



**Contribution au développement des nouvelles méthodes de mise à la terre
(MALT) basées sur l'utilisation des bétons et/ou géopolymères électriquement
conducteurs**

**Par
Mouna Daadaa**

**Sous la direction de Prof., ing., Ph.D. Christophe Volat directeur et Prof., ing.,
Ph.D. Stephan Brettschneider codirecteur**

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention
du grade de Maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.) en ingénierie**

Québec, Canada

© Mouna Daadaa, 2024

RÉSUMÉ

Ce mémoire explore le développement de nouvelles méthodes de mise à la terre, en particulier l'intégration du béton électriquement conducteur (BEC) avec la technologie des électrodes enrobées de béton (EEB), appelée EE-BEC, en tant qu'approche innovante des systèmes de mise à la terre des sous-stations (SGS) dans le but de protéger les équipements électriques, le personnel, le public et les animaux contre les défauts pouvant apparaître dans les réseaux électriques. L'étude commence par la validation du logiciel commercial Comsol Multiphysics® de méthode des éléments finis (FEM) par l'analyse d'un SGS de cuivre conventionnel. Par la suite, des simulations numériques sont effectuées sur le système de mise à la terre EE-BEC, en faisant correspondre les dimensions de la grille de cuivre pour validation. Divers paramètres du système EE-BEC sont étudiés, notamment la géométrie BEC, les dimensions, la résistivité et le diamètre des barres d'armature.

Les résultats révèlent que les systèmes EE-BEC surpassent les SGS traditionnels, en particulier dans les scénarios à haute résistivité du sol. Les paramètres clés influençant la résistance de mise à la terre, les tensions de contact et de pas sont identifiés comme la surface de section et la résistivité de BEC. Le système EE-BEC proposé présente des avantages en termes d'efficacité, de durabilité, de facilité de conception et de mise en œuvre par rapport aux SGS conventionnels. De plus, ce travail présente une étude numérique d'une nouvelle méthode de mise à la terre adaptée aux sols gelés saisonniers, une condition répandue dans les climats froids comme le Canada.

L'étude comprend un modèle de sol à deux couches pour simuler un sol gelé saisonnier, explorant l'impact de l'épaisseur de la couche supérieure sur divers paramètres du système EE-BEC, tels que la profondeur d'enfouissement et la longueur supplémentaire des piliers. Les résultats indiquent des performances supérieures du système EE-BEC par rapport aux grilles de cuivre conventionnelles, en particulier lorsque l'épaisseur de la couche gelée dépasse la profondeur d'enfouissement de la grille de mise à la terre. Cette condition a tendance à augmenter la résistance de grille et les tensions de pas et de contact, soulignant l'efficacité du système de mise à la terre EE-BEC proposé dans des environnements difficiles.

En conclusion, la mise en œuvre d'une grille à petite échelle a constitué une simulation précieuse pour reproduire les comportements réels de notre système innovant MALT dans des climats froids. Les résultats de cette étude soulignent l'efficacité remarquable du système EE-BEC en tant qu'alternative supérieure au système conventionnel en cuivre, même dans les régions caractérisées par une résistivité élevée. Cette découverte renforce non seulement la viabilité du système proposé, mais le positionne également comme une solution robuste capable de relever les défis posés par des conditions environnementales extrêmes. Le succès du système

EE-BEC dans l'atténuation des problèmes liés à la résistivité souligne encore son potentiel à révolutionner les systèmes de mise à la terre, offrant une alternative fiable et efficace pour les applications de sous-stations, en particulier dans les zones froides et à haute résistivité.

ABSTRACT

This dissertation explores the development of new grounding methods, particularly the integration of electrically conductive concrete (ECON) with Concrete-Encased Electrode (CEE) technology, termed ECON-EE. This serves as an innovative approach to substation grounding systems (SGS) aimed at safeguarding electrical equipment, personnel, the public, and animals against faults that may occur in electrical networks. The study begins with the validation of the commercial finite element method (FEM) software, Comsol Multiphysics®, through the analysis of a conventional copper SGS. Subsequently, numerical simulations are conducted on the ECON-EE grounding system, matching the dimensions of the copper grid for validation. Various parameters of the ECON-EE system are studied, including ECON geometry, dimensions, resistivity, and the diameter of reinforcing bars.

The results reveal that ECON-EE systems outperform traditional SGS, particularly in scenarios with high soil resistivity. Key parameters influencing grounding resistance, touch, and step voltages are identified as the section area and resistivity of the ECON. The proposed ECON-EE system presents advantages in terms of efficiency, durability, and simplicity of design and implementation compared to conventional SGS. Additionally, this work presents a numerical investigation of a new grounding method applicable to seasonal frozen soil, a condition prevalent in cold climates like Canada.

The study includes a two-layer ground model to simulate seasonal frozen soil, exploring the impact of the upper-layer thickness on various ECON-EE system parameters, such as burial depth and length of additional pillars. The results indicate superior performance of the ECON-EE system over conventional copper grids, especially when the thickness of the frozen layer exceeds the burial depth of the grounding grid. This condition tends to increase grid resistance and step and touch voltages, underscoring the efficiency of the proposed ECON-EE grounding system in challenging environments.

In conclusion, the implementation of a small-scale grid served as a valuable simulation to replicate the real-world behaviors of our innovative MALT system in cold climates. The results of this study underscore the remarkable effectiveness of the ECON-EE system as a superior alternative to the conventional copper system, even in regions characterized by high resistivity. This finding not only reinforces the viability of our proposed system but also positions it as a robust solution capable of addressing the challenges posed by extreme environmental conditions. The success of the ECON-EE system in mitigating issues related to resistivity further emphasizes its potential to revolutionize grounding systems, offering a reliable and efficient alternative for substation applications, particularly in cold and high-resistivity areas.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xii
REMERCIEMENTS.....	xiii
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION	1
1.1 CONTEXTE.....	1
1.2 PROBLEMATIQUE.....	4
1.3 OBJECTIFS.....	8
1.4 METHODOLOGIE.....	9
1.4.1 CHOIX ET VALIDATION DU LOGICIEL DE SIMULATION.....	9
1.4.2 MODELISATION DU SYSTEME EE-BEC ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES INFLUENTS.....	11
1.4.3 MODELISATION DU SYSTEME EE-BEC DANS UN SOL GELÉ.....	12
1.4.4 ÉTUDE EXPERIMENTALE SUR UN MODELE REDUIT DE SYSTEME EE-BEC.....	13
1.5 RÉFÉRENCES.....	14
CHAPITRE 2	16
REVUE DE LITTÉRATURE	16
2.1 GÉNÉRALITÉ SUR LA MISE À LA TERRE DES POSTES ÉLECTRIQUES ..	16
2.1.1 RÔLE D'UNE MISE À LA TERRE.....	16
2.1.2 ÉLÉMENTS NORMATIFS.....	17
2.1.3 SYSTÈME DE MALT D'UN POSTE ÉLECTRIQUE.....	19
2.2 MÉTHODES DE MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ DU SOL ET DE LA RÉSISTANCE DE LA GRILLE.....	21
2.2.1 MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ DU SOL.....	21
2.2.2 MESURE DE LA RÉSISTANCE DE LA GRILLE DE MALT.....	24
2.3 MÉTHODES POUR AMÉLIORER LA MISE À LA TERRE POUR LES SOLS A RÉSISTIVITÉ ÉLEVÉE.....	27

2.3.1	DENSIFICATION DU MAILLAGE DE LA GRILLE ET UTILISATION DE PIQUETS VERTICAUX.....	27
2.3.2	UTILISATION DES MATÉRIAUX D'AMÉLIORATION DE LA RÉSISTIVITÉ DU SOL (GEM).....	28
2.3.3	UTILISATION DE L'ÉLECTRODE UFER.....	29
2.4	UTILISATION DU BÉTON ÉLECTRIQUEMENT CONDUCTEUR (BEC).....	31
2.4.1	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BEC.....	31
2.4.2	ÉTUDES RÉALISÉES JUSQU'À CE JOUR.....	32
2.4.3	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS.....	33
2.5	COMPORTEMENT D'UN SYSTEME MALT EN REGIONS FROIDES ET GELÉES.....	35
2.6	LOGICIELS CHOISIS POUR LA SIMULATION D'UN SGS.....	36
2.7	CONCLUSION.....	38
2.8	RÉFÉRENCES.....	39
	CHAPITRE 3.....	44
	ARTICLE 1: NUMERICAL INVESTIGATION OF THE USE OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETE-ENCASED ELECTRODES AS POTENTIAL REPLACEMENT FOR SUBSTATION GROUNDING SYSTEMS.....	44
3.1	INTRODUCTION.....	46
3.2	VALIDATION OF CONVENTIONAL SGS MODELING USING GENERAL FEM SOFTWARE.....	52
3.2.1	GEOMETRY AND PARAMETERS OF AN SGS.....	52
3.2.2	CONSTRUCTION OF THE FEM MODEL OF THE GROUNDING GRID.....	53
3.2.3	VALIDATION OF THE PROPOSED FEM MODEL.....	57
3.3	NUMERICAL INVESTIGATION OF THE ECON-EE GROUNDING.....	61
3.3.1	ECON-EE GROUNDING MODELING.....	61
3.3.2	INFLUENCE OF THE ECON-EE SQUARE SECTION AREA.....	62
3.3.3	INFLUENCE OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE ECON-EE SQUARE SECTION.....	66
3.3.4	INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE ECON-EE SECTION.....	68
3.3.4.1	CIRCULAR AND RECTANGULAR SECTIONS OF THE SAME AREA.....	69
3.3.4.2	CIRCULAR AND RECTANGULAR SECTIONS WITH THE SAME PERIMETER.....	71
3.3.5	INFLUENCE OF THE REBAR DIAMETER.....	73
3.4	DISCUSSION.....	76

3.4.1	INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE ECON-EE SECTION.....	76
3.4.1.1	ECON-EE SECTION AREA.....	76
3.4.1.2	ECON-EE RESISTIVITY	78
3.4.2	EFFICIENCY OF THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM COMPARED TO COPPER GRID	79
3.4.3	ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF USING AN ECON-EE GROUNDING SYSTEM FOR A SUBSTATION	81
3.4.3.1	ADVANTAGES OF THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM	82
3.4.3.1	DISADVANTAGES OF THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM.....	83
3.5	CONCLUSIONS	85
3.6	REFERENCES	87
CHAPITRE 4	91
ARTICLE 2: IMPROVING SUBSTATION GROUNDING PERFORMANCE IN COLD CLIMATE REGIONS USING NEW METHOD BASED ON ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETE ENCASED ELECTRODES (ECON-EE)	91
4.1	INTRODUCTION	93
4.2	MODELS OF THE ECON-EE SYSTEM AND SEASONAL FROZEN SOIL.....	96
4.3	INFLUENCE OF SEASONAL FROZEN SOIL ON GROUNDING GRID RESISTANCE	98
4.3.1	ECON-EE SYSTEM WITH 0.5 m BURIAL DEPTH	98
4.3.2	ECON-EE SYSTEM WITH VARIABLE BURIAL DEPTHS	99
4.3.3	EFFECTS OF ADDITION OF VERTICAL ECON-EE PILLARS TO THE ECON-EE SYSTEM.....	101
4.4	SAFETY EVALUATION OF THE ECON-EE SYSTEM UNDER SEASONAL FROZEN SOIL CONDITIONS.....	103
4.4.1	TOLERABLE TOUCH AND STEP VOLTAGES	103
4.4.2	ECON-EE SYSTEM SAFETY FOR A 0.5 m BURIAL DEPTH	104
4.4.3	ECON-EE SYSTEM SAFETY AS FUNCTION OF GRID BURIAL DEPTH.....	106
4.4.4	ECON-EE SYSTEM SAFETY AS FUNCTION OF ECON-EE PILLAR LENGTH.....	107
4.5	CONCLUSION.....	108
4.6	REFERENCES	109
CHAPITRE 5	111
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	111

5.1	INTRODUCTION	111
5.2	MODÈLE RÉDUIT PROPOSÉ.....	111
5.3	PRÉPARATION DU GÉOPOLYMERÉ ÉLECTRIQUEMENT CONDUCTEUR.....	113
5.4	CARACTÉRISATION DU SITE D'IMPLANTATION.....	115
5.5	MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU GEC.....	119
5.6	MESURE DE LA RÉSISTANCE DE MALT.....	122
5.7	SIMULATION DU MODÈLE EXPÉRIMENTAL.....	126
5.8	CONCLUSION.....	128
5.9	RÉFÉRENCES	129
	CHAPITRE 6.....	130
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	130
6.1	CONCLUSION.....	130
6.2	RECOMMANDATIONS	134
	ANNEXES.....	136

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: ÉTUDE COMPARATIVE DE LOGICIELS COMMERCIAUX.....	38
TABLE 2: INFLUENCE OF THE DIMENSION OF THE INTERMEDIATE REGION ON THE GROUNDING RESISTANCE.....	57
TABLE 3: COMPARISON OF THE FEM RESULTS WITH A BENCHMARK STUDY PERFORMED FOR A COPPER GRID WITHOUT VERTICAL RODS AND A UNIFORM SOIL MODEL.	59
TABLE 4: COMPARISON OF THE FEM RESULTS WITH A BENCHMARK STUDY PERFORMED FOR A COPPER GRID WITH VERTICAL RODS AND A TWO-LAYER SOIL MODEL.....	60
TABLE 5: PARAMETRIC STUDY RESULTS OF THE ECON-EE SQUARE SECTION WITH SIDE LENGTH A WITH THE TWO-LAYER SOIL MODEL.....	63
TABLE 6: COMPARISON OF THE RESULTS OBTAINED FOR A COPPER AND REBAR GRID WITHOUT ECON, WITH THE TWO-LAYER SOIL MODEL, AND WITHOUT VERTICAL RODS.	64
TABLE 7: INFLUENCE OF THE ECON RESISTIVITY PE ON THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM PARAMETER FOR A SQUARE SECTION SIDE LENGTH A EQUAL TO 266.7 MM AND $P1 = 300 \Omega\cdot M$	67
TABLE 8: INFLUENCE OF THE ECON SECTION GEOMETRY ON THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM PARAMETERS WITH THE SAME SECTION AREA EQUAL TO A^2 WITH $A = 266.7$ MM.	71
TABLE 9: INFLUENCE OF THE ECON SECTION GEOMETRY ON THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM PARAMETERS WITH THE SAME EQUIVALENT PERIMETER EQUAL TO $4A$ WITH $A = 266.7$ MM.....	73
TABLE 10: INFLUENCE OF THE REBAR DIAMETER ON THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM PARAMETERS FOR A SQUARE SECTION WITH A 266.7 MM SIDE, WITH THE TWO-LAYER SOIL MODEL.	74
TABLE 11: CALCULATION OF THE EQUIVALENT RADIUS REQ AS A FUNCTION OF THE REBAR DIAMETER FOR A SQUARE ECON-EE SECTION OF THE 266.7 MM SIDE.	75
TABLE 12: SIMULATION PARAMETERS.....	98
TABLE 13: IEEE STD 80 TOLERABLE VALUES FOR TOUCH AND STEP VOLTAGES.....	104
TABLEAU 14: RESULTATS DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DU SOL.	117
TABLEAU 15: RESULTATS DE RESISTANCE R_G OBTENUS PAR LA METHODE DE LA CHUTE DE POTENTIEL.....	124
TABLEAU 16: ÉVOLUTION DE LA RESISTANCE R_G DU SYSTEME EE-GEC EN FONCTION DES JOURS APRES ENFOUISSEMENT.	125

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SITE D'IMPLANTATION DU PROJET.	13
FIGURE 2: (A) EXPOSITION A LA TENSION DE CONTACT ; (B) EXPOSITION A LA TENSION DE PAS [1].	18
FIGURE 3 : METHODE DE WENNER [1].	22
FIGURE 4: METHODE DE SCHLUMBERGER [4].	24
FIGURE 5: METHODE DE 62%.	25
FIGURE 6: PRESENTATION OF THE SUBSTATION GROUNDING GRID GEOMETRY USED FOR FEM MODELING VALIDATION: (A) WITHOUT VERTICAL RODS; (B) WITH VERTICAL RODS.	53
FIGURE 7: PRESENTATION OF THE FEM MODEL WITHOUT VERTICAL RODS AND WITH A UNIFORM SOIL MODEL WITH A RESISTIVITY P OF 140 Ω -M.	54
FIGURE 8: PRESENTATION OF THE FEM MODEL WITH VERTICAL RODS AND WITH A TWO-LAYER SOIL MODEL, WITH THE FIRST LAYER OF 6.096 M DEPTH WITH A RESISTIVITY P1 OF 300 Ω -M AND THE SECOND LAYER (INFINITE LENGTH) WITH A RESISTIVITY P2 OF 100 Ω -M.	55
FIGURE 9: DISTRIBUTION OF THE EQUIPOTENTIAL LINES OF THE TOUCH VOLTAGE OBTAINED FOR A GRID WITHOUT VERTICAL RODS AND USING A UNIFORM SOIL MODEL WITH A RESISTIVITY OF 140 Ω -M.	56
FIGURE 10: DISTRIBUTION OF THE TOUCH VOLTAGE ALONG THE DIAGONAL OF THE GRID WITHOUT VERTICAL RODS AND USING A UNIFORM SOIL MODEL WITH A RESISTIVITY OF 140 Ω -M.	60
FIGURE 11: ECON-EE GROUNDING USING REBAR CENTERED IN THE ECON SQUARE SECTION WITH SIDE LENGTH A: (A) AN OVERVIEW OF THE ECON-EE SYSTEM; (B) A VIEW OF THE ECON-EE SECTION IN M.	62
FIGURE 12: EVOLUTION OF THE ECON-EE GRID PARAMETERS AS A FUNCTION OF THE SQUARE SECTION WITH SIDE LENGTH A.	65
FIGURE 13: COMPARISON OF THE TOUCH VOLTAGE DISTRIBUTION ALONG THE GRID DIAGONAL OBTAINED FOR THE COPPER GRID WITH VERTICAL RODS AND THREE ECON-EE SECTIONS WITH SIDE LENGTHS EQUAL TO 114.3 MM, 266.7 MM, AND 520.7 MM.	66
FIGURE 14: EVOLUTION OF THE ECON-EE GRID PARAMETERS AS A FUNCTION OF THE RATIO P_1/P_E FOR A = 266.7 MM AND $P_1 = 300 \Omega$ -M.	68
FIGURE 15: PRESENTATION OF THE TWO DIFFERENT SECTIONS OF THE ECON-EE WITH A REBAR OF 12.7 MM DIAMETER CENTERED IN THE MIDDLE: (A) CIRCULAR SECTION OF RADIUS R; (B) RECTANGULAR SECTION OF 114.3 MM \times W MM.	69
FIGURE 16: DISTRIBUTION OF THE TOUCH VOLTAGE ALONG THE GRID DIAGONAL OBTAINED FOR THE THREE ECON SECTIONS (SQUARE,	

RECTANGULAR, AND CIRCULAR), WITH THE SAME SURFACE AREA OF 0.071 M ²	71
FIGURE 17: DISTRIBUTION OF THE TOUCH VOLTAGE ALONG THE GRID DIAGONAL OBTAINED FOR THE THREE ECON SECTIONS (SQUARE, RECTANGULAR, AND CIRCULAR) WITH THE SAME PERIMETER OF 1.067 M.	73
FIGURE 18 : DISTRIBUTION OF THE ALLOWABLE TOUCH VOLTAGE AS FUNCTION OF THE DURATION OF THE CURRENT FAULT EVENT OBTAINED FOR BODY WEIGHTS OF 50 KG AND 70 KG AND FOR A GROUND RESISTIVITY OF 300 Ω-M AND CS = 1.....	81
FIGURE 19: DISTRIBUTION OF THE ALLOWABLE STEP VOLTAGE AS A FUNCTION OF THE DURATION OF THE CURRENT FAULT EVENT OBTAINED FOR BODY WEIGHTS OF 50 KG AND 70 KG AND FOR A GROUND RESISTIVITY OF 300 Ω-M AND CS = 1.....	81
FIGURE 20: OVERVIEW OF THE ECON-EE SYSTEM IN SEASONAL FROZEN SOIL: (A) TWO-LAYER ECON-EE GEOMETRY AND (B): TWO-LAYER ECON-EE MODEL USED FOR FEM SIMULATIONS.	97
FIGURE 21: EVOLUTION OF THE GRID RESISTANCE R _G AS A FUNCTION OF THE FROZEN LAYER THICKNESS H _F OBTAINED FOR THE ECON- EE SYSTEM AND THE COPPER GRID WITHOUT VERTICAL RODS.	99
FIGURE 22: EVOLUTION OF THE ECON-EE GRID RESISTANCE R _G AS A FUNCTION OF THE FROZEN LAYER THICKNESS OBTAINED FOR DIFFERENT GRID BURIAL DEPTHS.....	100
FIGURE 23: ILLUSTRATION OF THE ECON-EE SYSTEM EQUIPPED WITH PILLARS WITH A CIRCULAR CROSS-SECTION.	102
FIGURE 24: EVOLUTION OF ECON-EE GRID RESISTANCE R _G AS A FUNCTION OF PILLAR LENGTH, OBTAINED FOR A FROZEN LAYER THICKNESS OF 1.8 M.	102
FIGURE 25: EVOLUTION OF THE TOUCH VOLTAGE RATIO FOR A BODY WEIGHT OF 50 KG, AS A FUNCTION OF THE FROZEN LAYER THICKNESS H _F OBTAINED FOR THE ECON-EE SYSTEM AND THE COPPER GRID BURIED AT 0.5 M.	106
FIGURE 26: EVOLUTION OF R _{TOUCH} AND R _{STEP} FOR A BODY WEIGHT OF 50 KG, AS A FUNCTION OF THE GRID BURIAL DEPTH FOR A FROZEN LAYER THICKNESS H _F OF 1.8 M.	107
FIGURE 27: EVOLUTION OF R _{TOUCH} AND R _{STEP} FOR A BODY WEIGHT OF 50 KG AS A FUNCTION OF THE PILLAR LENGTH OBTAINED FOR A FROZEN LAYER THICKNESS OF 1.8 M.	108
FIGURE 28 : CONCEPTION DU SYSTEME REDUIT DE MALT.....	112
FIGURE 29 : PREPARATION DE LA GRILLE DE MALT.	113
FIGURE 30: PREPARATION DE LA RECETTE DU GEOPOLYMERE ELECTRIQUEMENT CONDUCTEUR.....	114
FIGURE 31 : TERRAIN D'IMPLANTATION DE L'ETUDE EXPERIMENTALE.	115
FIGURE 32 : MESURE DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DU SOL PAR LA METHODE WENNER.	116

FIGURE 33 : DISTRIBUTION DE LA RESISTIVITE DU SOL EN FONCTION DE L'ESPACEMENT DES ELECTRODES DE MESURE DE LA METHODE WENNER.....	118
FIGURE 34: TERRAIN DE L'ETUDE EXPERIMENTALE.	119
FIGURE 35: MONTAGE EXPERIMENTAL POUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES GEC.	121
FIGURE 36: ÉVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DU GEC EN FONCTION DES JOURS DE MURISSEMENT.	122
FIGURE 37: TEST DE MESURE DE LA RESISTANCE DE MALT PAR LA METHODE DE LA CHUTE DE POTENTIEL.....	124
FIGURE 38: MODELE NUMERIQUE DU SYSTEME EE-GEC EXPERIMENTAL.	127
FIGURE 39: ÉVOLUTION DE LA RESISTANCE DE TERRE R_G DU SYSTEME EE-GEC EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DU GEC POUR UNE RESISTIVITE DE SOL DE 47 Ω .M.	128

LISTE DES ABRÉVIATIONS

MALT	Mise À La Terre
IEC	International Electrotechnical Commission (Commission Électrotechnique Internationale)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut des Ingénieurs Électriciens et Électroniciens)
NEC	National Electrical Code (Code National de l'Électricité)
GPR	Ground Potential Rise (l'élévation du potentiel de terre)
$V_{\text{cont}} = V_{\text{TOUCH}}$	Tension de contact
$V_{\text{pas}} = V_{\text{Step}}$	Tension de pas
R_G	Résistance de mise à la terre
RTA	Rio Tinto Alcan
SGS	Substation Grounding System (Système de mise à la terre des sous-stations)
BEC	Béton Électriquement Conducteur
GEC	Géopolymère Électriquement Conducteur
EEB	Électrode Enrobée de Béton
CEE	Ciment Électriquement conducteur
GEM	Ground Enhancing Material (Matériaux d'amélioration du sol)
FEM	Finite Element Method (Méthodes des éléments finis)
EE-BEC	Électrode Enrobée dans du Béton Électriquement Conducteur
ECON	Electrically Conductive Concrete
CEE	Concrete-Encased Electrode
ECON-EE	Electrically Conductive Concrete combined with Concrete-Encased Electrode

REMERCIEMENTS

Je saisis l'occasion de ce rapport pour exprimer mes profonds remerciements envers toutes les personnes qui ont apporté leur contribution sous diverses formes à la réussite de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude et mon appréciation à mes superviseurs Prof. Ph. D, Eng Christophe Volat et Prof. Ph. D, Eng Stephan Brettschneider, professeurs en génie électrique au département des sciences appliquées à l'UQAC, pour leur temps précieux, leurs disponibilités et leurs aides tout au long de ce projet de recherche, et ils n'ont jamais manqué de m'apporter tout ce que j'avais besoin. Je souhaite que tous les superviseurs soient aussi exemplaires que vous. Votre exemple est une source d'inspiration pour moi.

Je serai toujours reconnaissante à toute l'équipe de CURAL, Rio Tinto Alcan, UQAC et Mitacs qui m'ont offert toutes les ressources nécessaires pour la réalisation de cette étude. Je suis reconnaissante également envers mes collègues de laboratoire pour les discussions stimulantes, les retours constructifs et le partage d'expériences qui ont enrichi mon apprentissage tout au long de ce projet.

Un sentiment de reconnaissance particulier envers mes chers parents, Miled et Bahija, qui ont été une source constante de soutien. Ma motivation découle de leur amour sincère, de leur profonde tendresse, et des sacrifices qu'ils ont consentis. Merci de m'avoir aidé à devenir la personne que je suis aujourd'hui. Mes remerciements s'étendent également à ma sœur Maissa, à mes frères et à mes nièces. Une gratitude spéciale et éclatante est réservée à mon cher mari Alaeddine, qui n'a jamais cessé de me pousser en avant et de m'encourager, malgré la distance. Ces simples mots de remerciement ne suffiront pas à exprimer toute ma gratitude.

En conclusion, je souhaite exprimer ma reconnaissance à mes amis les plus proches, que ce soit ceux de Tunisie ou ceux de Chicoutimi, pour avoir partagé leur soutien moral tout au long de cette nouvelle aventure. Je tiens également à souligner ma propre force et résilience pendant ce parcours, loin de ma famille.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Avec environ 1,2 million de tonnes métriques d'aluminium primaire produit annuellement par Rio Tinto Alcan (RTA), soit 36 % de la production canadienne, la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean occupe donc une place stratégique dans la production et la transformation de l'aluminium au Canada et également à travers le monde. Cependant, cette production engendre des résidus générés dans le processus de production de l'aluminium primaire à partir de minerai de bauxite. Dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean, la production de l'aluminium primaire génèrent annuellement plus de 400 kt (kilotonnes) de sous-produits et 1 200 kt de résidus de bauxite. L'entreposage de ces résidus de bauxite et sous-produits demeure une problématique actuelle dans la région mais aussi sur les autres sites de production à travers le monde et demeure une préoccupation importante pour RTA qui s'est donné comme objectif de développement durable d'atteindre zéro émission nette et zéro déchet d'ici 2050.

L'atteinte de cet objectif ambitieux réside principalement dans la mise en place d'une saine gestion des sous-produits et résidus miniers. Pour répondre à cet enjeu, RTA a mis en place, en 2019, un programme de recherche avec pour objectif à plus court terme de détourner de l'enfouissement 20 % des déchets d'ici 2030. Ainsi, pour faire avancer le savoir et augmenter les probabilités de succès autant pour les résidus

que les sous-produits, trois grands axes de recherche ont été mis en avant dans le projet de recherche, soient en génie des matériaux, en génie agro-environnemental et en extraction des éléments. Des sous-projets s'inscrivant dans l'un et/ou l'autre de ces axes ont donc été avancés en collaboration avec des institutions et des industriels de la région du Saguenay. Parmi les axes de recherche proposés, l'utilisation des résidus de bauxites et sous-produits dans le développement de nouvelles formulations de bétons et géopolymères électriquement conducteurs est une avenue prometteuse pour recycler une quantité importante de résidus de bauxite et sous-produits.

En effet, l'intérêt relatif au développement et à l'utilisation de bétons électriquement conducteurs (BEC) ont été ravivés vers la fin des années quatre-vingt-dix dans l'optique de développer à grande échelle des structures de transport (chaussée, trottoir, pistes aéroportuaires) chauffantes utilisables sous des conditions hivernales [1-2]. Ainsi, l'utilisation des bétons électriquement conducteurs à grande échelle offre une avenue intéressante pour recycler les résidus de bauxite dont peuvent être extraits entre 230 et 280 kg de poudre de magnétite par tonne de résidu de bauxite calciné [3-4]. Ayant déjà été utilisée à l'état naturel dans certaines formulations de bétons spéciaux pour en augmenter les capacités thermoélectriques [5-6], les résultats prometteurs issus d'une recherche exploratoire récente effectuée en partenariat avec RTA dans le cadre d'une maîtrise [7] a ainsi permis de confirmer que la poudre de magnétite permet d'atteindre des conductivités électriques de béton autour de 0.29 S/m, ce qui est très bon au regard des valeurs proposées dans la littérature [1-8]. Dans un registre similaire, il est également possible de produire de la poudre de graphite à partir des sous-produits issus de la transformation de l'aluminium. Ce matériau très conducteur, qui est

également utilisé depuis quelques années pour produire des bétons électriquement conducteurs [7], sera donc également utilisé et étudié comme additif principal dans des recherches connexes au présent projet.

Enfin, en parallèle des recherches exploratoires sur les bétons conducteurs, des recherches également exploratoires sur le développement de géopolymères conducteurs ont également été entreprises et conduits à des résultats plus que satisfaisants [7]. La particularité des géopolymères électriquement conducteurs ainsi développés a trait à l'utilisation d'un mélange composé de cendres volantes de classe F et de résidus de bauxite. La combinaison de ces deux éléments peut alors être utilisée comme matériau-source précurseur pour la production d'une mortier géopolymère, présentant des résultats satisfaisants de résistance en compression et une conductivité électrique élevée [7]. Ces matériaux géopolymères ont récemment reçu une attention considérable en raison de leur excellente résistance au feu, de leurs excellentes propriétés thermiques et de leur nature plus écologique que le béton conventionnel [7].

Une des voies possibles d'application de ces nouveaux bétons et géopolymères électriquement conducteurs résident dans le développement de nouvelles méthodes de mises à la terre (MALT) des équipements électriques de grandes structures telles que les réseaux électriques aériens. En effet, les systèmes de MALT utilisés dans les différents postes électriques (sortie de centrale, interconnexion, élévateurs et de distributions) qui sont présents entre la production et la distribution résidentielle de l'énergie électrique utilisent une quantité importante de matériaux conducteurs tels que le cuivre, l'acier galvanisé, l'acier inoxydable ou encore le zinc.

Ces matériaux, en plus de leur prix important, subissent également l'effet prolongé de leur enfouissement dans le sol qui se concrétise principalement par l'apparition de corrosion. La corrosion qui dépend de la constitution des sols, peut entraîner une dégradation des caractéristiques électriques de la MALT, pouvant alors nécessiter un remplacement précoce de ces derniers. Enfin, étant des matériaux coûteux, ils peuvent être sujets au vol de par leur prix de rachat sur le marché des matériaux recyclables.

Ainsi, le développement d'applications concrètes à grande échelle de bétons ou géopolymères électriquement conducteurs présente une solution forte intéressante qui permettrait à moyen terme de réduire considérablement l'entreposage des résidus de bauxite tout en permettant de relancer l'économie de la région par l'émergence de nouvelles entreprises issues du recyclage des résidus produits par la production de l'aluminium.

1.2 PROBLEMATIQUE

Bien que moins conducteurs que le cuivre ou autres matériaux utilisés dans les systèmes de MALT des différents postes, les bétons et géopolymères peuvent cependant être utilisés judicieusement et en plus grande quantité pour offrir des caractéristiques électriques de MALT équivalentes aux matériaux utilisés actuellement.

Il est important de préciser que le but premier d'un système efficace de MALT est de protéger les équipements, le personnel et les animaux contre les chocs de foudre, court-circuit ou autre décharges électrostatiques en créant un chemin électriquement conducteur permettant de dissiper dans le sol l'excès de courant issu de ces défauts. À cet effet, différents systèmes de MALT peuvent être utilisés dépendamment de la résistivité du sol, telles que des électrodes horizontales et/ou verticales, de grandes grilles ou une combinaison de toutes ces possibilités.

L'efficacité d'un système de MALT dépend principalement de la résistivité du sol dans lequel il est enfoui qui elle-même, dépend de la nature du sol et des conditions environnementales présentes [9]. Ainsi, plus la résistivité du sol est élevée et plus la géométrie du système de MALT sera complexe et coûteuse [10]. De plus, afin d'assurer la sécurité du personnel et des équipements, le design des systèmes de MALT doivent respecter les exigences des standards internationaux (IEEE 80-2013 ou IEC 60364-5-54) en termes de résistance de MALT et de tension de pas et de contact [11].

En particulier, les exigences pour les systèmes de MALT utilisés dans les postes sont les plus exigeantes avec une résistance de grille (R_G) qui doit être inférieure ou égale à 1Ω [11]. Cette valeur faible provient principalement de la valeur élevée des courants de défauts qui peuvent se produire dans les postes. Plus le courant est élevé et plus le potentiel induit à la surface du poste sera important et donc dangereux pour le personnel présent. Ainsi, lorsque la résistivité du sol est très élevée, l'atteinte des exigences relatives aux normes lors du design des systèmes de MALT des postes

devient un défi de taille. En effet, dans ces conditions particulières, l'utilisation d'une grille et de piquets verticaux réalisés à partir des matériaux conducteurs standards ne suffit plus et il faut alors avoir recours à des matériaux d'amélioration de mise à la terre ou en anglais, Ground Enhancement Material (GEM).

Ces matériaux, de nature organiques ou chimiques et décrits plus en détail dans la revue de littérature, sont répandus directement dans les tranchées creusées pour accueillir les conducteurs de la grille ou dans les trous réalisés pour les piquets verticaux et permettent ainsi de réduire localement la résistance du sol autour des conducteurs et piquets de la grille de MALT [12]. Ils agissent donc comme une sorte d'adaptation d'impédance entre la grille et le sol et permettent ainsi d'atteindre les exigences normatives en terme de résistance de MALT.

Ainsi, l'idée d'utiliser du BEC dans les systèmes de MALT n'est pas une nouveauté en soi puisqu'il faut remonter au milieu des années soixante-dix pour voir apparaître l'utilisation d'un ciment électriquement conducteur comme GEM [13], Ce ciment rendu conducteur par l'ajout de composés carbonés est encore utilisé de nos jours pour diminuer la résistivité du sol autour des conducteurs consistant la MALT et reste un des meilleurs GEM sur le marché en terme de performance et de durabilité comparés aux autres GEM chimiques à base de chlorures ou de sulfates qui diffusent dans le sol au cours du temps et perdent de leur efficacité en plus de contaminer l'environnement [14]. Cependant, bien qu'efficaces, les ciments conducteurs sont toujours utilisés en complément des grilles de cuivre et ne peuvent donc pas les remplacer.

Dans cette optique, il est intéressant de regarder du côté de la méthode UFER de mise à la terre inventée dans les années soixante par l'ingénieur portant le même nom [15]. Cette méthode propose d'utiliser les fondations en béton armé des bâtiments pour réaliser le système de MALT. En effet, tel que démontré par quelques études, le système UFER offre des performances égales au système de MALT en cuivre et même supérieures lorsque la résistivité du sol est élevée. Même si le béton conventionnel a une résistivité 10 à 20 fois plus élevée que le BEC, le fait qu'il soit enterré profondément dans le sol qui est alors plus humide et qu'il soit renforcé par des armatures métalliques (les rebars), cela permet d'atteindre des résistances de MALT très faibles. Il faut également compter sur le fait que les systèmes UFER ne sont applicables que pour les fondations avec de grandes surfaces enterrées, comme c'est le cas pour les grands bâtiments ou les fondations de pylônes [16]. Une telle méthode ne serait donc pas envisageable pour une utilisation dans les postes.

Fort est de constater que l'utilisation de BEC en remplacement des systèmes conventionnels de MALT dans les postes demeure un défi de taille mais pas insoluble en combinant les avantages des GEM à base de ciment conducteur et le système UFER. Il s'agit alors de diminuer la résistivité du béton conventionnel de la méthode UFER en le remplaçant par du béton et/ou du géopolymère plus conducteur et d'utiliser l'armature métallique du béton armé comme conducteur assurant le transport du courant. Avec cette proposition innovante, il devient alors possible de proposer une nouvelle technique de MALT aussi efficace que les MALT conventionnelles et plus durables dans le temps. Cependant, au meilleur de nos connaissances, l'utilisation

d'électrodes métalliques encastrées dans du béton électriquement conducteur (EE-BEC) comme systèmes complets de MALT de postes n'a jamais été étudié malgré leur utilisation depuis le début des années deux mille dans des applications de bétons chauffants. À cela s'ajoute quelques travaux initiateurs mais limités à l'utilisation de BEC dans des systèmes de MALT de faibles tailles comparés aux dimensions d'une grille de MALT d'un poste très haute tension. Il reste donc un travail important à réaliser afin de démontrer la viabilité de ce nouveau système de MALT basé sur l'utilisation d'EE-BEC.

1.3 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce projet de recherche est donc de contribuer au développement d'une nouvelle méthode de mise à la terre dédiée aux postes électriques de grandes dimensions combinant l'utilisation de BEC combinée au principe de la méthode UFER, soit une nouvelle méthode basée sur la technologie des électrodes enrobées de béton électriquement conducteur, ou EE-BEC. Ainsi, l'objectif ultime est de démontrer la possibilité de remplacer les systèmes de MALT conventionnels par le système EE-BEC en proposant des solutions permettant de rencontrer les exigences des normes internationales en terme de résistance de grille et de tension de pas et de contact.

Afin de proposer une méthode innovante de MALT des postes basée sur l'utilisation de la technologie EE-BEC, plusieurs objectifs spécifiques doivent être atteints.

Les objectifs spécifiques ainsi visés par la présente recherche peuvent se décrire comme suit :

- Développer et valider un modèle numérique d'un système de MALT utilisant la technologie EE-BEC;
- Déterminer numériquement les paramètres géométriques et électriques du système EE-BEC qui ont le plus d'influence sur les éléments principaux entrant en jeu lors de la conception initiale de la mise à la terre d'un poste, à savoir la résistivité du sol, la résistance de MALT à atteindre ainsi que les tensions de pas et de contact obtenus lors d'un défaut.
- Réaliser une étude comportementale numérique d'un système MALT EE-BEC en régions à climat froid (sol gelé).
- Étudier expérimentalement l'évolution sur une longue période de la résistance de MALT d'un système EE-BEC à échelle réduite dans des conditions environnementales extérieures.

1.4 METHODOLOGIE

L'atteinte des différents objectifs de cette recherche nécessite la mise en place d'une méthodologie de recherche divisée en plusieurs étapes qui peuvent se décrire comme suit :

1.4.1 CHOIX ET VALIDATION DU LOGICIEL DE SIMULATION

Cette première étape consiste à valider le choix du logiciel de modélisation utilisé pour réaliser les différentes simulations en lien avec cette recherche. Pour ce

faire, il a été décidé d'utiliser un logiciel commercial général basé sur la méthode des éléments finis, soit Comsol Multiphysics®. En effet, les logiciels commerciaux dédiés exclusivement à la conception de système de MALT sont nombreux sur le marché mais aucun d'entre eux ne permet de répondre aux exigences du présent projet, soit la prise en compte d'un système d'électrodes métalliques enrobées dans du BEC.

Le logiciel Comsol Multiphysics®, de par ses fonctions avancées de calcul, permet de traiter un tel problème autant dans le domaine stationnaire que dans le domaine transitoire et de plus, ce dernier a été utilisé avec succès pour calculer la résistance de mise à la terre d'une tige verticale simple dans différentes configurations [17].

La validation du logiciel est réalisée par la réalisation d'une étude comparative d'un cas référence issus de la littérature et pour lequel une étude comparative réalisée sur plusieurs logiciels commerciaux de conception de MALT est disponible [18]. Plusieurs cas références sont disponibles dans la littérature mais il a été décidé d'utiliser un cas référence plus complexe qui se rapproche le plus d'un système de MALT de poste conventionnel en cuivre en terme de dimension et pour laquelle différents cas de figures ont été étudiés comme le model de sol utilisé en fonction de sa résistivité et également l'utilisation de piquets verticaux (tel qu'expliqué dans la revue de littérature).

Cette étude comparative permettra ainsi de définir et fixer les paramètres du modèle numérique influencent les résultats obtenus comme les dimensions requises

pour modéliser le sol ainsi que le nombre d'éléments finis optimales à utiliser. Ces simulations ont été réalisées en régime stationnaire en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics®.

1.4.2 MODELISATION DU SYSTEME EE-BEC ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES INFLUENTS

Afin de pouvoir évaluer les performances du système de MALT EE-BEC proposé, ce dernier reprend les mêmes paramètres de modélisation que ceux utilisés pour le cas référence de l'étape précédente. La seule différence est que le conducteur en cuivre de la grille conventionnelle de MALT est remplacé par une armature métallique (½ pouce de diamètre) utilisée couramment dans le béton armé et centrée dans la section du BEC. Différentes simulations seront réalisées afin d'étudier l'influence de la conductivité électrique du BEC, des dimensions et de la géométrie de la section du BEC et également du diamètre de l'armature métallique.

Les résultats obtenus permettront de comparer les performances du système EE-BEC avec celle d'une grille en cuivre conventionnelle dans deux situations de model de sol et également d'identifier les paramètres optimaux du système EE-BEC qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats en termes de résistance de grille et de tensions de pas et de contact. Ces simulations ont été également réalisées en régime stationnaire en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics®.

1.4.3 MODELISATION DU SYSTEME EE-BEC DANS UN SOL GELÉ

Dans cette étape, nous étudions l'influence de la couche gelée sur notre système de mise à la terre. Pour parvenir à une compréhension approfondie de cette interaction complexe, nous introduisons une approche innovante dans laquelle nous intégrons une couche supplémentaire dans notre analyse, reproduisant les caractéristiques de la couche gelée avec une profondeur qui peut être ajustée pour imiter les différentes conditions de la couche gelée dans des scénarios réels.

En introduisant cette couche supplémentaire avec une conductivité électrique et une profondeur réglables, nous pouvons simuler une gamme de scénarios représentant la nature dynamique de la couche gelée dans les régions à climat froid. Cette approche nous permet d'étudier comment les changements dans les propriétés de la couche gelée, telles que son épaisseur et sa conductivité, ont un impact sur les performances de notre système de mise à la terre. Cette analyse nous permet de fournir des informations précieuses sur le comportement de notre système MALT dans différentes conditions, mettant en lumière la manière dont il s'adapte aux défis posés par les variations saisonnières de la couche gelée.

Grâce à cette approche, nous visons à développer une compréhension plus approfondie des réponses du système de MALT à améliorer ses performances dans les régions à climat froid, garantissant ainsi la sécurité et la fiabilité des systèmes de distribution d'énergie électrique.

1.4.4 ÉTUDE EXPERIMENTALE SUR UN MODELE REDUIT DE SYSTEME EE-BEC

Pour cette dernière étape, nous avons étudié le comportement d'un modèle réduit de système EE-BEC sous conditions environnementales réelles. L'implantation du système est faite sur un terrain de l'UQAC (Figure 1) dont la mesure de la résistivité du sol est réalisée avec l'appareil disponible à l'UQAC. Le système EE-BEC a une dimension de $1\text{m} \times 1\text{m}$ et il est réalisé avec une formulation de BEC développé par un étudiant au doctorat dans le cadre de ses travaux de recherche. La section du système EE-BEC est carrée ($20\text{cm} \times 20\text{cm}$) avec une armature métallique de 1 pouce de diamètre en son centre.

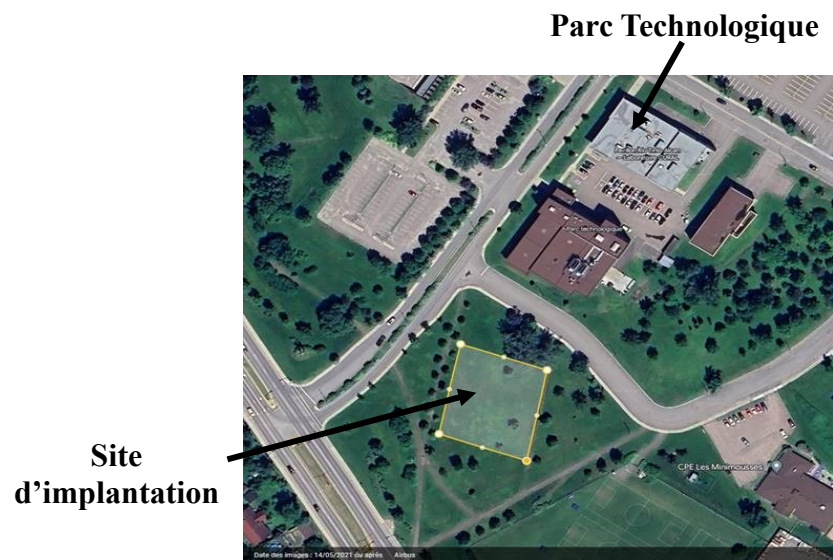


Figure 1 : Site d'implantation du projet.

Une fois le système installé, une mesure de la résistance de grille est réalisée tous les 7 jours afin de suivre son évolution au cours du temps. Parallèlement, une

simulation numérique est réalisée avec les données expérimentales recueillies afin de confirmer et/ou infirmer la précision des simulations réalisées.

1.5 RÉFÉRENCES

- [1] Electrically conductive concrete, US Patent no. 3 166 518, 1965.
- [2] P. Xie et J. J. Beaudoin, “Electrically Conductive Concrete and its Application in Deicing”, International Concrete Abstracts Portal, Vol. 154, pp. 399-418, mai 1995.
- [3] Y. Li et al., “Feasibility study of iron mineral separation from red mud by high gradient superconducting magnetic separation”, Physica C: Superconductivity, Vol. 471, No. 3, pp. 91-96, 2011.
- [4] A. Matthews, “Magnetite formation by the reduction of hematite with iron under hydrothermal conditions”, American Mineralogist, Vol. 61, No.9-10, pp. 927-932, 1976.
- [5] F. Aslani, D. M. Lesslie et F. Hamidi “Development and analysis of highly workable high-strength heavyweight concrete using magnetite aggregates”, International Federation for Structural Concrete, <https://doi.org/10.1002/suco.201900243>, février 2020.
- [6] E. Horszczaruk, P. Sikora et P.Zaporowski, “Mechanical properties of shielding concrete with magnetite aggregate subjected to high temperature”, Procedia Engineering, Vol. 108, pp. 39-46, 2015.
- [7] J. A. Lago Araujo Seixas, “Développement d’un béton électriquement conducteur par utilisation des résidus de bauxite brutes ou transformés”, mémoire de maîtrise en Ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, 2021.
- [8] D. D. L. Chung, “Electrically conductive cement-based materials”, Advances in Cement Research, Vol.16, No. 4, pp. 167-176, octobre 2004.
- [9] S. Rajan et S. Venugoplan, “Corrosion and Grounding Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 13, No. 3, pp. 297-306, juillet 1977.
- [10] Sherif Salama Mohamed Ghoneim, Optimization of Grounding Grids Design with Evolutionary Strategies, 2007.
- [11] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, January 2000.

- [12] Azmi, Aizat et al. "The Use of Enhancement Material in Grounding System: a Review." Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 13.2 (2019): 453. Web.
- [13] Farren, E. J.; Hallmark, C. L. Why a low resistance to remote Earth is desirable and how to obtain it. In Proceeding of the Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Phoenix, USA, 10-14 September 2000.
- [14] Schroeder, J. Practical Issues in Grounding: Bentonite vs. Conductive Concrete. In Proceeding of the Protection Engineers Group Conference, Monroe, USA, 5-7 April 2016.
- [15] Ufer, H.G. Investigation and Testing of Footing-Type Grounding Electrodes for Electrical Installations. IEEE Trans. On Pow. App. & Syst. 1964, 83(10), 1042-1048.
- [16] Muhammad Haziq Aniq Bin Zulkifli and Hussein Bin Ahmad. Preliminary result on the enhancement of Ufer electrodes using recycle additives materials. 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 160 012010.
- [17] Samadinasab, S.; Namdari, F.; Bakhshipour, M. A novel approach for earthing system design using finite element method. Jour. of Intelli. Proc. in Electr. Techn. 2017, 8(29), 54-63.
- [18] Disponible en ligne Elek.com. <https://elek.com.au/articles/earthing-software-benchmark-study> (Visité le 20 Juin 2022).

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 GÉNÉRALITÉ SUR LA MISE À LA TERRE DES POSTES ÉLECTRIQUES

2.1.1 RÔLE D'UNE MISE À LA TERRE

Comme définition générale, un système de mise à la terre (MALT) est constitué d'une tige enfouie dans le sol et reliée par un conducteur au neutre du circuit sur lequel différents équipements sont branchés. Tout système de MALT est donc essentiel dans la protection des individus contre les accidents électriques tout en permettant un fonctionnement adéquat des installations électriques lors d'un défaut [1].

Dans le cas des postes des réseaux électriques haute et très haute tension, les systèmes de MALT sont plus complexes de par la présence de plusieurs équipements électriques qui y sont reliés et également de par les amplitudes des courants de défauts qui résultent généralement d'un court-circuit sur un équipement ou encore d'un choc de foudre. Ainsi, pour des installations importantes telles que les postes, le système de MALT est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. Son rôle est de permettre l'écoulement, à l'intérieur du sol, de courants de défaut de toutes origines. Lors de tels écoulements par le réseau de terre, des différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points, par exemple entre deux masses métalliques, entre une masse métallique et le sol, ou entre deux points du sol. En conséquence, la conception de tout système de MALT doit permettre, même dans ces conditions, d'assurer le maintien :

- de la sécurité du personnel œuvrant à l'intérieur des postes et dans ses abords immédiats;
- de la protection des équipements électriques sensibles et de puissance (appareils de mesure, transformateurs, etc.) en limitant la création et les effets de surtension provoqués par les défauts, chocs de manœuvre et de foudre;
- des différents équipements électriques reliés entre eux à un potentiel identique ;
- d'un potentiel de référence minimal sur toute la surface au sol couverte par le poste électrique.

2.1.2 ÉLÉMENTS NORMATIFS

Lors d'un défaut électrique, le courant de défaut cherche à s'échapper dans le sol par des conducteurs électriques à faible résistance. Pour cette raison, l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) dans sa norme IEEE Std 80-2013 exige que pour les postes électriques haute et très haute tension, la résistance de terre soit généralement d'environ 1Ω ou moins. Pour les postes de distribution, la plage généralement acceptable est de 1Ω à 5Ω , selon les conditions locales [1].

Cette norme permet également de définir les paramètres nécessaires au maintien de la sécurité des personnes présentes dans le poste ou au voisinage immédiat de ce dernier en définissant la tension de contact et la tension de pas qui sont admissibles lors d'un défaut.

Par définition, la tension de contact V_{cont} est la différence de potentiel entre l'élévation du potentiel au sol (GPR) lors d'un défaut et le potentiel de surface au point

où la personne pourrait se tenir tout en ayant en même temps une main en contact avec une structure mise à la terre (Figure 2-a).

La tension de pas V_{pas} correspond à la différence de potentiel de surface qui pourrait être ressentie par une personne franchissant 1 m avec les pieds sans entrer en contact avec un objet mis à la terre (Figure 2-b).

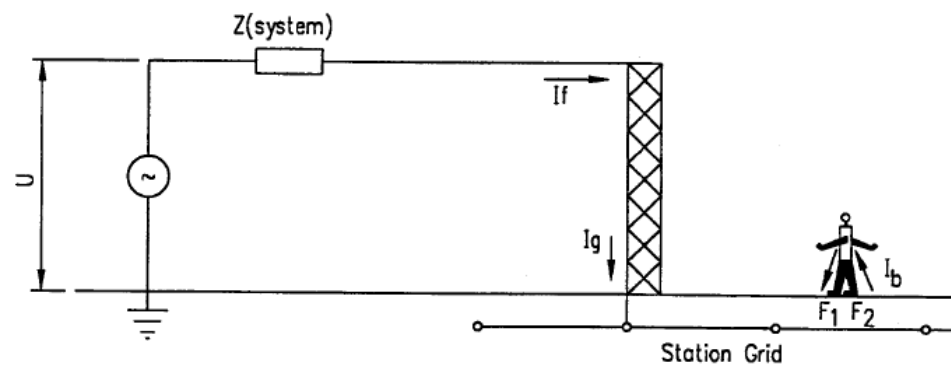
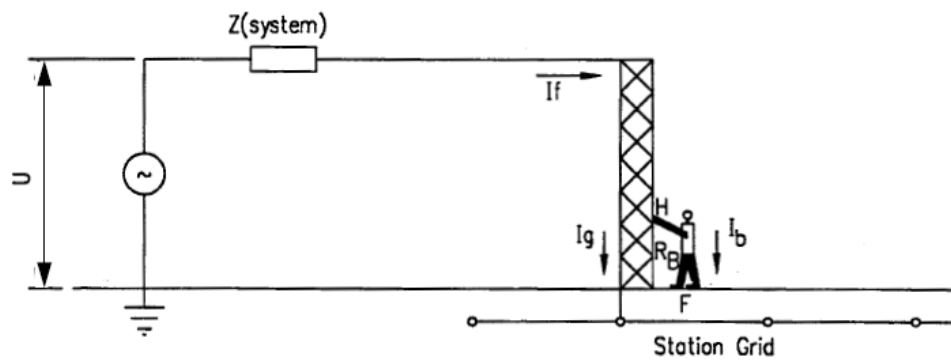


Figure 2: (a) Exposition à la tension de contact ; (b) Exposition à la tension de pas [1].

La norme IEEE propose deux équations permettant de déterminer les tensions de contact et de pas qui sont données par [1] :

$$V_{cont}(V) = I_b \cdot (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \quad (2.1)$$

$$V_{pas}(V) = I_b \cdot (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \quad (2.2)$$

avec ρ_s la résistivité du sol, C_s le facteur d'échelle dû à la présence de la couche superficielle de protection ($C_s = 1$ dans le pire de cas) et I_b (A) le courant maximal pouvant circuler sans danger dans 99,5 % des personnes et qui s'exprime comme suit :

$$I_b = \frac{0,116}{\sqrt{t_f}} \quad \text{pour un poids corporel de 50 kg} \quad (2.3)$$

$$I_b = \frac{0,157}{\sqrt{t_f}} \quad \text{pour un poids corporel de 70 kg} \quad (2.4)$$

où t_f (s) représente la durée de l'événement de défaut produit.

2.1.3 SYSTÈME DE MALT D'UN POSTE ÉLECTRIQUE

Dans les postes électriques des réseaux électriques, la mise à la terre des équipements de puissance est sensible et d'une importante capitale de par les niveaux de tension admissibles induisant des courants de défaut de forte intensité. Une attention particulière doit donc être portée lors de la conception de chaque système de MALT afin que les courants de défauts soient évacués tout en respectant les critères de tension de contact et de pas [1]. De plus, cette conception doit prendre en compte plusieurs paramètres plus ou moins dépendants les uns d'autres comme le nombre et la position des équipements électriques, la superficie du poste ainsi que la résistivité du sol sur lequel il est construit. Ainsi, aucun système de MALT de poste ne peut être identique

car chaque implantation requière une conception particulière issus d'un processus itératif plus ou moins fastidieux en fonction de la complexité du poste électrique.

Cependant, pour simplifier le processus itératif de conception, la norme IEEE-std-80-2013 recommande d'utiliser certaines règles de base qui servent à définir le système de MALT initial servant de modèle de départ aux itérations subséquentes. Ces règles de base peuvent se résumer ainsi [1] :

- Le système de MALT typique (modèle de départ) d'un poste électrique peut comprendre une pluralité de conducteurs en cuivre nu 4/0 espacés de 3 à 7 m et interconnectés de telle sorte à former une grille qui est enterrée généralement entre 0,3 à 0,5 m sous le niveau du sol.
- La grille ainsi enterrée doit couvrir au moins toute la surface occupée le poste, voir un peu au-delà de ses limites.
- Le ration de la taille des mailles de la grille est généralement situé entre 1:1 (maille carrée) ou 1:3 (mailles rectangulaire) mais peut également varié dépendamment des éléments de conceptions à respecter.
- Pour des sols avec des résistivités élevés, des pieux (ou piquets) peuvent être installés en priorité aux coins et aux interconnexions des conducteurs situés sur le périmètre de la grille. Des pieux peuvent également être installés sous les équipements majeurs de puissance et également aux interconnexions internes à la grille si nécessaire. Le nombre de pieux nécessaire augmente ainsi avec la résistivité du sol.

En partant de ces règles de base suggérées par la norme, le processus itératif de conception de la grille de MALT des postes électriques peut débuter en modifiant la taille du maillage, le nombre et le diamètre des conducteurs ainsi que le nombre et la longueur des pieux jusqu'à rencontrer les exigences en termes de résistance de grille et de tensions de pas et de contact.

2.2 MÉTHODES DE MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ DU SOL ET DE LA RÉSISTANCE DE LA GRILLE

2.2.1 MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ DU SOL

La résistivité du sol est l'un des critères les plus importants pour déterminer les paramètres nécessaires pour la mise à la terre. Elle reflète la capacité du sol à limiter le passage du courant électrique. Elle est dépendante de plusieurs facteurs tels que le type de sol, la taille des grains, le pourcentage de teneur en eau, le pourcentage de sels solubles et la température [2]. Cette mesure nous permet de connaître le meilleur positionnement et la meilleure profondeur des conducteurs de MALT.

Les méthodes les plus couramment utilisées sont les méthodes de Wenner et Schlumberger qui utilisent quatre électrodes : deux électrodes externes pour l'injection du courant et deux électrodes internes pour la mesure de la chute (ou différence) de potentiel.

Dans la méthode de Wenner, qui est la plus utilisée pour les mesures de résistivité du sol, les quatre électrodes sont positionnées à une distance identique a les unes des autres et enfoncées dans le sol à une profondeur b [3], tel que présenté à la figure 3. Un courant connu est alors injecté entre les deux électrodes externes et la chute de potentiel due à la résistance de la terre est mesurée entre les deux électrodes internes (voir Figure 3).

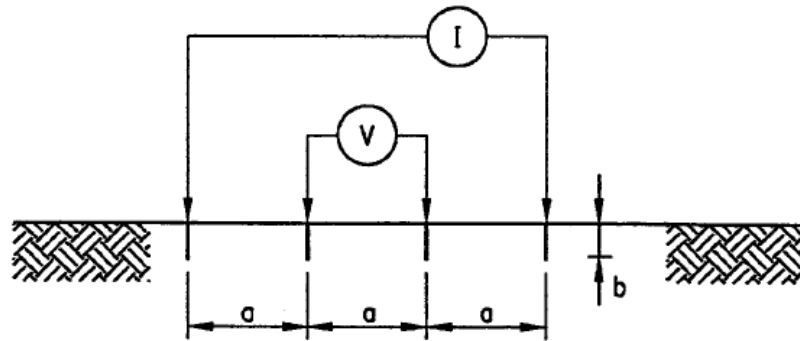


Figure 3 : Méthode de Wenner [1].

La résistivité apparente du sol est alors calculée comme suit [1]:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.5)$$

où :

- ρ_a : la résistivité apparente du sol en Ω -m.
- R : la résistance mesurée en Ω .
- a : la distance entre les électrodes adjacentes en m.
- b : la profondeur des électrodes en m.

Lorsque la distance a entre les électrodes est supérieure (d'un facteur 20) à la profondeur b à laquelle les électrodes sont enfoncées dans le sol, l'équation (2.5) peut être simplifiée comme suit [1]:

$$\rho_a = 2\pi aR \quad (2.6)$$

En faisant varier la distance a entre les électrodes (en les gardant toujours équidistantes), il est alors possible de mesurer la résistivité apparente du sol à différentes profondeurs. Ainsi, plus a augmente et plus la profondeur de mesure augmente. Cela permet ainsi d'effectuer un relevé de la résistivité apparente du sol en fonction de la profondeur [3].

La méthode de Schlumberger reprend le même concept de mesure à quatre électrodes que la méthode de Wenner mais avec un positionnement différent des électrodes qui ne sont plus équidistantes les unes des autres.. En effet, dans la méthode de Wenner, il y a une diminution rapide de l'amplitude du potentiel entre les deux électrodes internes lorsque l'espacement a entre ces dernières est importante pour permettre une mesure de la résistivité apparente du sol à une plus grande profondeur. Cela se traduit par des chutes de potentiel faibles qu'il est parfait difficile de mesure avec une précision suffisante avec les instruments de mesure du commerce. Pour contourner ce problème lorsque l'espacement entre les électrodes d'injection de courant est important, la méthode Schlumberger peut alors être utilisée, comme illustré à la Figure 4. Le principe de mesure consiste alors à rapprocher les électrodes internes des électrodes d'injection du courant, ce qui permet ainsi d'augmenter les valeurs mesurées de la chute de potentiel.

Dans la majorité des cas, la profondeur de pénétration dans le sol b des électrodes est généralement très petite devant la distance d entre les électrodes internes et la distance c entre les électrodes internes et externes.. Dans ces conditions, la formule utilisée pour le calcul de la résistivité du sol est alors donnée par [4] :

$$\rho_a = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (2.7)$$

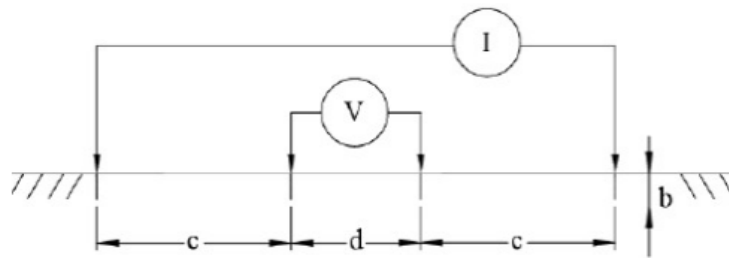


Figure 4: Méthode de Schlumberger [4].

2.2.2 MESURE DE LA RÉSISTANCE DE LA GRILLE DE MALT

Bien qu'il existe différentes méthodes pour mesurer la résistance d'une MALT, nous allons uniquement présenter la méthode la plus répandue et qui a également été utilisée dans les mesures de résistance de MALT réalisées dans ce travail de maîtrise. Cette méthode est la méthode à trois pôles dite méthode des 62%. Cette méthode générale permet de mesurer la résistance de tout type de MALT et est particulièrement adaptée aux systèmes de MALT complexes comme ceux des postes électriques [1].

Comme illustré à la Figure 5, le principe de mesure consiste à faire circuler un courant alternatif constant à travers l'électrode d'injection de courant C, le retour se réalisant par la prise de terre T. La mesure de la tension V s'effectue entre la prise de

terre T et l'électrode de tension T (aussi appelée prise de potentiel 0V). Le quotient entre la tension ainsi mesurée et le courant constant injecté donne la résistance recherchée. Il est important de noter que pour que la mesure soit la plus précise possible, il faut s'assurer que l'électrode de tension T soit placée hors de la zone d'influence de chacune des électrodes de courant et de terre. Si c'est le cas, son potentiel sera considéré comme nulle et la mesure sera alors fiable.

Afin de s'assurer du bon positionnement de l'électrode de tension hors des zones d'influence des deux autres électrodes créées par la circulation du courant injecté, il faut alors effectuer une série de mesure faisant varier la distance X (voir Figure 5) entre l'électrode de tension et l'électrode de terre pour une distance d entre cette dernière et l'électrode de courant maintenue constante.

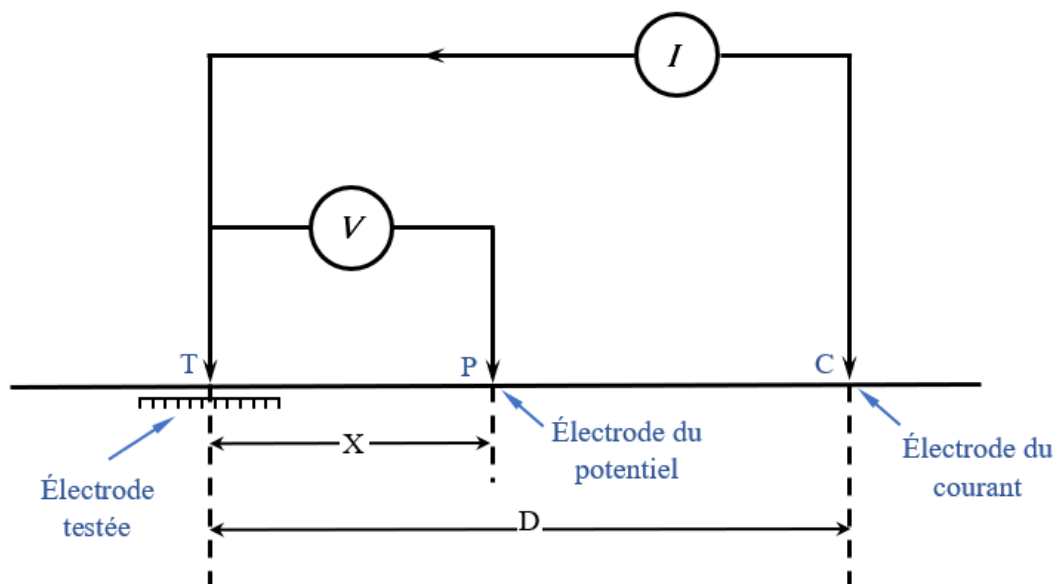


Figure 5: Méthode de 62%.

La variation de la distance X entre l'électrode de tension et de terre permet ainsi de définir la zone de potentiel nul (0V) dans laquelle l'électrode de tension n'est pas dans la zone d'influence des deux électrodes de terre et de courant. Pour déterminer cette zone de potentiel 0V, il suffit de tracer l'évolution de la résistance de terre mesurée en fonction de la distance X et de noter la partie pour laquelle la résistance de terre ne varie plus. D'après plusieurs statistiques relatives à un grand nombre de mesure de terrain, il a été démontré que la grande précision de mesure est obtenue en plaçant l'électrode de tension à une distance X correspond à 62 % de la distance D entre les électrodes de terre et de courant [1]. Ainsi, cette valeur caractéristique ayant donné le nom à la méthode de mesure permet de s'assurer que l'électrode de tension est au milieu de la zone de potentiel 0V, ce qui permet d'obtenir une mesure précise de la résistance de la MALT.

Une des conditions importantes pour appliquer la méthode des 62% est de s'assurer que la distance D entre les électrodes de terre et de courant soit suffisamment grande pour qu'il puisse avoir une zone de potentiel 0V. Étant donné que la zone d'influence du système de MALT est proportionnelle à la surface couverte par la grille de terre, la distance D peut être très importante, ce qui complexifie l'utilisation de la méthode [1]. Dans certains cas, il devient impossible de définir la zone de potentiel 0V et il faut alors avoir recours à d'autres méthodes d'interprétation des résultats pour obtenir une mesure fiable de la résistance de MALT.

2.3 MÉTHODES POUR AMÉLIORER LA MISE À LA TERRE POUR LES SOLS A RÉSISTIVITÉ ÉLEVÉE

2.3.1 DENSIFICATION DU MAILLAGE DE LA GRILLE ET UTILISATION DE PIQUETS VERTICAUX

Plusieurs études ont été réalisées afin de permettre de diminuer la résistance de MALT dans le cas où le sol présente une résistivité élevée. Parmi ces études, nous trouvons une étude réalisée sur l'optimisation de la conception des grilles de mise à la terre utilisant des stratégies évolutives [5]. Les résultats obtenus par cette étude démontrent l'effet de l'augmentation du nombre de mailles de la grille de MALT permet de réduire significativement la résistance de MALT. Cependant, avec l'augmentation du nombre de mailles, le coût de la conception de la MALT augmente également. Par conséquent, la longueur totale des conducteurs utilisés dans le système doit être prise en compte. Une autre étude a également permis de démontrer que la taille des mailles de la grille avait également un impact sur l'impédance de MALT en régime transitoire avec une diminution de l'impédance transitoire de MALT lorsque la taille des mailles augmente [6].

Dans les postes électriques, la géométrie des grilles de MALT peut être de différentes formes et avec un maillage pouvant être symétrique (conducteurs également espacés) ou asymétrique (conducteurs inégalement espacés). Différentes études ont été réalisées sur les espacements égaux et inégaux entre les conducteurs afin de comparer leur impact sur le système de MALT. Dans certains cas étudiés, l'espacement des conducteurs de grille qui augmente progressivement de la périphérie vers le centre permet d'égaliser la densité du courant dans les conducteurs et donc réduire le potentiel

de surface [7]. De plus, cette configuration de mailles inégales permet de réduire de 30 % la quantité de matériaux utilisés pour réaliser la grille de MALT par rapport à une grille de dimension identique mais ayant un maillage régulier.

Une autre technique pour améliorer la résistance de MALT pour des sols à haute résistivité consiste en l'ajout des piquets verticaux (ou pieux). En effet, il a été rapporté que plus le nombre de tiges enfoncées dans le sol augmente, plus la résistance de MALT s'en trouve diminuée [8-9].

2.3.2 UTILISATION DES MATÉRIAUX D'AMÉLIORATION DE LA RÉSISTIVITÉ DU SOL (GEM)

Le but des matériaux d'amélioration de la résistivité du sol (Ground Enhancement Materials (GEM) en anglais) est de diminuer la résistivité du sol autour des conducteurs constituant la grille de MALT afin d'assurer un bon écoulement du courant de défaut. Ces matériaux sont généralement appliqués dans les zones sèches où la résistivité du sol est élevée. À cet effet, une quantité importante de recherches a été réalisée dans le but de trouver les meilleurs matériaux d'amélioration du sol (GEM) [10-11].

Les GEM peuvent être trouvés sous forme naturelle ou chimique tels que la bentonite [12-13], les additifs de graphite [14], les déchets recyclés principalement issus de la production naturelle [15] et les ciments électriquement conducteurs (CEE)

qui sont également proposés dans [16-17] pour réduire la résistivité de terre et améliorer les performances sous condition de défauts de courant transitoire [17-18].

En termes de comparaison, bien que les fibres de carbone elles-mêmes soient beaucoup moins conductrices que les fibres d'acier, les composites de ciment avec des fibres de carbone sont de meilleurs conducteurs que ceux réalisés avec des fibres d'acier. Ceci s'explique principalement par la taille extrêmement fine des fibres de carbone qui fournit une meilleure conductivité électrique inter-fibres [19]. Comme la teneur en humidité des éprouvettes était l'un des facteurs les plus importants influençant la résistivité du mortier conducteur, l'étude proposée dans [20] a démontré la possibilité d'utiliser le revêtement époxy pour éviter l'évaporation de l'humidité. De plus, l'utilisation de la bentonite comme substitut partiel du ciment a montré une meilleure performance mécanique contre les attaques acides par rapport à celle du béton ordinaire ainsi qu'une amélioration de la résistance à la compression [21]. Cependant, ces ajouts apportent des effets secondaires indésirables. Par exemple, l'utilisation de graphite dans le béton peut entraîner une certaine réduction de la résistance mécanique du béton en raison du fait qu'il s'agit d'un matériau hydrophobe [14].

2.3.3 UTILISATION DE L'ÉLECTRODE UFER

Une autre alternative aux techniques GEM est l'utilisation des électrodes enrobées de béton (EEB), également appelée mise à la terre Ufer, une solution inventée par Herbert G. Ufer pendant la deuxième guerre mondiale pour améliorer la mise à la terre des grandes structures militaires en zone arides [22]. La méthode Ufer utilise

simplement les armatures métalliques du béton armé comme des électrodes de mise à la terre [23].

L'utilisation de la méthode Ufer joue un rôle important dans l'amélioration de l'efficacité du système de mise à la terre, même dans des conditions de sol défavorables. En effet, des études sur l'utilisation de piquets enrobés de béton ont donné des résultats très intéressants dans lesquels des essais dans des sols à haute, moyenne et faible résistivité montrent que l'efficacité de cette méthode est comparable à celle des électrodes conventionnelles pour des résistivités du sol faibles à moyennes. Par contre, cette technique présente de meilleures performances par rapport aux électrodes conventionnelles lorsque la résistivité du sol est élevée [24].

D'autres recherches effectuées sur la méthode Ufer ont permis également de démontrer l'efficacité de cette méthode dans le cas de courants de défaut élevés [25]. Il a ainsi été démontré que la méthode Ufer permet d'obtenir une faible résistance de MALT avant et après l'application des courants de défaut d'amplitude élevée. Cependant, cette étude a permis de constater que lorsque l'amplitude du courant de défaut est élevée (autour de 2 600 A), cela peut dans certains cas endommager partiellement ou complètement le béton présent autour de l'électrode. Dans ces circonstances, le système de mise à la terre Ufer est préconisé pour les applications à faible courant de défaut telles que les installations électriques du bâtiment, mais il n'est pas recommandé pour postes électriques de puissance [15].

2.4 UTILISATION DU BÉTON ÉLECTRIQUEMENT CONDUCTEUR (BEC)

2.4.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BEC

Le béton électriquement conducteur (BEC) est considéré comme un composite cimentaire contenant des composants électriquement conducteurs pour obtenir une conductivité électrique élevée par rapport au béton conventionnel. Une étude réalisée par Yehia et Tuan a permis de proposer un modèle électrique simple représentant le BEC comme un matériau semi-conducteur composé d'une résistance et d'un condensateur variables en série pour modéliser les matériaux conducteurs ajoutés au béton (les fibres de carbone ou le graphite), le tout en parallèle à une résistance fixe qui modélise la matrice cimentaire [26].

Pour les caractéristiques intrinsèques du béton, plusieurs facteurs peuvent avoir des effets sur la résistivité électrique du BEC tels que les conditions environnementales, notamment la température et l'humidité de sorte que lorsque la température augmente, elle augmente la mobilité des ions et par conséquent diminue la résistivité. De même pour l'humidité, plus le milieu est humide, plus il contribue à l'amélioration de la conductivité électrique puisque l'eau permet d'augmenter la conductivité ionique de la matrice cimentaire [27-28].

Concernant la mesure de la résistivité du BEC, plusieurs recherches montrent que l'utilisation du courant continu (DC) n'est pas adaptée à cause des phénomènes de

polarisation et c'est pour cela que l'utilisation d'un courant alternatif est préconisé pour caractériser des systèmes électriques complexes que sont les BEC [14-28].

2.4.2 ÉTUDES RÉALISÉES JUSQU'À CE JOUR

Depuis maintenant plus de deux décennies, les chercheurs se sont attachés à développer des formulations de béton électriquement conducteur qui permettent d'atteindre simultanément une conductivité et une résistance mécanique élevées. L'objectif principal a été, jusqu'à aujourd'hui, d'utiliser les BEC pour produire des applications à grande échelle dans le domaine du transport afin de proposer des solutions efficaces pour lutter contre les accumulations de neige et de glace au sol. En particulier, plusieurs tests expérimentaux ont été réalisés au cours de la dernière décennie pour valider la viabilité des BEC comme la mise en place d'un tablier de pont chauffant ou encore une section de piste aéroportuaire chauffante [29-33]. Les résultats obtenus après plusieurs hivers d'utilisation ont démontré que la conductivité électrique des BEC au cours du temps diminuait rapidement lors des deux premiers mois pour finalement se stabiliser à des valeurs suffisantes permettant un dégivrage efficace lors des accumulations de neige et de glace, le tout avec une consommation énergétique satisfaisante. D'autres études ont également permis de démontrer que les BEC pouvaient être utilisés pour développer des blindages contre les ondes électromagnétiques en ajoutant au béton des agrégats de magnétite [31].

En ce qui concerne l'utilisation des BEC dans le domaine de la mise à la terre, peu d'études se sont penchées sur ce sujet. Cependant, des recherches semblent importantes, notamment celles portant sur l'application des BEC dans les SGS des

postes électriques, où l'intégration de fibres de carbone ou de poudre de graphite avec le BEC peut contribuer à l'amélioration du système MALT [34].

De plus, l'incorporation de fibres d'acier et/ou de carbone a démontré une amélioration significative des propriétés mécaniques du BEC par rapport au béton ordinaire. Cette amélioration se manifeste par une augmentation de la résistance à la compression et à la flexion, ainsi qu'une réduction du retrait de séchage [34-33]. D'autres études ont également indiqué que la résistivité électrique du BEC peut atteindre 500 Ω .cm, demeurant stable malgré les températures élevées du sol [30-35]. De plus, ce type de béton a la capacité d'améliorer la dispersion du courant de foudre et de réduire son échauffement [36].

2.4.3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

L'ajout de fibres d'acier ou de carbone améliore significativement les propriétés mécaniques des BEC par rapport au béton ordinaire avec notamment une augmentation de la résistance à la compression et à la flexion et une diminution du retrait de séchage.

Autre avantage intéressant, une récente étude numérique sur la possible utilisation des BEC dans des fondations de pylônes de lignes électriques a permis de démontrer l'obtention d'une meilleure dispersion des courants de foudre tout en minimisant l'échauffement induit par le passage du courant et ce, comparativement à une fondation en béton ordinaire [36]. En particulier, les simulations numériques ont permis de constater que l'élévation de température de la fondation en BEC induite par le choc de foudre était maintenue à une température proche de la température ambiante

(environ 20°C) alors que pour une fondation en béton ordinaire la température maximale atteinte grimpe à environ 300°C dans les mêmes conditions [36]. Le fait que les BEC aient une conductivité électrique très supérieure au béton ordinaire (d'un facteur 10 à 20 environ), cela permet au courant de défaut circulant dans les conducteurs de la grille de s'évacuer plus rapidement dans le sol. Ainsi, le BEC agit un peu comme une adaptation d'impédance entre la résistivité apparente de la grille et le sol dans lequel elle est enfouie.

De plus, l'ajout du béton électriquement conducteur autour des électrodes de faibles diamètres permet ainsi d'augmenter significativement la surface de contact électrique de ces dernières, tout en permettant de réduire localement la résistivité du sol, ce qui est réalisé avec les GEM. Enfin, l'utilisation des additifs conducteurs à base de carbone et graphite conjointement avec les cendres volantes permet de retarder significativement la corrosion des électrodes qui sont enrobées dans les BEC [33-37].

Les bétons électriquement conducteurs présentent certains désavantages qui peuvent influencer leur performance au cours du temps. En premier lieu, durant la maturation du béton qui peut durer jusqu'à trois mois, une diminution de la teneur en eau due à l'hydratation continue de la pâte de ciment est inévitable, ce qui entraîne une baisse significative de la conductivité électrique des BEC [28]. Cette dernière tend alors à se stabiliser autour d'une valeur qui peut être 10 à 20 fois inférieure à la conductivité mesurée à 7 jours [28]. La perte de la teneur en eau peut être observée lors la température interne du BEC augmente au-dessus de la température d'ébullition et dans ce cas, la perte de conductivité peut être plus importante [29-30].

De plus, l'ajout des matériaux conducteurs peut affecter la maniabilité du béton, ce qui peut être problématique lors de sa mise en place. Également, pour l'instant, les BEC sont principalement produits avec des matériaux non recyclés, ce qui augmente le coût de production par rapport au béton ordinaire. Enfin, un autre inconvénient important de l'utilisation de BEC dans les systèmes de MALT est le manque d'études expérimentales réalisées sur un site réel afin de suivre l'évolution de la résistance de mise à la terre d'un grand système MALT.

2.5 COMPORTEMENT D'UN SYSTEME MALT EN REGIONS FROIDES ET GELÉES

La variation de la résistivité du sol pendant les saisons dans les régions à climat froid constitue une problématique bien présentée pour les systèmes de mise à la terre des postes électriques et cela, spécifiquement lors des périodes hivernales. Les recherches menées pour étudier l'influence des variations saisonnières de la résistance de MALT ont permis de mettre en évidence que la résistivité du sol en période hivernale peut augmenter de manière significative, atteignant des valeurs de 10 à 15 fois supérieures à valeurs observées pendant les saisons estivales [39-40]. Cette augmentation drastique de la résistivité électrique du sol est principalement attribuable à la présence d'un front de gel du sol dont l'épaisseur augmente au fur et à mesure que la saison froide progresse. Initialement, pendant la saison froide, la valeur de la résistance de mise à la terre reste relativement stable. Cependant, à mesure que le front de gel s'étend en profondeur, un point critique est alors atteint lorsque ce dernier atteint la profondeur d'enfouissement de la grille de mise à la terre [39-41]. À ce stade critique,

la résistance de MALT peut alors augmenter jusqu'à 3 fois sa valeur obtenue dans des conditions normales, engendrant ainsi des préoccupations majeures en matière de sécurité du personnel et de protection des équipements électriques [39-42]. Cette situation met en évidence l'impératif de développer des stratégies et des technologies innovantes visant à améliorer les performances de mise à la terre des postes électriques dans les régions à climat froid. Les variations saisonnières de la résistivité du sol et le gel du sol ont un impact significatif sur la stabilité et la sécurité du réseau de distribution électrique, soulignant ainsi l'importance d'aborder ce défi de manière proactive.

2.6 LOGICIELS CHOISIS POUR LA SIMULATION D'UN SGS

Comme il a été présenté dans les sections précédentes, la conception de tout système de MALT dédié aux postes électriques doit s'appuyer obligatoirement sur les normes en vigueur afin d'assurer la sécurité des personnes et des équipements électriques lors de différents courants de défaut. À cet effet, la conception de ces systèmes de MALT est une étape cruciale dans la construction de toute ligne électrique mais également une étape qui peut s'avérer complexe dépendamment du niveau de tension du poste considéré. Heureusement, le développement des outils informatiques ont ainsi permis de faciliter la conception nécessitant un travail itératif afin d'atteindre les exigences des différentes normes américaine IEEE et européenne IEC.

Plusieurs études de simulation de mise à la terre ont été réalisées avec différents logiciels commerciaux qui sont dédiés spécifiquement à la conception de MALT tel

que CDEGS pour modéliser une électrode de mise à la terre [43] ou une grille MALT [44-45]. Ainsi plusieurs configurations de sol ont été analysées afin de déterminer la meilleure configuration d'un modèle d'armature en béton de fondation a également été ajouté et connecté à des électrodes de mise à la terre [46]. Une autre étude a été réalisée avec le logiciel SKM pour étudier le GPR, la tension de contact et la tension de pas du système [47]. Dans [48], des dispositifs de mise à la terre avec grilles ont été réalisés pour le contrôle de potentiel afin d'assurer la sécurité des personnes à l'intérieur de la zone protégée en cas de coup de foudre.

Plusieurs autres logiciels sont disponibles pour la simulation dans laquelle le choix dépend du cas de besoin. Le tableau 1 résume quelques propriétés pour ces logiciels. Malgré la variété des logiciels, la majorité d'entre eux se limitent à simuler uniquement les systèmes MALT conventionnels avec coûts importants entre 9 900 \$ et 105 000 \$.

Tableau 1: Étude comparative de logiciels commerciaux.

	CDEGS			ETAP	WinIGS
	AutoGrid Design	MultiGround	MultiGroundZ		
Modèle de sol à une couche	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Modèle de sol à deux couches	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Modèle de sol à couches infinies	Non	Oui	Oui	Non	Non
Calcul des tensions limites selon IEEE	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Calcul des tensions limites selon IEC	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Effets de résistivité	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Considération de l'impédance du conducteur ⁽¹⁾	Non	Non	Oui	Non	Quelques versions
Calcul de protection contre la foudre	Non	Oui	Oui	Non	Oui
3D Rolling Sphere pour les calculs de protection contre la foudre	Non	Non	Non	Non	Oui
Domaine transitoire	Qu'avec le module Multifields			Non	Non
Méthode WENNER pour la modélisation du sol	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Méthode Schlumberger pour la modélisation du sol	Oui	Oui	Oui	Non	Non

	CYMGRD	XGSLab		SafeGrid	SKM
		GSA	GSA_FD		
Modèle de sol à une couche	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Modèle de sol à deux couches	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Modèle de sol à couches infinies	Non	Non	Non	Oui	Non
Calcul des tensions limites selon IEEE	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Calcul des tensions limites selon IEC	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets de résistivité	Oui	Oui	Oui	Oui	Non spécifié
Considération de l'impédance du conducteur ⁽¹⁾	Oui	Oui	Oui	Oui	Non spécifié
Calcul de protection contre la foudre	Non	3D avec le module SHIELD		Oui	Non spécifié
3D Rolling Sphere pour les calculs de protection contre la foudre	Non	Non	Non	Oui	Non spécifié
Domaine transitoire	Non	Qu'avec le module XGSA_FD		En cours de développement	Non
Méthode WENNER pour la modélisation du sol	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Méthode Schlumberger pour la modélisation du sol	Non	Non	Non	Non	Non

2.7 CONCLUSION

Ce chapitre a principalement pour objectif de présenter les concepts généraux relatifs à notre projet. Dans une première partie, nous avons présenté les méthodes classiques qui ont été utilisées pour la mise à la terre et les techniques déjà proposées pour les mesures nécessaires de la résistivité du sol et de la résistance de la grille MALT. Par la suite, nous avons cité les différents travaux ayant utilisé du béton électriquement conducteur dans plusieurs domaines. Enfin, nous avons fait un aperçu comparatif avec les logiciels qui sont disponibles pour la simulation des grilles de mise à la terre.

Cette partie de travaux antérieurs enrichira non seulement notre compréhension du sujet, mais fournira également des informations précieuses sur le discours académique plus large entourant notre domaine d'intérêt.

2.8 RÉFÉRENCES

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std 80-2013 Décembre 2013.
- [2] Dawalibi, F. and C. Blattner, Earth resistivity measurement interpretation techniques. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984(2): p. 374-382.
- [3] Mesures de mise à la terre, LEM.
- [4] C. Wang, X. Liang and R. Radons, "Minimum Separation Distance Between Transmission Lines and Underground Pipelines for Inductive Interference Mitigation," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 3, pp. 1299-1309, June 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2941928.
- [5] Sherif Salama Mohamed Ghoneim, Optimization of Grounding Grids Design with Evolutionary Strategies, 2007.
- [6] Djamel Idir, Mémoire de maîtrise à l'université du Québec en Abitibi-Témiscamingue : Modélisation et simulation d'une décharge atmosphérique sur les grilles de mise à la terre, Novembre 2017.
- [7] L. Huang, X. Chen and H. Yan, "Study of unequally spaced grounding groups," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 716-722, April 1995, doi: 10.1109/61.400860.
- [8] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin and M. Z. A. A. Kadir, "The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters," in IEEE Access, vol. 9, pp. 37497-37509, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.
- [9] FLUKE, Résistance de mise à la terre.
- [10] Lim, S.C.; Gomes, C.; Kadir, Z.M.A. Electrical earthing in troubled environment. Elec. Pow. & Ener. Syst. 2013, 47, 117-128.
- [11] Azmi, Aizat et al. "The Use of Enhancement Material in Grounding System: a Review." Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 13.2 (2019): 453. Web.

- [12] S.Lim, C.Gomes, M.Kadir, Preliminary Grounding Performance of Bentonite Mixed Concrete Encased Steel Cage under High Soil Resistivity Condition, Jun. 26-28, 2013, Seoul, Korea.
- [13] Clayton L Hallmark, The use of conductive cement to extend and protect made ground electrodes.
- [14] Kim Iqbal, Electrical characterization of conductive concrete containing graphite powder, August 2021.
- [15] Muhammad Haziq Aniq Bin Zulkifli and Hussein Bin Ahmad. Preliminary result on the enhancement of Ufer electrodes using recycle additives materials. 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 160 012010.
- [16] Farren, E. J.; Hallmark, C. L. Why a low resistance to remote Earth is desirable and how to obtain it. In Proceeding of the Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Phoenix, USA, 10-14 September 2000.
- [17] Schroeder, J. Practical Issues in Grounding: Bentonite vs. Conductive Concrete. In Proceeding of the Protection Enginners Group Conference, Monroe, USA, 5-7 April 2016.
- [18] Androvitsaneas, V. P.; Gonos, I. F.; Stathopoulos, I. A. Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. Electric Power Systems Research, 2016, 139, 109-115.
- [19] N. Banthia, S. Djeridane, M. Pigeon, Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements, Cement and Concrete Research.
- [20] Zhao, Ruohong & Tuan, C. & Fan, Daobo & Xu, An & Luo, Bao. (2017). Ionically Conductive Mortar for Electrical Heating. ACI Materials Journal. 114. 10.14359/51700897.
- [21] Benaissa, Mohamed & Bendani, Karim & Belas, Nadia & Belguesmia, Khalil & Missoum, Hanifi. (2016). Effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés des mortiers et des bétons autoplaçants. Matériaux & Techniques. 104. 608. 10.1051/mattech/2017021.
- [22] Ufer, H.G. Investigation and Testing of Footing-Type Grounding Electrodes for Electrical Installations. IEEE Trans. On Pow. App. & Syst. 1964, 83(10), 1042-1048.
- [23] National Electrical Code, 1968.

- [24] B. Alex, S.Daniel, G. Alfredo, C.Roberto, B.Arturo, M.Tello, Transient Evaluation of Grounding Encased in Concrete: a Study Based on Real Measurements in Power Systems Configurations, June 2017.
- [25] ERICO, Practical Guide To Electrical Grounding, First Printing, First Edition, August 1999.
- [26] C. Y. Tuan et S. Yehia, "Conductive concrete overlay for bridge deck deicing," éd: ProQuest Dissertations Publishing, 1999.
- [27] Sofi, A., Iqbal, S.M., Mir, S.A., Mohmmad, Wani, V., & Masoodi, E.A. (2016). Electrically Conductive Concrete Formed By Using Waste Coke Proving Beneficial For Grounding.
- [28] Cosoli, Gloria & Mobili, Alessandra & Tittarelli, Francesca & Revel, Gian & Chiariotti, Paolo. (2020). Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review. Applied Sciences. 10. 9152. 10.3390/app10249152.
- [29] P. Xie et J. J. Beaudoin, "Electrically Conductive Concrete and its Application in Deicing", International Concrete Abstracts Portal, Vol. 154, pp. 399-418, mai 1995.
- [30] D. D. L. Chung, "Electrically conductive cement-based materials", Advances in Cement Research, Vol.16, No. 4, pp. 167-176, octobre 2004.
- [31] B. R. W. Murdoch, "Electrically conductive building material," United States Brevet 5,908,584, 1999.
- [32] A. S. El-Dieb, M. A. El-Ghareeb, M. A. H. Abdel-Rahman, et E. S. A. Nasr, "Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers," Journal of Building Engineering, vol. 15, pp. 61-69, 2018/01/01/ 2018.
- [33] A. Sassani, H. Ceylan, S. Kim, A. Arabzadeh, P. C. Taylor, et K. Gopalakrishnan, "Development of Carbon Fiber-modified Electrically Conductive Concrete for Implementation in Des Moines International Airport," Case Studies in Construction Materials, vol. 8, pp. 277-291, 2018/06/01/ 2018.
- [34] Rahman, M. L.; Malakooti, A.; Ceylan, H.; Kim, S.; Taylor, P. C. A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation. Constr. and Buil. Mat. 2022, 329, 127139.
- [35] Tuan, C.Y. Electrical Resistance Heating of Conductive Concrete Containing Steel Fibers and Shavings. ACI Mat. Jour. 2004, 101(1), 65–71.

- [36] Tian, X.; Pei, F.; Liu, X.; Jia, L.; Deng, C.; Lan, F.; Cheng, H. Analysis of Electrothermal Characteristics of Conductive Concrete Foundation of Power Tower. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci. 2020, 571(1), 012057.
- [37] Xu, T.; Feng, P.; Xin, L.; Lulu, J.; Chenxing, D.; Pinghao, Y.; Hongbo, C.. Comparison of corrosion characteristics of conductive concrete. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, 431(1), 012048.
- [38] J. A. Lago Araujo Seixas, “Développement d’un béton électriquement conducteur par utilisation des résidus de bauxite brutes ou transformés”, mémoire de maîtrise en Ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, 2021.
- [39] J. He, Y. Gao, R. Zeng, W. Sun, J. Zou and Z. Guan, Z. “Optimal Design of Grounding System Considering the Influence of Seasonal Frozen Soil Layer” (IEEE transactions on power delivery number 20 volume1 January 2005 pages 107-115).
- [40] J. He, R. Zeng, Y. Gao, Y. Tu, W. Sun, J. Zou and Z. Guan “Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System” (IEEE Transactions on Power Delivery volume 18 number 3 July 2003 pages 788-795).
- [41] J. He, J. Wu, B. Zhang and R. Zeng “Fault Current-Division Factor of Substation Grounding Grid in Seasonal Frozen Soil” (IEEE Transactions on Power Delivery volume 28 number 2 April 2013 pages 855-865).
- [42] C. Wang, X. Liang, E.P. Adajar and P. Loewen “Investigation of Seasonal Variations of Tower Footing Impedance in Transmission Line Grounding Systems” (IEEE Transactions on Industry Applications volume 53 number 3 May/June 2021 pages 2274-2284).
- [43] W. Ruan, J. Ma, J. Liu, F. P. Dawalibi and R. D. Southey, "Performance of HVDC ground electrode in various soil structures," Proceedings. International Conference on Power System Technology, 2002, pp. 962-968 vol.2, doi: 10.1109/ICPST.2002.1047542.
- [44] S. Alyami, "Grid Grounding Calculations for a 132-KV Substation Using Soil Backfilling," in IEEE Access, vol. 7, pp. 104933-104940, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932447.
- [45] Nikolovski, Srete & Barić, Tomislav. (2004). Computer Aided design of Transformer Station Grounding System Using CDEGS. Acta Polytechnica. 44. 85-89.
- [46] A. Esmaeilian, A. A. Shayegani Akmal and M. Salay Naderi, "Wind farm grounding systems design regarding the maximum permissible touch & step

voltage," 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2012, pp. 74-79, doi: 10.1109/EEEIC.2012.6221545.

- [47] G. Gilbert, Y. L. Chow, D. E. Bouchard and M. M. A. Salama, "Optimization of high voltage substations using a random walk technique," 2011 IEEE PES 12th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO), 2011, pp. 1-7, doi: 10.1109/TDCLLM.2011.6042219.
- [48] M. Rock, K. Müller, E. Shulzhenko and R. Schünge, "Mesh width of ground grids in shelters with small base areas for low step voltages at lightning currents," 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICLP.2018.8503353.

CHAPITRE 3

ARTICLE 1: NUMERICAL INVESTIGATION OF THE USE OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETE-ENCASED ELECTRODES AS POTENTIAL REPLACEMENT FOR SUBSTATION GROUNDING SYSTEMS

Cet article est publié:

Daadaa, M.; Brettschneider, S.; Volat, C.; Simard, G. Numerical Investigation of the Use of Electrically Conductive Concrete-Encased Electrodes as Potential Replacement for Substation Grounding Systems. *Energies* 2023, 16, 4410. <https://doi.org/10.3390/en16114410>.

Résumé : Cet article présente une étude numérique concernant la possibilité d'utiliser du béton électriquement conducteur (ECON) combiné à la technologie d'électrode enrobée de béton (CEE) pour développer de nouveaux systèmes de mise à la terre de sous-stations (SGS) appelés ECON-EE, en remplacement des grilles de mise à la terre conventionnelles en cuivre ou en acier galvanisé. Dans une première étape, la validation du logiciel commercial d'éléments finis (FEM) utilisé pour effectuer l'analyse du système de mise à la terre a été réalisée en termes de résistance de la grille (RG), d'élévation du potentiel de la terre (GPR) et de tensions de pas et de contact, en utilisant une SGS conventionnelle en cuivre symétrique de 70 m × 70 m. Ensuite, plusieurs simulations numériques d'un système de mise à la terre ECON-EE avec les mêmes dimensions que la grille conventionnelle en cuivre utilisée pour la validation du logiciel FEM ont été réalisées. Ainsi, plusieurs paramètres du système de mise à la terre ECON-EE ont été étudiés, tels que la géométrie, les dimensions et la résistivité de

l'ECON, ainsi que le diamètre des barres d'armature. Les résultats numériques obtenus nous permettent de démontrer que les systèmes de mise à la terre ECON-EE peuvent être plus performants que les SGS conventionnelles équipées de barres verticales, notamment dans le cas d'une résistivité élevée du sol. De plus, il a été démontré que les deux principaux paramètres de l'ECON-EE affectant la résistance de mise à la terre et les tensions de contact et de pas sont la section et la résistivité de l'ECON. Comme discuté en détail dans cet article, le système de mise à la terre ECON-EE proposé peut offrir plusieurs avantages par rapport aux SGS conventionnelles en termes d'efficacité, de durabilité, ainsi que de simplicité de conception et de mise en œuvre.

Abstract: This paper presents a numerical investigation regarding the possibility of using electrically conductive concrete (ECON) combined with concrete-encased electrode (CEE) technology to develop new substation grounding systems (SGSs) called ECON-EE as a replacement for conventional copper or galvanized steel grounding grids. In the first step, the validation of the commercial FEM software used to perform grounding system analysis was performed in terms of the grid resistance (R_G), ground potential rise (GPR), and step and touch voltages, using a symmetrical 70 m \times 70 m conventional copper SGS. Next, several numerical simulations of an ECON-EE grounding system with the same dimensions as the conventional copper grid used for FEM software validation were performed. Thus, several parameters of the ECON-EE grounding system were studied, such as the geometry, dimensions, and resistivity of ECON and the diameter of the rebar. The numerical results obtained permit us to demonstrate that ECON-EE

grounding systems can perform better than conventional SGSs equipped with vertical rods, particularly in the case of high ground resistivity. Moreover, it was demonstrated that the two main ECON-EE parameters affecting the grounding resistance and the touch and step voltages are the section area and the resistivity of the ECON. As discussed in detail in this paper, the proposed ECON-EE grounding system can offer several advantages compared to conventional SGSs in terms of efficiency and durability, as well as in terms of simplicity of conception and implementation.

Keywords: grid resistance; substation grounding systems; electrically conductive concrete-encased electrode; FEM simulations

3.1 INTRODUCTION

Grounding systems are some of the most important components in all electrical networks and particularly in substations. Correctly designed grounding systems ensure the protection of the equipment and the safety of the personnel from the dangers of electrical faults, as well as providing the continuity of the power supply [1–3]. In general, a substation grounding system (SGS) is constituted of copper-based wire or galvanized steel tape arranged as a horizontal mesh of varying size, buried in the ground, and connected to all the electrical equipment and towers present in the substation. In case of high earth resistivity, vertical rods can be added to the horizontal mesh to reach layers of lower resistivity at a greater depth [3]. SGS provides low grounding resistance in order to meet electrical safety standards in terms of the resulting ground potential rise (GPR) and the ensuing touch and step voltages [4,5].

Over the last few decades, a huge amount of research has been conducted on improving conventional SGSs. One of the solutions commonly considered in the case of high ground resistivity is to employ a ground enhancing material (GEM), as presented in a detailed review in [6,7], which can be found in natural or chemical form.

As GEM is effective in reducing grounding resistance, one of the main concerns in using GEM lies in the possibility of it being leached away by heavy rainwater or, for some chemical products, the risk of increasing the corrosion of the grounding electrodes, as well as environmental contamination [6,7]. To address this issue, electrically conductive cement (ECC), another chemical GEM, has also been proposed since the mid-1970s [8,9]. Once hardened, ECC becomes an electrically conductive solid encapsulating the electrode, resulting in a durable decrease in ground resistance even in dry soil conditions, and excellent performance under transient current faults [9–11]. Moreover, ECC is environmentally safe and maintenance-free as it is significantly more durable than soft GEM and contributes to protecting the copper electrode against corrosion and theft [8,9].

Another alternative to GEM techniques is the use of concrete-encased electrodes (CEEs), also called Ufer grounding [12]. CEE grounding exploits the advantages of the chemical properties of ordinary concrete coupled with the presence of steel reinforcing rods (commonly called rebars) [13]. In CEE grounding, the dissipation of the fault current in the ground is ensured by the steel rebars acting as electrodes and the concrete, which, as with ECC, significantly increases the electrical contact surface area of

electrodes with the surrounding ground. Studies have demonstrated that CEE grounding is equal or even superior to conventional grounding, with a significant reduction in the value of the grounding impulsive impedance both in low and high soil resistivity [13,14]. This technology has been used for a long time in building footers and concrete floors, as well as in communication towers and steel transmission towers [6,12,13]. However, to the best of our knowledge, very few studies have been conducted on the possibility of using CEE as a replacement for the entire substation grounding. This partly explains the current lack of consensus and standards (IEC or IEEE) for the use of CEE in large substations, although there are a few CEE requirements in the National Electrical Code (NEC) [15]. Another important aspect regarding the use of CEE in building grounding versus substations is that in large buildings, foundations buried deep in the ground provide a large contact surface with generally moist ground. This situation permits us to compensate for the poor electrical conductivity of ordinary concrete used in CEE grounding [13]. This is not the case for substations where the grounding grid is generally buried at a lower level, between 0.5 m and 1.5 m, where the moisture content can be low [6]. In this context, it is necessary to take into account the limitation of the size of each section constituting the grounding grid, which provides a small surface of contact with the surrounding ground compared to the foundations of a building. From these observations, it becomes evident that ordinary concrete used in CEE is not suitable for SGSs.

To address this issue, one solution can be found by combining the advantages of ECC with those of CEE. ECC can provide low resistivity compared to ordinary concrete but, being a cement, it cannot achieve the mechanical properties of concrete

made with aggregates of larger size and reinforced with rebars [9,13]. Such a solution can be found in the use of electrically conductive concrete (ECON) as a replacement for ordinary concrete in CEE. Over the last three decades, a huge number of studies have been performed to develop ECON dedicated mainly to heating and de-icing functions [16,17] As reported in a recent comprehensive review [18], ECON is obtained by incorporating steel or carbon fibers, steel shavings, graphite powder, graphene, and carbon nano-tubes [18]. ECON can achieve durable electrical resistivity of 500 Ω -cm [17–19], which is up to 10 times lower than concrete buried deeply in the ground [13]. Several practical applications have been conducted over the last two decades, which have permitted us to evaluate the efficiency, durability, and mechanical properties, as well as the cost of such ECON heating and de-icing systems for bridge decks, airport runways, and highways [18–20].

Although ECON can now be considered a mature technology in the field of heating and de-icing systems, a small number of applications have been proposed for its use in grounding systems and particularly in substations as a copper grid replacement [21–23]. In one study [21], ECON with a resistivity of 500 Ω -cm was simply used as a GEM, forming a slab of 1.25 m thickness in which the entire substation grounding grid area of 120 m x 85 m was embedded. Although the results obtained under a switching surge current are very promising, such a solution is not cost-effective and is difficult to implement in a large substation. Another study has proposed the use of ECON for rod grounding electrodes, which were laid in parallel on the bottom and side walls of the foundation ditch of a transmission tower to build a new type of stereo grounding grid for transmission towers [22]. This study proposed both an ECON mix

as well as experimental on-site resistance to achieve ground measurement. The results obtained demonstrated that the resistivity of the ECON mix becomes stable after 42 days of aging with a value of $530 \Omega\text{-cm}$, and its fluctuation between 40°C and 50°C was less than 5%. In another study [23], the electric heating effect of a classical model of transmission tower foundation using ECC with rebars (Ufer grounding) was numerically investigated in order to compare its behavior under a lightning strike when ordinary concrete or ECON is used. The results obtained demonstrated that the use of ECON in the ECC grounding permits obtaining better grounding current dispersion, resulting in a drastic decrease in the internal temperature inside the foundation, which remains uniform compared to ordinary concrete.

Using ECON combined with CEE technology seems to be an interesting alternative as a replacement for conventional copper or galvanized steel grounding grids used in SGSs. However, as demonstrated in the above literature review, very little research has focused on this specific subject despite technological progress made in ECON development. With the aim of demonstrating the feasibility of using ECON-EE technology in a large SGS, this paper presents some preliminary results obtained from a numerical investigation of a substation grounding system of $70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ buried at a depth of 0.5 m . Comparisons between the same grid made with a regular copper conductor mesh with and without vertical rods and a grid made with the proposed ECON-encased electrode (ECON-EE) mesh were performed in terms of grid resistance, GPR, and step and touch voltages. These important parameters in grounding design were also investigated as a function of ECON electrical conductivity and geometry, as well as the diameter of the steel electrodes encased in the ECON. The

numerical investigation was performed using the commercial finite element analysis software package Comsol Multiphysics®, version 5.5. Although Comsol Multiphysics® has been used to successfully calculate the grounding resistance of simple vertical rods in different configurations [24–27], it was decided to validate, as a first step, its capacity to model more complex conventional grounding systems by comparison with results available in the literature and obtained from different commercial grounding design software packages [28]. Particular attention has been paid to the dimensions used for the soil model, as it has a direct influence on the calculation of the ground resistance, as demonstrated in this paper.

The results obtained represent an initial step toward demonstrating the feasibility of using ECON-EE technology as a replacement for conventional copper grid substation grounding. Indeed, the different results obtained permitted us to demonstrate that the proposed ECON-EE grounding system can perform as well as or even better than a conventional copper grid system equipped with vertical rods, particularly in areas of high ground resistivity. It was also demonstrated that designing such a new grounding system is quite simple and depends on two main ECON parameters: its section area and its resistivity. The ECON-EE system can also provide an interesting solution to copper theft, which has become a growing problem for electricity infrastructure around the world. Moreover, as ECON-EE technology meets all the requirements in terms of mechanical constraints, such technology could be extended to the foundations of the power equipment and towers present in the substation in order to develop a complete interconnected grounding system.

3.2 VALIDATION OF CONVENTIONAL SGS MODELING USING GENERAL FEM SOFTWARE

3.2.1 GEOMETRY AND PARAMETERS OF AN SGS

Before using the general FEM software Comsol Multiphysics® to model the proposed ECON-EE grounding system, it was decided to validate its capacity to model a conventional SGS. For this, an SGS model extracted from an earthing benchmark study proposed by [28] was used. The grounding grid presents square dimensions of 70 m x 70 m (Figure 6a), buried at 0.5 m in the ground, constructed with a copper conductor of 9.27 mm diameter (2/0 Cu) and symmetrically spaced at 14 m in each direction. The use of vertical rods 7.5 m in length and 15.9 mm in diameter, located at each conductor intersection around the grid perimeter (for a total of 20 rods), was also studied (Figure 6b).

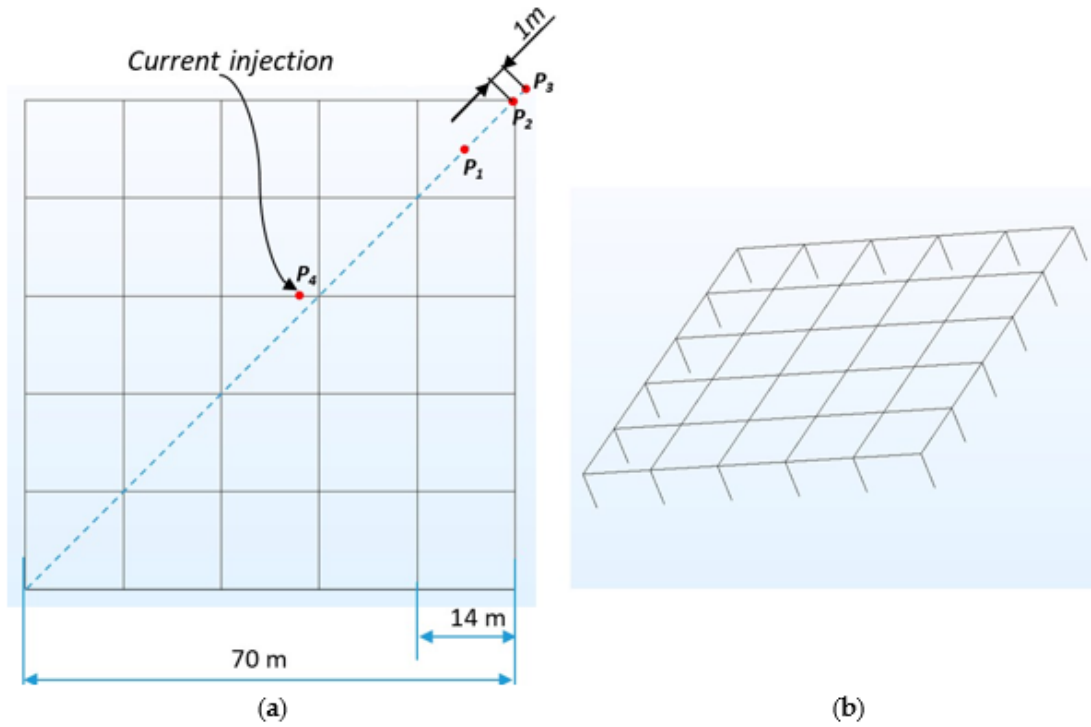


Figure 6: Presentation of the substation grounding grid geometry used for FEM modeling validation: **(a)** without vertical rods; **(b)** with vertical rods.

The simulations were performed for uniform soil with a resistivity ρ of 140 Ω -m (without vertical rods) and for a two-layer soil model with the first layer of 6.096 m depth with a resistivity ρ_1 of 300 Ω -m and the second layer (infinite) with a resistivity ρ_2 of 100 Ω -m (with only vertical rods).

3.2.2 CONSTRUCTION OF THE FEM MODEL OF THE GROUNDING GRID

Figure 7 presents the FEM model of the grounding grid without rods and with a uniform soil model, whereas Figure 8 presents the FEM model with vertical rods and a two-layer soil model. As described in Figure 7, the soil is divided into three

semi-hemispherical regions with the same electrical properties but with different finite element sizes and properties. The inner region, with a fixed radius of 60 m surrounding the grid, uses the finer mesh size to match the mesh size used for the grid, as illustrated in Figure 9. The intermediate region of radius r_i also uses finite elements but with a larger size than the inner region. Finally, the outer region of 10 m width contains infinite elements available in Comsol Multiphysics[®] [29]. All the simulations in this paper were performed under stationary conditions.

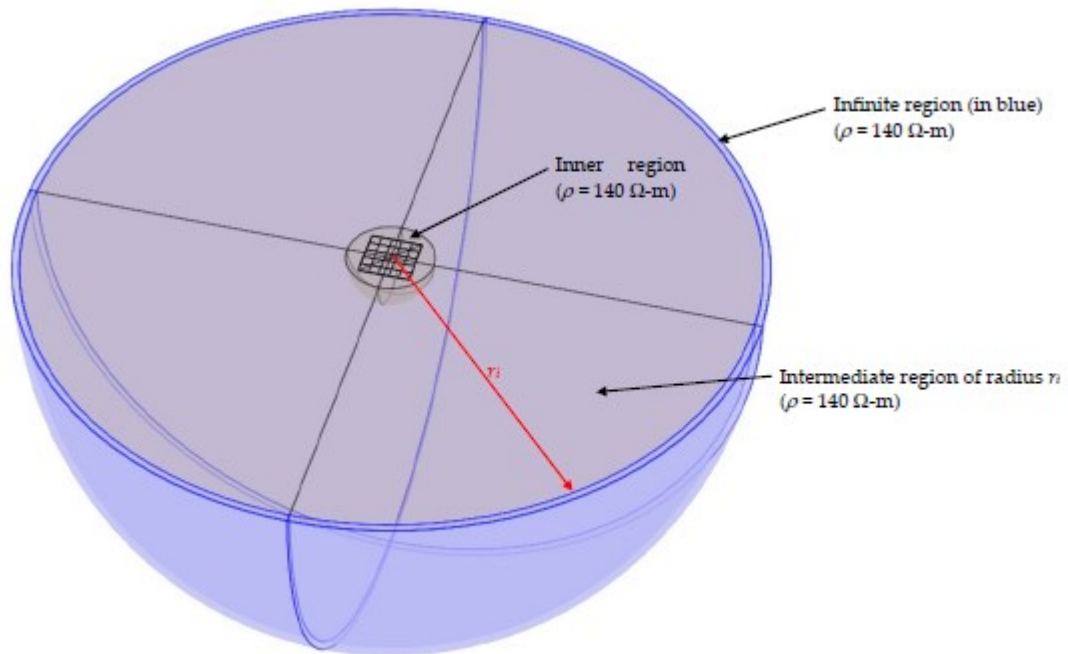


Figure 7: Presentation of the FEM model without vertical rods and with a uniform soil model with a resistivity ρ of 140 Ω -m.

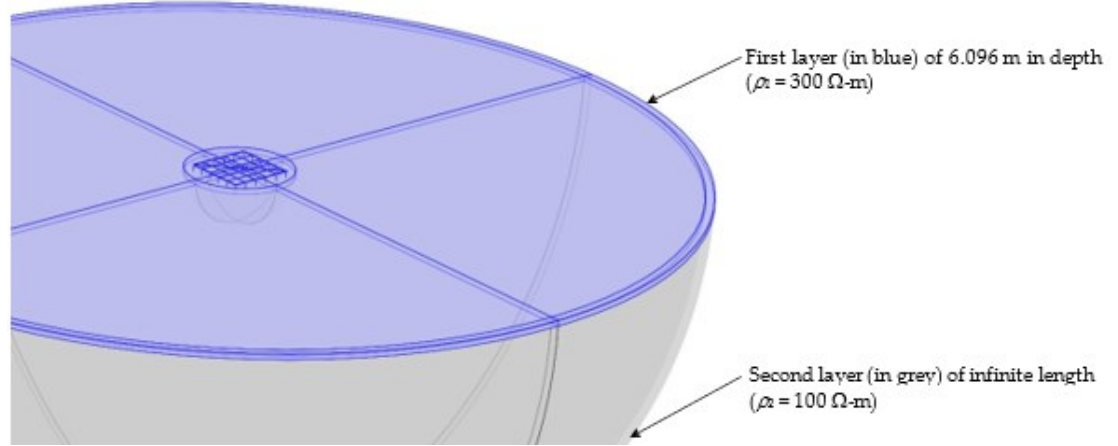


Figure 8: Presentation of the FEM model with vertical rods and with a two-layer soil model, with the first layer of 6.096 m depth with a resistivity ρ_1 of 300 $\Omega\text{-m}$ and the second layer (infinite length) with a resistivity ρ_2 of 100 $\Omega\text{-m}$.

The principal problem with the FEM model is defining the size of the intermediate region as this can directly affect the results of the grounding resistance [24]. Moreover, such information seems difficult to find in the literature, given the lack of consensus on the required minimum size for r_i . Thus, it was decided to perform a parametric study in order to determine the influence of its size on the grounding resistance R_G . As demonstrated in [25], R_G (Ω) can be simply calculated from the dissipated power P_d in the volume occupied by the ground, as follows:

$$R_G = \frac{U^2}{P_d} \quad (3.1)$$

where U (V) is the voltage applied to the grid and P_d (W) is the dissipated power in the ground, which can be determined with the following expression [25]:

$$P_d = \iiint_V E \cdot J \, dV \quad (3.2)$$

where E (V/m) and J (A/m²) are, respectively, the electric field and the current density flowing in the ground (modeled by the finite and infinite region) produced by the potential U applied to the entire grounding grid.

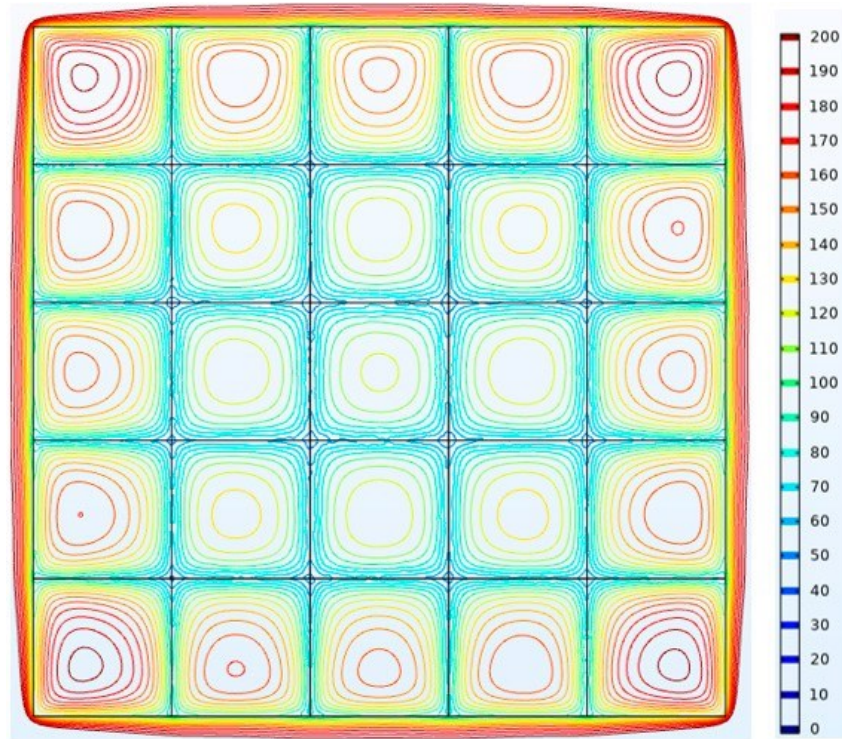


Figure 9: Distribution of the equipotential lines of the touch voltage obtained for a grid without vertical rods and using a uniform soil model with a resistivity of 140 Ω -m.

For R_G calculation, a potential U of 1 V is applied as a boundary condition at all the surfaces of the conductors forming the grid, and a ground condition (0 V) is applied at the exterior surfaces of the infinite region.

Table 2 presents the value obtained for R_G as a function of the parameter k defined as a multiple of the diagonal size d_G of the grid where:

$$r_i = k \cdot d_G \tag{3.3}$$

Table 2: Influence of the dimension of the intermediate region on the grounding resistance.

K	R_G (Ω)	Difference (%)
1	1.284	-
2	1.108	22.47
3	1.054	6.09
4	1.021	3.40
5	1.001	2.09
6	0.999	0.20
7	0.998	0.10

As can be observed in Table 2, the value of the grounding resistance R_G decreases when k (or r_i) increases until a certain value where the decrease in R_G becomes non-significant. Indeed, when k changes from 5 to 6, the change in the R_G value is less than 0.20% and it decreases to 0.10% for k equal to 7. In this way, the change in R_G becomes negligible and, considering that increasing the size of the finite region increases the number of finite elements as well as the calculation time, a k value equal to 5 for all the simulations seems to be the best compromise.

3.2.3 VALIDATION OF THE PROPOSED FEM MODEL

This section presents the comparison of the results obtained with the proposed FEM model and the results extracted from the benchmark study [28]. Figure 9 presents the FEM model used for a two-layer soil system using the same k value of 5 obtained in the previous section.

Once the R_G value is calculated using Equation (3.1), another simulation is

performed to determine the GRP and the step and touch voltages with a current I of 744.8 A injected in the grid at the point P_4 defined in Figure 6a and used in [28]. The step voltage (V_{step}) is computed as the potential difference between the ground surface potential 1 m apart, with one point directly over the corner of the grid and the other on a diagonal and 1 m outside the grid (points P_2 and P_3 in Figure 6a). The touch voltage (V_{touch}) was calculated at the center of the corner mesh (point P_1 in Figure 6a), and its determination requires the implementation of an equation in Comsol Multiphysics[®], which is expressed as follows:

$$V_{touch} = GPR - V_{surface} = I \times R_G - V_{surface} \quad (3.4)$$

Where $V_{surface}$ represents the potential distribution obtained at the ground surface and GPR is the ground potential rise defined as the product of the injected current I by the grounding resistance R_G calculated at the first step.

Table 3 presents a comparison of the results obtained for the FEM grid model with- out vertical rods (Figure 6a) and with uniform soil, with the results obtained with four grounding design software packages, as presented in [28]. The results are presented as an interval of the lower and higher values obtained by the grounding software packages. In the same way, Table 4 presents the comparison results obtained for the FEM grid model with vertical rods (Figure 6b) and with a two-layer soil model (Figure 8). As can be observed in Tables 3 and 4, very good concordance is obtained with the proposed FEM simulations. In the case of a uniform soil model (Table 3), all the FEM results fall within the range of values obtained with the grounding software

packages. For the two-layer soil model (Table 4), the FEM results are higher by less than 1% than the values obtained with the grounding software packages, except for the step voltage, which is lower by 1%.

Table 3: Comparison of the FEM results with a benchmark study performed for a copper grid without vertical rods and a uniform soil model.

	FEM	Grounding Software [28]
R_G (Ω)	1.00	1–1.01
GPR (V)	745.54	743.9–749
V_{touch} (V)	195.62	194.9–200.34
V_{step} (V)	86.97	70.92–89.3

Figure 9 presents an example of the distribution of the equipotential lines of the touch voltage obtained from Equation (3.4) for the grid without vertical rods and using a uniform soil model; Figure 10 presents the corresponding distribution of the touch voltage along the diagonal of the grid. As can be observed, the distribution of the touch voltage is quite symmetrical at the surface of the grid. The maximum values of the touch voltage distribution are obtained close to the center of each grid mesh and the minimum values are above the electrode intersections.

Table 4: Comparison of the FEM results with a benchmark study performed for a copper grid with vertical rods and a two-layer soil model.

	FEM	Grounding Software [28]
R_G (Ω)	0.980	0.97–0.974
GPR (V)	729.90	719.5–725.75
V_{touch} (V)	271.09	261–268.81
V_{step} (V)	100.52	101.3–117

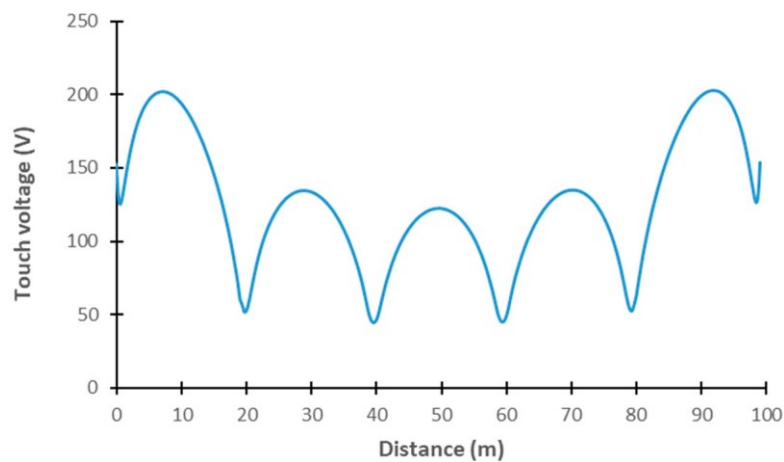


Figure 10: Distribution of the touch voltage along the diagonal of the grid without vertical rods and using a uniform soil model with a resistivity of 140 Ω -m.

The different results presented in this section permit us to demonstrate the capability of a general FEM software package to design a grounding system, as the results provided by it are significantly close to the results obtained from specific grounding design packages.

3.3 NUMERICAL INVESTIGATION OF THE ECON-EE GROUNDING

3.3.1 ECON-EE GROUNDING MODELING

The proposed ECON-EE grounding principle consists of a steel electrode encased in an ECON section to form a grounding grid. For comparison purposes, the geometry and the dimensions of the electrode grid formed by encased electrodes are the same as the 70 m x 70 m grid without vertical rods (Figure 6a) used for the FEM model validation. However, for this study, the two-layer soil model (Figure 8) was used to simulate the worst case in terms of soil resistivity, rather than the uniform soil model of 140 Ω -m.

For all the simulations, the electrical resistivity ρ_E of the ECON was fixed at 5 Ω -m, in accordance with the average values found in the literature [16–22]. The first series of simulations was performed with a conventional steel rebar of 1/2 inch diameter (12.7 mm) used as an electrode, which represents the minimum size specified in the National Electrical Code (NEC) as a reference for Ufer grounding [15]. With this rebar electrode used to form the heart of the grounding grid of 70 m x 70 m area, a parametric study was performed to evaluate the influence of the ECON section dimensions on the grounding resistance R_G . For this, the electrical resistivity of the ECON was kept constant, and the electrical conductivity of the rebar was fixed at 6.7×10^6 S/m, as recommended in [30].

Figure 11a presents an overview of the ECON-EE grounding model and Figure 11b a view of the ECON-EE section parameters. As can be observed, the rebar grid

(in blue) is centered in the ECON square section (in grey) with side length a . A square section was chosen for this study as this geometry can be easily obtained onsite by directly pouring the ECON into the trenches, compared to a circular shape requiring specific molds. As specified in the NEC concerning requirements for Ufer grounding [15], the minimum concrete thickness between the rebar and the soil is equal to 50.8 mm (2 inches), as illustrated in Figure 11b. Considering this, the minimum value for the square section side a must be equal to 114.3 mm (4.5 inches). For all the simulations, the distance between the ground surface and the top of the ECON-EE system was fixed at 0.5 m and kept constant.

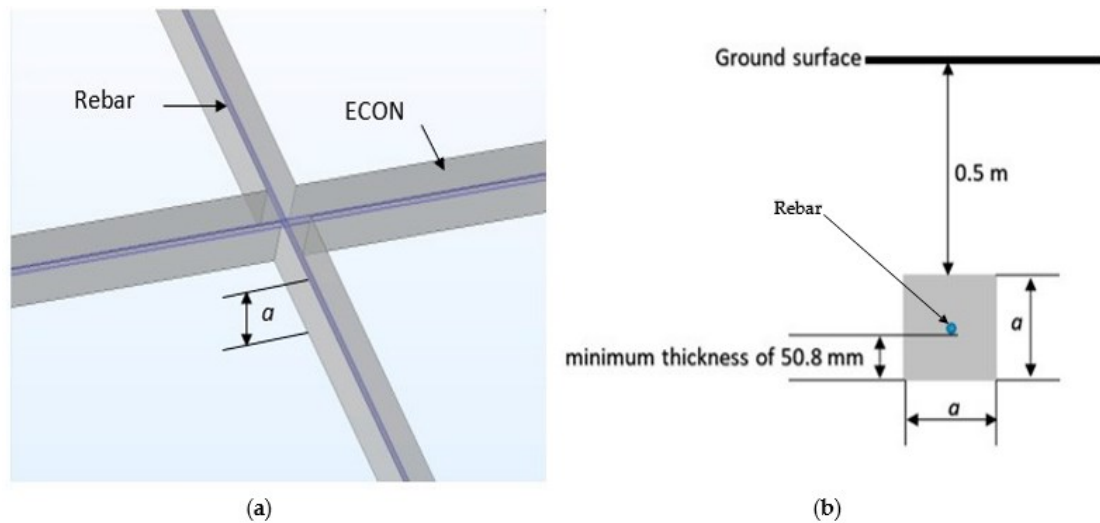


Figure 11: ECON-EE grounding using rebar centered in the ECON square section with side length a : (a) an overview of the ECON-EE system; (b) a view of the ECON-EE section in m.

3.3.2 INFLUENCE OF THE ECON-EE SQUARE SECTION AREA

Table 5 presents the results obtained from the parametric study in terms of ground resistance, GPR, and step and touch voltages. The different voltages were determined at the same points as defined in Figure 6a, for the same injected

current of 744.8 (A) as used in Section 3.2.3. For all the simulations, the distance between the soil surface and the ECON-EE grounding system was constant and equal to 0.5 m. For comparison, Table 6 presents the results obtained for the copper and the rebar grid without ECON under the same conditions.

Table 5: Parametric study results of the ECON-EE square section with side length a with the two-layer soil model.

a (mm)	R_G (Ω)	GPR (V)	V_{touch} (V)	V_{step} (V)
114.3	1.059	789.01	295.38	142.20
139.7	1.047	779.73	285.33	141.68
165.1	1.036	771.34	276.76	140.91
190.5	1.026	764.08	269.08	139.42
215.9	1.017	757.33	262.12	138.41
241.3	1.009	751.23	255.94	137.26
266.7	1.001	745.55	249.83	135.86
292.1	0.994	740.28	244.42	134.60
317.5	0.987	735.31	239.03	133.11
342.9	0.981	730.70	234.46	131.64
368.3	0.975	726.35	229.85	130.12
419.1	0.964	718.09	221.49	127.01
520.7	0.945	703.70	206.97	117.51

Table 6: Comparison of the results obtained for a copper and rebar grid without ECON, with the two-layer soil model, and without vertical rods.

	Copper Grid	Rebar Grid
Conductor diameter (mm)	9.27	12.7
R_G (Ω)	1.188	1.176
GPR (V)	884.96	886.31
V_{touch} (V)	394.88	386.22
V_{step} (V)	117.16	118.71

At first observation, a comparison of the results of Tables 4 and 6 shows that the addition of vertical rods to the copper grid significantly improves the grounding resistance as well as the GPR and the touch and step voltages. This demonstrates the efficiency of vertical rods in the case of soil having low resistivity. In addition, the results of Table 6 demonstrate that the use of rebars as grid electrodes is quite equivalent to the use of copper with regard to the value of R_G and the touch and step voltages. The low electrical conductivity of the rebar (88.82% lower than copper) seems to be compensated for by its larger diameter (37% larger than copper).

The analysis of the parametric study presented in Table 5 shows that the increase in the ECON-EE section leads to a slow decrease in the ground resistance R_G and the corresponding touch and step voltages. As illustrated in Figure 12, the variation in R_G and the touch voltage decrease follow a power curve, whereas the step voltage decreases linearly with the increase in a . As the ground resistance

recommended by the IEEE standard for substations must be equal to or less than 1Ω [4], this critical value is reached from the ECON-EE section side equal to 266.7 mm. With these values, it is interesting to note that the touch voltage is reduced by 7.84 % compared to the results in Table 4 obtained with the copper grid with vertical rods. However, as can be observed from the results in Table 4 and Figure 12, the value of the step voltage obtained with the different ECON-EE surface area remains higher than the value obtained in Table 4 for the copper grid with vertical rods, with a difference between 41.46% for the smaller side a , and 18.10% for the longer side a .

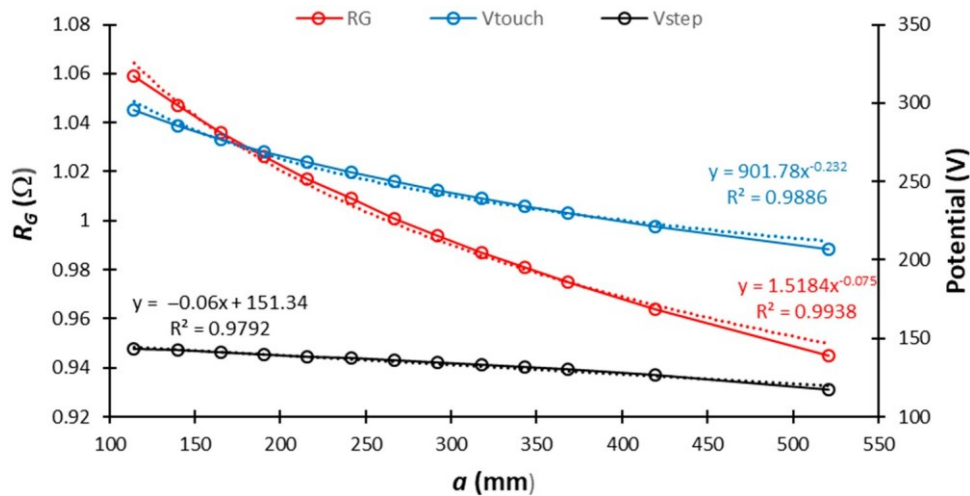


Figure 12: Evolution of the ECON-EE grid parameters as a function of the square section with side length a .

The efficiency of the ECON-EE grounding is also illustrated in Figure 13, presenting the evolution of the distribution of the touch voltage along the grid diagonal (Figure 6a) as a function of the square geometry with side length a , which is compared with the distribution obtained for the copper grid with vertical rods. The

results obtained show that the maximum values of the touch voltage decrease with the increase in the ECON-EE area (or side a).

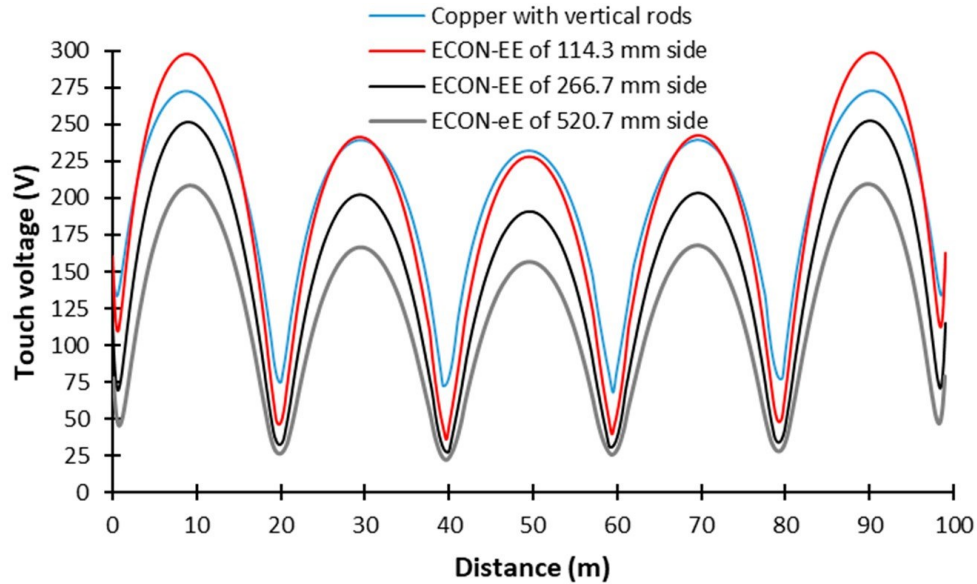


Figure 13: Comparison of the touch voltage distribution along the grid diagonal obtained for the copper grid with vertical rods and three ECON-EE sections with side lengths equal to 114.3 mm, 266.7 mm, and 520.7 mm.

3.3.3 INFLUENCE OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE ECON-EE SQUARE SECTION

In this section, the influence of the electrical resistivity ρ_E of the ECON is investigated for an ECON-EE square section with a side length a of 266.7 mm leading to a grounding resistance value of 1.001 Ω , as presented in Table 5. Table 7 presents the results obtained for different values of ρ_E and its influence on the grounding system parameters. Figure 14 presents the evolution of R_G and the touch and step voltages plotted as a function of the ratio ρ_1/ρ_E , where $\rho_1 = 300 \Omega\cdot\text{m}$ is the resistivity of the first soil layer and ρ_E the resistivity of the ECON-EE. From the results obtained, it can be observed that the grounding resistance and the touch

voltage decrease by 14.88% and 35.31%, respectively, when the ECON resistivity ρ_E decreases from 300 to 5 Ω -m, corresponding to a ρ_1/ρ_E ratio increase from 1 to 60. After this, both the grounding resistance and the touch voltage remain constant as the ECON resistivity decreases or the ratio of ρ_1/ρ_E increases. Such behavior of the grounding resistance is consistent with the results reported in [13,31] in the case of a simple vertical rod embedded in a cylinder of ordinary concrete [13] or GEM [31]. It is also interesting to note that the step voltage follows the opposite trend to the touch voltage, with an increase until a ρ_1/ρ_E value of 60, followed by a constant value for higher ECON resistivities.

Table 7: Influence of the ECON resistivity ρ_E on the ECON-EE grounding system parameter for a square section side length a equal to 266.7 mm and $\rho_1 = 300 \Omega$ -m.

ρ_E (Ω -m)	ρ_1/ρ_E	R_G (Ω)	GPR (V)	V_{touch} (V)	V_{step} (V)
300	1	1.176	886.31	386.22	118.71
150	2	1.090	811.80	319.07	125.21
50	6	1.030	766.93	272.4	131.75
10	30	1.004	748.02	252.11	135.38
5	60	1.001	745.62	249.83	135.86
1	300	0.998	743.61	247.40	136.37
0.25	1 200	0.998	743.61	247.40	136.37
0.01	30 000	0.998	743.61	247.40	136.37

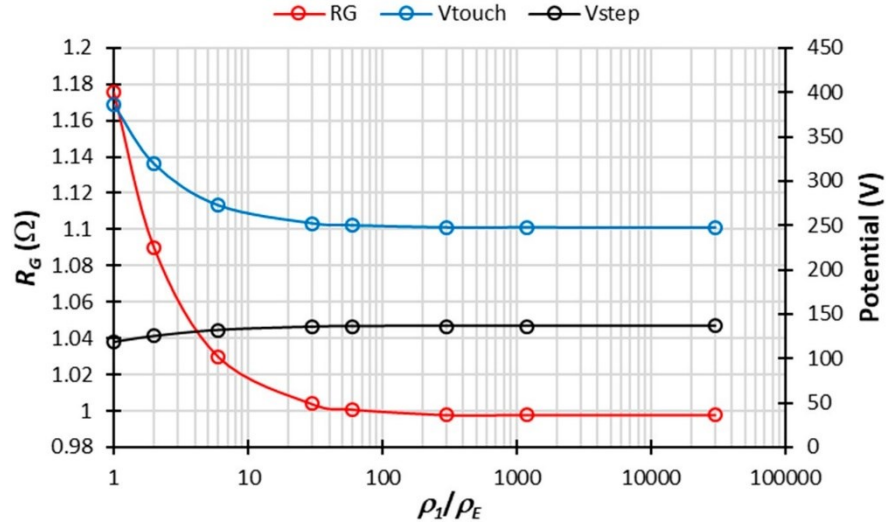


Figure 14: Evolution of the ECON-EE grid parameters as a function of the ratio ρ_1/ρ_E for a = 266.7 mm and $\rho_1 = 300 \Omega\text{-m}$.

3.3.4 INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE ECON-EE SECTION

In this section, the influence of the ECON section geometry is investigated. For this, two section geometries were studied, a circular section (Figure 15a) and a rectangular section (Figure 15b), with the same encased rebar electrode of 12.7 mm diameter used in the previous section and centered in the middle. The simulation parameters were the same as used in the previous section, and the distance between the ground surface and the top of the ECON-EE system was maintained at 0.5 m. In addition, as for the square section, the height of the rectangular section was fixed at 114.3 mm, which is the minimum side dimension of the square section in order to maintain the minimum required ECON thickness between the rebar and the ground at 50.8 mm (see Figure 15a), as required by [15].

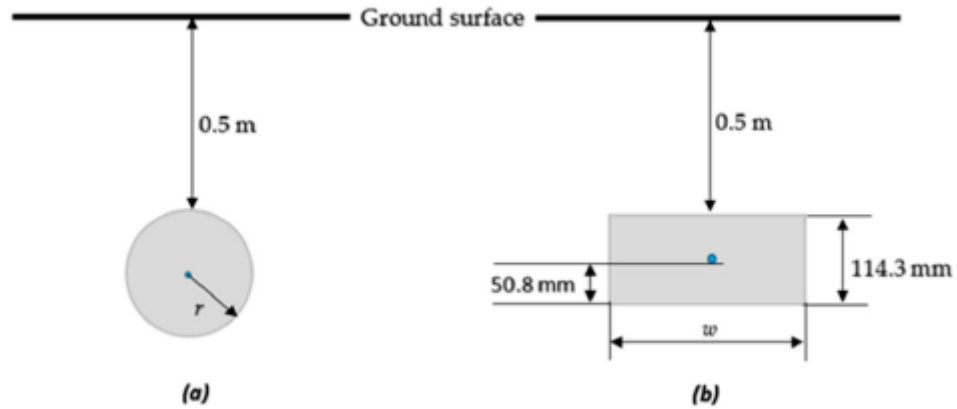


Figure 15: Presentation of the two different sections of the ECON-EE with a rebar of 12.7 mm diameter centered in the middle: **(a)** circular section of radius r ; **(b)** rectangular section of 114.3 mm \times w mm.

In order to study the influence of the ECON section geometry, it was decided to compare the results with those obtained for the square section with side length $a = 266.7$ mm, which permits us to obtain a grounding resistance R_G of 1.001 Ω (see Table 5), equivalent to the minimum value required for large substation grounding [4]. However, for comparison purposes, two different studies were performed: a study where the areas of the circular and rectangular ECON sections were the same as that of the square one, and another where the perimeters of the circular and rectangular ECON sections were identical to that of the square section. The results are presented in the subsections that follow.

3.3.4.1 CIRCULAR AND RECTANGULAR SECTIONS OF THE SAME AREA

Keeping the same area for the circular and rectangular ECON sections as for the square one permits us to keep constant the electrical resistance of the ECON-EE per unit length [32], as well as allowing the same quantity of material required for the

construction of the grounding system. With this assumption, the radius r of the circular section can be defined as follows:

$$r(mm) = \frac{a}{\sqrt{\pi}} = 150.5 \quad (3.5)$$

And the width w can be expressed as follows:

$$w(mm) = \frac{a^2}{114.3} = 622.3 \quad (3.6)$$

Table 8 presents the results obtained for the circular and rectangular sections of the same surface area and compared with the results obtained previously for the square section under the same modeling parameters. As can be observed, the values of the grounding resistance R_G and the touch voltage obtained for the rectangular and circular sections are identical to the values obtained for the square section, with a difference lower than 0.1%, which can be attributed to calculation error. However, for the step voltage, the section geometry seems to have a certain influence, with a difference of 2.22% lower and 5.67% higher for the circular and rectangular sections, respectively, compared to the square one. The evolution of the touch voltage along the grid diagonal presented in Figure 16 confirms that the influence of the different sections is not significant.

Table 8: Influence of the ECON section geometry on the ECON-EE grounding system parameters with the same section area equal to a^2 with $a = 266.7$ mm.

ECON Geometry	Section Area (m ²)	Perimeter (m)	R_G (Ω)	GPR (V)	V_{touch} (V)	V_{step} (V)
Square	0.071	1.067	1.001	745.55	249.83	135.86
Rectangular	0.071	1.473	1.000	744.80	248.05	143.56
Circular	0.071	0.946	1.002	746.29	250.85	132.84

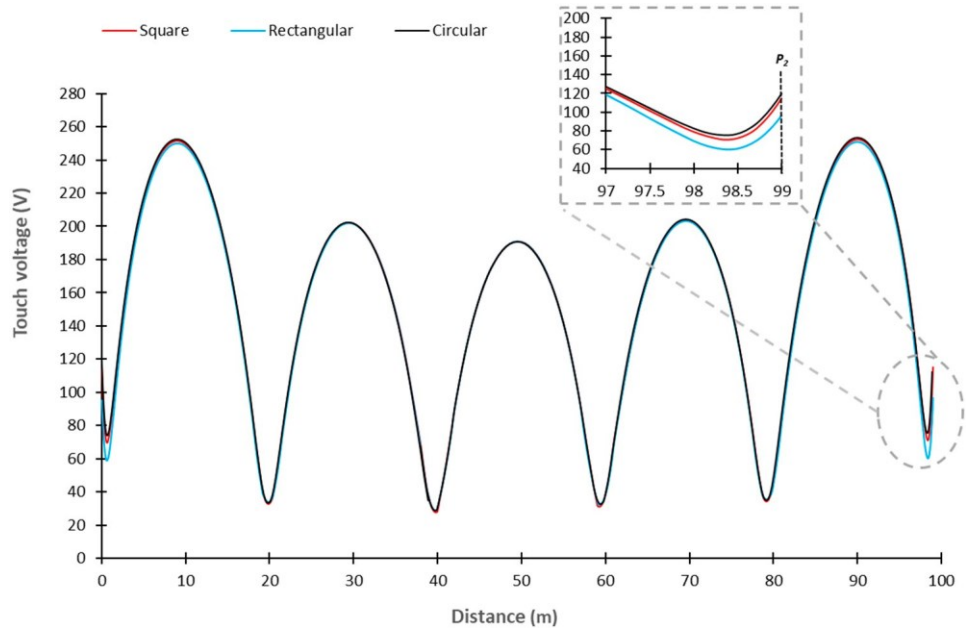


Figure 16: Distribution of the touch voltage along the grid diagonal obtained for the three ECON sections (square, rectangular, and circular), with the same surface area of 0.071 m².

3.3.4.2 CIRCULAR AND RECTANGULAR SECTIONS WITH THE SAME PERIMETER

In general, the analytical formulation used to calculate the grounding resistance of a grid depends principally on the geometry of the electrodes, which

influences the contact surface area with the surrounding soil [13,32]. From this observation, it was decided to study the influence of circular and rectangular ECON sections with the same section perimeter as the square one in order to validate this assumption. Hence, the radius r of the circular section can be defined as follows:

$$r(mm) = \frac{2a}{\pi} = 169.8$$

and the width w can be expressed as follows:

$$w(mm) = 2a - 114.3 = 419.1 \quad (3.8)$$

Table 9 presents the results obtained for the circular and rectangular sections with the same perimeter and compared with the results obtained previously for the square section. As can be observed, the influence of the ECON geometry with the same perimeter seems to be higher than those obtained for the sections with the same area. For the rectangular section with a small area surface (0.048 m^2), the grounding resistance and the touch voltage are 1.00% and 2.94% higher than for the square section, respectively. For the circular section with a larger area (0.091 m^2), the grounding resistance and the touch voltage are 0.80% and 2.73% lower than for the square section, respectively. Moreover, the rectangular and circular sections present a step voltage 7.17% higher and 3.89% lower, respectively, than that of the square section.

Table 9: Influence of the ECON section geometry on the ECON-EE grounding system parameters with the same equivalent perimeter equal to $4a$ with $a = 266.7$ mm.

ECON Geometry	Section Area (m ²)	Perimeter (m)	R_G (Ω)	GPR (V)	V_{touch} (V)	V_{step} (V)
Square	0.071	1.067	1.001	745.55	249.83	135.86
Rectangular	0.048	1.067	1.011	752.99	257.18	145.59
Circular	0.091	1.067	0.993	739.59	243.92	130.57

Figure 17 presents the evolution of the touch voltage along the grid diagonal obtained for the three sections. As can be observed, the larger difference between the touch voltage of the rectangular section and the square one is obtained for the maximum value of the touch voltage distribution obtained close to the center of each grid mesh.

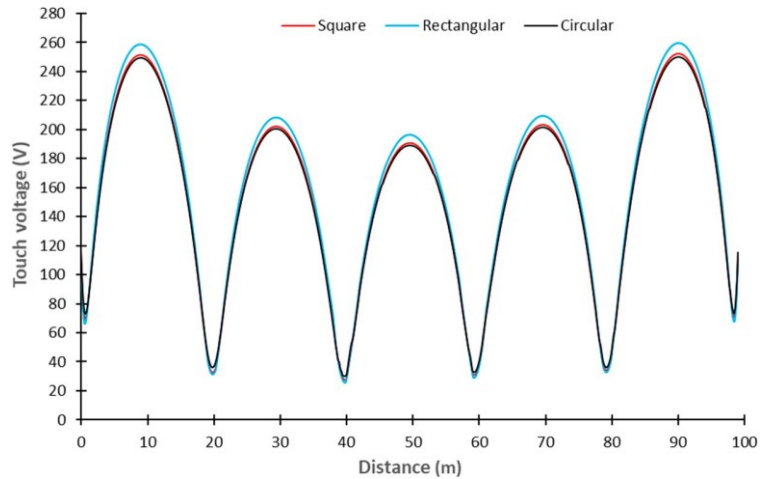


Figure 17: Distribution of the touch voltage along the grid diagonal obtained for the three ECON sections (square, rectangular, and circular) with the same perimeter of 1.067 m.

3.3.5 INFLUENCE OF THE REBAR DIAMETER

In this section, the last parameter studied was the size of the rebar acting as the electrode embedded in the ECON. Different simulations were performed for the

ECON-EE square section of the 266.7 mm side with the same two-layer soil model as used in previous sections. The results are presented in Table 10 with the different grid parameters determined at the same points as used previously and presented in Figure 6a.

Table 10: Influence of the rebar diameter on the ECON-EE grounding system parameters for a square section with a 266.7 mm side, with the two-layer soil model.

Rebar Diameter (mm)	Imperial Bar Size	R_G (Ω)	GPR (V)	V_{touch} (V)	V_{step} (V)
12.7	#4	1.001	745.55	249.83	135.86
19.05	#6	1.000	744.80	249.27	136.01
25.4	#8	1.000	744.80	249.27	136.01
32.26	#10	1.000	744.80	249.27	136.01
43.00	#14	0.999	744.06	248.53	136.06
57.33	#18	0.998	743.31	247.77	136.24

The results presented in Table 10 seem to demonstrate that, for the same square section of ECON, the influence of the rebar diameter is not significant. Another means to prove this assumption is to use the analytical formulation proposed in [32] (3.9) to determine the equivalent radius of a single conductor modeling the rebar embedded in the ECON square section. The proposed formulation, initially developed for an electrode embedded in GEM, can easily be applied to the ECON-EE in the same manner. Hence, the equivalent radius r_{eq} of the single conductor model can be expressed as follows [32]:

$$r_{eq} = r_b \left(\frac{r_0}{r_b} \right)^{1 - \frac{\rho E}{\rho_1}}$$

where r_b is the radius of the rebar, ρ_E is the resistivity of the ECON-EE, ρ_1 is the resistivity of the first layer of the soil model, and r_0 is the radius of the ECON circular section with the same area as the square section and given by Equation (3.5).

With the simulation parameters used for the results of Table 10, $\rho_E = 5 \text{ } \Omega\text{-m}$, $\rho_1=300 \text{ } \Omega\text{-m}$, $a = 266.7 \text{ mm}$, and $r_0 = 150.5 \text{ mm}$, and Equation (3.9), r_{eq} can then be determined for the different rebar diameters, as presented in Table 11.

Table 11: Calculation of the equivalent radius r_{eq} as a function of the rebar diameter for a square ECON-EE section of the 266.7 mm side.

Rebar Diameter(mm)	Imperial Bar Size	r_{eq} (mm)
12.7	#4	142.74
19.05	#6	143.70
25.4	#8	144.40
32.26	#10	144.97
43.00	#14	145.67
57.33	#18	146.37

The results presented in Table 11 demonstrate that the influence of the rebar diameter on the equivalent radius is not very significant, with an increase of only 2.54% in r_{eq} when the rebar diameter increases from 12.7 mm to 57.33 mm. These results demonstrate the fact that increasing the rebar diameter seems not to affect the grid parameters, as confirmed by the simulation results in Table 10.

3.4 DISCUSSION

In this paper, many simulation results have been presented in order to demonstrate the feasibility of using a new grounding system based on the use of simple rebars encased in an electrically conductive concrete section in order to replace conventional copper grids for substation grounding. The analysis of these different results permits us to highlight several advantages of using such new types of grounding systems, as well as the main parameters of the ECON-EE system influencing the grounding resistance and the touch and step voltages, as discussed in the following sections.

3.4.1 INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE ECON-EE SECTION

3.4.1.1 ECON-EE SECTION AREA

As demonstrated by the different results obtained, for the same ECON resistivity, the main parameter influencing the grounding system parameters is the surface area of the ECON, and this occurs independently of the geometry of the section. Indeed, the results of Table 5 and Figure 12 show that increasing the section area of the ECON-EE leads to a significant decrease in the grounding resistance R_G and the touch voltage, which both follow a power curve decrease with the increase in section area. As can be observed, the decrease in the touch voltage is more significant than R_G when the side section varies from 114.3 mm to 520.7 mm, with a decrease of 10.76% and 29.93% for R_G and the touch voltage,

respectively. For the step voltage, its decrease is equal to 17.36% for the same side length increase, and its decrease seems to follow a linear curve instead of a power one.

In the same way, the results in Tables 8 and 9 have demonstrated that the geometry of the ECON section has no real influence on the grounding system parameters as long as the section area is the same. When the section area is kept constant for different section geometries, the R_G and the touch voltages are similar. The only difference observed was in the step voltage, with a difference of 2.22% lower and 5.67% higher for the circular and rectangular sections, respectively, compared to the square one. Although not very significant, this difference can be explained by the apparent surface of the ECON-EE section, which is greater and lower for the rectangular and circular sections, respectively, than that of the square section. The apparent section seems to have a small influence on the distribution of the potential at the surface of the ground in the vicinity of P_2 , where the step voltage is determined (see Figure 6a). This influence can be observed in Figure 16 and particularly in the magnified section of the end of the touch potential distribution. As can be observed, the touch voltage at P_2 is lower and higher for the rectangular and circular sections, respectively, compared to the square section. In this condition, the potential difference calculated between points P_2 and P_3 becomes higher for the rectangular section and lower for the circular one, and this explains the difference obtained in the step voltage for each section.

Finally, the influence of the ECON-EE section can also be seen in the results of Table 9, for which the perimeter of the section is maintained constant. Indeed, the lower and higher values of R_G and the touch and step voltages were obtained for the circular and rectangular sections with a larger and smaller surface area, respectively. These results provide another confirmation that the ECON-EE surface area is one of the main parameters influencing the SGS parameters.

3.4.1.2 ECON-EE RESISTIVITY

From the results presented in Table 7 and Figure 14, it can be concluded that ECON resistivity is another parameter directly influencing the SGS parameters. Moreover, the results of Figure 14 are interesting in the sense that the influence of the ECON resistivity also depends on the resistivity of the surrounding ground and particularly on the ratio of the ground resistivity to the ECON resistivity (ρ_1/ρ_E). As demonstrated in a study performed on GEM's influence [31], decreasing the ECON resistivity seems to have a significant effect on the grounding resistance diminution until a ρ_1/ρ_E ratio equal to around 60. From this value, increased ECON resistivity seems not to affect the grounding resistance. These results are very interesting as they demonstrate that, for higher ground resistivity, where grounding can be difficult, the resistivity of the ECON must be higher in order, which is easy to obtain. By contrast, for lower ground resistivity, the ECON resistivity must be lower, which is more difficult to achieve. At present, the ECON resistivity obtained with specific conductive fillers can be as low as 0.25 Ω -m, corresponding to a minimum ground resistivity of 15 Ω -m [17]. These results also demonstrate that ECON-EE seems to be

better adapted to soil with higher soil resistivity but can also be effective in other types of soil.

3.4.2 EFFICIENCY OF THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM COMPARED TO COPPER GRID

Table 4 presents the results used as a reference obtained for a copper grid with vertical rods for a two-layer soil model with $\rho_1 = 300 \text{ } \Omega\text{-m}$ and $\rho_2 = 100 \text{ } \Omega\text{-m}$. A comparison of the results with the results presented in Table 6 demonstrates the necessity and the efficiency of vertical rod addition in decreasing the grounding resistance. Now, by comparing the results of Table 4 with the results of Tables 5 and 7, it can be observed that the best result can be achieved with an ECON-EE square section with a 266.7 mm side and a resistivity of 5 $\Omega\text{-m}$. Indeed, with these ECON-EE parameters, the grounding resistance is equal to 1 Ω , as recommended by IEEE Std 80 [4]. However, for the touch and step voltages recommended by the standard, it may be necessary to determine the recommended values for a ground resistance ρ_1 of 300 $\Omega\text{-m}$. For this, the Equations (3.10) and (3.11) provided by the IEEE Std 80 to calculate the allowable touch and step voltages were used, respectively [4].

$$V_{\text{touch}}(\text{V}) = I_b \cdot (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \quad (3.10)$$

$$V_{\text{step}}(\text{V}) = I_b \cdot (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \quad (3.11)$$

where t_f (s) represents the duration of the current fault event; ρ_s is the resistivity of the soil; C_s represents the surface layer derating factor, which accounts for the effect of the presence of a high-resistivity surface layer in the substation, and I_b (A) is the

allowable body current, which can be survived by 99.5% of persons and can be expressed as follows:

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \text{ for a body weight of 50 Kg} \quad (3.12)$$

$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \text{ for a body weight of 70 Kg} \quad (3.13)$$

Figures 18 and 19 present the distribution of allowable touch and step voltages as a function of t_f obtained for body weights of 50 kg and 70 kg with $\rho_s = \rho_1 = 300 \Omega\text{-m}$ and $C_s = 1$, meaning that no high-resistivity surface layer is present in the substation (worst case). In these figures, the touch and step voltages obtained for ECON-EE square sections with 266.7 mm and 520.7 mm sides and for the copper grid with vertical rods are also represented for comparison.

As can be observed in Figure 18, the comparison of the different touch voltage values shows that the copper grid with vertical rods performs the worst, with maximum current fault durations of 0.38 s and 0.70 s for body weights of 50 kg and 70 kg, respectively. For the square ECON-EE section with a 266.7 mm side, the values obtained are 0.45 s and 0.83 s for body weights of 50 kg and 70 kg, respectively, and they increase to 0.66 s and 1.21 s for the ECON-EE square section with a 520.7 mm side. These values remain significantly higher than a typical fault clearing time of 40 to 90 ms, considering a breaker opening time of 2 to 5 cycles and a relay operating time of half a cycle, as mentioned in [33], and significantly higher than the duration of a lightning strike. Finally, for the step voltage (Figure 19), although the values of the

step voltage obtained with the ECON-EE square sections are higher than the values obtained for the copper grid with vertical rods, the ECON-EE values remain lower than the values recommended by the IEEE Std 80 for a current fault duration of up to 3 s.

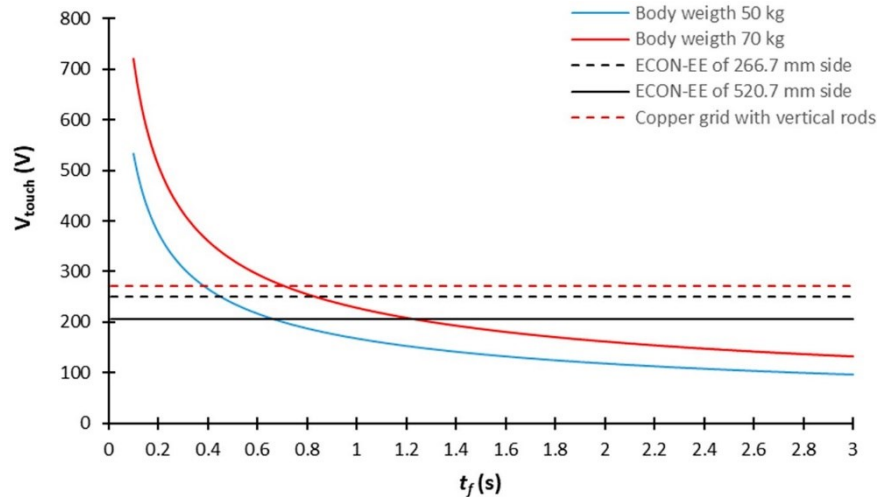


Figure 18 : Distribution of the allowable touch voltage as function of the duration of the current fault event obtained for body weights of 50 kg and 70 kg and for a ground resistivity of 300 Ω-m and Cs = 1.

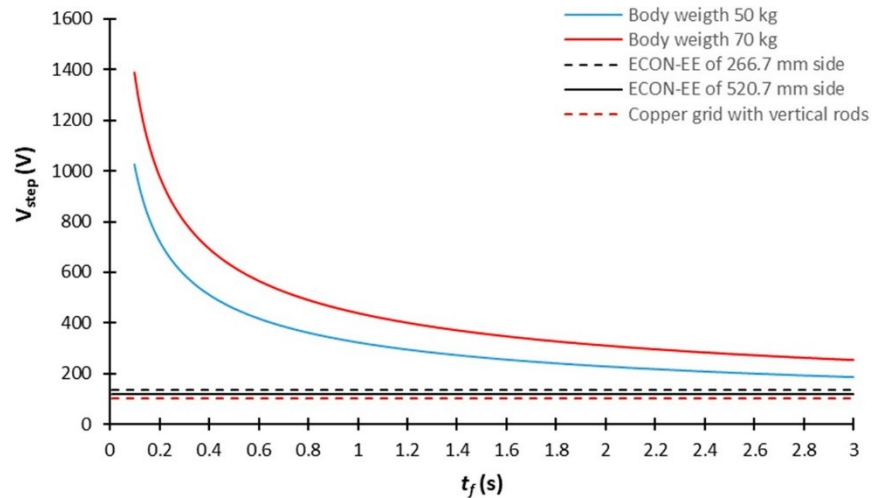


Figure 19: Distribution of the allowable step voltage as a function of the duration of the current fault event obtained for body weights of 50 kg and 70 kg and for a ground resistivity of 300 Ω-m and Cs = 1.

3.4.3 ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF USING AN ECON-EE GROUNDING SYSTEM FOR A SUBSTATION

3.4.3.1 ADVANTAGES OF THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM

As presented in the previous sections, the different results obtained tend to confirm the fact that the proposed ECON-EE grounding system can perform as well as or even better than a conventional copper grid system, which requires, in the case presented in this paper, the addition of vertical rods in order to meet the standard requirement for substation grounding. In this case, the ECON-EE grounding system presents a certain advantage over the copper grid in terms of the cost of installation, because it is no longer necessary to dig supplementary holes for vertical rod installation. Moreover, the installation of the ECON-EE grounding system should not require supplementary operation compared to copper grid installation as, for each solution, trenches must be dug approximatively to the same depth.

Moreover, as presented and demonstrated in this paper, the design and dimensioning of the ECON-EE grounding system is not complicated, since the grounding resistance and the touch and step voltages are principally governed by the section area of the ECON-EE and its resistivity, whose value depends on the resistivity of the ground in a ratio of 60.

As demonstrated in Section 3.3.5, the diameter of the rebar encased in the ECON section has no real influence on the grounding system parameters. The rebar diameter will only have a direct influence on the permissible ground current fault, whose value will increase with the increase in the rebar diameter, as demonstrated in [18].

Hence, with the same ECON-EE section area and resistivity, it becomes easy to adapt the grounding system at different substation ratings by only modifying the diameter of the rebar and without changing the parameters of the ECON-EE grounding system obtained for the substation ground resistivity. Moreover, as presented in the literature review, ECON-EE, which can be considered an improved Ufer grounding system, performs very well under lightning strikes in terms of the diminution of the impulse ground resistance compared to that of the power frequency, and also permits us to improve the heat dissipation to the ground during the current fault. Another advantage of the ECON-EE grounding system is the protection against vandalism and copper theft.

3.4.3.1 DISADVANTAGES OF THE ECON-EE GROUNDING SYSTEM

The first disadvantage of the ECON-EE grounding system can be attributed to its cost. As mentioned in [20], ECON can be produced with an estimated cost of around USD 400 per m³. The average cost of a ½ inch diameter steel rebar can be estimated at around USD 3.7 per meter [34]. Hence, in the case of the ECON-EE square section with a 266.7 mm side, the cost of material (ECON plus rebar) can be estimated at around USD 32 per meter. This cost can be compared to the cost of a stranded bare wire 2/0 Cu, the average price of which calculated from several suppliers can be estimated at around USD 17.4 per meter. Thus, ECON-EE's cost can be 1.84 times the cost of a simple copper wire grid. However, this cost does not take into account the need for vertical rods in the case of high-resistivity soil and the cost of digging and installing the rods.

Another disadvantage could be attributed to the possible corrosion of rebars, as mentioned in [6] in reference to Ufer grounding used in soil of high acidity. However, rebar or electrode corrosion in ECON or ECC seems to be lower than in ordinary concrete, as observed in different studies [9,20,35]. The use of carbon-based material and silicate fumes or fly ash in ECON or ECC seems to delay the corrosion of the encased electrodes [20,35]. Moreover, rebar corrosion can also be managed using corrosion inhibitors in ECON or by replacing steel rebars with galvanized rebars, or even stainless steel rebars, which are less affected by corrosion but are more costly. The cost of galvanized rebars is approximately 15% higher than that of steel rebars, but they are 40 times more resistant to corrosion than steel rebars [36]. The cost of stainless steel rebars is around 6 times the cost of steel rebars, but their corrosion resistance is 1500 times higher than that of carbon steel rebars [36].

Finally, another disadvantage of using ECON-EE in SGSs is the lack of experimental studies conducted on real sites in order to follow the evolution of the grounding resistance of a large ECON-EE grounding system over time, and the influence of environmental parameters, such as ground composition, rain, cold weather, etc. Nevertheless, some data obtained on natural sites over several years are available from studies performed on ECC [9,10], as well as on ECON in pavement heating applications [18,19]. The results obtained demonstrate the stability of ECC or ECON resistivity over time, which is an important parameter for maintaining stable grounding resistance. The stability of the resistivity is also a

good indication that electrode corrosion is not a concern when electrodes are encased in ECC or ECON because, in the presence of electrode corrosion, the resistivity should increase significantly, as demonstrated in [35].

3.5 CONCLUSIONS

As a general conclusion, the results presented in this paper have permitted us to evaluate the possibility of using a new concept of substation grounding systems using electrically conductive concrete with rebars used as electrodes. The results obtained and the comparisons performed with conventional copper grid electrodes have demonstrated that the proposed ECON-EE grounding system can perform better than a copper grid equipped with vertical rods, especially in high-resistivity soil, where the cost of ECON-EE grounding seems to be equivalent to the cost of a copper grid with vertical rods. Moreover, ECON has become a mature technology in the field of pavement de-icing, and its use in the development of substation grounding systems with rebars as electrodes must be considered a serious candidate for a conventional SGS replacement. Indeed, as demonstrated in this paper, the design and dimensioning of an ECON-EE grounding system is quite simple and is principally governed by two parameters: the section area and the resistivity of the ECON.

However, in order to be accepted and integrated into international standards as an alternative solution to conventional SGSs, ECON-EE grounding technology

has to demonstrate its long-term durability and efficiency under different environmental conditions as well as during different types of faults. To this end, several numerical and experimental studies are currently underway to characterize the electrical behavior of the ECON-EE system under different current faults and to study the evolution of the grid resistance of a small-scale ECON-EE system as a function of seasonal influences. The results obtained from these studies will be presented in future papers.

Author Contributions: Conceptualization, C.V.; methodology, M.D.; software, M.D. and C.V.; validation, C.V. and S.B.; writing original draft preparation, M.D. and C.V.; writing review and editing, S.B. and C.V.; supervision, C.V. and S.B.; project administration, G.S.; funding acquisition, G.S. and C.V. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Rio Tinto in partnership with the Mitacs Accelerate program, grant number FR82263.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

3.6 REFERENCES

- [1] Hyung-Soo, L.; Jung-Hoon, K.; Dawalibi, F.P.; Jinxi, M. Efficient ground grids designs in layered solids. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1998, 13, 745–751. [CrossRef]
- [2] Permal, N.; Osman, M.; Ariffin, A.M.; Kadir, M.Z.A. The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters. *IEEE Access* 2021, 9, 37497–37509. [CrossRef]
- [3] Abdul Ali, A.; Ahmad, N.; Mohamad Nor, N.; Reffin, M.; Syed Abdullah, S. Investigations on the performance of a new grounding device with spike rods under high magnitude current conditions. *Energies* 2020, 13, 3538. [CrossRef]
- [4] IEEE Std 80-2013; IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2013.
- [5] Nikolovski, S.; Kneevic, G.; Baus, Z. Assessment of step and touch voltages for different multilayer soil models of complex grounding grid. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* 2016, 6, 1441–1455.
- [6] Lim, S.C.; Gomes, C.; Kadir, Z.M.A. Electrical earthing in troubled environment. *Elec. Power Energy Syst.* 2013, 47, 117–128. [CrossRef]
- [7] Azmi, A.; Ahmad, N.A.; Yiew, L.K.; Abdul-Malek, Z. The use of enhancement material in grounding system: A review. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2019, 13, 453–460. [CrossRef]
- [8] Farren, E.J.; Hallmark, C.L. Why a low resistance to remote Earth is desirable and how to obtain it. In *Proceedings of the Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Phoenix, AZ, USA, 10–14 September 2000.
- [9] Schroeder, J. Practical Issues in Grounding: Bentonite vs. Conductive Concrete. In *Proceedings of the Protection Engineers Group Conference*, Monroe, MI, USA, 5–7 April 2016.
- [10] Hallmark, C.L. The use of conductive cement to extend and protect made ground electrodes. In *Proceedings of the AREMA Annual Conference*, Dallas, DA, USA, 9–13 October 2000.
- [11] Androvitsaneas, V.P.; Gonos, I.F.; Stathopoulos, I.A. Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. *Electr. Power Syst. Res.* 2016, 139, 109–115. [CrossRef]

- [12] Ufer, H.G. Investigation and Testing of Footing-Type Grounding Electrodes for Electrical Installations. *IEEE Trans. Power App. Syst.* 1964, 83, 1042–1048. [CrossRef]
- [13] Fagan, E.J.; Lee, R.H. The Use of Concrete-Enclosed Reinforcing Rods as Grounding Electrodes. *IEEE Trans. Indus. Gen. Appl.* 1970, 6, 337–348. [CrossRef]
- [14] Cabral, R.J.; Gazzana, D.S.; Tronchoni, A.B.; Dias, G.A.; Leborgne, R.C.; Bretas, A.S.; Telló, M. Comparative performance of impulsive grounding systems embedded in concrete: An experiment in reduced scale. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Estoril, Portugal, 25–30 September 2016.
- [15] Earley, M.W.; Sargent, J.S.; Sheehan, J.V.; Buss, E.W. *National Electrical Code Handbook*, 11th ed.; NFPA: Quincy, MA, USA, 2008;
- [16] Xie, P.; Beaudoin, J.J. Electrically Conductive Concrete and Its Application in Deicing: Advances in Concrete Technology. In *Proceeding of the 2nd CANMET/ACI International Symposium*, Las Vegas, NV, USA, 11–14 June 1995.
- [17] Chung, D.D.L. Electrically conductive cement-based materials. *Adv. Cem. Res.* 2004, 16, 167–176. [CrossRef]
- [18] Rahman, M.L.; Malakooti, A.; Ceylan, H.; Kim, S.; Taylor, P.C. A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation. *Constr. Build. Mater.* 2022, 329, 127139. [CrossRef]
- [19] Tuan, C.Y. Electrical Resistance Heating of Conductive Concrete Containing Steel Fibers and Shavings. *ACI Mater. J.* 2004, 101, 65–71.
- [20] Sassani, A.; Ceylan, H.; Kim, S.; Arabzadeh, A.; Taylor, P.C.; Gopalakrishnan, K. Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport. *Case Stud. Constr. Mater.* 2018, 8, 277–291. [CrossRef]
- [21] Lee, C.Y.; Wand, S.R. A study of grounding grid characteristics with conductive concrete. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* 2009, 3, 2229–2234.
- [22] Zhang, J.; Xu, L.; Zhao, Q. Investigation of carbon fillers modified electrically conductive concrete as grounding electrodes for transmission towers: Computational model and case study. *Constr. Build. Mater.* 2017, 145, 347–353. [CrossRef]

- [23] Tian, X.; Pei, F.; Liu, X.; Jia, L.; Deng, C.; Lan, F.; Cheng, H. Analysis of Electrothermal Characteristics of Conductive Concrete Foundation of Power Tower. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; Volume 571, p. 012057.
- [24] Trlep, M.; Anton, H.; Božidar, H. The analysis of complex grounding systems by FEM. *IEEE Trans. Magn.* 1998, 34, 2521–2524. [CrossRef]
- [25] Güemes, J.A.; Hernando, F.E. Method for Calculating the Ground Resistance of Grounding Grids Using FEM. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004, 19, 595–600. [CrossRef]
- [26] Brennas, M.; Foiadelli, F.; Longo, M.; Zaninelli, D. Particular grounding systems analysis using FEM models. In Proceedings of the 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, 13–16 May 2018.
- [27] Samadinasab, S.; Namdari, F.; Bakhshipour, M. A novel approach for earthing system design using finite element method. *J. Intell. Proced. Electr. Technol.* 2017, 8, 54–63.
- [28] Elek.com. Available online: <https://elek.com.au/articles/earthing-software-benchmark-study> (accessed on 12 May 2022).
- [29] COMSOL Multiphysics Reference Manual. Available online: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf (accessed on 22 March 2022).
- [30] Eddy, I.; Underhill, P.R.; Morelli, J.; Krause, T.W. Pulsed eddy current response to general corrosion in concrete rebar. In Proceedings of the 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Portland, OR, USA, 14–19 July 2019.
- [31] Galvan, A.; Pretelin, G.; Goana, E. Practical evaluation of ground enhancing compounds for high soil resistivities. In Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cagliari, Italy, 13–17 September 2010.
- [32] Kurtovic, M.; Vujevic, S. Earthing grid parameters with conductor surrounded by an additional substance. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* 2000, 147, 57–61. [CrossRef]
- [33] Zubic, S.; Gajic, Z.; Kralj, D. Line protection operate time: How fast shall it be? *IEEE Access* 2021, 9, 75608–75616. [CrossRef]
- [34] HomeAdvisor. Available online: <https://www.homeadvisor.com/cost/outdoor-living/steel-reinforcement-bars-pricing/> (accessed on 20 May 2023).

- [35] Xu, T.; Feng, P.; Xin, L.; Lulu, J.; Chenxing, D.; Pinghao, Y.; Hongbo, C. Comparison of corrosion characteristics of conductive concrete. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; Volume 431, p. 012048.
- [36] Civil Engineering Talks. Available online: <https://civilengineeringtalks.com/types-of-rebar/> (accessed on 20 May 2023).

CHAPITRE 4

ARTICLE 2: IMPROVING SUBSTATION GROUNDING PERFORMANCE IN COLD CLIMATE REGIONS USING NEW METHOD BASED ON ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETE ENCASED ELECTRODES (ECON-EE)

Cet article est présenté lors de la conférence CIGRE 2023:

October 2023, Conference: 2023 CIGRE Canada Conference & Exhibition At: Vancouver, BC, Canada. Mouna Daadaa, Stephan Brettschneider, Christophe Volat, Véronique Savard.

Résumé : Cet article présente une étude numérique sur la performance d'une nouvelle méthode de mise à la terre applicable aux sols gelés saisonniers, une condition pouvant poser problème dans les régions au climat froid, comme le Canada. Le nouveau concept de mise à la terre proposé, appelé le système ECON-EE, est basé sur la combinaison de béton électriquement conducteur (ECON) avec la technologie d'électrode enrobée de béton (CEE). L'enquête numérique, réalisée avec un logiciel commercial d'éléments finis (FEM), a été effectuée avec une grille symétrique de 70 m × 70 m avec 25 mailles. Le sol gelé saisonnier a été modélisé avec un modèle de sol à deux couches dans lequel l'influence de l'épaisseur de la couche supérieure a été étudiée en fonction de plusieurs paramètres du système ECON-EE, tels que la profondeur d'enfouissement et la longueur des piliers supplémentaires ECON-EE.

Les résultats ont démontré que le système de mise à la terre ECON-EE proposé fonctionne significativement mieux qu'une grille en cuivre conventionnelle avec ou sans barres verticales, en termes de résistance de grille et de tensions de contact et de

pas. La performance de l'ECON-EE est particulièrement favorable lorsque l'épaisseur de la couche gelée dépasse la profondeur d'enfouissement de la grille de mise à la terre, des conditions qui ont tendance à augmenter considérablement la résistance de la grille ainsi que les tensions de pas et de contact. De plus, l'ajout de piliers courts utilisant une section circulaire ECON-EE augmente nettement l'efficacité du système ECON-EE, satisfaisant ainsi aux tensions de contact et de pas acceptables selon la norme IEEE Std 80.

Dans le contexte des sols gelés saisonniers, le système de mise à la terre ECON-EE proposé offre plusieurs avantages par rapport aux systèmes de mise à la terre conventionnels en cuivre, en termes d'efficacité, de durabilité, ainsi que de simplicité du concept et de la mise en œuvre.

SUMMARY: This article presents a numerical investigation of the performance of a new grounding method applicable to seasonal frozen soil, a condition that can be problematic in cold climate regions, such as Canada. The new grounding concept proposed, called the ECON-EE system, is based on the combination of electrically conductive concrete (ECON) with concrete-encased electrode (CEE) technology. The numerical investigation, using commercial FEM general software, was performed with a symmetrical grid of 70 m × 70 m with 25 meshes. The seasonal frozen soil was modeled with a two-layer ground model in which the influence of the upper-layer thickness was investigated as a function of several ECON-EE system parameters, such as the burial depth and length of additional ECON-EE pillars.

The results demonstrated that the proposed ECON-EE grounding system performs significantly better than a conventional copper grid with or without vertical rods, in terms of the grid resistance, and touch and step voltages. The ECON-EE performance is particularly favorable when the thickness of the frozen layer exceeds the burial depth of the grounding grid conditions that tend to greatly increase the grid resistance, and step and touch voltages. Moreover, the addition of short pillars using ECON-EE circular cross-section markedly increases the efficiency of the ECON-EE system, thus meeting acceptable touch and step voltages according to IEEE Std 80.

In the context of seasonally frozen ground, the proposed ECON-EE grounding system offers several advantages over conventional copper grid grounding systems, in terms of efficiency, durability, and simplicity of the concept and implementation.

KEYWORDS

Electrically conductive concrete with concrete-encased electrode technology, substation grounding in cold regions, FEM numerical simulations.

4.1 INTRODUCTION

Proper design of any substation grounding system (SGS) in accordance with safety standards requires the resulting ground potential rise, and the ensuing touch and step potentials, to be sufficiently low when a ground fault occurs [1]. These electrical properties of each SGS are directly associated with soil characteristics, specifically soil resistivity, which depends on the soil composition as well as environmental conditions such as moisture content and soil temperature [1–2]. Soil temperature plays an

important role, particularly in cold climate regions subjected to seasonal frost. Areas with seasonal frost can be defined as those where the ground is seasonally frozen, but the deeper subsurface soils remain permanently unfrozen [3]. As reported by several studies [3–7], the resistivity of the seasonal frozen soil can increase to 10 to 15 times the soil resistivity obtained in normal season, depending on the soil composition [3–4].

This rapid increase in frozen soil resistivity is attributed primarily to the moisture content, which forms ice as the frost depth increases in periods of sub-zero temperatures [5]. Consequently, the grid resistance (denoted R_G) of the SGS can vary considerably during the cold season, thus resulting in an increase in grid resistance as the thickness of the frozen layer increases. As demonstrated by several studies [3, 7], the value of R_G during the cold season remains constant until the frozen layer reaches the burial depth of the grounding grid. At this critical point, the R_G value rapidly increases with increasing frozen layer thickness [7]. Depending on the resistivity of the frozen soil and the thickness of the frozen layer, the value of R_G can reach three times that under normal conditions [3, 6–7]. Under these conditions, personnel safety and protection of the power equipment can be markedly compromised in the event of a fault.

To mitigate the effects of seasonal frost on the R_G value, classical methods, such as the use of ground enhancement material and burial of vertical rods deeper than the frozen layer, are generally applied to decrease R_G during the cold season [5]. Another solution consists of increasing the buried depth of the substation grounding grid. However, these solutions become increasingly costly as the thickness of the frozen layer

increases; for example, in Quebec, Canada, this thickness can reach 2.44 m (8 ft) during the cold season [8]. An alternative solution for substation grounding in cold climate regions is a new grounding method based on the combination of electrically conductive concrete (ECON) with concrete-encased electrode (CEE) technology, also called an ECON-EE system. As presented in detail in our recent article [9], an intensive numerical investigation has demonstrated the potential of the ECON-EE system to replace the conventional copper grids used for substation grounding. The proposed ECON-EE system has been demonstrated to have better high ground resistivity performance than a conventional copper grid of the same dimensions but equipped with 7.5 m vertical rods.

On the basis of these promising results, herein, we performed a numerical investigation of the performance of the proposed ECON-EE system presented in our previous work under seasonal frost conditions. The ECON-EE system performance under the same frozen soil conditions was compared with that of a conventional copper grid of the same geometry, with or without vertical rods. Moreover, solutions such as vertical ECON-EE pillars were investigated to increase the performance of the ECON-EE system when the thickness of the frozen layer exceeds the buried depth. The results confirmed that the proposed ECON-EE system may serve as a compelling alternative to the conventional copper grids used in substations, by solving the problem of ground resistance variation observed in cold climate regions. Moreover, this new system offers protection against vandalism and copper theft, which remain recurring problems for electrical power companies.

4.2 MODELS OF THE ECON-EE SYSTEM AND SEASONAL FROZEN SOIL

Figure 1 presents an overview of the ECON-EE system used in the numerical investigation presented herein. As illustrated in Figure 1-a, the ECON-EE system has a square section of 30 cm x 30 cm with a centered steel rebar of 2.54 cm diameter (1 inch). The grid formed by the rebars has a square area of 70 m x 70 m, with a uniform grid spacing of 14 m (Figure 20a).

To consider the frozen layer of thickness h_f in the simulations, we used a two-layer soil model, as proposed in several studies [3, 7]. This two-layer soil model comprised a top layer of resistivity r_f and finite thickness h_f , representing the frozen layer, and a bottom layer of infinite thickness with resistivity ρ_0 . Hence, in the absence of seasonal frost ($h_f = 0$ m), the soil model is considered uniform, with a single infinite layer of resistivity ρ_0 . As the frozen layer increases in thickness, the soil model becomes a two-layer soil model in which the thickness h_f of the top layer varies.

As presented in detail in our previous work [9], the numerical simulations were performed by using the general FEM software Comsol Multiphysics®, version 5.6. Figure 20b presents an overview of the FEM model, with the frozen layer of variable thickness h_f in blue. Table 12 presents the main parameters used for the FEM ECON-EE model.

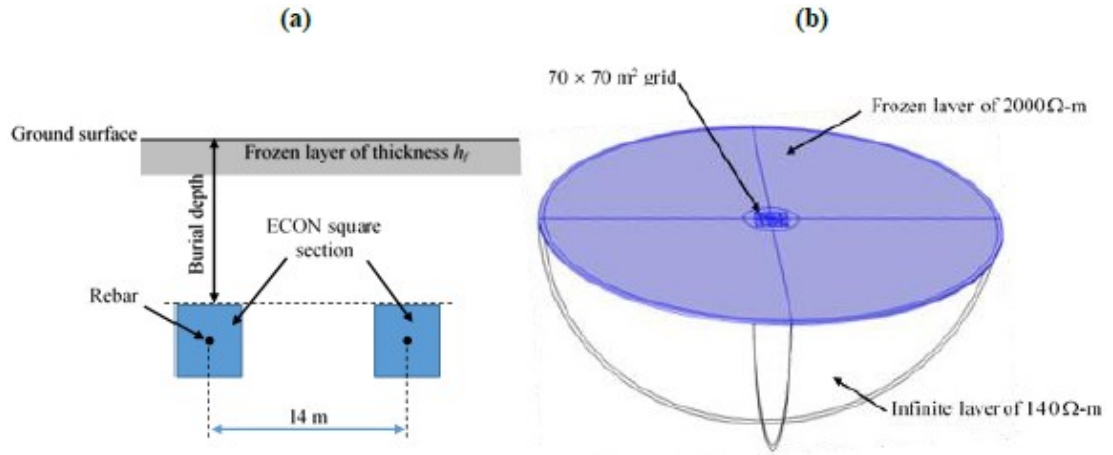


Figure 20: Overview of the ECON-EE system in seasonal frozen soil: **(a)** two-layer ECON-EE geometry and **(b)**: two-layer ECON-EE model used for FEM simulations.

As presented in Table 12, the resistivity ρ_f of the frozen layer was set at 14.3 times the infinite layer resistivity ρ_0 to simulate a large increase in soil resistivity. The maximum value of the frozen layer thickness was fixed at 1.8 m, corresponding to the average frost penetration depth in Quebec, Canada [8]. To simulate the progression of the frost line in the ground during the cold season, the frozen layer thickness h_f was varied from 0 m to 1.8 m in incremental steps of 0.2 m. Importantly, the value of the ECON section area was chosen according to the results of our previous study, in which a grid resistance R_G below 1 Ω was achieved with a section area of 292.1 mm x 292.1 mm [9].

Table 12: Simulation parameters.

	Frozen layer	Infinite layer	ECON	Rebar
Resistivity ($\Omega\text{-m}$)	2000	140	5	1.50×10^{-7}
Relative permittivity	16	12	10	1
Dimensions (cm)	$0 < hf < 180$	∞	30 x 30	2.54 in diameter

The performance of the ECON-EE system in terms of grid resistance R_G , and touch and step voltages, was compared with that of a conventional copper grid constructed from a copper conductor of 9.27 mm diameter (2/0 Cu) presenting the same geometry as the rebar grid and buried at the same depth. The computational procedure of the touch and step voltages was performed for an injected current of 744.8 A and followed the same procedure as previously described [9].

4.3 INFLUENCE OF SEASONAL FROZEN SOIL ON GROUNDING GRID RESISTANCE

4.3.1 ECON-EE SYSTEM WITH 0.5 m BURIAL DEPTH

Because the typical grid burial depth ranges from 0.5 m to 1.5 m [1], we evaluated the performance of the ECON-EE system for a minimum burial depth fixed at 0.5 m. Figure 21 presents the comparison of the grid resistance R_G obtained with the ECON-EE system and the conventional copper grid as a function of the frozen layer thickness h_f . The R_G value remains constant until the frozen layer thickness reaches the burial depth of the grid of 0.5 m, as reported by several studies [3–5, 7]. For the ECON-EE

system, the sudden increase in R_G occurs at a thickness $h_f = 0.8$ m, as compared with 0.4 m for the copper grid, simply because the ECON-EE thickness of 0.3 m increases the burial depth of the grounding system with respect to that of the copper grid.

However, because the frozen layer extends beyond the grid burial depth, the ECON-EE system presents better performance, with an R_G value of 2.09Ω for a 1.8 m thick frozen layer, than the copper grid, with an R_G value of 3.13Ω , thus corresponding to a 33% decrease (Figure 22).

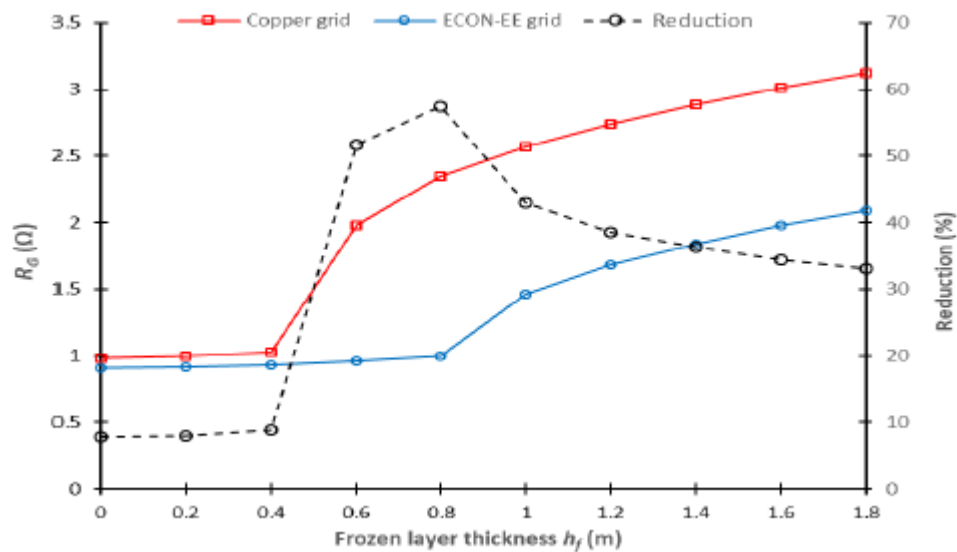


Figure 21: Evolution of the grid resistance R_G as a function of the frozen layer thickness h_f obtained for the ECON-EE system and the copper grid without vertical rods.

4.3.2 ECON-EE SYSTEM WITH VARIABLE BURIAL DEPTHS

In this section, the evolution of the grid resistance R_G of the ECON-EE system as a function of the frozen layer thickness was studied for different burial depths (Figure 22). The minimum burial depth was fixed at 0.36 m, to ensure that the steel

rebar grid of the ECON-EE system was buried at the same 0.5 m depth as the copper grid.

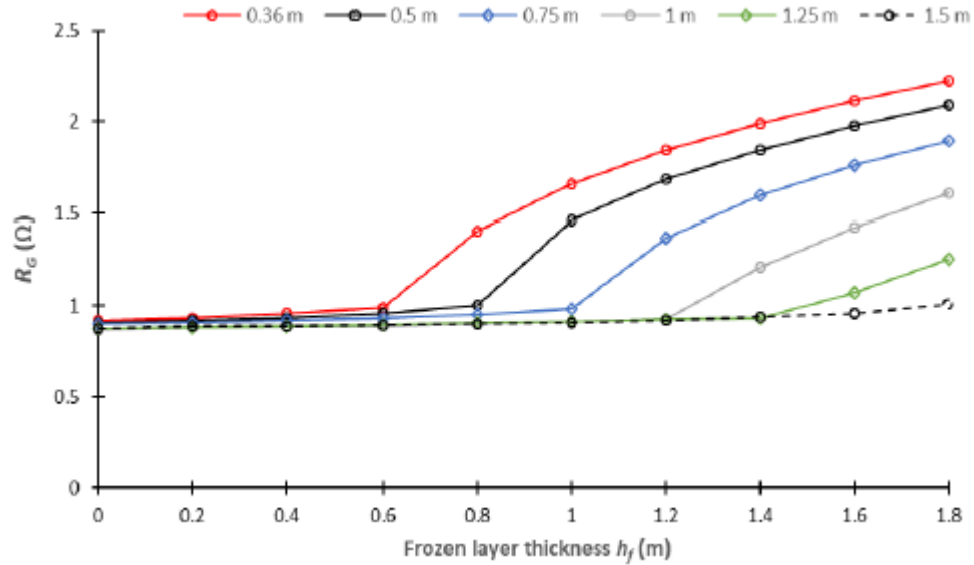


Figure 22: Evolution of the ECON-EE grid resistance R_G as a function of the frozen layer thickness obtained for different grid burial depths.

As previously reported [2] and demonstrated in Figure 22, the deeper the ECON-EE is buried in the soil, the lower the influence of the frozen layer on the grid resistance R_G . Moreover, as observed in the previous section (Figure 21), the rapid increase in R_G value obtained with the ECON-EE system occurs after the thickness of the frozen layer has reached the bottom of the ECON section. This finding explains why, for a burial depth of 1.5 m, the R_G value increases very slowly and remains equal to 1 Ω even for a frozen layer of thickness of 1.8 m, thus meeting grid resistance standard recommendations for substations [1].

4.3.3 EFFECTS OF ADDITION OF VERTICAL ECON-EE PILLARS TO THE ECON-EE SYSTEM

According to the results obtained previously, the influence of the frozen layer becomes important after its thickness is equal or greater than the grid burial depth. With a conventional copper grid, the use of vertical rods extending far below the maximum frozen layer thickness is essential to meet the standard requirements for R_G , and touch and step voltages [2]. Therefore, we investigated the contribution of the addition of vertical pillars made with the same ECON-EE technology, but with a circular section of 34 cm in diameter to obtain the same cross-sectional area as the 30 cm x 30 cm ECON square section. The pillars, whose length varied from 2 m to 7.5 m, were located at each conductor intersection around the grid perimeter, and the total number was 20 (Figure 23). The simulations were performed for the worst case corresponding to a frozen layer thickness of 1.8 m and a burial depth of 0.5 m.

The results were also compared with the conventional copper grid geometry used in previous sections, buried at 0.5 m depth, and equipped with 20 vertical copper rods of 15.9 mm in diameter, which were also positioned at each conductor intersection around the grid perimeter. The variation in rod length was the same as that used for the ECON-EE pillar length. The results obtained for the ground grid resistance are presented in Figure 24.

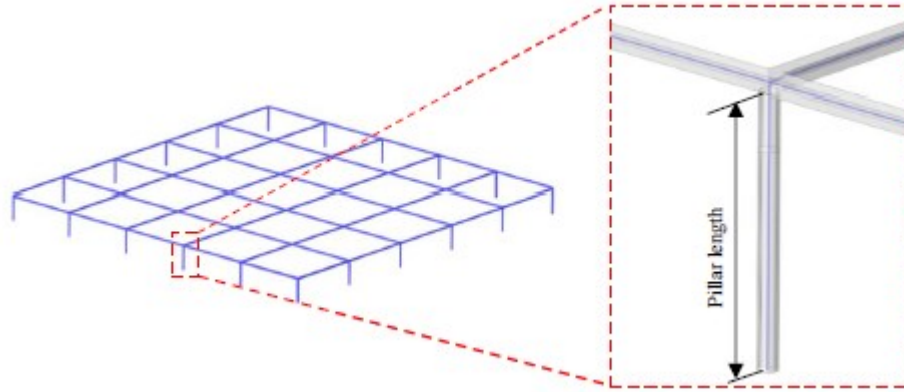


Figure 23: Illustration of the ECON-EE system equipped with pillars with a circular cross-section.

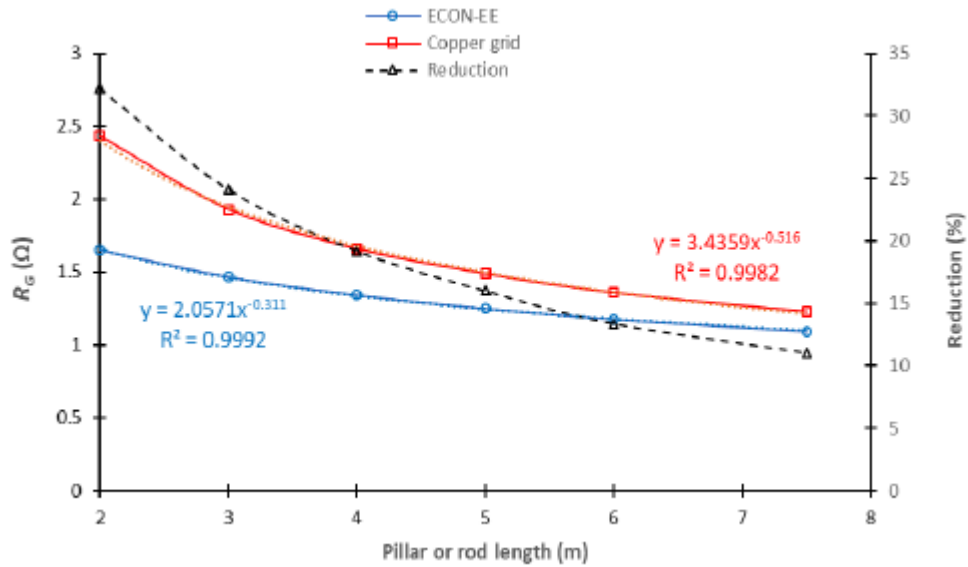


Figure 24: Evolution of ECON-EE grid resistance R_G as a function of pillar length, obtained for a frozen layer thickness of 1.8 m.

As confirmed by the results in Figure 24, the ECON-EE system equipped with vertical pillars performs better than the copper grid with vertical rods. However, as the length of vertical rods or pillars increases, the difference between grounding systems decreases, following a perfect power curve, as illustrated by the regression equations in Figure 24. By using these power curve regressions, we estimated that the ECON-EE

system and the copper grid would achieve the same grid resistance at a rod or pillar length of 12.1 m, for which the R_G value would be equal to 0.94Ω .

4.4 SAFETY EVALUATION OF THE ECON-EE SYSTEM UNDER SEASONAL FROZEN SOIL CONDITIONS

4.4.1 TOLERABLE TOUCH AND STEP VOLTAGES

To evaluate the safety of the proposed ECON-EE system under seasonal frozen soil conditions, we compared the touch and step voltage values obtained with the different ECON-EE configurations with the tolerable touch and step voltages provided by IEEE Std 80, by using Equations (4.1) and (4.2), respectively [1].

$$V_{touch}(V) = I_b \cdot (1000 + 1.5C_S \cdot \rho_S) \quad (4.1)$$

$$V_{step}(V) = I_b \cdot (1000 + 6C_S \cdot \rho_S) \quad (4.2)$$

where t_f (s) represents the duration of the current fault event; ρ_S is the resistivity of the soil; C_S represents the surface layer derating factor, which accounts for the effect of the presence of a high-resistivity surface layer in the substation, and I_b (A) is the allowable body current, which can be survived by 99.5% of people and can be expressed as follows:

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \text{ for a body weight of } 50 \text{ Kg} \quad (4.3)$$

$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \text{ for a body weight of } 70 \text{ Kg} \quad (4.4)$$

In the worst case, in which no high resistivity surface layer is present in the substation, $C_s = 1$ and ρ_s equal 140 Ω -m for normal soil and 2000 Ω -m in the presence of the frozen layer. Table 13 presents the acceptable values of touch and step voltages determined from equations (4.1) and (2) for $t_f = 0.5$ s.

Table 13: IEEE Std 80 tolerable values for touch and step voltages.

	Touch voltage (V)		Step voltage (V)	
	$\rho_s = 140$ Ω -m	$\rho_s = 2000$ Ω -m	$\rho_s = 140$ Ω -m	$\rho_s = 2000$ Ω -m
Body weight of 50 kg	198.5	656.2	301.8	2132.6
Body weight of 70 kg	268.7	888.1	408.5	2886.4

To simplify the evaluation of the safety of the ECON-EE system parameters, we studied the ratio of the numerical touch voltage to the tolerable touch voltage for 50 kg body weight (denoted R_{touch}), and the ratio of the numerical step voltage to the tolerable step voltage for a 50 kg body weight (denoted R_{step}).

4.4.2 ECON-EE SYSTEM SAFETY FOR A 0.5 m BURIAL DEPTH

Figure 25 presents the evolution of R_{touch} and R_{step} for 50 kg body weight obtained for the two grounding systems, as a function of the frozen layer thickness. Under normal conditions ($h_f = 0$ m and $\rho_s = 140$ Ω - m), both the R_{touch} and R_{step} obtained for each grounding system are below 1, i.e., below the acceptable values in Table 13 for 50 kg body weight. As soon as the soil begins to freeze, a decrease in the two ratios is observed, owing to increases in the acceptable values of the touch and step

voltages. As the frozen layer thickness increases, R_{touch} and R_{step} for the copper grid remain nearly constant until the frozen layer thickness ($\rho_s = 2000 \Omega \cdot m$) reaches the burial depth. At that point, R_{touch} quickly increases from 0.34 to 1.45 for $h_f = 0.6$ m, as previously reported [2, 3], and exceeds the tolerable values. The same sudden increase is observed for R_{step} but remains largely below the tolerable values independently of the frozen layer thickness.

For the ECON-EE system, the R_{touch} values remain significantly lower than the values obtained for the copper grid from $h_f = 0.6$ m. Thus, the decrease in the R_{touch} value obtained for the ECON-EE system varies from 82% to 43.5% at 1.8 m, as compared with the R_{touch} obtained for the copper grid. However, a touch voltage value exceeding tolerable limits for the ECON-EE system is obtained around $h_f = 1.1$ m ($R_{touch} = 0.98$) for a body weight of 50 kg. This finding indicates a substantial improvement with respect to the results obtained with the copper grid. Finally, as also observed for the copper grid, R_{step} obtained with the ECON-EE system remains below the tolerable values independently of the frozen layer thickness.

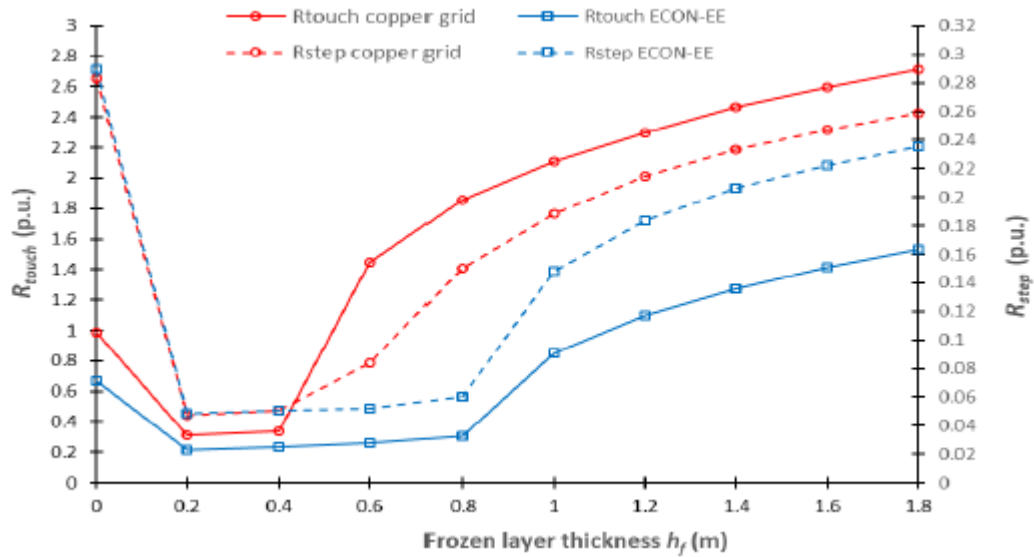


Figure 25: Evolution of the touch voltage ratio for a body weight of 50 kg, as a function of the frozen layer thickness h_f obtained for the ECON-EE system and the copper grid buried at 0.5 m.

4.4.3 ECON-EE SYSTEM SAFETY AS FUNCTION OF GRID BURIAL DEPTH

Figure 26 presents the evolution of R_{touch} and R_{step} as a function of the burial depth of the two grounding systems, and computed for the worst case represented by a frozen layer thickness of 1.8 m. As expected from the R_G results presented in Figure 22 for $h_f = 1.8$ m, increasing the burial depth of the ECON-EE system also results in a significant linear decrease in the touch and step voltages, as previously reported [2]. The decrease in R_{touch} obtained for the ECON-EE system compared with the copper grid is also significant, changing from 38.1% to 62.4% for a burial depth of 0.5 m to 1.5 m, respectively.

For the copper grid, the R_{touch} value remains above 1 for all burial depths; consequently, the resulting touch voltage always exceeds the tolerable value for a body

weight of 50 kg. In comparison, R_{touch} for the ECON-EE system becomes lower than the tolerable value for a burial depth of 0.96 m, thus indicating a significant improvement over the copper grid.

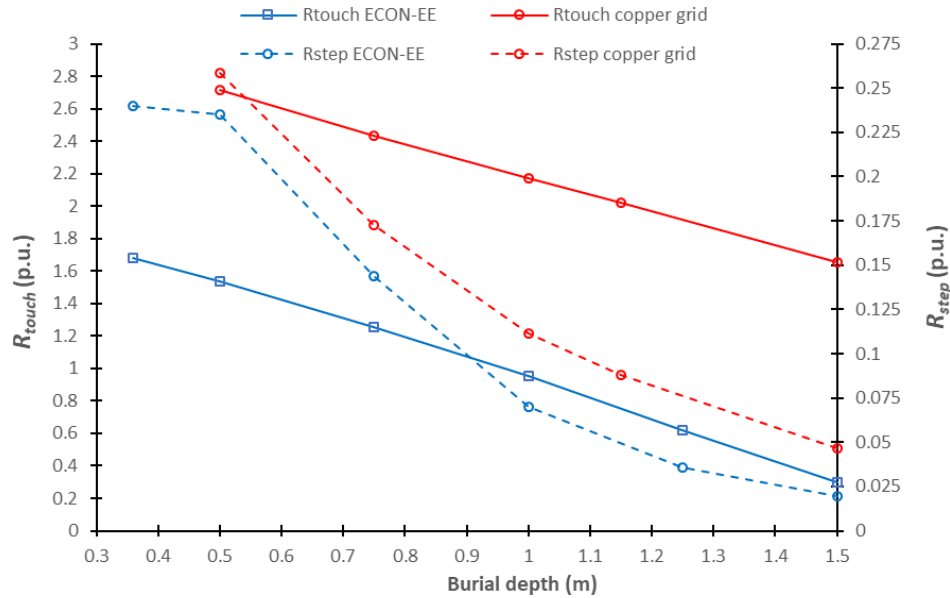


Figure 26: Evolution of R_{touch} and R_{step} for a body weight of 50 kg, as a function of the grid burial depth for a frozen layer thickness h_f of 1.8 m.

4.4.4 ECON-EE SYSTEM SAFETY AS FUNCTION OF ECON-EE PILLAR LENGTH

Figure 27 presents the evolution of R_{touch} and R_{step} obtained for the ECON-EE system with variable pillar length and the copper grid equipped with a variable vertical rod length. As expected, R_{touch} and R_{step} decrease with increasing pillar and rod length, as has been reported by the literature [1–2]. The addition of ECON-EE pillars with a circular cross-section significantly increases the performance of the ECON-EE system buried at 0.5 m. Compared with that for a conventional copper grid equipped with vertical rods, a significant decrease in R_G value is obtained (Figure 24), which is

followed by a marked decrease in R_{touch} and R_{step} (Figure 27). With a pillar length of only 2 m, R_{touch} is equal to 1.04 and is comparable to the value of 1.07 obtained for the copper grid with a rod length of 4 m. By extrapolation, a R_{touch} value of 1 is obtained for an ECON-EE pillar length of 2.2 m and for a vertical rod length of 4.4 m.

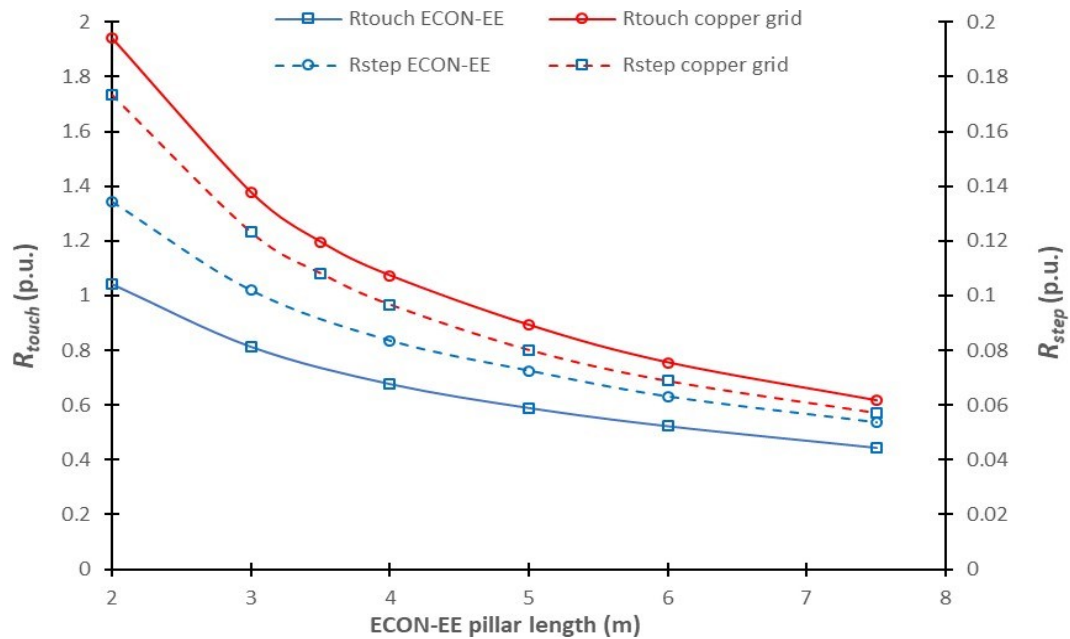


Figure 27: Evolution of R_{touch} and R_{step} for a body weight of 50 kg as a function of the pillar length obtained for a frozen layer thickness of 1.8 m.

4.5 CONCLUSION

The results presented herein enabled numerical investigation of the behavior and efficiency of a new concept of substation grounding systems based on ECON with rebars used as encased electrodes under seasonal frozen soil conditions. As observed herein, and confirmed by several studies, the influence of the frozen soil layer of high resistivity becomes critical as soon as it reaches the burial depth of the grounding system. However, under these severe conditions, our results demonstrated that the

burial depth of the ECON-EE system is approximately twice as small as that of the copper grid to meet the tolerable touch voltage required by the IEEE 80.2013 standard.

In addition, for the same burial depth of 0.5 m, the addition of ECON-EE pillars 2.2 m in length with a circular cross-section is sufficient to meet tolerable touch voltage, as compared with a copper grid requiring the same number of vertical rods but a length of 4.4 m. Hence, the ECON-EE system would require fewer installation constraints than a copper grid system with equal performance.

The proposed ECON-EE grounding system therefore provides an efficient alternative to conventional copper grids for increasing efficiency of SGS subjected to seasonal frozen soil conditions. Notably, the use of rebar as an encased electrode in an electrically conductive concrete offers multiple possibilities for the design and optimization of ECON-EE system geometry to meet the tolerable touch and step values required by standards, particularly in conditions of high soil resistivity.

Acknowledgements

We thank Rio Tinto and Mitacs for financial support of this project.

4.6 REFERENCES

- [1] IEEE Standard. “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” (IEEE Standard 80.2013: Piscataway, NJ, USA, 2013).
- [2] N. Permal, M. Osman, A.M. Ariffin and M.Z.A. Kadir “The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters” (IEEE Access number 9 March 2021 pages 37497-37509).
- [3] J. He, Y. Gao, R. Zeng, W. Sun, J. Zou and Z. Guan, Z. “Optimal Design of Grounding System Considering the Influence of Seasonal Frozen Soil Layer”

- (IEEE transactions on power delivery number 20 volume1 January 2005 pages 107-115).
- [4] J. He, R. Zeng, Y. Gao, Y. Tu, W. Sun, J. Zou and Z. Guan “Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System” (IEEE Transactions on Power Delivery volume 18 number 3 July 2003 pages 788-795).
 - [5] K. Henry “Electrical Grounding in Cold Regions” (US Army Corps of Engineers Cold Regions Technical Digest volume 87-1 March 1987 pages 1-16).
 - [6] C. Wang, X. Liang, E.P. Adajar and P. Loewen “Investigation of Seasonal Variations of Tower Footing Impedance in Transmission Line Grounding Systems” (IEEE Transactions on Industry Applications volume 53 number 3 May/June 2021 pages 2274-2284).
 - [7] J. He, J. Wu, B. Zhang and R. Zeng “Fault Current-Division Factor of Substation Grounding Grid in Seasonal Frozen Soil” (IEEE Transactions on Power Delivery volume 28 number 2 April 2013 pages 855-865).
 - [8] C.B. Crawford “Frost Penetration Studies in Canada as an Aid to Construction” (Roads and Engineering Construction Volume 93 number 3 February 1955 pages 71-78).
 - [9] M. Daadaa, S. Brettschneider, C. Volat and G. Simard “Numerical investigation of the use of electrically conductive concrete-encased electrodes as potential replacement for sub-station grounding systems” (Energies volume 16 number 11 May 2023 pages 1-21).

CHAPITRE 5

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

5.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous visons à étudier le comportement d'un modèle réduit du système EE-BEC sous conditions environnementales réelles. L'importance de cette étude réside dans la nécessité de valider l'efficacité de ce concept novateur dans des situations du monde réel, où les variables environnementales et opérationnelles peuvent être variées et imprévisibles.

5.2 MODÈLE RÉDUIT PROPOSÉ

Le modèle réduit proposé est constitué d'une grille de mise à la terre carrée de 1 m x 1 m, combinant du béton électriquement conducteur avec une électrode enrobée. La section en béton prend la forme d'un carré de 20 cm x 20 cm avec une conductivité de 1.2 [S/m], à l'intérieur duquel une barre d'armature centrale en acier avec une conductivité électrique de 4.032×10^6 [S/m] et de 1 pouce de diamètre est positionnée avec précision (Figure 28). Cette grille de mise à la terre est enterrée à une profondeur de 1 m dans le sol pour imiter des scénarios de mise à la terre réels et pour cette raison, dans cette étude.

Afin de faciliter la prise de mesure de la résistance du système MALT, une électrode sortant du sol réalisée également avec une barre d'armature centrale en acier 1 pouce et reliée à l'électrode principale a été réalisée (Figure 29).

Cette conception fournit un banc d'essai contrôlé et reproductible pour évaluer les performances et la conductivité du système de mise à la terre composite dans des conditions réalistes (Figure 29).

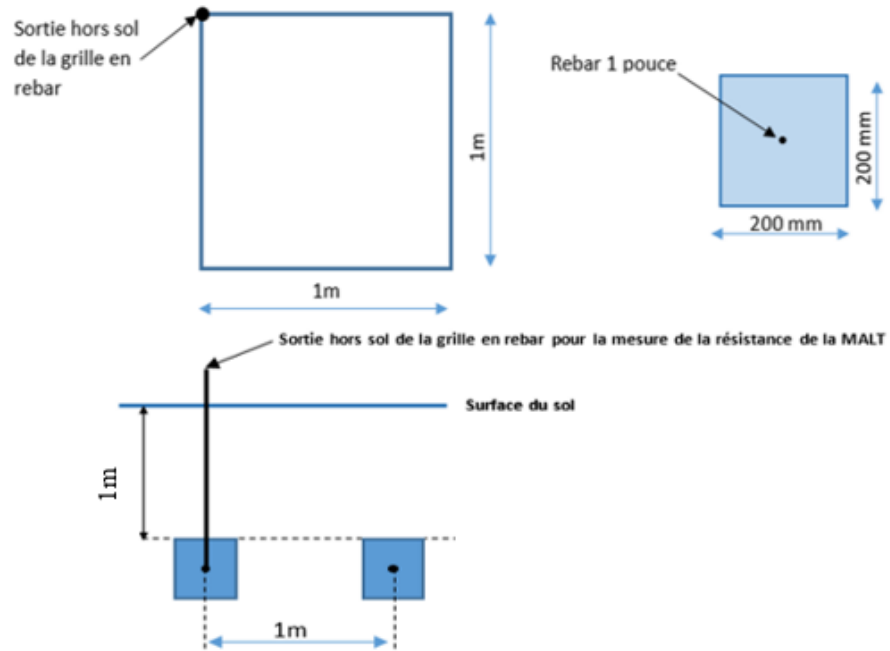


Figure 28 : Conception du système réduit de MALT

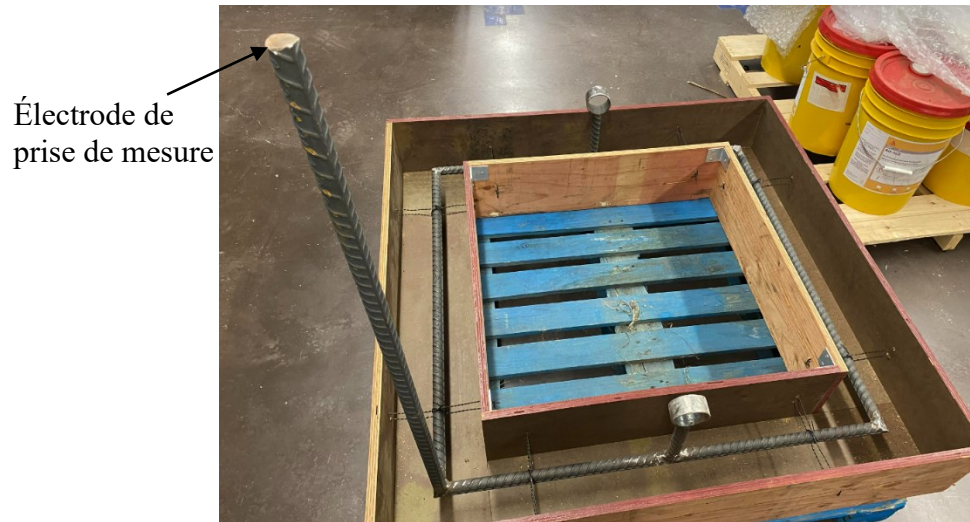


Figure 29 : Préparation de la grille de MALT.

© Mouna Daadaa

5.3 PRÉPARATION DU GÉOPOLYMÈRE ÉLECTRIQUEMENT CONDUCTEUR

La préparation de la recette du géopolymère électriquement conducteur (Figure 30) est le résultat du travail d'un doctorant au sein de notre laboratoire CURAL. Cette formule innovante combine plusieurs composants pour créer un matériau aux propriétés électriques. Les ingrédients clés comprennent les cendres volantes (CV), les résidus de bauxite, le LCLL graphite, le gravier, le sable, le silicate de sodium (SS), l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'eau (Figure 30).

Les cendres volantes et les résidus de bauxite qui proviennent de la production d'aluminium à l'usine Vaudreuil de Rio Tinto, localisée au Saguenay contribuent en tant que charges conductrices, tandis que le graphite LCLL « Low-Caustic Leaching and Liming » qui était développé au début des années 1990 par Rio Tinto au Centre de

recherche et de développement Arvida (ARDC) à Jonquière au Québec, améliore la conductivité électrique. Ainsi, le gravier et le sable sont utilisés comme des agrégats, et silicate de sodium (SS) agit en tant que renfort. L'hydroxyde de sodium (NaOH) est introduit pour ajuster la réactivité chimique de la solution, et l'eau agit comme liant qui lie tous ces éléments entre eux pour former un béton électriquement conducteur à haute performance. Cette recette a le potentiel de révolutionner la façon dont nous concevons nos infrastructures électriques et ouvre des perspectives prometteuses pour des applications innovantes dans les domaines de l'électricité et de la construction.



Figure 30: Préparation de la recette du géopolymère électriquement conducteur.

© Mouna Daadaa

5.4 CARACTÉRISATION DU SITE D'IMPLANTATION

Afin de faciliter le transport du système EE-GEC et le suivi des mesures de résistance de MALT, il a été décidé d'implanter le modèle réduit à proximité du Parc technologique sur un terrain appartenant à l'UQAC (Figure 31).

Comme illustré à la Figure 31, le modèle réduit du système EE-GEC a été positionné sur la portion du terrain ayant le moins de végétation à proximité afin de ne pas perturber la mesure de la résistance du système et également de permettre une mesure précise de la résistivité du sol.



Figure 31 : Terrain d'implantation de l'étude expérimentale.

© Mouna Daadaa

La mesure de la résistivité du sol a donc été réalisée avant l'enfouissement du système de MALT en utilisant la méthode WENNER (Figure 32), présentée en détail dans la revue de littérature, à l'aide d'un appareil de la marque AEMC® Ground Resistance Tester Models 4620 & 4630. Cet appareil permet à la fois de mesure la

résistivité du sol et également de mesurer la résistance de la MALT. Les relevés de résistance ont ainsi été effectués suivant deux lignes perpendiculaires qui se rencontrent au centre de l'emplacement d'enfouissement du système EE-GEC, comme illustré sur la Figure 31 par les deux lignes jaunes..

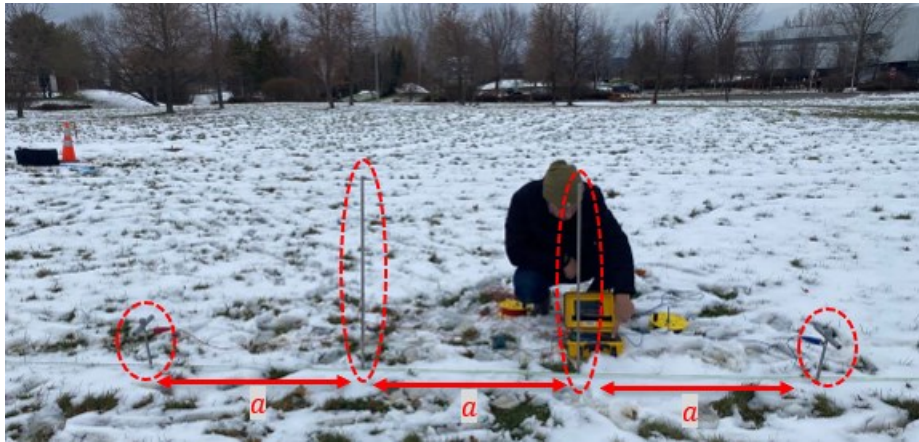


Figure 32 : Mesure de la résistivité électrique du sol par la méthode WENNER.

© Mouna Daadaa

Compte tenu de la taille réduite du système EE-GEC ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$), il a été décidé d'effectuer la mesure de la résistivité du sol sur une profondeur d'environ 10 m seulement, soit environ 10 fois la dimension du système de MALT. Les résultats obtenus pour les mesures de résistance et la résistivité équivalente sont présentés dans le Tableau 14 pour les deux directions perpendiculaires.

Les résultats trouvés dans le tableau 14 donnent une valeur moyenne de résistivité égale à $50,88 \Omega\text{-m}$ pour la direction 1 et $42,80 \Omega\text{-m}$ pour la direction 2. La résistivité du sol peut donc être considéré comme faible, ce qui est simplement expliqué par le fait que le sol présent sur le site d'implantation est principalement argileux et donc avec

résistivité relativement faible [1]. Également, il peut être observé que l'écart relatif ainsi obtenu entre les deux directions de mesure est de l'ordre de 14%, ce qui reste très acceptable.

Tableau 14: Résultats de la résistivité électrique du sol.

L'espace entre les électrodes (m)	R direction 1 (Ω)	R direction 2 (Ω)	ρ direction 1 ($\Omega.m$)	ρ direction 2 ($\Omega.m$)
0,5	28,9	30,4	90,8	95,50
1	15,62	13,33	98,14	93,75
1,5	5,87	5,57	55,32	52,50
2	3,69	3,13	46,36	49,33
2,5	2,46	2,35	38,64	36,91
3	1,97	1,88	37,13	35,43
4	1,49	1,39	37,44	34,93
5	1,25	1,16	39,26	36,44
6	1,06	1,01	39,96	38,07
7	0,94	0,89	41,34	39,14
8	0,84	0,82	42,22	41,21
10	0,7	0,71	43,98	44,61

La Figure 33 présente l'évolution de la résistivité du sol obtenue à partir des résultats du Tableau 14. Nous pouvons ainsi remarquer que la résistivité sur les premiers 1,5 m décroît rapidement mais que cette dernière tend à se stabiliser autour de 2,5 m pour commencer à remonter légèrement vers 6 mètres de profondeur. Compte tenu de l'évolution de la résistivité du sol sur les dix (10) premiers mètres, nous

pouvons donc considérer le sol comme été uniforme avec une résistivité équivalente située autour de 47 $\Omega.m$ en considérant la moyenne des deux valeurs moyennes obtenues pour les deux directions perpendiculaires.

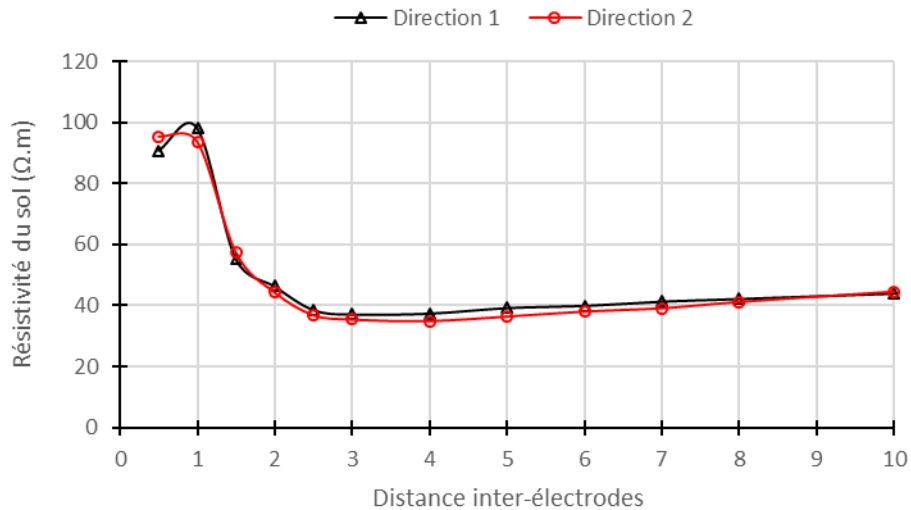


Figure 33 : Distribution de la résistivité du sol en fonction de l'espacement des électrodes de mesure de la méthode Wenner.

La Figure 34 présente une illustration les étapes d'enfouissement du système EE-GEC réalisées sur le site d'implantation. Une fois l'emplacement excavé à une profondeur d'un mètre, le système de MALT a été déposé dans le fond du trou puis simplement recouvert par le remblai de terre.



Figure 34: Terrain de l'étude expérimentale.

© Mouna Daadaa

5.5 MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU GEC

Afin d'évaluer la conductivité électrique de géopolymère, trois échantillons cylindriques ont été produit avec la même formulation utilisée pour la réalisation de la MALT. La conductivité électrique des trois échantillons cylindriques de 7 cm de diamètre par 15 cm de longueur a ensuite été mesurée aux 7^{ième}, 14^{ième} et 28^{ième}, 45^{ième} et 92^{ième} jours de mûrissement des trois (3) échantillons afin d'analyser les variations de la conductivité électrique du géopolymère au cours du temps.

La mesure de la conductivité électrique a été réalisée en utilisant la méthode voltampèremétrique dont le montage expérimental de mesure est présenté à la (Figure 32). La tension est appliquée aux électrodes circulaires positionnées aux extrémités des cylindres et encastrés dans ces derniers lors du coulage du géopolymère dans les moules cylindriques. Cette dernière est appliquée en utilisant une source de tension programmable AMP SP300VAC200W permettant une prise de mesure automatique et

rapide du courant et de la tension jusqu'à 300 V par incrément de 5V. Cette prise de mesure rapide permet ainsi d'éviter tout échauffement des échantillons afin de s'affranchir de l'effet de la température induite dans l'échantillon par effet Joule.

Pour garantir la sécurité des opérateurs, nous avons pris la précaution de placer le dispositif expérimental à l'intérieur d'une cage de Faraday (Figure 35). Cette mesure vise à prévenir tout risque potentiel découlant de l'utilisation de tensions et de courants élevés lors des mesures.

Par la suite, la valeur de la conductivité électrique est déterminée en se basant sur la résistance ainsi obtenue et les dimensions de l'échantillon, calculée conformément à la loi d'Ohm, c'est-à-dire :

$$\sigma(\text{S/m}) = \frac{I \cdot L}{U \cdot S} \quad (5.1)$$

où :

- I : courant d'essai (A).
- L : distance entre les deux contacts extérieurs (cm).
- U : tension d'essai (V).
- S : Surface de la section transversale du cylindre (cm²).

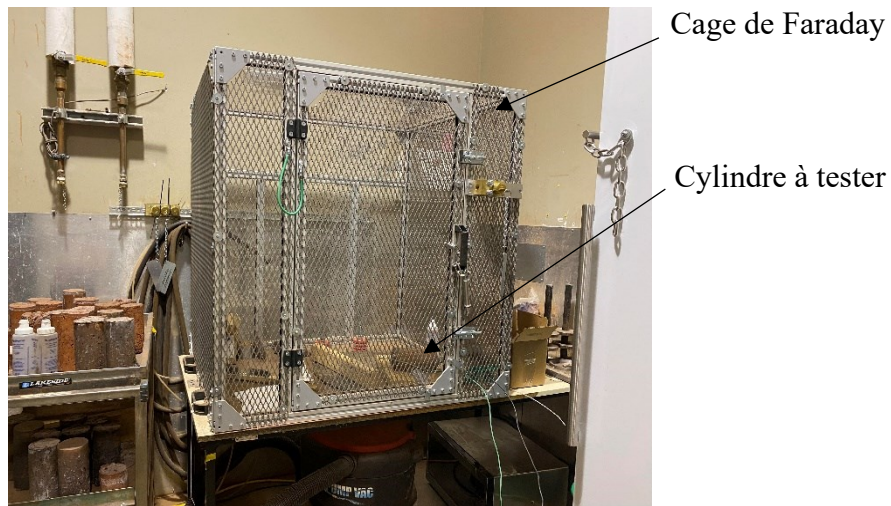


Figure 35: Montage expérimental pour la mesure de la conductivité électrique des GEC.

© Mouna Daadaa

Les résultats de l'évolution de la conductivité électrique du GEC en fonction des jours de mûrissement sont présentés à la Figure 36. Les mesures ont été réalisées pour une tension appliquée variant de 10V à 140V. Comme nous pouvons le constater, la conductivité du GEC diminue avec l'augmentation du temps de mûrissement. Cette diminution est significative entre le 7^{ième} jour et le 92^{ième} jour. De plus, nous constatons également qu'avec l'augmentation de la durée de mûrissement, la dépendance de la conductivité du GEC en fonction de la tension appliquée est beaucoup moins significative. Cela s'explique par le fait que la teneur en eau du GEC est moindre et donc que la conductivité ionique est donc moins prépondérante. Cela explique également la différence de conductivité entre le 7^{ième} et le 92^{ième} jours qui passe respectivement d'une valeur moyenne de 6,46 mS/cm à 0,16 mS/cm.

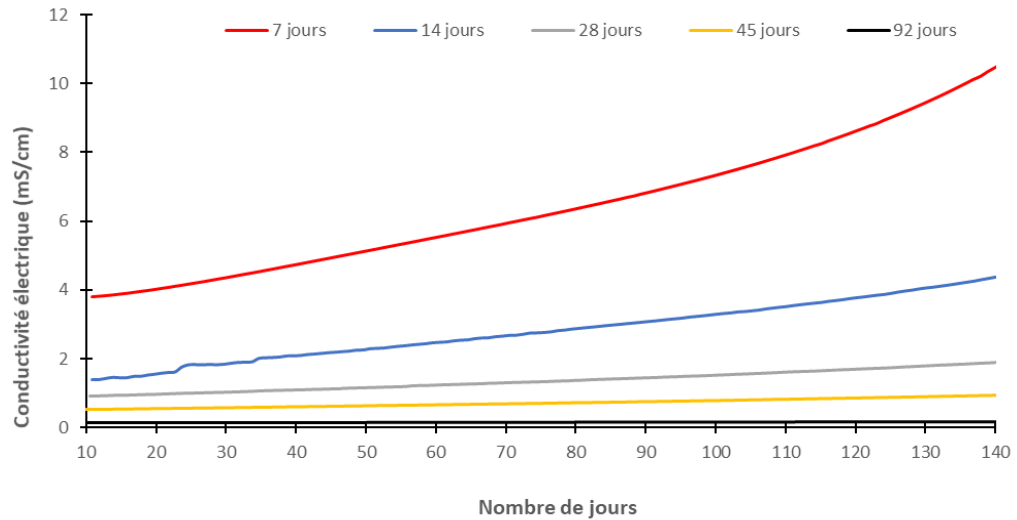


Figure 36: Évolution de la conductivité électrique du GEC en fonction des jours de mûrissement.

Il faut cependant mentionner que durant toute la période de mesure de la conductivité électrique du GEC, les échantillons utilisés sont restés à la température ambiante et à l'air libre. Le mûrissement de ces derniers n'a donc pas été effectué dans les mêmes conditions que le système EE-GEC qui, étant enfouis dans un milieu plutôt humide. De ce fait, nous pouvons émettre l'hypothèse que la conductivité électrique du GEC utilisé dans le système EE-GEC va demeurer à des valeurs proches de celles obtenues autour de 28 jours (Figure 36), soit une valeur moyenne de 1,35 mS/cm.

5.6 MESURE DE LA RÉSISTANCE DE MALT

Dans le but de mesurer avec précision la résistance de MALT, la méthode des 3 points présentée en détail dans la revue de littérature a donc été utilisée. Les mesures

de résistance ont été réalisés avec le même appareil utilisé pour la mesure de la résistivité du sol et présenté à la section précédente.,

La première mesure de résistance de MALT a été réalisée une semaine après la mise en terre du système EE-GEC. Afin de garantir une évaluation précise de la résistance de MALT, des mesures ont été effectuées dans diverses directions par rapport à l'électrode de la MALT (Electrode 1 sur la Figure 37). Dans chaque cas, la méthode en 3 points a été utilisée en utilisant un placement stratégique d'électrodes pour mesurer la résistivité du sol. L'électrode 2 de référence, élément central de ce processus, a été systématiquement positionnée à différentes distances : 10 et 20 m de l'électrode 1. Simultanément, l'électrode 3 a subi un déplacement minutieux pour déterminer la distance équivalente de 62% en fonction des distances utilisées, soit 10 et 20 m..

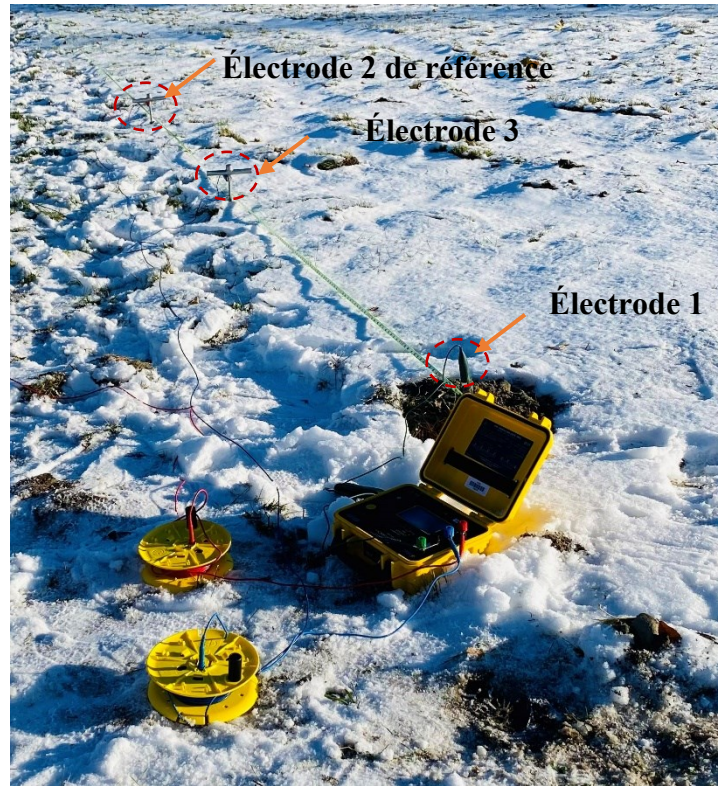


Figure 37: Test de mesure de la résistance de MALT par la méthode de la chute de potentiel.

© Mouna Daadaa

Les résultats obtenus pour trois (3) directions perpendiculaires au système de MALT et pour une distance entre les électrodes 1 et 2 de 10 et 20 m sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15: Résultats de résistance R_G obtenus par la méthode de la chute de potentiel.

Direction	10 m (Ω)	20 m (Ω)	Différence %(Ω)
1	9,93	9,96	0,3
2	9,81	9,87	06
3	9,76	9,87	1,11

Les valeurs trouvées dans le tableau 15 nous ont fourni des mesures de résistance dans les trois directions qui correspondent étroitement à une valeur moyenne de résistance MALT de $9,86 \Omega$. À partir de ces mesures, deux électrodes fixes en acier inoxydables et d'une longueur totale de 1,2 m dont les positions ont été déterminées par la méthode de la chute de potentiel (62%) ont été placées afin de pouvoir effectuer la prise de mesure de la résistance de MALT au cours des prochains mois. Ces électrodes sont beaucoup plus longues que les électrodes vendues avec l'appareil car afin de permettre d'effectuer les mesures même en présence d'une couche de neige importante.

Ainsi, plusieurs relevés de résistance de MALT ont alors été effectués dans les semaines suivantes et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16: Évolution de la résistance R_G du système EE-GEC en fonction des jours après enfouissement.

Jours après enfouissement	$R_G (\Omega)$
7	9,96
14	9,87
23	9,96
37	10,15
44	10,00
71	10,78

Comme le démontre les résultats du Tableau 16, la résistance de MALT du système EE-GEC varie d'environ 9,25% sur une période de 71 jours qui s'est étendue du 11 Novembre 2023 au 18 janvier 2024. Cela semble également confirmer que la conductivité du GEC, une fois le système enfoui dans le sol, semble donc moins affecté par la durée de mûrissement comparativement aux échantillons qui sont demeurés à

l'air libre et utilisées pour la mesure de la conductivité, tel que décrit précédemment par les résultats de la Figure 36.

5.7 SIMULATION DU MODÈLE EXPÉRIMENTAL

À partir des différents relevés effectués sur le site expérimental d'implantation et des mesures de conductivité électrique du GEC, il a été décidé de réaliser une modélisation numérique du système EE-GEC en utilisant l'approche présentée dans les sections précédentes.

Le modèle numérique utilisé est présenté à la Figure 38 et le sol d'implantation du système a été modélisé comme un sol uniforme avec une résistivité moyenne de $47 \Omega\text{m}$. Pour ce qui est du choix de la conductivité électrique du GEC, en référence aux mesures présentées à la Figure 36, il a été décidé de déterminer la résistance de terre R_G pour différentes valeurs de conductivité du GEC en faisant varier ces valeurs entre $6,46 \text{ mS/cm}$ (7 jours de mûrissement) à $0,16 \text{ mS/cm}$ (92 jours de mûrissement). En effet, la conductivité du GEC du système EE-GEC ne peut être déterminée une fois enfoui dans le sol mais nous avons cependant des valeurs moyennes en fonction du nombre de jours de mûrissement. De plus, comme la résistivité du GEC dépend de la tension appliquée, il devient difficile de connaître exactement la résistivité de ce dernier puisque la tension appliquée au système de MALT par l'appareil de mesure de résistance n'est pas connue. Les résultats ainsi obtenus sont présentés à la Figure 39.

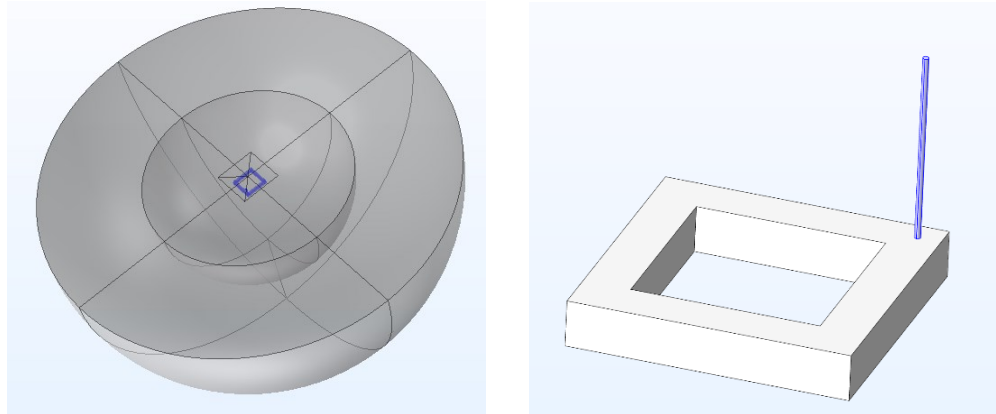


Figure 38: Modèle numérique du système EE-GEC expérimental.

Comme nous pouvons le constater sur la Figure 39, la conductivité électrique du GEC n'a pas d'influence significative sur R_G entre 0,16 et 6,16 mS/m. Pour cet intervalle, la valeur de R_G varie respectivement entre 9,72 et 10,93 Ω . Ces valeurs sont ainsi en total adéquation avec les mesures expérimentales de R_G qui sont présentées dans le Tableau 16 avec des valeurs variant de 9,87 à 10,78 Ω . Cela démontre également que le modèle numérique développé est d'une excellente précision et permet ainsi une modélisation adéquate du système de MALT EE-GEC proposé dans cette étude.

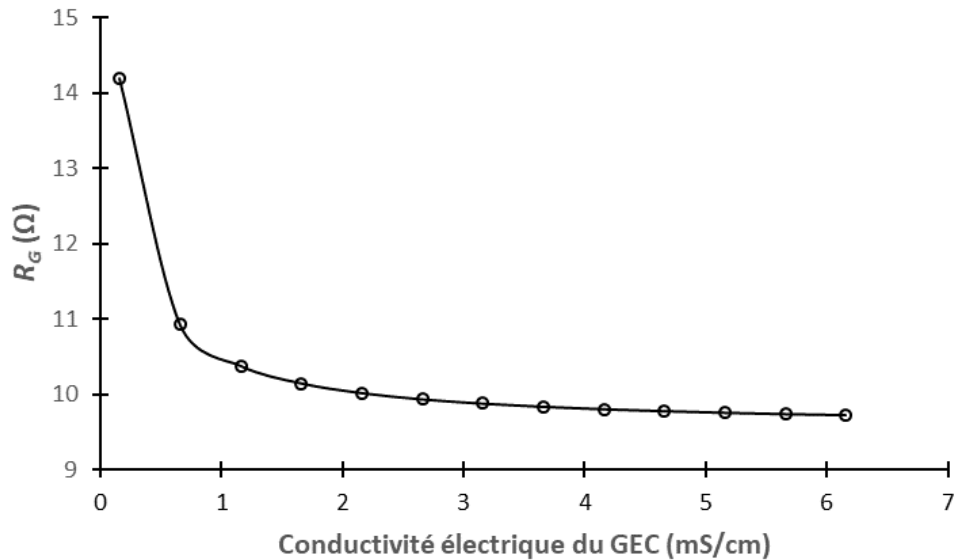


Figure 39: Évolution de la résistance de terre R_G du système EE-GEC en fonction de la conductivité électrique du GEC pour une résistivité de sol de $47 \Omega.m$.

5.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'implantation d'un modèle réduit d'un système EE-GEC en situation réelle a été présenté et validé. Aux meilleurs de nos connaissances, ce test expérimental représente une première mondiale et va ainsi permettre d'étudier l'évolution de la résistance de terre d'un système EE-GEC au cours du temps. Les données recueillies sur une période de 71 jours après enfouissement démontre que la résistance de terre a peu varié, autour de 9,2% ce qui demeure faible. De plus, les mesures expérimentales ont également permis de valider la modélisation numérique du montage expérimental en prenant en compte la variation de la conductivité électrique du GEC lors de sa période de mûrissement.. Ainsi, la concordance entre les mesures

expérimentales et les données simulées souligne la robustesse de notre approche, validant davantage la précision et l'applicabilité du modèle élaboré.

5.9 RÉFÉRENCES

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, January 2000.
- [2] A practical guide to earth resistance testing. Disponible en ligne : https://ledaelectronics.com.au/wp-content/uploads/2015/12/Megger-1_GettingDownToEarth.pdf (consulté le 22 mars 2022).

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 CONCLUSION

Cette étude représente une avancée importante dans le domaine des méthodes de mise à la terre en proposant un nouveau système basé sur des électrodes en acier (les armatures métalliques) encastrées dans du béton et/ou des géopolymère électriquement conducteurs. En fait, cette méthode EE-BEC/GEC est simplement basée sur la méthode Ufer qui utilise le béton armé des fondations de bâtiments pour réaliser la MALT. Cependant, l'objectif principale de cette recherche était de vérifier la possibilité d'utiliser un système EE-BEC/GEC pour remplacer les systèmes conventionnels de MALT en cuivre dans les postes électriques haute et très haute tension.

L'étude numérique comparative a été réalisée avec un système de MALT de poste constitué d'une grille de 70 m × 70 m uniforme de 14 m d'espacement entre les conducteurs et enfouie à 0,50 m dans le sol. Les modélisations ont été réalisées en utilisant un logiciel commercial d'éléments finis qui, une fois validé, a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le système EE-BEC/GEC étudié constitué d'une armature métallique de 19 mm de diamètre centré dans une section carré forme de BEC ou GEC ayant une résistivité de 5 Ω -m permet d'atteindre une résistance de MALT recommandé par les normes, c'est-à-dire autour de 1 Ω pour un sol non uniforme modélisé par une couche de 6,096m d'épaisseur et 300 Ω -m de résistivité et une couche infinie de résistivité de 100 Ω -m. Cette valeur de résistance de MALT a été atteinte pour une

dimension de la section carrée du BEC/GEC de 266,7 mm. Pour obtenir la même de résistance de MALT de 1Ω avec la grille en cuivre, 20 pieux verticaux de 7,5 m placés à chaque intersection des conducteurs cuivrés ont dû être ajoutés à cette dernière. Qui plus est, avec la même résistance de MALT, le système EE-BEC/GEC permet une réduction de de 7,8% de la tension de contact comparativement à la grille en cuivre avec pieux mais également une augmentation de 35% de la tension de pas. Cependant, ces valeurs de tension de pas et de contact demeurent toujours inférieures aux valeurs admissibles par les normes pour un poids de corps de 50 kg et un courant de défaut issu d'un choc de foudre, ce qui très encourageant.

- L'étude paramétrique du système EE-BEC/GEC a permis de démontrer que l'influence de la dimension de sa section carrée n'est pas très significative sur la valeur de la résistance de MALT et la tension de pas avec une réduction d'environ 15% des valeurs obtenus lorsque la longueur du côté de la section carrée passe de 114,3 mm à 520,7 mm. Par contre, pour la tension de contact, la réduction est autour de 29%.
- Lorsque la résistivité électrique du BEC/GEC varie pour un sol de résistivité uniforme et une section du système EE-BEC/GEC identique et carrée, les valeurs de résistance de MALT et les tensions de contact ne semblent plus variées lorsque le rapport entre la résistivité du sol (maintenue constante) sur la résistivité du BEC/GEC est égale ou supérieur à 60. Cela signifie que la valeur minimale de la résistivité du BEC/GEC doit être au moins égale celle du sol divisée par 60. Donc plus la résistivité du sol est importante et plus la résistivité du BEC/GEC peut être grande. Ceci démontre un avantage important du système EE-GEC dans des

conditions pour lesquelles la résistivité du sol est importante où lorsque cette dernière varie en fonction des conditions environnementales, comme au cours des saisons hivernales. Par contre pour les sols ayant des résistivités de faibles à très faibles, il pourrait être difficile de respecter le ratio de 60 puisque la résistivité du BEC/GEC reste limitée à de ordres de grandeurs de l'ordre de 1 Ω -m.

- L'étude numérique a également permis de démontrer que la géométrie de la section du système EE-GEC a moins d'influence sur les paramètres de la MALT tant que la surface de la section reste identique.
- Dans des conditions simulées de modification saisonnière de la résistivité du sol et particulièrement en saison hivernale, les résultats de simulations ont permis de constater que le système EE-BEC/GEC à une efficacité supérieure à une grille conventionnelle en cuivre de même géométrie. Cette supériorité en performance est particulièrement significative lorsque le seuil de gel atteint la profondeur d'enfouissement du système de MALT. Le seuil de gel est alors modélisé par une couche de sol d'épaisseur variable et d'une résistivité qui est plus de 10 fois supérieure à sa valeur estivale. Dans ces conditions critiques où la profondeur de pénétration du gel est égale ou supérieure à la profondeur d'enfouissement de la grille de MALT, la réduction de la résistance de MALT obtenue avec le système EE-BEC/GEC varie entre 60% et 32 % de la valeur obtenue avec une grille en cuivre. Cela représente une amélioration significative qui peut justifier l'utilisation du système EE-BEC/GEC dans des conditions extrêmes.
- Également, toujours dans le cas de l'influence du seuil de gel, les résultats de simulation ont également démontré que les tensions de pas et de contact obtenues

avec le système EE-BEC/GEC étaient toujours inférieures aux valeurs obtenues avec la grille en cuivre.

- L'implantation d'un système EE-GEC à échelle réduite de 1 m × 1m avec une section carrée 20 cm × 20 cm a été réalisée sur le site de l'UQAC. Pour ce faire, un géopolymère électriquement conducteur développé à partir de résidus de production de l'aluminium a été utilisé. Suite à l'implantation, le suivi de la résistance de MALT a été réalisée pendant 71 jours et les résultats obtenus ont permis de démontrer une faible variabilité de cette dernière située autour de 9,25% sur la période d'étude.
- Les résultats expérimentaux ont également permis de constater que l'évolution de la conductivité du GEC une fois enfoui semble différente de celle des échantillons laissés à l'air libre et utilisés pour la mesure de la conductivité. Cependant, les résultats de simulation du modèle expérimental à échelle réduite semblent confirmer que la résistance de MALT n'est pas significativement affectée par la conductivité du GEC lorsque cette dernière varie en 0,66 mS/cm et 6,46 mS/cm. En effet, pour cet intervalle de variation, la résistance de MALT obtenue numériquement varie de 9,72 Ω à 10,92 Ω soit une diminution de 12,33%, ce qui est en accord avec la variation de résistance obtenue expérimentalement.

Les différentes conclusions présentées précédemment démontrent qu'il est possible de proposer une méthode de MALT basé sur le système EE-BEC/GEC afin de remplacer les systèmes actuels utilisant des grilles en cuivre. Le système proposé est aussi performant voir meilleur lorsque la résistivité du sol est importante. Qui plus est, l'utilisation de géopolymères électriquement conducteurs développés à partir de

résidus de production de l'aluminium est une solution innovante et durable dans un contexte où le cuivre est un matériau de plus en plus en demande avec l'électrification des transports. En proposant un système de MALT issu de l'économie circulaire avec des performances fortes intéressantes, il devient alors possible de proposer de nouvelles solutions de MALT pouvant être aussi économique que le cuivre et plus durables dans le temps.

6.2 RECOMMANDATIONS

Comme il a été constaté que le système EE-BEC présente des avantages substantiels dans la mise à la terre et le positionnant comme une alternative viable pour remplacer les coûteux systèmes de mise à la terre de sous-stations conventionnels en cuivre, il est impératif de reconnaître que son acceptation et son intégration dans les normes internationales en tant qu'alternative viable dépendent de la démonstration de sa durabilité et son efficacité à long terme dans diverses conditions environnementales et lors de divers scénarios de panne. Pour y parvenir, des mesures de surveillance et de contrôle continues sont essentielles pour caractériser le comportement électrique du système ECON-EE sous divers défauts de courant. De plus, étudier l'évolution de la résistance du sol d'un système ECON-EE à une petite échelle en réponse aux variations saisonnières est un effort continu.




Il est crucial de souligner que les simulations réalisées étaient en régime permanent. Pour explorer de manière exhaustive la réponse d'un système EE-BEC aux chocs induits par la foudre et prendre en compte son comportement à hautes fréquences,


il est recommandé d'exploiter des modules supplémentaires dans le logiciel Comsol Multiphysics®. Plus précisément, l'utilisation de modules tels que le module RF ou le module électromagnétique est préconisée pour étudier en profondeur les réponses des géopolymères dans des conditions de haute fréquence. Cette approche garantit une compréhension complète des performances du système dans des scénarios dynamiques et s'aligne sur les normes rigoureuses attendues pour son acceptation et son utilisation généralisées en tant que solution de mise à la terre fiable.

En anticipant la nécessité d'une investigation approfondie, on prévoit que la présente recherche ouvrira la voie à un projet ultérieur visant à mener une étude exhaustive. Cette future initiative est conçue pour approfondir la garantie de la sécurité des individus, des animaux et de la protection du matériel électrique face aux défauts électriques. La poursuite de ce travail est jugée essentielle pour permettre une exploration plus approfondie des capacités du système de mise à la terre proposé. En entreprenant une étude complète, l'objectif est de renforcer les bases posées par cette recherche, contribuant au développement de mesures de sécurité robustes et améliorant la fiabilité globale de l'infrastructure électrique en cas d'incidents imprévus.

ANNEXES

Autorisation d'utilisation de la Figure 3

Sign in/Register  



Requesting permission to reuse content from an IEEE publication

Standard: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
Publisher: IEEE
Issue Date: 15 May 2015
Copyright © 2015, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

Autorisation d'utilisation de la Figure 4



Minimum Separation Distance Between Transmission Lines and Underground Pipelines for Inductive Interference Mitigation

Author: Chenyang Wang

Publication: IEEE Transactions on Power Delivery

Publisher: IEEE

Date: June 2020

Copyright © 2020, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

