utilise quatre électrodes sur la même droite avec un espace entre elles équidistant égale à  $a$ , et enterrées verticalement, on mesure la résistivité au centre à une profondeur de  $3a/4$ . On alimente les électrodes des extrémités par un courant  $I$  à l'aide d'un générateur  $G$ . On branche un voltmètre aux bornes des deux électrodes du milieu et mesure  $V$ , puis on

mesure la valeur de  $R$  à l'aide d'un telluromètre. La figure I.5 illustre le schéma du montage de la méthode de Wenner. On fait varier la distance  $a$  pour obtenir un vecteur de valeurs de  $R$ , puis on calcule sa valeur moyenne [TAY 08]. On peut tirer la valeur de résistivité ( $\rho$ ) du point central pour un sol homogène avec la formule suivante [GAR 11] :

$$\rho = 2\pi R a \quad (I.7)$$

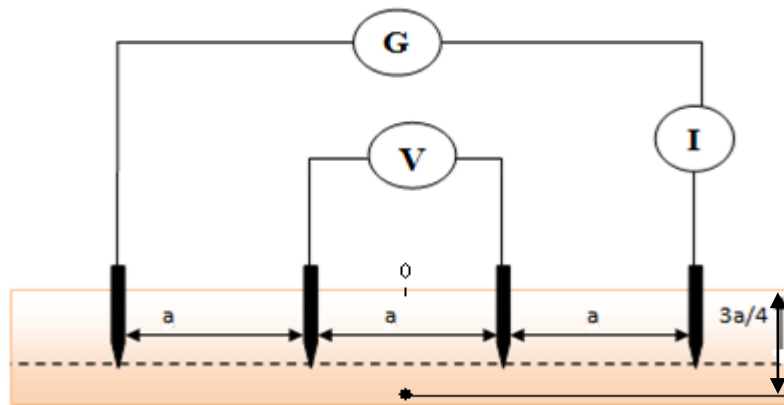


Figure I.5 : Schéma du montage de la méthode de Wenner

### I.5.2. Méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger est basée sur le même principe de mesure de Wenner. La seule différence consiste en les distances séparant les électrodes (Figure I.6) :

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

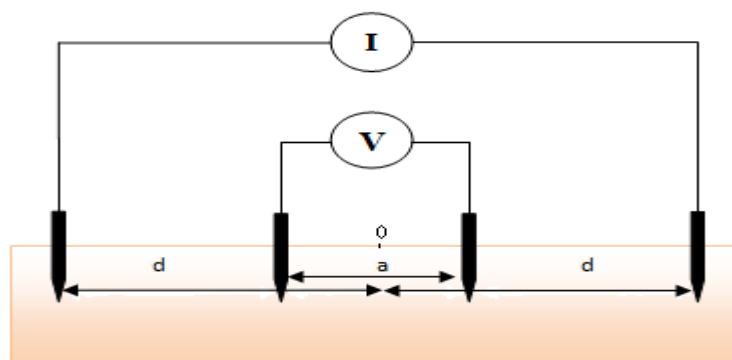


Figure I.6 : Schéma du montage de la méthode de Schlumberger

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

$$\rho = \frac{\pi \left( d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R}{4} \quad (\text{I.8})$$

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

### I.5.3. Méthode de mesure à trois pôles

La méthode de mesure à trois pôles emploie deux piquets S1 et S2 ; S2 est utilisé pour la circulation de courant injecté et S1 comme une référence de potentiel. Le troisième pôle P est la prise de terre qu'on veut mesurer. Si la distance entre P et S2 est 'd', la distance entre P et S1 doit être de 62% de la distance d (Figure I.7). Cette disposition des sondes permet de minimiser les perturbations des pôles les uns sur les autres [TAY 08].

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

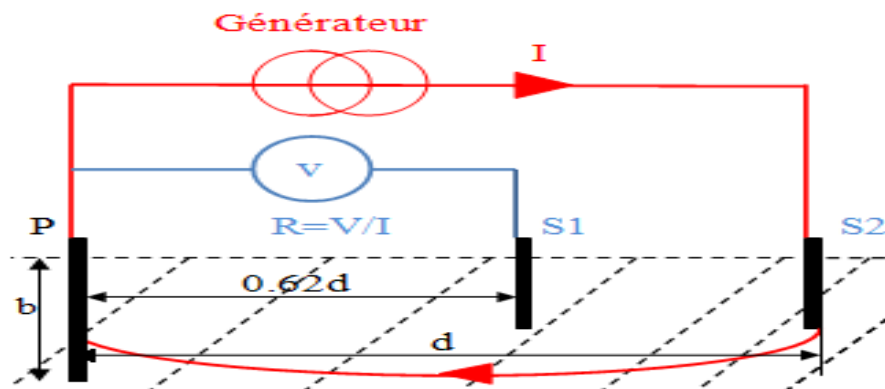


Figure I.7 : Schéma du montage de la méthode à trois pôles

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

$$\rho_a = \frac{2\pi b R}{\ln\left(\frac{2b^2}{d}\right)} \quad (\text{I.9})$$

b: la profondeur de P;

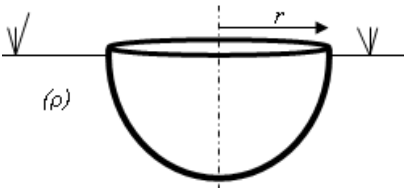
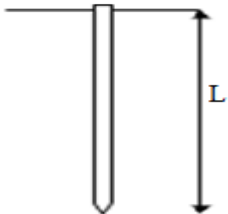
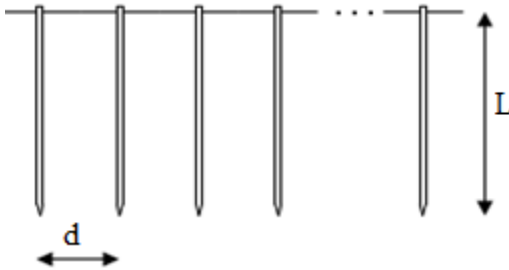
d: la distance entre P et S2.



## I.6. Résistances des quelques configurations de mise à la terre

### I.6.1. Sol homogène

Beaucoup d'auteurs ont mis en évidence les méthodes analytiques pour évaluer la résistance de mise à la terre pour différentes configurations d'électrodes. Les relations qui sont données dans le tableau (I.8) supposent une résistivité uniforme du sol  $\rho$  (sol homogène). En pratique, pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol, on fait souvent l'hypothèse de deux couches de résistivités différentes. Les différentes configurations dépendent de la forme de la prise de terre [EDF 84].

Forme de prise de terre	Valeur de la résistance
<p>Electrode hémisphérique de rayon <math>r</math></p> 	$R = \frac{\rho}{2\pi r}$
<p>Piquet de terre de longueur <math>L</math> et de rayon <math>r</math></p> 	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$
<p>Electrodes, de longueur <math>L</math> et de rayon <math>r</math>, en ligne droite</p> 	$R \approx \frac{1}{n} \left[ \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left( \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] \quad d > l$


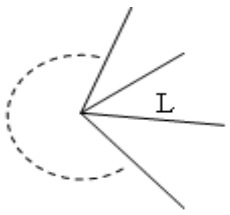
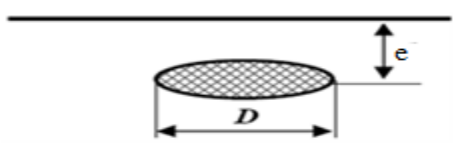
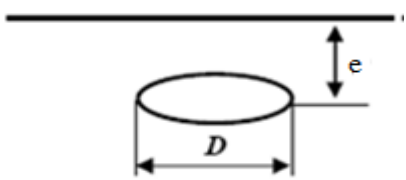
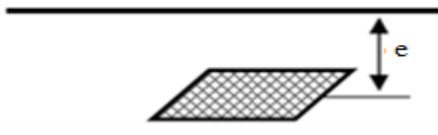
<p>Câble enterré horizontalement de longueur <math>L</math> et de rayon <math>r</math></p> 	$R = \frac{\rho}{\pi L} \left( \ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2re}} - 1 \right)$																
<p>Plusieurs câbles rayonnant de longueur <math>L</math>, enfouis à la même profondeur <math>e</math></p> 	$R = \frac{\rho}{n\pi L} \left( \ln \frac{2L}{\sqrt{2re}} - 1 + N(n) \right)$ <p><math>n</math> : nombre de rayons (supposés régulièrement disposés).</p> <p>Les <math>N(n)</math> sont donnés par le tableau suivant :</p> <table border="1" data-bbox="805 784 1388 896"> <tr> <td>n</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>12</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>0,7</td> <td>1,53</td> <td>2,45</td> <td>4,42</td> <td>6,5</td> <td>11</td> <td>116</td> </tr> </table>	n	2	3	4	6	8	12	100	N	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11	116
n	2	3	4	6	8	12	100										
N	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11	116										
<p>Grille en forme de disque</p> 	<p>pour <math>e \ll D</math> :</p> $R = \frac{\rho}{4D} \left( 1 - \frac{4e}{D} \right)$ <p>et pour <math>e \gg D</math> :</p> $R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi e}$																
<p>Boucle enterrée</p> 	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{er}$																
<p>Réseau maillé</p> 	$R \approx \frac{2\rho}{P}$ <p><math>P</math> : le périmètre de la grille.</p>																

Figure I.8 : Résistance de quelques configurations en sol homogène [EDF 84]

## I.6.2. Sol non homogène

### I.6.2.1. Résistance d'une électrode verticale

Tagg (1964) a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique verticale de longueur  $l$  et de rayon  $r$  dans un sol en deux couches supérieure et inférieure de résistivités  $\rho_1$  et  $\rho_2$  respectivement. Deux cas sont alors considérés : l'électrode peut se situer entièrement dans la couche supérieure ou dans la couche inférieure [TAG 64, DAW 02].

Pour une électrode se situant dans la couche supérieure de résistivité  $\rho_1$  (Figure I.9), la résistance correspondante est donnée par [TAG 64, SCH 08]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[ \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k^i}{2} \ln \left( \frac{\frac{iz}{l} + 1}{\frac{iz}{l} - 1} \right) \right] \quad (I.11)$$

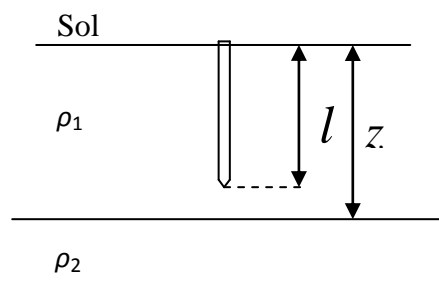


Figure I.9 : Electrode se situant dans la couche supérieure

avec:

$l$ : longueur de l'électrode;

$k$ : coefficient de réflexion donnée par la relation donné par I.4;

$z$ : profondeur de la couche de résistivité  $\rho_1$ ;

$i$ : nombre entier varié de 1 à  $\infty$ .

Pour une électrode qui pénètre dans la couche inférieure (Figure I.10), sa résistance est donnée par:

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

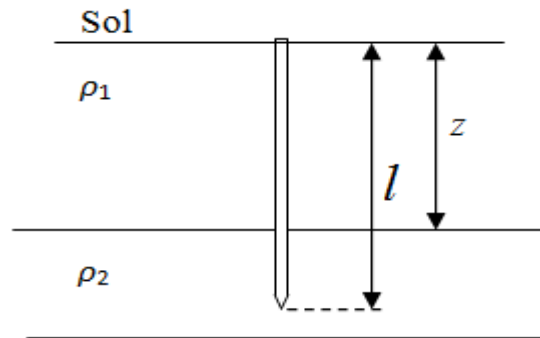


Figure I.10 : Electrode pénétrant dans la couche inférieure

### I.6.2.2. Résistance d'une électrode horizontale

Tagg (1964) a également établi l'expression de la résistance d'une électrode cylindrique horizontale de longueur  $l$  et de rayon  $r$ , enterrée à une profondeur  $e$  ( $e < z$ ) dans un sol en deux couches de résistivité  $\rho_1$  et  $\rho_2$  (Figure I.11). Cette résistance est donnée par [NZU 09]:

$$R = R_1 + R_a \tag{I.13}$$

$R_1$ : résistance de l'électrode horizontale dans un sol homogène de résistivité  $\rho_1$ ;

$R_a$ : résistance additionnelle due au changement de la résistivité du sol;

$Z$ : épaisseur de la couche supérieure.

La résistance  $R_a$  est donnée par [DAW01]:

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{i=1}^{\infty} k^i \left[ 4 \ln \left( \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1}}{2i\frac{z}{l}} \right) + 8i\frac{z}{l} - 4\sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1} \right] \tag{I.14}$$

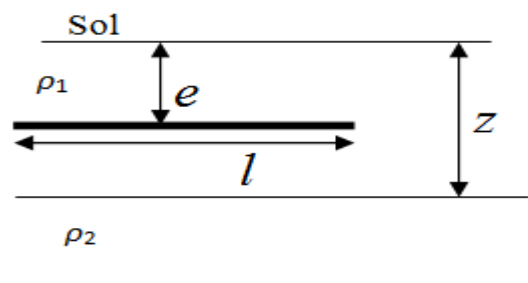


Figure I.11 : Electrode horizontale dans un sol en deux couches

### I.7. Régimes de neutre

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

#### I.7.1. Schémas de liaison à la terre

Le schéma de liaison à la terre (SLT) illustre comment les neutres du transformateur d'alimentation et des masses des récepteurs sont reliés à la terre ou au neutre du réseau d'alimentation. On distingue trois schémas TT, IT et TN-C ou -S, qui correspondent respectivement aux figures (I.12 à I.14) [LEF 07, PRE 05]. La signification des lettres T, I, N, C et S est présentée dans le tableau I.2.

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

Tableau I.2 : Signification des lettres des différentes configurations

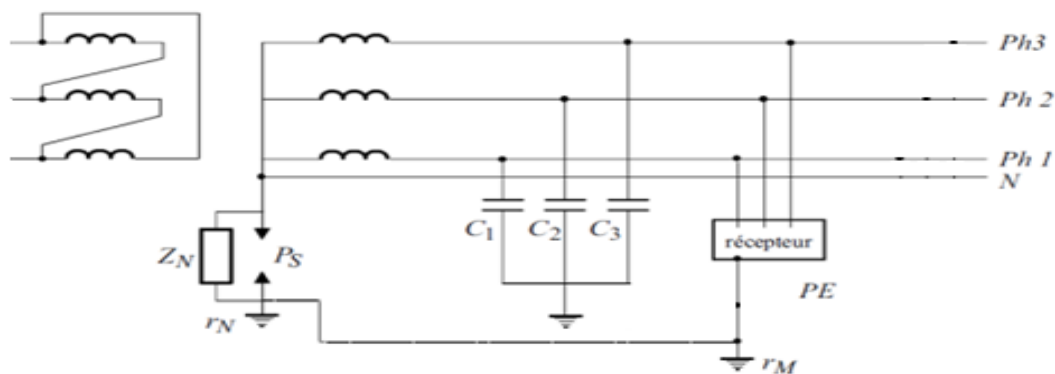


Figure I.12 : Schéma de liaison à la terre en basse tension IT

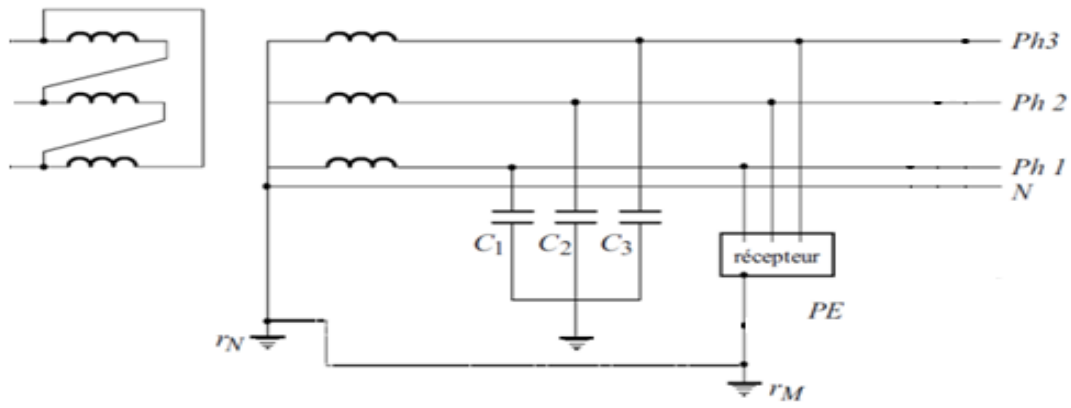
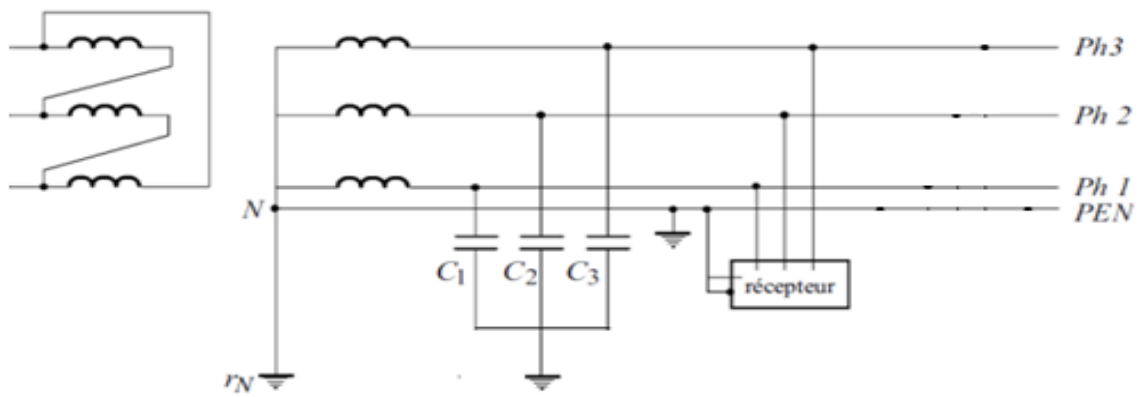
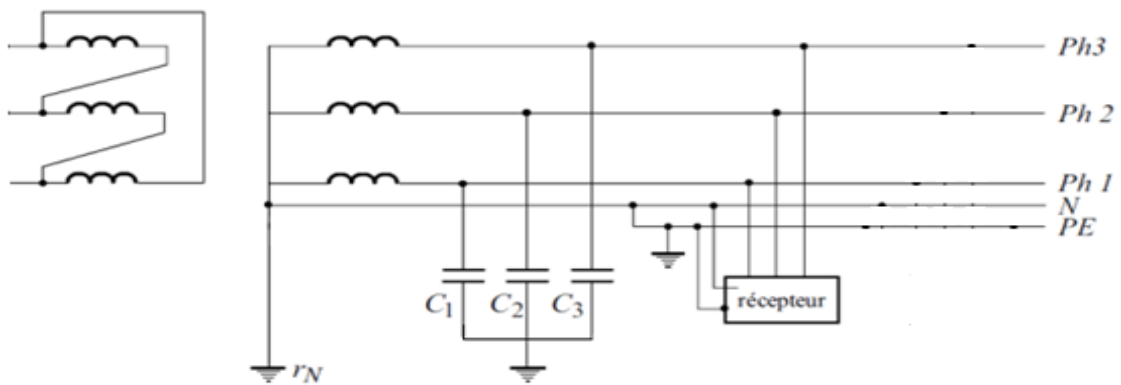


Figure I.13 : Schéma de liaison à la terre en basse tension TT



(a) Liaison TN-C



(b) Liaison TN-S

Figure I.14 : Schémas de liaison à la terre en basse tension TN

ou:

$r_M$ : résistance des masse;

$r_N$ : résistance du neutre.

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

### I.7.2. Mise à la terre par neutre isolé

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

### I.7.3. Mise à la terre directe

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

### I.7.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance

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

### I.7.5. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance

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

## I.8. Conclusion

Le paramètre le plus important dans l'analyse des mises à la terre en fréquence industrielle est la résistance qui doit être la plus faible possible, pour assurer la sécurité des personnes et du matériel. La valeur de la résistance de mise à la terre dépend des propriétés électro-géologiques du sol et de la forme géométrique de l'électrode de terre. La résistivité du sol peut varier sur une grande plage, allant de quelques  $\Omega.m$  jusqu'à plusieurs milliers d' $\Omega.m$ , en fonction notamment du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité. Ainsi, la mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre. Par ailleurs, il est préconiser de relier tous les renforts de fondation d'une construction afin d'améliorer sa mise à la terre.



## II.1. Introduction

La conception adéquate d'un système de mise à la terre (SMALT) est l'un des paramètres les plus déterminants pour assurer la sécurité des personnes, des appareils et d'améliorer la qualité du service électrique [NZU 09]. En effet, les problèmes liés à la conception du SMALT attirent l'attention des ingénieurs et des concepteurs électriques notamment avec le développement de l'industrie, la forte demande d'énergie électrique et l'augmentation importante du niveau de tension (HT et THT) [GEO 01, LEE 09]. En outre, la sûreté et la fiabilité sont les deux principaux piliers de la conception des SMALT. Une conception efficace des SMALT assurant la sécurité du personnel et les équipements est conditionnée par une faible résistance de terre pour minimiser l'élévation de potentiel (GPR) ainsi que les tensions dangereuses de contact et de pas. La planification, les calculs et les mesures des SMALT peuvent être effectués selon les restrictions considérées par de la norme IEEE 80-2000 [KLA 07]. Les valeurs de base pour ces procédures consistent en le courant maximal de la grille  $I_G$  et la durée de défaut des différents niveaux de tension. La méthodologie de conception devrait également prendre en considération la minimisation des coûts de matériaux et de l'installation [PIE 14].

## II.2. Différentes étapes de conception [IEE 00]

Le réseau de terre doit vérifier deux principes fondamentaux :

- être équipotentiel, c'est-à-dire minimiser les différences de potentiel auxquelles les équipements du poste et les personnes sont susceptibles d'être soumis;
- avoir une résistance de terre faible afin de favoriser l'écoulement dans le sol du courant engendré par les défauts.

Cette partie illustre l'application des équations, des tableaux et des graphiques pour concevoir le réseau de terre d'un ouvrage électrique basée sur la norme IEEE 80-2000.

### II.2.1. Etape 1 : Détermination de la résistivité

La conception du réseau de terre commence nécessairement par une étude électro-géologique du sol (structure physique, hétérogénéité, mesures de résistivités, variations saisonnières de la résistivité des couches du sol,...) où sera implantée l'installation. En plus,

elle nécessite de connaître la structure générale du circuit de terre (la surface, la forme, ...), car le but recherché est d'obtenir un réseau de terre efficace, même dans les périodes les plus défavorables.

### II.2.2. Etape 2 : Dimensionnement des conducteurs

Le courant de défaut maximum qui sera conduit par n'importe quel conducteur dans le système de mise à la terre est donné par l'équation (II.1)

$$I_0 = \frac{V}{3R_{df} + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (\text{II.1})$$

$R_0, R_1, R_2$ : résistances homopolaire, directe et inverse lors d'un défaut dissymétrique ( $\Omega$ );

$X_0, X_1, X_2$ : réactances homopolaire, directe et inverse lors d'un défaut dissymétrique ( $\Omega$ );

$V$ : tension simple entre phase et neutre;

$R_{df}$ : résistance de défaut.

La section minimale du conducteur capable de résister à l'élévation de température associée à un défaut à la terre est donnée par:

$$A = I_G K_f \sqrt{t_c} \quad \text{kcmil} \quad (\text{II.2})$$

$A$ : section minimale du conducteur en kcmil (1kcmil=1/2mm<sup>2</sup>);

$I_G$ : courant maximal de grille en kA;

$T_m$ : température maximale admissible par un conducteur en °C;

$t_c$ : durée de défaut en s;

$K_f$ : constante déterminée à partir du tableau (II.1).

Le tableau (II.1) illustre les constantes caractéristiques des matériaux utilisées dans la conception des SMALT [IEE 00].

Description	Conductivité (%)	$\alpha_r$ à 20C° (1/ C°)	K0 à 0 C°	Température de fusion Tm (C°)	$\rho_r$ 20 C° ( $\mu\Omega$ -cm)	$K_f$
<b>Cuivre Recuit doux</b>	100,0	0,00393	234	1083	1,72	3,42

Tableau II.1 : Constantes caractéristiques des matériaux [IEE 00]

### II.2.3. Etape 3 : Tensions de contact et de pas maximales admissibles

Les tensions tolérables de pas et de contact peuvent être calculées de manière empirique à partir des circuits accidentels équivalents utilisant le courant tolérable du corps  $I_b$  donné par l'expression (I.2) (respectivement (I.3)) pour un corps de 50kg (respectivement 70kg).

#### 1. Circuit accidentel de la tension de contact

La figure (II.1) présente le chemine de courant de défaut  $I_f$  traverse une personne touchant en point H une structure métallique reliée au SMALT. Les différentes impédances du circuit sont montrées sur la figure (II.2).

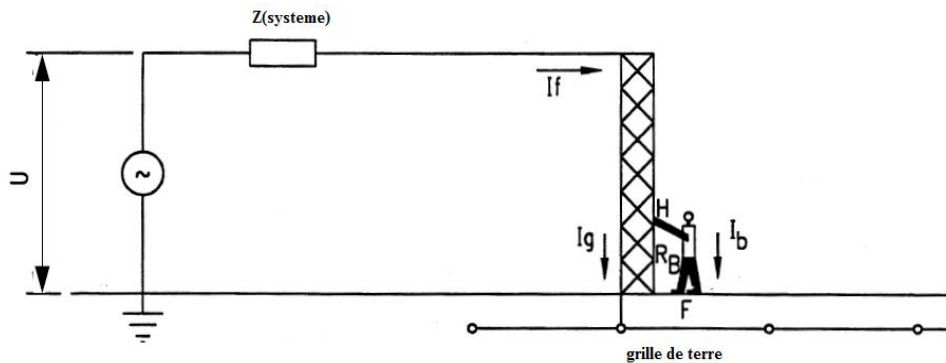


Figure II.1 : Exposition à la tension de contact

où:

$I_f$ : courant de défaut total en A;

$I_b$ : courant tolérable du corps humain en A;

$I_g$ : courant maximal de la grille;

$R_B$ : résistance du corps humain en  $\Omega$  est égale 1000  $\Omega$ ;

$R_f$ : résistance d'une portion de terre correspondante à la plante d'un pied en  $\Omega$ .

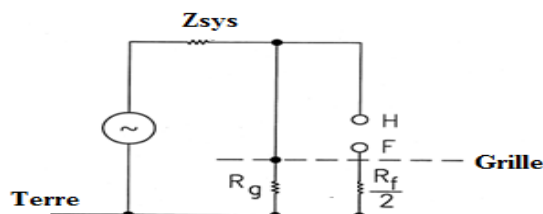


Figure II.2 : Impédances du circuit de la tension de contact

La borne H est un point dans le système au même potentiel que la grille dans laquelle le courant de défaut circule et la borne F est le petit secteur sur la surface de la terre qui est en contact avec les deux pieds de la personne.

Le courant  $I_b$  circule du point H à la terre au point F à travers le corps de la personne. Le théorème de Thevenin nous permet de représenter ces deux bornes (H, F) par le circuit de la figure (II.3) suivante [DAW 90] :

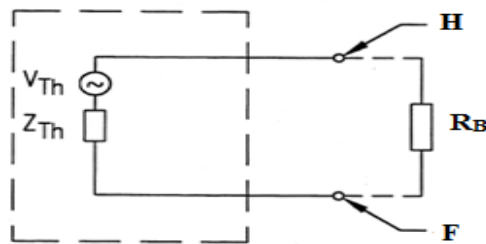


Figure II.3 : Circuit de la tension de contact

où :

$V_{Th} = V_T$ : tension de contact;

$Z_{Th} = R_f/2$ : impédance de Thevenin.

La tension de Thevenin  $V_{Th}$  est la tension entre les bornes H et F ( $V_{touch\ max}$ ). L'impédance de Thevenin  $Z_{Th}$  est celle du système vue des points H et F en court-circuitant la source de tension du système. La tension de contact admissible relative au courant  $I_b$  tolérable par les personnes est donnée par:

$$V_{Th} = I_b(Z_{Th} + R_B) \tag{II.3}$$

La plante d'un pied humain est généralement représentée par un disque métallique et la résistance de contact des chaussures, chaussettes, etc., est négligée. La résistance de terre en ohms d'un disque métallique de rayon b sur la surface d'une terre homogène de la résistivité  $\rho$  ( $\Omega.m$ ) est exprimée par l'équation suivante [LAU 51] :

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \tag{II.4}$$

Traditionnellement, le disque métallique représentant le pied est pris comme plat circulaire avec un rayon de 0,08 m.

En remplaçant  $Z_{TH}$  par  $R_f/2$  dans l'équation (II.3), on obtient :

$$V_{touch\ max} = (R_B + \frac{R_f}{2}) I_b \quad (II.5)$$

Les tensions de contact admissible pour des personnes pesant 50 et 70 kg sont définies respectivement par (II.6) et (II.7) :

$$V_{T\ max50} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s)^{\frac{0,116}{\sqrt{t_c}}} \quad (II.6)$$

$$V_{T\ max70} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s)^{\frac{0,157}{\sqrt{t_c}}} \quad (II.7)$$

où :

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

$C_s$ : facteur de réduction en présence de la couche superficielle. Ce facteur est donné par :

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho_t}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (II.8)$$

$h_s$  : épaisseur de la couche de la superficielle m.

## 2. Circuit accidentel de la tension de pas

La figure (II.4) montre que le courant  $I_b$  s'écoule du pied  $F_1$  à travers le corps de la personne à l'autre pied  $F_2$ . Les bornes  $F_1$  et  $F_2$  sont les secteurs surfaciques de la terre qui sont en contact avec les deux pieds, respectivement.

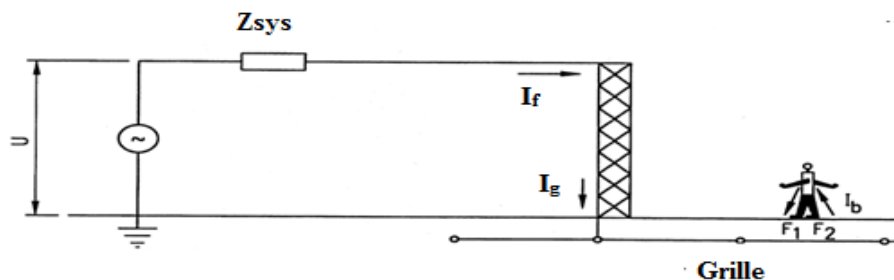


Figure II.4 : Exposition de la tension de pas

Le théorème de Thevenin nous permet de représenter ces deux bornes  $F_1$  et  $F_2$  sur la figure (II.5). La tension de Thevenin  $V_{Th}$  est la tension entre les bornes  $F_1$  et  $F_2$  quand la

personne n'est pas présente. L'impédance de Thevenin  $Z_{Th}$  est celle du système vue des bornes  $F_1$  et  $F_2$  en court-circuitant la source de tension du système.

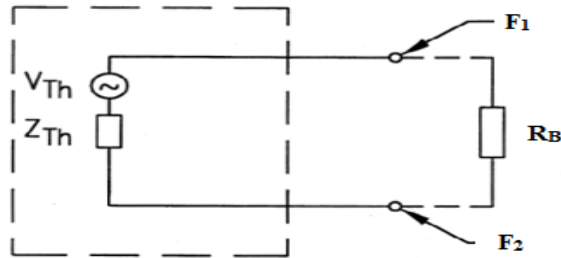


Figure II.5 : Circuit de la tension de pas

où :

$V_{Th} = V_{step\ max}$ : tension de pas en V;

$Z_{Th} = 2R_f$ : impédance de Thevenin en  $\Omega$ .

La tension de pas admissible est donnée par:

$$V_{step\ max} = (R_B + 2R_f) I_b \quad (II.9)$$

Les tensions de pas admissible pour des personnes pesant 50kg et 70kg sont définies respectivement par (II.10) et (II.11):

$$V_{S\ max50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (II.10)$$

$$V_{S\ max70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_c}} \quad (II.11)$$

#### II.2.4. Etape 4 : Conception initiale

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

La figure II.6 présente une configuration préliminaire d'une grille avec les paramètres suivants :

$L_x, L_y$ : longueur et largeur suivant les axes x et y;

$N_x, N_y$ : nombre de conducteurs parallèles aux axes x et y;

$L_p, N_p$ : longueur du piquet et nombre de piquets;

h: profondeur d'enfouissement de la grille;

D: espacement entre deux conducteurs successifs donné par:

$$D = \frac{2L_x L_y}{L_c - L_x - L_y} \quad (\text{II.12})$$

$L_c$ : longueur totale des conducteurs de terre donnée par:

$$L_c = N_x L_x + N_y L_y \quad (\text{II.13})$$

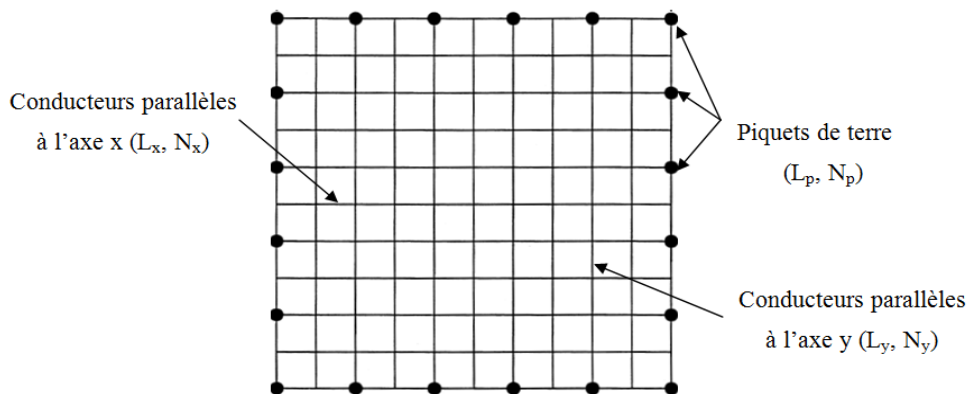


Figure II.6 : Disposition d'un SMALT

### II.2.5. Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille

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

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20Air}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/Air}} \right) \right] \quad (\text{II.14})$$

$\rho$ : résistivité du sol ( $\Omega \cdot m$ );

Air: surface du SMALT;

$L_T$ : longueur totale des conducteurs et piquets de terre.

### II.2.6. Etape 6 : Courant maximal $I_G$ de la grille

Le courant de défaut à la terre peut ne pas entièrement s'écouler à la grille, une partie du courant de défaut peut avoir des voies de retours locaux. Par conséquent, un facteur de division de courant doit être introduit pour tenir compte de la proportion du courant de défaut circulant à travers le SMALT vers la terre [PIE 14].

Le courant maximal de la grille est le courant qui traverse la grille à la terre donné par:

$$I_G = D_f S_f (3I_0) \quad (\text{II.15})$$

où:

$3I_0$ : courant total de défaut;

$I_G$ : courant de la grille;

$D_f$ : facteur de décroissance ;

$S_f$ : facteur de division du courant de défaut.

Le facteur de décroissance  $D_f$  elle est en fonction de la durée de défaut et le rapport  $X/R$  ;  $X$  et  $R$  sont les composants de l'impédance subtransitoire du système en cas de défaut. Le tableau II.2 présente les valeurs du  $D_f$  en fonction de la durée de défaut et le rapport  $X/R$ .

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

Tableau II.2 : Valeurs typiques de  $D_f$  relative au rapport  $X/R$  [IEE 00]



### II.2.7. Etape 7 : Elévation du potentiel de terre EPT (ou GPR)

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

$$GPR = I_G R_g \quad (II.16)$$

### II.2.8. Etape 8: Tensions de contact et de pas:

Les calculs de la tension de maille et celle de pas, relatives à la grille, peuvent être évaluées en utilisant les équations suivantes :

$$V_t = \frac{\rho_t I_G K_m K_i}{L_T} \quad (II.17)$$

$$V_s = \frac{\rho_t I_G K_s K_i}{L_s} \quad (II.18)$$

où:

$I_G$ : courant maximal de la grille;

$K_i$ : facteur d'irrégularité;

$L_T$ : longueur totale des conducteurs et piquets enterrés ( $L_T = L_C + L_R$ );

$L_C$ : longueur totale des conducteurs en m;

$L_R$ : longueur totale des piquets de terre en m;

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

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (II.19)$$

$$K_{ii} = \begin{cases} \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} & \text{sans piquets} \\ 1 & \text{avec piquets} \end{cases} \quad (II.20)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (II.21)$$

$h$ : profondeur d'enfouissement en m;

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

$D$ : espacement entre les conducteurs parallèles de la grille en m;

$n$ : facteur géométrique;

d: diamètre des conducteurs de la grille en m;

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right) \quad (\text{II.22})$$

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

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (\text{II.23})$$

n: facteur géométrique déterminé par l'équation suivante :

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (\text{II.24})$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (\text{II.25})$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{\text{Air}}}} \quad (\text{II.26})$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \times L_y}{\text{Air}} \right]^{\frac{0,7 \times \text{Air}}{L_x \times L_y}} \quad (\text{II.27})$$

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

Air: surface de la grille en m<sup>2</sup>;

$L_p$ : longueur périphérique de la grille en m;

$L_x$ : longueur maximale de la grille en direction de x en m;

$L_y$ : longueur maximale de la grille en direction de y en m;

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

$$L_s = 0,75 L_c + 0,85 L_R \quad (\text{II.29})$$

$L_R$ : longueur totale des piquets de terre m;

$L_c$ : longueur totale des conducteurs parallèles de la grille en m;

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

$L_r$ : longueur du piquet en m.

### II.2.9. Etapes 9 et 10 : Comparaison entre $V_t$ et $V_{Touch50}$ et entre $V_s$ et $V_{Step50}$

Si les deux tensions calculées de contact et de pas sont au-dessous des tensions tolérables, la conception a besoin seulement des améliorations exigées selon l'étape 11 pour relier les équipements au SMALT. Sinon, la conception préliminaire doit être mise à jour (étape 12).

### II.2.10. Etape 11 : Amélioration de la configuration initiale

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

- Diminution de la résistance totale de la grille : Si la résistance de la grille est diminuée, le GPR est réduit.
- Diminution de l'espacement entre les conducteurs en augmentant le nombre des conducteurs parallèles dans chaque direction. Ce que diminuent les tensions de contact et de pas.
- Augmentation de l'épaisseur de la couche superficielle ce qui augmente les tensions tolérables de contact et de pas.
- Limitation du courant de défaut total, par conséquent la diminution de le GPR.

### II.2.11. Etape 12: Configuration finale

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

Ainsi, l'organigramme de la figure (II.7) récapitule la démarche à suivre pour la conception d'un réseau de terre.

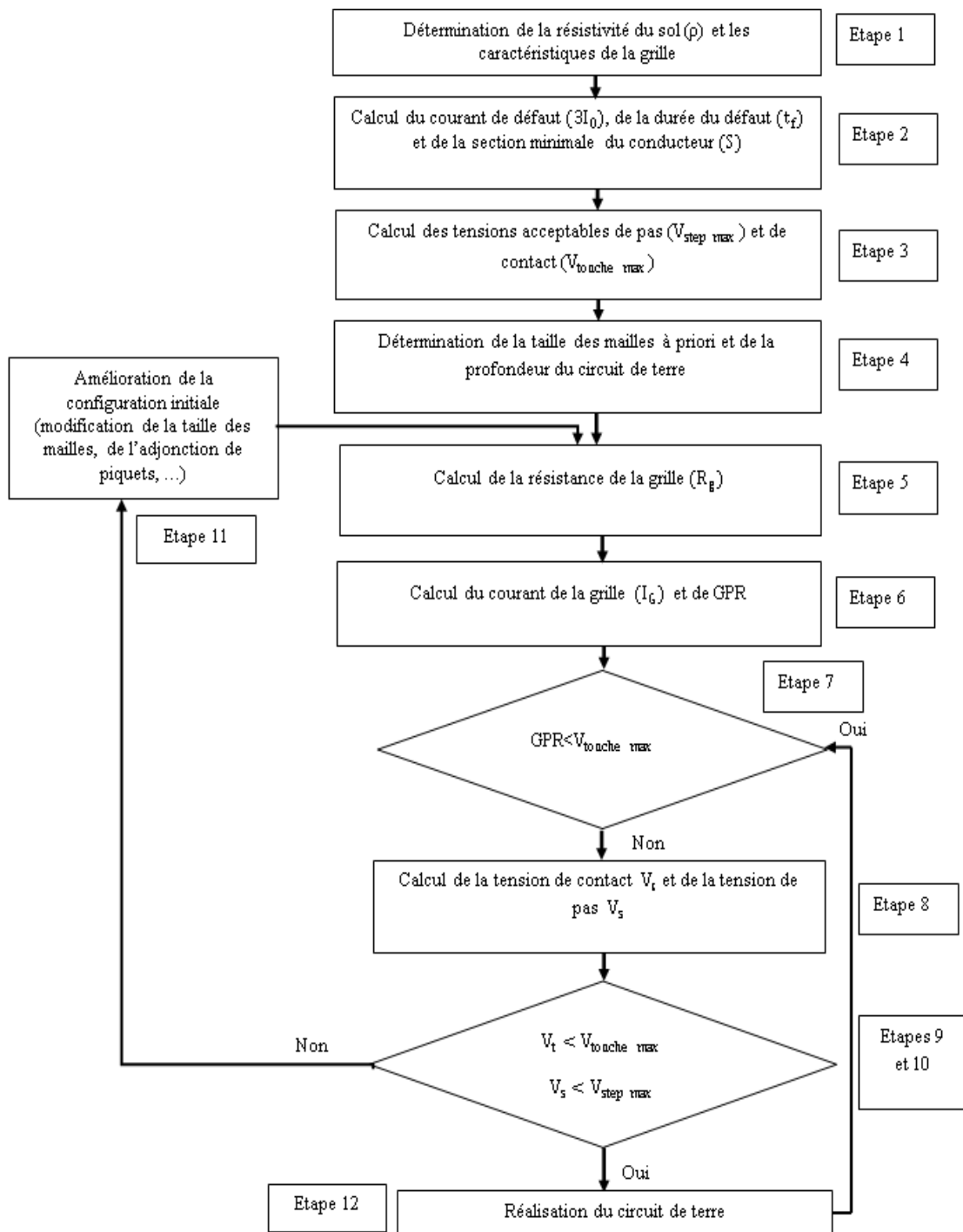


Figure II.7 : Organigramme de la conception de SMALT

### II.3. Conclusion

Pour assurer la sécurité des biens et des personnes, la conception des SMALT doit être bien conçue pour évacuer la totalité des courants de défaut vers la terre. Cette conception peut se faire en plusieurs étapes selon des critères bien déterminés en utilisant la norme IEEE 80-

2000. Ce résultat recherché ne peut être atteint que lorsqu'on effectue une bonne mesure de résistance du sol et choisit, par conséquent, la meilleure partie qui doit être exploitée à implanter le système de mise à la terre.

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

### III.1. Introduction

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

En compagnie de l'évolution rapide de la technologie informatique, les ordinateurs sont de plus en plus puissants, et en conséquence, la taille et la complexité des problèmes des systèmes de terre qui peuvent être résolues en utilisant des techniques d'optimisation sont également en évolution. La caractéristique la plus importante d'un ordinateur à grande vitesse est sa capacité à exécuter efficacement les opérations itératives. Afin d'exploiter cette caractéristique de base, la plupart des algorithmes visant à résoudre les grands problèmes d'optimisation sont donc de nature itérative [LEE 08].

De nombreuses techniques, seules ou couplées avec des outils modernes de conception, ont été mises au point dans le processus d'optimisation [DAW 09]. La conception optimale d'un système de mise à la terre (SMALT) est achevée par minimisation de la fonction coût (appelée aussi fonction objectif) en se basant sur la décision optimale des paramètres de construction et géométriques à savoir, le nombre et le diamètre des conducteurs et des piquets, la profondeur d'enfouissement, l'espacement entre les conducteurs, la surface d'excavation revêtement,... [GIO 85]. Dans un tel système optimal de mise à la terre, les tensions actuelles de contact et de pas en un point quelconque de l'installation ne doivent pas dépasser les valeurs maximales admissibles [CHO 98].

Récemment, les méthodes modernes d'optimisation ont été émergées comme étant des techniques puissantes et populaires pour la conception économique des systèmes de mise à la terre [QIA 14]. Beaucoup de problèmes d'optimisation liés à la conception de tels systèmes utilisent les approches méta-heuristiques pour minimiser les différents modèles mathématiques de la fonction du coût, en présence de diverses contraintes [COV 05].

Dans ce chapitre, nous présentons des méthodes approchées (Méta-heuristiques) ainsi que les différents modèles de la fonction du coût à optimiser élaborés dans littérature.

Les méta-heuristiques consistent à trouver une solution de l'optimum en un temps raisonnable. Plusieurs algorithmes méta-heuristiques modernes ont été développés pour résoudre les problèmes combinatoires et numériques d'optimisation. Ces algorithmes peuvent être classifiés en différents groupes selon des critères basés sur la population, l'itération, la stochastique, le déterministe, etc. [MOU 12].

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

La plupart des méta-heuristiques utilisent des processus aléatoires pour récolter de l'information. Les méta-heuristiques peuvent être considérées comme des algorithmes stochastiques itératifs, où elles manipulent une ou plusieurs solutions à la recherche de l'optimum. Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, consistant généralement en un nombre d'itérations prédéterminé ou une précision demandée [COV 05].

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

Les méta-heuristiques sont souvent inspirées de processus naturels qui relèvent de la physique comme l'algorithme du recuit simulé, de la biologie de l'évolution comme les

algorithmes génétiques ou encore de l'éthologie comme les algorithmes de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaim particulaire [QIA 14].

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

## III.2. Théorie d'optimisation

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

### III.2.1. Concept et définition

L'optimisation a été introduite dans un souci d'améliorer les services fournis, peu importe le domaine auquel ils s'appliquent. Un problème d'optimisation concerne l'exécution de méthodes spécifiques en quête d'un optimum. Ce dernier peut être une valeur maximisant ou minimisant une fonction  $f$ , dite fonction objectif ou fonction du coût.

Dans des travaux sur l'intégration de l'optimisation pour les procédés de mise en forme, M. Ejday [EJD 11] définit le concept d'optimisation en deux phases comme illustré sur la figure III.1 [BON 07] :

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



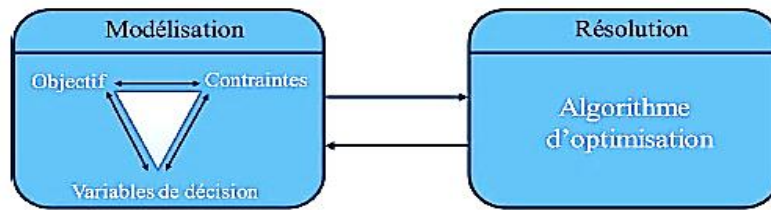


Figure III.1: Modélisation et résolution pour l'optimisation

Le concept d'optimisation a été intégré dans des services touchant à des domaines divers. Il s'agit de fournir aux utilisateurs de ces services le seuil de satisfaction requis et qui cadrerait avec leurs exigences. Par conséquent, la nécessité de fournir à l'utilisateur un système répondant au mieux à ses attentes est l'essence même de ce concept et dont découle le besoin d'amélioration cherchant à atteindre l'optimalité de la qualité de service. Le degré de satisfaction des utilisateurs est quantifiable à travers de la fonction objectif  $f$  où l'on fait intervenir une ou plusieurs variables appelées variables de décision [EJD 11].

La recherche de l'optimum (maximum ou minimum) de  $f$  se fait de par la modification d'une composition d'une telle recherche. Pour ce qui est de la formalisation d'un problème d'optimisation, elle relève de la formulation mathématique de la minimisation d'une fonction  $f(\vec{x})$  telle que  $\vec{g}(\vec{x}) \leq 0$  et  $\vec{h}(\vec{x}) = 0$ , où [MOU 12]:

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

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

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

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

### III.2.2. Délimitation de l'espace de recherche

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

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

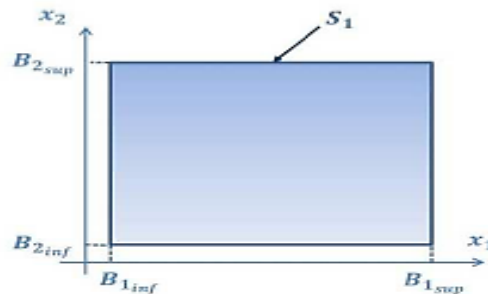


Figure III.2 : Espace de recherche

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

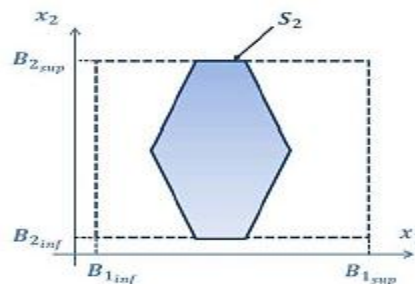


Figure III.3 : Espace de valeurs réalisables

### III.2.3. Différents critères d'optimalité pour différents types d'optimum

Entre l'optimal et l'optimisé, il existe une différence se référant au degré d'optimalité d'une valeur de  $f$  pour un point choisi dans un espace de recherche global et l'étendue de cette optimalité par rapport aux différentes valeurs de  $\vec{x}$ . Nous distinguons alors, selon le cas, trois types différents d'optima (minima ou maxima). Considérons pour cela le cas d'une fonction  $f$  à maximiser (cela valable aussi dans le cas d'une fonction  $f$  à minimiser), un point de l'espace de recherche  $\vec{x}^*$  est [HAJ 03] :

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

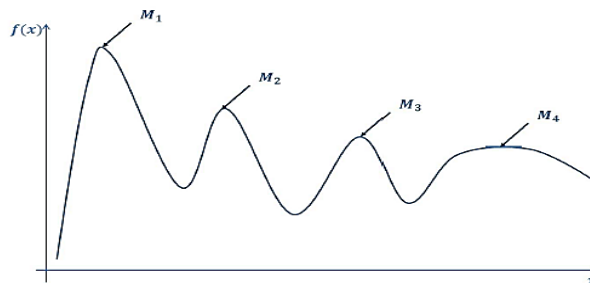


Figure III.4 : Maxima global, local fort et local faible

### III.2.4. Classification des problèmes d'optimisation

Le tableau III.1 illustre les différentes notions principales relatives aux définitions de classification des problèmes d'optimisation données par H. Zgaya [ZGA 07]:

Caractéristiques du problème		Type du problème	
Variables de Décision	Nombre	1	Mono-variable
		>1	Multi-variable
	Type	Nombre réel continu	Continu
		Nombre entier	Entier ou discret

		Permutation sur un ensemble fini de nombres	Combinatoire
Fonction Objectif	Type	Fonction linéaire des variables de décision	Linéaire
		Fonction quadratique des variables de décision	Quadratique
		Fonction non linéaire des variables de décision	Non linéaire
Formulation du problème	Type	Avec contraintes	Contraint
		Sans contraintes	Non contraint

Tableau III.1. Classification des problèmes d'optimisation

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

### III.2.5. Optimisation mono-objectif

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

Cependant, plusieurs complications peuvent exister telles que par exemple une fonction objectif non linéaire où que l'on ne peut exprimer analytiquement en fonction des paramètres. La principale difficulté que l'on peut rencontrer en optimisation mono-objectif réside ainsi dans le fait que modéliser le problème sous forme d'une équation unique peut s'avérer une tâche très difficile. Par la suite, tenter de ramener la formulation du problème à une seule fonction objectif peut biaiser la modélisation. Un tel problème n'est pas rencontré dans le cas d'une optimisation multicritère où un certain degré de liberté est autorisé engendrant une certaine flexibilité qui manquait aux problèmes mono-objectifs [COL 02].

### III.2.6. Optimisation multi-objectif

L'optimisation multi-objectif est utilisée dans la considération d'une multitude de critères à prendre en compte en même temps, sachant qu'ils peuvent à fortiori être contradictoires et engendrer des conflits d'intérêts. Cette extension est d'autant plus nécessaire que les problèmes nécessitent la considération de manière simultanée d'une multitude d'objectifs. L'optimisation multicritère consiste donc à choisir parmi un ensemble infini d'alternatives une seule (ou plusieurs) lorsqu'une multitude de critères doivent être considérés [OTH 98]. Deux groupes distincts ont émergé pour réaliser la classification des

méthodes d'optimisation. Le premier est constitué des méthodes qui s'appuient sur un critère unique de synthèse, lesquelles sont dites *classiques*. Alors que le deuxième inclue des méthodes réactives au sens où elles intègrent un processus interactif de décision [BOU 93].

### III.2.7. Classification des méthodes d'optimisation

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

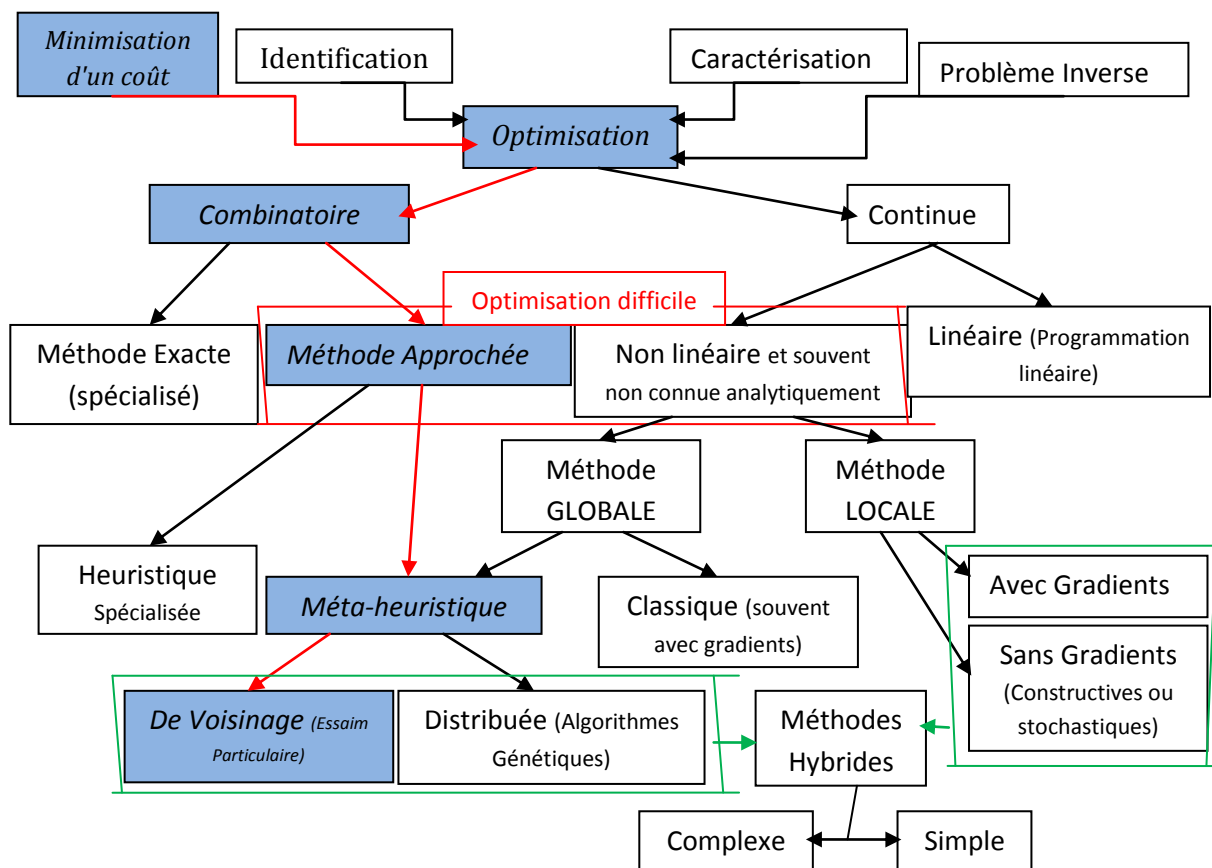


Figure III.5 : Méthodes d'optimisation

Les méthodes présentées sur la figure III.5 sont principalement distinguées de par leur appartenance aux méthodes de résolution de problèmes continus ou combinatoires (discrets). Les méthodes approchées et non linéaires caractérisent les problèmes où il n'est pas connu un

algorithme exact rapide (dans le cas combinatoire) ou permettant de repérer un optimum global en un nombre fini d'itérations (cas discret). Plusieurs variantes des méthodes approchées et non linéaires existent ont été définies dans la référence [BOU 93].

Il existe un arsenal important de méthodes classiques dites d'optimisation globale dans le cas de l'optimisation non linéaire (problème à variables continues). Cependant, ces techniques ont échoué là où la formulation du problème donnait lieu à la définition d'une fonction objectif ne possédant pas de propriétés structurelles particulières, telle que la convexité par exemple. Parallèlement à l'optimisation continue, les efforts déployés dans le domaine de l'optimisation combinatoire ont abouti au développement d'un grand nombre d'heuristiques. Celles-ci ont pour mission principale de produire des solutions proches de l'optimum. Cependant, la plupart d'entre elles ont été conçues pour répondre de manière spécifique à un problème bien déterminé [ZGA 07].

Compte tenu de cette spécificité des heuristiques, les chercheurs ont été amenés à considérer le développement de techniques génériques capables de s'adapter à n'importe quel domaine. Dans le but de réaliser cette généralité des méthodes, les efforts déployés dans ce sens ont mené à la conception d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation, nommées «méta-heuristiques». Ces dernières peuvent s'appliquer à toute sorte de problème à variables aussi bien discrètes que continues [EJD 11].

### III.3. Caractéristiques

#### III.3.1. Sensibilité et robustesse d'une méthode d'optimisation

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

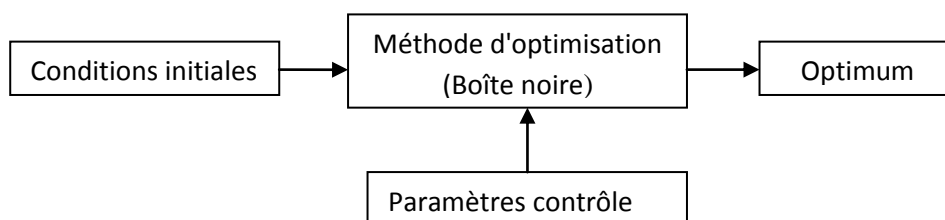


Figure III.6 : Modèle de la boîte noire

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

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

### III.3.2. Opérateurs de recherches fondamentales

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

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

Le succès et l'efficacité d'une technique de résolution dépendent, dans la plupart du temps, d'un compromis entre l'exploration et l'exploitation. Certaines méthodes toutefois n'utilisent qu'un seul de ces opérateurs pour parvenir à l'optimum. Ainsi, les méthodes déterministes, exploitant les dérivées de la fonction objectif et des contraintes pour atteindre rapidement et précisément l'optimum local le plus proche du point de départ, privilégient l'exploitation au détriment de l'exploration [BOU 93].

Tout algorithme d'optimisation doit utiliser ces deux stratégies pour trouver l'optimum global; l'exploration pour la recherche de régions inexplorées de l'espace de recherche, et l'exploitation pour exploiter la connaissance acquise aux points déjà visités et ainsi trouver des points meilleurs. Ces deux exigences peuvent paraître contradictoires mais un bon algorithme de recherche doit trouver le bon compromis entre les deux. Une recherche purement aléatoire est bonne pour l'exploration mais pas pour l'exploitation, alors que la recherche dans le voisinage est une bonne méthode d'exploitation mais pas d'exploration [QIA 14].

### III.3.3. Mode de recherche de l'optimum

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

Les méthodes déterministes sont qualifiées de méthodes locales, c'est-à-dire qu'elles convergent vers un optimum dépendant uniquement du point de départ, qu'il soit local ou global. A l'opposé, les techniques stochastiques sont reconnues comme des méthodes globales qui permettent de localiser l'optimum global [COL 02].

### III.3.4. Ordre d'une méthode de résolution

Les méthodes de résolution peuvent être classées à partir de leur ordre selon qu'elles nécessitent ou non le calcul des dérivées de la fonction objectif et des fonctions contraintes par rapport aux paramètres. Une méthode est dite d'ordre zéro si elle utilise uniquement la connaissance de la fonction objectif. Elle est d'ordre un si elle requiert le calcul des dérivées premières et d'ordre deux s'il lui faut aussi accéder aux dérivées secondes [ELD 12].

Les méthodes d'ordre zéro sont en général peu précises et convergent plus lentement vers l'optimum. En revanche, elles offrent l'avantage d'éviter le calcul du gradient [LEE 08].

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

## III.4. Optimisation des systèmes de mise à la terre dans littérature

Plusieurs techniques méta-heuristiques modernes ont été élaborées pour résoudre les problèmes d'optimisation des systèmes de mise à la terre. A titre d'exemple, la méthode du recuit simulé RS a été utilisée par Chou [CHO 98] pour optimiser une grille de mise à la terre ayant une surface de 3000m<sup>2</sup> d'un poste de 69kV. La fonction du coût proposée dans cette investigation dépend à la fois du coût des matériaux et de l'installation, ainsi que des contraintes de sécurité. La conception optimale révèle l'efficacité de RS.



En outre, une technique de stratégie évolutive a été élaborée par Ghoneim et al [GHO 07] afin d'optimiser la grille de mise à la terre (de 70m x 70m) sans piquet du poste 115/13kV de la norme IEEE Std.80-2000 [IEE 00]. Les contraintes de sécurité de la dite norme consistant en la résistance de terre, l'élévation du potentiel de terre et les tensions de contact et de pas, ont été vérifiées.

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

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

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

Divers chercheurs utilisent les essaims particulaires (EP) pour l'optimisation des systèmes de mise à terre. L'EP a été développé par Lee et Shen [LEE 09] pour proposer une conception de grille de mise à la terre optimale au poste 115/13kV de la norme IEEE Std.80-2000. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux utilisant à la fois un AG et les formules

empiriques de la norme IEEE. Une bonne concordance a été obtenue. En outre, la méthode de l'EP offre un coût et temps de calcul inférieurs à ceux de l'AG.

La même technique a été élaborée par Nezhad et al [NEZ 13] pour concevoir le système de mise à la terre d'un poste caractérisé par une surface de 200m x 150m et un courant de défaut de 21kA. La fonction du coût comprend le diamètre des conducteurs, l'espacement entre les conducteurs, le nombre, la longueur et le diamètre des piquets, la profondeur de la grille de terre et les différents coûts du matériel, d'excavation et de raccordement, en tenant compte des restrictions de sécurité concernant le GPR ainsi que des tensions de contact et de pas considérées par la norme IEEE Std. 80-2000.

### III.5. 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. En effet, l'optimisation est un concept très important qui a touché la conception des SMALT. Avec l'évolution rapide de la technologie informatique, les ordinateurs sont de plus en plus puissants, et en conséquence, l'émergence des méta-heuristiques dans les techniques d'optimisation ont connu un avancement considérable lors de la dernière décennie.

Les méta-heuristiques (essentiellement; les essais particuliers), les techniques évolutionnistes (Algorithmes Génétiques) et les stratégies d'hybridation 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.

## IV.1. Introduction

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à trouver la solution optimale qui minimise la fonction de coût. En vue d'obtenir un SMALT fiable et sécurisé, certaines contraintes doivent être vérifiées. En effet, la sécurité des personnes et des biens est assurée en gardant la tension de pas ( $V_s$ ), la tension de contact ( $V_t$ ), l'élévation du potentiel de terre ( $GPR$ ) et la résistance du réseau de terre ( $R_g$ ) dans des limites admissibles requises par la norme IEEE Std. 80-2000.

Ce chapitre présente une application de la technique des algorithmes génétiques (AGs) pour l'optimisation des paramètres aussi bien géométriques que de construction du SMALT pour l'ouvrage électrique de Ain El-Melh. Pour cela, nous avons proposé une nouvelle fonction de coût. Cette dernière inclut le nombre de conducteurs suivant les axes (x) et (y), les diamètres du conducteur et des piquets, la profondeur de la grille, le nombre et la longueur des piquets, la superficie totale de l'excavation et revêtement, et les contraintes sur la résistance du réseau de terre ainsi que les tensions de pas et de contact. Nos résultats ont été validés en les confrontant à ceux utilisant le code de calcul CYMGrd [CYM 06].

## IV.2. Formulation du problème d'optimisation

L'optimisation des SMALT a été effectuée en se basant sur:

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

### IV.2.1. Fonction objectif

Dans notre étude, la conception optimale des SMALT est accomplie via la minimisation de la fonction de coût. De nombreux modèles mathématiques des fonctions du coût ont été proposés dans la littérature. Ces fonctions sont soumises aux diverses contraintes et considèrent les paramètres géométriques et de construction tels que le nombre et la taille des conducteurs, la profondeur de la grille, le nombre et la longueur des piquets, l'espacement entre les conducteurs, la superficie totale de l'excavation et revêtement, etc...

Les différents paramètres de fonctions du coût utilisés dans cette section sont:

- $N_x, (N_y)$ : nombre de conducteurs suivant l'axe x, (l'axe y);
- $d_c$ : diamètre du conducteur de la grille de terre (m);
- $h$ : profondeur de la grille de terre (m);
- $N_r$ : nombre de piquets;
- $L_r$ : longueur de chaque piquet (m);
- $d_r$ : diamètre de chaque piquet (m);
- $h_s$ : épaisseur de la couche superficielle (m);
- $\rho_s$ : résistivité de la couche superficielle ( $\Omega.m$ );
- $C_{1cmat}, C_{3rmat}, C_{4gmat}$ : coefficients du coût des matériaux;
- $C_{1cinst}, C_{3rinst}, C_{4ginst}$ : coefficients du coût d'installation;
- $C_{2exc}$ : coefficient du coût d'excavation;
- $e_{trch}$ : largeur de l'excavation de la tranchée (m), supposée égale à 1 (m) dans ce travail;
- $R_g$ : résistance de la grille de mise à la terre;
- $V_s, (V_t)$ : tension de pas (contact) réelle (V);
- $GPR$ : élévation du potentiel de terre (V);
- $R_{gs}$ : résistance de terre tolérable ( $\Omega$ );
- $V_{step70}, (V_{touch70})$ : tension tolérable de pas (contact) (V) pour l'homme ayant un poids corporel de 70 (kg);
- $GPRs$ : élévation tolérable du potentiel de terre;
- $L_x, (L_y)$ : longueur maximale du réseau de terre suivant x, (y) (m);
- $D_x, (D_y)$ : espacement entre conducteurs suivant x, (y) (m);
- $L_t$ : longueur totale des conducteurs de la grille (m);
- $N_d$ : nombre de points de soudure;
- $F(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ : fonction objectif avec contraintes;
- $f(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ : fonction objectif sans contraintes;
- $K$ : coefficient de pondération positif.

La fonction de coût proposée par Chou est donnée par la formule (IV.1). Elle est constituée du diamètre du conducteur, de la profondeur du réseau de terre et du nombre de points de soudure [CHO 98]. Cette fonction est soumise aux restrictions de sécurité données par la norme IEEE Std.80-2000 et exprimées par les inégalités (IV.2) à (IV.5).

$$f(d_c, h, N_d) = (C_{1cmat}d_cL_T + C_{2exc}hL_T + k_3d_cN_d) \quad (IV.1)$$

$$R_g \leq R_{gs} \quad (IV.2)$$

$$V_s \leq V_{step70} \quad (IV.3)$$

$$V_t \leq V_{touch70} \quad (IV.4)$$

$$GPR \leq GPRs \quad (IV.5)$$

Utilisant la longueur totale des conducteurs de la grille et du nombre de piquets, et en tenant compte de l'unique contrainte relative à la tension de contact donnée par l'inégalité (IV.4), Covitti et al [COV 05] ont proposé la fonction de coût suivante:

$$f(N_r, L_T) = (C_{1cmat} + C_{2exc})L_T + (C_{3rmat} + C_{3rinst})N_r \quad (IV.6)$$

Comprenant les différents coûts de matériel, de l'excavation et des soudures, du nombre de mailles unilatérales, du diamètre de conducteur et de la profondeur de la grille de mise à la terre, Lee et Shen [LEE 09] ont proposé une fonction de coût donnée par la formule (IV.7). Cette fonction est soumise à toutes les contraintes de sécurité considérées par la norme IEEE Std. 80-2000.

$$Q_F = f_1(Q_1, Q_2, Q_3)$$

$$(C_{1cmat}d_c L_T + C_{2exc} h L_T + k_3 d_c N_d)$$

$$f(N, d_c h) = (C_{1cmat} \frac{\pi d_c^2 L_r}{4} + C_{2exc} h \frac{L_r}{2})[(N_x + 1)] + k_3 \frac{\pi d_c^2}{4} [(N_x + 1)]^2 \quad (IV.7)$$

En se basant sur le nombre de mailles suivant les axes x et y ainsi que le diamètre et la longueur des piquets, la fonction de coût proposée par Gilbert [GIL 11] est exprimée comme suit:

$$f(N_x, N_y, N_r, L_r) = (C_{1cmat} + C_{1cinst})[(N_x + 1)L_y + (N_y + 1)L_x] + C_{3rmat}[N_r] + C_{3rinst}[N_r L_r] \quad (IV.8)$$

L'unique contrainte considérée par Gilbert est donnée par l'inégalité suivante:

$$0,95 GPRs \leq GPR \leq GPRs \quad (IV.9)$$

Vyas et Jamnani [VYA 12] ont utilisé la fonction de coût de Gilbert. En plus des contraintes de sécurité données par les inégalités (IV.3) et (IV.4), Vyas et Jamnani ont adopté la restriction supplémentaire suivante :

$$0,95 D_x \leq D_y \leq 1.05 D_x \quad (IV.10)$$

L'objectif principal de notre présente étude est de minimiser le coût total des matériaux, d'excavation et d'installation du SMALT. Pour atteindre cet objectif, nous proposons une nouvelle fonction mathématique du coût donnée par:

$$f(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s) = (C_{1cmat} \left( \frac{\pi d_c^2}{4} \right) + C_{1cinst} + C_{2exc} h e_{trch}) [(N_x + 1)L_y + (N_y + 1)L_x] + (C_{3rmat} \left( \frac{\pi d_c^2}{4} \right) + C_{3rinst}) [N_r L_r] + (C_{4gmat} + C_{4ginst}) [L_y L_x h_s] \quad (IV.11)$$

### IV.2.2. Paramètres de conception

La formule (IV.11) comprend les paramètres géométriques et de construction suivants: le nombre de conducteurs suivant les axes ( $x$ ) et ( $y$ ), le diamètre du conducteur et de chaque piquet, la profondeur de la grille, le nombre et la longueur des piquets ainsi que la superficie totale de l'excavation et revêtement.

### IV.2.3. Gestion des contraintes

Les restrictions de sécurité prises en compte dans cette étude sont celles requises par la norme IEEE Std.80-2000, et données par les inégalités (IV.3) et (IV.4). Si ces contraintes ne sont pas vérifiées, nous rajoutons à la fonction de coût, un terme de pénalité constituée par une multiplication de la différence entre les valeurs réelles et tolérables des paramètres de sécurité mentionnés par un coefficient positif très grand ( $Q=10^9$ ). Dans ce scénario, la fonction de coût avec contraintes devient:

$$F(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s) = f(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s) + Q(\Delta V_t + \Delta V_s + \Delta R_g) \quad (IV.12)$$

$$\Delta V_t = \begin{cases} V_t - V_{touch70} & \text{if } V_t > 0,9 V_{touch70} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (IV.13)$$

$$\Delta V_s = \begin{cases} V_s - V_{step70} & \text{if } V_s > 0,9 V_{step70} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (IV.14)$$

$$\Delta R_g = \begin{cases} R_g - R_{gs} & \text{if } R_g > 0,9 R_{gs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (IV.15)$$

En se basant sur la norme IEEE Std. 80-2000, relative à la conception d'un SMALT, nous avons opté pour un espacement entre les conducteurs horizontaux de la grille suivants des 2 axes, compris entre deux valeurs limites :  $D_{xmin} = D_{ymin} = 2,5$  m et  $D_{xmax} = D_{ymax} = 30$  m. Nous prenons le diamètre minimum de tous les conducteurs égal à  $d_{min}$  (en mm) en raison de la résistance mécanique [CYM 06], et la distance minimale entre deux piquets successifs  $D_p = 5$  m. Selon la norme, le diamètre minimum  $d_{min}$  est calculé à partir de la section minimale  $A_{min}$  (en mm<sup>2</sup>) donnée par (IV.16) [IEE 00]:

$$A_{min} = I_G K_f \sqrt{t_f} \quad (kcmil) \quad (IV.16)$$

où:

$K_f$ : décrétement facteur égale à 7 [IEE 00];

$A_{min}$ : section minimale ( $1kcmil = 1/2mm^2$ ).

Les intervalles de variation des différents paramètres sont cités dans le tableau (IV.1) suivant [IEE 00]:

Paramètre	Intervalle de variation
$N_p$ : nombre de piquets	$[0 ; \frac{2 \cdot (L_x + L_y)}{D_p}]$
$N_x$ : nombre de conducteurs horizontaux suivant x	$[1 + \frac{L_y}{D_{xmax}} ; 1 + \frac{L_y}{D_{xmin}}]$
$N_y$ : nombre de conducteurs horizontaux suivant y	$[1 + \frac{L_x}{D_{ymax}} ; 1 + \frac{L_x}{D_{ymin}}]$
$L_p$ : longueur des piquets en m	[3 ; 6]
$d_c, d_r$ : diamètre des conducteurs horizontaux et des piquets en m	$[d_{min} ; 0,015]$
$h_s$ : épaisseur de la couche superficielle en m	[0,01 ; 0,5]
$h$ : profondeur de la grille en m	[0,2 ; 2,5]

Tableau IV.1: Intervalles de variation des paramètres

Les coûts des principaux matériaux utilisés dans la conception des systèmes de mise à la terre sont donnés dans le tableau (IV.2). Nous avons choisi le cuivre recuit doux à cause de ses caractéristiques électriques et mécaniques [IEE 00]. Concernant la couche superficielle, nous avons choisi le gravier 15/28 de résistivité de 3000  $\Omega \cdot m$ .

Coef	Coûts des principaux paramètres	
$C_{1cmat}$	Coûts des conducteurs (AWG) (\$/m) [GIL 11, ELF 13]	
	2/0 (9,26mm; 67,4mm <sup>2</sup> )	8 (\$/m)
	4/0 (11,68mm; 107mm <sup>2</sup> )	12 (\$/m)
	Coûts d'installation des conducteurs (AWG) (\$/m) [GIL 11]	
	2/0 (9,26mm; 67,4mm <sup>2</sup> )	85 (\$/m)

$C_{1cinst}$	4/0 (11,68mm; 107mm <sup>2</sup> )	85 (\$/m)
$C_{3rmat}$	Coûts des piquets (\$/m) [GIL 11]	
	3 m	24\$
	6 m	48\$
$C_{3rinst}$	Coûts d'installation des piquets (\$/m) [GIL 11]	
	3 m	48 (\$/m)
	6 m	78 (\$/m)
$C_{4ginst}$	Coûts d'installation de gravier = 8 (\$/m <sup>3</sup> ) [GEN 14]	
$C_{4gmat}$	Coûts de gravier 15/25= 19(\$/m <sup>3</sup> ) [ELF 13]	
$C_{2exc}$	Coûts d'excavation (\$/m <sup>3</sup> ) [GEN 14], [ELF 13]	
	Sol $\rho < 500$ ( $\Omega.m$ )	(25 \$/m <sup>3</sup> )
	Sol $\rho > 500$ ( $\Omega.m$ )	(50 \$/m <sup>3</sup> )

Tableau IV.2: Coûts unitaires des principaux matériaux de SMALT

### IV.3. Optimisation par algorithmes génétiques (OAG)

#### IV.3.1. Principe général

Les Algorithmes Génétiques (AGs) 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'application sont très vastes [BEN 13].

En 1866, Mendel a publié l'article retraçant dix années d'expérience d'hybridation chez les végétaux (recombinaison des gènes) et l'a adressé aux sociétés scientifiques des quatre coins du monde. Les réactions sont mitigées, voire inexistantes. Le monde scientifique n'était pas prêt à reconnaître la qualité de ses résultats. Ce n'est qu'en 1900, que la publication de trois nouveaux articles signés Hugo de Vries, Carl Correns et Erich von Tschermak révélant des résultats similaires à ceux de Mendel, et font que ces premiers seront reconnus [JUA 04].

En Allemagne, Rechenberg (1973) et Schwefel (1977) ont développé le concept de l'évolution stratégique, tandis qu'aux Etats-Unis, Lawrence Fogel et quelques autres chercheurs ont introduit le genetic programming [JAN 95]. Toutes ces contributions ont eu en commun l'utilisation conjointe des concepts de mutation et de sélection. Ces deux concepts ont été considérés par Darwin comme prépondérants dans l'évolution naturelle. Cependant, dès 1962, Bremer-mann et Fraser ont inclus le concept de croisement dont les scientifiques



contemporains avaient mesuré l'importance. Une bonne partie de ce travail préliminaire a été rassemblée par le fils d'un de ces précurseurs dont Fogel (1998) [DAV 91].

Dans les années 1960, John Holland a étudié les systèmes évolutifs et, en 1975, il a introduit le premier modèle formel des algorithmes génétiques ('the canonical genetic algorithm AGC') dans son livre 'Adaptation in Natural and Artificial Systems' [HOL 75]. Dans son travail, la notion de croisement était primordiale. Cependant, il est assez étonnant d'observer que son ouvrage n'a été absolument pas centré sur les problèmes d'optimisation. C'est son étudiant Jong qui, dans sa thèse (1975), a focalisé son travail sur l'utilisation des AGs dans la résolution des problèmes d'optimisation [BEN 13]. Il a expliqué comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (en échangeant l'information génétique) et la mutation (source de la diversité génétique). Ce modèle a servi de base aux recherches ultérieures et a été plus particulièrement repris par Goldberg qui a publié en 1989, un ouvrage de vulgarisation des AGs [JUA 04].

En fait, quand on utilise les AGs pour trouver une solution optimale à un certain problème, un système artificiel contenant une population d'individus représenté 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 [JAN 95]. Dans notre cas, cette mesure d'adaptation au milieu correspond à la fonction de coût définie par IV.11.

Un 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 parents 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 [DAV 91].

### IV.3.2. Terminologie

Nous définissons quelques termes de base rencontrés dans ce chapitre:

- **Gène, Locus** : partie élémentaire d'un chromosome représenté par 0 ou 1.
- **Chromosome** : solution potentielle du problème sous une forme codée. Pour notre étude les chromosomes représentent les  $N_{var}$  variables ( $N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s$ ) consistant en les paramètres géométriques et de construction constituant la fonction de coût.
- **Individu** : ensemble de chromosomes représenté par le vecteur  $[N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s]$ .
- **Fitness** : terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction de coût et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution).
- **Population** : ensemble fini des  $N_{pop}$  individus, peut être représenté par une matrice de taille  $N_{pop} \times (N_{bits} \times N_{var})$ , où chaque individu contient  $N_{var}$  chromosomes ( $N_{pop}$ ,  $N_{bits}$  et  $N_{var}$  étant respectivement: la taille de population, le nombre de bits et le nombre de variables).

### IV.3.3. Etapes de l'AG

L'organigramme de la figure IV.1 illustre les étapes de l'AG élaboré.

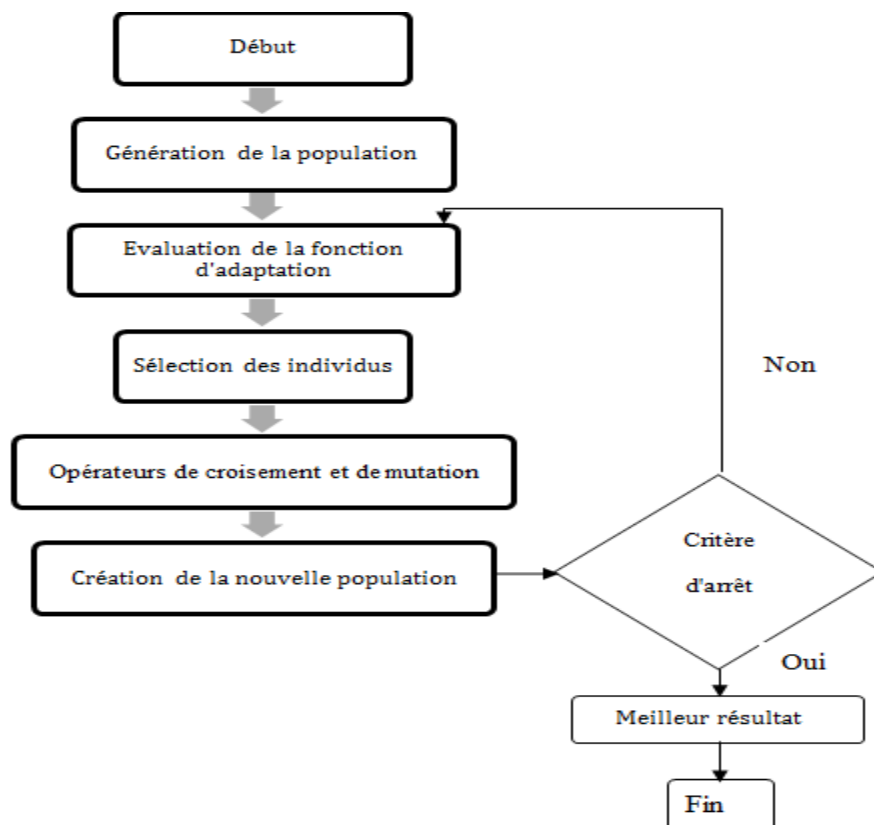


Figure IV.1 : Organigramme de l'AG élaboré

### IV.3.3.1. Initialisation de la population

L’objectif de l’étape de l’initialisation est de choisir aléatoirement un ensemble de solutions potentielles au problème d’optimisation posé. En fait, chaque solution potentielle va représenter un individu. Tous les individus représentés vont être rassemblés dans ce que l’on appelle la population initiale [DUR 04].

Dans l’initialisation, la première chose à faire est de décider la structure de codage. Le codage pour une solution est habituellement décrit comme corde binaire {0, 1}. Les composants de la solution sont alors marqués comme gènes. Chaque solution  $X_i$  ( $i=1, 2, \dots, N_{pop}$ ) est représentée par une corde des symboles {0, 1} de longueur  $N_{bits} \times N_{var}$ . Typiquement, la population initiale des solutions de taille  $N_{pop}$  est choisie complètement au hasard, avec chaque bit de chaque solution ayant une probabilité de 50% de prendre la valeur 0 ou 1 [BEN 13]. La représentation de la population sous forme binaire est donnée par :

$$pop = \begin{pmatrix} Individu1 \\ \vdots \\ IndividuN_{pop} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left[ \begin{array}{ccc} \xrightarrow{11110010} & & \xrightarrow{11001001} \\ chromosome_1 & \dots & chromosomeN_{var} \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{ccc} \xrightarrow{11001001} & & \xrightarrow{11101001} \\ chromosome_1 & \dots & chromosomeN_{var} \end{array} \right] \end{pmatrix} \quad (IV.17)$$

### IV.3.3.2. Fonction objectif (ou fonction d’adaptation)

Résoudre un problème d’optimisation, c’est de chercher, parmi un ensemble de solutions qui vérifient les contraintes données, les solutions qui rendent minimale (ou maximale) une fonction mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction est appelée fonction objectif. Les contraintes et la fonction objectif s’expriment à l’aide d’une modélisation mathématique qui combine les paramètres et les variables du problème d’optimisation [DAV 91]. Le but de notre présente étude est de minimiser la fonction de coût du SMALT. En s’inspirant des travaux antérieurs sur l’optimisation des réseaux de terre [ALI 15], nous avons proposé une fonction objectif à 8 variables consistant en le nombre de conducteurs suivants (x) et (y) et leur diamètre, la profondeur de la grille, le nombre de piquets et leur longueur ainsi que la superficie totale de l’excavation et revêtement.

Les AGs travaillent sur la maximisation d'une fonction positive. Or dans notre problème, l'objectif est de minimiser une fonction de coût  $f(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ . Il est nécessaire de transformer la fonction de coût en une fonction appelée fonction d'adaptation ou fitness [JAN 95].

La fonction fitness (ou d'adaptation) permet de mesurer l'efficacité de la solution. La pertinence des solutions potentielles dépend essentiellement de la formulation de cette fonction. En effet, quelle que soit sa définition, l'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction. La fonction fitness doit donc exprimer le plus fidèlement possible sous forme mathématique le ou les objectifs à atteindre [YIM 09]. En effet, cette fonction est donnée par:

$$\text{Fitness} = \frac{1}{F(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)} = \frac{1}{f(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s) + G} \quad (IV.18)$$

où :

$F(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ ): fonction objectif avec contraintes;

$f(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ ): fonction objectif sans contraintes;

G: les contraintes.

Les variables de la fonction objectif  $(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$  sont codées sous forme binaire. Ce type de codage a pour avantage la création d'opérateurs de croisement et de mutation. Etant donné que la fonction de coût utilise des variables réelles, nous sommes tenus à décoder ces variables pour les transformer de la forme binaire à celle réelle.

La transformation d'une chaîne binaire  $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$  en un nombre réel  $x$  peut s'exécuter en deux étapes:

1) Conversion (de la base 2 en base 10):

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^m a_i 2^{m-i} \quad (IV.19)$$

2) Recherche du nombre réel correspondant:

$$x = x_{min} + \hat{x} \frac{x_{max} - x_{min}}{2^m - 1} \quad (IV.20)$$

$x$ : valeur réelle;

$x_{min}$ : borne inférieure de l'intervalle de variation de  $x$ ;

$x_{max}$ : borne supérieure de l'intervalle de variation de  $x$ .

### IV.3.3.3. Opérateurs génétiques

Les principaux opérateurs utilisés dans les AGs sont le croisement, la mutation et la sélection.

#### a) Opérateur de croisement

Le croisement consiste à copier et recombinaison les gènes de deux chromosomes parents de façon à former deux nouveaux chromosomes fils possédant des caractéristiques issues des deux parents. Nous utilisons le croisement à deux points de coupure pour chaque variable, en choisissant au hasard les points de coupure.

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 produit et les chromosomes des parents sont croisés pour donner deux enfants qui remplaceront leurs parents dans la nouvelle génération.

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

$P_c$  : probabilité de croisement à fixer par l'utilisateur [AFF 09].

Il est à noter que le nombre de points de croisements ainsi que la probabilité de croisement  $P_c$  permettent d'introduire plus ou moins la 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. Par ailleurs, plus le nombre de points de croisements sera petit et plus la probabilité de croisement sera faible, moins le croisement apportera de diversité [QIA 14].

On peut donc espérer, en combinant les caractéristiques des solutions performantes, obtenir des solutions encore plus performantes.

#### a.1) 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 IV.2.

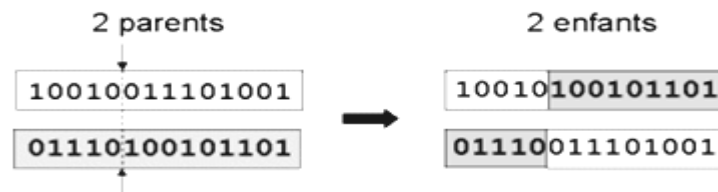


Figure IV.2 : Croisement avec un point

### a.2) Croisement avec deux points

Les deux points de croisements sont également choisis au hasard puis les séquences des chromosomes situées entre les deux points sont échangées. Ce type de croisement est généralement considéré comme plus efficace que le croisement à un point [DUR 04]. La figure IV.3 illustre un exemple de croisement avec deux points:

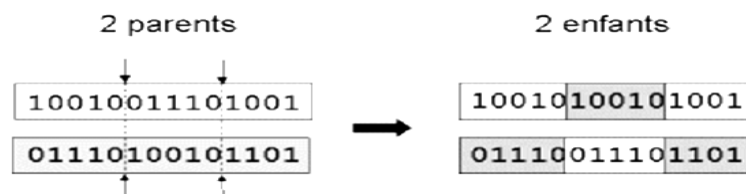


Figure IV.3 : Croisement avec 2 points

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

### b) Opérateur de mutation

Cet opérateur consiste à changer la valeur d'un gène avec une probabilité  $P_m$  très faible. Cette probabilité pourrait être prise comme  $P_m = 1/L$ , où  $L$  est la longueur de la chaîne de bits codant notre chromosome [QIA 14].

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 notre population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un élément perturbateur. Il introduit du « bruit » au sein de la population [QIA 14].

La mutation n'est effectuée 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 ; en se produisant, cela veut dire que la probabilité attribuée à chaque bit est inférieure à  $P_m$  qui est lui-même une valeur faible). Cela dépend de la façon dont l'opération est programmée.

Cet opérateur dispose de 4 grands avantages [BEN 13] :

- Il garantit la diversité de la population, ce qui est primordial pour les AGs;
- Il permet d'éviter un phénomène connu sous le nom de « dérive génétique ». On parle de dérive génétique quand certains gènes favorisés par le hasard se répandent au détriment des autres et sont ainsi présents au même endroit sur tous les chromosomes. L'opérateur de mutation pouvant entraîner de manière aléatoire des changements au niveau de n'importe quel bit, permet d'éviter l'installation de ce phénomène défavorable.
- Il permet de limiter les risques d'une convergence prématurée causée par exemple par une méthode de sélection élitiste imposant à la population une pression sélective trop forte. En effet, dans le cas d'une convergence prématurée, on se retrouve avec une population dont tous les individus sont identiques, mais ne sont que des optima locaux. Tous les individus étant identiques, le croisement ne changera rien à la situation. En effet, l'échange d'informations par croisement entre des individus strictement identiques est bien sûr totalement sans conséquences ; on aura beau choisir la méthode de croisement qu'on veut, on se retrouvera toujours à échanger des portions de chromosomes identiques et la population n'évoluera pas ; l'évolution se retrouvant bloquée, on n'atteindra jamais l'optimum global.
- La mutation permet d'atteindre la propriété d'ergodicité. Cette dernière est une propriété garantissant que chaque point de l'espace de recherche puisse être atteint. Etant donné qu'une mutation peut intervenir de manière aléatoire au niveau de n'importe quel locus, on a la certitude mathématique que n'importe

quelle permutation de la chaîne de bits peut apparaître au sein de la population [QIA 14]. La figure IV.4 explique l'opération de mutation.

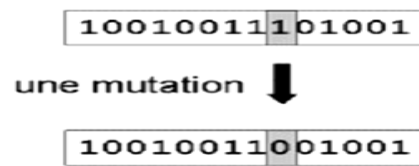


Figure IV.4 : Exemple d'une mutation

Pour ne pas perturber l'exécution de notre algorithme, nous avons choisi la probabilité  $P_m$  de mutation égale à 0,15. Une valeur élevée peut rendre la recherche de l'algorithme aléatoire. Par ailleurs, une valeur très faible rendra impossible l'extraction des optimums locaux.

### c) 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 valeur de fitness. Pour ce faire, il existe de nombreuses façons de procéder : sélection par roue de roulette, sélection par tournoi, sélection proportionnelle à l'écart-type, sélection par classement,.... Nous avons choisi, dans notre travail, la sélection par roue de roulette (roulette wheel) vue sa simplicité et sa rapidité. Dans cette sélection chaque individu de la population se voit attribuer une probabilité d'être choisi égale à sa fitness divisée par la fitness totale. Les probabilités sont cumulées de façon que chaque individu se voit attribuer 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-retenus disparaissent de la nouvelle population. Pour éviter de perdre les meilleurs gènes, l'individu optimal est conservé dans la nouvelle population. Le tableau IV.3 et la figure IV.5 illustrent un exemple de sélection de type roue de roulette [DUR 04]. Ou Chaque individu de la population (A, B, C, D, E) est représenté sur la roue par une probabilité égale à sa fitness divisée par la fitness totale.

Individus	Fitness	Probabilité de sélection
-----------	---------	--------------------------



A	4	$4 / 20 = 20\%$
B	6	$6 / 20 = 30\%$
C	2	$2 / 20 = 10\%$
D	3	$3 / 20 = 15\%$
E	5	$5 / 20 = 25\%$
Total	20	100%

Tableau IV.3: Exemple d'une sélection de type Roue de Roulette

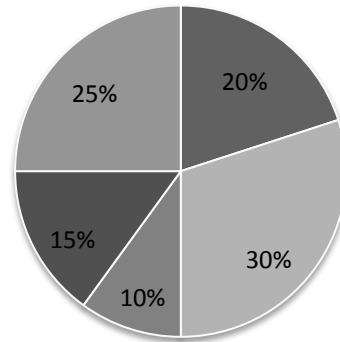


Figure IV.5 : Schéma d'une Roue de Roulette

#### IV.3.3.4. 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 pas suffisamment rapidement. On peut aussi envisager d'arrêter l'algorithme lorsque la fonction d'adaptation d'un individu dépasse un seuil fixé au départ [JUA 04].

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

Dans ce travail, nous avons choisi le nombre d'itérations comme étant le critère d'arrêt pour le programme que nous avons élaboré. En effet, après plusieurs exécutions, nous avons jugé que le nombre d'itérations égal à 1000 est suffisant pour obtenir l'optimum global.

#### IV.4. Application et validation

Une application aux problèmes d'optimisation des SMALT utilisant les AGs afin de trouver une installation à la fois économique et sécurisée est présentée dans ce chapitre. Nous nous sommes intéressés à cet effet au système de mise à la terre du poste de transformation 60/30kV de Ain El-Melh situé à la Wilaya de M' Sila.

##### IV.4.1. Poste de transformation 60/30kV de Ain El-Melh

Ce poste est de type extérieur. Il est constitué d'un étage de 60kV avec 02 transformateurs de puissance 40MVA chacun et d'un poste de 30kV pour l'alimentation de la région en énergie électrique. Il est relié au réseau national par 02 départs aériens de 60kV. La superficie de ce poste est de 160x160 m<sup>2</sup>. Il est caractérisé par:

- Une puissance de court-circuit du réseau 60kV:  $P_{cc} = 3500\text{MVA}$ ;
- Une durée normalisée de court-circuit:  $t_c = 1\text{s}$ ;
- Un courant de court-circuit:  $I_{cc} = 31500\text{A}$ ;
- Une résistivité de matériau de surface (Gravier):  $\rho_s = 3000\Omega\text{m}$ ;
- Une résistivité de la terre:  $\rho = 50,8938\Omega\text{m}$ ;
- Un nombre de départs lignes 60 kV:  $na = 2$ ;
- Facteur de division du courant  $S_f = 0,6$ ;
- Un courant maximal de la grille de terre:  $I_G = I_{cc}S_f = 18900\text{A}$ ;
- Une surface du réseau maillé (de la grille):  $A = 25600\text{m}^2$ .

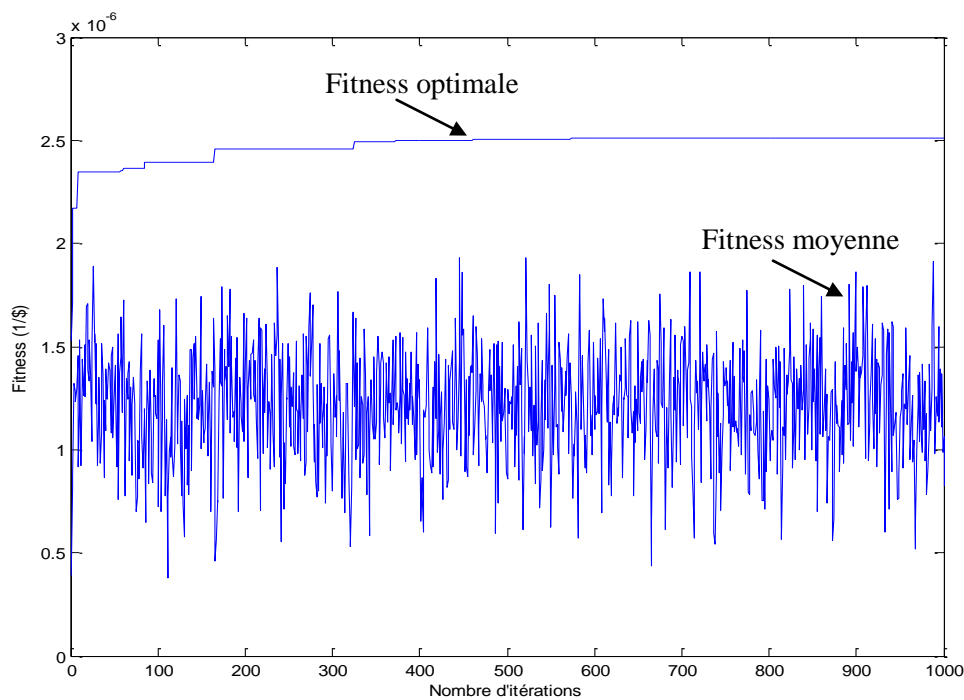
##### IV.4.2. Résultats et interprétations

L'évaluation de la fitness moyenne donne l'information sur la performance de l'algorithme ainsi que sur la stratégie de recherche **exploration** (diversification) ou **exploitation** (intensification). L'**exploration** permet de scruter les zones inconnues de l'espace de recherche et l'**exploitation** permet la réutilisation des connaissances acquises aux points précédemment visités [DUR 04]. La valeur de la fitness moyenne est donnée par l'expression (IV.21) suivante:

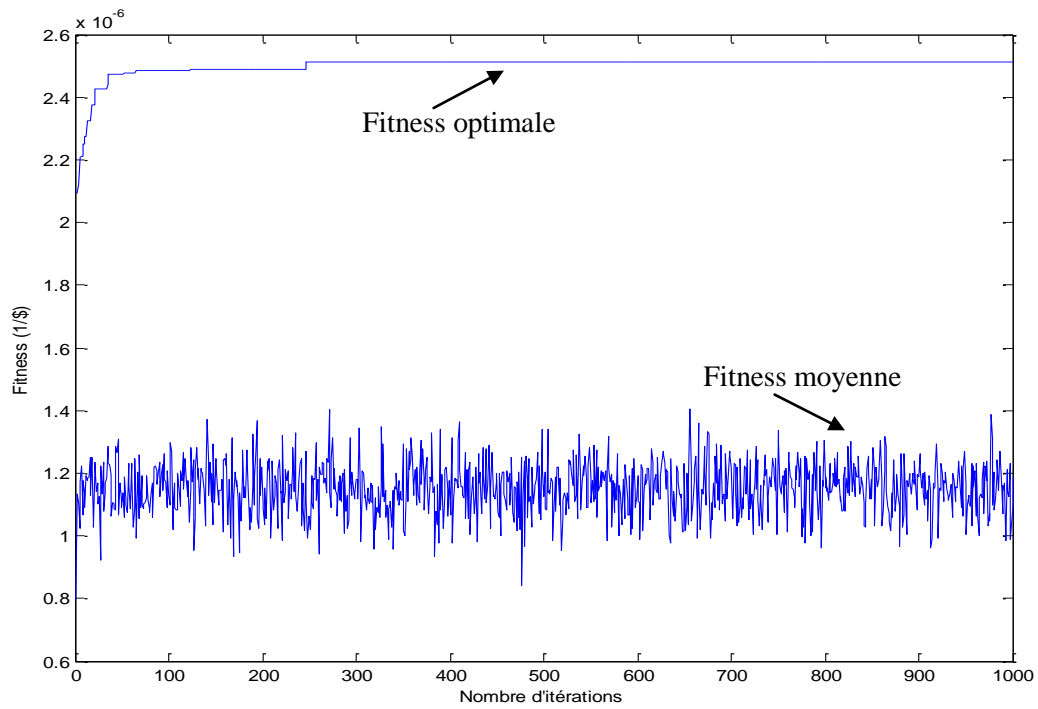
$$Fitness_{moyenne}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{pop}} Fitness(k)}{N_{pop}} \quad (IV.21)$$

$N_{pop}$ : la taille de la population.

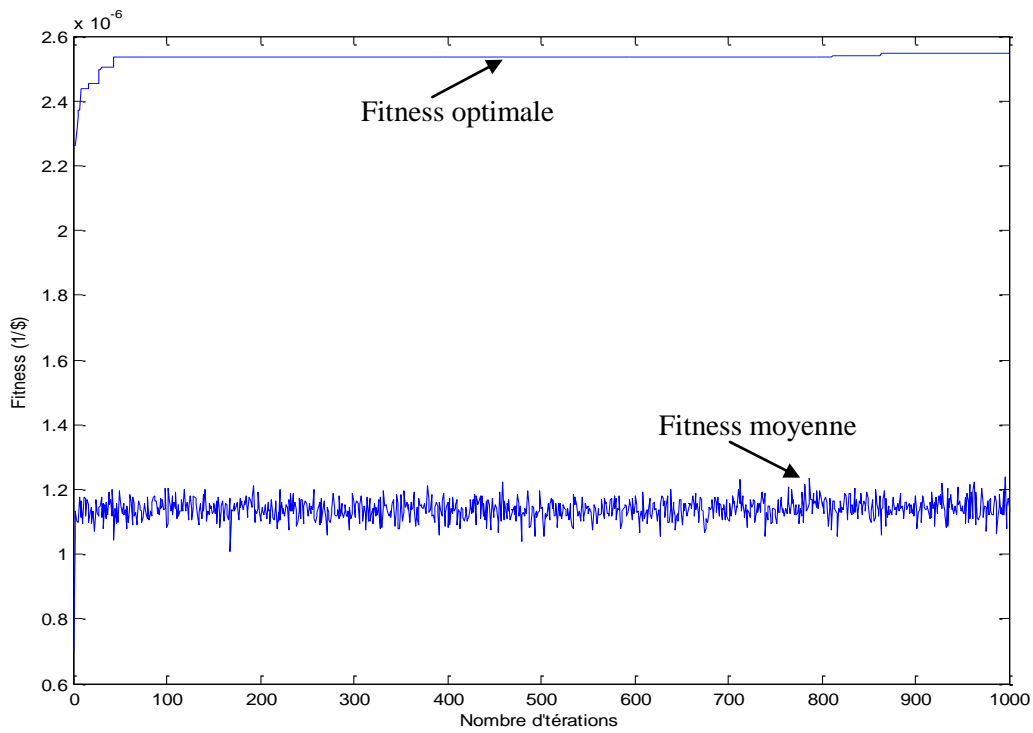
La figure (IV.6) illustre les variations de la fitness moyenne et celle optimale en fonction du nombre d'itérations, pour les tailles de la population 10, 100, 1000 et 10000. Rappelons que la fitness moyenne est la somme des fitness partielles divisée par la taille de la population. Elle permet d'analyser la qualité de l'avancement de l'algorithme vers l'optimum global au cours des itérations.



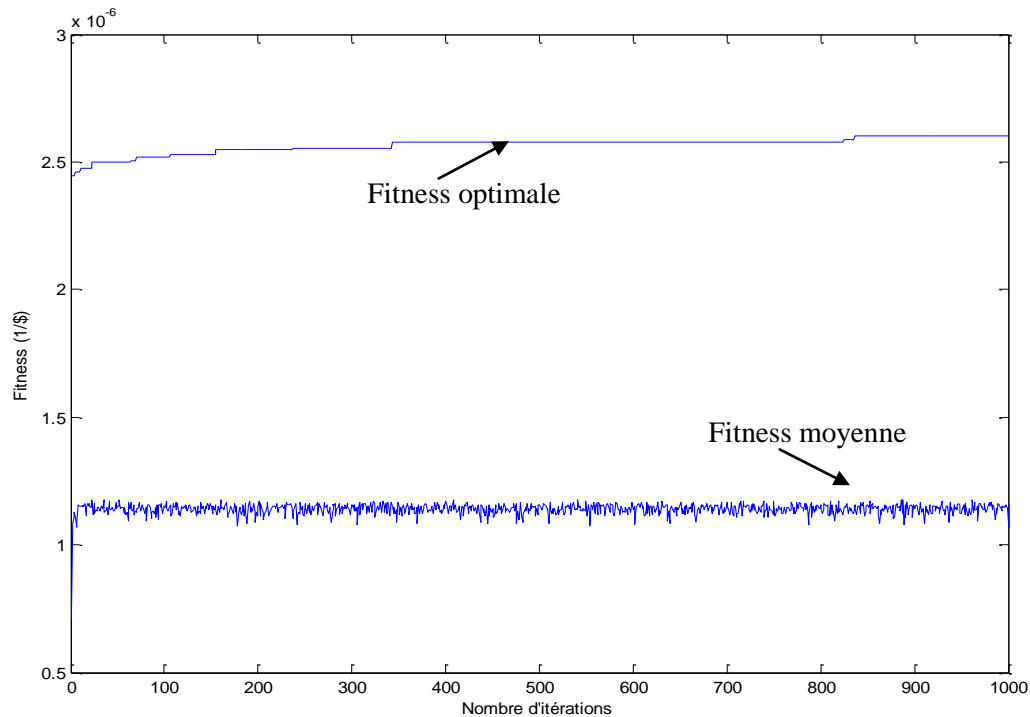
a) Taille de la population égale à 10



b) Taille de la population égale à 100



c) Taille de la population égale à 1000



d) Taille de la population égale à 10000

Figure IV.6: Fitness moyenne et fitness optimale en fonction du nombre d'itérations pour différentes taille de la population

Avec l'augmentation du nombre d'itérations, nous remarquons, d'après la figure (IV.6), que l'amélioration de la fitness optimale est très rapide au début et devient de plus en plus lente à mesure que le temps passe. Les limites inférieure et supérieure de cette fitness diminuent avec l'augmentation de la taille de la population.

Les courbes de la fitness moyenne obtenues sont oscillatoires synonyme de la présence du bruit. Ce bruit est essentiellement dû à l'opérateur de mutation, ce qui implique la diversité de la population (i.e., variété des chromosomes présents dans la population), puisque la diversification (ou exploration) incite la recherche à découvrir des zones de recherche prometteuses (explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche). Nous remarquons aussi, d'après la même figure, qu'avec l'augmentation du nombre de la population, les oscillations de la fitness moyenne diminuent, ce qui favorise l'intensification (ou exploitation). Une telle stratégie de recherche permet à l'algorithme de se concentrer autour des meilleures solutions rencontrées (ou plus exactement utiliser des individus pertinents pour en produire d'autres, c'est-à-dire les exploiter) ; la diversité de la population devient très faible lorsque la majorité des individus sont identiques.

La figure (IV.7) représente la variation de la fonction de coût en fonction du nombre d'itérations pour différentes tailles de la population à savoir 10, 100, 1000 et 10000.

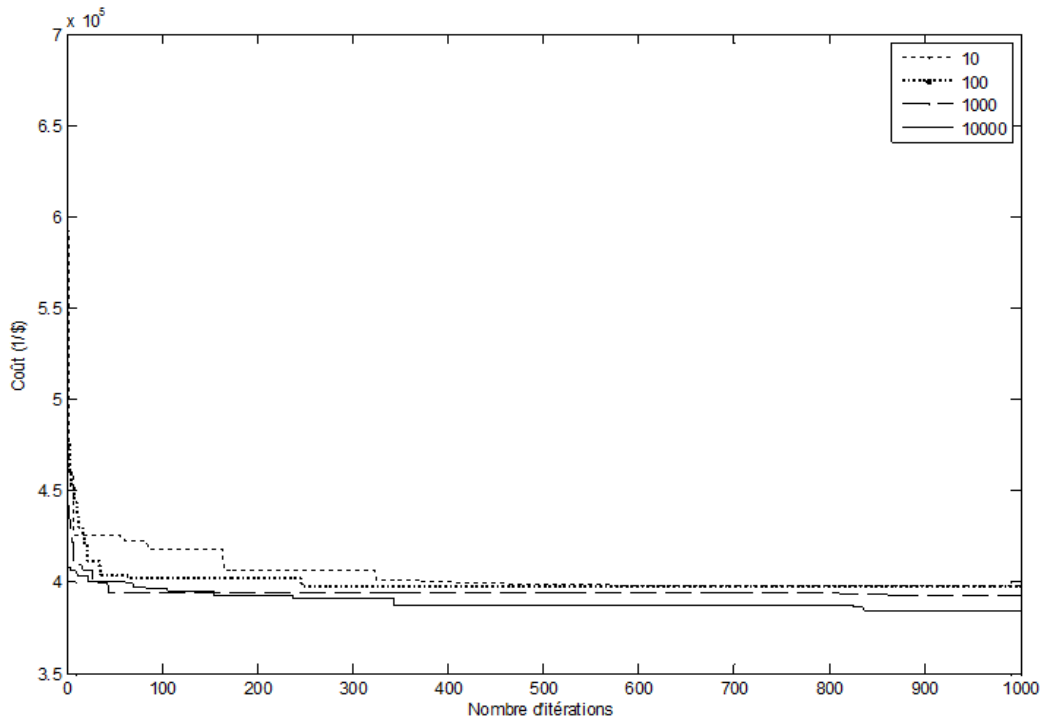


Figure IV.7: Courbes de convergence du Coût (\$) pour différentes taille de la population

Contrairement à l'évolution de la fonction de fitness, celle du coût diminue brusquement, puis lentement et tendant d'abord vers l'optimum dès les 100 premières itérations, avant de trouver l'optimum global (398472\$, 394066\$, 391791\$, 374239 respectivement pour une taille de la population de 10, 100,1000 et 10000).

Pour les différentes tailles de la population, les différents paramètres de la conception initiale et optimale obtenus sont présentés dans le tableau (IV.4). A partir de ces paramètres, le programme nous a proposé une topologie présentée en 3D du SMALT propre à chaque taille de la population (Figure IV.8). En outre, les valeurs du nombre de conducteurs et de leur diamètre, de la longueur des piquets, de la profondeur de la grille et de l'épaisseur de la couche superficielle appartiennent aux intervalles ([limite inférieure ; limite supérieure]) respectifs de leurs variations.

$N_{pop}$	Paramètre	Initial	Optimal	$N_{pop}$	Paramètre	Initial	Optimal
10	Nx	8	10	100	Nx	10	10
	Ny	10	10		Ny	16	9
	h (m)	1,5	0,6		h (m)	0,6	0,5

	hs (m)	0,5	0,13		hs (m)	0,12	0,16
	Lr (m)	3	6		Lr (m)	6	3
	Nr	9	16		Nr	4	19
	dc(m)	0,010	0,013		dc(m)	0,011	0,013
	dr(m)	0,013	0,010		dr(m)	0,012	0,011
	Coût (\$)	685051	398472		Coût (\$)	479321	394066
	CPU time (s)	0,98	0,95		CPU time (s)	3,19	3,30
1000	Nx	11	9	10000	Nx	10	10
	Ny	9	10		Ny	11	10
	h (m)	1,3	0,7		h (m)	0,7	0,5
	hs (m)	0,12	0,13		hs (m)	0,12	0,11
	Lr (m)	6	6		Lr (m)	6	3
	Nr	14	17		Nr	25	19
	dc(m)	0,013	0,013		dc(m)	0,015	0,015
	dr(m)	0,011	0,012		dr(m)	0,014	0,012
	Coût (\$)	446841	391791		Coût (\$)	403576	374239
	CPU time (s)	31,20	31,07		CPU time (s)	689,62	689,06

Tableau IV.4: Paramètres optimaux

Notons que l'augmentation de la taille de la population améliore l'optimalité (i.e., le coût donné pour la population 10000 (374239 \$) est le moindre par rapport aux autres coûts). Ainsi avec l'accroissement de la taille de la population, nous remarquons que le coût de la conception initiale se rapproche plus à celui de la conception optimale:

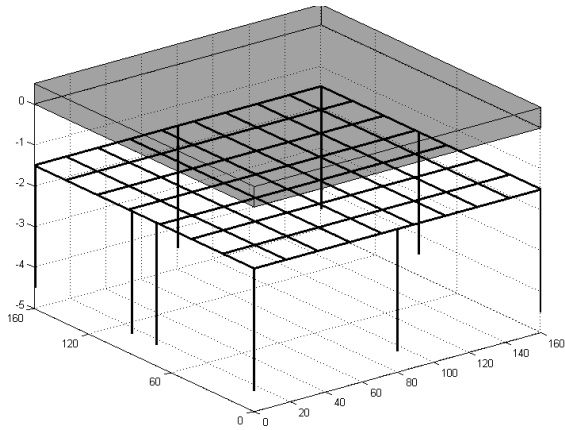
685051\$, 398472\$: coût initial et optimal pour une taille de population égale à 10;

479321\$, 394066\$: coût initial et optimal pour une taille de population égale à 100;

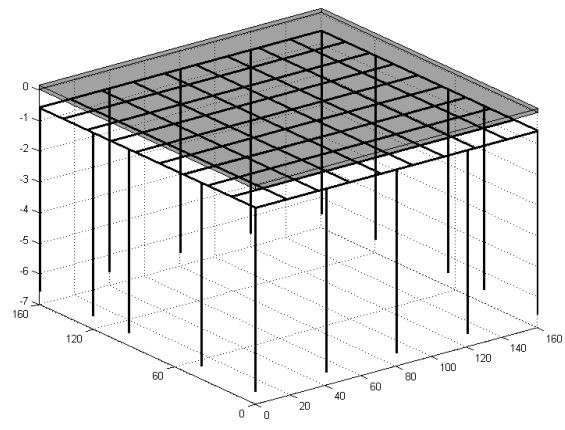
446841\$, 391791\$: coût initial et optimal pour une taille de population égale à 1000;

403576\$, 374239\$: coût initial et optimal pour une taille de population égale à 10000.

Les paramètres mentionnés dans le tableau (IV.4) précédent nous ont permis de dessiner en 3D les topologies initiale et optimale. La figure IV.8 présente de tels réseaux de terre.

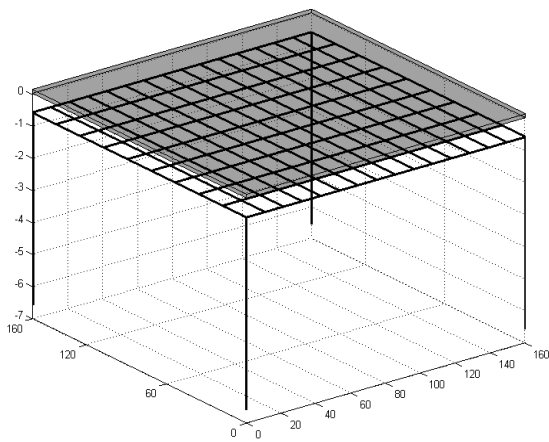


Initiale

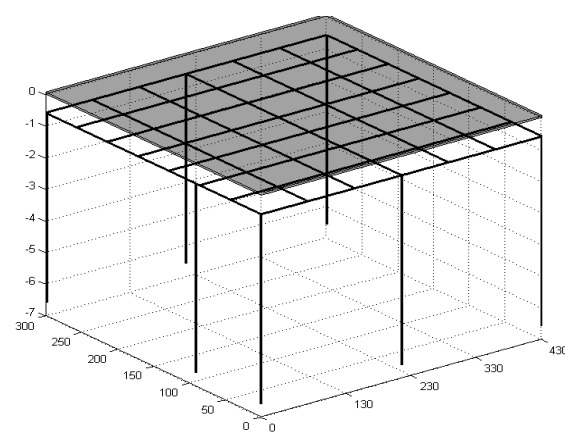


Optimale

Taille de la population égale 10

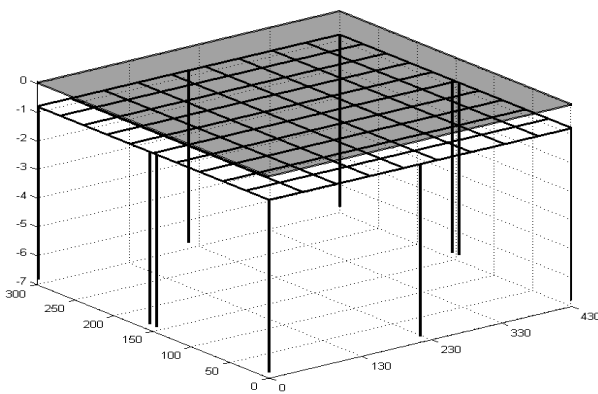


Initiale

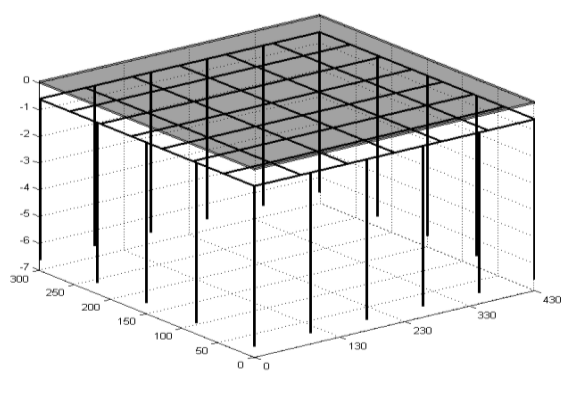


Optimale

Taille de la population égale 100



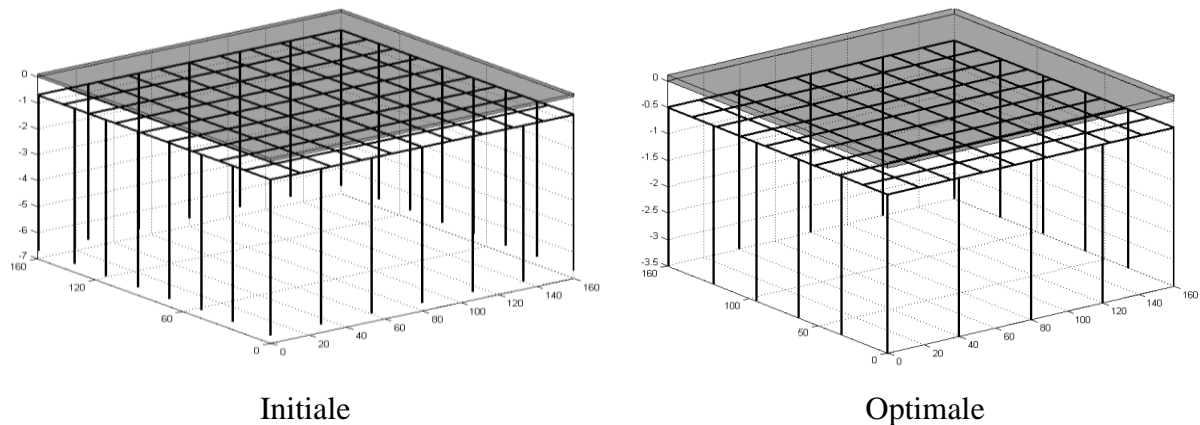
Initiale



Optimale

Taille de la population égale 1000





Taille de la population égale 10000

Figure IV.8 : Topologies de la grille en 3D pour différentes tailles de la population

Pour les différentes tailles de la population, l'AG nous a permis d'obtenir les paramètres de sécurité électriques relatifs aux tensions de contact, de pas et la résistance de la grille de terre pour les configurations optimales. Les résultats ainsi trouvés sont présentés dans le Tableau (IV.5). Ce dernier montre que la tension de pas, celle de contact et la résistance de la grille sont largement inférieures à celles admissibles respectives (recommandées par la norme IEEE Std. 80-2000).

$N_{pop}$	Conception	$R_g$ ( $\Omega$ )	GPR (V)	$V_{touch7}$ (V)	$V_t$ (V)	$V_{step7}$ (V)	$V_s$ (V)
10	Initiale	0,156	2965	806	686	2753	122
	Optimale	0,155	2580	684	613	2268	247
100	Initiale	0,153	2896	674	587	2252	254
	Optimale	0,157	2980	711	673	2373	299
1000	Initiale	0,155	2930	596	674	2225	132
	Optimale	0,157	2968	636	684	2268	218
10000	Initiale	0,155	2930	565	647	2120	212
	Optimale	0,150	2835	666	622	2176	289

Tableau IV.5 : Valeurs optimales des principaux paramètres électriques

## IV.5. Utilisation de CYMGrd - Validation des résultats

Le code de calcul CYMGrd est un programme d'analyse et de conception d'installations efficaces de mise à la terre. Il a été développé pour aider les ingénieurs à la conception de leurs nouvelles grilles et à renforcer les grilles de toute géométrie déjà existantes. Ce code de calcul permet l'analyse rapide de différentes alternatives de conception et de choisir la solution la plus économique pour n'importe quelle installation donnée. Le programme répond aux normes IEEE Std. 80-2000, IEEE Std. 81-1983 et IEEE Std. 837-2002 [CYM06].

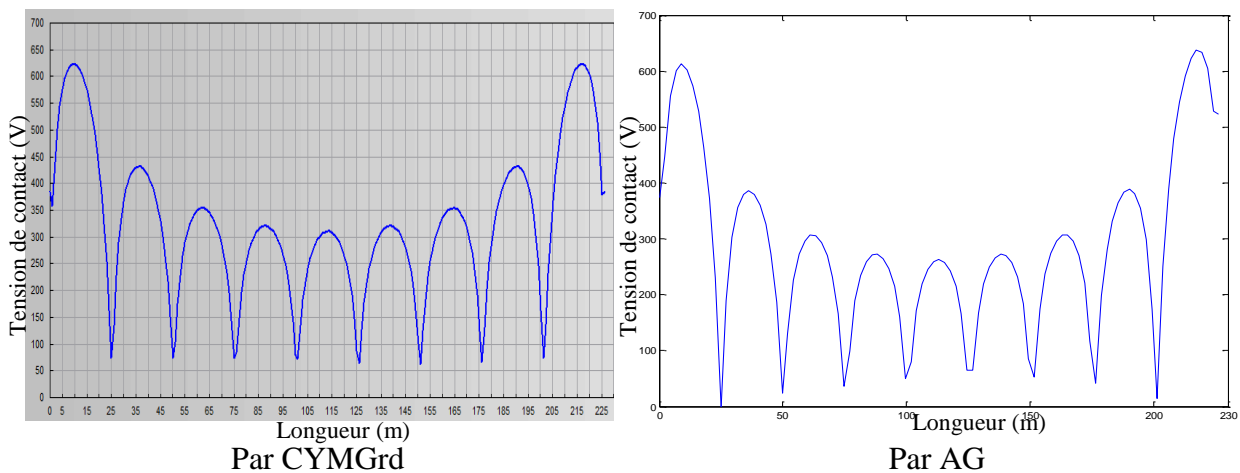
En introduisant, les paramètres relatifs à la topologie du réseau de terre optimisée et initiale à savoir, les valeurs optimales des 8 variables, ainsi que celles de la durée du défaut, du facteur de division du courant, de la résistivité du sol et de la résistivité de la superficie du site dans le code de calcul CYMGrd, nous avons pu obtenir, les principales grandeurs électriques de sécurité présentées dans le tableau (VI.6).

N <sub>pop</sub>	Conception	Méthode	R <sub>g</sub> (Ω)	GPR(V)	V <sub>touch70</sub> (V)	V <sub>t</sub> (V)	V <sub>step70</sub> (V)	V <sub>s</sub> (V)
10	Optimale	CYMGrd	0,154	2910	684	620	2268	130
		AG	0,155	2929	684	613	2268	247
100	Optimale	CYMGrd	0,155	2929	711	685	2373	150
		AG	0,157	2980	711	673	2373	299
1000	Optimale	CYMGrd	0,154	2910	636	635	2268	100
		AG	0,157	2968	636	624	2268	218
10000	Optimale	CYMGrd	0,151	2890	666	612	2176	140
		AG	0,150	2835	666	622	2176	289

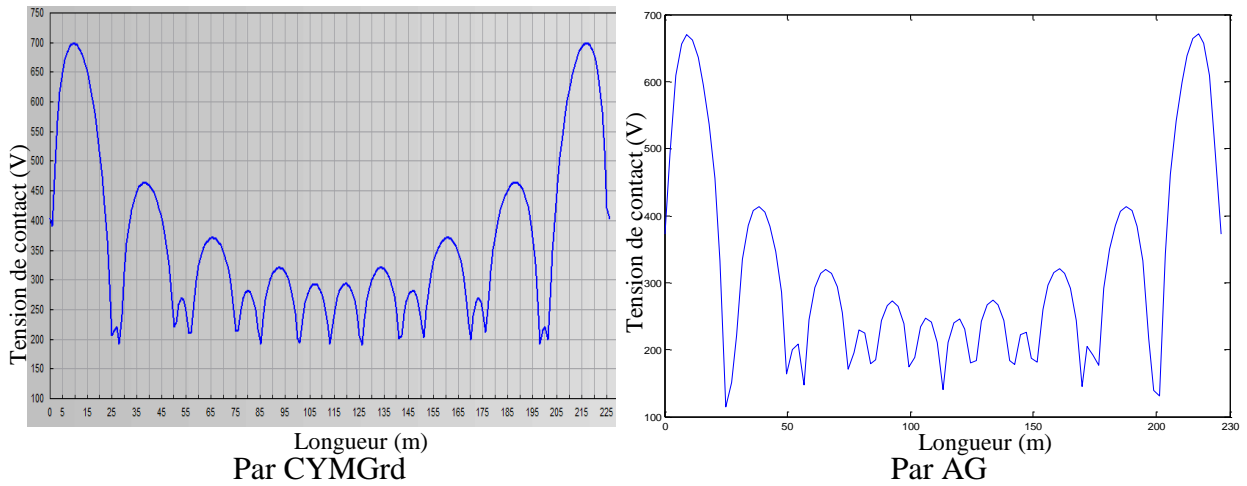
Tableau IV.6 : Comparaison des principaux paramètres électriques

Pour les différentes tailles de population, les tensions de pas et de contact obtenues sont largement inférieures à celles admissibles respectives.

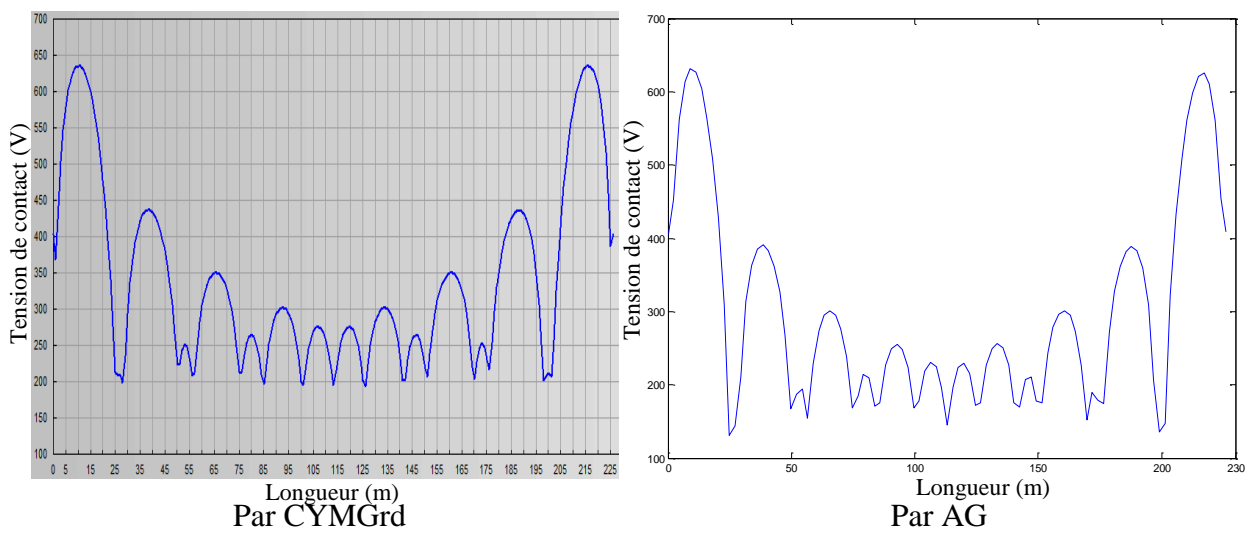
La figure (IV.9) présente respectivement le diagramme de profil de la tension de contact obtenue à la fois par CYMGrd et AG. Nous remarquons que pour une même taille de la population, les formes des caractéristiques relatives au profil de tension de contact obtenue par CYMGrd et AG sont très similaires.



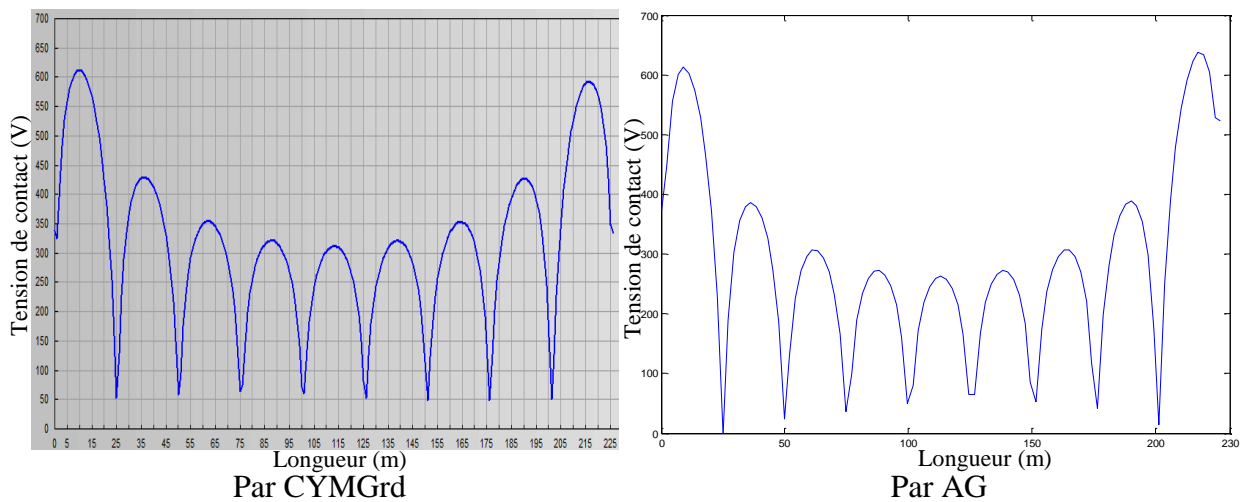
Conception optimale pour taille de la population égale 10



Conception optimale pour taille de la population égale 100



Conception optimale pour taille de la population égale 1000



Conception optimale pour taille de la population égale 10000

Figure IV.9: Diagramme de profil de potentiels de contact pour différents tailles de la population

Bien que la tension de contact atteint au niveau des coins une valeur maximale, elle reste très inférieure à celle admissible maximale ; nos systèmes de terre sont largement sécurisés.

## IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons optimisé le SMALT du poste de transformation de Ain El-Melh en développant un AG. Il ressort de cette étude les conclusions suivantes:

- l'algorithme AG converge dès les 400 itérations.
- Pour toutes les tailles de la population, les SMALT optimisés que nous avons obtenus sont sécurisés du fait que les tensions de contact et de pas sont inférieures à celles maximales admissibles respectives.
- Pour les faibles tailles de la population, l'AG explore plus d'espace de recherche étant donné l'oscillation de la fitness moyenne. Avec l'augmentation de la taille de la population, l'AG favorise l'intensification (ou exploitation) lui permettant de se concentrer autour des meilleures solutions rencontrées, suite à la l'atténuation des oscillations de la fitness moyenne.
- l'AG est robuste ; une telle robustesse est due à l'exploration et l'exploitation intensive des solutions.
- Pour toutes les tailles de la population, les paramètres de construction relatifs au nombre de conducteurs et de leur diamètre, de la longueur des piquets, de la profondeur de la grille et de l'épaisseur de la couche superficielle appartiennent aux intervalles ([limite inférieure ; limite supérieure]) respectifs de leurs variations conformément à la IEEE 80-2000.
- Les valeurs des tensions de pas et de contact admissibles obtenues à l'aide du code de calcul CYMGrd sont exactement les mêmes que celles que nous avons trouvées lors de nos optimisations. Les tensions de pas et de contact actuelles sont très proches. Les topologies ainsi proposées sont à la fois économiques et largement sécurisées.

## V.1. Introduction

L'obtention d'un SMALT économique et sécurisé nécessite un choix judicieux des paramètres de construction en respectant les restrictions imposées par la norme IEEE 80-2000. Cette dernière stipule que la tension de pas, la tension de contact, l'élévation du potentiel de terre (EPT) et la résistance du réseau de terre doivent être dans des limites admissibles.

Ce chapitre présente l'application des EPs afin de déterminer les paramètres optimaux géométrique et de construction du SMALT. Cette optimisation est basée sur la fonction de coût que nous avons proposée en chapitre IV. Cette fonction est soumise à diverses contraintes et considère les paramètres géométriques et de construction à savoir le nombre de conducteurs, la taille des conducteurs et des piquets, la profondeur de la grille, le nombre et la longueur des piquets, la superficie totale de l'excavation et revêtement. Nos résultats ont été validés en comparant certains de nos résultats à ceux en utilisant le code de calcul CYMGrd [CYM 06].

## V.2. Optimisation par Essaim Particulaire (OEP)

### V.2.1. Principe général

L'optimisation par essaim particulaire a été initialement introduite par Russel Eberhart et James Kennedy en 1995 [JUA 04, KEN 01]. Le mot « essaim » est généralement utilisé pour désigner un ensemble fini de particules ou d'agents interactifs. Les oiseaux évoluant en groupes, les bancs de poissons, les colonies de fourmis, les colonies d'abeilles et même les systèmes immunitaires sont des exemples d'essaims. L'optimisation par essaim de particules s'inspire du comportement social des oiseaux évoluant en groupe et des bancs de poissons. L'algorithme d'optimisation par essaim de particules lance la recherche avec une population de solutions, où chacune est appelée particule. Cette dernière est caractérisée par une vitesse de déplacement et une position dans l'espace de recherche. Au cours du processus de la recherche, chaque particule se déplace pour modifier sa position dans l'espace de recherche en fonction de sa vitesse actuelle, sa position actuelle, sa meilleure position trouvée au cours des itérations passées et la meilleure position trouvée par l'essaim. Son déplacement lui permet de mettre à jour sa position et sa vitesse de déplacement à chaque itération. Le

processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt, défini par l'utilisateur, soit vérifié [LEE 09].

### V.2.2. 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) [BEN 13]:

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

Nous notons que cette heuristique se démarque des autres méthodes évolutionnaires (typiquement, les algorithmes génétiques) sur deux points essentiels ; elle met l'accent sur la coopération plutôt que sur la compétition et il n'y a pas de sélection (au moins dans les versions de base). L'idée était qu'une particule même actuellement médiocre mérite d'être conservée, car c'est peut être justement elle qui permettra le succès futur, précisément du fait qu'elle sort des sentiers battus [YEN 08].

### V.2.3 Paramètres d'un EP

Pour appliquer l'EP, il faut définir un espace de recherche constitué de particules et une fonction objectif à optimiser. Le principe de l'algorithme est de déplacer ces particules afin qu'elles trouvent l'optimum. Chacune de ces particules est dotée [KEN 01]:

1. D'une **position**, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définitions.

$$X_i = (X_{i1}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{ik}) \quad (V.1)$$

2. D'une **vitesse** qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, chaque particule change de position au cours des itérations. Elle évolue 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.

$$V_i = (V_{i1}, \dots, V_{ij}, \dots, V_{ik}) \quad (V.2)$$

3. 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 :

4. Sa **meilleure position visitée**  $P_{id}(t)$ . On retient essentiellement la valeur du critère calculée (valeur de la fonction objectif) ainsi que ses coordonnées.

5. La **position du meilleur voisin de l'essaim**  $g_{id}(t)$  qui correspond à l'ordonnancement optimal.

6. La **valeur qu'elle donne à la fonction objectif**  $f(P_{id}(t))$ , car à chaque itération, il faut une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

#### V.2.4 Etapes de l'Algorithme d'essaim particulaire

Le principe de l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire, illustré par l'organigramme de la figure V.1, exploite la même notion d'influence entre les individus dans une population. Le déplacement de chaque individu est influencé par l'historique de son parcours et de celui des autres individus qui se retrouvent dans son voisinage. La mémoire de chacun des individus est sollicitée et permet d'influencer le parcours de l'ensemble de la population [LEE 09].

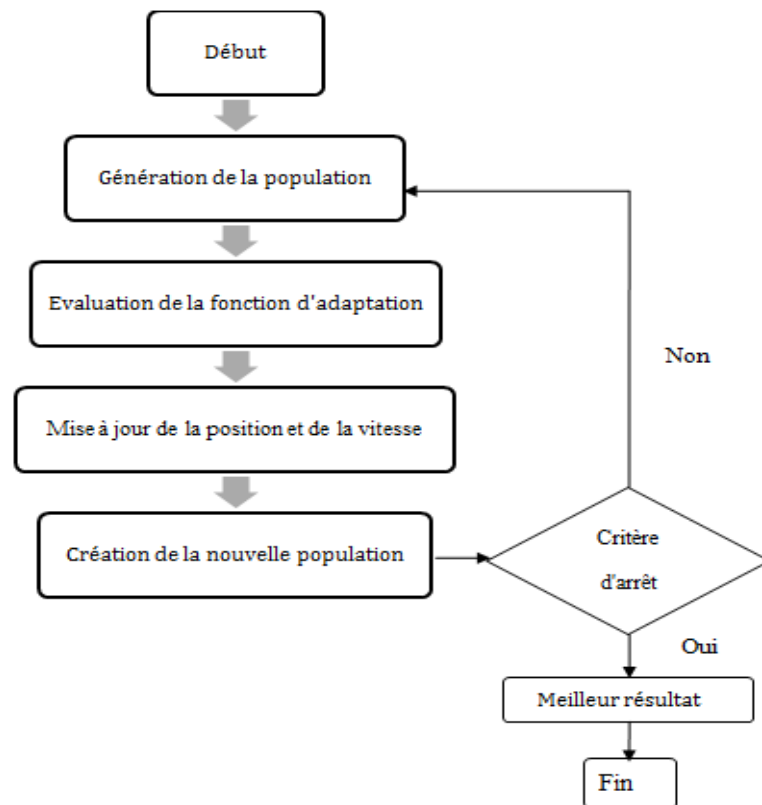


Figure V.1 : Étapes d'un algorithme d'essaim particulaire

### V.2.4.1 Génération de la population

Pour appliquer la méthode des EPs, il faut définir un espace de recherche constitué des particules et d'une fonction objectif à optimiser. Chacune de ces particules est initialement dotée d'une position, définie par l'équation V.3, d'une vitesse donnée par l'équation V.4, permettant à la particule de se déplacer, et finalement, 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 [LEE 09].

$$X_i = (X_{i1}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{ik}) \quad (V.3)$$

$$V_i = (V_{i1}, \dots, V_{ij}, \dots, V_{ik}) \quad (V.4)$$

### V.2.4.2 Fonction fitness

Chaque particule est estimée par la fonction fitness. Cette particule sera retenue si la valeur de sa fitness est élevée. En tenant compte des contraintes, la fonction fitness peut être donnée par l'expression suivante :



$$fit(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s) = \frac{1}{F(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)} \quad (V.5)$$

où:

$F(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ : fonction de coût avec contraintes;

$fit(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ : fonction fitness.

### V.2.4.3. Mise à jour de la position et de la vitesse

A chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte non seulement leur meilleure position, mais aussi celle de son voisinage. Dans les faits, la nouvelle vitesse est calculée à partir de la formule suivante [YEN 08]:

$$V_{id}(iter + 1) = \omega V_{id}(iter) + C_1 r_1 (P_{id}(iter) - X_{id}(iter)) + C_2 r_2 (g_{id}(iter) - X_{id}(iter)) \quad (V.6)$$

avec:

$$\omega = \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \left( \frac{iter}{max_{iter}} \right);$$

$$C_1 = (C_{1f} - C_{1i}) \frac{iter}{max_{iter}} + C_{1i};$$

$$C_2 = (C_{2f} - C_{2i}) \frac{iter}{max_{iter}} + C_{2i};$$

$\omega$ : facteur d'inertie;

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

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

$iter$ : itération courante;

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

$C_1$ : coefficient de confiance (auto confiance);

$C_2$ : coefficient de confiance (confiance en essaim);

$C_{1i}$ ,  $C_{1f}$ ,  $C_{2i}$  et  $C_{2f}$ : constantes;

$max_{iter}$ : nombre d'itérations maximales;

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

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

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

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

Nous déterminons ensuite la position suivante de la particule grâce à la vitesse calculée par l'expression suivante [NEZ 13]:

$$X_{id}(t + 1) = X_{id}(t) + V_{id}(t + 1) \quad (V.7)$$

On se rend compte, en accord avec Maurice Clerc et Patrick Siarry [MAU 14], que l'évolution d'une particule est finalement une combinaison de trois types de comportements : égoïste (suivre sa voie suivant sa vitesse actuelle), conservateur (revenir en arrière en prenant en compte sa meilleure performance) et panurgien (suivre aveuglement le meilleur de tous en considérant sa performance). On voit alors que la bio-inspiration à l'origine de l'optimisation par EP ressort dans l'algorithme sous la forme d'une intelligence collective : coordination du groupe, instinct individuel et interaction locale entre les individus (grognements, phéromones, ...) [DEL 08]. Un déplacement entre deux points est expliqué sur la figure V.2.

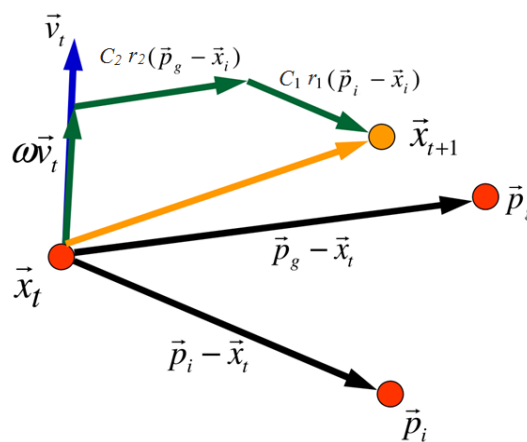


Figure V.2: Déplacements possibles entre deux points

## V.2.5. 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 la taille d'essaim. Les arrangements de ces paramètres déterminent les orientations de recherche de l'optimum dans l'espace de recherche.

### V.2.5.1. 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 [DEL 08].

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. Le concept de la

vitesse est complètement perdu si  $\omega = 0$ . La particule se déplace alors en chaque étape sans connaissance de la vitesse précédente.

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). Alors qu'un petit poids d'inertie tend à faciliter l'exploitation, c'est-à-dire favoriser le secteur courant de recherche. Une valeur appropriée de facteur d'inertie fournit l'équilibre entre la capacité globale et celle locale d'exploration de l'essaim, et a ainsi comme conséquence de meilleures solutions [ELF 13].

Les études menées par Shi et Eberhart [SHI 98] 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 V.8. De bons résultats ont été trouvés pour une valeur décroissant linéairement de 0,9 à 0,4 [LEE 09]

$$\omega = \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \left( \frac{iter}{max_{iter}} \right) \quad (V.8)$$

où

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

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

$iter$ : Itération courante;

$max_{iter}$ : Nombre maximum d'itérations à effectuer.

### V.2.5.3. 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 celle locale. Ainsi, l'ajustement de ces constantes change la quantité de « tension » entre paramètres dans le système. 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 [KEN 01, LIA 08].

Cependant, d'autres arrangements ont été également employés dans différentes études. Ratnaweera et al ont récemment étudié l'effet de la variation de ces coefficients dans le temps. Les auteurs ont adapté  $C_1$  et  $C_2$  avec le temps de la façon suivante [LIA 08] :

$$C_1 = (C_{1f} - C_{1i}) \frac{iter}{max_{iter}} + C_{1i};$$

$$C_2 = (C_{2f} - C_{2i}) \frac{iter}{max_{iter}} + C_{2i}.$$

$C_{1i}$ ,  $C_{1f}$ ,  $C_{2i}$ , et  $C_{2f}$  sont des constantes,  $iter$  est le nombre d'itérations courantes et  $max_{iter}$  est le nombre maximal d'itérations. 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 optima globaux à la fin de la recherche. Les auteurs appelaient ceci comme méthode de PSO-TVAC (OEP avec des coefficients d'accélération variables dans le temps). En fait,  $C_1$  a été diminué de 2,5 à 0,5 tandis que  $C_2$  a été grimpé de 0,5 jusqu'à 2,5 [LIA 08].

#### V.2.5.4. Taille de l'essaim

C'est tout à fait une pratique commune dans la littérature de la technique d'EP de limiter le nombre de particules à la gamme 20-60. Van den Bergh et Engelbrecht [VAN 04] 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 [SHI 98] ont illustré que la taille de population a à peine un effet sur la performance de la méthode d'OEP [NEZ 13].

#### V.2.6. 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 [KEN 01]:

- Le nombre maximum d'itérations a été atteint;

- La variation de la vitesse est proche de 0;
- La fitness de la solution est suffisant.

Comme les opérateurs génétiques utilisent des facteurs aléatoires, un EP 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. Après plusieurs exécutions du programme que nous avons élaborés, le nombre d'itérations permettant l'obtention de l'optimum global a été fixé à 1000.

### V.3. Application et validation

Nous nous intéressons dans cette application à la conception du SMALT de l'ouvrage énergétique de Bir-Khadem. Cet ouvrage consiste en un poste de transformation de 60/11kV GIS se situe à Alger et se compose principalement de:

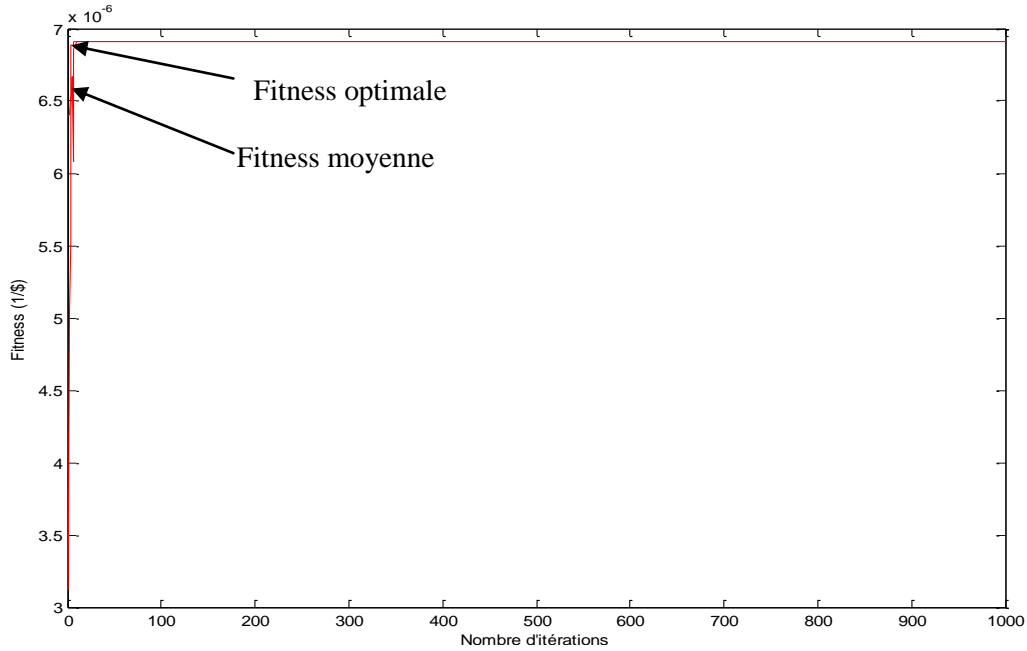
- Un bâtiment HT abritant un poste 60kV et différentes salles de contrôle;
- Deux transformateurs 60/11kV, 40MVA;
- Un bâtiment MT abritant un poste 11kV et différentes salles de contrôle.

Cette présente étude est faite dans le but de trouver au poste de transformation de 60/11kV de Bir-Khadem, une configuration du réseau de terre à la fois, sécurisé, performante, optimisée et donc moins coûteuse (économique).

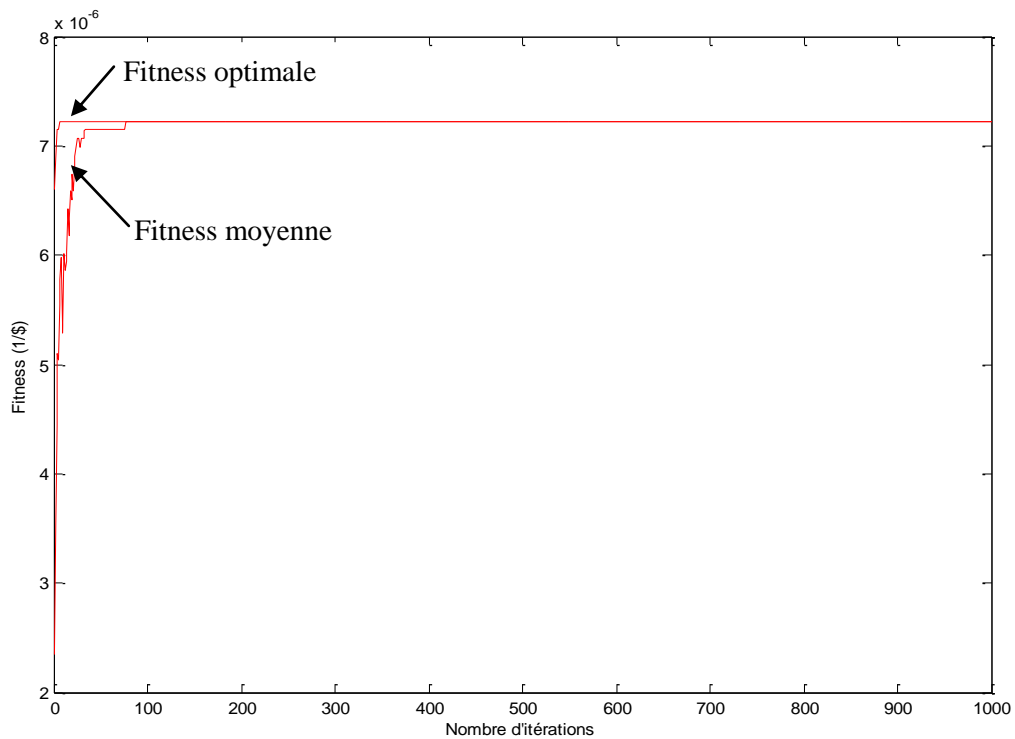
Les données nécessaires pour la conception du SMALT sont fournies par le constructeur après étude du dossier relatif à la conception du réseau de terre en question. Ces données consistent en les paramètres contractuels suivants :

- Superficie totale de 60mx70m;
- Durée de court-circuit:  $t_f = 0,15$  s;
- Courant de court-circuit:  $I_{cc} = 31,5$  kA;
- Résistivité du matériau de surface (Gravier):  $\rho_s = 3000$   $\Omega$ .m;
- Facteur de division du courant:  $S_f = 0,64$ ;
- Valeurs de la résistivité:  $\rho = 74$   $\Omega$ .m.

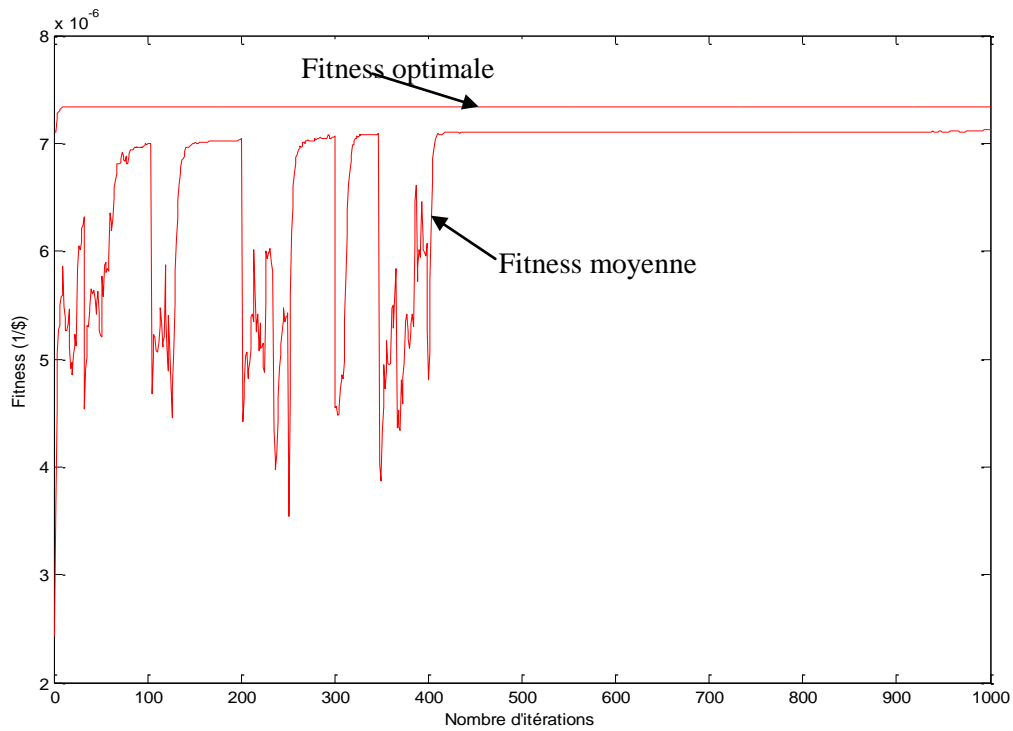
La variation de la valeur de la fitness moyenne et celle optimale en fonction du nombre d'itérations obtenues pour une taille de population de 10, 100, 1000 et 10000 respectivement sont présentées sur la figure V.3.



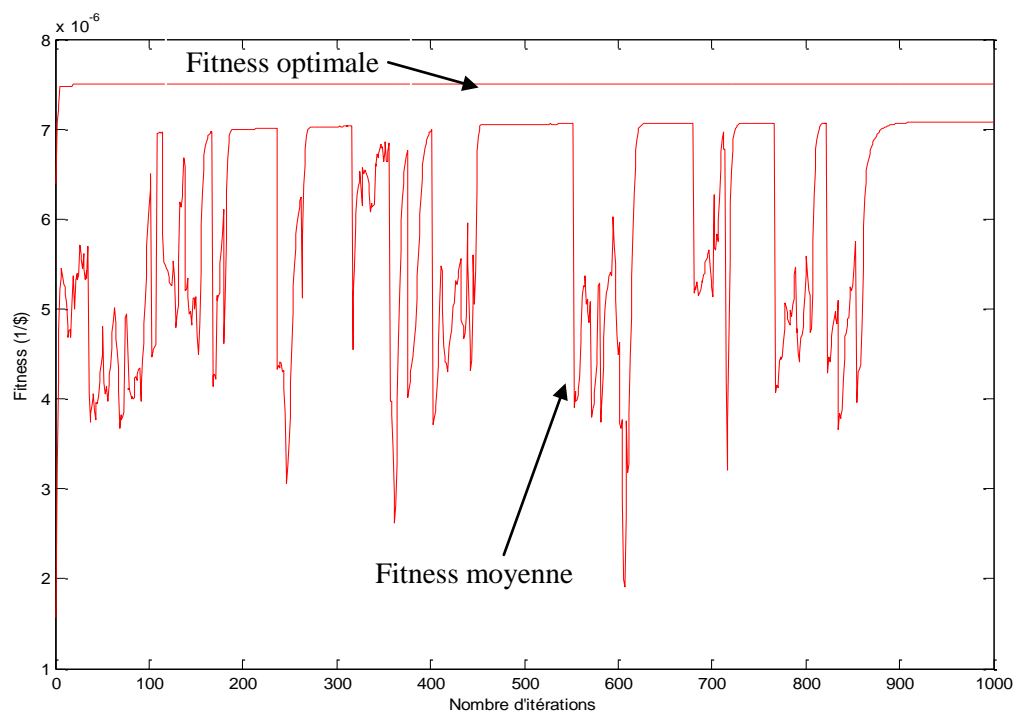
a) Taille de population égale à 10



b) Taille de population égale à 100



c) Taille de population égale à 1000



d) Taille de population égale à 10000

Figure V.3: Fitness moyenne et fitness optimale en fonction du nombre d'itérations pour différentes tailles de population

Les courbes de la fitness moyenne obtenues par EP sont pratiquement confondues à celles de la fitness optimale, pour les plus faibles tailles de population (10 et 100). Cela

explique la convergence très rapide vers un optimum local, étant donné la stagnation de la recherche de cette technique EP (l'algorithme s'est retrouvé bloqué sur un minimum local et n'a pas réussi à l'échapper). Pour les tailles importantes (1000 et 10000), la fitness moyenne présente des oscillations avant de se rapprocher de la fitness optimale. Ce fait est dû à la diversité (ou exploration) de la population, puisque la présence du nombre important des particules incite davantage une recherche à explorer des nouvelles zones de l'espace de recherche. En plus, d'après la figure V.3, la fitness optimale augmente rapidement dès les 20 premières itérations, avant de tendre vers un palier constant.

Les résultats ainsi trouvés montrent que l'objectif lié à l'augmentation de la taille de population aidant l'algorithme à explorer l'espace des solutions et à améliorer le meilleur individu obtenu, est vérifié. Cependant, l'algorithme n'arrive pas à limiter le nombre des particules piégées à un optimum local.

La figure (V.4) représente la variation de la fonction de coût en fonction du nombre d'itérations pour différentes tailles de population (10, 100, 1000 et 10000).

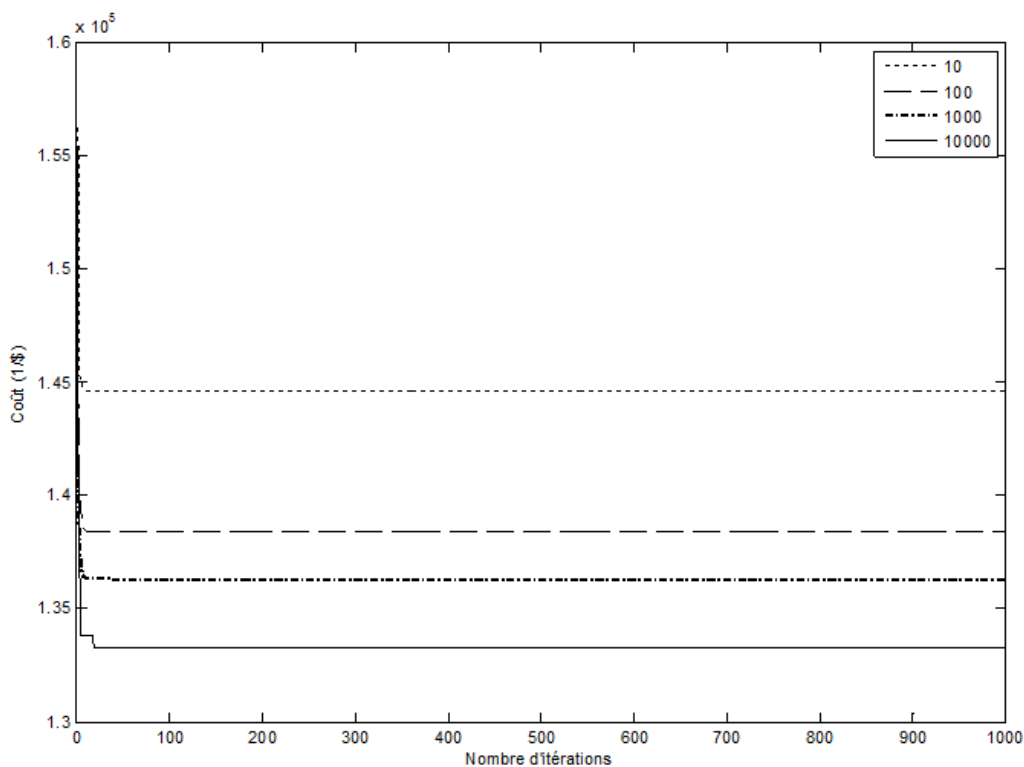


Figure V.4: Courbe de convergence du coût

Dès les premières itérations, la fonction de coût diminue brusquement avant de converger rapidement vers un optimum propre à chaque taille de population. Cet optimum



vaut 145700 \$, 138410 \$, 135120 \$ et 133660 \$ respectivement pour une taille de population de 110, 100, 1000 et 10000. La chute de la fonction de coût exprime, en fait, que les solutions de bonne qualité sont encore nombreuses.

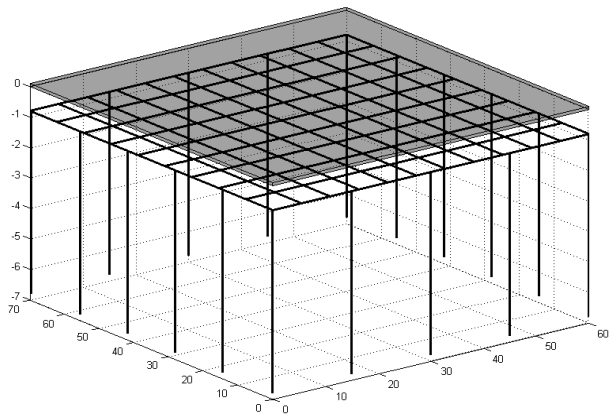
Pour les différentes tailles de population, les différents paramètres de la conception initiale et optimale obtenus par l'algorithme EP sont présentés dans le tableau V.1. En outre, les valeurs relatives au nombre de conducteurs, au diamètre des conducteurs, à la longueur des piquets, à la profondeur de la grille et à l'épaisseur de la couche superficielle appartiennent aux intervalles ([limite inférieure ; limite supérieure]) respectifs de leurs variations.

$N_{pop}$	Paramètres	Initial	Optimal	$N_{pop}$	Paramètres	Initial	Optimal
10	Nx	10	9	100	Nx	8	9
	Ny	12	11		Ny	13	10
	h (m)	0,8	0,7		h (m)	0,6	0,5
	hs (m)	0,1	0,13		hs (m)	0,19	0,19
	Lr (m)	6	6		Lr (m)	6	3
	Nr	18	18		Nr	18	18
	dc(m)	0,014	0,014		dc(m)	0,014	0,014
	dr(m)	0,014	0,013		dr(m)	0,014	0,013
	Coût (\$)	158530	145700		Coût (\$)	154030	138410
	CPU time (s)	0,8	0,72		CPU time (s)	4,8	4,3
1000	Nx	8	8	10000	Nx	8	8
	Ny	9	9		Ny	11	9
	h (m)	1	0,7		h (m)	0,9	0,7
	hs (m)	0,25	0,2		hs (m)	0,16	0,21
	Lr (m)	6	6		Lr (m)	6	3
	Nr	18	18		Nr	19	18
	dc(m)	0,014	0,013		dc(m)	0,013	0,013
	dr(m)	0,014	0,014		dr(m)	0,014	0,013
	Coût (\$)	149040	135120		Coût (\$)	148670	133660
	CPU time (s)	19,02	19,4		CPU time (s)	167	160

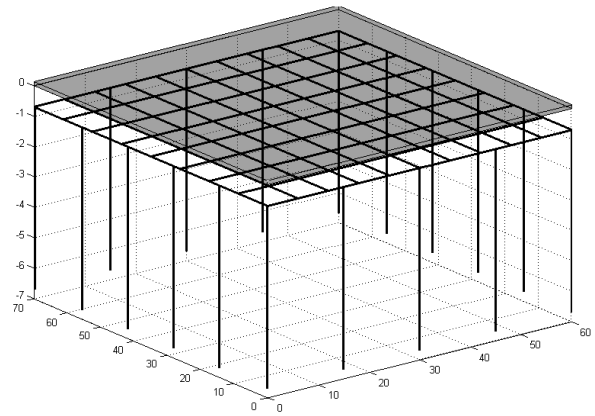
Tableau V.1: Paramètres optimaux obtenus par EP

Nous remarquons que l'augmentation de la taille de la population améliore l'optimalité; le coût obtenu pour la population de 10000, égal à 133660 \$, est le plus faible. Il est important aussi de noter que l'écart entre les coûts des conceptions initiales et finales diminue avec l'augmentation de la taille de la population.

A partir de tableau V.1, le programme nous a proposé les topologies présentées en 3D sur la figure V.5.

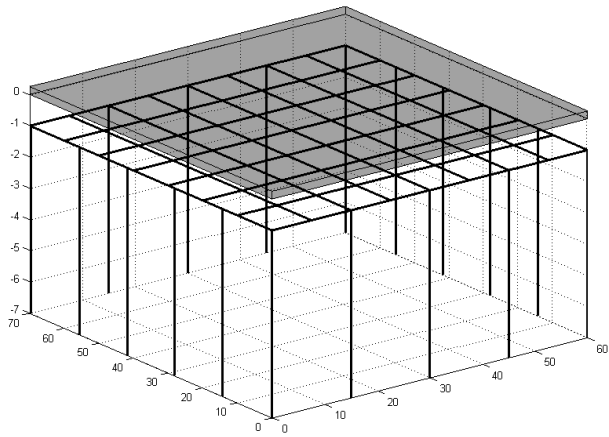


Initiale

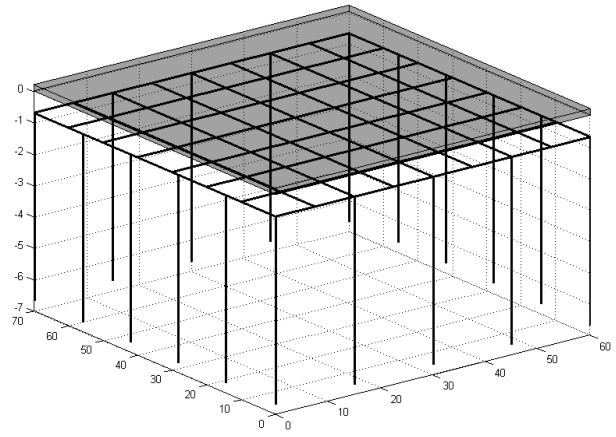


Optimale

Taille de population égale 10

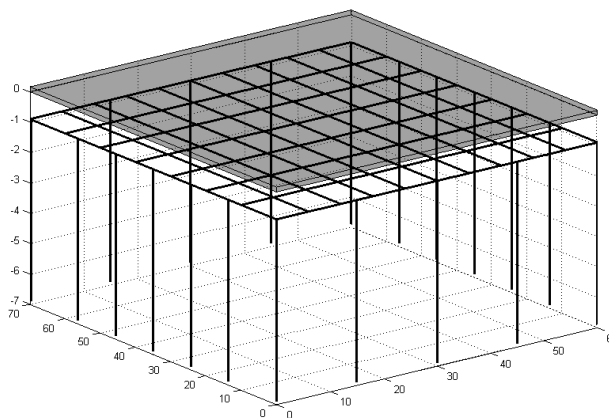


Initiale

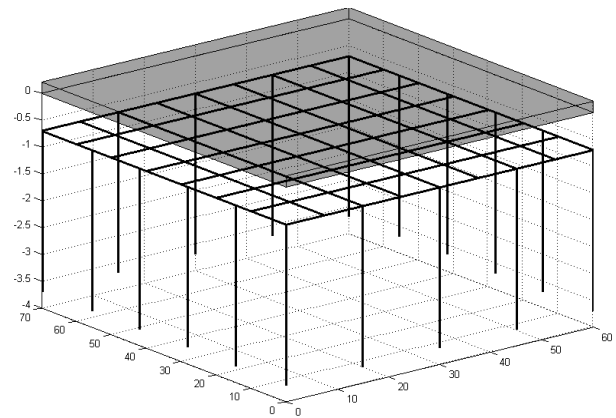


Optimale

Taille de population égale 100



Initiale



Optimale

Taille de population égale 1000

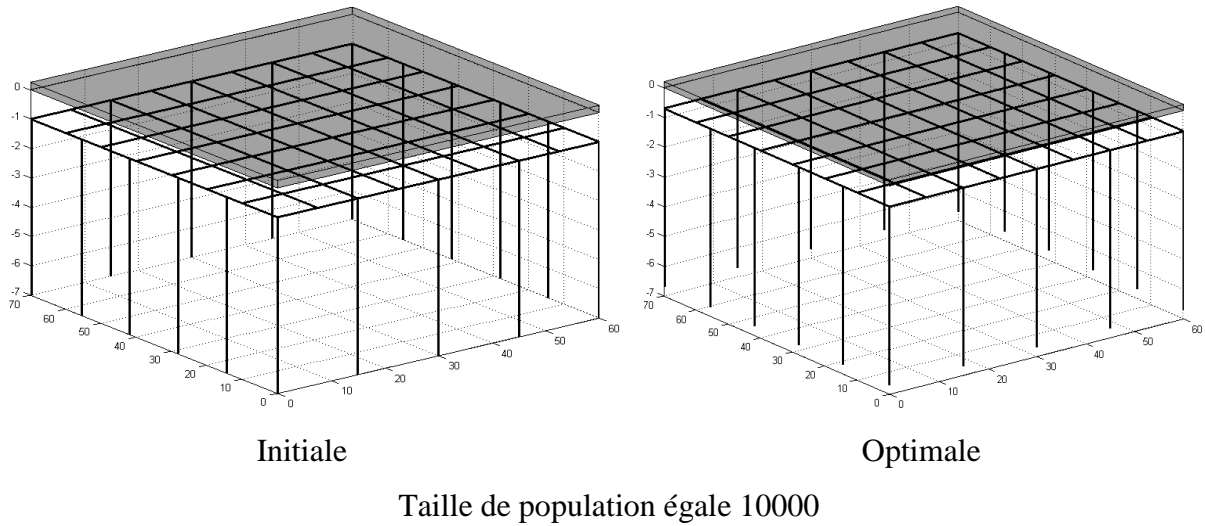


Figure V.5: Topologies de la grille en 3D pour différentes tailles de population

Pour les différentes tailles de population, l’algorithme EP nous a permis d’obtenir les paramètres de sécurité électrique (tension de contact, de pas et la résistance de la grille,...) suivants:

$N_{pop}$	Conception	$R_g$ ( $\Omega$ )	GPR (V)	$V_{touch7}(V)$	$V_t(V)$	$V_{step7}(V)$	$V_s(V)$
10	Initial	0,54	11000	1677	1419	5493	855
	Optimal	0,55	11125	1772	1558	5872	934
100	Initial	0,55	11120	1888	1645	6339	1089
	Optimal	0,56	12613	1888	1784	6339	1261
1000	Initial	0,55	11197	1958	1692	6616	707
	Optimal	0,56	11292	1902	1750	6394	921
1000	Initial	0,55	11112	1839	1622	6139	787
	Optimal	0,56	11350	1920	1900	6446	969

Tableau V.2: Valeurs des paramètres de sécurité électrique obtenus par EP

Notons que les résultats trouvés montrent que la tension de pas ( $V_s$ ), celle de contact ( $V_t$ ) et la résistance de la grille ( $R_g$ ) sont largement inférieures à celles admissibles respectives (recommandées par la norme IEEE Std. 80-2000) ; les systèmes sont donc bien optimisés et sécurisés.

#### V.4. Validation en utilisant le code de calcul CYMGrd

En introduisant les paramètres relatifs à la topologie du réseau de terre optimisée à savoir, les valeurs optimales des 8 variables, ainsi que celles de la durée du défaut, du facteur de division du courant, de la résistivité du sol et de la résistivité de la superficie du site dans le

code de calcul CYMGrd, nous avons pu obtenir, pour la configuration optimale de population de 10000, les principales grandeurs électriques de sécurité présentées dans le tableau V.3.

Méthode	Rg( $\Omega$ )	GPR(V)	V <sub>touch70</sub> (V)	V <sub>t</sub> (V)	V <sub>step70</sub> (V)	V <sub>s</sub> (V)
CYMGrd	0,53	11390	1920	1895	6446	660
EP	0,56	11350	1920	1900	6446	969

Tableau V.3 : Paramètres électriques calculés en utilisant CYMGrd

Les paramètres électriques que nous avons obtenus ont été confrontés à ceux en utilisant CYMGrd (présentés dans le tableau V.3). A l'exception de la tension de pas, où CYMGrd présente une valeur légèrement plus petite à celle que trouvée par l'algorithme EP, les autres paramètres sont proches, ce qui valide l'algorithme élaboré.

Par ailleurs, les tensions de pas et de contact obtenues sont largement inférieures aux tensions de pas et de contact admissibles respectivement.

La figure (V.6) présente respectivement diagramme de profil de la tension de contact obtenue par CYMGrd et EP. Bien que la tension de contact atteigne au niveau des coins une valeur importante, elle reste inférieure à celle admissible maximale ; notre système de terre est donc sécurisé.

Nous remarquons que les formes des courbes de profil de tension de contact obtenue par CYMGrd et EP sont similaires.

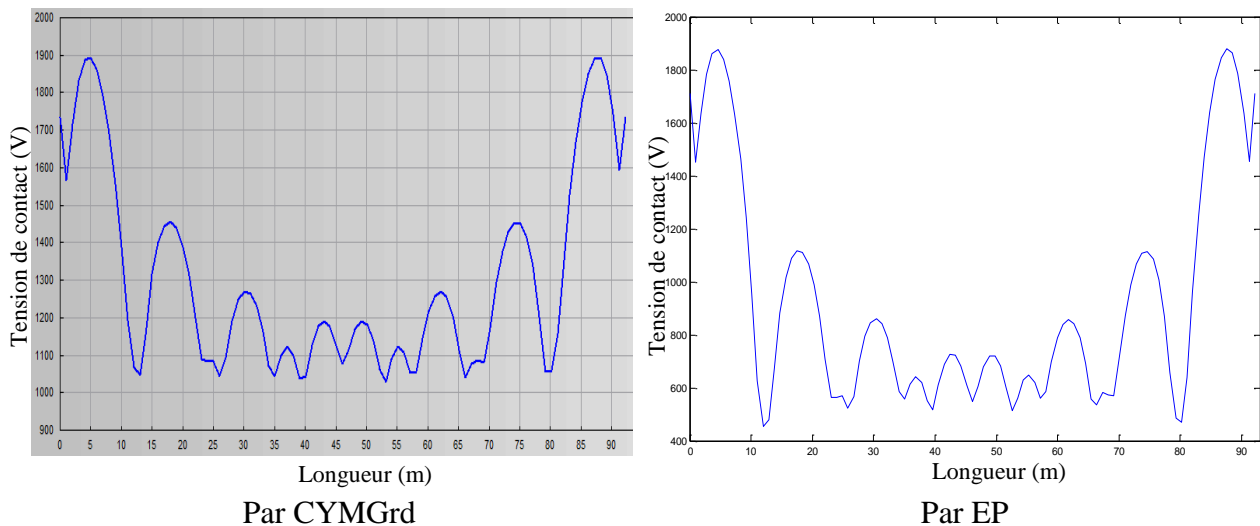


Figure V.6: Profils de la tension de contact pour les conceptions optimales, pour une taille de population de 10000

## V.5. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la conception optimale du SMALT du poste de transformation de Bir-Khadem en se basant sur la technique d'essaim particulaire (EP). Les résultats diversifiés présentés nous conduisent aux constats suivants :

- La convergence très rapide de l'OEP peut s'expliquer par le fait que l'algorithme s'est retrouvé bloqué à un minimum local et n'a pas réussi à s'en extraire (problème de convergence prématurée).
- La fitness optimale augmente rapidement au cours des premières itérations. Ceci est valable pour toutes les tailles de la population adoptées. Les valeurs de cette fitness les plus élevées sont obtenues pour une population de taille importante (10000).
- Pour les faibles tailles de population, l'algorithme EP favorise l'intensification (ou exploitation) lui permettant de se concentrer autour des meilleures solutions rencontrées (i.e., problème de la stagnation de l'EP dû à la rapidité du flux d'information entre les particules, entraîne la création de particules similaires, ce qui augmente la possibilité de piéger la recherche autour d'un optimum local ; il s'agit d'une sous exploration de la recherche).
- L'EP favorise l'exploration pour des tailles de population importantes, c'est pour quoi les courbes de la fitness moyenne sont oscillatoires.
- Pour bien explorer l'espace de solutions et obtenir de meilleures performances, il faut augmenter la taille de population.
- Pour toutes les tailles de la population, les configurations des SMALT optimisés que nous avons obtenus sont sécurisées. Cela se traduit par le fait que les tensions de contact et de pas sont inférieures à celles de maximales admissibles respectives.
- Les valeurs des tensions de pas et de contact admissibles obtenues à l'aide du code de calcul CYMGrd sont proches à celles que nous avons trouvées par EP.

## VI.1. Introduction

Les nombreuses techniques d'inspiration biologique apportent plusieurs avantages et améliorations aux problèmes d'optimisation. Le choix de la technique et de son paramétrage joue un rôle primordial dans la détermination des résultats. En effet, seules l'expertise et l'expérience de l'utilisateur permettront de faire un tel choix [MAT08]. Cependant, aucune méthode n'est efficace à 100% pour la résolution de tous les problèmes d'optimisation [WOL97]. En vue d'améliorer les résultats d'optimisation, une alternative intéressante, l'hybridation, a été proposée. A la base de l'hybridation, plusieurs chercheurs ont introduit des nouvelles techniques basées sur la combinaison entre les différentes stratégies méta-heuristiques.

Ce chapitre est consacré à l'élaboration et l'application d'une nouvelle stratégie d'hybridation (HEPAG) entre les EPs et les AGs pour optimiser le SMALT de l'ouvrage de Labreg. Une telle optimisation est réalisée en minimisant la fonction de coût que nous avons proposée en chapitre IV. Les résultats obtenus suite à l'application des différents algorithmes (EP, AG et HEPAG) seront comparés entre eux. Les paramètres électriques ainsi obtenus seront également confrontés à ceux utilisant le code de calcul CYMGrd.

## VI.2. Principe général

Dans l'objectif de bien explorer, exploiter l'espace de recherche et d'améliorer la qualité des résultats, des stratégies d'hybridation intéressantes ont été réalisées [TAL07, AND01, BUR00, COT98]. Elle permettant l'apparition d'une nouvelle génération des techniques d'optimisation puissante et performante.

L'émergence actuelle des méthodes hybrides consiste à aboutir un équilibre entre l'intensification et la diversification. La diversification est liée à l'exploration de l'espace de recherche, tandis que l'intensification est liée à l'aptitude d'exploiter cet espace [LAB13]. La consistance d'hybridation est d'associer à une méthode dont la capacité d'exploration est très élevée, une méthode caractérisée par une bonne exploitation de l'espace de recherche. Les méthodes hybrides ont rapidement gagné du terrain en réussissant à produire les meilleurs résultats pour de nombreux problèmes [TAL07, AND01].

Actuellement, Plusieurs communautés de chercheurs ont envisagé la combinaison et la coopération des méthodes heuristique d'optimisation, afin de tirer profit des avantages de

chaque méthode et de combler certaines de ses lacunes [MUH88]. En effet, selon [TAL09], les approches hybrides ont permis d'obtenir de bons résultats dans une grande variété de problèmes d'optimisation combinatoire tels le problème du voyageur de commerce, le problème de coloration de graphe, le problème d'affectation quadratique, le problème de tournée de véhicules, le séquençage d'ADN, le calcul des trajectoires des satellites ou encore le problème d'optimisation des SMALT [LAB13, ALI15].

La naissance des méthodes hybrides revient à l'intégration d'une méthode de descente à l'intérieur d'une méthode évolutive décrite par [MUH88, GRE87]. D'autres travaux ont montré l'efficacité de l'hybridation d'une méthode évolutionnaire avec une méthode de recherche locale [HAO99, COT05]. Dans la littérature, plusieurs stratégies d'hybridation combinant les AGs et les EPs ont été développées [TAL09]. La coopération d'AG avec l'EP devient une alternative très intéressante, étant donné que les deux méthodes ont des particularités bien différentes [GRO07].

En effet, les AGs et les EPs présentent un fort potentiel d'application pour résoudre les problèmes d'optimisation, mais elles présentent des points faibles. Les majeurs inconvénients des EPs qui influent totalement sur la performance de l'algorithme sont: l'essaim peut converger prématurément (vers un optimum local si la meilleure position globale et la meilleure position locale sont égales à la position de la particule durant plusieurs itérations), la difficulté de réglage des paramètres (i.e., la taille de l'essaim, le coefficient d'inertie  $\omega$ , les coefficients d'accélération  $C_1$  et  $C_2$ ) [OLA08]. Ainsi, trouver les meilleures valeurs pour les paramètres n'est pas une tâche facile et elle peut différer d'un problème à l'autre. Plusieurs chercheurs confirment que l'EP n'est pas capable de bien explorer totalement l'espace de recherche [CHE11]. Par contre, les AGs ont une grande capacité d'explorer l'espace de recherche à cause de ces opérateurs (mutation, croisement et sélection), mais sont inefficaces dans la détermination du minimum local en termes de vitesse de convergence et de qualité de la solution. Pour surmonter les limitations de l'AG et l'EP, plusieurs approches d'hybridation ont été proposées [WAN08].

Robinson et al [ROB02] ont proposé deux algorithmes hybrides AG-EP et EP-AG pour la résolution des problèmes particuliers d'électromagnétique. En AG-EP, l'AG initialise la population pour l'algorithme EP. Cependant, dans l'hybridation EP-AG, l'algorithme EP génère la population initiale pour l'AG.

Conradie et al [CON02] ont élaboré un algorithme basé sur l'Evolution Neuro-Mimétique Symbiotique (Symbiotic Memetic Neuro Evolution, SMNE) combinant l'AG et l'EP. Le SMNE est utilisé dans le renforcement des algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones. En effet, l'AG a été utilisée pour la recherche globale et l'EP pour la recherche locale.

Lian et al [LIA08] ont utilisé les opérateurs de croisement et de mutation dans l'EP pour résoudre les problèmes d'optimisation discrets d'ordonnancement Flow Shop. Les résultats de comparaison ont démontré la performance de l'algorithme hybride par rapport à celle de l'AG.

Juang et al [JUA04] ont proposé l'HGAPSO comme étant une stratégie d'hybridation d'AG et EP. HGAPSO a utilisé la sélection en premier phase des meilleurs éléments de la population par EP, puis ils sont reproduits directement dans la population suivant. Les applications de HGAPSO dans la conception de réseau neuronal adaptatif inférence floue ont été démontré la performance de l'algorithme.

Grimaldi et al [GRI 04] ont développé le GSO algorithme hybride à base de GA et EP pour l'optimisation des problèmes électromagnétique. Dans le GSO, la population est divisée en deux parties, chaque partie est évoluée par une technique. Puis dans la phase de la mise à jour de la population, les deux parties seront regroupées entent compte un facteur d'hybridation HC ( $0 < HC < 1$ ). Les applications de l'algorithme GSO par [GAN06, GRI04] ont été démontré l'efficacité [GAN06, GRI04].

De même, Lii et al [LII08] ont proposé un algorithme EP hybridé avec l'AG pour la sélection des gènes. Les résultats obtenus et utilisés dans les diagnostics médicaux pour la classification du cancer ont montré l'efficacité et la précision de la classification établie par l'application de l'algorithme proposé.

Une autre philosophie d'hybridation (MGPSO) de l'algorithme EP avec l'AG est utilisée par Liu Zhiming et al [ZHI08]. MGPSO a été utilisé pour résoudre les problèmes d'optimisation avec contraintes. Les résultats obtenus lors de l'application de MGPSO sur des fonctions benchmarks ont montré la robustesse et l'efficacité de l'algorithme proposé.

Zhang et al [ZHA08] ont utilisé la coopération de l'algorithme EP avec l'opérateur de mutation inspirée de l'AG pour résoudre le problème du regroupement spatial avec



contraintes. Les résultats obtenus ont montré la robustesse et l'efficacité de l'algorithme proposé.

On peut conclure que l'hybridation de méta-heuristiques est la voie la plus prometteuse pour l'amélioration de la qualité des solutions dans beaucoup d'applications réelles. Ainsi, le choix d'une approche hybride devient aujourd'hui déterminant pour obtenir de meilleures performances lors de la résolution des problèmes complexes.

### VI.3. Algorithme hybride HEPAG

En utilisant les avantages des techniques AG, EP, nous avons élaboré un hybride essaim particulaire algorithme génétique (HEPAG). L'HEPAG combine la coopération des deux technique AG et EP ; il prend en compte les capacités d'exploitation et d'exploration des deux stratégies. L'algorithme de la technique HEPAG est décrit par l'organigramme de la figure VI.1 suivante :

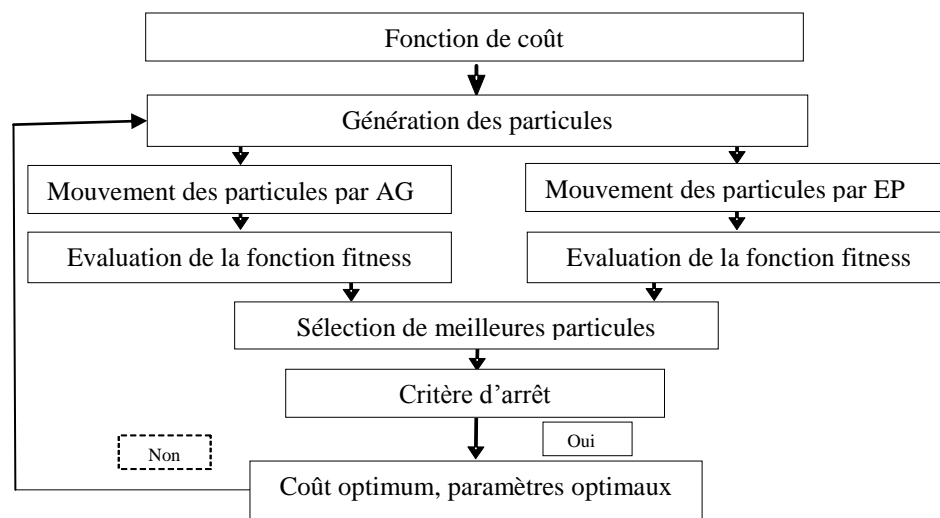


Figure VI.1: Étapes de l'algorithme HEPAG

#### VI.3.1. Initialisation de la population

L'algorithme hybride HEPAG, commence avec une population de  $N_{pop}$  particules. Dans l'espace de recherche ayant  $N_{var}$  variables, la  $i$ ème particule a une position  $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{iNvar})$  et une vitesse  $V_i = (V_{i1}, \dots, V_{ij}, \dots, V_{iNvar})$ . La position est présentée comme une matrice de  $N_{pop} \times (N_{bits} \times N_{var})$  dans laquelle chaque position (correspondant à un chromosome en

AG) est générée sous forme binaire (0 ou 1). Cependant, la vitesse  $V_i$  qui est une matrice de  $N_{pop} \times N_{var}$  est maintenue sous sa forme réelle.

### VI.3.2. Fonction fitness

Chaque particule a sa propre valeur de fitness ( $fit_i$ ) estimée à partir de la fonction fitness. Chaque position doit être décodée en valeur réelle, pour évaluer le coût des particules. En effet, la  $i$ ème particule est meilleure si la valeur de  $fit_i$  est plus élevée.

### VI.3.3. Hybridation

La nouvelle position de chaque particule est évaluée selon deux mouvements. Dans le premier mouvement, la particule se déplace dans l'espace de recherche à une vitesse et une position évaluées conformément aux expressions (V.6) et (V.7) relatives à l'algorithme EP. Dans le second, la particule se déplace dans l'espace de recherche en utilisant les différents opérateurs de l'AG à savoir la mutation, le croisement et la sélection. Pour ce mouvement, la position de la particule est codée sous forme binaire. La valeur de la fonction fitness ( $fit_i$ ) est réévaluée pour les deux mouvements et les particules ayant les plus hautes valeurs de fitness sont conservées pour la nouvelle génération. L'algorithme HEPAG est répété jusqu'à atteindre le nombre maximal d'itérations, défini par l'utilisateur.

## VI.4. Application et validation

Nous présentons une application des techniques d'optimisation susmentionnées (AG, EP et HEPAG) pour la conception optimale d'un SMALT. L'objectif est de déterminer les paramètres géométriques et de construction optimaux des SMALT en minimisant la fonction de coût. La sûreté de tels systèmes est examinée en gardant les paramètres de sécurité requis par la norme IEEE Std. 80-2000 inférieurs à ceux admissibles.

Le SMALT faisant l'objet de ce chapitre est celui de l'ouvrage énergétique de Labreg. Les tailles de population testée sont : 10, 100, 1000 et 10000. En fait, l'augmentation de la taille de population influe sur la stratégie de recherche (i.e., exploration ou exploitation), réduire la probabilité d'une convergence prématurée vers un optimum local et augmenter le temps nécessaire pour converger vers les régions optimales de l'espace de recherche.

Le critère d'arrêt adopté dans cette étude consiste en le nombre d'itérations. Après plusieurs essais, nous avons fixé, pour toutes les applications, le nombre d'itérations équivalent à 1000. Ceci permet d'assurer la convergence des trois techniques.

### VI.4.1. Présentation de l'ouvrage énergétique de Labreg

L'ouvrage de LABREG consiste en une centrale à turbine à gaz (TG) d'une puissance nominale  $2 \times 140,5$  MW. Cette présente étude est faite dans le but de trouver à la dite centrale, une configuration du réseau de terre à la fois, sécurisée, performante, optimisée et donc moins coûteuse (économique).

Les données nécessaires pour la conception du SMALT sont fournies par le constructeur après étude du dossier relatif à la conception du réseau de terre en question, et sont basées sur les paramètres contractuels suivants :

- Superficie totale de  $435 \text{m} \times 300 \text{m}$ ;
- Durée de court-circuit :  $t_f = 0,5 \text{s}$ ;
- Courant de court-circuit triphasé :  $I_{cc} = 31,5 \text{kA}$ ;
- Résistivité du matériau de surface (Gravier) :  $\rho_s = 2000 \Omega \cdot \text{m}$  ;
- Nombre de départs lignes 220 kV :  $na = 3$  ;
- Valeurs de la résistivité des couches supérieure et inférieure :  $\rho_1 = 100,67 \Omega \cdot \text{m}$  avec une épaisseur de 5m et  $\rho_2 = 40,50 \Omega \cdot \text{m}$ .

A partir de la superficie de l'ouvrage et des paramètres contractuels d'une part, et la taille de la population et le nombre d'itérations d'autre part, nous dressons le tableau VI.1. Ce dernier englobe les paramètres à injecter dans les programmes développés à base de l'AG, l'EP et l'HEPAG.

Le courant du grill $I_G(\text{A})$	14900
Le facteur de division du courant $S_f$	0,45
La durée de défaut (s)	0,5
La taille de la population	10, 100, 1000 et 10000
Le nombre d'itérations	1000

Tableau VI.1: Données relatives aux programmes d'optimisation

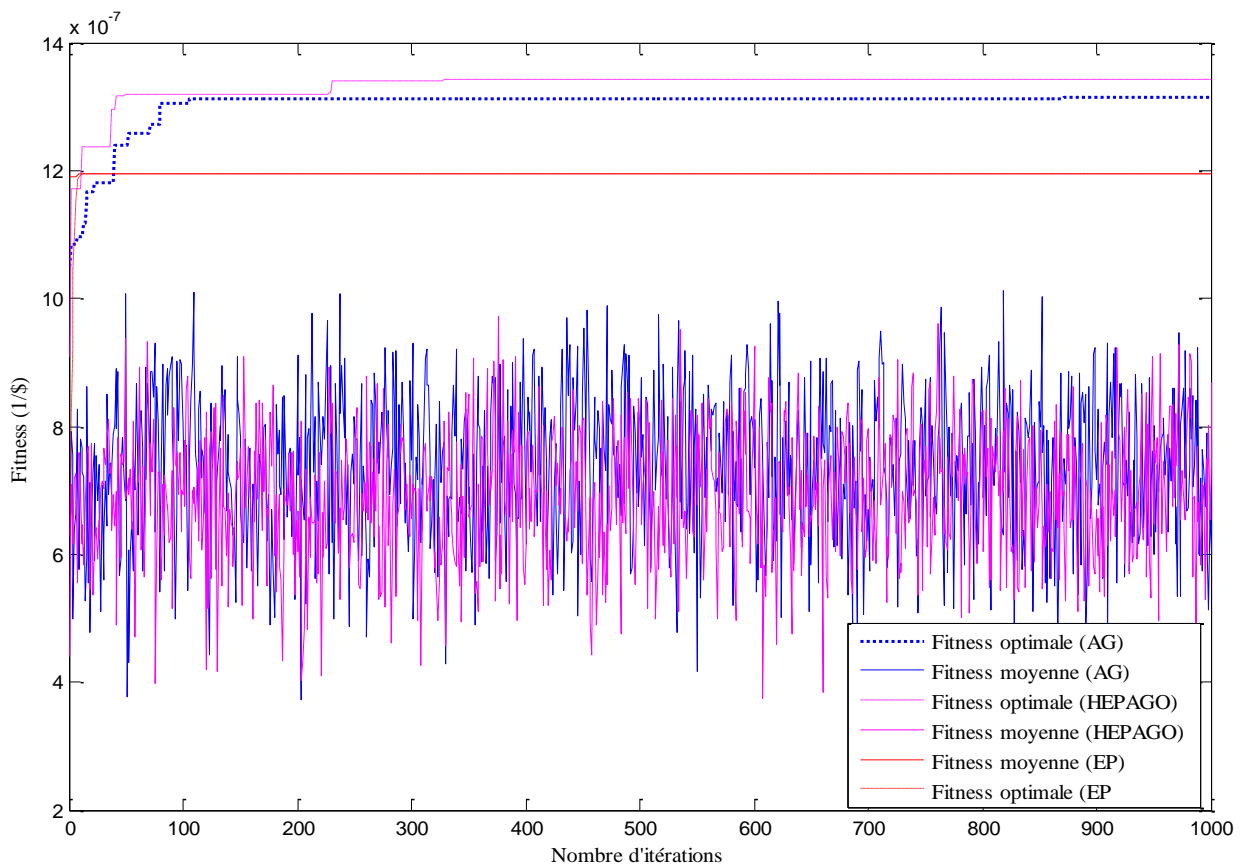
## VI.4.2. Résultats et discussion

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

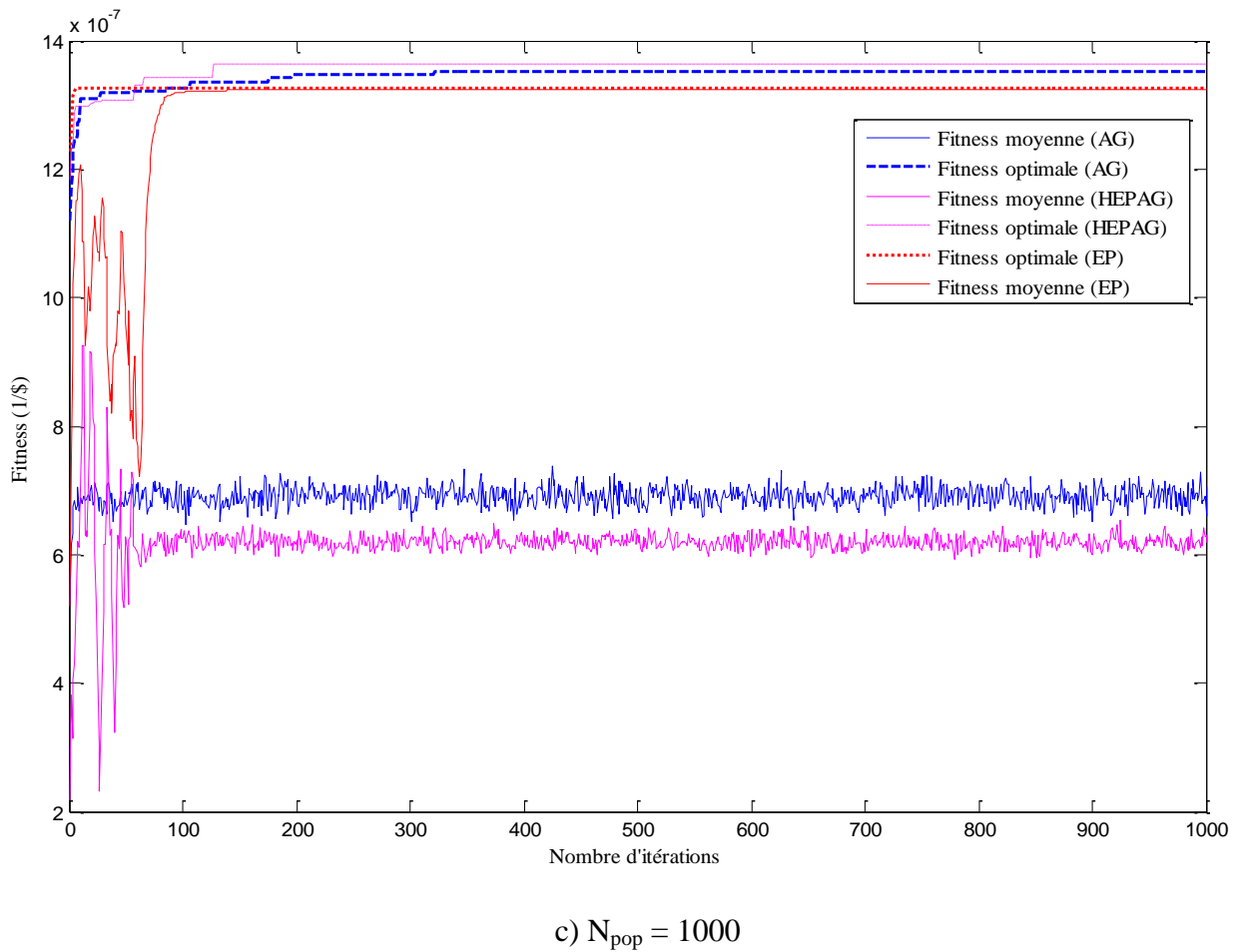
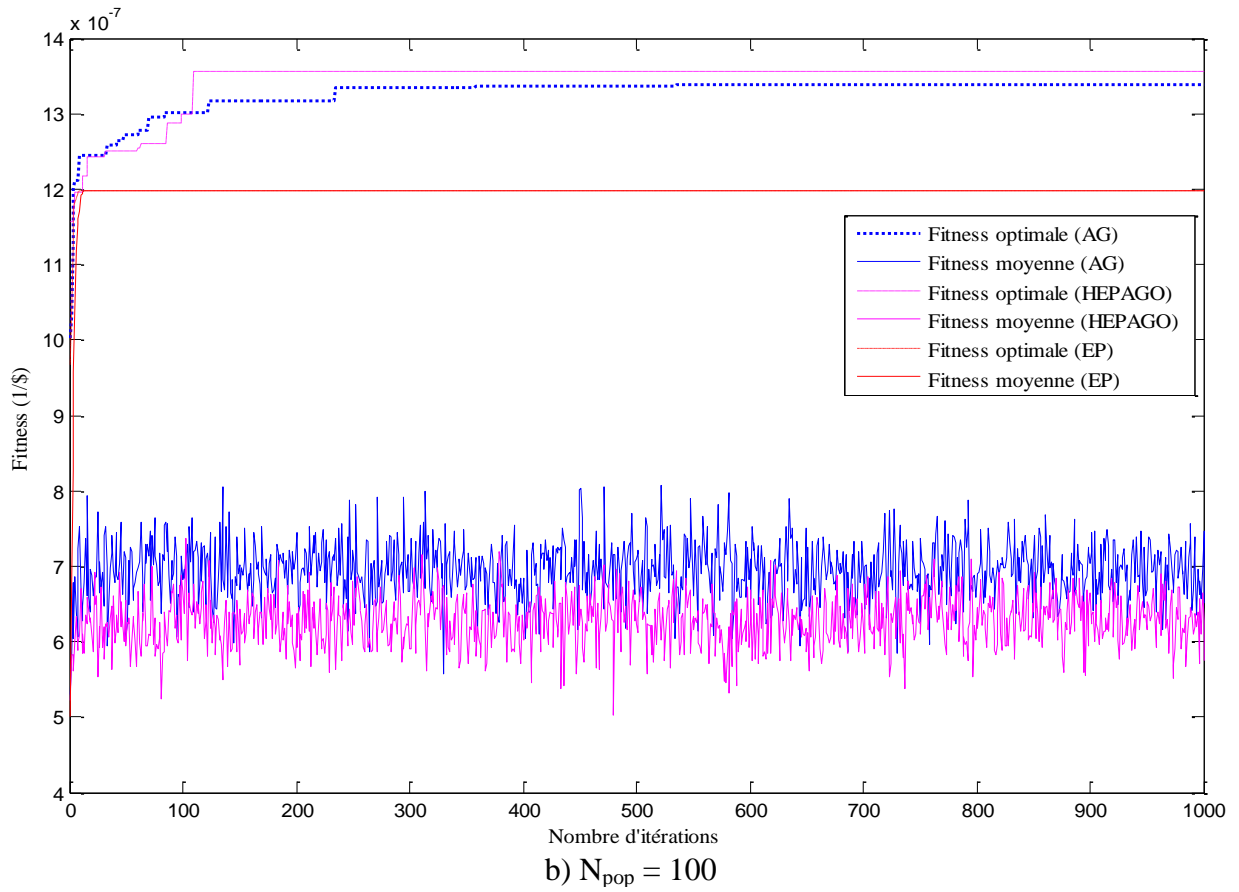
$$Fitness_{moyenne}(i) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{pop}} Fitness(k)}{N_{pop}} \quad (VI.1)$$

$N_{pop}$ : la taille de la population.

La figure VI.2 illustre les variations des valeurs de la fitness moyenne et la fitness optimale en fonction du nombre d'itérations obtenues par les techniques AG, EP et HEPAG, pour différentes tailles de population. Rappelons que la fitness moyenne est la somme des fitness partielles divisée par la taille de la population. Elle permet d'analyser la qualité de l'avancement de l'algorithme vers l'optimum global au cours des itérations.



a)  $N_{pop} = 10$



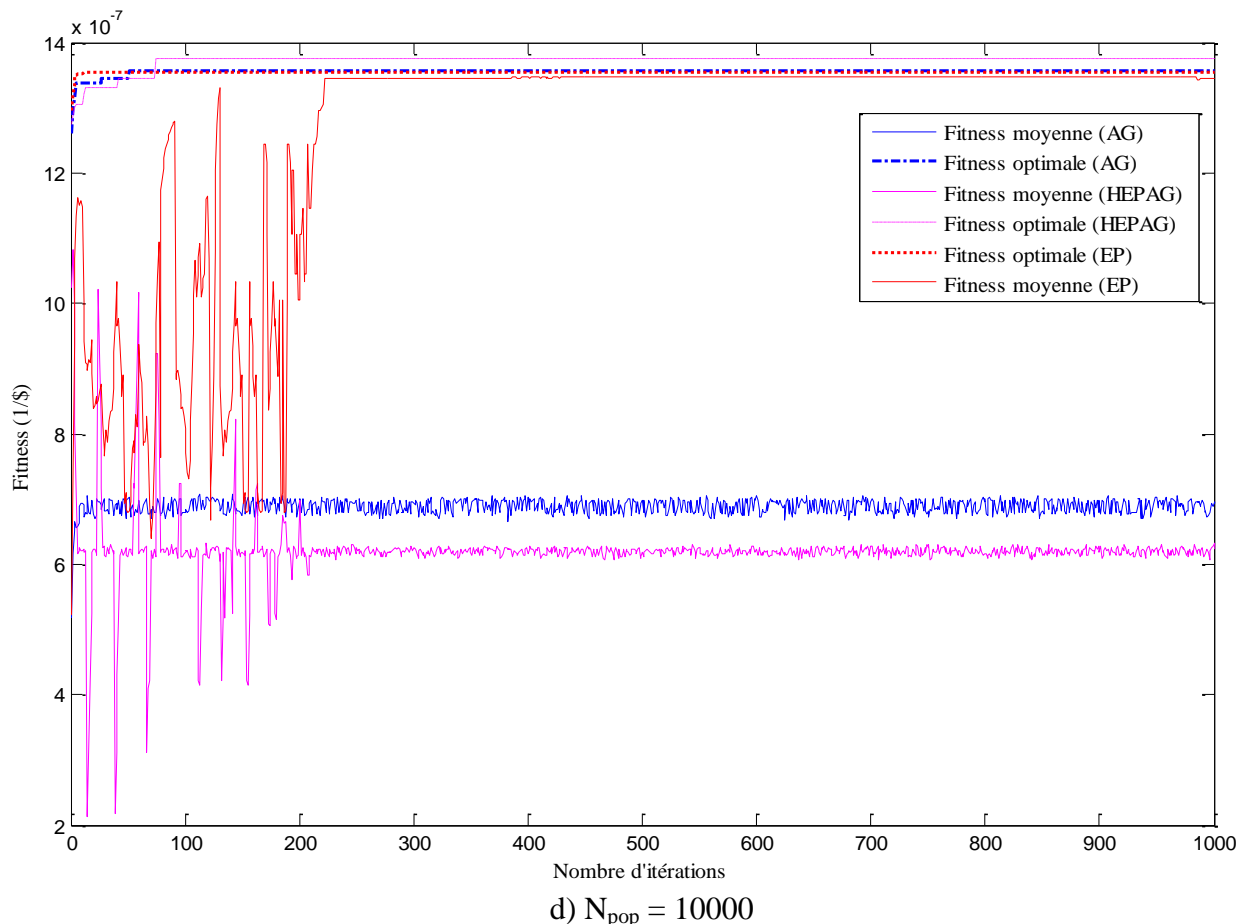


Figure VI.2: Fitness moyenne et fitness optimale en fonction du nombre d'itérations, pour différentes tailles de population

Pour les trois techniques AG, EP et HEPAG, la figure VI.2 montre que la fitness optimale augmente en général au cours des itérations. En outre, pour les différentes tailles de la population adoptées, l'HEPAG donne les valeurs les plus élevées de la fitness optimale.

Pour des faibles tailles de population, les courbes de la fitness moyenne obtenues notamment par l'AG et l'HEPAG sont oscillatoires, ce qui montre que les algorithmes incitent la recherche à explorer des nouvelles zones de l'espace de recherche (diversité de la population ou l'exploration). Alors que les courbes de la fitness moyenne obtenues par l'EP sont pratiquement confondues à celles de la fitness optimale ; il s'agit d'un problème de convergence prématuré.

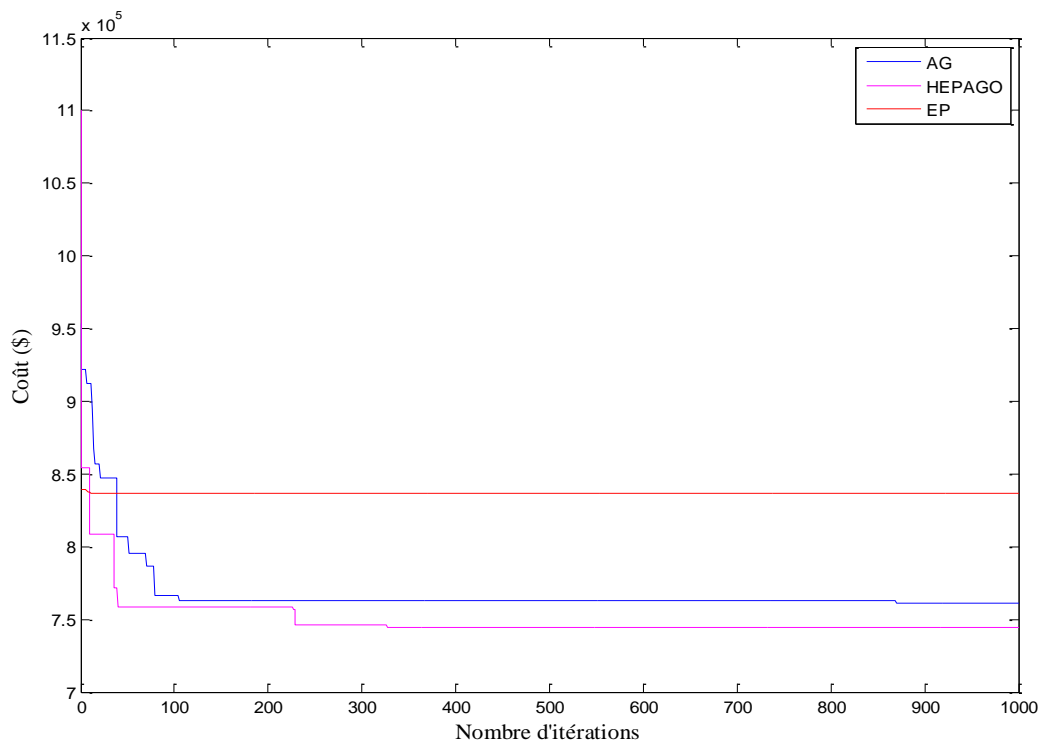
Nous remarquons aussi, d'après la même figure, qu'avec l'augmentation du nombre de population, l'algorithme hybride suit l'algorithme de l'essaim particulaire en favorisant l'exploration de l'espace de recherche lors des premières itérations (80 itérations pour  $N_{pop}$  égale à 1000 et 250 itérations pour  $N_{pop}$  égale à 10000). Par la suite et avec l'accroissement du nombre d'itérations, l'EP converge vers un optimum local, or l'HEPAG bénéficie de la

stratégie d'exploitation (donc l'intensification) favorisée par l'AG en se concentrant autour des meilleures solutions rencontrées, étant donné l'atténuation des oscillations.

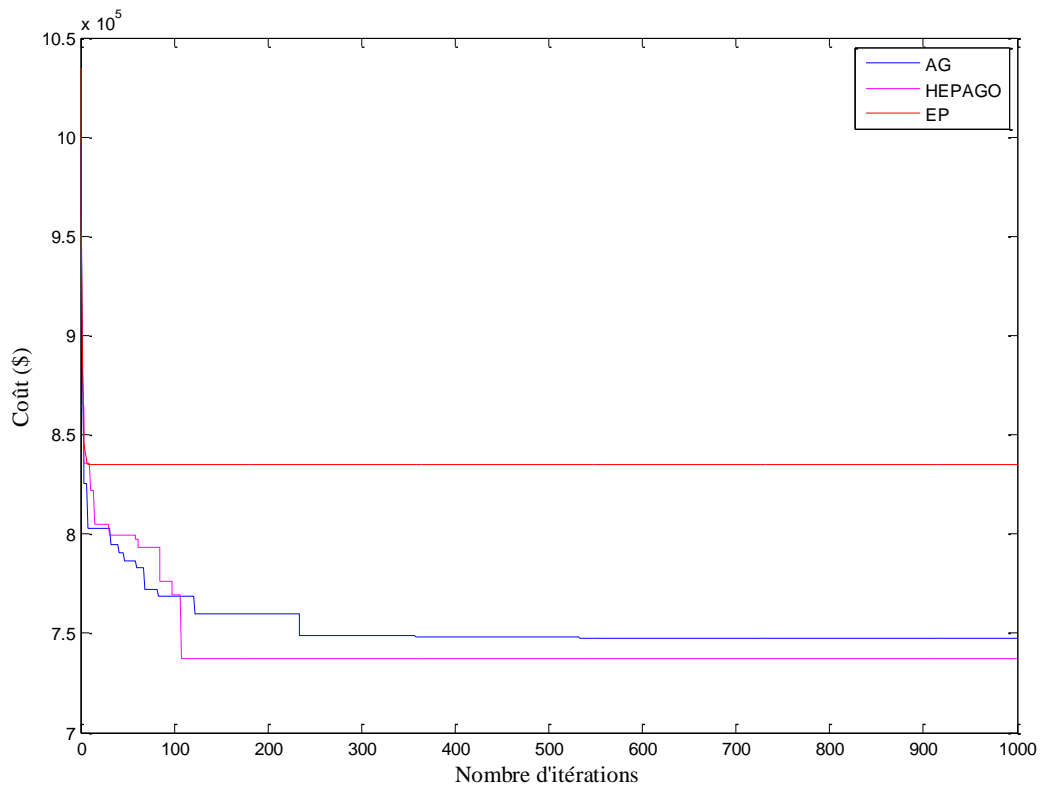
Par ailleurs, l'écart entre les caractéristiques de la fitness moyenne et celles de la fitness optimale obtenues dans les des algorithmes génétiques et hybride est important, ceci est expliqué par le fait que les algorithmes HEPAG et AG sont à la recherche d'un optimum global.

Contrairement à l'algorithme EP, le rapprochement de la fitness moyenne à celle optimale implique la convergence de cet algorithme vers un optimum local, étant donné la stagnation de la recherche de cette technique EP. En effet, la rapidité du flux d'information entre les particules, entraîne la création de particules similaires, ce qui augmente la possibilité de piéger la recherche autour d'un optimum local ; il s'agit d'une sous exploration de la recherche.

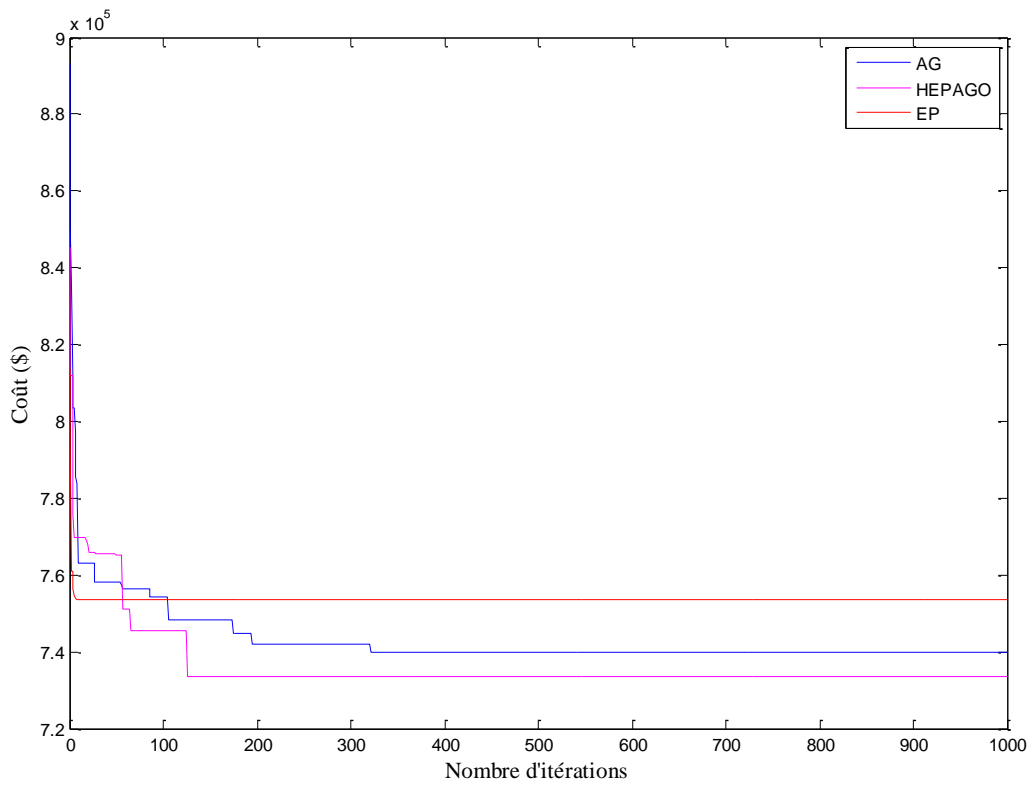
Sur la figure VI.3, nous présentons les courbes de convergence obtenues lors de l'exécution des programmes relatifs aux algorithmes EP, AG et HEPAG pour les différentes tailles de population à savoir 10, 100, 1000 et 10000. Une différence significative entre les caractéristiques des trois techniques est observée. La convergence pour l'EP est très rapide par rapport à celles trouvées par l'AG et l'HEPAG.



a)  $N_{pop} = 10$



b)  $N_{pop} = 100$



c)  $N_{pop} = 1000$



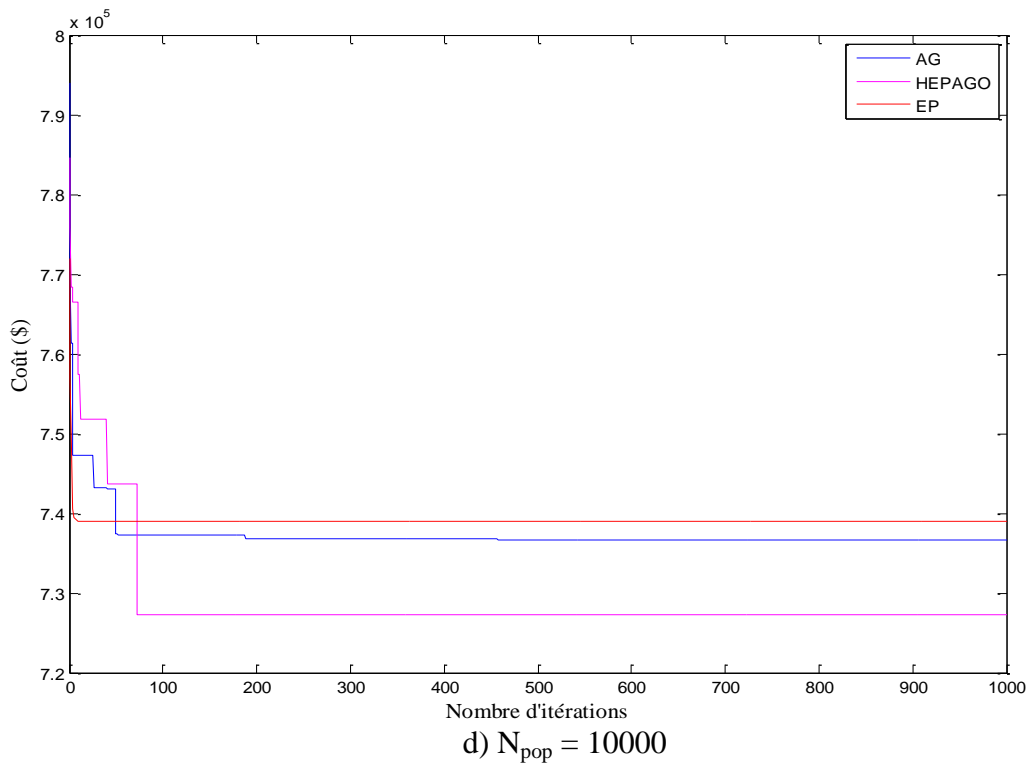
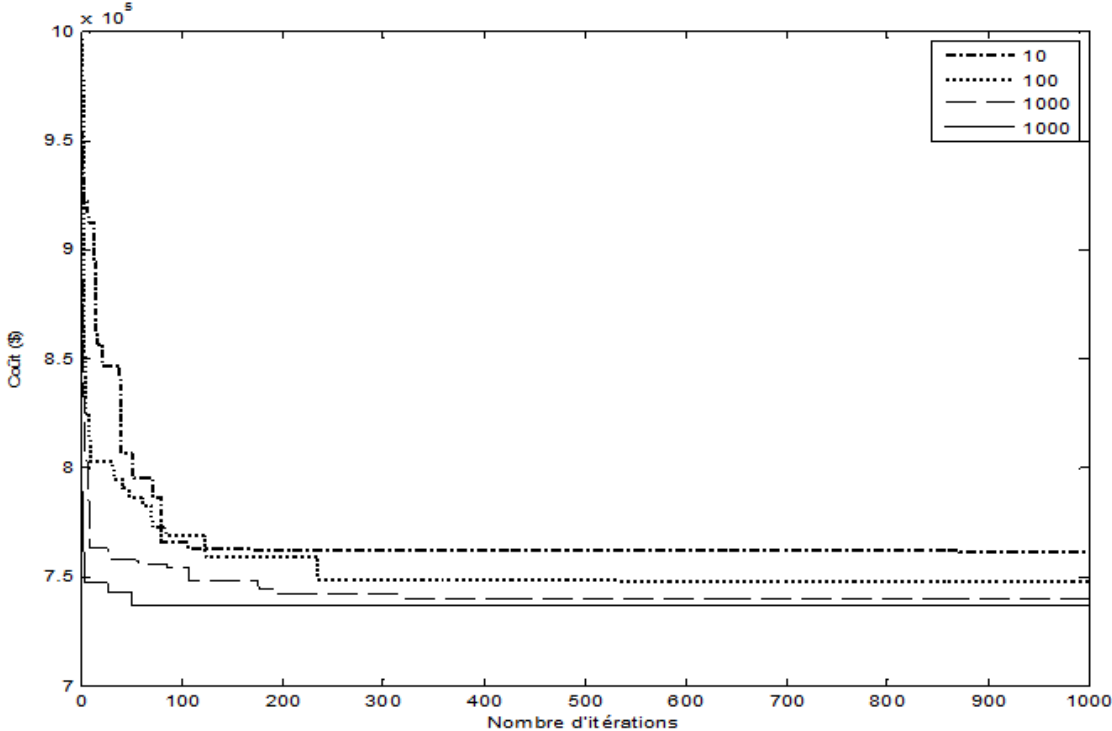


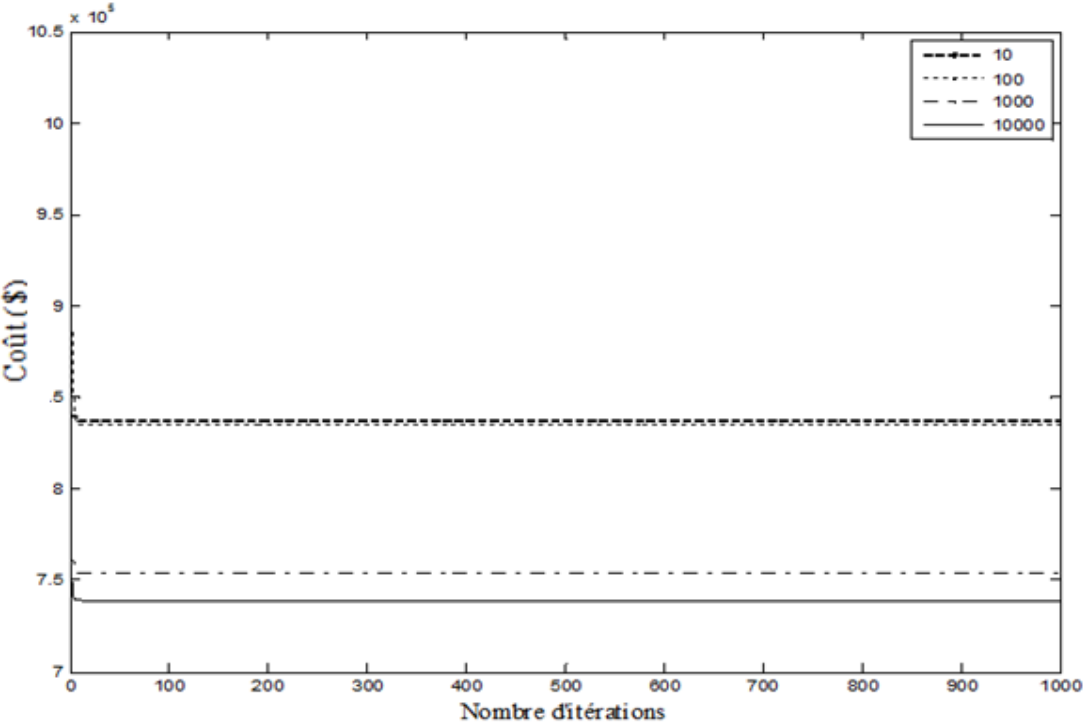
Figure VI.3: Courbe de convergence du coût en fonction du nombre d'itérations, pour différentes tailles de population

Contrairement à l'évolution de la fonction de fitness, celle du coût diminue brusquement puis lentement, en tendant vers un optimum. L'optimum obtenu lors de l'optimisation par l'algorithme hybride est le plus faible. Cet optimum pourrait être considéré comme étant global.

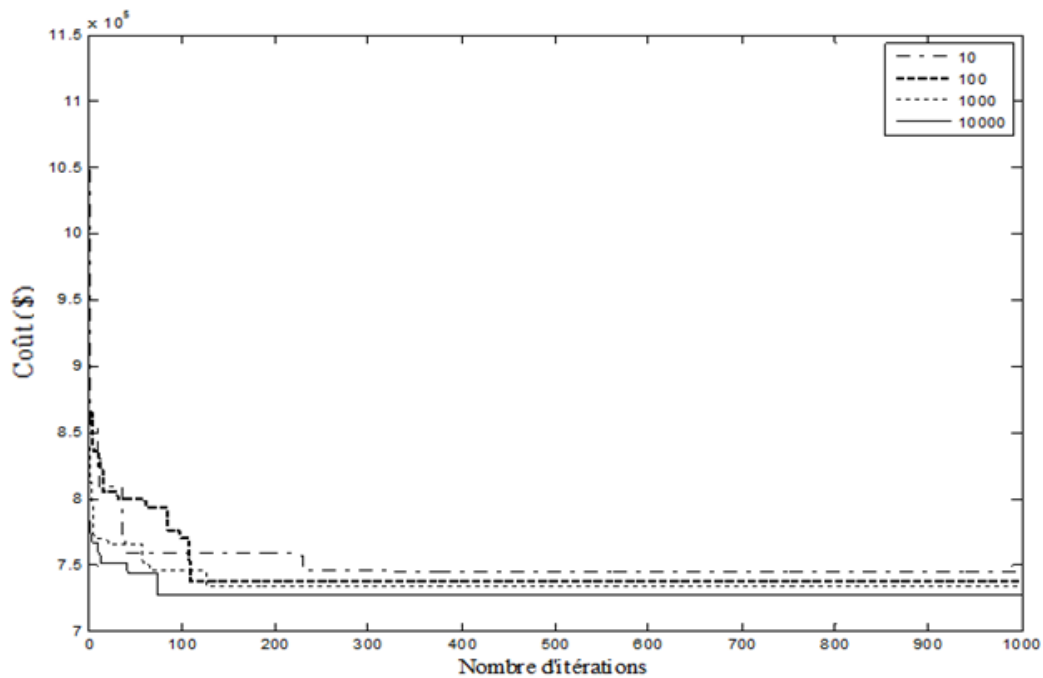
Pour chaque technique, la figure VI.4 représente la variation de la fonction de coût en fonction du nombre d'itérations pour différentes tailles de population (10, 100, 1000 et 10000).



a) AG



b) EP



c) HEPAG

Figure VI.4: Fonction de coût pour différentes techniques

Nous constatons à partir de cette figure, que l'augmentation de la taille de population entraîne à la fois la diminution du coût et l'écart entre les coûts des conceptions initiales et finales. De telles constatations sont valables pour toutes les techniques développées. En effet, plus la taille de la population est élevée, plus nous nous rapprochons de l'optimum. Ainsi, les performances (coût, convergence et l'écart entre les coûts de la conception initiale et celle finale) de la recherche s'améliorent avec l'augmentation de la taille de population.

Pour toutes les tailles de population, les différents paramètres de la conception initiale et optimale obtenus par les algorithmes sont présentés dans le tableau (VI.2). En outre, les valeurs du nombre de conducteurs, du diamètre des conducteurs, de la longueur des piquets, de la profondeur de la grille et de l'épaisseur de la couche superficielle appartiennent aux intervalles ([limite inférieure ; limite supérieure]) respectifs de leurs variations.

N <sub>pop</sub>	Paramètres	HEPAG		GA		EP	
		Initiale	optimale	Initiale	Optimale	Initiale	Optimale
10	N <sub>x</sub>	17	9	16	9	10	9
	N <sub>y</sub>	5	8	10	8	6	6
	h (m)	1,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5
	h <sub>s</sub> (m)	0,07	0,05	0,03	0,055	0,1	0,1
	L <sub>r</sub> (m)	6	3	3	3	6	3
	N <sub>r</sub>	14	17	10	15	20	10

	$d_c(m)$	0,011	0,013	0,010	0,013	0,013	0,010
	$d_r(m)$	0,012	0,010	0,010	0,013	0,013	0,010
	Coût (\$)	1100663	744490	970440	761121	870229	838140
	CPU time (s)	1,64	1,27	0,93	0,94	0,6	0,54
100	$N_x$	11	9	10	8	9	7
	$N_y$	11	7	5	7	8	7
	$h(m)$	0,8	0,6	1	0,6	0,6	1,2
	$h_s(m)$	0,05	0,06	0,12	0,065	0,08	0,06
	$L_r(m)$	6	6	6	6	3	3
	$N_r$	4	10	17	18	20	12
	$d_c(m)$	0,012	0,013	0,011	0,013	0,013	0,011
	$d_r(m)$	0,012	0,012	0,013	0,011	0,011	0,011
	Coût (\$)	978600	740016	963610	747484	864820	772810
	CPU time (s)	5,92	5,66	3,19	3,30	2,5	2,4
1000	$N_x$	10	8	11	8	9	8
	$N_y$	11	7	10	7	7	6
	$h(m)$	0,5	0,7	0,8	0,55	1,1	0,9
	$h_s(m)$	0,07	0,05	0,04	0,065	0,06	0,07
	$L_r(m)$	6	6	6	6	6	3
	$N_r$	4	20	10	7	18	20
	$d_c(m)$	0,013	0,013	0,010	0,013	0,013	0,011
	$d_r(m)$	0,012	0,010	0,010	0,012	0,012	0,012
	Coût (\$)	960000	739401	902200	739939	828000	757440
	CPU time (s)	53,96	53,21	31,20	31,07	21,3	20,01
10000	$N_x$	13	9	12	9	9	8
	$N_y$	9	7	6	7	7	6
	$h(m)$	0,7	0,6	0,8	0,45	1	0,6
	$h_s(m)$	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	$L_r(m)$	6	6	3	6	3	6
	$N_r$	10	20	15	18	20	14
	$d_c(m)$	0,013	0,013	0,013	0,013	0,011	0,012
	$d_r(m)$	0,010	0,012	0,010	0,010	0,013	0,010
	Coût (\$)	899770	722286	794320	736703	776580	739750
	CPU time (s)	889,46	889,93	689,62	689,06	170	165

Tableau VI.2: Paramètres optimaux obtenus lors de l'optimisation par EP, AG et HEPAG

Pour toutes les tailles de population, nous remarquons que l'algorithme hybride (HEPAG) présente les conceptions ayant les plus faibles coûts relativement à celles des autres algorithmes. Il est important de noter que l'augmentation de la taille de la population améliore l'optimalité. Ainsi, le coût donné pour la population de 10000, égal à 722286 \$, est le plus faible.

Les paramètres mentionnés dans le tableau VI.2 précédent nous ont permis de dessiner en 3D les topologies optimisées et présentées sur la figure VI.5. Ces topologies correspondent à la taille de population la plus élevées. De tels réseaux de terre sont constitués de conducteurs horizontaux et des piquets. En outre, les valeurs du diamètre des conducteurs et de l'épaisseur de la couche du gravier correspondent toujours aux limites inférieures de leurs intervalles de variations respectifs.

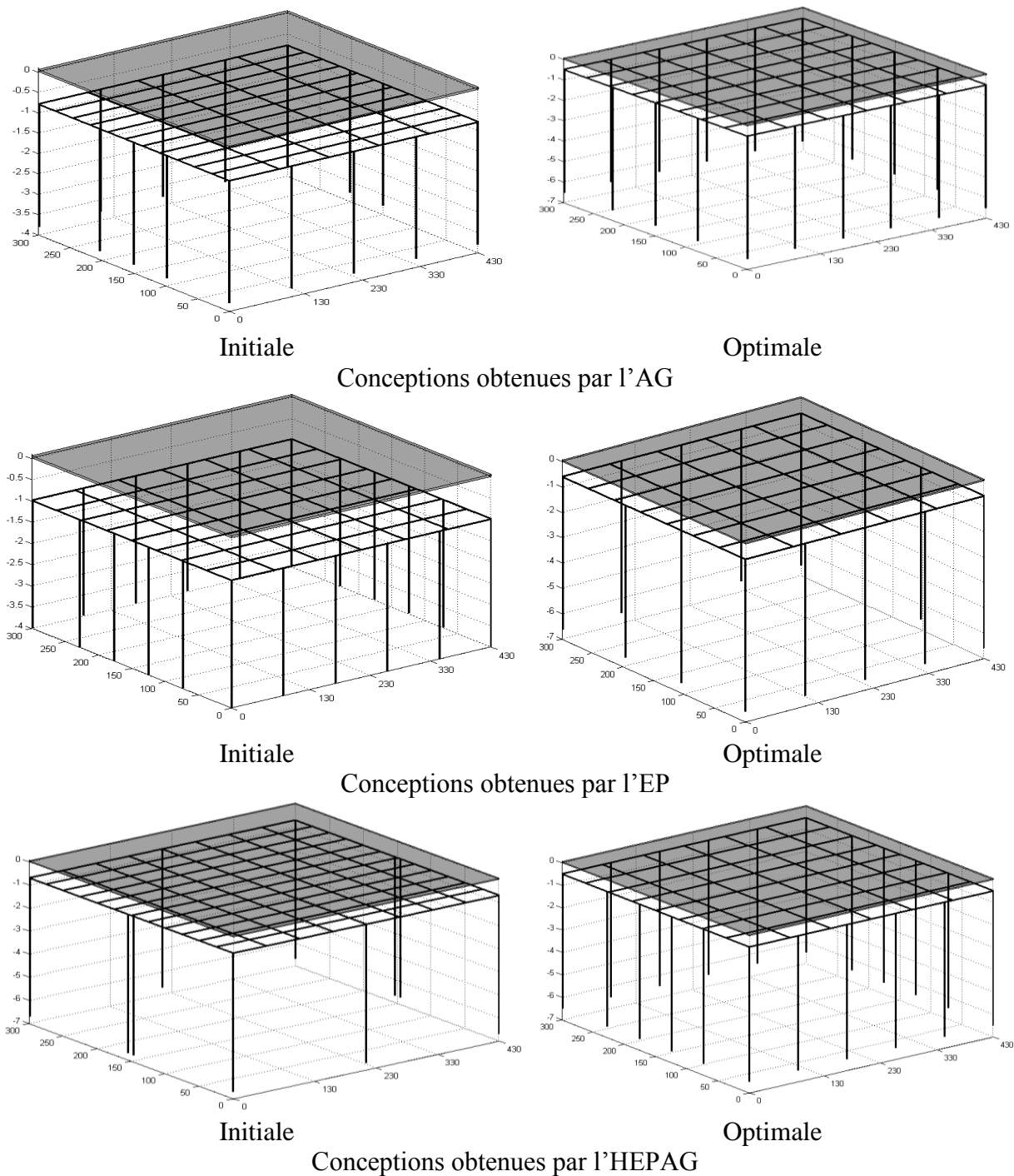


Figure VI.5: Topologies de la grille obtenues pour une taille de population de 10000

Pour les différentes tailles de population, les algorithmes AG, EP et HEPAG nous ont permis d'obtenir les paramètres de sécurité électriques relatifs aux tensions de contact et de pas et à la résistance de la grille de terre pour les configurations optimales. Les résultats ainsi trouvés sont présentés dans le tableau VI.3. Ce dernier montre que la tension de pas, celle de contact et la résistance de la grille sont largement inférieures à celles admissibles respectives (recommandées par la norme IEEE Std. 80-2000).

$N_{pop}$	Méthode	$R_g$ ( $\Omega$ )	GPR (V)	$V_{touch70}$ (V)	$V_t$ (V)	$V_{step70}$ (V)	$V_s$ (V)
10	HEPAG	0.068	1024	588	463	1687	98
	AG	0.068	1024	588	464	1687	98
	EP	0.070	1043	691	526	2101	105
100	HEPAG	0.069	1039	617	477	1802	100
	AG	0.0698	1039	617	512	1802	86
	EP	0.070	1044	617	512	1802	46
1000	HEPAG	0.069	1039	617	490	1802	74
	AG	0.0697	1038	617	512	1802	85
	EP	0.070	1048	640	508	1896	59
10000	HEPAG	0.069	1039	588	462	1687	83
	AG	0.0692	1031	588	494	1687	99
	EP	0.070	1050	640	516	1896	87

Tableau VI.3: Valeurs optimales des principaux paramètres électriques

## VI.5. Utilisation de CYMGrd - Validation des résultats

Le code de calcul CYMGrd est un programme d'analyse et de conception d'installations efficaces de mise à la terre. Il a été développé pour aider les ingénieurs à concevoir leurs nouvelles grilles et à renforcer les grilles de toute géométrie déjà existantes. Ce code de calcul permet d'analyser rapidement les différentes alternatives de conception et de choisir la solution la plus économique pour n'importe quelle installation donnée. Le programme répond aux normes IEEE Std. 80-2000, IEEE Std. 81-1983 [CYM06].

En introduisant, pour chaque technique, les paramètres relatifs à la topologie du réseau de terre optimisée à savoir, les valeurs optimales des 8 variables, ainsi que celles de la durée du défaut, du facteur de division du courant, de la résistivité du sol et de la résistivité de la superficie du site dans le code de calcul CYMGrd, nous avons pu obtenir, pour la configuration optimale de population de 10000, les principales grandeurs électriques de sécurité présentées dans le tableau VI.4.

$N_{pop}$	Méthode	$R_g$ ( $\Omega$ )	GPR (V)	$V_{touch70}$ (V)	$V_t$ (V)	$V_{step70}$ (V)	$V_s$ (V)
10000	HEPAG	0,069	1039	588	462	1687	83
	CYMGrd	0,071	1082	588	490	1687	66
	AG	0,0692	1031	588	494	1687	99
	CYMGrd	0,073	1102	588	500	1687	75
	EP	0,070	1050	640	516	1896	87
	CYMGrd	0,075	1143	588	540	1687	65

Tableau VI.4: Comparaison des principaux paramètres électriques, pour une taille de population de 10000

En confrontant les résultats obtenus lors de l'optimisation par HEPAG, EP et AG à ceux trouvés en utilisant CYMGrd, les valeurs des tensions de pas et de contact admissibles obtenues à l'aide du CYMGrd sont exactement les mêmes que celles que nous avons trouvées. Ceci est évident, car le code de calcul CYMGrd repose sur la norme IEEE Std. 80-2000. Par ailleurs, les tensions de pas et de contact actuelles sont très proches.

La figure VI.6 présente respectivement les diagrammes de profil de la tension de contact obtenus à la fois par CYMGrd et les techniques d'optimisation pour les conceptions optimales; la taille de population considérée pour cette figure étant égale à 1000. Nous remarquons que les formes des courbes de profil de tension de contact obtenues par CYMGrd et celles par les algorithmes d'optimisation sont pratiquement similaires.

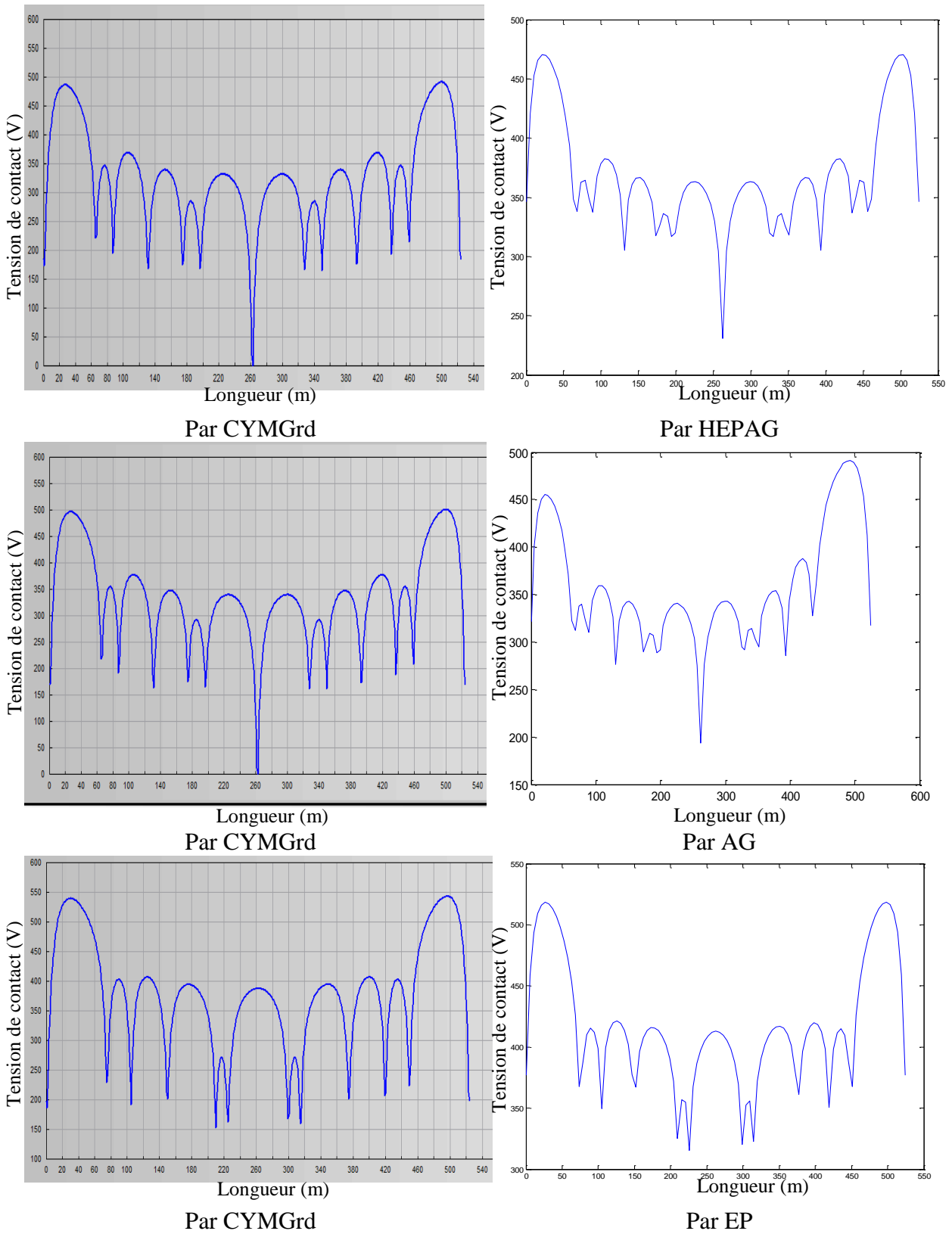


Figure VI.6: Profils de tension de contact pour les conceptions optimales, pour une taille de population de 10000



Bien que la tension de contact pour chaque conception atteigne au niveau des coins une valeur importante, elle reste très inférieure à celle admissible maximale ; la topologie ainsi proposée est largement sécurisé.

## VI.6. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre consiste en la recherche des paramètres optimaux correspondant à un coût minimum d'un réseau de terre, en satisfaisant les restrictions de sûreté des personnes et de matériels imposées par la norme IEEE Std. 80-2000. Nous nous sommes intéressés, dans ce rapport, à optimiser le réseau de terre de l'ouvrage énergétique de Labreg (situé à la wilaya de Khenchela). Pour cela, trois méthodes d'optimisation basées sur l'essaim particulaire (EP), l'algorithme génétique (AG) et un algorithme hybride EP-AG (noté HEPAG) ont été développées. Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- L'augmentation de la taille de la population améliore une telle optimalité. Ainsi, les topologies les plus optimales correspondent à la taille de population la plus élevées.
- L'augmentation de la fitness au cours des itérations traduit l'avancement vers un optimum. Les valeurs de cette fitness les plus élevées sont obtenues lors de l'optimisation par HEPAG ; l'optimum ainsi trouvé pourrait être global.
- L'EP augmente la capacité d'exploitation (problème de la convergence vers un optimum local) pour des faibles tailles de population, cela explique le rapprochement de la fitness moyenne à celle optimale. Or pour des tailles de population importantes, la fitness moyenne présente des oscillations durant la première centaine d'itérations, avant de se rapprocher de la fitness optimale. Cela traduit par l'augmentation de la capacité d'exploration.
- Les oscillations de la fitness moyenne obtenues par AG, EP et HEPAG traduisent l'exploration comme stratégie de recherche favorisée par l'algorithme.
- L'écart important est enregistré entre les fitness moyennes et celles optimales obtenues lors de l'optimisation par AG et HEPAG, ce qui traduit la recherche d'un optimum global.
- La fonction de coût diminue brusquement puis lentement, en tendant vers un optimum. L'optimum le plus faible qui pourrait être global est obtenu lors de l'optimisation par HEPAG.

- L'approche hybride est prometteuse du moment qu'elle combine les stratégies d'exploration et d'exploitation favorisée respectivement par l'EP et par l'AG dans l'espace de recherche.
- Les méthodes méta-heuristiques permettent la détermination des SMALT à la fois efficaces et économiques (donc optimaux).
- Pour toutes les configurations optimales, les paramètres électriques relatifs aux tensions de contact et de pas et à la résistance de la grille de terre que nous avons obtenus sont largement inférieurs à ceux admissibles respectifs. Par ailleurs, étant les tensions de contact, présentant des valeurs élevées notamment aux niveaux des coins, restent très inférieures à celles admissibles maximales.
- Les valeurs des tensions de pas et de contact admissibles obtenues à l'aide du code de calcul CYMGrd sont exactement les mêmes que celles que nous avons trouvées lors de nos optimisations. Les tensions de pas et de contact actuelles sont très proches.
- Les configurations des SMALT que nous avons proposées sont économiques et amplement sécurisées.

# *Conclusion générale*

L'objectif principal de ce travail consiste à optimiser les systèmes de mise à la terre de l'ouvrage énergétique de Labreg situé à la wilaya de Khenchela, du poste de transformation 60/30 kV d'Ain El-Melh situé à la wilaya de M'Sila et du poste de transformation de Bir-Khadem situé à la wilaya d'Alger. En effet, pour chaque système de mise à la terre, l'optimisation a été effectuée en minimisant la fonction objectif de coût en se basant sur une décision optimale de ses paramètres géométriques et de construction conformément aux restrictions de sécurité exigées par IEEE Std. 80-2000. Nous avons proposé en fait une nouvelle fonction de coût comportant le nombre de conducteurs suivant (x) et (y) ainsi que leur diamètre, la profondeur de la grille, le nombre et la longueur des piquets, la superficie totale de l'excavation et de revêtement, et finalement les contraintes sur les tensions de pas et de contact. Les contraintes ont été introduites dans la fonction objectif en termes de pénalité.

Pour effectuer une telle optimisation, trois techniques méta-heuristiques ont été développées en se basant sur un algorithme génétique (AG), un essaim particulaire (EP) et une hybridation EP-AG.

Les principaux opérateurs à savoir le croisement, la mutation et la sélection ont été considérés dans l'AG établi. Nous avons opté pour un croisement à un point de coupure et une probabilité de croisement de 0,9 afin de favoriser la recombinaison des individus. La probabilité de mutation a été choisie égale à 0,15 ; une valeur élevée peut rendre la recherche de l'algorithme aléatoire et une valeur très faible rendra impossible l'extraction des optima locaux. Finalement, la sélection a été faite selon la roue de fortune classique sur laquelle chaque individu de la population se voit attribuer une probabilité d'être choisi égale à sa fitness divisée par la fitness totale.

Dans l'EP, les particules se déplacent en prenant en compte non seulement leur meilleure position, mais aussi celle de son voisinage. Les arrangements des principaux paramètres, à savoir le facteur d'inertie et les coefficients de confiance (ou d'accélération),

déterminent en fait les orientations de recherche de l'optimum dans l'espace de recherche. Le facteur d'inertie a été choisi entre 0,8 et 1,2. Les coefficients de confiance ont été adaptés avec le temps.

Basée sur les avantages de deux techniques précédemment citées, une troisième et nouvelle stratégie d'hybridation (HEPAG) des essais particuliers et des algorithmes génétiques a été également développée. En fait, la technique HEPAG initie un espace de recherche par une population des particules dont la position est codé en binaire. Chaque particule se déplace dans l'espace de recherche suivant deux mouvements ; l'un utilise la vitesse et la position de l'EP et l'autre emploie les opérateurs de l'AG (mutation, croisement et sélection). Enfin, la particule optimale sera sélectionnée dans la suivante génération.

Les optimisations utilisant les trois techniques (EP, AG et HEPAG) ont été réalisées pour différentes tailles de population. Par ailleurs, le critère d'arrêt adopté dans cette étude consiste en le nombre d'itérations. Après plusieurs essais, nous avons fixé, pour toutes les applications, le nombre d'itérations équivalent à 1000. Ceci permet d'assurer la convergence des trois techniques. Une étude comparative entre les résultats des différentes techniques (EP, AG et HEPAG) a été effectuée. De plus, certains de nos résultats ont été validés en les confortant à ceux obtenus en utilisant le code de calcul CYMGrd.

Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- L'approche hybride tente d'aboutir à un bon équilibre entre l'exploration (favorisée par l'EP) et l'exploitation (favorisée par l'AG) dans l'espace de recherche. Pour les grandes tailles de population, l'HEPAG favorise l'exploration (respectivement l'exploitation) pour les nombres faibles (respectivement élevés) d'itérations.
- La fitness optimale augmente en général au cours des itérations, ce qui résulte un avancement rapide vers l'optimum global. Ceci est valable pour les trois techniques et pour les toutes les tailles de la population adoptées. Les valeurs de cette fitness les plus élevées sont obtenues lors de l'optimisation par HEPAG.
- Etant donné la stratégie d'exploration des algorithmes AG et HEPAG tendant à chercher un optimum global, les fitness moyennes obtenues sont oscillatoires pour toutes les tailles de populations adoptées. Cette fitness est oscillatoire uniquement pour les tailles importantes de population lors de l'application de l'algorithme EP. Ce dernier utilise la stratégie d'exploitation dans le cas de faibles tailles de population.

- Pour les faibles tailles de population (10 et 100), les fitness moyennes obtenues lors de l'application de l'EP sont pratiquement confondues à celles optimales. Pour les tailles élevées (1000 et 10000), la fitness moyenne présente des oscillations avant de se rapprocher de la fitness optimale. Le rapprochement de la fitness moyenne à celle optimale traduit la convergence de l'algorithme vers un optimum local.
- Lors de l'optimisation par AG et HEPAG, un écart important est enregistré entre les fitness moyennes et celles optimales ; ces algorithmes sont à la recherche d'un optimum global.
- La fonction de coût diminue brusquement puis lentement, en tendant vers un optimum. L'optimum obtenu lors de l'optimisation par HEPAG est le plus faible qui pourrait être considéré global. L'augmentation de la taille de la population améliore une telle optimalité. Ainsi, les topologies les plus optimales correspondent à la taille de population les plus élevées.
- Pour toutes les tailles de population et les techniques élaborées, les valeurs électriques relatives aux tensions de contact et de pas et à la résistance de la grille de terre que nous avons obtenues pour les configurations optimales sont largement inférieures à celles admissibles. Par ailleurs, les tensions de contact aux niveaux des coins des topologies que nous avons proposées, restent très inférieures à celles admissibles maximales. Par voie de conséquence, de telles topologies sont économiques et largement sécurisées.
- Les valeurs des tensions de pas et de contact admissibles que nous avons obtenues coïncident parfaitement avec celles trouvées en utilisant le code de calcul CYMGrd, au moment où les tensions de pas et de contact actuelles sont très proches.

# Bibliographie

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

[ALI 15] B. Alik, M. Tegar & A. Mekhaldi, "Minimization of Grounding System Cost Using PSO, GAO, and HPSGAO Techniques", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 30, No. 6, pp. 2561-2569, Jun.2015.

[ALI 14] B. Alik, M. Tegar and A. Mekhaldi, "Optimization of Grounding System of 60/30 kV Substation of Ain El-Melh using Particle Swarm," in *Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electrique au Maghreb (CISTEM)*, pp. 652-659,3-5, Nov. 2014.

[AND 01] G. Andal Jayalakshmi , S. Sathiamoorthy & R. Rajaram, "A Hybrid Genetic Algorithm - A New Approach to Solve Traveling Salesman Problem", *International Journal of Computational Engineering Science*, Sahana S.K, Vol. 02, Issue 02, pp. 339–355, 2001.

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

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

[BEN 13] N. Bendekkiche & Y. Kemari, "Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Mise à la Terre par Algorithme Génétique & Essaim Particulaire", *Projet de Fin d'Etudes*, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2013.

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

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

[BON 08] M. Bonnefoy & P. Lepeut, "Risques Physiques : Les Schémas de Liaisons à la Terre ou Les régimes des neutres", 2008, [www.cnam.fr/physique/.../LES\\_REGIMES\\_DES\\_NEUTRES\\_2008\\_JJB.pdf](http://www.cnam.fr/physique/.../LES_REGIMES_DES_NEUTRES_2008_JJB.pdf)

[BOU93] B. Bouyssou, D. Roy, "Aide multicritère à la décision : méthodes et cas", *Economica*, 1993.

[BUR 00] E. K. Burke & A. J. Smith, "Hybrid Evolutionary Techniques for the Maintenance Scheduling Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 1 No 1, pp. 122-128, 2000.

## Bibliographie

---

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

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

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

[CHO 98] C. Chou, "Optimal design of large grounding grids based on simulated annealing method," Chung Yuan Journal, vol. 26, No 3, pp.77-85, 1998.

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

[COL 02] Y. Collette, P. Siarry, Optimisation multi-objectif. [éd.] Eyrolles. 2212111681.

[CON 02] Conradie, R. Miikkulainen & C. Aldrich, "Intelligent Process Control Utilizing Symbiotic Memetic Neuro-Evolution", Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Honolulu, Hawaii, pp. 623-628, 12-7, May. 2002.

[COT 98] C. Cotta, "A study of Hybridization Techniques and their Application to the Design of Evolutionary Algorithms", AI Communications, Vol. 11, No 3-4, pp.223–224, 1998.

[COV 05] A. Covitti, G. Delvecchio, A. Fusco, F. Lerariand, F. Neri, "Two Cascade Genetic Algorithms to Optimize Unequally Spaced Grounding Grids with Rods", Proc. Int. Conf. Computer as a Tool, EUROCON, 2, Belgrade, Serbia & Montenegro, pp.1533-1536, Nov. 2005.

[CYM 06] CYMGRD 6.3, "User's Guide And Reference Manual", Manuel d'utilisation, Copyright CYME International T&D Inc., Oct. 2006.

[DAV 91] L. Davis, Handbook on Genetic Algorithms, vol. 1. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

[DAW 79] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, "Parametric analysis of grounding grids", IEEE Trans. PAS, Vol. 98, No-5, pp. 1659-1668, Oct. 1979.

[DRO 03] J. Dréo, A. Pérowski, P. Siarry, and E. Taillard. "Méta-heuristiques pour l'Optimisation Difficile", Eyrolles, 2003.

[EDF 59] EDF (Electricité De France), "La mise à la terre du neutre des réseaux MT aériens et souterrains", Electricité de France, Centre de Normalisation, H 80, Avr. 1959.

[EDF 84] EDF (Electricité De France), "Principes de conception et de réalisation des mises à la terre", Electricité de France, Centre de Normalisation, H 115, Jan. 1984.

- [ELD 12] A. El Dor, "Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d'images et en électronique", Thèse de doctorat, ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES ET STIC, UNIVERSITÉ PARIS-EST, France, 2012.
- [ELF 13] El-Fergany, "Accelerated particle swarm optimization-based approach to the optimal design of substation grounding grid", *Przeegląd Elektrotechniczny*, Poland, R. 89 No. 7, pp. 30-34, 2013.
- [EJD 11] M. Ejday, "Optimisation Multi-Objectifs à base de Métamodèle pour les procédés de mise en forme". Thèse de doctorat, École des MINES ParisTech, p. 136, Fra. 2011.
- [FRA 10] D. FRANK PETRUZELLA, "Electric Motors and Control Systems", higher education, first edition, 2010.
- [GAR 11] G. Gary Gilbert, "High voltage grounding systems", Ph.D. dissertation, Univ. Waterloo Ontario, Canada, 2011.
- [GEN 14] Genetti, graviers et bétons (Prix entreprises). [Online]. Available: [www.genetti.ch](http://www.genetti.ch), 2014.
- [GIO 85] Giordano R., Mark D. A., Rotkowski C. J., Schalland B., Sommer K. O., "Computer assisted design of substation grounding", *IEEE Trans. PAS*, 104, (7), pp. 1864-1867, Jul.1985.
- [GIL 11] G. Gilbert, Y.L. Chow, & D.E. Bouchard, "Optimization of high voltage substations using a random walk technique", *IEEE PES 12th Int. Conf. Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO)*, Providence, Rhode Island, USA, pp. 1-7, May. 2011.
- [GOH 07] S. Ghoneim, H. Hirsch, A. Elmorshedy, & R. Amer, "Optimum grounding grid design by using an evolutionary algorithm," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, Florida, USA, pp.1-7, 24-28, Jun. 2007.
- [GEO 01] S. Georges, "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, Sep. 2001.
- [GLO 86] F. Glover, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", *Computers and Operations Research*, Vol. 13, pp. 533-549, 1986.
- [GOH 07] S. Ghoneim, H. Hirsch, A. Elmorshedy, & R. Amer, "Optimum grounding grid design by using an evolutionary algorithm," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, Florida, USA, pp.1-7, 24-28, Jun. 2007.
- [HAJ 03] O. Hajji, "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, Déc. 2003.



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

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

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

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

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

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

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

[KLA 07] Klajn A. & Markiewicz H., "Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre", Leonardo Energy, France, Aoû. 2007. [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org)

[LEE 08] K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, "Modern heuristic optimization techniques with applications to power systems", IEEE Power Engineering Society -Wiley-IEEE Press, New York, USA, 2008.

[LEE 09] C. Y. Lee, Y. X. Shen, "Optimal planning of ground grid based on particle swam algorithm", World Academy of Sci. Eng. and Technol., Vol. 36, pp. 30-37, 2009.

[LEF 07] M. Lefouili, "Caractérisation Numérique d'une Prise de Terre à Géométrie Complexes", Thèse de Doctorat, Département d'Electrotechnique, Université de Ferhat Abbas, Setif, Jui. 2007.

[JUA 04] C. Juang, "A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for recurrent network design", IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part b: cybernetics, vol. 34, pp. 997-1006, 2004.

[QIA 14] Z. Qianzhi and W. Xuan, "Software Development of Optimal Substation Ground Grid Design Based on Genetic Algorithm and Pattern Search", IEEE Conf. Pub., North American Power Symposium (NAPS), Pullman, WA, pp 1- 6, 7-9 Sept. 2014 .

- [LIA 08] Z. Lian, X. Gu, B. Jiao, "A novel particle swarm optimization algorithm for permutation flow-shop scheduling to minimize makespan", *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 35, No 5, 851-861, 2008.
- [MAU 14] C. Maurice, S. Patrick "Swarm Intelligence Based Optimization", First international conference, ICSIBO2014, Mulhouse, France, pp. 51-60, May. 13-14, 2014
- [MEZ 10] H.E. Mezhoudi, "Résolution du problème d'affectation de fréquence dynamique en utilisant un algorithme basé sur le comportement des abeilles", 2010.
- [MEZU 10] E. Mezura-Montes, M. Damián-Araoz, and O. Cetina-Domínguez, " Smart Flight and Dynamic Tolerances in the Artificial Bee Colony for Constrained Optimization", Sep. 2010.
- [MOU 12] S. Mouassa, "Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode méta-heuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS", Magister, Département Génie Electrique, UNIVERSITE Ferhat ABBAS SETIF, Algérie, 2012.
- [NEZ 13] N. K. Nezhad, M. H. Fallahi, M. G. Dozein, « An optimal design of substation grounding grid considering economic aspects using particle swarm optimization », *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, Vol. 6, No. 12, pp. 2159-2165, 2013.
- [NUZ 09] N. J. P. Nzuru, "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, Fév. 2009.
- [NZU 09] N. J. P. Nzuru, "Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales", Ph.D. Thesis, Belgique, Liège University, Fév. 2009.
- [NEZ13] N. K. Nezhad, M. G. Fallahi, "An optimal design of substation grounding grid considering economic aspects using particle swarm optimization", *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, Vol. 6, Issue 12, pp. 2159-2165, Jul. 2013.
- [OTH 98] I. Othman, "Optimisation multicritère : fondements et concepts", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenobles. p. 118, Grenoble, 1998.
- [PIE 14] L. PIERRAT, "Performance Assessment and Modeling of Grounding Grid", *Université Bulletin-ISSUE No.16- Vol. (1)*, Février, 2014.
- [PRE 05] C. Prévé, "Les Réseaux Electriques Industriels1", Hermes Science, Lavoisier, ISBN 2-7462- 1102-5, Paris, 2005.
- [RAO 09] S. Rao, "Engineering Optimization: Theory and Practice", Singiresu Press, Inc Copyright ©, 4nd edition, 2009.
- [ROB02] J. Robinson, S. Sinton, Y.R. Samii, "Particle swarm, genetic algorithm, and their hybrids: optimization of a profiled corrugated horn antenna", in *Proc. of the IEEE*

International Symposium in Antennas and Propagation Society, San Antonio, TX, USA, Vol. 01, pp. 314–317, 2002.

[ROY 10] S. Roya, S. H. Hesamedin, R. Moini "A Hybrid Genetic- Simulated Annealing Algorithm for Optimal Design of Grounding Grids with Rods", IEEE Trans. PAS, Vol. 49, No 4, pp. 1883-1889, Jul. 2010.

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

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

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

[SHI 98] Y. Shi, R. Eberhart "A modified particle swarm optimizer" Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence, The 1998 IEEE International Conference, Anchorage, AK , pp. 69 - 73 4-9 May 1998.

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

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

[TAL 07] E. G. Talbi, S. Cahon & N. Melab, "Designing cellular networks using a parallel hybrid metaheuristic", Journal of Computer Communications Vol. 30, No 4, pp. 698-713, 2007.

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

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

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

[VAN04] F. Van den Bergh, A. P. Engelbrecht "A Cooperative approach to particle swarm optimization" IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 8, No.3, pp. 225 – 239 Jun.2004.

## *Bibliographie*

---

[VYA12] Vyas A. and Jamnani J. G., "Development of IEEE complaint software 'economical substation grounding system designer' using matlab gui development environment", in International Journal on Electrical Engineering and Informatics. Vol. 4, No. 2, pp. 335-345, July 2012.

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

[YEN08] G. G. Yen and L. W-F, "PSO-based multiobjective optimization with dynamic population size and adaptive local archives", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 38, no. 5, pp. 1270 –1293, Oct. 2008.

[YIM09] Y. Yi-min, P. Min-fang, H. Hai-Taoand, Y. Yue-Hua, "Optimal Design of Grounding Grids Based on Genetic Algorithm", Proc. Int. Conf. Genetic and Evolutionary, Guilin, Chine, pp. 129-132, Oct.2009.

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