
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة فرحات عباس - سطيف

UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF
UFAS (ALGERIE)
Faculté de Technologie

Mémoire de Magister

Présenté au département d'Electrotechnique
Pour obtenir le diplôme

De Magister En Electrotechnique

Option :

Réseaux Electriques

Par :

M. ZIDANE ZINE ABIDDINE

Thème

MODELISATION ET SIMULATION DES PRISES DE TERRE DANS LES SYSTEMES ELECTRIQUE

Soutenu le 13 / 05 /2012 devant la commission d'examen composée de :

M. BOUKTIR.T	Prof	à l'Université Ferhat Abbas de Sétif	Président
M. BAYADIA	Prof	à l'Université Ferhat Abbas de Sétif	Rapporteur
M. GHERBLA	Prof	à l'Université Ferhat Abbas de Sétif	Examineur
M. BELKHIAT.S	Prof	à l'Université Ferhat Abbas de Sétif	Examineur

Dédicaces

Je dédis ce modeste travail :

» A mes très chers parents pour leurs conseils et leurs encouragements ;

» A ma chère femme ;

» A mes chers frères et sœurs ;

» A toute ma famille ;

» A tous mes amis...

» A toute ma promotion.

Remerciements

Notre profonde gratitude et nos plus grands remerciements vont en priorité à Dieu Tout Puissant qui sans Son aide, ce travail n'aurait jamais abouti.

Je tiens à remercier en tout premier lieu Pr. Abdelhafid BAYADI Directeur de ce mémoire de m'avoir proposé ce sujet et de m'avoir aidé par ses idées et ses conseils durant toutes les étapes de ce travail.

J'exprime ma gratitude aux enseignants du département qui m'ont aidé par leurs explications durant le cycle de ma formation.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Sétif, le 13 / 05 /2012

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	I
----------------------------	---

Chapitre 01 GENERALITES SUR LES MISE A LA TERRE

1.1. Introduction	1.1
1.2. Définition d'un réseau de terre	1.1
1.3. Rôle d'une mise à la terre.....	1.1
1.3.1. Sécurité des personnes et des animaux	1.2
1.3.2. Protection des installations de puissance	1.4
1.3.3. Protection des équipements sensibles	1.5
1.3.4. Maintien d'un potentiel de référence	1.5
1.4. Différents types de prise de terre	1.5
1.5. Résistivité de la terre et résistance de mise à la terre.	1.6
1.6. Mesure des résistivités des sols	1.7
1.7. Mesure de la résistance de système de mise à la terre	1.9
1.7.1. Méthode des trois points (triangle)	1.9
1.7.2. Méthode de chute de potentiel (Fall of potentiel).....	1.10
1.8. Amélioration de la résistance d'une mise à la terre	1.13
1.8.1. Augmentation de la longueur de l'électrode	1.13
1.8.2. Augmentation de la distance entre électrodes.....	1.14
1.8.3. Augmentation du nombre d'électrodes.....	1.15
1.8.4. Augmentation du diamètre de l'électrode.....	1.16
1.8.5. Traitement des sols pour réduire la résistivité	1.18
1.8.6. Ajout d'une matière de résistivité réduite entourant l'électrode	1.18
1.9. Conclusion	1.21

Chapitre 02 Modèles des mise à la terre

2.1. Introduction	2.1
2.2. Premiers développements dans la modélisation des systèmes de mise à la terre.....	2.1
2.3. Développements récents dans la modélisation des systèmes de mise à la terre	2.4
2.3.1. Méthode des circuits équivalents.....	2.4
2.3.2. Modèle électromagnétique	2.7
2.3.3. Approche hybride	2.8
2.3.4. Modèle des lignes de transmission (TL)	2.9
2.4. Modèle électromagnétique d'une mise à la terre.....	2.10
2.4.1. Théorie des antennes.....	2.10

2.4.2. Résolution numérique de l'équation intégrale.....	2.11
2.4.3. Méthode des moments.....	2.11
2.4.4. Le Logiciel NEC-4.	2.12
2.5. Modélisation de mise à la terre en utilisant La Méthode des circuits équivalents.....	2.14
2.5.1. Modèle de systèmes de mise à la terre sous EMTP.....	2.14
2.5.2. Modèle type circuit RLC	2.15
2.6. Conclusion	2.19

Chapitre 03 Résultats et discussions

3.1. Introduction	3.1
3.2. Electrode verticale	3.1
3.2.1. Evolution de la tension et du courant de l'électrode de mise à la terre	3.3
3.2.2. Evolution de l'impédance transitoire l'électrode de terre verticale.	3.4
3.3. Electrode Horizontale.....	3.9
3.3.1. Evolution de la tension et du courant de l'électrode de mise à la terre	3.11
3.3.2. Evolution de l'impédance de l'électrode de terre horizontale	3.12
3.4. Grille de mise à la terre.....	3.15
3.4.1. Evolution de la tension et du courant grille de mise à la terre.....	3.17
3.4.2. Evolution de le champ électrique et le champ magnétique dans la grille de mise à la terre	3.19
3.5. Etude des effets des différents facteurs sur la réponse des réseaux de terre.	3.21
3.5.1. Effet du nombre des mailles de la grille.....	3.21
3.5.2. Effet du point d'injection.....	3.22
3.5.3. Effet de la résistivité.....	3.23
3.5.4. Effet du temps de montée de l'onde de courant de foudre.....	3.25
3.5.5. Effet de l'Augmentation de la longueur de l'électrode.....	3.27
3.6. Conclusion	3.27

<i>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....</i>	<i>R.1</i>
---	------------

Annexe A1- Calcule analytiques des résistances de terre

A1.1.Introduction	R.2
A1.2.Piquet de terre de forme cylindrique et vertical.....	R.2
A1.3.L'hémisphère	R.4
A1.4. Câble enterré horizontalement.....	R.4
A1.5. Electrodes sur la circonférence d'un cercle	R.5
A1.6.Réseau maillé ou grille.....	R.6
Annexe A2 L'essentiel sur le NEC4.....	R.9

Liste des figures

Figure 1.1 Tension de pas.	1.2
Figure 1.2 Tension de pas en fonction de la distance	1.3
Figure 1.3 Tension de touché.	1.4
Figure 1.4 Systèmes simples (a) et systèmes complexes de terre(b).	1.5
Figure 1.5 Schéma de mesure de la méthode de quatre électrodes.	1.7
Figure 1.6 Sol en deux couches de résistivités différentes.	1.8
Figure 1.7 Méthode des trois points.	1.9
Figure 1.8 Méthode de chute de potentiel.	1.10
Figure 1.9 Zones d'influence	1.10
Figure 1.10 Méthode du 62 %.....	1.11
Figure 1.11 Méthode de chute de tension utilisant des sondes capacitives.	1.11
Figure 1.12 Méthode de mesure sans électrodes auxiliaires.	1.12
Figure 1.13 Variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre	1.13
Figure 1.14 Résistance en fonction de la distance entre les électrodes cylindriques.	1.14
Figure 1.15 Caractéristique $R=f(n)$	1.15
Figure 1.16 Résistance en fonction du diamètre de l'électrode cylindrique verticale.	1.16
Figure 1.17 Ajout d'une matière de faible résistivité autour de l'électrode	1.18
Figure 1.18 Caractéristiques $R=f(l)$ sans et avec la couche de bentonite.	1.19
Figure 1.19 Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité.	1.20
Figure 1.20 Prise de terre avec trous profonds.....	1.21
Figure 2.1 Circuit équivalent d'une maille carrée de la grille.....	2.5
Figure 2.2 Circuit équivalent du système mise à la terre par Otero [28].....	2.6
Figure 2.3 Modèle des lignes de transmission.	2.10
Figure 2.4 Interface Electrode ou Grille pour le code NEC-4.	2.13
Figure 2.5 Interface pour l'électrode de terre.	2.13
Figure 2.6 Interface pour la grille de terre.	2.14
Figure 2.7 Modèle RLC.	2.16
Figure 2.8 Résistance et réactance inductive d'un piquet.	2.18
Figure 3.1 Electrode de terre verticale	3.1
Figure 3.2 Modèle RLC pour l'électrode verticale.	3.2
Figure 3.3 Fichier des données pour l'électrode verticale.	3.2
Figure 3.4 Comparaison entre les différentes méthodes.....	3.3

Figure 3.5 Variation du courant en différents points de l'électrode	3.4
Figure 3.6 Ondes de courant de foudre (données expérimentales de Berger)[48].	3.5
Figure 3.7 Impédance harmonique cas électrode verticale $z(f)$	3.5
Figure 3.8 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (premier arc).	3.6
Figure 3.9 Evolution de l'impédance transitoire (premier arc).	3.7
Figure 3.10 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (arc en retour suivant)	3.8
Figure 3.11 Evolution de l'impédance transitoire (arc en retour suivant).	3.8
Figure 3.12 Electrode de terre horizontale.	3.9
Figure 3.13 Modèle RLC pour l'électrode horizontale.	3.10
Figure 3.14 Fichier des données NEC-4 pour l'électrode l'horizontale.	3.10
Figure 3.15 Comparaison entres les différentes méthodes	3.11
Figure 3.16 Variation du courant en différents points de l'électrode	3.12
Figure 3.17 Impédance harmonique cas électrode horizontale $z(f)$	3.13
Figure 3.18 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (Premier arc).	3.13
Figure 3.19 Evolution de l'impédance transitoire (Premier arc).	3.14
Figure 3.20 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (Arc en retour suivant).	3.14
Figure 3.21 Evolution de l'impédance transitoire (Arc en retour suivant).	3.15
Figure 3.22 Grille de mise à la terre.	3.15
Figure 3.23 Modèle RLC pour la grille	3.16
Figure 3.24 Fichier des données NEC-4 pour la grille.	3.17
Figure 3.25 Comparaison entres les différentes méthodes	3.18
Figure 3.26 Courant électrique dans grille de mise à la terre.....	3.18
Figure 3.27 le champ électrique dans la grille.....	3.19
Figure 3.28 Variation de champ électrique le long du profil P_1P_2	3.20
Figure 3.29 Variation de champ magnétique le long du profil P_1P_2	3.20
Figure 3.30. Différentes formes de grilles.....	3.21
Figure 3.31 Pic de courant en fonction du nombre des mailles	3.22
Figure 3.32 Grille 4×4	3.22
Figure 3.33 Tension pour différents points d'injection.	3.23
Figure 3.34 Variation de champ électrique et champ magnétique le long du profil P_1P_2 pour deux points d'injection.	3.24
Figure 3.35 Le pic de courant au point B pour différentes résistivités	3.25
Figure 3.36 Répartition de tension pour des différents temps de montée.	3.26
Figure 3.37 Tensions pour différents longueur d'électrode.	3.26

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Résistivités moyennes des différents types de sol.	1.6
Tableau 1.2 Les sections normalisées obtenues en fonction des I_{cc}	1.17
Tableau 3.1 Données pour l'électrode verticale.....	3.2
Tableau 3.2 Données pour l'électrode horizontale.....	3.10
Tableau 3.3 Données pour la grille	3.16

Listes des Acronymes et Symboles

NEC	Le code numérique électromagnétique
CEI	La Commission Electrotechnique Internationale
FEM	La méthode des éléments finis
MOM	La méthode des moments
FFT	La transformée de Fourier
IFFT	La transformée de Fourier inverse.
EFIE	L'équation intégrale en champ électrique
MFIE	L'équation intégrale en champ magnétique.
TL	Le modèle de ligne de transmission
PE	Conducteur de protection
EDF	Electricité de France
GW	Configuration de la mise de terre
GN	paramètres du sol
FR	domaine fréquentiel
EX	Structure d'excitation
NE	Champ électrique
NH	Champ magnétique
XQ	La commande d'exécution
En	La commande de fin d'exécution

Listes des Symboles

ρ	La résistivité de sol.
l_{eq}	La longueur effective d'électrode de terre.
S	Section du conducteur en (mm ²)
α_r	Coefficient thermique de la résistivité à la température de référence.
Z_s	L'impédance interne de l'électrode de terre
Z_0	L'impédance de propagation
λ	La constante de propagation des ondes dans le sol.
$\vec{W}$	Le vecteur de potentiel
W	Le potentiel scalaire
E^s	Le champ électrique le long de la surface du conducteur
R'	La résistance interne linéique de l'électrode
ε_{eff}	La permittivité complexe
ε_r	La permittivité relative,
σ	La conductivité du sol
ω	La fréquence de fonctionnement.
I_0	L'amplitude du courant du canal de base ;
τ_1	La constante de temps de montée ;
τ_2	La constante de temps de descente ;
η	Le facteur de correction de l'amplitude de l'onde
n	Le exposant variant entre 2 et 10.
μ_0	La perméabilité magnétique et
τ_C	Constante de temps capacitive
τ_L	Constante de temps inductive

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est un facteur primordial du développement. Les pays en développement, souvent situés dans les régions tropicales, ont encore à ce jour un déficit en taux d'électrification et, en plus, les réseaux électriques existants connaissent de nombreuses perturbations, dues notamment aux problèmes de mise à la terre.

Le fonctionnement des installations électriques dépend étroitement de la manière dont certains dispositifs sont mis à la terre et des valeurs des paramètres des mises à la terre (résistance, inductance, capacité,...).

Depuis plusieurs décennies, des recherches se sont intensifiées dans le domaine des mises à la terre des installations électriques. Ces recherches visaient, dans leur grande majorité, les comportements de ces mises à la terre à fréquence industrielle et en régime établi ; en plus, la résistivité du sol considérée était généralement proche de $100 \Omega.m$ (valeur souvent rencontrée dans les régions tempérées).

L'objectif principal de ce mémoire est de contribuer, en utilisant la méthode électromagnétique (sous NEC-4-Numerical Electrmagnetic Code) et la méthode approche par circuit (sous EMTP) pour faire l'investigation de la réponse des systèmes de mise à la terre utilisée. L'élaboration de l'objectif va nous conduire à passer par une première phase de recherche bibliographique intensive où on va présenter des travaux d'autres chercheurs, ainsi qu'une analyse et une synthèse de ces travaux.

Dans une seconde phase, on va procéder à la modélisation des systèmes de mise à la terre, en se basant sur la théorie des moments par le logiciel NEC-4, après quoi on va utiliser ATP-EMTP.

Finalement, on va donner des comparaisons des résultats obtenus par les deux logiciels. Dans cette partie, on va présenter aussi l'étude des effets des différents facteurs sur la réponse des réseaux de terre.

Chapitre 01

GENERALITES SUR LES MISE A LA TERRE

1.1. Introduction

Dans le présent chapitre, on va rappeler les notions de base indispensables à l'analyse des mises à la terre des installations électriques à fréquence industrielle, en mettant un accent particulier sur les propriétés des sols la résistance et la résistivité de sol.

1.2. Définition d'un réseau de terre

La mise à la terre, parfois simplement appelée « la terre », est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour relier une partie métallique conductrice à la terre. La mise à la terre est un élément important d'un réseau électrique, que ce soit en haute ou basse tension. Elle est caractérisée par sa résistance ou son impédance, elle doit être capable d'assurer l'écoulement du courant de défaut ou de courant de foudre, sans se détruire par échauffement. Pour ces raisons, les mises à la terre ont pour but d'éliminer des potentiels anormaux sur les masses.

Pour une installation ou une structure de faible étendue, on emploie l'expression « prise de terre », en réservant le terme « réseau de terre » à l'installation importante telle que celles des postes.

A fréquence industrielle, l'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol qui l'entoure. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité, des caractéristiques géométriques du réseau de terre et de la source. La conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol.

1.3. Rôle d'une mise à la terre

Le rôle d'une mise à la terre d'une installation électrique [1] est de permettre l'écoulement rapide à l'intérieur du sol de courants de défaut de toutes origines, qu'il s'agisse, par exemple, cause dû aux surtensions encore de défauts à 50 Hz.

Lors de l'écoulement de tels courants par une prise ou un réseau de terre, des différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points ou entre deux masses métalliques, par exemple entre la prise de terre et le sol qui l'entoure, ou entre deux points de sol. Les schémas de liaison à la terre seront abordés sous l'aspect de leurs relations avec les réseaux de terre.

La conception des prises et des réseaux de terre doit permettre, même dans ces conditions [2], d'assurer le maintien de :

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

1.3.1. Sécurité des personnes et des animaux

Lors de l'écoulement dans le sol de courant élevé, la sécurité doit être assurée à l'intérieur de l'installation électrique et ses bords immédiats par une limitation de la tension de pas et de la tension de toucher à des valeurs non dangereuses pour l'homme ou les animaux. Cette limitation est obtenue grâce à la connaissance et au contrôle de la répartition idéale dont on doit chercher à se rapprocher, est l'équipotentialité de l'ensemble des prises de terre.

1.3.1.1. Tension de pas

Comme représenté dans la figure 1.1, la tension de pas est la différence de potentiels entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas, que l'on assimile à un mètre, dans la direction du gradient de potentiel maximum [3]:

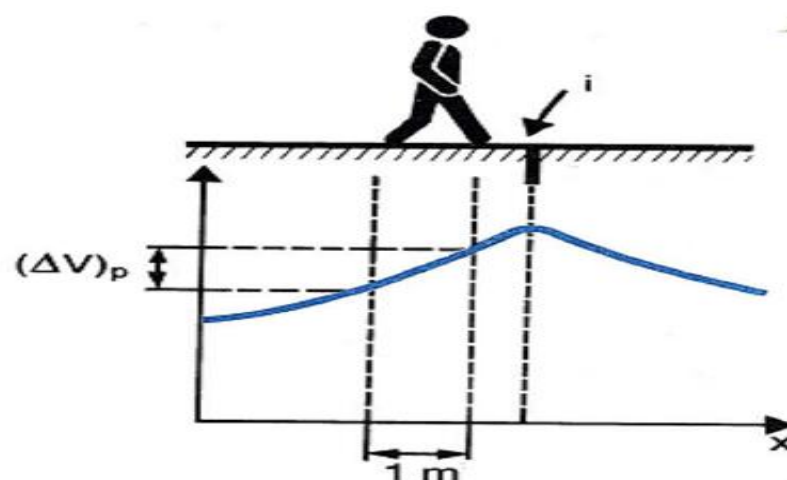


Figure 1.1 Tension de pas.

Dans un sol supposé homogène, la tension de pas est directement proportionnelle à la résistivité du sol. En général, elle dépend de la distribution de potentiel dans le sol.

A une distance d de l'impact d'un courant de foudre au sol, en considérant un sol homogène de résistivité ρ et une répartition purement résistive de potentiel, elle est donnée par la relation :

$$U_p = \frac{\rho I}{2\pi d} \frac{\rho}{(d + \rho)} \quad (1.1)$$

Dans ce cas, pour un courant de foudre de valeur de crête $I = 50$ kA par exemple, la tension de pas à une distance de 30 m du lieu d'impact est de :

$$U_p = 855,67 \text{ V pour } \rho = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m (Sétif par exemple) et}$$

$$U_p = 25,67 \text{ kV pour } \rho = 3000 \text{ } \Omega \cdot \text{m (région tropicale par exemple).}$$

La courbe de la figure 1.2 [4] donne la tension de pas en fonction de la distance pour une résistivité typique de $100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ à l'impact de courant $I=50$ kA.

Cette courbe qualifie bien la diminution de la tension de pas avec l'éloignement du point d'écoulement du courant à la terre. Dans notre cas, la tension de pas qui valait 398 kV à 1 m du point d'impact, tombe à 856 V à une distance de 30 m et à 312 V à 50 m.

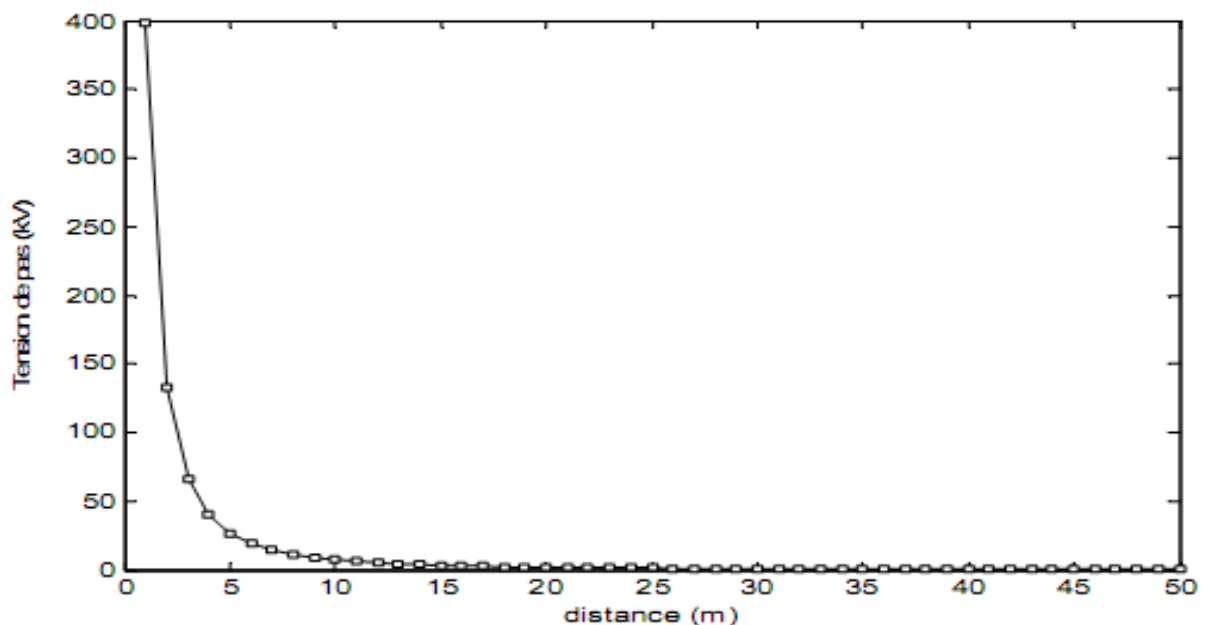


Figure 1.2 Tension de pas en fonction de la distance

Cette tension cessera d'être dangereuse pour un être humain à 126 m du point d'impact. Tandis que pour une résistivité de $3000 \Omega \cdot m$, cette distance sera de 690 m, dans un sol sec.

1.3.1.2. Tension de touché (ou de contact)

La tension de toucher (figure 1.3) est la différence de potentiels entre une structure métallique mise à la terre et un point situé à la surface du sol, à une distance égale à 1 m [4].

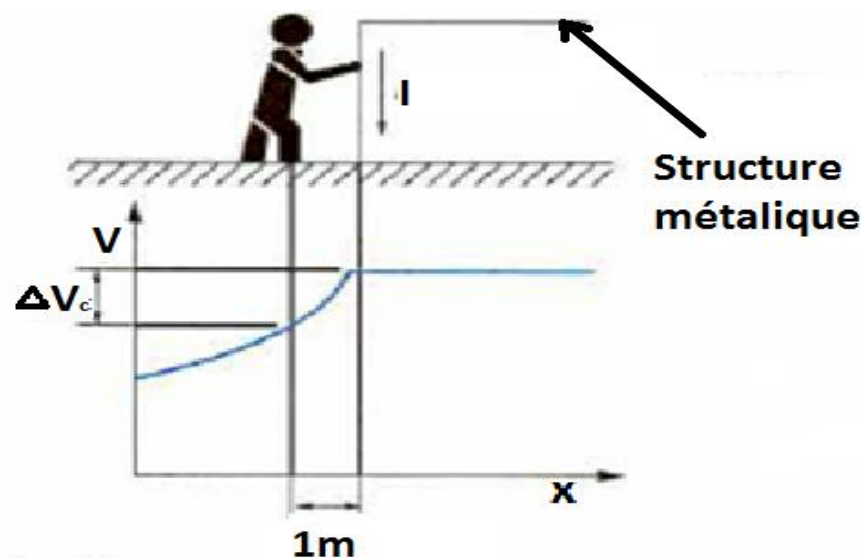


Figure 1.3 Tension de touché.

1.3.2. Protection des installations de puissance

Le réseau de terre des installations électriques, la prise de terre des supports de lignes, limitent les effets des surtensions provoquées par :

- Les défauts à 50 Hz,
- Les manœuvres d'appareillages dans les postes,
- Les surtensions d'origine atmosphérique.

Cette limitation est d'autant plus efficace que ces prises de terre facilitent l'écoulement du courant dans le sol, c'est-à-dire qu'ils présentent une impédance de terre faible, aussi bien pour les phénomènes lents (défauts à 50 Hz) que pour les phénomènes rapides tels que ceux engendrés par la foudre et par les manœuvres des disjoncteurs.

1.3.3. Protection des équipements sensibles

Dans les postes, à proximité des installations de puissance, on trouve des équipements fonctionnant à des niveaux de tension beaucoup plus faibles, équipements électroniques ou électromécaniques. ces équipements sont également exposés aux effets liés par couplage galvanique, inductif, capacitif ou plus généralement, électromagnétique.

1.3.4. Maintien d'un potentiel de référence

Les différents équipements placés dans une même installation doivent, lorsqu'ils sont reliés électriquement, rester fixes à un potentiel identique même pendant la durée des perturbations mentionnées plus haut.

1.4. Différents types de prise de terre

Il y'a deux types de systèmes de prise de terre [5] les systèmes simples et les systèmes complexes.

➤ Systèmes simples

Sont constituées, comme montré dans la figure 1.4.a de piquets ou tubes métalliques verticaux, rubans ou câbles enfoncés dans le sol à une profondeur supérieure à 1m, et couramment de 3 à 30 m ou plus. Les terres individuelles représentent le type de mise à la terre le plus utilisé.

➤ Systèmes complexes

Se composent de prises de terre multiples reliées entre elles, de systèmes maillés ou de réseau de grilles placée horizontalement à faible profondeur ,comme montré dans la figure 1.4.b.

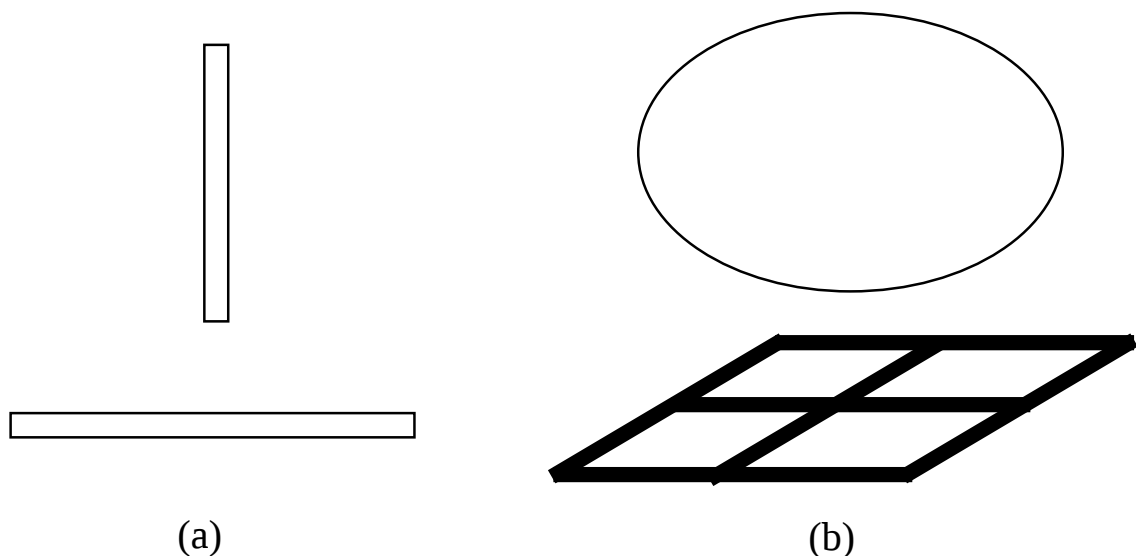


Figure 1.4 Systèmes simples (a) et systèmes complexes de terre(b).

1.5. Résistivité de la terre et résistance de mise à la terre.

Le sol est constitué de matériaux à faible conductivité. Celle-ci est due aux sels et aux impuretés entre les isolants (oxyde de silice et oxyde d'aluminium).

A cause de la faible conductivité de la terre, tout courant qui passe à travers elle, crée une grande chute de tension, ce qui revient à affirmer que le potentiel de la terre n'est pas uniforme.

La résistivité du sol est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs [6] :

- la nature des sols,
- composition chimique des sels,
- concentration des sels dissous dans l'eau contenue,
- le taux d'humidité, la température.

Le tableau ci-dessous donne une indication sur les résistivités des différents types de sol [7]

Tableau 1.1 Résistivités moyennes des différents types de sol.

Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)	Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)
Terrain marécageux	De quelques unités à 30	Calcaires fissurés	500 à 1000
Limon	20 à 100	Schistes	50 à 300
Humus	100 à 150	Calcaire tendre	100 à 500
Tourbe humide	5 à 100	Calcaires compacts	1000 à 5000
Argile plastique	50	Sol pierreux nu	1500 à 3000
Marnes et argiles compactes	100 à 200	Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Sable argileux	50 à 500	Micaschistes	800
Sable siliceux	200 à 3000	Granits et Grès	100 à 10000

La résistance d'une mise à la terre est directement proportionnelle à la résistivité du sol, si celle-ci peut être considérée comme homogène. Un autre facteur dont il faudra tenir compte est la caractéristique de l'électrode de mise à la terre : la matière, la forme, la profondeur dans le sol, le nombre, la structure, ...

1.6. Mesure des résistivités des sols

La méthode qui convient est celle de quatre électrodes (la méthode de WENNER) décrite ci-dessous [8]:

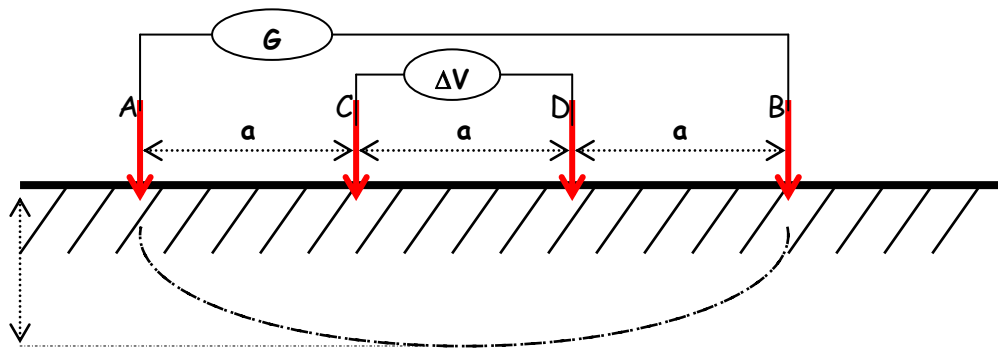


Figure 1.5 Schéma de mesure de la méthode de quatre électrodes.

La formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols à partir de la méthode de WENNER pour un sol homogène (une seule couche de résistivité ρ) est :

$$\rho = 2\pi a R \quad (1.2)$$

ρ : Résistivité apparente en $\Omega.m$

a : Distance entre électrodes en m

R : Valeur en Ω lue sur le telluromètre

La résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes dont le circuit (le circuit voltmétrique est relié aux prises C et D et le circuit ampèremétrique aux prises A et B).

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1.3)$$

Pour les sols multicouches, on utilise généralement un sol équivalent à deux couches (figure 1.6)

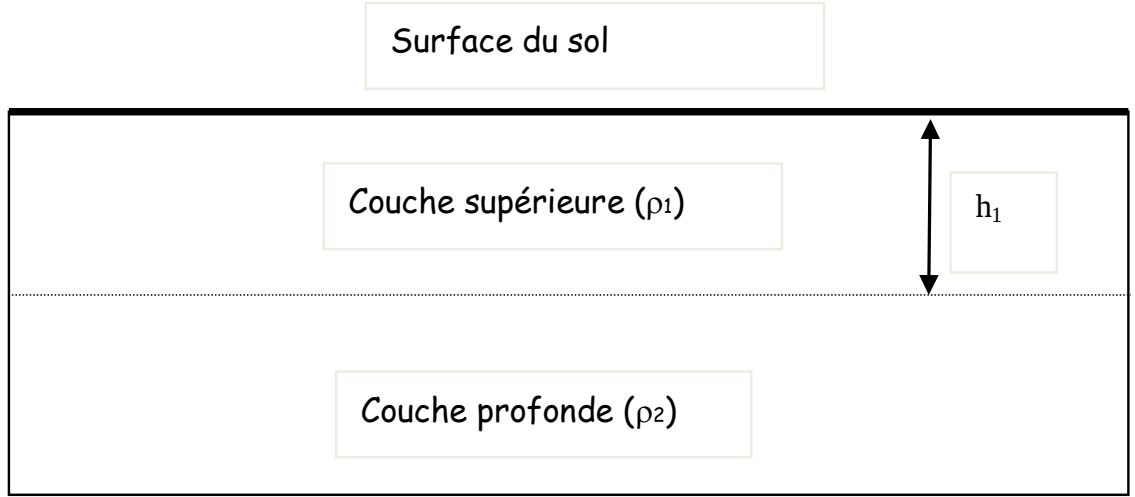


Figure 1.6 Sol en deux couches de résistivités différentes.

Depuis plusieurs dizaines d'années, les formules simples ont été développées pour calculer la résistance d'une mise à la terre en modélisant le sol en deux couches. La résistivité apparente du sol est alors donnée par la relation suivante,

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h_1}{a} \right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h_1}{a} \right)^2}} \right] \quad (1.4)$$

avec h_1 , la profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1

K , coefficient de réflexion, donné par la relation

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1.5)$$

ρ_2 , la résistivité de la couche profonde du sol.

Et pour le cas de sol en plusieurs couches de résistivités différentes, on peut aussi considérer le sol comme uniforme. Dans ce cas, La résistivité apparente ρ_a du sol supposée homogène peut être trouvée par la relation suivante [9]:

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (1.6)$$

$\rho_{a(1)}, \rho_{a(2)}, \dots, \rho_{a(n)}$ sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de 4 électrodes

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} \quad (1.7)$$

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

1.7. Mesure de la résistance de système de mise à la terre

Le problème de la détermination de la résistance d'un réseau de terre est extrêmement complexe. A part les méthodes de calculs analytiques et numériques (voir l'annexe 1), il est nécessaire dans la pratique d'utiliser des électrodes auxiliaires d'une part pour injecter du courant dans la prise de terre étudiée et d'autre part pour mesurer l'élévation de potentiel de cette dernière. Parmi ces méthodes on peut citer :

1.7.1. Méthode des trois points (triangle)

On utilise deux électrodes auxiliaires E1 et E2 associées à l'électrode de mesure E [7]. On injecte du courant électrique I entre les électrodes E et E2 et on mesure la différence de potentiel entre E et E1 (figure 1.7). Les mesures se font plusieurs fois, en écartant les électrodes jusqu'à ce que les valeurs des résistances mesurées soient constantes. C'est une méthode peu recommandée à cause de son manque de précision. Elle nécessite, par ailleurs, la déconnection de la barrette de terre avant la mesure.

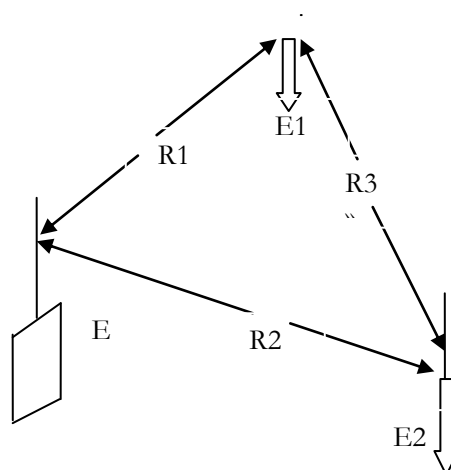


Figure 1.7 Méthode des trois points.

1.7.2. Méthode de chute de potentiel (Fall of potential)

C'est la méthode appliquée presque pour tous les types de réseau de terre [8.10], elle nécessite l'emploi de deux électrodes auxiliaires pour permettre l'injection de courant et la référence de potentiel 0V [11].

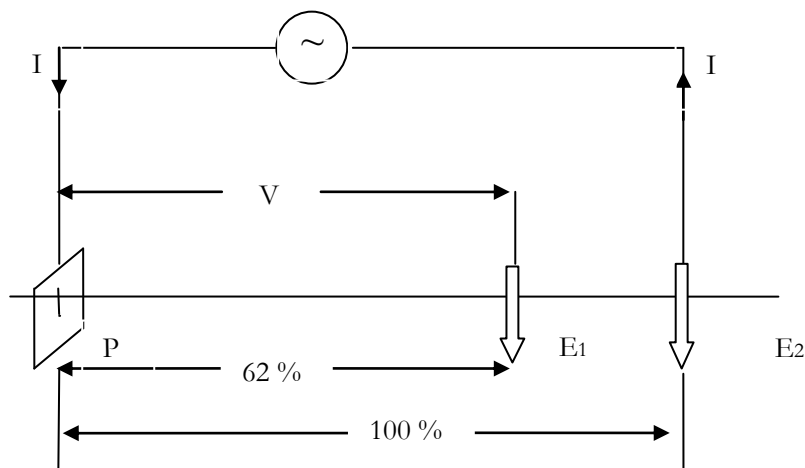


Figure 1.8 Méthode de chute de potentiel.

La position des deux électrodes auxiliaires, par rapport à la prise de terre à mesurer $E(X)$, est déterminante. Pour effectuer une bonne mesure, il faut que la « prise auxiliaire » de référence de potentiel ($E1$) ne soit pas plantée dans les zones d'influences des terres E et H (figure 1.9), zones d'influence créées par la circulation du courant (i).

Des statistiques de terrain ont montré que la méthode idéale pour garantir la plus grande précision de mesure consiste à placer le piquet $E1$ à 62 % de E sur la droite $EE2$ [5] (fig. 1.10)

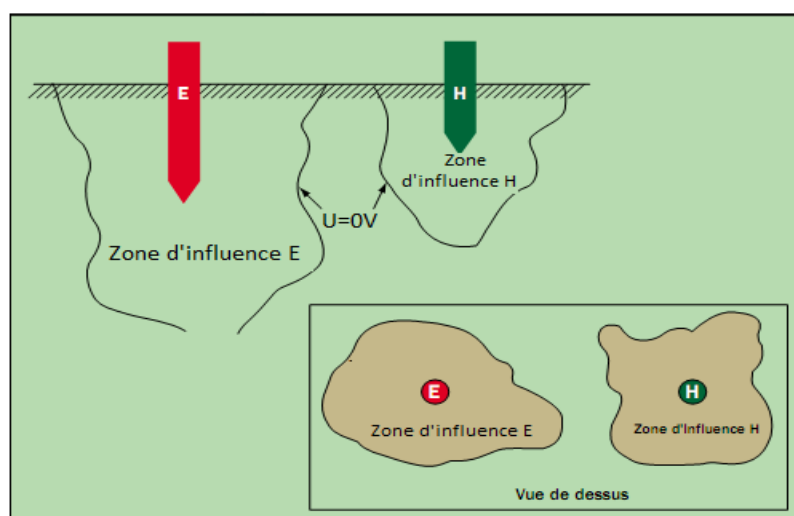


Figure 1.9 Zones d'influence

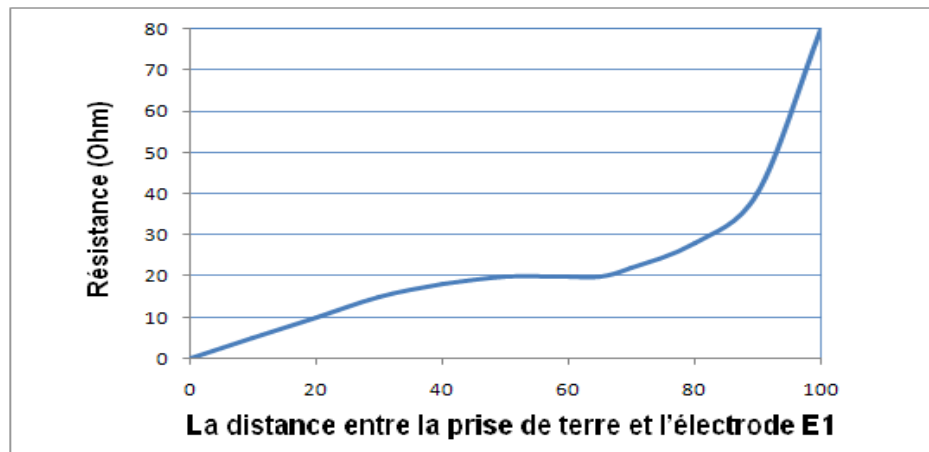


Figure 1.10 Méthode du 62 %

Il convient ensuite de s'assurer que la mesure varie peu en déplaçant le piquet E1 à $\pm 10\%$ de part et d'autre de sa position initiale et ceci toujours sur la droite EE2. Si la mesure varie, cela signifie que (E1) se trouve dans une zone d'influence : Il faut donc augmenter les distances et recommencer les mesures.

Cette méthode nécessite également, la déconnection de la barrette de terre avant la mesure.

C. Korasli propose une nouvelle méthode très pratique [12.13] pour mesurer la résistance de la mise à la terre en utilisant des sondes capacitatives au lieu des électrodes dans les districts urbanisés où il est difficile d'appliquer les électrodes figure 1.11.

Il a été démontré que les sondes capacitatives peuvent être utilisées avec succès à la place des sondes à tige dans les champs ayant une structure du sol dur et l'espace limité.

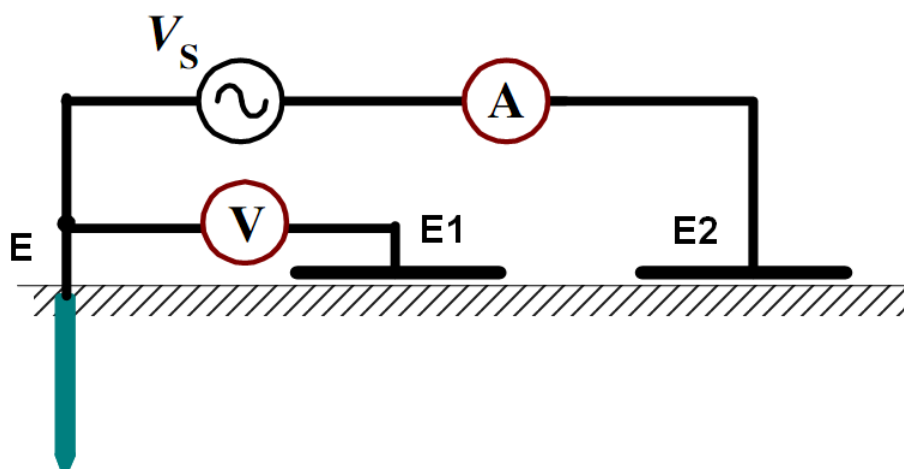


Figure 1.11 Méthode de chute de tension utilisant des sondes capacitatives.

Kazuo Murakawa et Hiroshi Yamane proposent une autre méthode de mesure [14] sans l'utilisation des électrodes auxiliaires lorsque la surface du sol est couverte par des chaussées ou des pierres (difficulté de l'utilisation d'électrodes auxiliaires) comme il est montré dans la figure 1.12.

Un fil conducteur est relié à la prise de terre à l'essai, et le fil de retour est raccordé uniquement à un générateur de signal V_s , a est le diamètre des fils, et h est le diamètre du l'isolant.

$\varepsilon_1 \mu_1 \sigma_1$, et $\varepsilon_2 \mu_2 \sigma_2$ Sont la permittivité et la perméabilité et la conductivité des fils et de la terre respectivement.

L'impédance interne de fil $Z(\omega)$ est :

$$Z(\omega) = R_g + Z_0 \frac{1 + r_r \exp(-2\gamma_1 L_2)}{1 - r_r \exp(-2\gamma_1 L_2)} \quad (1.8)$$

Sachant que

$$Z_0 = 60 \log \frac{2h}{a} \quad \text{et} \quad \gamma_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$$

R_g est la résistance de prise de terre, r_r est le coefficient de réflexion du fil de retour, γ_1 est la longueur d'onde du fil de retour, L_1 et L_2 sont les longueurs des fils,

On peut trouver R_g en changeant la fréquence de générateur V_S jusqu'à la valeur minimum de $Z(\omega)$.

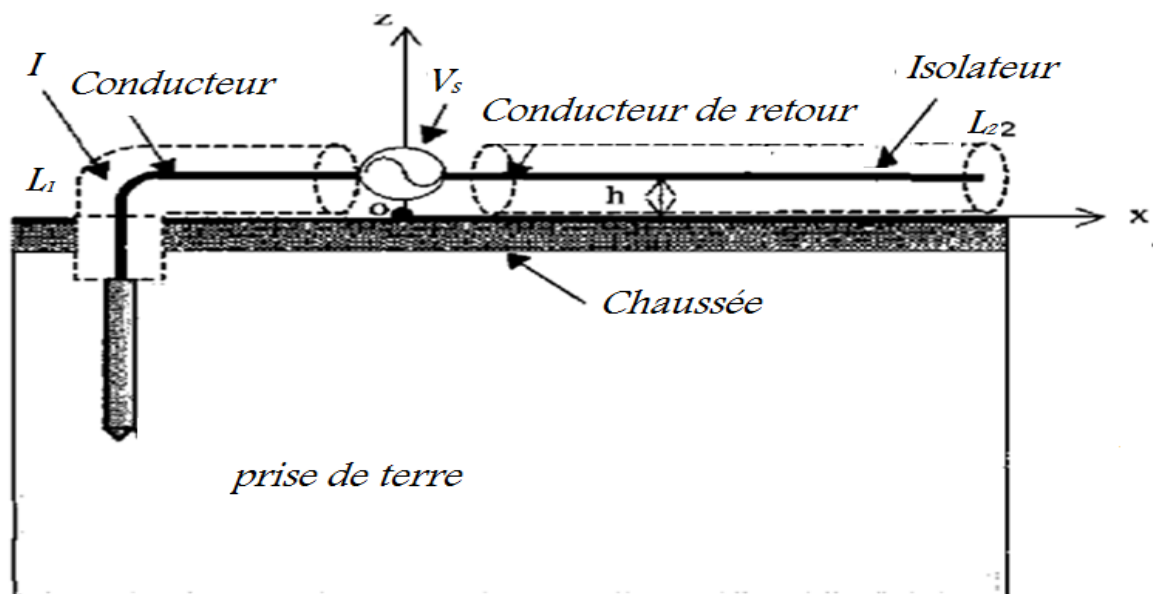


Figure 1.12 Méthode de mesure sans électrodes auxiliaires.

1.8. Amélioration de la résistance d'une mise à la terre

En régions de forte résistivité des sols, les configurations habituelles de mise à la terre ne permettent pas d'obtenir des résistances et des impédances relativement faibles [5], selon les normes. Il faut alors trouver des moyens efficaces pour réduire ces résistances (impédances).

De nombreuses solutions existent mais il nous faudra choisir celles qui minimisent le coût des installations, tout en respectant les normes. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons énumérer ces différents moyens et évaluer l'impact de l'amélioration des résistances des mises à la terre qu'ils permettent.

1.8.1. Augmentation de la longueur de l'électrode

La figure 1.13 montre les valeurs des résistances pour différentes valeurs de la longueur de l'électrode cylindrique [15] de rayon 0,0125 m, pour un sol homogène de résistivité $100 \Omega \cdot m$ (La relation (1.9)).

Cette figure montre que l'augmentation de la longueur de l'électrode réduit la résistance. Il est noté que cette affirmation n'existe que rarement en pratique, les mesures sont donc nécessaires.

En plus, l'augmentation de la longueur induit l'augmentation de l'inductance du piquet, donc de son impédance, ce qui est mauvais pour les courants en hautes fréquences.

La longueur effective d'une électrode de terre est sa longueur pour laquelle le coefficient impulsionnel est égal à 1.

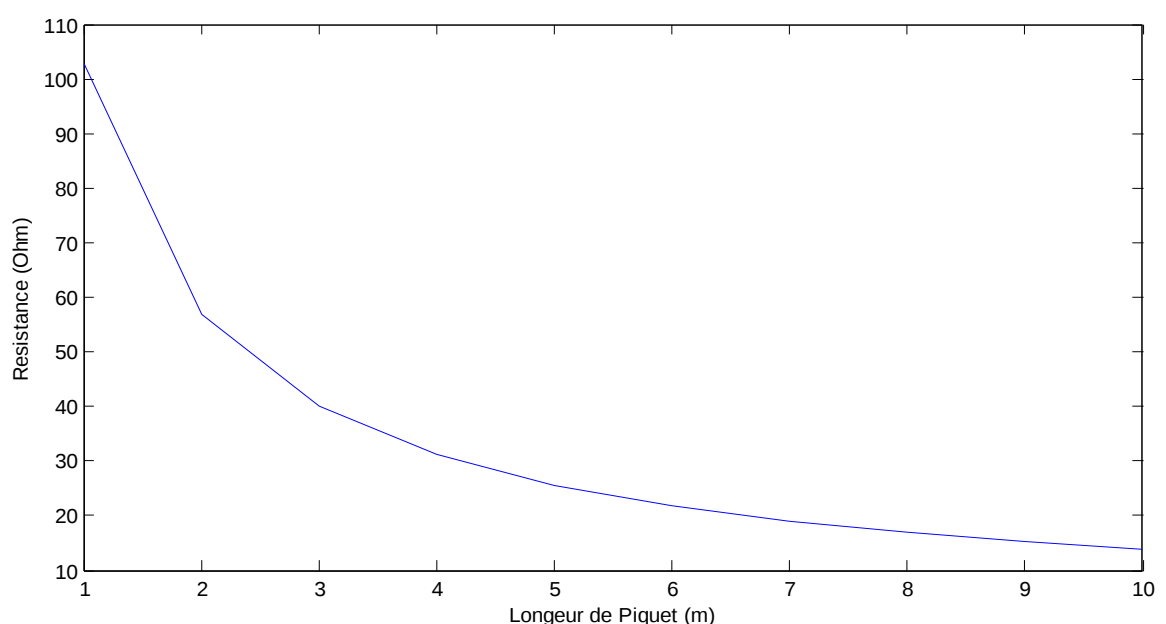


Figure 1.13 Variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre

Le coefficient impulsif est le rapport entre l'impédance impulsif et la résistance en basse fréquence. Gupta et Thapar ont donné la relation analytique suivante pour calculer la longueur effective [16].

$$l_{eq} = 1,4\sqrt{\rho\tau_1} \quad (1.10)$$

Où ρ est la résistivité du sol et τ_1 le temps de montée de l'onde du courant de foudre en μs .

1.8.2. Augmentation de la distance entre électrodes

La figure 1.14 montre la résistance de plusieurs configurations possibles des prise de terre de rayon $r = 0,0125$ m, et longueur $l = 2$ m, en fonction de la distance entre elles, pour un sol homogène de résistivité $\rho = 100 \Omega m$ [4].

L'espacement entre deux conducteurs D est donné par [10]:

$$D = \frac{2.L_x.L_y}{L - L_x - L_y} \quad (1.11)$$

L_x : Longueur du poste

L_y : Largeur du poste

L : Longueur totale du réseau maillé

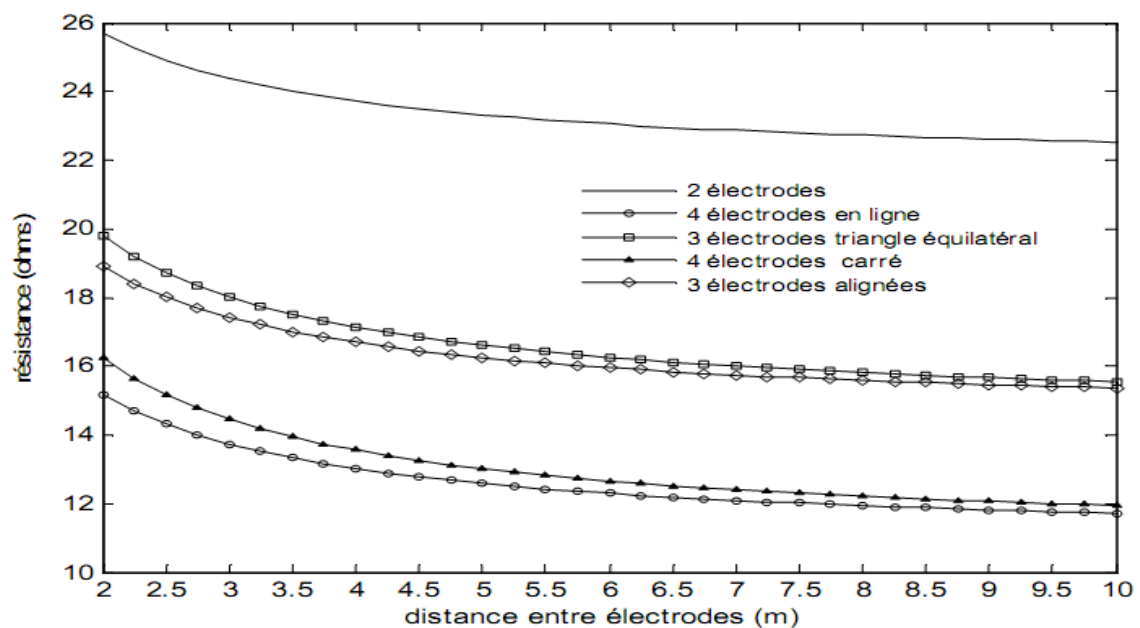


Figure 1.14 Résistance en fonction de la distance entre les électrodes cylindriques.

Nous remarquons bien que pour des distances entre électrodes juste supérieures à la longueur de celle-ci, la réduction de la résistance des piquets est assez sensible et diminue avec l'augmentation de la distance (par exemple, pour 3 électrodes au sommet d'un triangle équilatéral, la résistance subit une diminution de 13 % quand la distance passe de 2 m à 3 m, alors que quand elle passe de 2 m à 10 m, la réduction n'est que de 21 %). Ceci montre une fois de plus que pour des raisons de coût et d'espace, il y a une limite quant à la distance entre les électrodes. La littérature renseigne que la distance de 6 m entre les électrodes est économiquement une limite du coût de la mise à la terre [17]

1.8.3. Augmentation du nombre d'électrodes

On peut réduire la résistance d'une mise à la terre en augmentant le nombre d'électrodes.

La littérature indique que l'augmentation du nombre d'électrodes diminue la résistance mais pas d'un facteur inverse [17].

La figure 1.15 montre la résistance d'une mise à la terre en fonction du nombre d'électrodes cylindriques[4] pour une configuration en ligne droite et pour une distance entre électrodes égale au double de la longueur des électrodes, soit $l = 2$ m, $d = 4$ m, $r = 0.0125$ m et $\rho = 100 \Omega.m$.

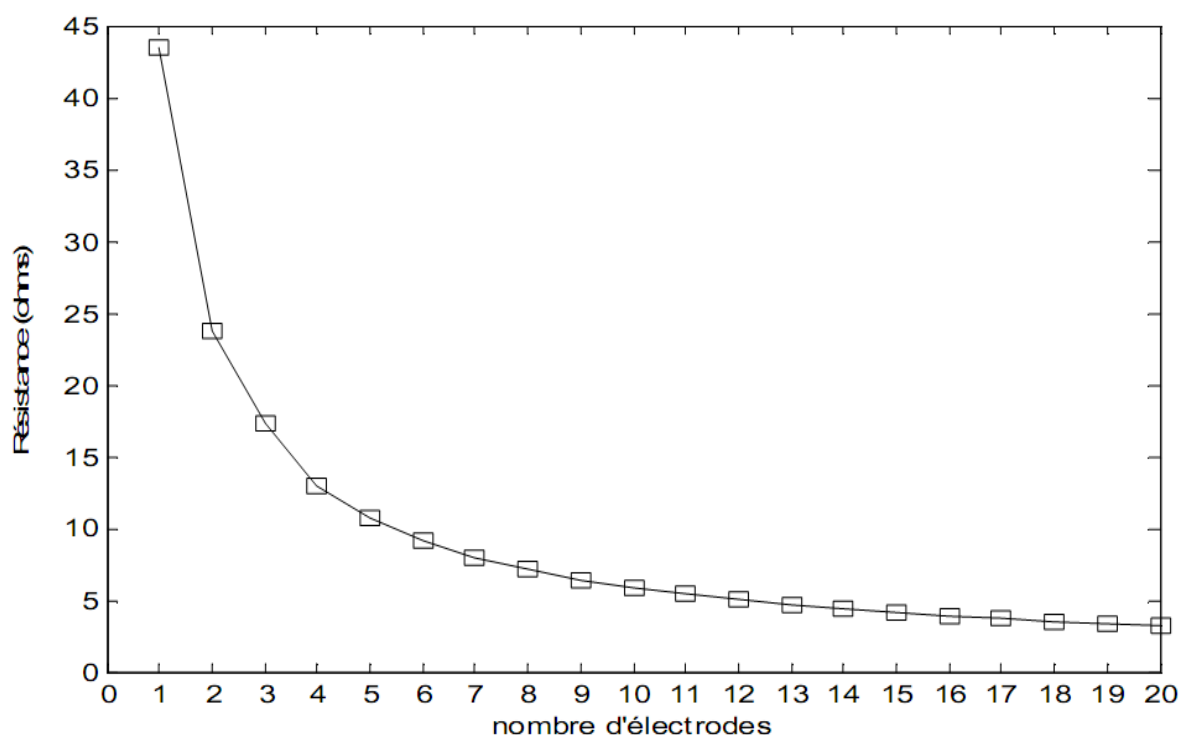


Figure 1.15 Caractéristique $R=f(n)$

Cette figure montre bien l'impact de l'augmentation du nombre d'électrodes. Par exemple en passant d'une à 20 électrodes, la résistance est divisée par 10, comme souligné précédemment. La meilleure réduction de la résistance a lieu quand on passe d'une à deux électrodes. Au fur et à mesure que l'on augmente le nombre d'électrodes, la réduction de la résistance devient plus faible. Ce moyen est le plus utilisé pour obtenir une résistance de mise à la terre réduite. Il demande, néanmoins, de l'espace et augmente le coût de la mise à la terre.

Nombre de conducteur en parallèle :

$$\text{En longueur : } n = \frac{Lx}{D} + 1 \quad (1.12)$$

$$\text{En largeur : } n = \frac{Ly}{D} + 1 \quad (1.13)$$

1.8.4. Augmentation du diamètre de l'électrode

Soit une électrode verticale en cuivre de 2 m de longueur, dans un sol de 100 $\Omega \cdot m$. La résistance de la mise à la terre en fonction du diamètre de l'électrode pour plusieurs configurations en appliquant la relation de Dwight-Sunde (l'équation(A2.2))est donnée à la figure suivante [4] :

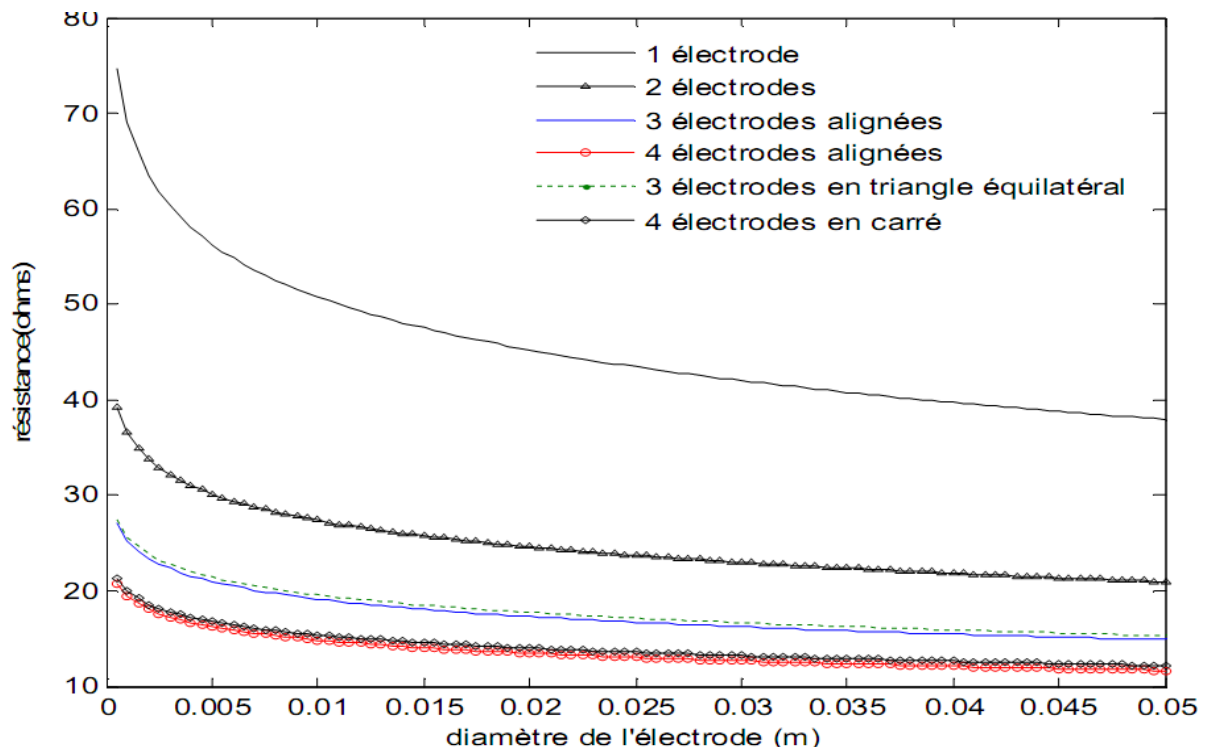


Figure 1.16 Résistance en fonction du diamètre de l'électrode cylindrique verticale.

Cette figure montre que pour une électrode cylindrique, en multipliant le diamètre par 10, la résistance est réduite de 43 % pour une électrode, de 30 % pour deux électrodes, 29 % pour trois, 28 % pour 4 électrodes en ligne et 27 % pour 4 électrodes aux sommets d'un carré). Ceci montre qu'il n'y a pas beaucoup d'intérêt à augmenter dans des larges proportions le diamètre de l'électrode à cause des problèmes de coût. Nous rappelons ici que pour une électrode cylindrique pleine, multiplier le diamètre par 10 revient à multiplier le volume (le prix également) par 100, pour la même longueur, alors que la résistance, quant à elle, n'est réduite que de 30 % en moyenne. Le calcul de section des conducteurs est fait selon la norme ANSI:

$$S = 0.7 \cdot I_{cc} \cdot \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{T_{cap}} \cdot \frac{1}{L_n \left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right]}} \quad (1.14)$$

S : Section du conducteur en (mm²).

I_{cc} : Courant de court circuit maximal en (kA).

t_c : Durée maximale de défaut (1s).

α_r : Coefficient thermique de la résistivité à la température de référence.

ρ_r : Résistivité du conducteur de terre à la température de référence.

T_{cap} : Capacité thermique.

T_m : Température maximale admissible typique pour les connexions serties. (300°C)

T_a : Température ambiante dans le sol. (30°C)

K_o : Coefficient = $[1/\alpha_r] - T_r$. ($K_o = 234$)

T_r : Température de référence. (20 °C)

Le tableau ci-dessus montre quelques sections des conducteurs pour différents courant de court circuit.

Tableau 1.2 Les sections normalisées obtenues en fonction des I_{cc}

Sections (mm ²)	Courants de court circuit (kA)
75,5	< 20
93,3	20 < I_{cc} ≤ 24
116,2	24 < I_{cc} ≤ 31,5
147,1	31,5 < I_{cc} ≤ 40
181,6	40 < I_{cc} ≤ 63

1.8.5. Traitement des sols pour réduire la résistivité

Comme évoqué précédemment, la résistivité du sol dépend de plusieurs facteurs (la nature des sols, la profondeur des courants dans le sol, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température,...).

Il y a moyen de réduire la résistivité en traitant le sol avec des produits [5] tels que le charbon de bois, la bentonite et le sel. La norme CEI 62305-3 [4] recommande les matériaux à utiliser comme électrode de mise à la terre et les risques de corrosion en présence d'autres matériaux dans le sol, pour les mises à la terre de protection contre la foudre d'autres produits sont disponibles sur le marché pour ce faire. Dans tous les cas, il faut éviter une solution tendant à réduire les performances de la mise à la terre avec le temps.

Dans la suite, nous allons évaluer l'influence d'une couche de matière de résistivité plus faible que la terre entourant les électrodes de terre dans les performances des mises à la terre. En plus, l'utilisation des produits chimiques est dans la plupart de cas proscrite à cause des risques de pollution des sols.

1.8.6. Ajout d'une matière de résistivité réduite entourant l'électrode

Cette technique permet d'entourer l'électrode de terre d'une couche de matière peu résistive [15], tel que présenté sur la figure ci-dessous.

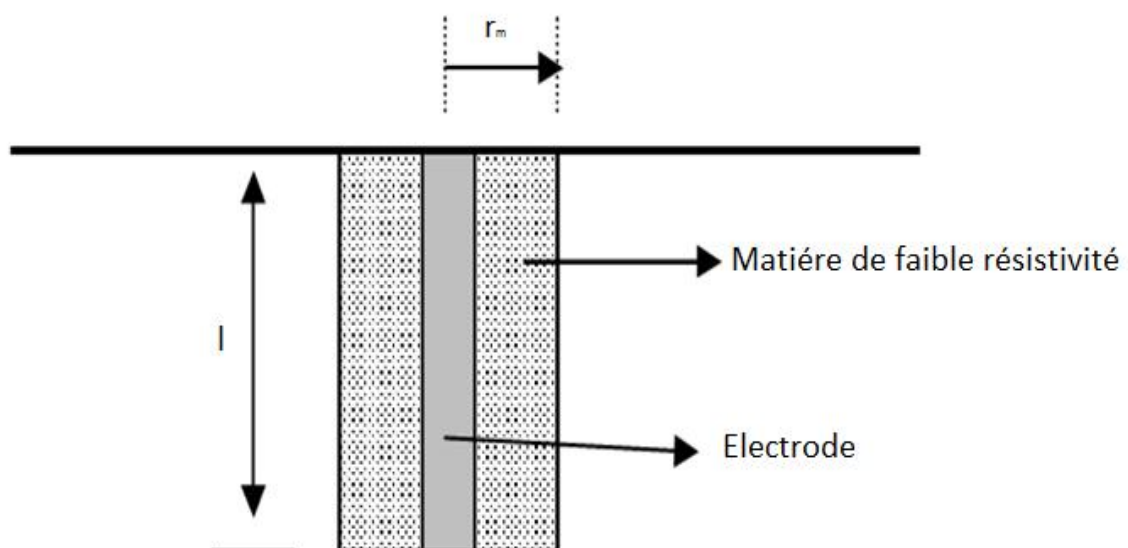


Figure 1.17 Ajout d'une matière de faible résistivité autour de l'électrode

Cette matière ne devra pas causer une corrosion aux piquets .Plusieurs produits de faible résistivité sont utilisés (la bentonite par exemple), ou encore le charbon de bois dans les régions tropicales.

La figure 1.18 représente la variation de la résistance de terre eu fonction de la longueur de l'électrode de terre (l) sans et avec la couche de bentonite [15], cette courbe est tracée pour une électrode verticale en cuivre de 2 -32 m de longueur et de rayon 4 mm, dans un sol de résistivité 1300 Ω .m. La résistivité de la matière entourant l'électrode étant de 10 Ω .m.

La réduction de résistance justifie l'intérêt de bentonite. Une relation analytique ci-dessous, utilisée par Fagan et Lee a été donnée [4], pour évaluer la résistance d'une telle électrode verticale :

$$R_m = \frac{1}{2\pi l} \left\{ \rho_m \left[\ln \left(\frac{r_m}{r} \right) \right] + \rho \left[\ln \left(\frac{4l}{r_m} \right) - 1 \right] \right\} \quad (1.15)$$

Où l est la longueur du piquet, ρ la résistivité du sol, ρ_m est la résistivité de la matière autour de l'électrode, r le rayon de l'électrode et r_m le rayon de la matière autour de l'électrode.

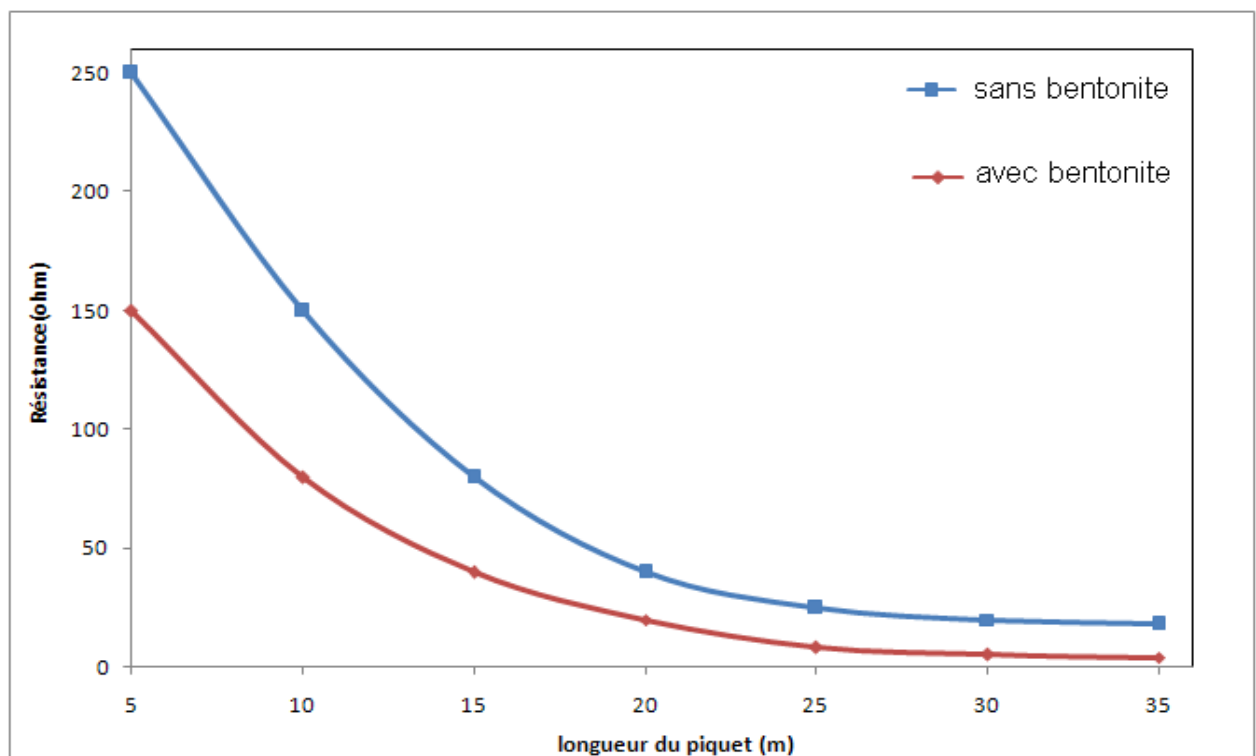


Figure 1.18 Caractéristiques $R=f(l)$ sans et avec la couche de bentonite.

La résistivité électrique du charbon de bois a été évaluée et plusieurs références en donnent des résultats. Lev Weiner [4] indique que les mesures effectuées sur un échantillon de la poudre de charbon de bois avaient donné une résistivité assez faible de quelques ohmmètres, dépendant de l'espèce du bois utilisée pour fabriquer le charbon de bois. Il est donc intéressant de faire usage de la poudre de charbon de bois autour des piquets de terre car la résistivité diminue avec la diminution de la taille des grains.

QingboMeng ,Jinliang He et F. P. Dawalibi proposent Une nouvelle technique [18] pour réduire la résistance de sol. Cette méthode nécessite trois étapes:

- faire des trous profonds dans le sol;
- faire des fissures dans le sol à l'aide des explosifs dans les trous;
- remplir les trous avec des matériaux de faible résistivité sous pression.

Un réseau complexe de fissures de faible résistivité en forme d'arbre lié à la grille est formé.

Jinliang He et GangYu proposent Une autre technique [19] permet l'utilisation des trous profonds dans le sol et de diminuer la résistance de mise a la terre.

La prise de terre est ainsi formée par un tube métallique avec des ouvertures latérales qui permettent la pénétration d'eau souterraine, qui a la capacité de recueillir l'eau et de mouiller l'environnement au tour de sol. Cette nouvelle méthode a été appliquée dans les zones où la terre contient beaucoup d'eaux souterraines

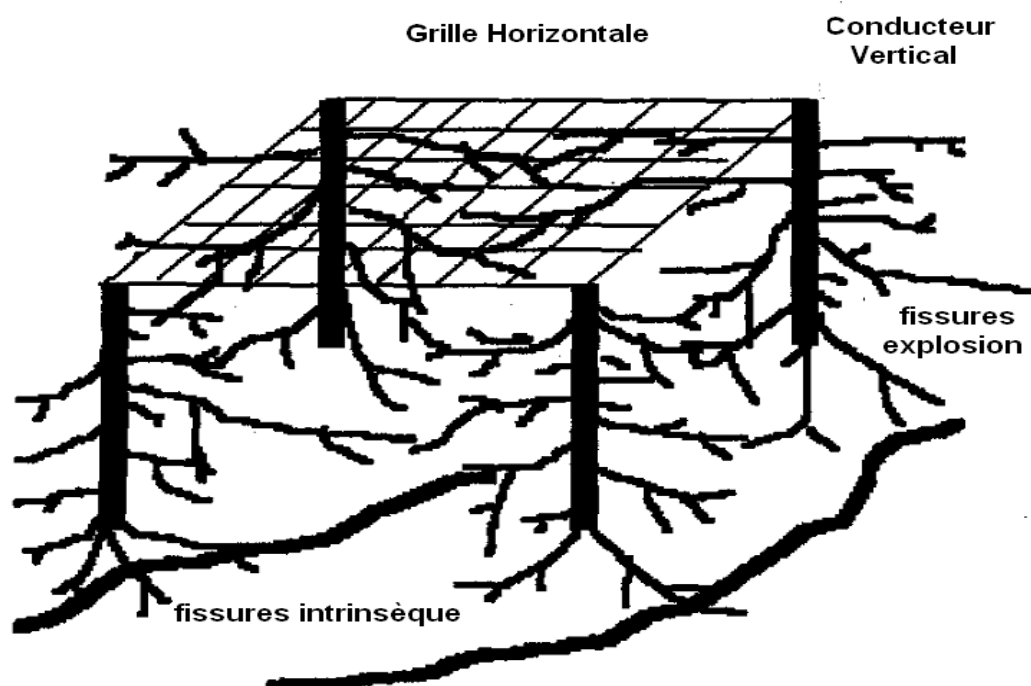


Figure 1.19 Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité.

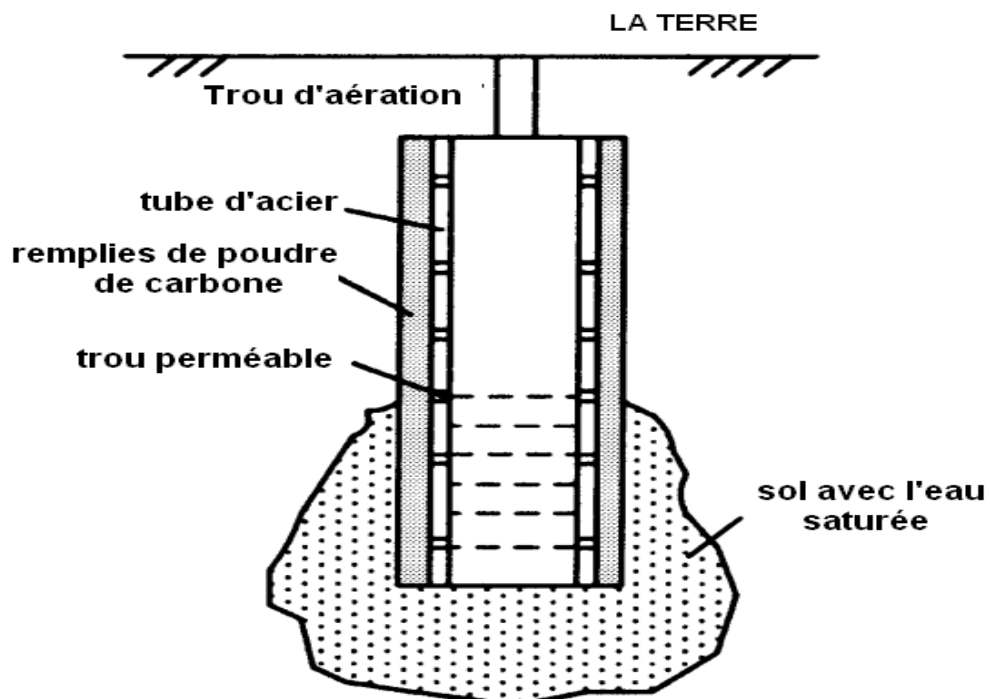


Figure 1.20 *Prise de terre avec trous profonds*

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre on a exposé les notions de base nécessaire à l'analyse des mises à la terre des installations électriques à fréquence industrielle. On a présenté aussi les différentes méthodes de mesure et d'amélioration de la résistance de mise à terre.

Chapitre 02

MODELES DES MISE A LA TERRE

2.1. Introduction

Les relations développées jusqu'ici sont valables pour les basses fréquences comme celles du réseau électrique industriel (50 Hz et 60 Hz) où l'inductance et la capacité des mises à la terre sont négligées par rapport à leur résistance.

A des fréquences élevées (telles que les fréquences de l'onde d'un courant de foudre), il faut tenir compte de tous ces éléments (résistance, inductance et capacité). Plusieurs modèles simples d'une électrode verticale ou horizontale ont été développés pour évaluer les caractéristiques impulsionnelles des mises à la terre [20-23]; donc il est nécessaire d'avoir aussi un aperçu historique des différents modèles mathématiques pour l'analyse transitoire de systèmes de mise à la terre. Ces modèles existants sont le premier pas pour cette présente recherche. Ce chapitre est consacré à la présentation des différents modèles existants depuis 1934. La modélisation des systèmes de terre sera développée au cours de ce chapitre, en utilisant les méthodes analogiques et numériques.

2.2. Premiers développements dans la modélisation des systèmes de mise à la terre

Plusieurs méthodes expérimentales et théoriques du comportement transitoire des systèmes de terre sous les coups de foudre ont fleuri pour la première fois en 1934 des travaux de Bewley. Son travail a été une partie de la recherche pour la protection des systèmes électriques contre la foudre, où il a tiré l'impédance d'entrée au point d'injection pour une tension appliquée (échelon unité). Cette impédance, comme indiqué dans l'équation (2.1) a été dérivée en se basant sur l'hypothèse que l'électrode de terre est une ligne de transmission à long perte [5].

$$Z_c(t) = \frac{1}{G l_c \left\{ 1 - \sum_{K=1}^{\infty} \frac{8e^{-\delta t}}{(2K-1)^2 2\pi^2} \left[\cos \omega_K t + \left(\frac{G}{4\omega_K C} - \frac{\omega_K C}{G} \right) \sin \omega_K t \right] \right\}} \quad (2.1)$$

$$\omega_K = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(2k-1)2\pi^2}{L C l_c^2} - \frac{G^2}{C^2}} \quad (2.2)$$

$$\delta = \frac{G}{2C} \quad (2.3)$$

l_c est la longueur d'électrode de terre. G , L et C sont les valeurs par unité de longueur de la conductance, de l'inductance et de la capacitance d'électrode respectivement. L'impédance transitoire de la prise de terre commence avec un effet d'impédance initial $\sqrt{\frac{L}{C}}$ et se termine avec l'effet de résistance de fuite finale $\frac{1}{Gl_c}$, et le temps de transition entre ces deux effets dépend de la résistivité du sol et de la surtension. Tout ce qui précède a été déclaré est résumées ensuite dans son livre de "Travelling waves in transmission systems" [24].

En 1943, Bellaschi et Armington ont calculés analytiquement la tension de réponse des électrodes de mise à la terre au point d'injection pour des impulsions de courant avec des formes d'ondes différentes [25]. Ils ont donnés les expressions de la tension développée au point d'injection par une série lentement convergentes. Pour une impulsion échelon ($I=1$), la tension de choc au point d'injection est donnée par la relation suivante [20]:

$$e(t) = \frac{I}{G_t} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} t} \right] \quad (2.4)$$

Pour un courant de foudre de forme bi exponentielle $I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, la tension au point d'injection est :

$$e(t) = I_0 \left[\frac{\sqrt{\frac{L_t \alpha}{G_t}} e^{-\alpha t}}{\tan \sqrt{G_t L_t} \alpha} - \frac{\sqrt{\frac{L_t \beta}{G_t}} e^{-\beta t}}{\tan \sqrt{G_t L_t} \beta} + \frac{\alpha - \beta}{G_t^2 L_t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2 \pi^2 e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} t}}{\left(\alpha - \frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} \right) \left(\beta - \frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} \right)} \right] \quad (2.5)$$

Pour un courant de forme sinusoïdal $I(t) = A(1 - \cos Bt)$ la tension au point d'injection est :

$$e(t) = \frac{A}{G_t} - A \sqrt{\frac{L_t B}{G_t}} \frac{\cos \left[Bt + 0.783 - \tan^{-1} \left(\frac{\sin \sqrt{2G_t L_t B}}{\sinh \sqrt{2G_t L_t B}} \right) \right]}{\frac{\sqrt{\sinh^2 \sqrt{2G_t L_t B} + \sin^2 \sqrt{2G_t L_t B}}}{\cosh \sqrt{2G_t L_t B} + \cos \sqrt{2G_t L_t B}}} - \frac{AG_t B^2 L_t^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} t}}{n^4 + \frac{B^2 G_t^2 L_t^2}{\pi^4}} \quad (2.6)$$

L_t est l'inductance de l'électrode, G_t est la conductance de sol, I_0 est la valeur crête du courant d'injection. α , β , A et B sont des constantes pour le courant injecté pour des différentes formes d'onde.

En comparant les équations (2.1), (2.5) et (2.6), on peut constater que Bellaschi a négligé l'effet capacitif dans leur modèle.

L'un des manuels le plus important et classique des systèmes de terre a été écrit par Sunde [26] qui est aujourd'hui encore largement utilisé par de nombreux ingénieurs praticiens à résoudre les problèmes de terre. Son approche de décrire le système de mise à la terre est basé sur la théorie du champ électromagnétique à partir des équations de Maxwell. Il a présenté non seulement le calcul de la résistance des différentes structures de mise à la terre, il donne aussi une théorie extensive du comportement à haute fréquence par induction des électrodes de terre.

Peut-être Sunde a été le premier à introduire le concept de ligne de transmission avec des paramètres dépendent de la fréquence la modélisation du comportement transitoire des électrodes horizontales de mise à terre avec l'utilisation les équations du télégraphiste suivants.

$$\frac{dl(x, j\omega)}{dx} = -YV(x, j\omega) \quad (2.7)$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -ZI(x, j\omega) \quad (2.8)$$

Z et Y sont l'impédance et l'admittance par unité de longueur de l'électrode de terre, exprimées comme suit :

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\rho_{sol} + j\omega\epsilon_{sol})} \log\left(\frac{1,12}{\Gamma a}\right) \right]^{-1} \quad (2.9)$$

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \log \frac{1,85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{0.5}} \quad (2.10)$$

Sachant que $\gamma^2 = j\omega\mu_0(\sigma_{sol} + i\omega\epsilon_{sol})$, Z_s est l'impédance interne de l'électrode de terre par unité de longueur, Y_i est l'admittance par unité de longueur de l'électrode, $Y_i=0$ lorsque l'électrode est en contact parfait avec le sol, a est le diamètre de électrode et Γ est le constante de propagation.

Il est clair pour tout ce qui précède que la modélisation du comportement transitoire du système de mise à la terre a commencé à partir du principe de la théorie de la ligne de transmission, et a été dérivé analytiquement sous certaines approximations de solutions rapides à cause de l'absence d'ordinateur puissant. Par conséquent, ces modèles ont été limitées à des systèmes de mise à la terre simple, à savoir l'électrode simple. Pour les systèmes de mise à la terre complexes, telles que les grilles de terre importantes, seule l'analyse empirique de la réflexion pourrait être exploité dont

Gupta et Thapar ont tenté en 1980 [20]. Ils ont trouvé à travers des expériences que la réponse de grilles de terre pour injection de courant unitaire pourrait être représentée par l'équation (2.5); L_t et G_t est sont les paramètres de l'électrode de mise à la terre, pour les quels donna la méthode empirique de leur détermination pour le cas d'une grille basée sur des résultats expérimentaux.

2.3. Développements récents dans la modélisation des systèmes de mise à la terre

Depuis des années, la puissance de l'ordinateur a considérablement augmenté, ce qui a accéléré presque toutes les recherches scientifiques et techniques dans des domaines complexes de résolution des problèmes pratiques fondées sur diverses méthodes numériques puissantes.

Par conséquent, la modélisation du comportement transitoire complexe du système de terre soumis à un courant de foudre a eu un meilleur avenir en raison précisément des raisons suivantes.

- Les modèles antérieurs décrits dans la section précédente ont pris plusieurs reprises afin d'aboutir à des équations simples, mais avec l'utilisation des méthodes numériques, la plupart des équations complexes peuvent être résolues ;
- des systèmes complexes pratiques peuvent être modélisés facilement à cause de la grande mémoire et la vitesse de l'ordinateur.

Les différentes méthodes de modélisation numérique pour les systèmes de mise à la terre soumis à un courant de foudre sont développées depuis 1980 jusqu'à maintenant, peuvent être classés comme suit.

1. Modèle des circuits équivalents
2. Modèle électromagnétique
 - 2.1. Méthode des moments.
 - 2.2. Méthode des éléments finis.
3. Modèle hybride.
4. Modèle des lignes de transmission.

2.3.1. Méthode des circuits équivalents

Un des modèles numériques souvent utilisé pour la modélisation du comportement transitoire de mise à la terre des systèmes à géométrie complexe est l'approche par circuit. Les étapes principales de cette méthode sont les suivantes :

1. Diviser le système de mise à la terre en des plusieurs segments.
2. Créer le circuit équivalent regroupé pour chaque segment et calculer ses paramètres, tels que

self et mutuelle (L), la capacitance (C), la conductance (G) et la résistance interne

3. Résoudre les équations nodales du circuit équivalent qui représente le système entier de terre basée sur les lois de Kirchhoff. L'équation nodale peut être présentée sous des formes différentes en fonction du circuit équivalent du système adopté à la terre.

L'approche par circuit pour l'analyse transitoire du système de mise à la terre a été développée pour la première fois par Meliopoulos et Moharam en 1983 [21], ils ont utilisés les paramètres indépendantes de la fréquence pour chaque segment, qui sont calculés sur la base de l'équation de Laplace $\Delta^2 V = 0$ dans le milieu semi-infini de la terre.

Plus tard, Meliopoulos et al ont amélioré leur approche de circuit de mise à la terre pour les études de la foudre en calculant la réponse de chaque segment [22], de sorte que ses paramètres et le courant dépendent de la fréquence. Une technique de convolution récursive a été utilisée à cet effet.

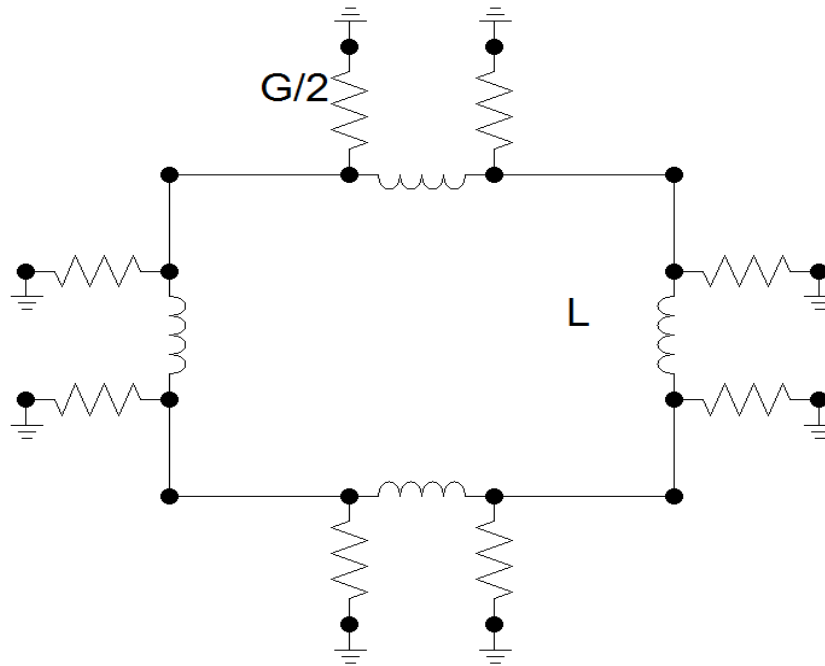


Figure 2.1 Circuit équivalent d'une maille carrée de la grille

En 1989, Ramamoory et Narayanan [23] ont développés un circuit simplifié pour la grille de la terre (figure 2.1). Dans leur approche, après avoir divisé le système à la terre entier en n segments, chaque segment a été seulement représenté par un circuit regroupant les inductances propres et mutuelles (L) et la conductance de fuite à la terre (G). Par conséquent, l'équation nodale de leur circuit équivalent du système de mise à la terre est donnée par (2.11).

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1} \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1} [V] \right\} \quad (2.11)$$

$[V]$ est le vecteur nodal de tension, $[I_s]$ est le vecteur nodal de courant d'injection. $[G]$ est la matrice de conductance nodale. $[L]$ est la matrice d'inductance nodale. Ce modèle néglige le couplage capacitif aussi.

En 1999, deux modifications sur le circuit basé sur les travaux de Meliopoulos [21,22] ont été publiées par Geri [27] et Otero [28], respectivement, et les deux ont inclus les phénomènes d'ionisation des sols dans leurs modèles.

Le circuit équivalent du système de mise à la terre par Otero [28] est montré dans la Figure 2.2. L'équation (2.12) représente l'équation nodale pour ce circuit. Elle a été résolue dans le domaine fréquentiel, ce qui fut probablement la première tentative pour l'analyse transitoire du système de terre.

$$[I_s] = [K]^t \cdot [G] \cdot [K] \cdot [V] + [Y] \cdot [V] \quad (2.12)$$

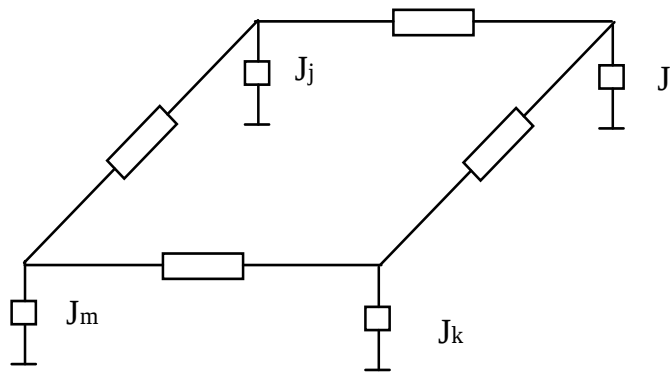


Figure 2.2 Circuit équivalent du système mise à la terre par Otero [28].

Le circuit est facile à comprendre dans le sens que le comportement complexe des systèmes transitoires de terre est transformé en une simple analyse transitoire des circuits équivalents. Cette transformation rend le problème plus observable. Il peut facilement intégrer les phénomènes non-linéaires d'ionisation du sol. En outre, les circuits équivalents peuvent inclure tous le couplage mutuel entre les électrodes de terre.

Cette théorie n'est néanmoins pas la mieux adaptée à tous les besoins. En effet :

- Les formules de décomposition ne sont en général validés que pour des configurations de terre simples (électrode, grille,...) ;
- Les phénomènes de propagation sur chaque élément sont négligés : on se trouve dans le cas d'une approximation quasi statique, ce que n'est pas nécessairement rigoureux en haute fréquence pour des systèmes étendus.

2.3.2. Modèle électromagnétique

L'Approche de champ électromagnétique est la méthode la plus rigoureuse pour la modélisation du comportement transitoire du système de mise à la terre, car il résout les équations de Maxwell avec un minimum d'approximation. Cette approche peut être mise en œuvre soit par la méthode des moments (MoM) ou par la méthode des éléments finis (FEM). Le modèle pour le comportement transitoire du système de mise à la terre basée sur MOM a été développé par Grcev [29]. Cette méthode commence à partir de l'équation d'intégrale de champ électrique de Maxwell comme indiqué dans (2.13) et (2.14).

$$E^s = \frac{1}{4\pi\omega\epsilon^*} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int_l t' \cdot I_l(r') G_n(r, r') dl \quad (2.13)$$

$$G_n(r, r') = G_l(r, r') G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (2.14)$$

E^s est le champ électrique le long de la surface du conducteur, $t' \cdot I_l(r')$ est le courant le long de conducteur.

$\epsilon^* = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ est la permittivité au milieu complexe et $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$ est la constante de propagation des ondes dans le milieu.

La condition aux limites est que l'ensemble du champ électrique longitudinal à la surface du conducteur de terre doit satisfaire l'équation (2.15) :

$$t \cdot (E^i + E^s) = I Z_s \Delta l \quad (2.15)$$

E^i est le champ électrique incident. Z_s est l'impédance interne du conducteur par unité de longueur, compris l'effet de peau. Le traitement numérique de l'équation (2.15) est appelée la méthode des Moments (MoM), qui n'est autre que de transformer l'équation d'un système d'équations algébriques linéaires à N inconnues, où les N inconnues représentent généralement les coefficients de courant qui sont basées sur quelques extensions appropriées.

Si les sources de courant dans tous les segments du conducteur de terre sont connues, le champ électrique autour du système de mise à la terre et le courant de fuite de segment à la terre peut être facilement calculé en utilisant les équations fondamentales.

Le potentiel à différents points sur la surface du conducteur de terre peut être calculé par l'intégration du champ électrique à partir du point sur la surface du conducteur à la terre. Enfin, pour obtenir la réponse dans le domaine temporel, on peut utiliser IFFT.

Une autre approche du champ électromagnétique pour l'analyse transitoire du système de mise à la terre [15,30] est développée en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) et qui est basée sur le principe de minimiser l'énergie dans le système. Les fonctions finales sont données dans (2.16) et (2.17) pour le champ dans le sol, (2.18) pour le champ dans l'air.

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) \cdot (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \vec{W}) \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) + (\sigma_{sol} + j\omega\epsilon_{sol}) (j\omega \vec{W} \cdot \vec{A} + \vec{W} \cdot \nabla V) \right) d\Omega = 0 \quad (2.16)$$

$$\int_{\Omega} \left((\sigma_{sol} + j\omega\epsilon_{sol}) \nabla W (j\omega \vec{A} + \nabla V) \right) d\Omega = 0 \quad (2.17)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) \cdot (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \vec{W}) \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) \right) d\Omega = 0 \quad (2.18)$$

$\vec{W}$ et W pour le vecteur de potentiel et le potentiel scalaire, respectivement. Afin de résoudre les problèmes numériquement, les équations précédentes ont été transformées en équations linéaires en divisant l'ensemble du système en N petits segments ou d'éléments. La difficulté de cette approche [31] est de transformer les frontières ouvertes de l'air et l'environnement terrestre en un problème de frontière fermée en utilisant une transformation spatiale, ce qui va réduire la taille du problème. L'avantage principal de cette approche basée sur les champs électromagnétiques FEM est que la discrétisation du domaine (géométrie ou le milieu) du problème peut être très flexible non-uniforme des correctifs ou des éléments qui peuvent facilement décrire des formes complexes. C'est la raison pour laquelle les ionisations des sols peuvent facilement être incluses. Cependant, cette méthode est encore plus compliquée à comprendre que celui qui est basé sur la méthode des moments.

2.3.3. Approche hybride

Cette méthode pour l'analyse transitoire de mise à la terre a été initiée par Dawalibi en 1986 [32], et plus tard modifiée par Andolfato [33], en 2000. Le mot «hybride» signifie que cette approche est une combinaison des deux approches celle de champ électromagnétique et celle des circuits équivalents. Le système de mise à la terre entière devrait être divisé en n segments de petite taille. Le champ électrique en tout point est donné par (2.19), qui ont été dérivé à partir des équations de Maxwell complète.

$$\vec{E} = -\text{grad}V - j\omega\vec{A} \quad (2.19)$$

$\vec{A}$ est le potentiel vecteur magnétique et V est le potentiel scalaire le long de chaque segment k . L'équation (2.19) peut être transformée comme suit :

$$Z_{sk}I_k + \sum_{i=1}^n (V_k - V_i) + j\omega \sum_{i=1}^n \int_{I_k} \bar{A}_{ik} dl = 0 \quad (2.20)$$

Z_{sk} est l'impédance série interne du segment k , V_k et V_i sont les potentiels des segments k et i . L'équation (2.20) peut être réécrite sous la forme :

$$Z_{sk}I_k + \sum_{i=1}^n (C - G)_{ik} I_{ik} + j\omega \sum_{i=1}^n L_{ik} I_i = 0 \quad (2.21)$$

Le mérite de l'approche hybride vient du fait de l'influence de fréquence sur les impédances internes, les composants inductifs et capacitifs de conducteur sont inclus, ce qui rend que cette approche plus précise que l'approche de circuit classique, surtout lorsque la fréquence de la source d'injection est élevée.

2.3.4. Modèle des lignes de transmission (TL)

Comme nous l'avons décrit dans la section 2.2 que le modèle de la ligne de transmission a été le premier utilisé pour simuler le comportement transitoire des mises à la terre du système. Cependant, le développement de cette approche n'a pas été aussi rapide que celle des autres modèles. Verma et Mukhedkar [34] ont appliqué le concept des lignes de transmission (figure 2.3) sur l'électrode horizontale de terre, ce qui a été décrit par les équations du télégraphiste [35] :

$$\frac{dV}{dx} + L \frac{dI}{dx} + RI = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{dI}{dx} + C \frac{dV}{dx} + GV = 0 \quad (2.23)$$

Dans ce modèle, l'électrode est considérée comme une ligne électrique ouverte à l'une des extrémités, chaque segment de l'électrode est modelé par un circuit équivalent π comme illustre La figure 2.3.

R est la résistance interne linéique de l'électrode, elle vaut

$$R = \frac{\rho}{S} \quad (2.24)$$

S étant sa section, L est l'inductance mutuelle, C et G sont la capacité et la conductance de terre respectivement.

La constante de propagation est donnée par la relation :

$$\lambda = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + jC\omega)} \quad (2.25)$$

L'impédance de propagation est donnée par la relation :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + jC\omega)}} \quad (2.26)$$

L'impédance de l'électrode de terre Z_R est dans ce cas égale à l'impédance d'entrée Z_{in} , donnée par la relation

$$Z_R = Z_{in} = Z_0 \frac{(Z_R + Z_0 \tanh(\gamma l))}{Z_R \tanh(\gamma l) + Z_0} \quad (2.27)$$

L'électrode est alors modélisée comme une ligne de transmission ouverte à l'extrémité. L'impédance de charge tend alors vers l'infini $Z_R \rightarrow \infty$. La relation (2.27) devient :

$$Z_{in} = Z_0 \coth(\gamma l) \quad (2.28)$$

Cette approche n'est pas la mieux adaptée à une structure complexe, pour laquelle le nombre de lignes devient important et les paramètres R, L, C et G devient difficiles à évaluer sans passer par une modélisation par éléments finis. On préférera alors les modèles de type électromagnétique, qui sont les plus rigoureux au niveau théorique.

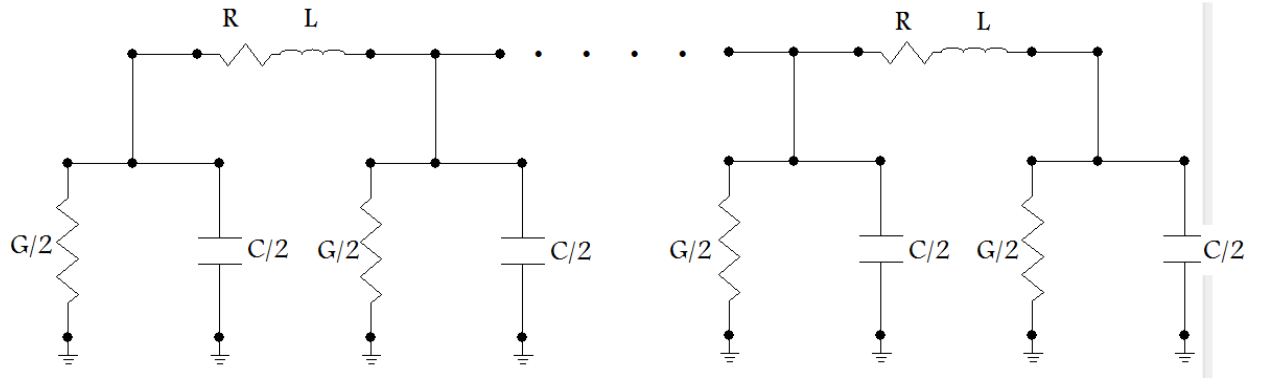


Figure 2.3 *Modèle des lignes de transmission.*

2.4. Modèle électromagnétique d'une mise à la terre.

Pour développer ce modèle on va utiliser le logiciel NEC-4 qui se base dans son concept sur la théorie des antennes.

2.4.1. Théorie des antennes

La théorie des antennes [36] est le formalisme le plus rigoureux pour étudier les phénomènes de rayonnement électromagnétique. Elle est basée sur une formulation intégrale de domaine fréquentiel, et sur le traitement des équations par la méthode des moments, le passage en temporel se fait à l'aide de la transformée de Fourier inverse.

2.4.2. Résolution numérique de l'équation intégrale

Depuis l'évolution des techniques numériques et informatiques, l'équation intégrale en champ électrique (EFIE) est résolue par la méthode des moments.

Pour une électrode verticale droite de longueur l et de rayon a , enterré dans une profondeur d (L'électrode est supposé un fil mince parfaitement conducteur), le point de départ dans le modèle mathématique est l'évaluation de la distribution de courant induit sur l'électrode vertical due à une excitation temporelle et pour un certain nombre de fréquences dans une bande de fréquence d'intérêt. Cette distribution de courant est obtenue par la résolution d'équation intégral-différentielles de Pocklington.

Cette équation peut être obtenue en exprimant le champ électrique en fonction du potentiel vecteur d'Hertz et en satisfaisant les conditions aux limites des composantes du champ tangentielles sur la surface de l'électrode.

Le champ électrique induit dans le voisinage de l'électrode enterré dans un demi-espace imparfaitement conducteur peut être exprimée en terme de vecteur potentiel de Hertz noté Π :

$$\vec{E} = \nabla \left(\nabla \cdot \vec{\Pi} \right) + k_1^2 \vec{\Pi} \quad (2.29)$$

où k_1 est coefficient de propagation dans le sol:

$$k_1^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_{eff} \quad (2.30)$$

et ϵ_{eff} désigne la permittivité complexe du sol:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.31)$$

où ϵ_r et σ sont la permittivité relative et la conductivité du sol, respectivement, et ω désigne la fréquence de fonctionnement.

Le développement des ressources informatiques a largement contribué à l'usage de plus en plus courant des méthodes matricielles plus connues sous le nom de méthode des moments sont utilisées.

2.4.3. Méthode des moments.

La méthode des moments est une technique très général de résolution d'équations fonctionnelles, développée par Harrington pour des équations integro-différentielles de l'électromagnétisme, cette technique numérique permet de résoudre efficacement les équations

intégrales en les transformant en un système matriciel résolu par ordinateur. Pour cela nous utilisons le code NEC-4.

2.4.4. Le Logiciel NEC-4.

Le NEC [37] est un code développé sous sa première version NEC-1, pour le traitement du rayonnement et du couplage électromagnétique, au début des années 80 et a été conçu en prenant compte des ressources informatiques de l'époque. Ce code a évolué par la suite avec le développement informatique et est aujourd'hui à sa quatrième version NEC-4. Ce code est maintenant reconnu et utilisé par les plus grandes instances de recherches dans le monde ; son fondement théorique est celui des antennes qui consiste à résoudre par la méthode numérique dite des moments d'une équation intégrale dans les milieux continus déduite à partir des équations de Maxwell en champ électrique (EFIE) ou en champ magnétique (MFIE).

La simulation numérique utilisant le code NEC-4 [38] exige l'utilisation des données provenant d'un fichier d'information décrivant la structure étudiée (voir l'annexe 2). En effet la création de ce fichier d'entrée s'effectue à partir des coordonnées qui conformement le modèle (coordonnées des nœuds, extrémités de la structure, rayon et nombre de segments constitutifs de la structure,...etc.), on utilise le MATLAB pour le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel à l'aide de la transformée de Fourier inverse [39].

A cause de la difficulté de l'utilisation de NEC-4, nous avons développé une interface à l'aide de l'environnement MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010 qui facilite la manipulation de ce code.

La première interface est montrée dans la figure 2.4, elle permet de choisir le type de la mise à la terre, électrode (figure 2.5) ou grille (figure 2.6).

La figure 2.5 représente l'interface qui permet la création du fichier de données pour le NEC-4 qui contient les coordonnées de l'électrode et son diamètre, la permittivité et la conductivité de terre, le point d'excitation de courant et sa valeur, la fréquence initiale et le pas d'incrément.

Cette interface permet aussi la manipulation du fichier des résultats et l'interface entre le NEC-4 et le MATLAB pour tracer les courants après dans le domaine temporel.

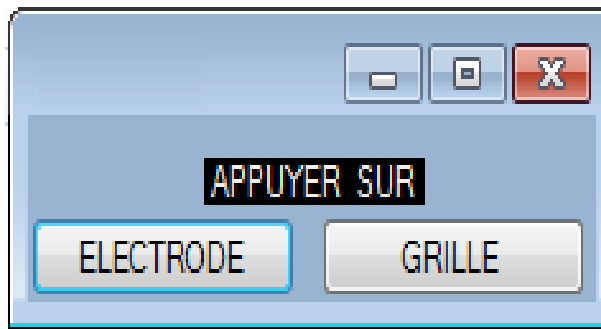


Figure 2.4 Interface *Electrode* ou *Grille* pour le code NEC-4.

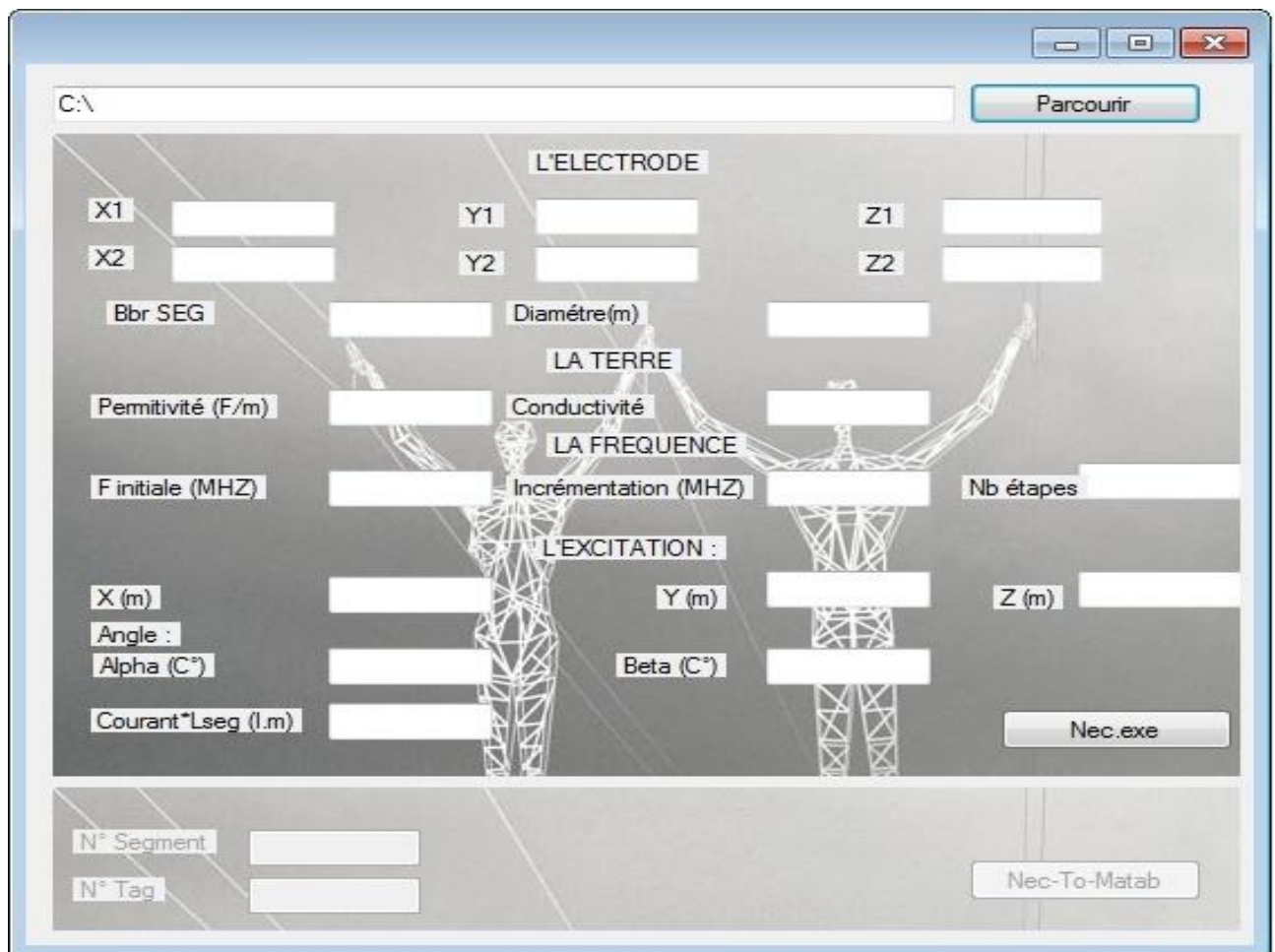


Figure 2.5 Interface pour l'électrode de terre.

La figure 2.6 représente l'Interface de NEC-4 pour le cas d'une grille. Elle permet d'introduire les données nécessaires et l'exécution du programme Build de NEC-4.

Pour la validation de notre approche on a utilisé aussi l'approche par circuit via l'EMTP. Une comparaison entre ces deux approches est faite et les résultats seront présentés dans le chapitre 3.

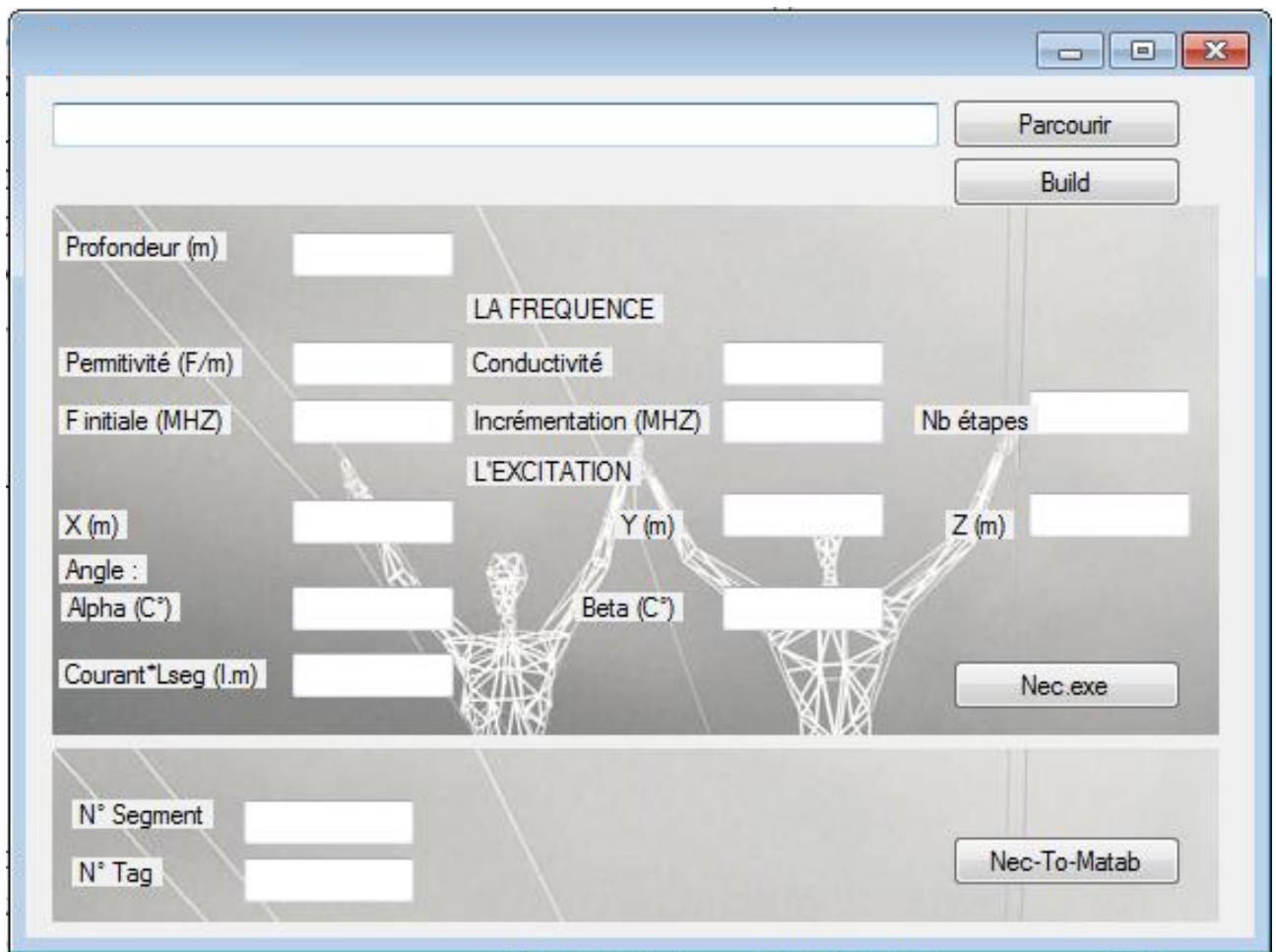


Figure 2.6 Interface pour la grille de terre.

2.5. Modélisation de mise à la terre en utilisant La Méthode des circuits équivalents

2.5.1. Modèle de systèmes de mise à la terre sous EMTP.

L'EMTP est un logiciel de calcul des transitoires électriques se propagent sur un réseau. Du point de vue informatique, il est composé d'un environnement graphique, qui permet de construire le réseau à étudier à partir d'une bibliothèque (connexion de résistances, inductances, lignes...).

L'étude des réseaux [40] passe inévitablement par la modélisation de lignes (aériennes ou souterraines). Il est donc nécessaire de disposer d'équations permettant de relier les tensions en extrémité des lignes ainsi que les courants y circulant avec les grandeurs électriques du reste du réseau.

Du point de vue théorique, chaque phénomène électromagnétique est décrit par les équations de maxwell et par des conditions aux limites qui dépendent du problème donné.

Très souvent, il est ardu de résoudre ces équations en raison de leur complexité, mais on peut simplifier considérablement l'étude des lignes à partir de la « théorie des lignes ».

De nombreux travaux permettent l'étude de la réponse transitoire des systèmes de mise à la terre sous EMTP [40-43], dans notre travail on utilise le modèle RLC et on considère le système comme une ligne, ou un ensemble de lignes. Notre étude a été faite sur une électrode horizontale, électrode verticale et sur électrodes en forme de grille, les paramètres R, L, C et G sont calculés à partir des formules analytiques. Les résultats seront présentés dans le chapitre 3.

On a utilisé la fonction d'Heidler pour modéliser l'onde de foudre I [42,43]:

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)} \quad (2.32)$$

$$\eta = e^{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(n \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.33)$$

I_0 est l'amplitude du courant du canal de base ;

τ_1 est la constante de temps de montée ;

τ_2 est la constante de temps de descente ;

η est le facteur de correction de l'amplitude de l'onde ;

n est un exposant variant entre 2 et 10.

2.5.2. Modèle type circuit RLC

Dans ce modèle, l'électrode est représentée comme un circuit RLC, comme indiqué à la figure 2.7. Ce modèle est utilisé avec l'hypothèse d'approximation quasi-statique, ce qui signifie que l'effet du retard dans la propagation des ondes est négligé. Comme le montre Olsen [44]. Cette hypothèse n'est valable que pour des longueurs de l'électrode de l'ordre de

$$l = \frac{\lambda}{10} \quad (2.34)$$

λ est la longueur d'onde dans le sol. Elle dépend des paramètres électriques du sol et est donnée par la relation suivante [45]:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon}} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

ω est la pulsation de l'onde (liée à la fréquence par la relation $\omega = 2\pi f$), ε , μ_0 et σ sont respectivement la permittivité diélectrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du sol.

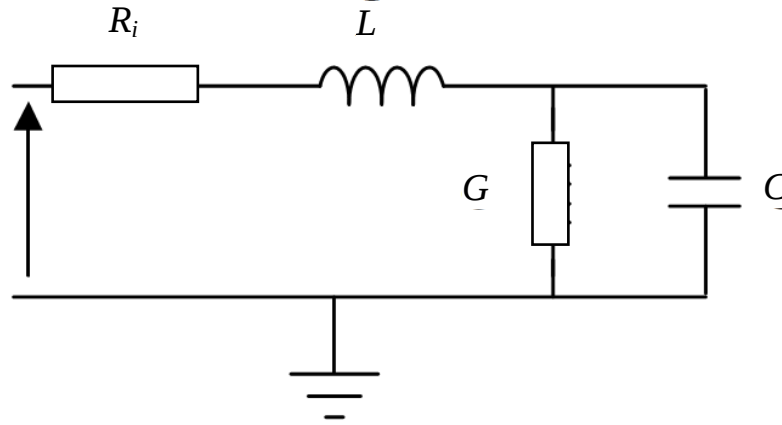


Figure 2.7 Modèle RLC.

Pour une électrode cylindrique et verticale, les relations suivantes [46] définissent les paramètres RLC du circuit approché.

$$R_i = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (2.36)$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (2.37)$$

$$C = 2\pi\varepsilon l \left(\ln \frac{2l}{r} \right)^{-1} \quad (2.38)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{2l}{r} \quad (2.39)$$

l est la longueur de l'électrode, r son rayon.

Pour une électrode horizontale enterrée à une profondeur h ($l \gg r$ et $l \gg h$) [43-44],

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (2.40)$$

$$C = 2\pi\varepsilon l \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.41)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (2.42)$$

2.5.2.1. Constante de temps capacitive

D'une manière générale, pour un sol homogène, la capacité et la résistance d'un piquet de terre sont liées par la constante de temps capacitive [47], donnée par la relation:

$$\tau_c = RC = \rho\varepsilon \quad (2.43)$$

La constante de temps capacitive ne dépend que des propriétés du sol (sa résistivité et sa permittivité). Pour un sol de permittivité relative égale à 10, elle vaut respectivement 8.85 ns, 88.5 ns et 443 ns pour les résistivités de 100, 1000 et 5000 $\Omega.m$. Ces valeurs faibles de la constante de temps capacitive impliquent que le comportement capacitif d'un piquet de terre intervient seulement aux hautes fréquences, dépendant essentiellement de résistivité et permittivité du sol.

2.5.2.2. Constante de temps inductive

La constante de temps inductive est donnée par la relation

$$\tau_L = \frac{L}{R} = \mu_0 \frac{l^2}{\rho} \quad (2.44)$$

La figure (2.8) [4] montre, les différentes valeurs de la résistance R, et de la réactance inductive Z_L en fonction de la longueur de l'électrode pour différentes fréquences (50 Hz, 100 kHz et 1 MHz), pour un piquet de terre vertical et cylindrique de rayon $r = 0,0125$ m, enterré dans un sol homogène de résistivité $\rho = 100 \Omega.m$

Nous remarquons bien que pour un piquet de terre et à la fréquence dépasse une certaine valeur, il n'est plus possible de négliger l'inductance face à la résistance, pour une longueur donnée du piquet.

2.5.2.3. Impédance transitoire

Lors d'un court-circuit ou d'un impact de foudre, et avant l'apparition des courants en basse fréquence [4], des régimes transitoires de très courtes durées prennent naissance. Généralement le contenu spectral des ondes de choc qui en résulte peut s'étendre de quelques kHz jusqu'à 10 MHz.

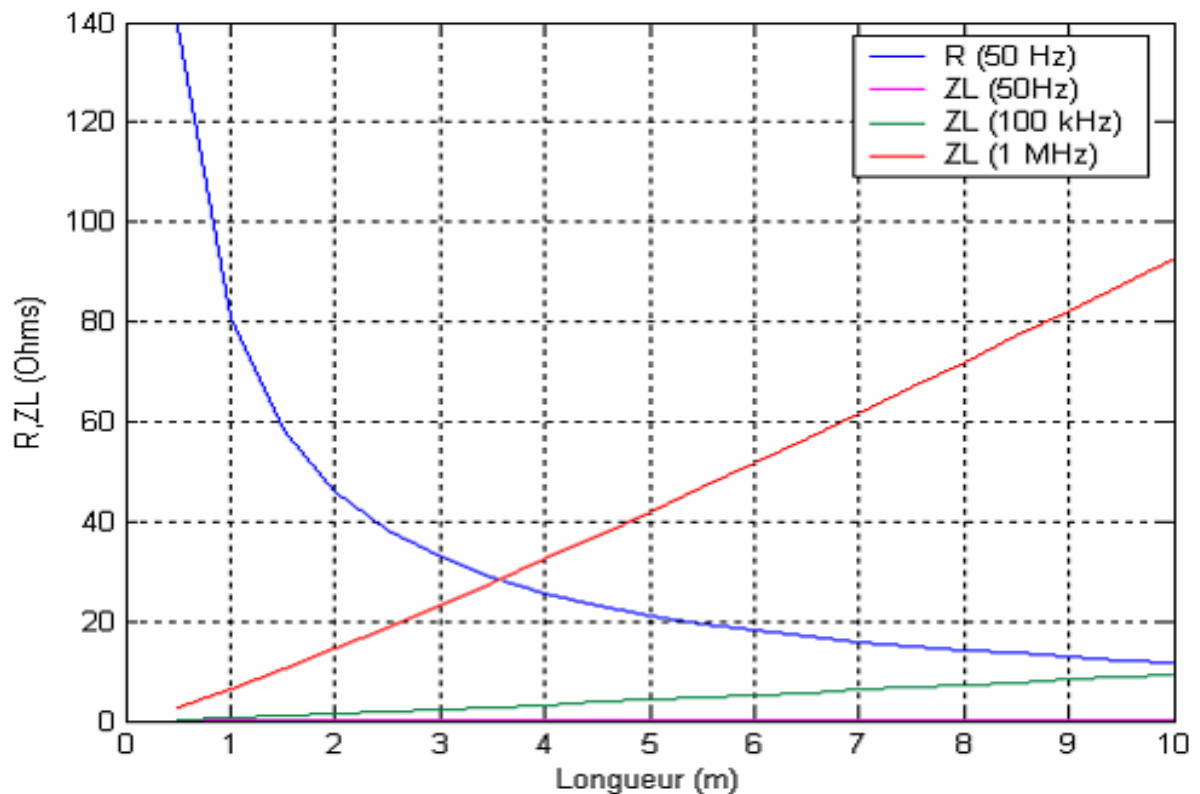


Figure 2.8 Résistance et réactance inductive d'un piquet.

En basse fréquence (figure 2.8), la terre peut être considérée comme résistive [48] et il est alors possible de calculer la résistance des prises de terre en tenant compte de la forme de l'électrode de terre, des conditions d'installation et de la résistivité du sol.

En haute fréquence, l'écoulement des courants de défaut dans le sol donne naissance à des phénomènes physiques qui ne sont pas ceux de la basse fréquence :

- l'effet de peau dans les conducteurs.
- les courants induits dans le sol sont très importants.
- les courants de déplacement dans le sol ne sont plus négligeables à partir d'un seuil fréquentiel.
- Le phénomène de propagation.

La notion d'impédance transitoire permet de caractériser quantitativement le comportement d'une prise de terre en régime transitoire d'une manière très commode.

On définit l'impédance transitoire [49] d'une prise de terre comme suite :

$$Z(t) = \frac{U(0,t)}{I(0,t)} \quad (2.45)$$

2.5.2.4. Impédance harmonique.

L'impédance harmonique de mise à la terre est une grandeur complexe et varie par rapport à la fréquence. Elle dépend uniquement des caractéristiques géométriques et électromagnétiques de la mise à la terre, elle ne dépend donc pas de l'excitation. Le comportement de la mise à la terre en hautes fréquences peut être soit résistive, soit inductive ou encore capacitive.

2.5.2.5. Impédance impulsionnelle

Pour caractériser le comportement transitoire de l'électrode, plusieurs paramètres sont définis. Ce sont :

I_m : le courant maximum ;

V_m : la tension maximum

$$Z_{\max} = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.46)$$

2.5.2.6. Coefficient impulsionnel

Le coefficient impulsionnel est le rapport entre l'impédance impulsionnelle Z et la résistance en basse fréquence. Elle est donnée par la relation

$$A = \frac{Z}{R} \quad (2.47)$$

La mise à la terre de faible coefficient impulsionnel (proche de l'unité) présente de bonnes performances transitoires. Mais il est toujours important, du fait de la valeur relative du coefficient impulsionnel, de tenir compte de la résistance basse fréquence de la mise à la terre.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différents modèles existants pour la modélisation des systèmes des mises à la terre des installations électriques. On a présenté aussi la modélisation des systèmes de terre en utilisant la méthode électromagnétique à l'aide de logiciel NEC-4. Pour faciliter l'utilisation de ce dernier on a développé une interface sous l'environnement MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010. Pour le but de comparaison des ces résultats, on a présenté aussi une autre méthode en utilisant la méthode des circuits équivalents à l'aide de logiciel ATP-EMTP.

Chapitre 03

RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous commençons par confronter nos modélisations sous le logiciel NEC4 (qui utilise le formalisme des antennes et la méthode numérique dites des moments), pour des installations de mise à la terre, avec ceux que nous obtenons en utilisant EMTP réalisés directement en temporel ; le logiciels NEC4 nous permet une simulation en fréquentiel, que nous transformons en temporel par FFT et IFFT en utilisant le MATLAB. Nous présentons aussi les résultats en tenant compte des différents facteurs qui influencent sur la réponse transitoire des mises à la terre.

3.2. Electrode verticale

La première application concerne une électrode de terre verticale en cuivre (figure 3.1) de rayon $r = 14$ mm, de longueur $l = 6$ m, enfoncées dans un sol considéré comme homogène, de résistivité $\rho = 30 \Omega\text{m}$, permittivité $\epsilon_r = 10$ et perméabilité $\mu_0 = 1$ (tableau 3.1).

Le modèle de circuiterie présenté dans le chapitre 2 a été implanté dans l'EMTP, on a décomposée l'électrode en 50 segments de longueur 0.12 qui confirme la condition (2.37), chaque segment est représenté par le modèle RLC comme montre dans la figure 3.2.

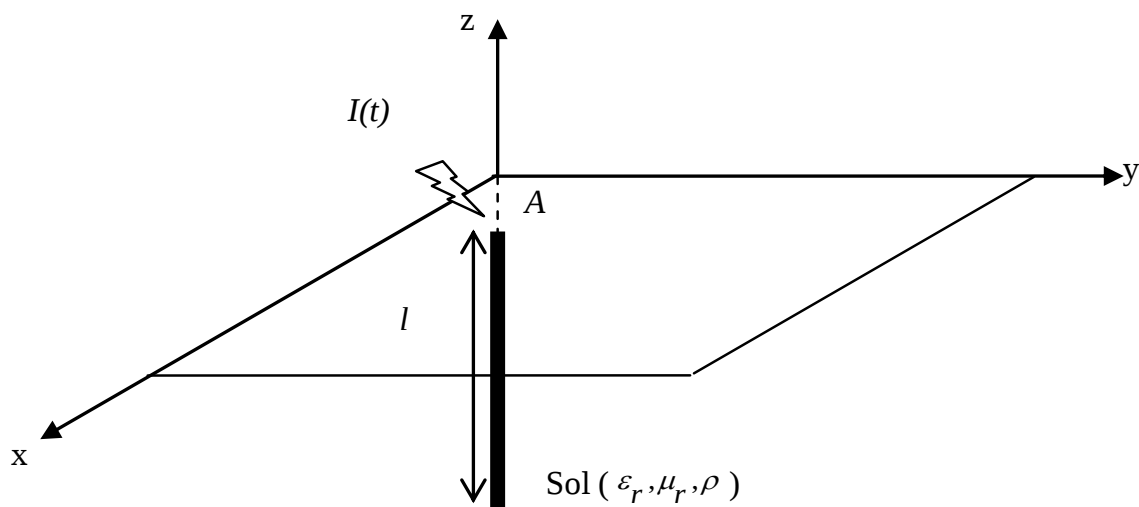


Figure 3.1 Electrode de terre verticale

De même, l'exemple a été introduit dans le logiciel NEC-4 (figure 3.3), le domaine de variation de la fréquence utilisé est varié entre 0,7 KHz et 0,7 MHz à raison de 0,7 KHz, avec un moment du courant de la source égal à $0,12 \text{ A} \cdot \text{m}$.

Tableau 3.1 Données pour l'électrode verticale

Electrode	Sol
$l = 6 \text{ m}$ $r = 14 \text{ mm}$ $\rho_c = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$	$\rho_c = 30 \Omega \text{m}$ $\varepsilon_r = 15$ $\mu_r = 1$

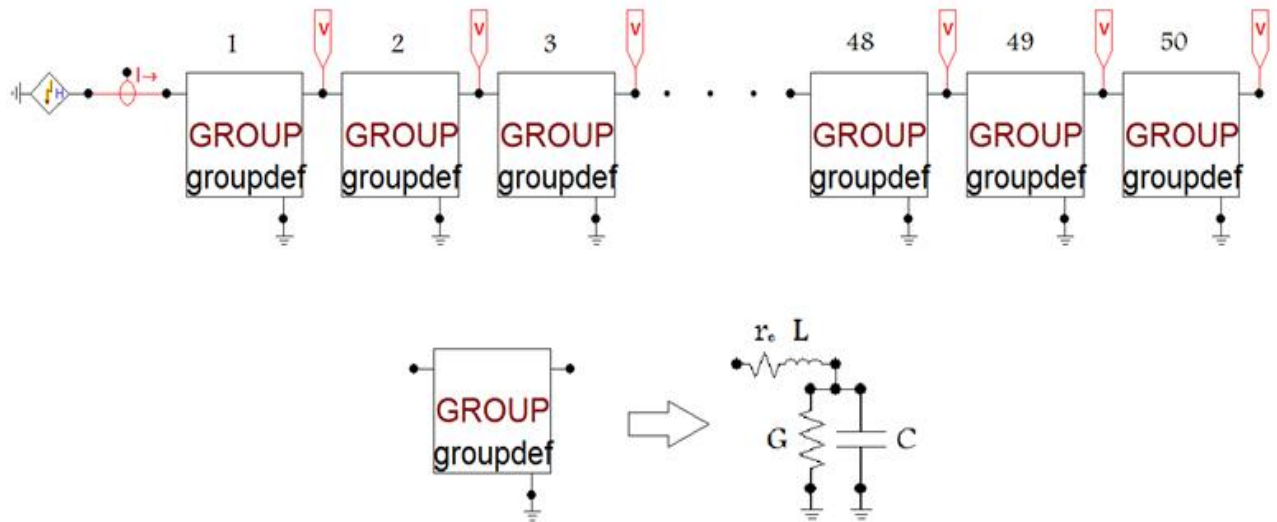


Figure 3.2 Modèle RLC pour l'électrode verticale.

CE												
GW	1	24	0	0	-0.6	0	0	-6.6	0.014	← Géométrie d'électrode		
GE	-1											
GN	2	0	0	0	10	0.0333	← Propriétés du sol					
FR	0	1024	0	0	0.0007	0.0007	← Domaine fréquentiel					
EX	4	1	10	0	0	0	0	90	0	0.12	← Excitation électrique	
NE	0	1	30	1	0	0	0	0	0	0.5	0	← Domaine de calcul du champ électrique
NH	0	1	30	1	0	0	0	0	0	0.5	0	← Domaine de calcul du champ magnétique
XQ												
EN												

Figure 3.3 Fichier des données pour l'électrode verticale.

3.2.1. Evolution de la tension et du courant de l'électrode de mise à la terre

La figure 3.4 montre la tension au point d'injection obtenue par les deux approches, pour un courant injecté I de type foudre comme montre la relation (3.1) :

$$I(t) = \frac{11 \cdot 10^3}{0,977} \frac{\left(\frac{t}{8 \cdot 10^{-6}}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{8 \cdot 10^{-6}}\right)^2} e^{\left(\frac{-t}{12,5 \cdot 10^{-6}}\right)} \quad (3.1)$$

Les résultats obtenus dans [50] en utilisant la méthode électromagnétique est introduit pour but de comparaison.

D'après cette figure, nous constatons que l'allure générale et l'amplitude sont conservées pour les différentes méthodes. On peut aussi constater qu'un décalage existe entre les différentes courbes. Ceci est peut être lié aux causes suivantes :

- La première concerne l'ATP-EMTP qui réalise les calculs en temporel alors que le NEC-4 les réalise en fréquentiel ce qui nécessite des transformations de passage d'un domaine à l'autre.
- La deuxième est que le modèle des circuits équivalents utilisé néglige la dépendance de ses paramètres en fonction de la fréquence cette approche néglige aussi l'effet de peau, contrairement à la méthode de moment qui ce montre plus précise.

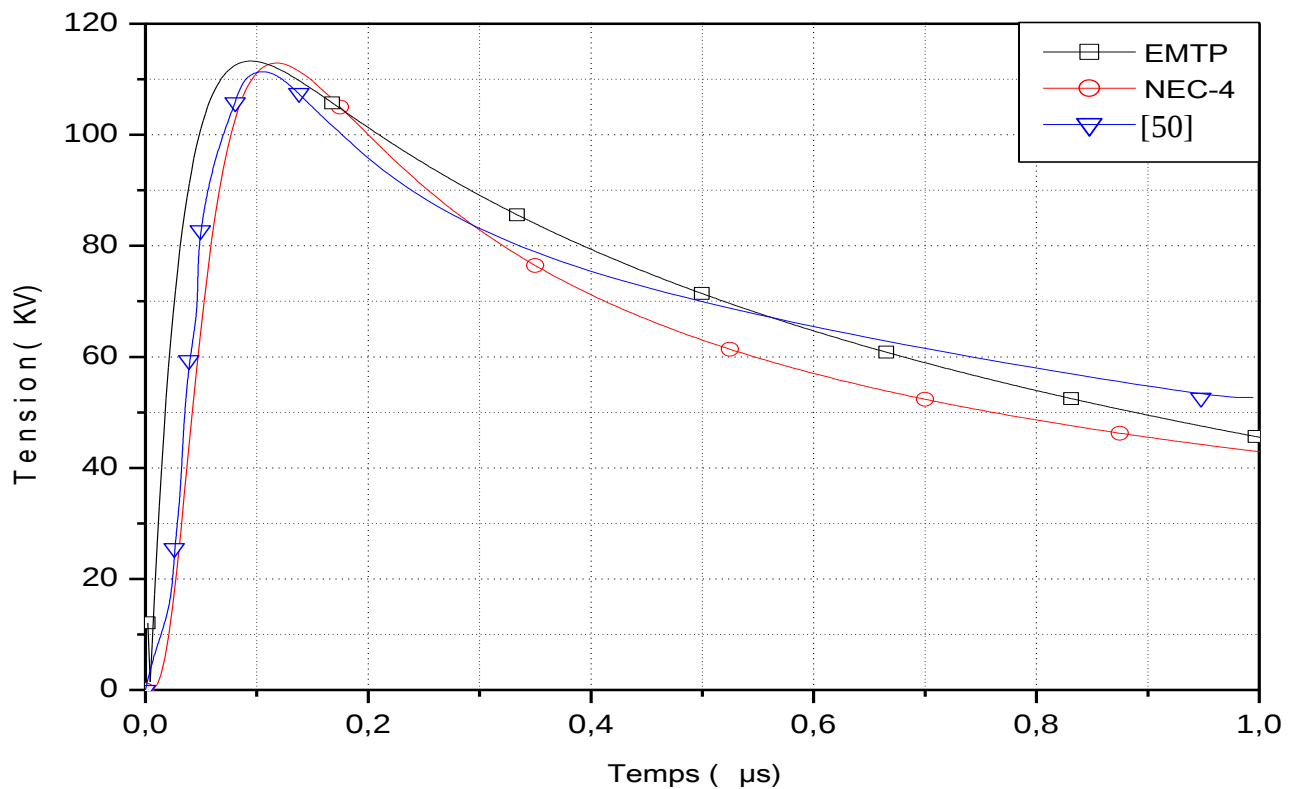


Figure 3.4 Comparaison entre les différentes méthodes

En fixant l'amplitude du courant injectée à 2000 A, et en ré-exécutant les deux logiciels nous obtenons les résultats montrés dans la figure 3.5 qui représente les courant aux point d'injection et au milieu de l'électrode ($x=0$ m et $x=4$ m). En examinant ces résultats nous pourrions facilement voir que les deux méthodes sont très proche l'une de l'autre, à part quelques différences qui peuvent être attribué aux causes déjà présentés. Nous avons aussi constaté que le pas de fréquence dans le logiciel NEC-4 joue un rôle très important dans la précision des calculs, mais malheureusement présente un inconvénient qui est l'augmentation du temps de calcul. On remarque aussi la diminution des pics de courant à chaque point à cause de l'écoulement de courant de foudre dans la prise de terre.

3.2.2. Evolution de l'impédance transitoire l'électrode de terre verticale.

Dans cette étude nous avons utilisé deux formes d'onde du courant de foudre correspondant aux coups typiques du premier et des arcs en retour suivants, basées sur les observations de Berger et al. [43], d'après [51] (fig. 3.6).

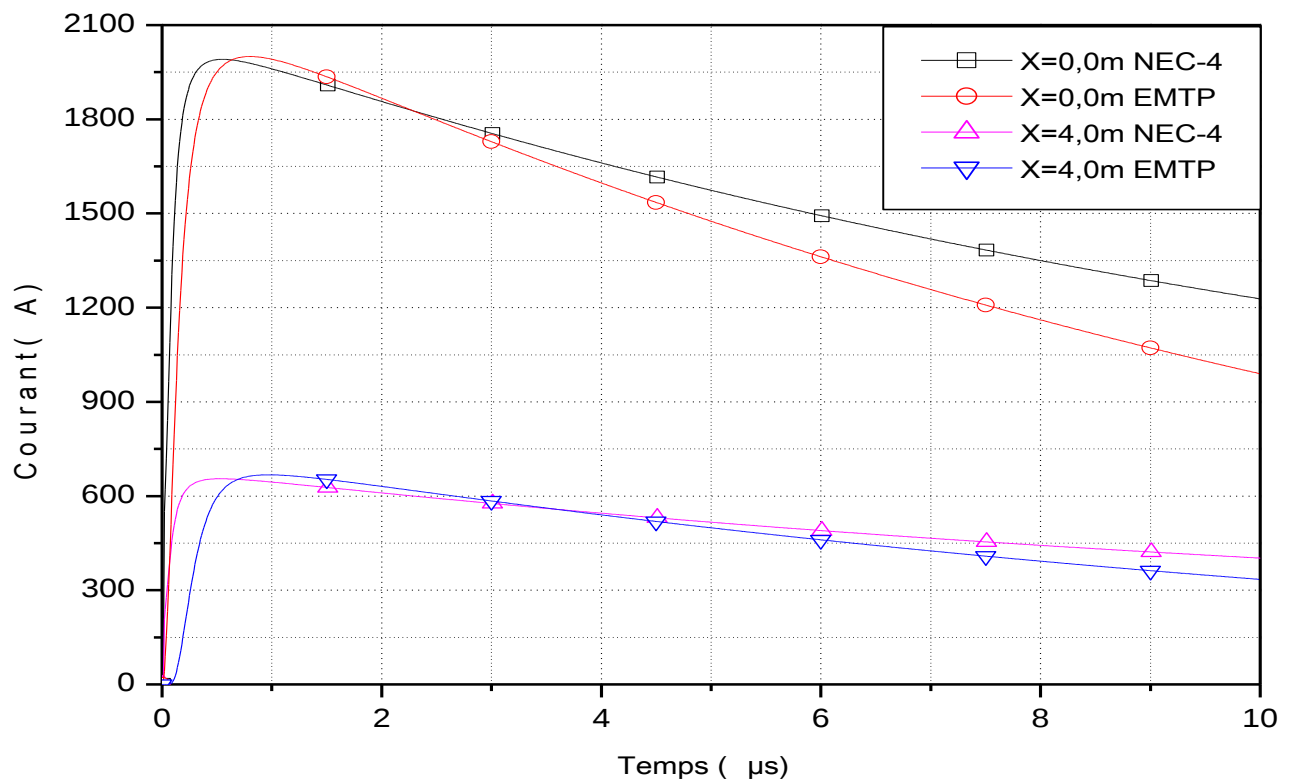


Figure 3.5 Variation du courant en différents points de l'électrode.

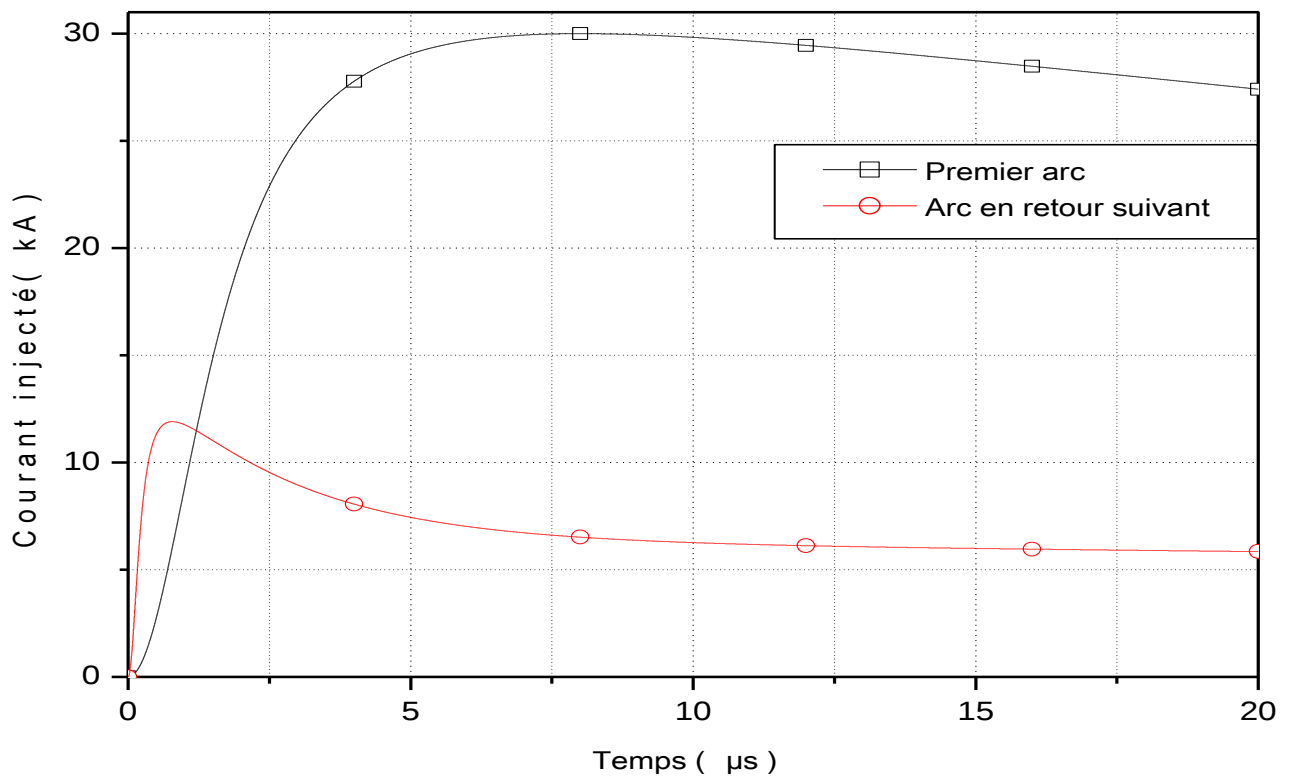


Figure 3.6 Ondes de courant de foudre (données expérimentales de Berger)[51].

Les signaux de courant sont choisis par Rachidi et al. [51] pour s'adapter typiquement aux données expérimentales et sont reproduites au moyen de somme de fonctions type Heidler (2.32 et 2.33).

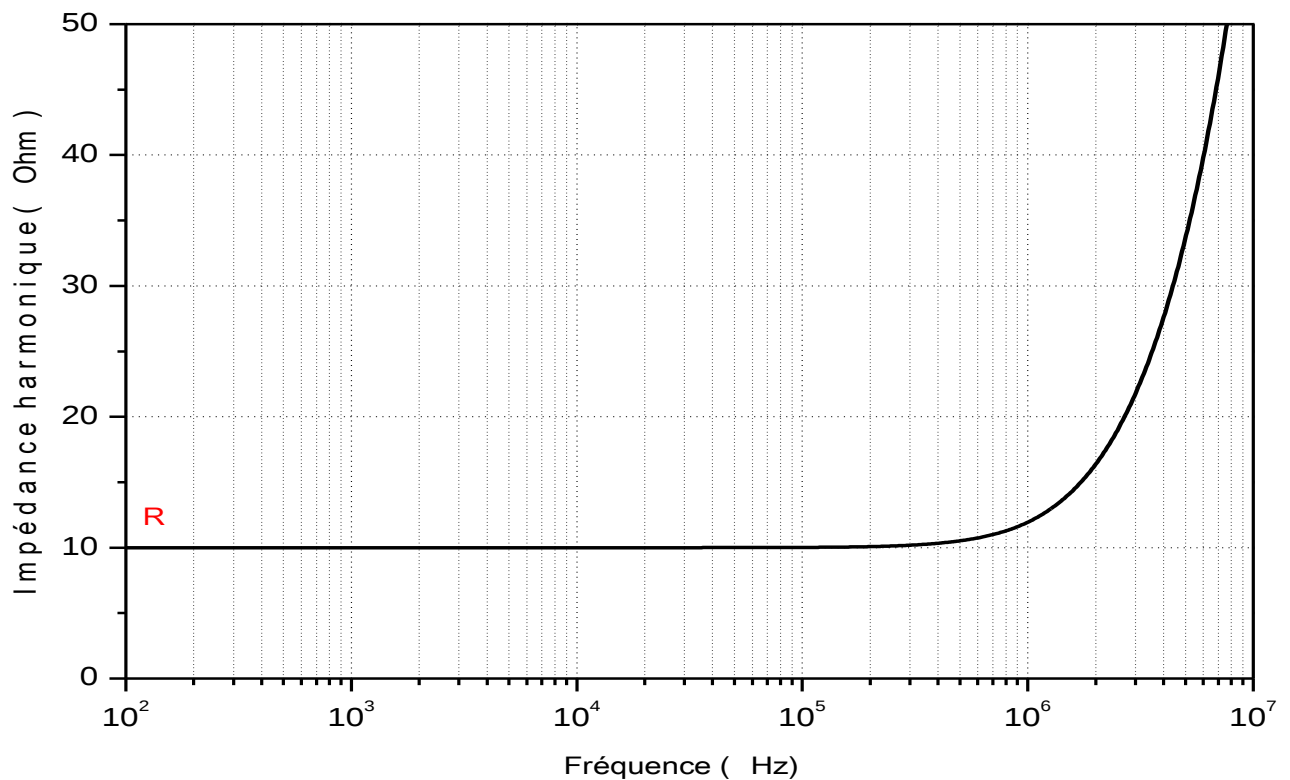


Figure 3.7 Impédance harmonique cas électrode verticale $z(f)$

L'impulsion de courant du premier arc en retour est caractérisé par une valeur de crête de 30 kA, un temps de front d'environ $8\mu\text{s}$ et une pente maximum de $12\text{kA}/\mu\text{s}$, alors que l'impulsion de courant de l'arc en retour suivant a une valeur de crête de 12kA , un temps de front d'environ $0,8\mu\text{s}$ et une pente maximale de $40\text{kA}/\mu\text{s}$.

La figure 3.7 montre la variation de l'amplitude de l'impédance harmonique en fonction de la fréquence pour une électrode verticale de rayon $r = 14\text{ mm}$, de longueur $l = 12\text{ m}$, enfoncées dans un sol considéré comme homogène, de résistivité $\rho = 100\ \Omega\text{m}$, de permittivité $\varepsilon_r = 10$ et de perméabilité $\mu_0 = 1$. En examinant cette figure on peut voir que l'impédance harmonique reste indépendante de la fréquence et égale à la résistance de terre $R = 10,3\ \Omega$, à faible fréquence dans le domaine des basses fréquences (BF) allant jusqu'à 100 kHz . Dans la gamme des hautes fréquences (HF) elle expose un comportement inductif et sa valeur devient plus grande que R .

Les figures 3.8 et 3.9 montrent la réponse de la prise de terre à cette excitation. Ils s'agitent du potentiel au point d'alimentation et de l'impédance transitoire pour le courant du premier arc en retour du coup de foudre.

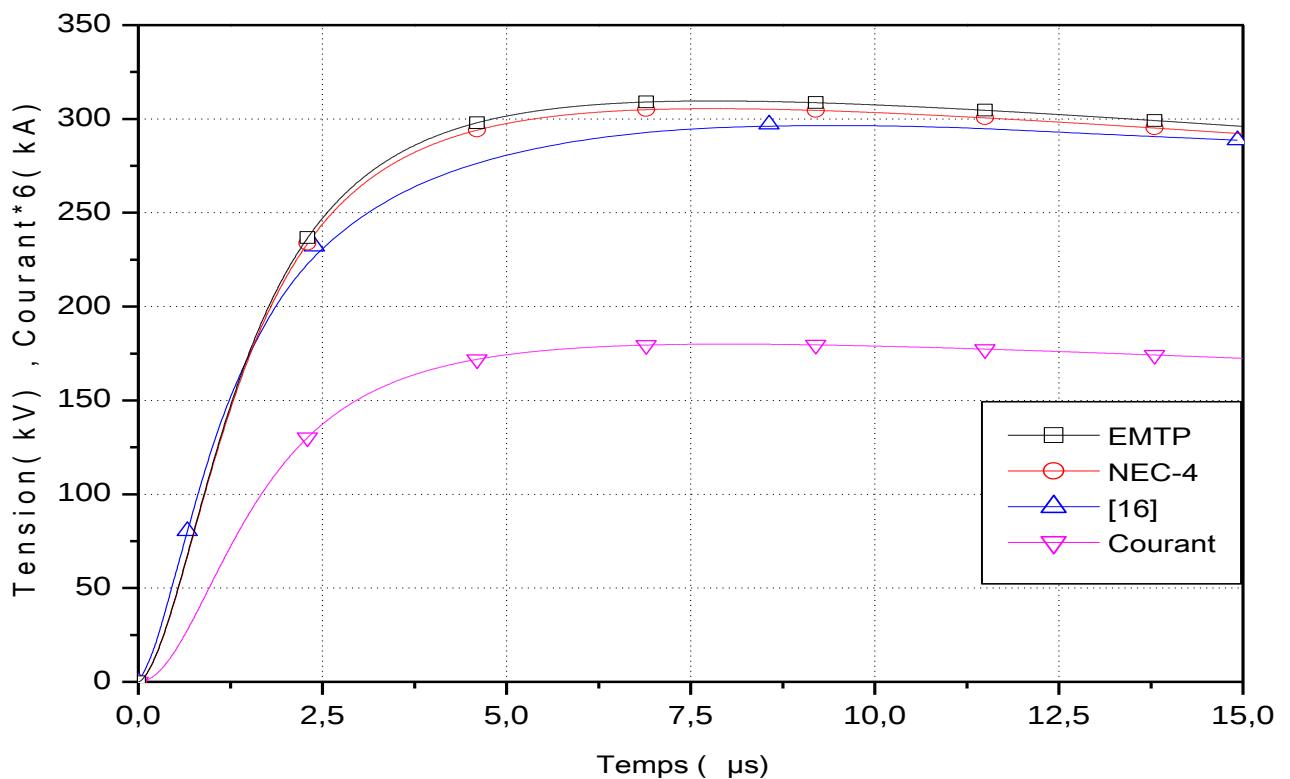


Figure 3.8 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (premier arc).

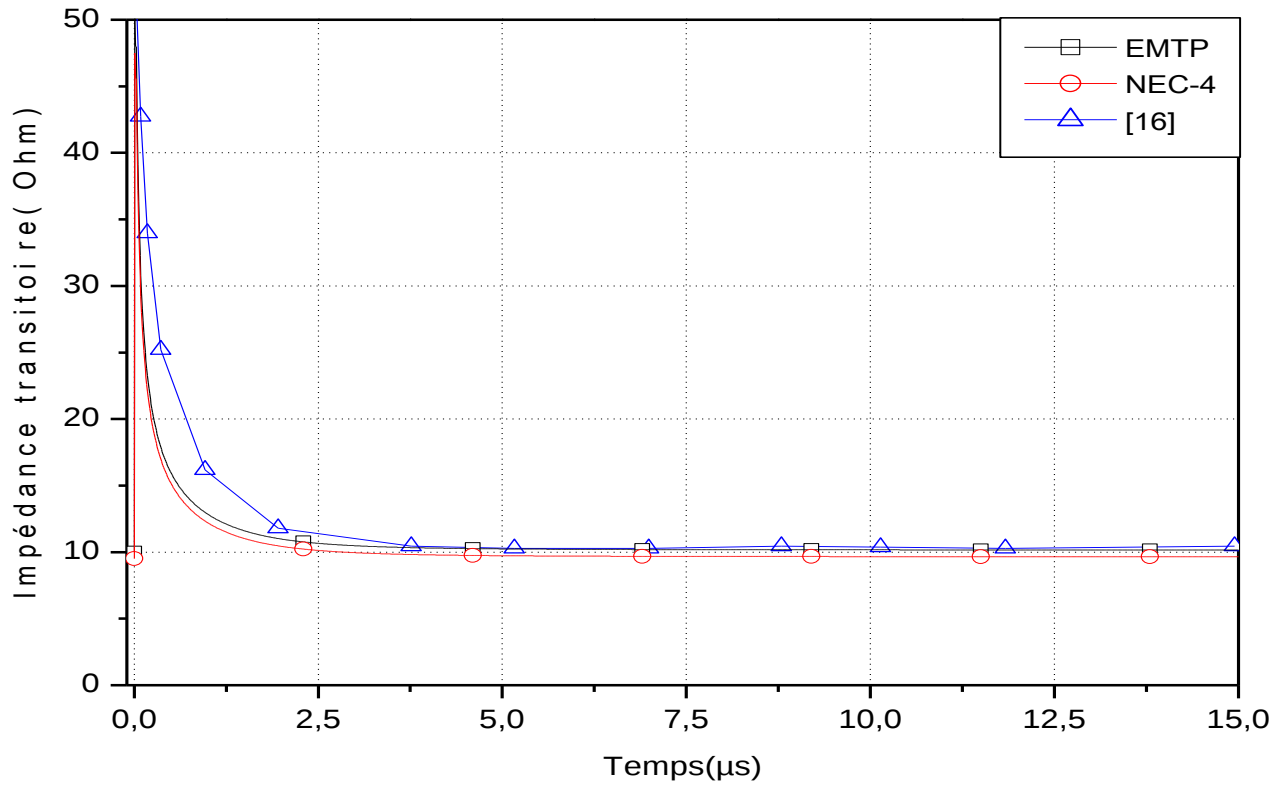


Figure 3.9 Evolution de l'impédance transitoire (premier arc).

Le potentiel peut être interprété comme une réponse à une excitation injectée à un filtre ayant une impédance harmonique telle que celle donnée dans la figure 3.7. Le courant du premier arc en retour ne contient pas de fréquences dans la gamme HF (au-dessus de 100 kHz), et par conséquent n'est pas affectée par la partie inductive HF de l'impédance. La réponse est substantiellement déterminée par la partie indépendante de la fréquence de l'impédance, c'est pour cette raison que la forme d'onde de la tension $v(t)$ n'est pas modifiée voir faiblement modifiée en comparaison avec la forme d'onde du courant injecté $i(t)$, et leur maximums auront lieu en même temps.

De même, nous constatons que l'impédance transitoire $z(t)$ monte très rapidement à une valeur supérieure à 50 Ω , mais aussi elle s'installe rapidement à la valeur de la résistance basse fréquence.

Ceci détermine la période transitoire à environ de 3 μs . Au de la de laquelle le comportement de la mise à la terre est exclusivement déterminée par R . Ceci conduit à un coefficient impulsif A égal à l'unité. Par ailleurs, les résultats obtenus par l'ATP-EMTP et l'NEC-4 sont très proche à ceux obtenus dans la référence [16].

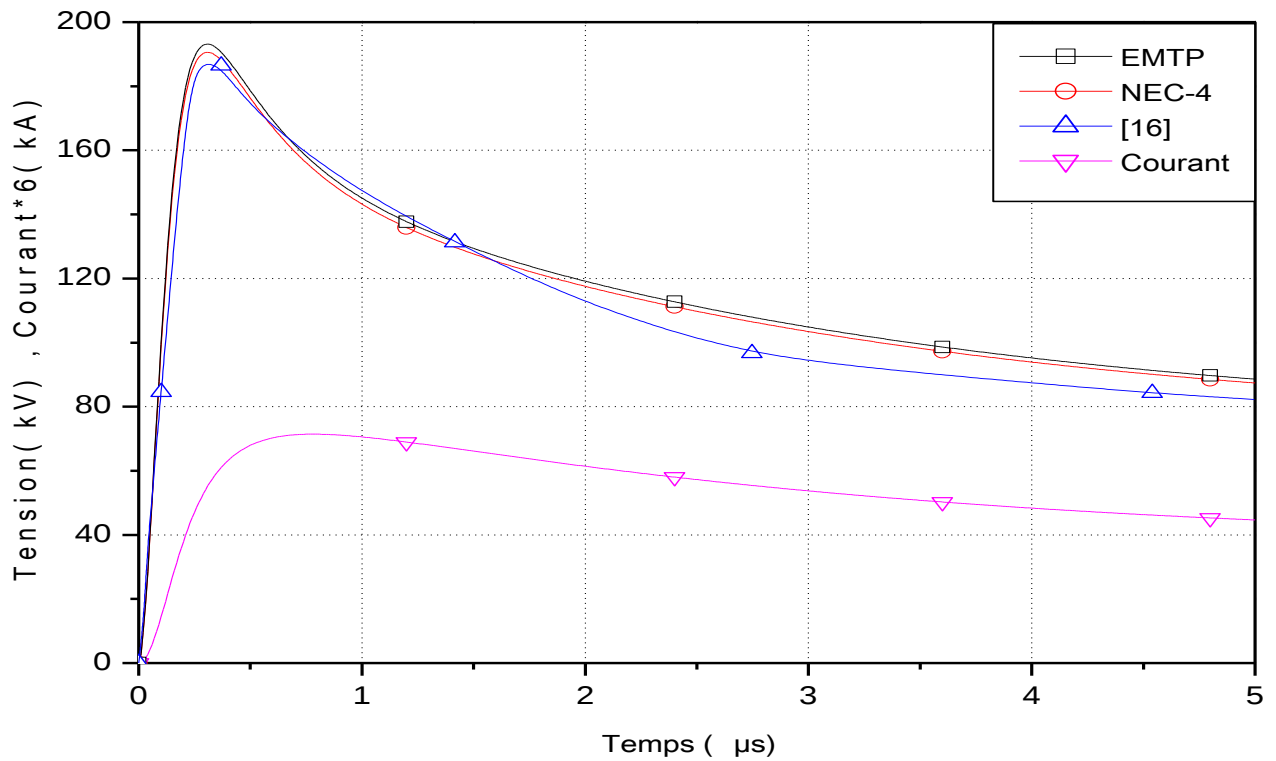


Figure 3.10 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (arc en retour suivant)

Pour le cas où on injecte le courant de l'arc en retour suivant (figure 3.10 et 3.11), la situation est tout à fait différente. En effet le courant dans ce cas est plus rapide que celui du premier arc en retour. Il est, au contraire, riche en fréquences très élevées, et par conséquent la réponse de la mise à la terre est influencée par la partie inductive HF de l'impédance.

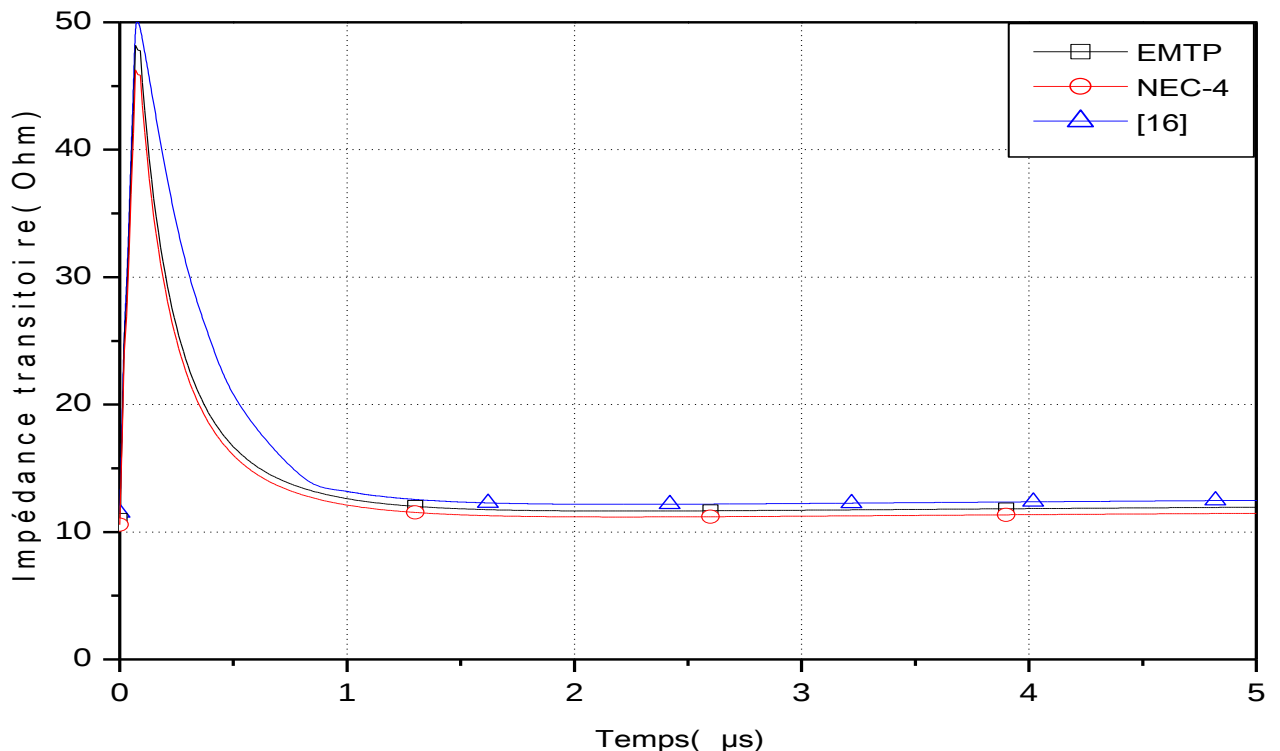


Figure 3.11 Evolution de l'impédance transitoire (arc en retour suivant).

Ceci peut expliquer l'augmentation de la valeur maximale V_m de la tension transitoire $v(t)$, et par suite causer une élévation de l'impédance impulsionnelle de $15,7 \Omega$ ($A=1,5$). La variation de l'impédance transitoire est similaire à celle du premier cas, elle monte très rapidement à une valeur élevée autour de 47Ω , et diminue rapidement à la valeur de la résistance basse fréquence pendant une durée de $1 \mu s$.

On remarque bien que l'impédance transitoire dépendra non seulement des caractéristiques géométriques de la mise à la terre et du milieu, mais aussi de la forme de l'onde du courant.

3.3. Electrode Horizontale

La deuxième application concerne une électrode de terre horizontale en cuivre (figure 3.12) de rayon $r=12 \text{ mm}$, de longueur 15 m , enfoncées à une profondeur $h=0,6 \text{ m}$, le sol est considéré comme homogène de résistivité, permittivité $\epsilon_r = 15$ et perméabilité $\mu_r = 1$ (tableau 3.2). Le modèle de circuiterie présenté dans le chapitre 2 a été implanté dans l'EMTP, on a décomposée l'électrode en 53 segments de longueur $0,283$ qui confirme la condition (2.37), chaque segment est représenté par le modèle RLC comme montre dans la figure 3.13.

De même, l'exemple a été introduit dans le logiciel NEC-4 (figure 3.14). On note que le même domaine fréquentiel précédemment présenté a été utilisé, avec un moment du courant de la source égal à $0,283 \text{ A} \cdot \text{m}$

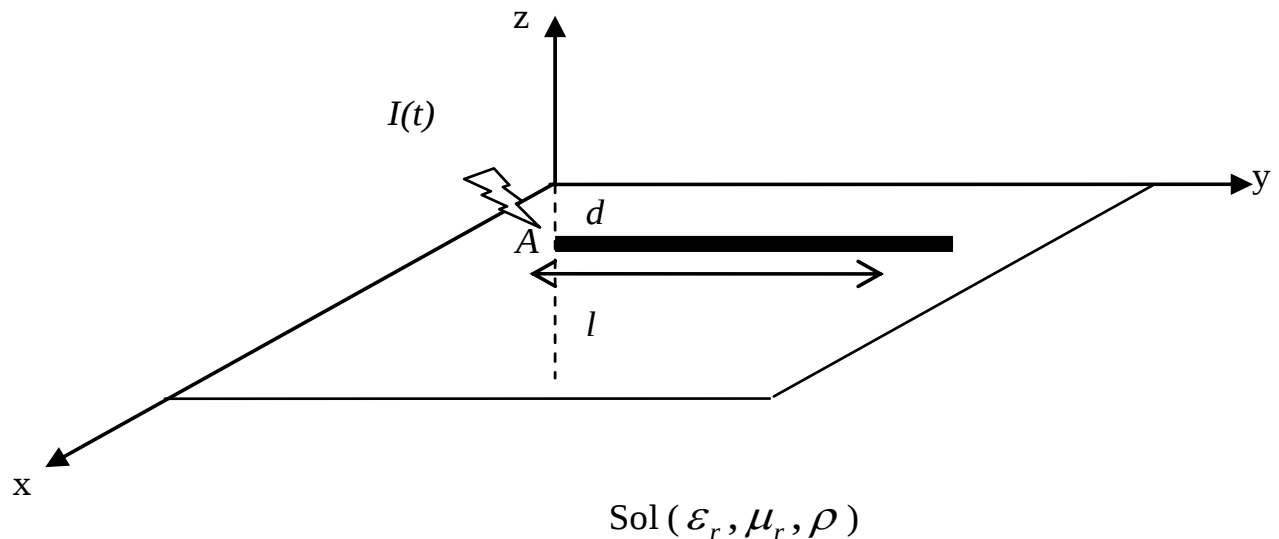
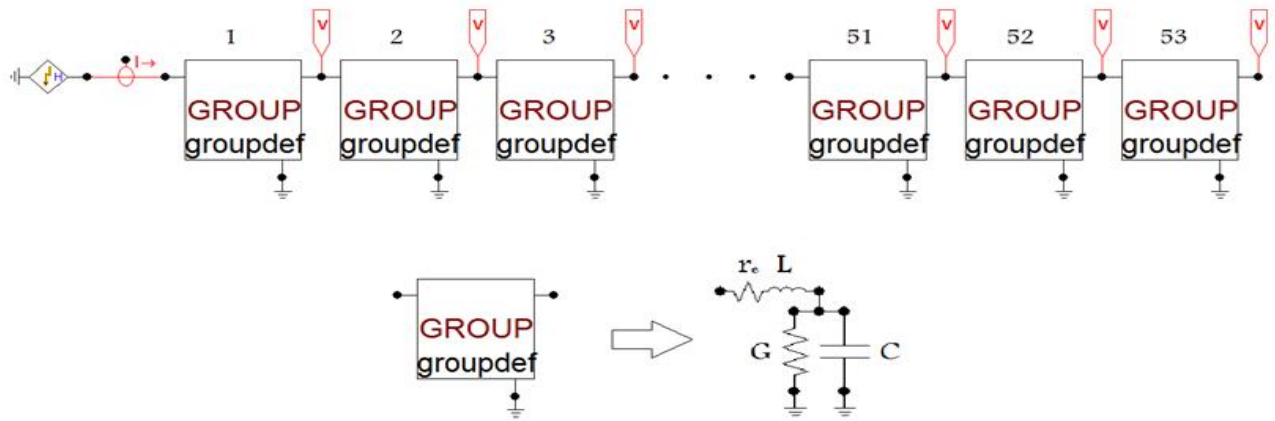


Figure 3.12 Electrode de terre horizontale.

Tableau 3.2 Données pour l'électrode horizontale

Electrode	Sol
L=15m	$\rho_c = 70 \Omega m$
r=12mm	$\epsilon_r = 15$
h=0,6m	$\mu_r = 1$
$\rho_c = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega m$	

**Figure 3.13** Modèle RLC pour l'électrode horizontale.

```

CE
GW 1 60 0 0 -0.6 0 15 -0.6 0.012
GE -1
GN 2 0 0 0 15 0.01428
FR 0 1024 0 0 0.0007 0.0007
EX 4 1 10 0 0 0 -0.6 0 90 0.283
NE 0 1 30 1 0 0 0 0 0.5 0
NH 0 1 30 1 0 0 0 0 0.5 0
XQ
EN

```

Figure 3.14 Fichier des données NEC-4 pour l'électrode l'horizontale.

3.3.1. Evolution de la tension et du courant de l'électrode de mise à la terre

La figure 3.15 montre la tension au point d'injection A obtenue par le NEC-4 et EMTP, pour le même courant injecté I (relation (3.1)) d'amplitude $I_0 = 44\text{A}$.

Les résultats obtenus dans [52] en utilisant la méthode des lignes de transmission ainsi que les mesures effectuées par Electricité de France (EDF) [16] sont introduit pour but de comparaison.

La même remarque pour cette électrode horizontale que pour l'électrode verticale avec une petit décalge temorel intervient entre les differénts resultats, et les tensions transitoires atteindre leurs pics avant que le pic de courant, à cause de l'effet d'inductance.

En fixant l'amplitude du courant injectée à 2000 A, et en ré-exécutant les deux logiciels nous obtenons les résultats montrés dans la figure 3.16 qui représente les courant aux point d'injection et au 4m de point d'injection. En examinant ces résultats nous pourrons facilement voir que les deux méthodes sont très proche l'une de l'autre, à part quelques différences qui peuvent être attribué aux causes déjà présentés.

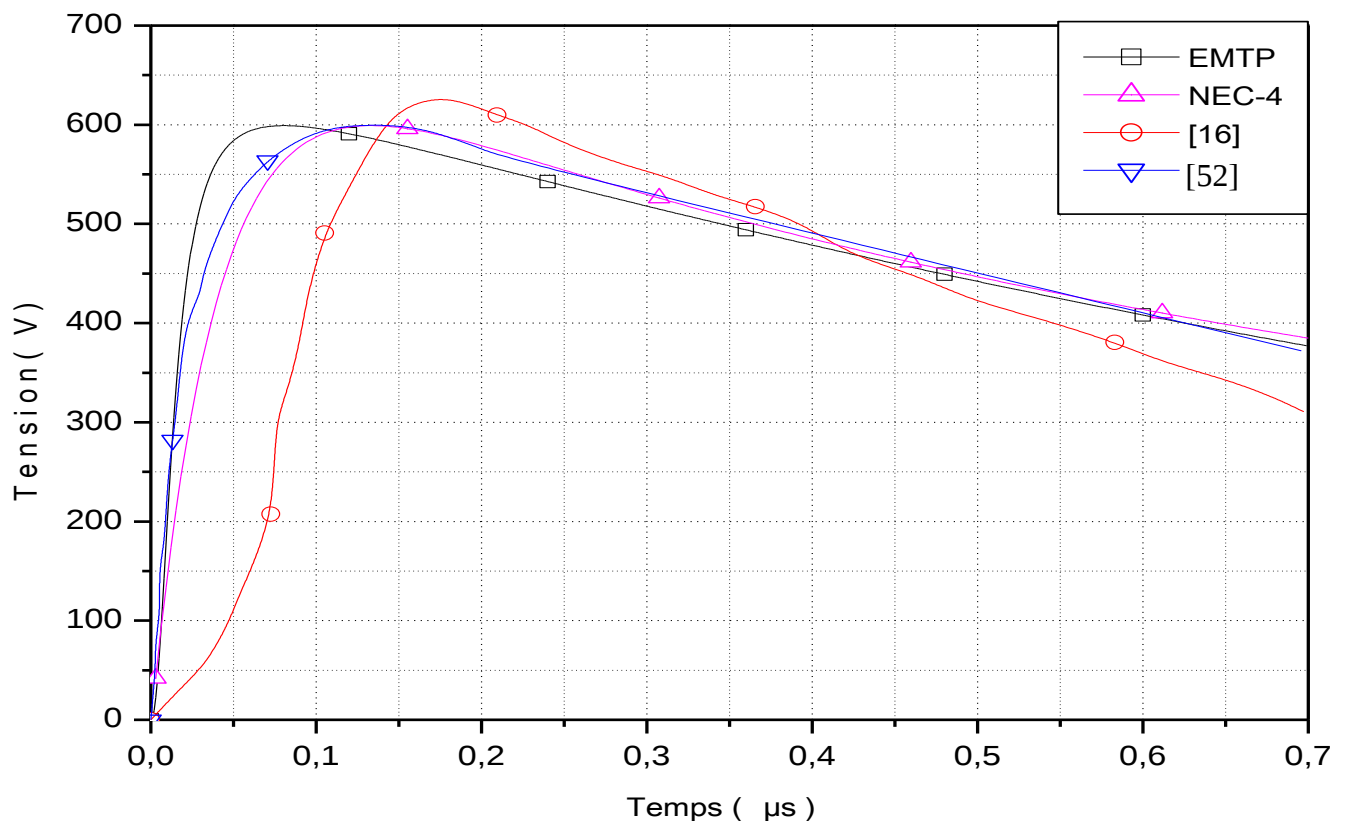


Figure 3.15 Comparaison entres les différentes méthodes

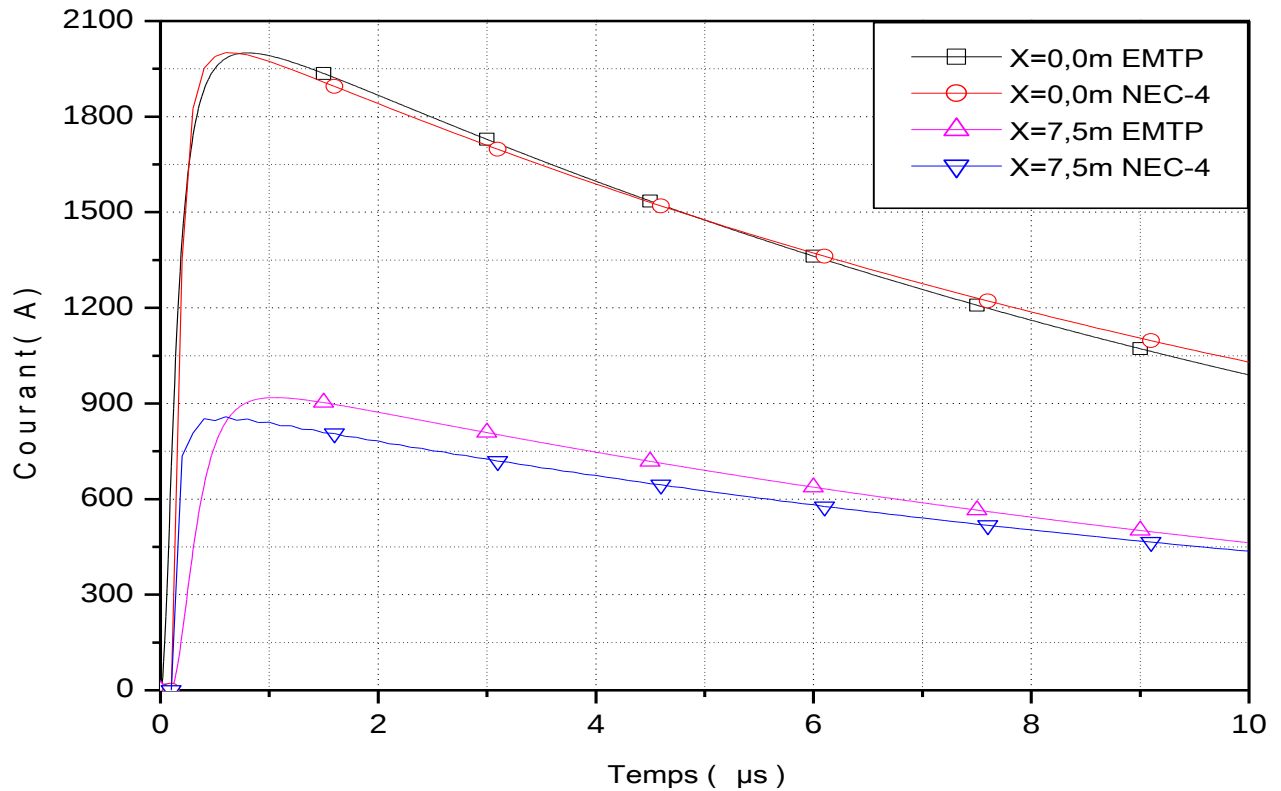


Figure 3.16 Variation du courant en différents points de l'électrode

3.3.2. Evolution de l'impédance de l'électrode de terre horizontale

La figure 3.17 montre la variation de l'amplitude de l'impédance harmonique en fonction de la fréquence pour une électrode de terre horizontale en cuivre de rayon $r = 14$ mm, de longueur $l = 12$ m, enfoncées à une profondeur $h = 0.6$ m dans un sol considéré comme homogène, de résistivité $\rho = 100 \Omega\text{m}$, de permittivité $\epsilon_r = 10$ et de perméabilité $\mu_0 = 1$. En examinant cette figure on peut voir que l'impédance harmonique reste indépendante de la fréquence et égale à la résistance de terre $R = 8,3 \Omega$, à faible fréquence dans le domaine des basses fréquences (BF) allant jusqu'à 100 kHz. Dans la gamme des hautes fréquences (HF) elle expose un comportement inductif et sa valeur devient plus grande que R .

Dans le but d'une comparaison entre cette électrode et l'électrode verticale, nous avons utilisé les mêmes formes d'onde de courant. Les figures 3.18 et 3.19 montrent la réponse de la prise de terre à première excitation, les figures 3.20 et 3.21 montrent la réponse pour l'arc en retour pour les deux électrodes. Ils s'agit du potentiel au point d'alimentation et de l'impédance transitoire pour les deux courants de foudre.

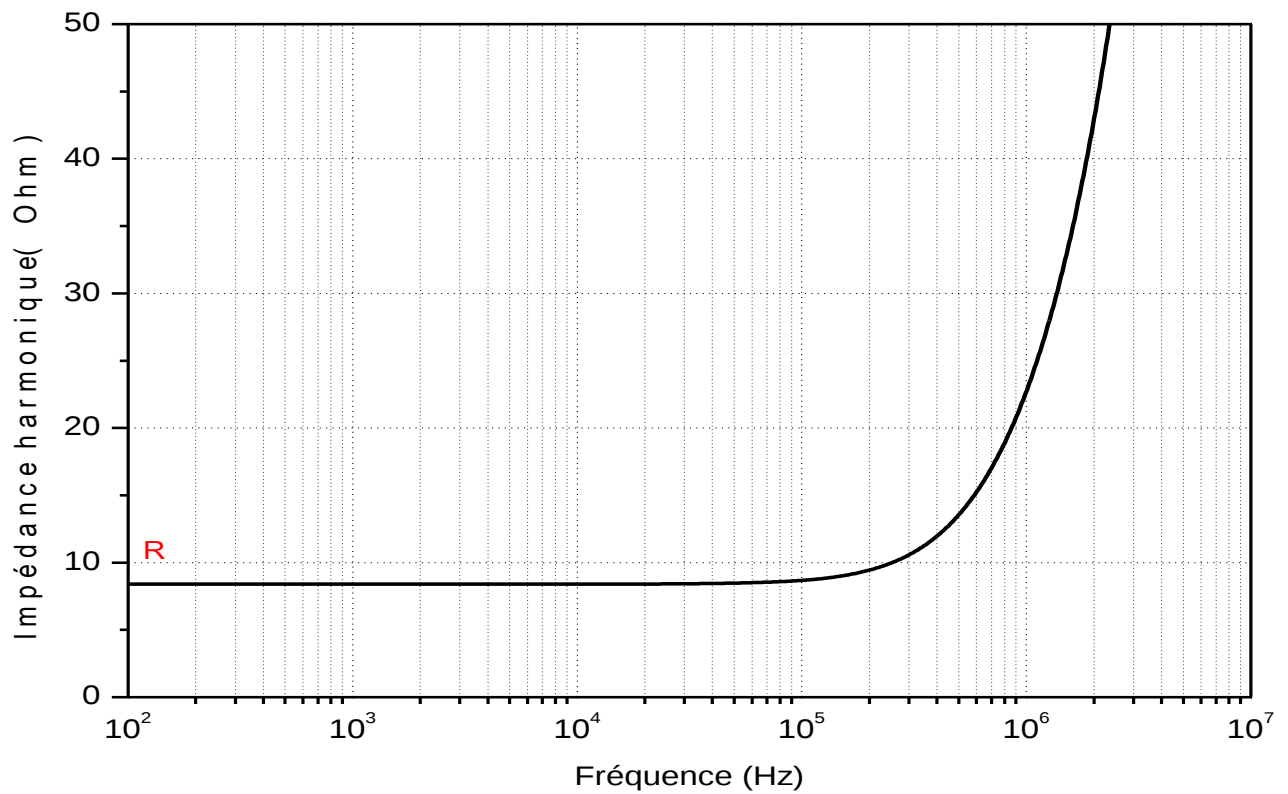


Figure 3.17 Impédance harmonique cas électrode horizontale $z(f)$

Les mêmes remarques que données pour l'électrode verticale sont observées pour le cas d'une électrode horizontale avec un comportement résistif pour le courant du premier arc en retour, et comportement inductif pour l'arc en retour.

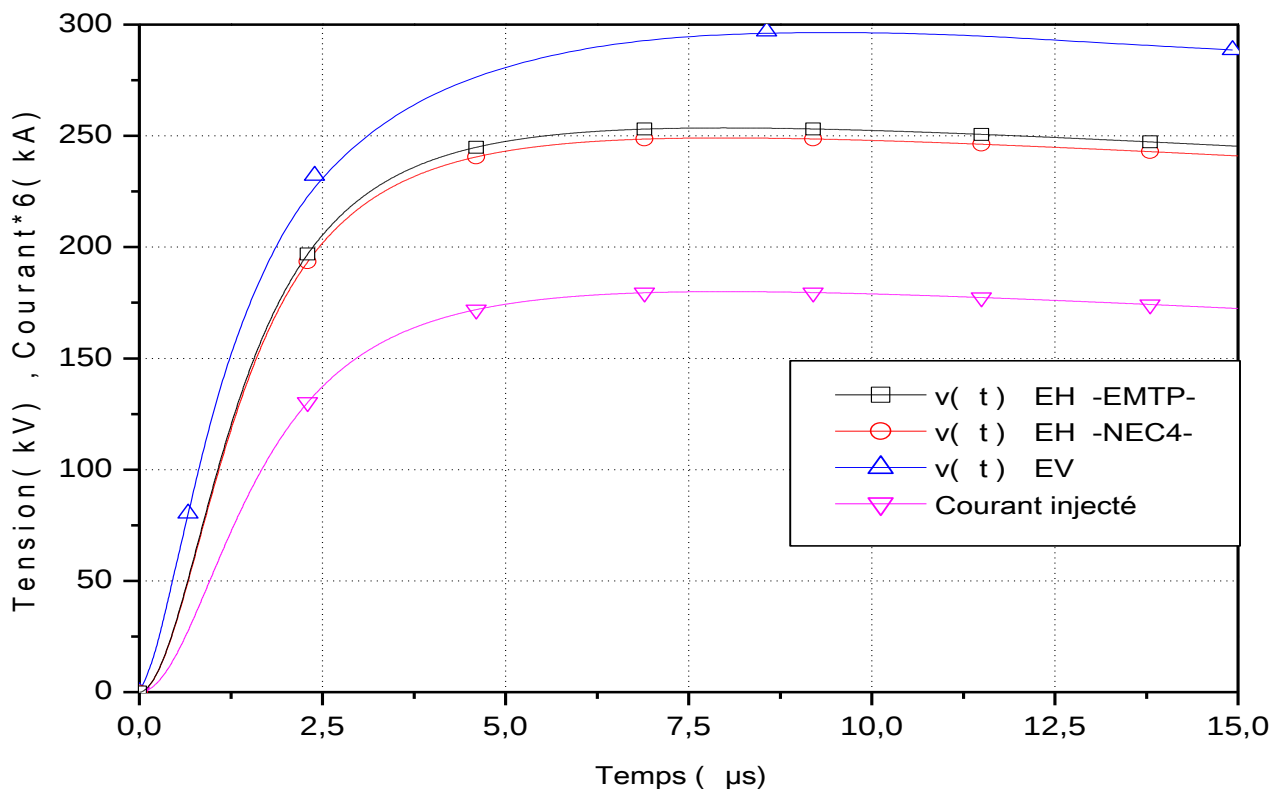


Figure 3.18 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (Premier arc).

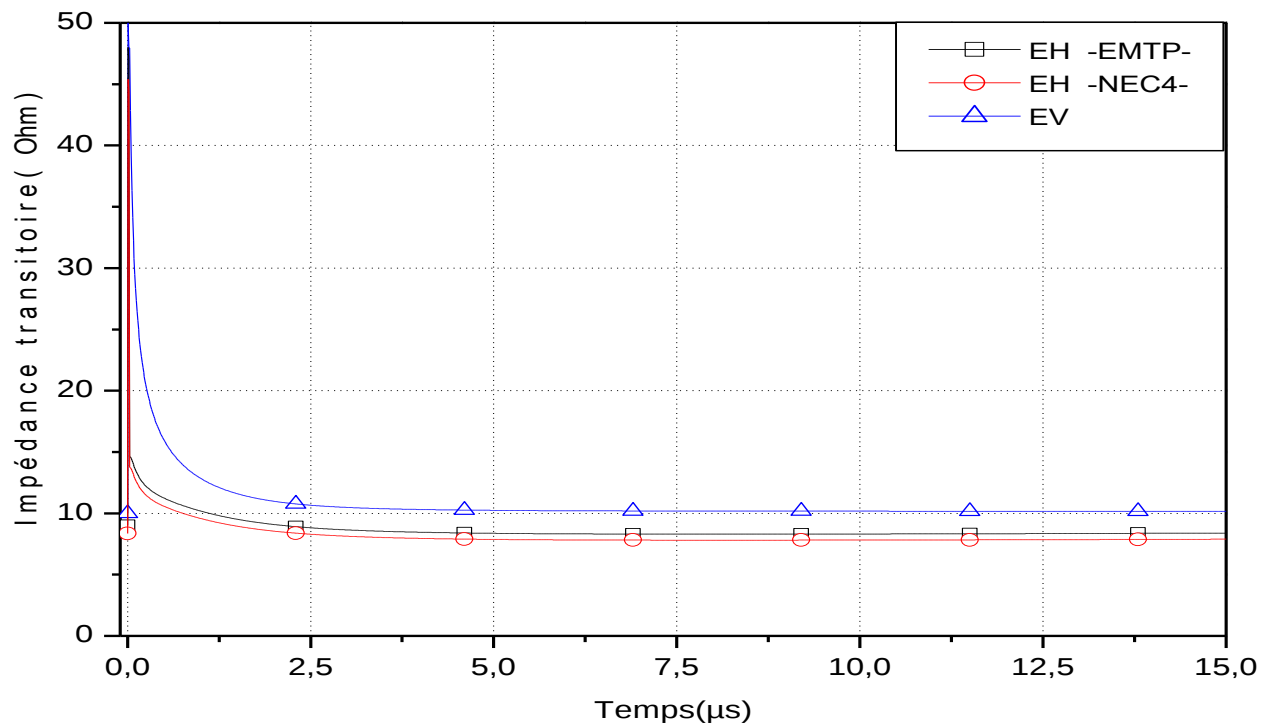


Figure 3.19 Evolution de l'impédance transitoire (Premier arc).

De même, nous constatons que l'impédance transitoire $z(t)$ monte très rapidement à une valeur supérieure à 50 Ω , mais aussi elle s'installe rapidement à la valeur de la résistance basse fréquence. Ceci détermine la période transitoire à environ de 3 μs . Au de la de laquelle le comportement de la mise à la terre est exclusivement déterminée par R . Ceci conduit à un coefficient impulsionnel A égal à l'unité.

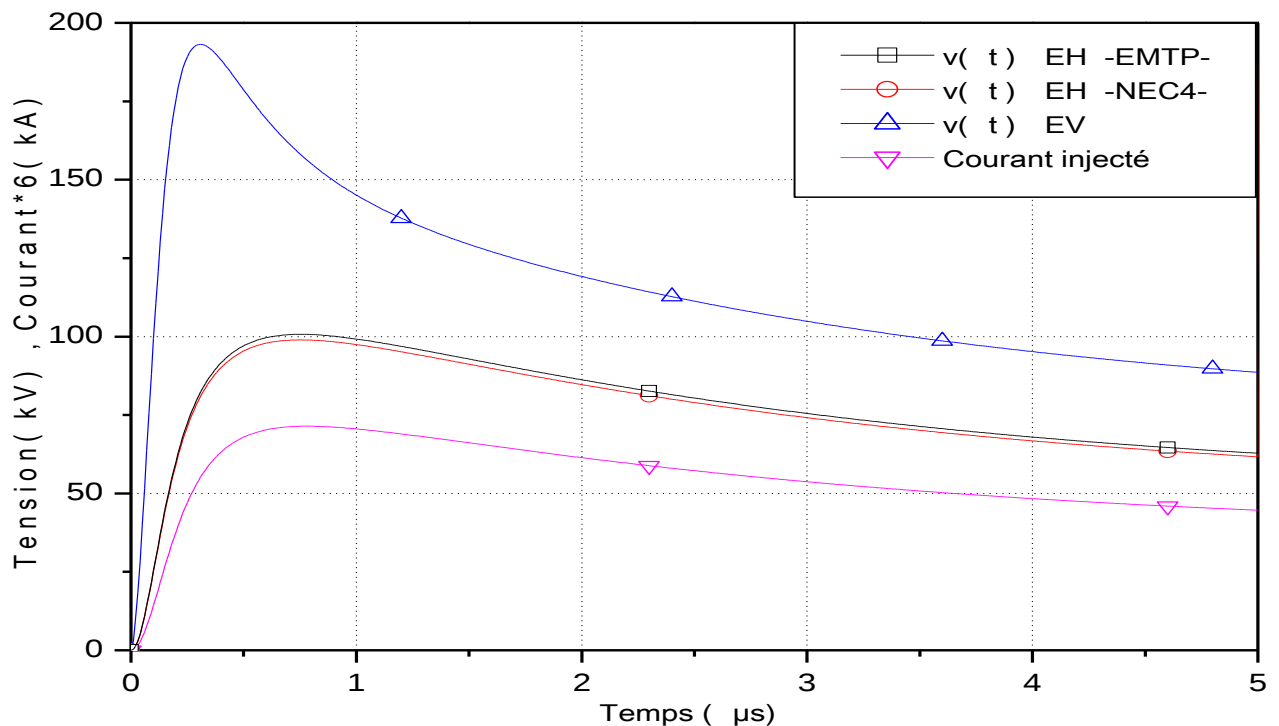


Figure 3.20 Evolution de la tension, du courant de l'électrode (Arc en retour suivant).

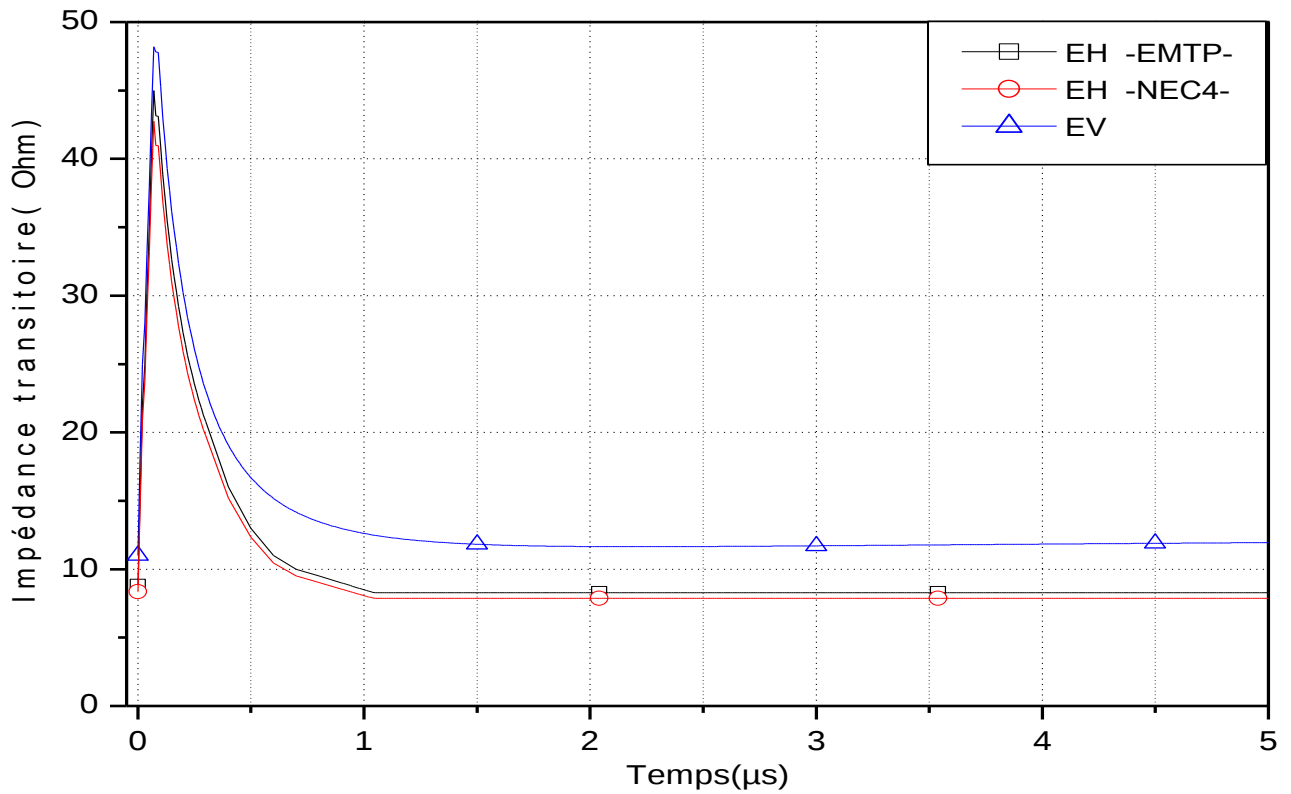


Figure 3.21 Evolution de l'impédance transitoire (Arc en retour suivant).

3.4. Grille de mise à la terre.

La troisième application concerne une grille 2×2 en cuivre de rayon 12 mm, de longueur $l = 15m$, enfouie à une profondeur $h = 0,6m$ (figure 3.22), le sol est considéré comme homogène de résistivité $\rho = 70 \Omega m$, permittivité $\epsilon_r = 15$ et perméabilité $\mu_0 = 1$ (tableau 3.3).

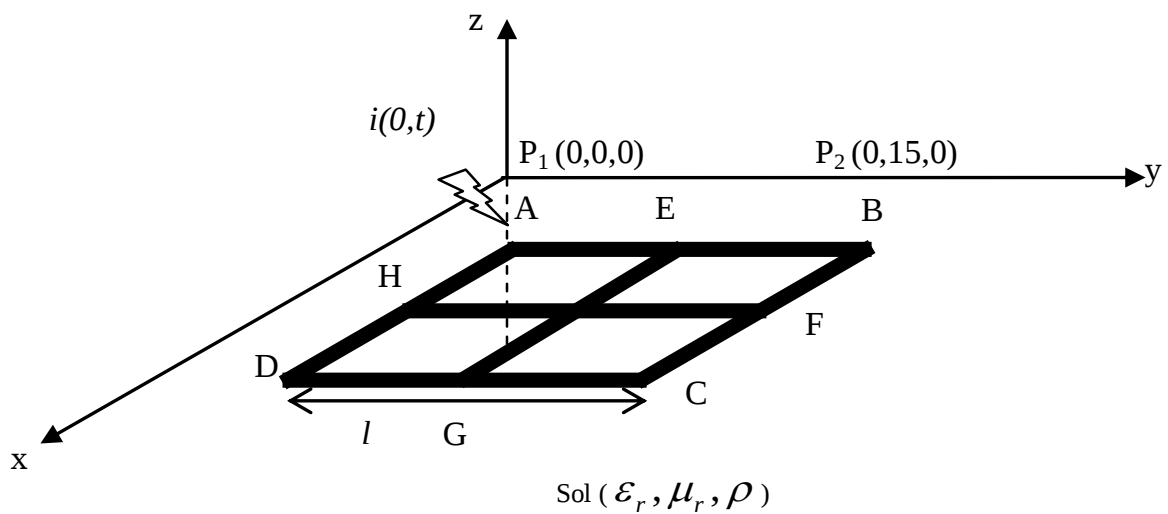


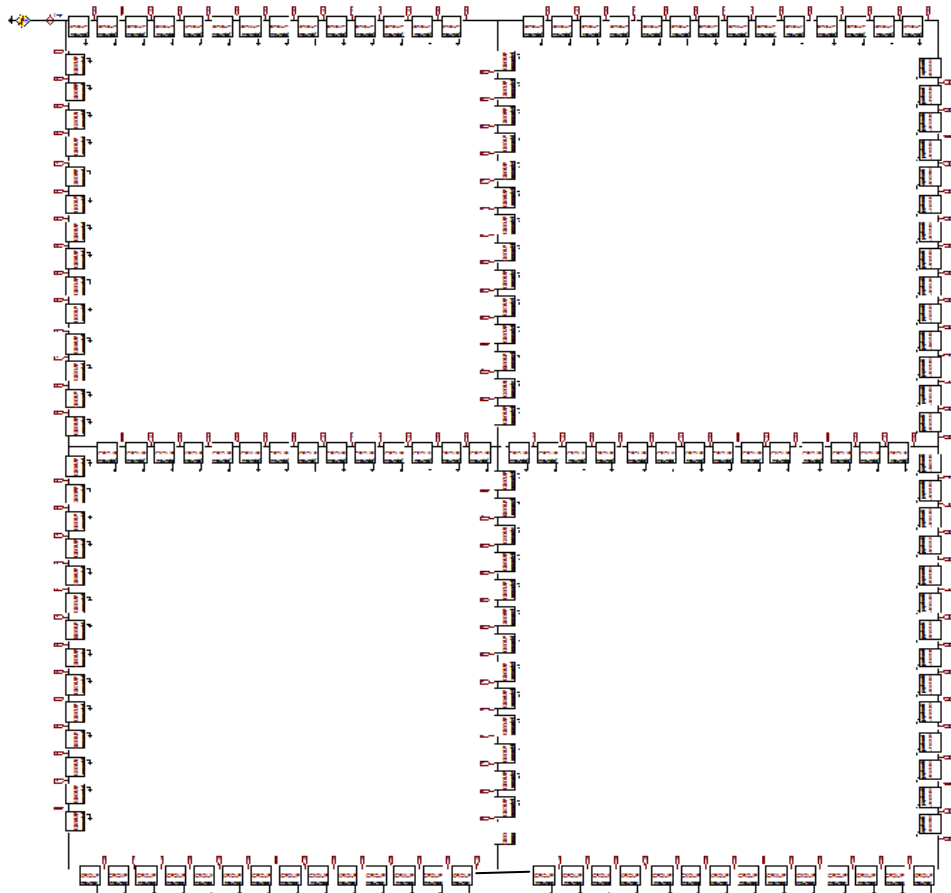
Figure 3.22 Grille de mise à la terre.

Tableau 3.3 Données pour la grille

Grille de la mise à la terre	Sol
$l=15\text{m}$	$\rho_c = 70 \Omega\text{m}$
$r=12\text{mm}$	$\varepsilon_r = 15$
$h=0,6\text{m}$	$\mu_r = 1$
$\rho_c = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$	

Le modèle de circuiterie présenté dans le chapitre 2 a été implanté dans l'EMTP, on a décomposé chaque partie de la grille en plusieurs petits segments de longueur 0.222 m de chacun, on respecte la condition (2.37), donc on a 27 segments pour chaque électrode de cette grille, chaque segment est représenté par le modèle RLC comme montre dans la figure 3.23.

De même, l'exemple a été introduit dans le logiciel NEC-4 comme il est montré dans la figure 3.24. On note que le même domaine fréquentiel précédemment présenté a été utilisé, avec un moment du courant de la source égal à 0,22 A · m

**Figure 3.23** Modèle RLC pour la grille

CE										
GW	1	15	-6.0	-6.0	-0.6	-6.0	0.0	-0.6	.012	
GW	2	15	-6.0	0.0	-0.6	-6.0	6.0	-0.6	.012	
GW	3	15	0.0	-6.0	-0.6	0.0	0.0	-0.6	.012	
GW	4	15	0.0	0.0	-0.6	0.0	6.0	-0.6	.012	
GW	5	15	6.0	-6.0	-0.6	6.0	0.0	-0.6	.012	
GW	6	15	6.0	0.0	-0.6	6.0	6.0	-0.6	.012	
GW	7	15	-6.0	-6.0	-0.6	0.0	-6.0	-0.6	.012	
GW	8	15	0.0	-6.0	-0.6	6.0	-6.0	-0.6	.012	
GW	9	15	-6.0	0.0	-0.6	0.0	0.0	-0.6	.012	
GW	10	15	0.0	0.0	-0.6	6.0	0.0	-0.6	.012	
GW	11	15	-6.0	6.0	-0.6	0.0	6.0	-0.6	.012	
GW	12	15	0.0	6.0	-0.6	6.0	6.0	-0.6	.012	
GE -1										
GN	2		0	0	0	36		0.01		
FR	0	1024	0	0		0.0007		0.0007		
EX	4		1	10	0	-6		-6	-0.6	0 45 0.22
NE	0	1	30	1	0	0		0	0	0.5 0
NH	0	1	30	1	0	0		0	0	0.5 0
XQ										
EN										

Figure 3.24 Fichier des données NEC-4 pour la grille.

3.4.1. Evolution de la tension et du courant grille de mise à la terre

La figure 3.25 montre la tension au point d'injection A obtenue par le NEC-4 et EMTP pour le même courant injecté I (relation (3.1)) d'amplitude $I_0 = 1A$.

Les résultats obtenus dans [52] en utilisant le modèle des lignes de transmission est introduit pour but de comparaison.

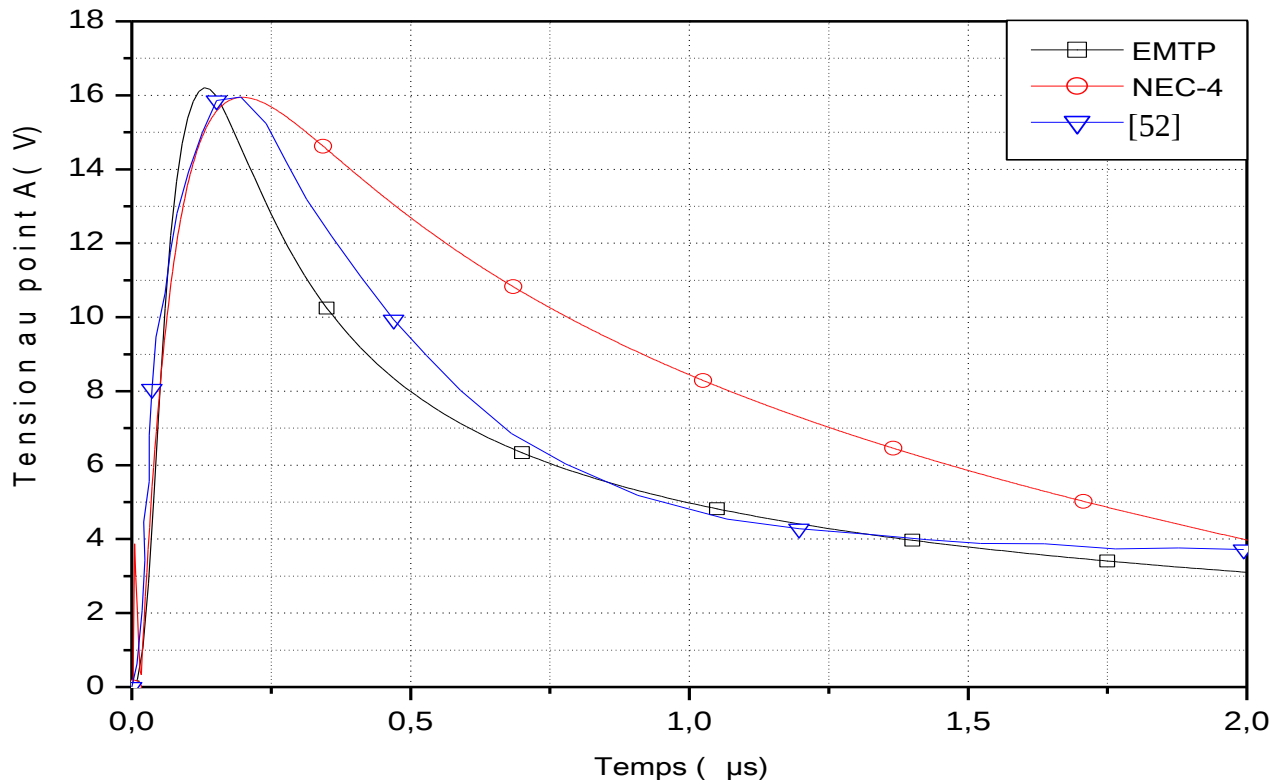


Figure 3.25 Comparaison entre les différentes méthodes

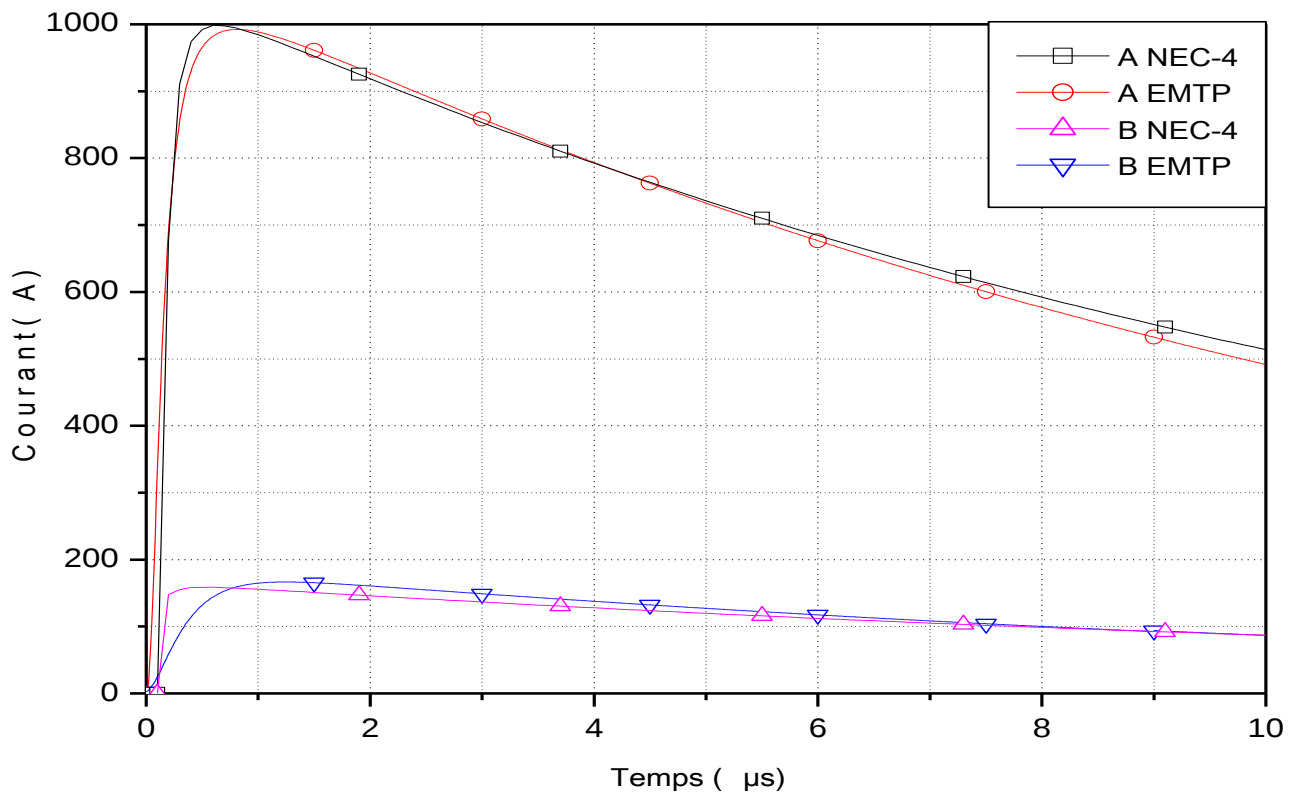


Figure 3.26 Courant électrique dans grille de mise à la terre

On note que l'approche électromagnétique utilisé est la plus précise, en effet que cette dernière prend en compte tout les accouplements électromagnétique mutuel ente les éléments des conducteurs de terre, par contre l'autre approche utilisé néglige ces accouplements.

En fixant l'amplitude du courant injectée à 2000 A, et en ré-exécutant les deux logiciels, nous obtenons les résultats montrés dans la figure 3.26 qui représente les courant aux point d'injection A et le point B (figure 3.22). En examinant ces résultats nous pourrons facilement voir que les deux méthodes sont très proche l'une de l'autre, à part quelques différences qui peuvent être attribuées aux causes déjà présentées. On remarque aussi la diminution des pics de foudre par rapport l'électrode horizontal ce qui montre l'efficacité d'un réseau de terre par rapport une prise de terre.

3.4.2. Evolution de le champ électrique et le champ magnétique dans la grille de mise à la terre

La figure 3.27 montre le champ électrique E et ses composantes E_x , E_y et E_z au point P_1 pour la même grille précédent, les figures 3.28 et 3.29 montrent la variation de champ électrique et de champ magnétique le long du profil P_1P_2 respectivement, lors de l'impact de foudre injecté à l'aide de NEC-4.

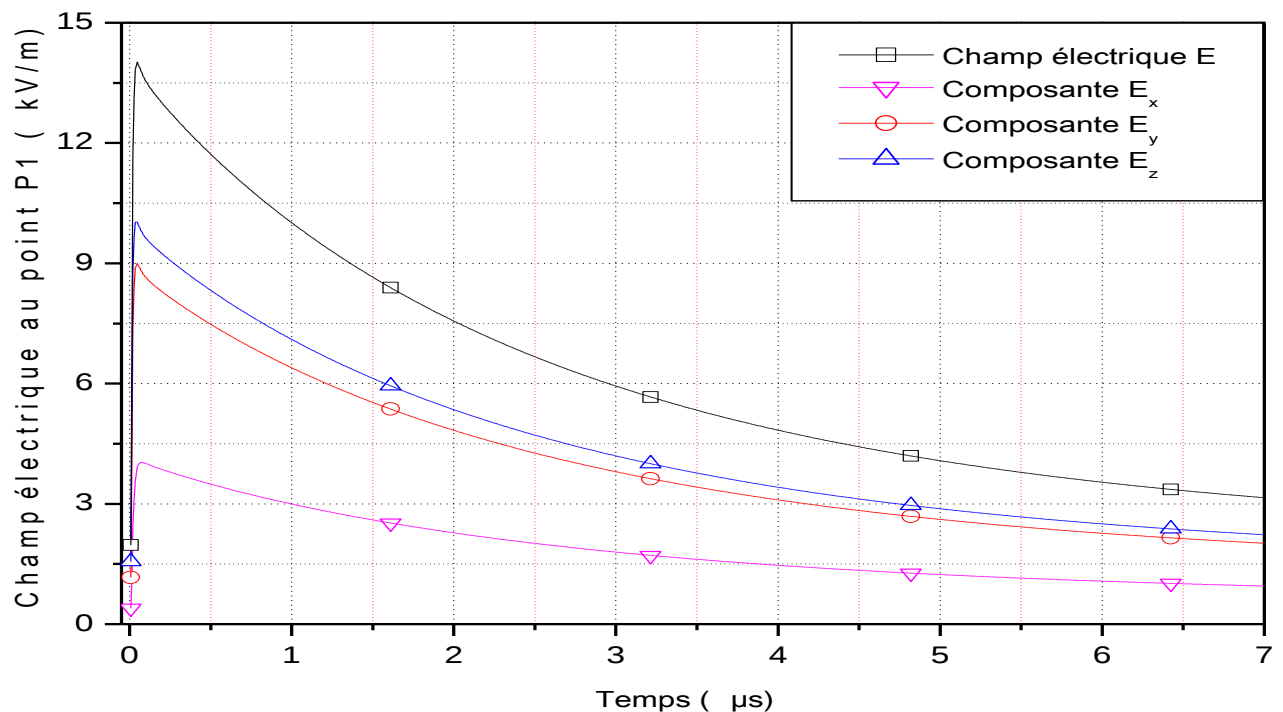


Figure 3.27 le champ électrique dans la grille

D'après ces figures, on remarque que les valeurs des pics de champ électrique et champ magnétique diminuent avec la distance du point d'injection suite au grand chemin de courant de foudre dans cette grille, donc la disparation de défaut.

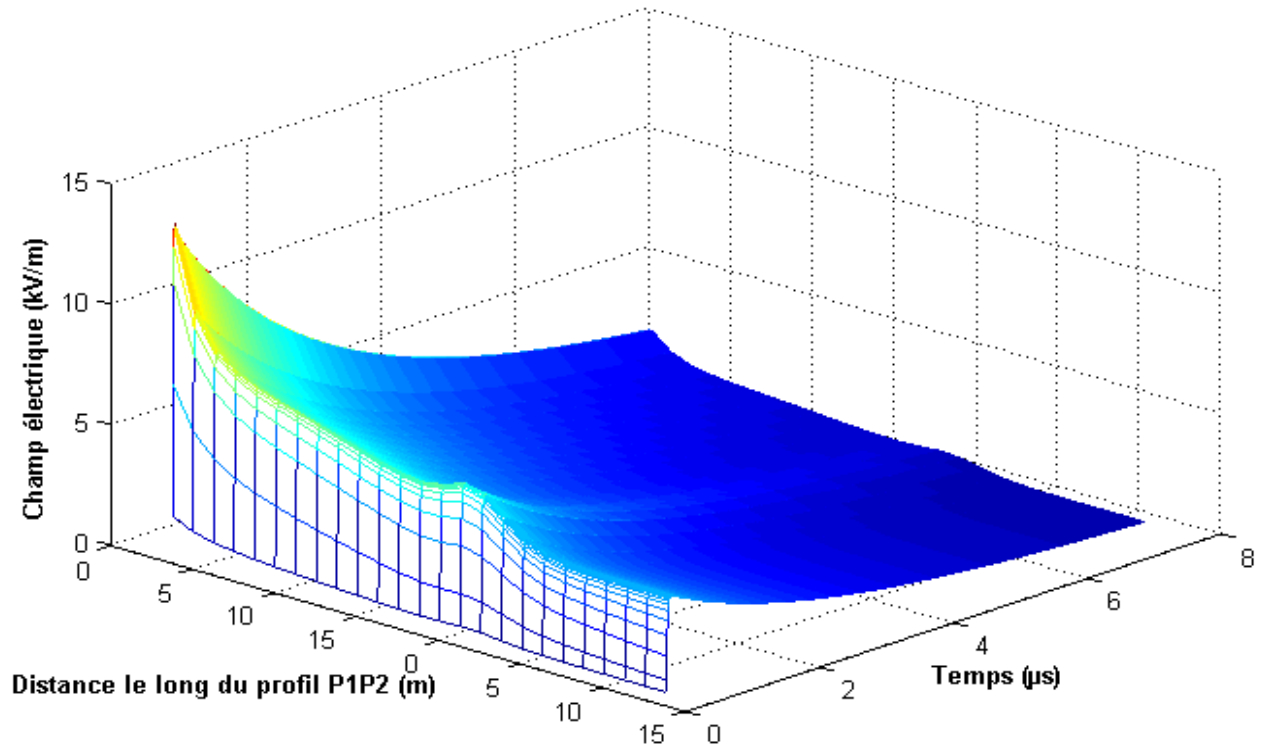


Figure 3.28 Variation de champ électrique le long du profil P_1P_2

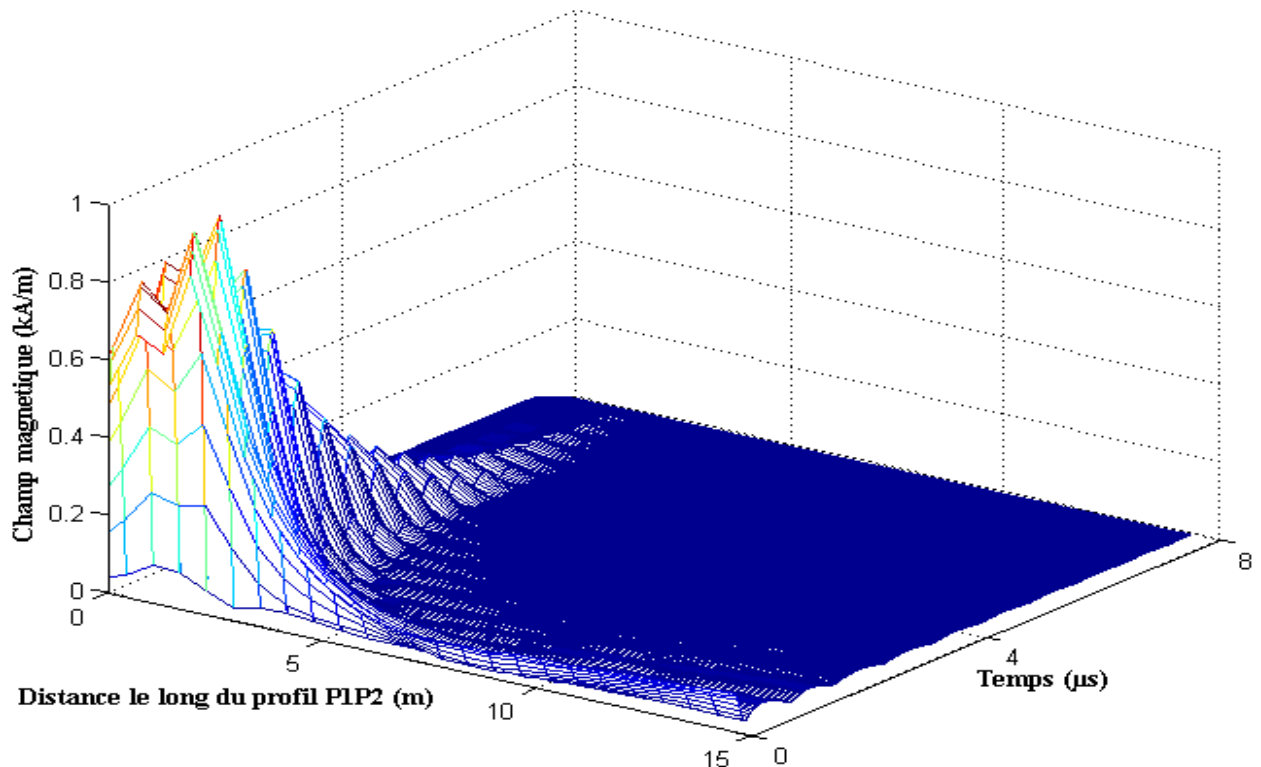


Figure 3.29 Variation de champ magnétique le long du profil P_1P_2

3.5. Etude des effets des différents facteurs sur la réponse des réseaux de terre.

3.5.1. Effet du nombre des mailles de la grille

Cette application concerne l'étude de la réponse impulsionnelle dans des différentes formes de (1 maille, 4 mailles et 16 mailles) de longueur 15m enfoncées à une profondeur $h=0,7$ m, sol est considéré comme homogène de résistivité $\rho=70 \Omega\text{m}$ permittivité $\varepsilon_r=15$, perméabilité $\mu_0=1$ comme montre dans la figure 3.30.

La figure 3.31 représente le pic de courant électrique au point B dans les trois cas pour un courant injecté I de type foudre comme le montre la relation (3.1) d'amplitude $I_0 = 2\text{kA}$, en utilisant la méthode des moments sous environnement NEC-4.

D'après cette figure, on peut remarquer la diminution des pics de courant à chaque augmentation des mailles, donc la limitation des courants de défaut est plus rapide lorsqu'on offre plus de chemins conducteurs.

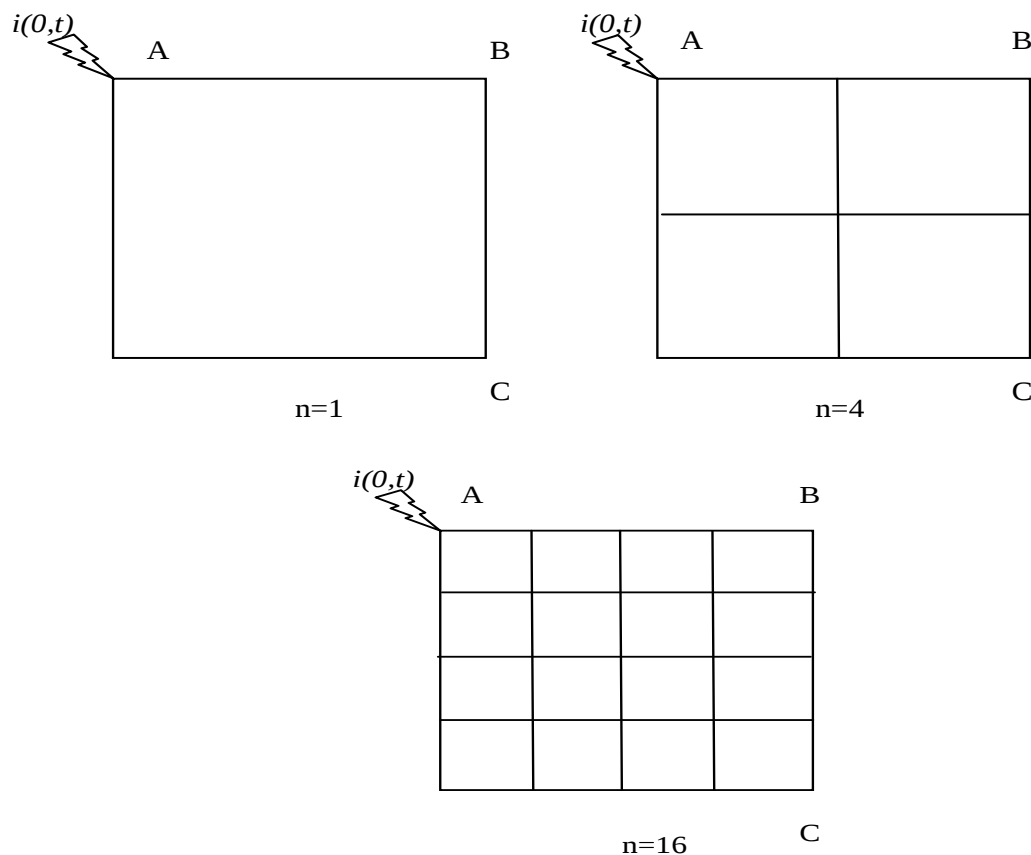


Figure 3.30. Différentes formes de grilles.

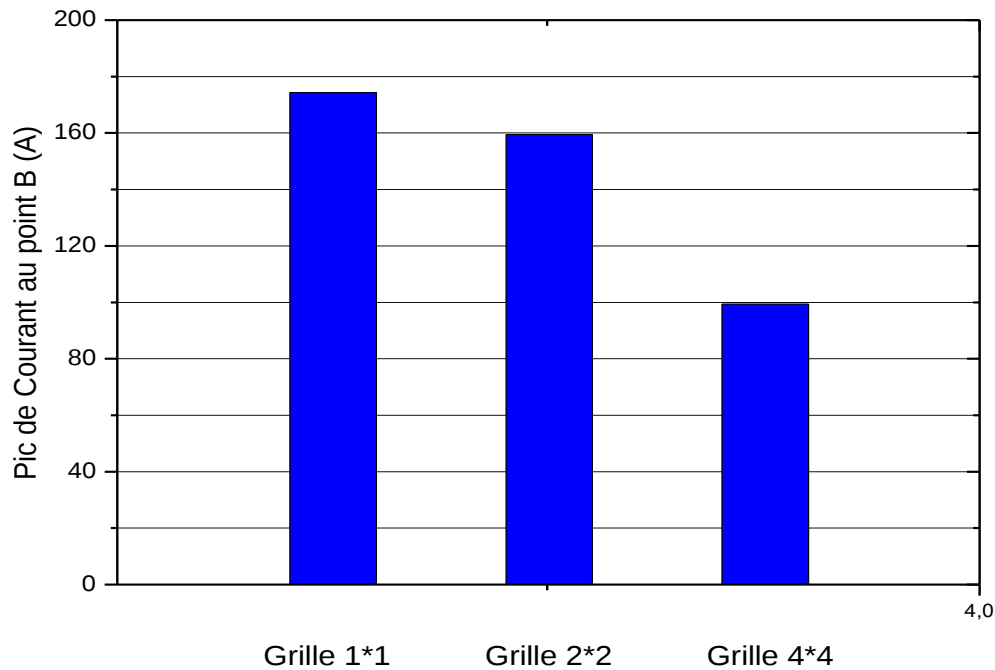


Figure 3.31 *Pic de courant en fonction du nombre des mailles*

3.5.2. Effet du point d'injection

Pour la même grille que nous présentons en figure 3.32, nous réalisons deux applications qui se différencient uniquement par le point d'injection pour le même courant de foudre précédent I .

La figure 3.33 montre la tension en point B pour les deux cas, en utilisant l'NEC-4. Les résultats de cette figure montrent bien l'effet du point d'injection ; l'épanouissement des courants de défaut est plus rapide lorsque le point d'injection offre plus de chemins conducteur (cuivre).

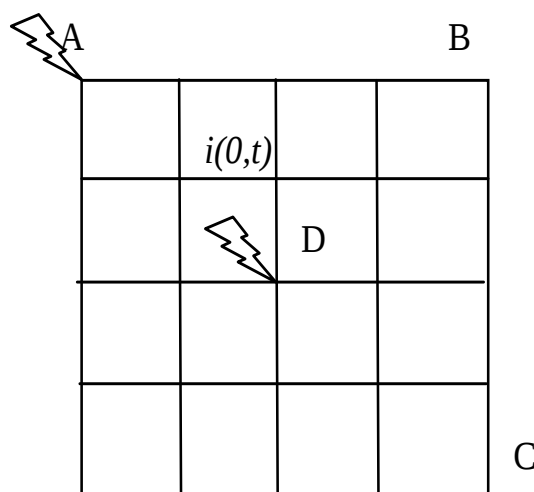


Figure 3.32 *Grille 4 × 4*

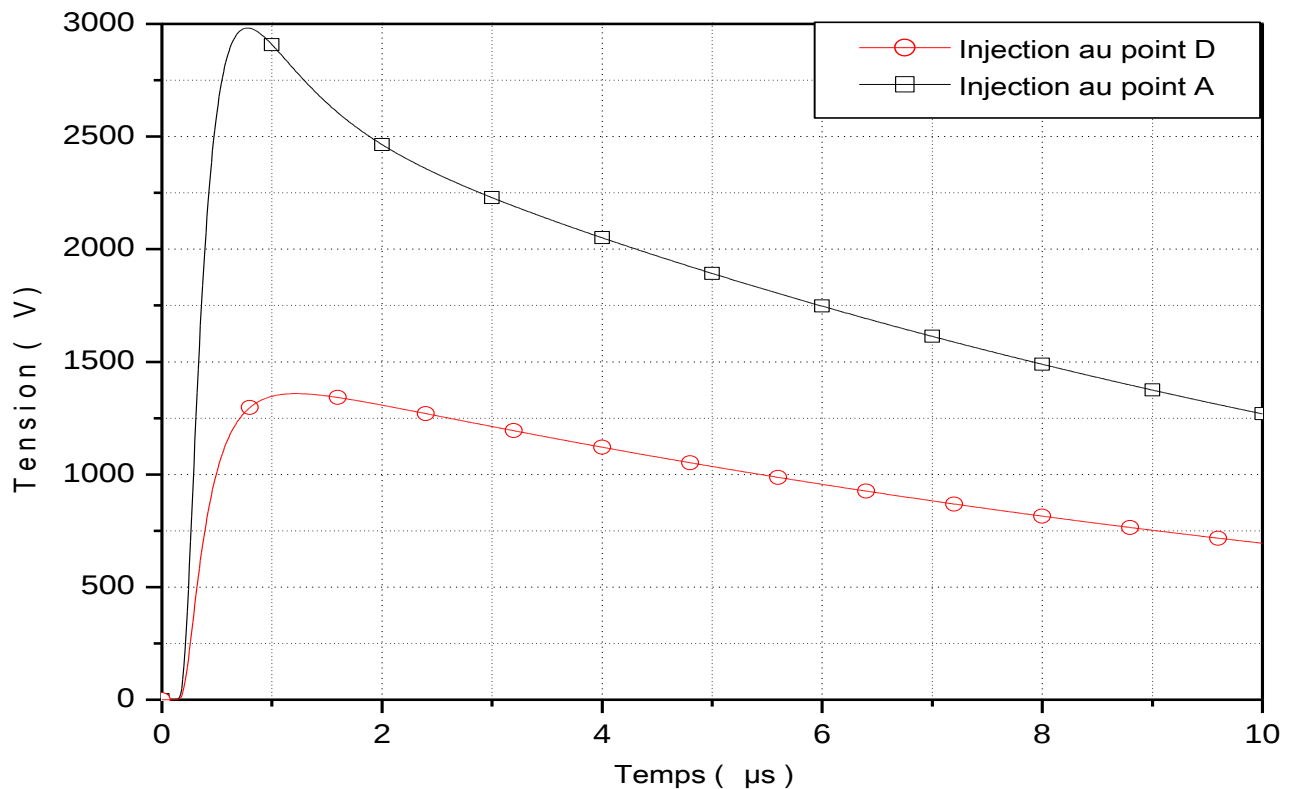


Figure 3.33 Tension pour différents points d'injection.

Pour la même application, on a utilisé le logiciel NEC-4 pour calculer le champ électrique et le champ magnétique dans chaque point le long de profil P_1P_2 dans les deux cas. Les résultats sont présentés dans la figure 3.34.

Les résultats montrés dans les deux figures précédentes illustrent bien l'influence de l'emplacement du point d'injection ; on remarque que les valeurs des pics de champ électrique et le champ magnétique diminue pour la même raison citée précédemment.

3.5.3. Effet de la résistivité

Dans le premier chapitre, nous avons très brièvement donné les modèles de sols pour les calculs des mises à la terre. Les modèles de la terre uniforme et en deux couches de résistivité différent, on a fait l'étude pour voir l'influence de la résistivité à la réponse de système de mise à la terre. On prend la même grille étudiée précédemment (figure 3.22) avec des différentes résistivités de sol ρ 100 $\Omega.m$, 200 $\Omega.m$ et 300 $\Omega.m$.

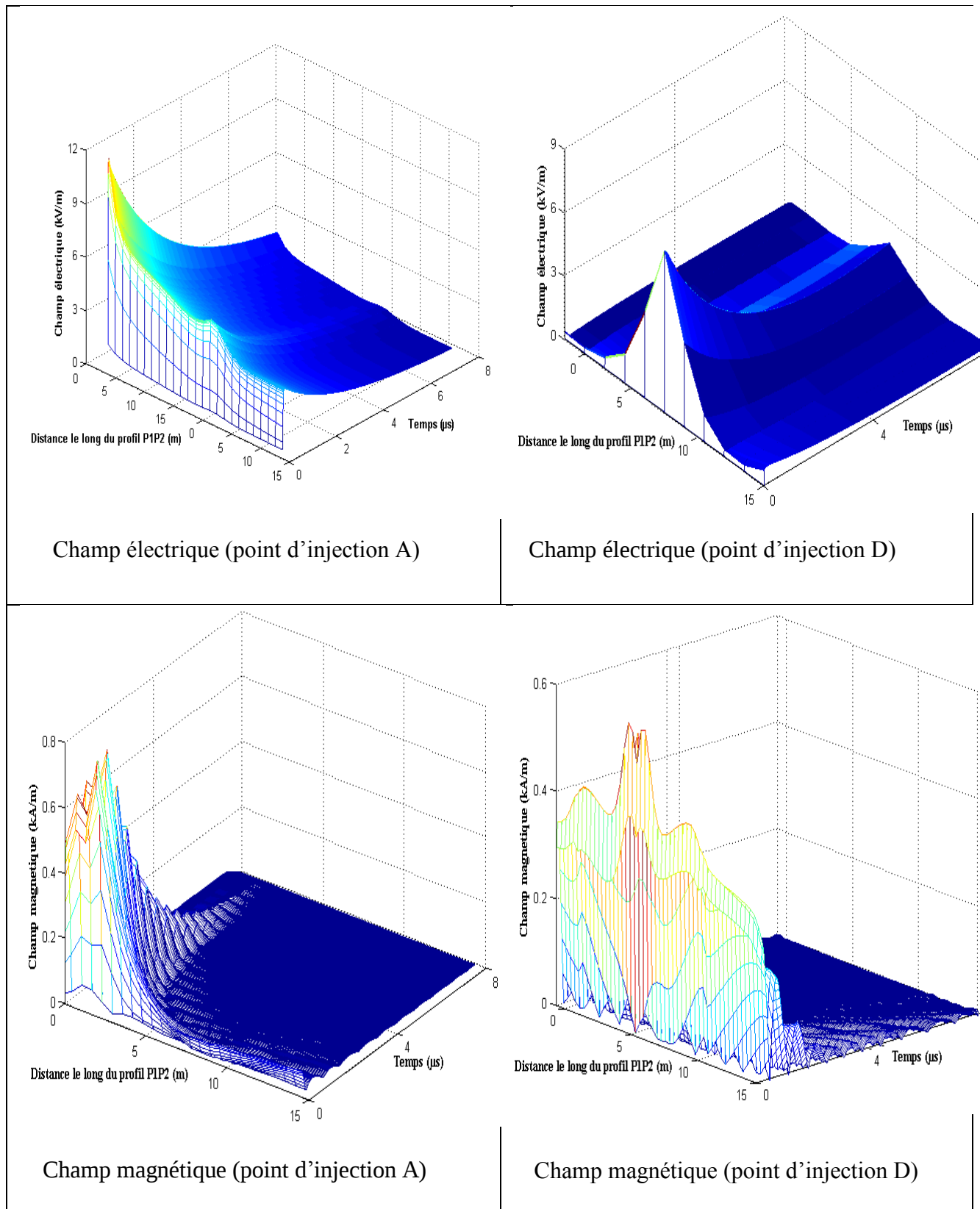


Figure 3.34 Variation de champ électrique et champ magnétique le long du profil P_1P_2 pour deux points d'injection.

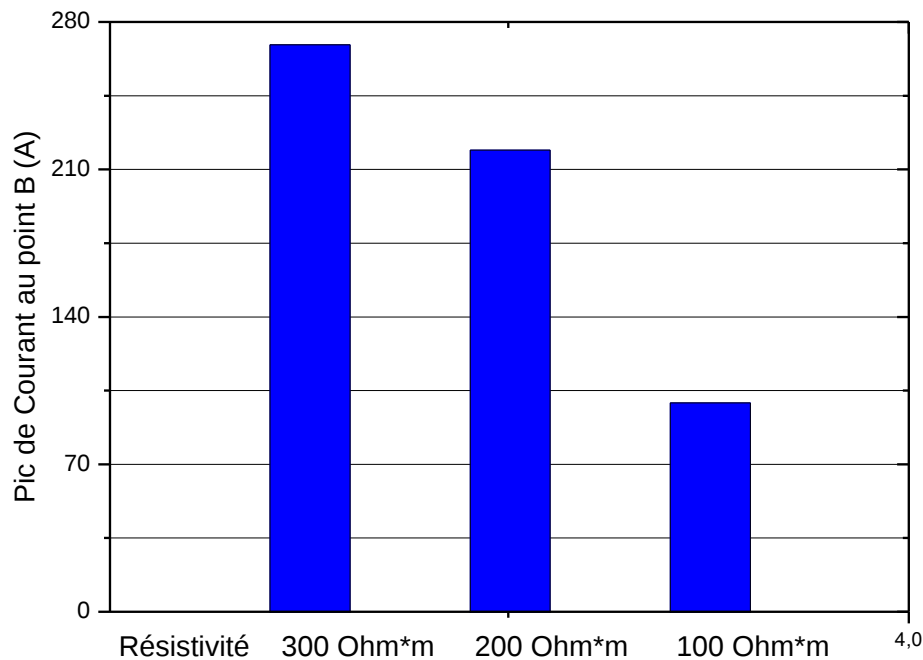


Figure 3.35 *Le pic de courant au point B pour différentes résistivités*

La figure 3.35 montre le pic de courant au point B de la grille pour différentes résistivités. Il augmente avec l'augmentation de résistivité, ce qui montre l'influence importante de cette dernière sur la réponse transitoire de la mise à la terre [53]. Beaucoup de méthodes pour la diminution de cette résistivité ont été exposées dans le premier chapitre.

3.5.4. Effet du temps de montée de l'onde de courant de foudre

La figure 3.36 montre la répartition du potentiel le long du profil AB de la grille présentée précédemment (figure 3.22). Les résultats sont obtenus pour un courant injecté au point A de type foudre et d'amplitude $I_0=2\text{kA}$. Le temps de montée varié entre $0,4$ et $1\mu\text{s}$ à raison de $0,2\mu\text{s}$ alors que le temps de demi-queue a été maintenu constant et égal à $12,5\mu\text{s}$. Le modèle à base de circuits électriques a été utilisé sous environnement EMTP.

Les résultats montrent bien que l'amplitude du potentiel au point d'injection devient de plus en plus importante au fur et à mesure que l'onde de courant injectée est plus rapide. Ce qui peut expliquer l'effet inductif à haute fréquence déjà présenté dans les paragraphes précédents.

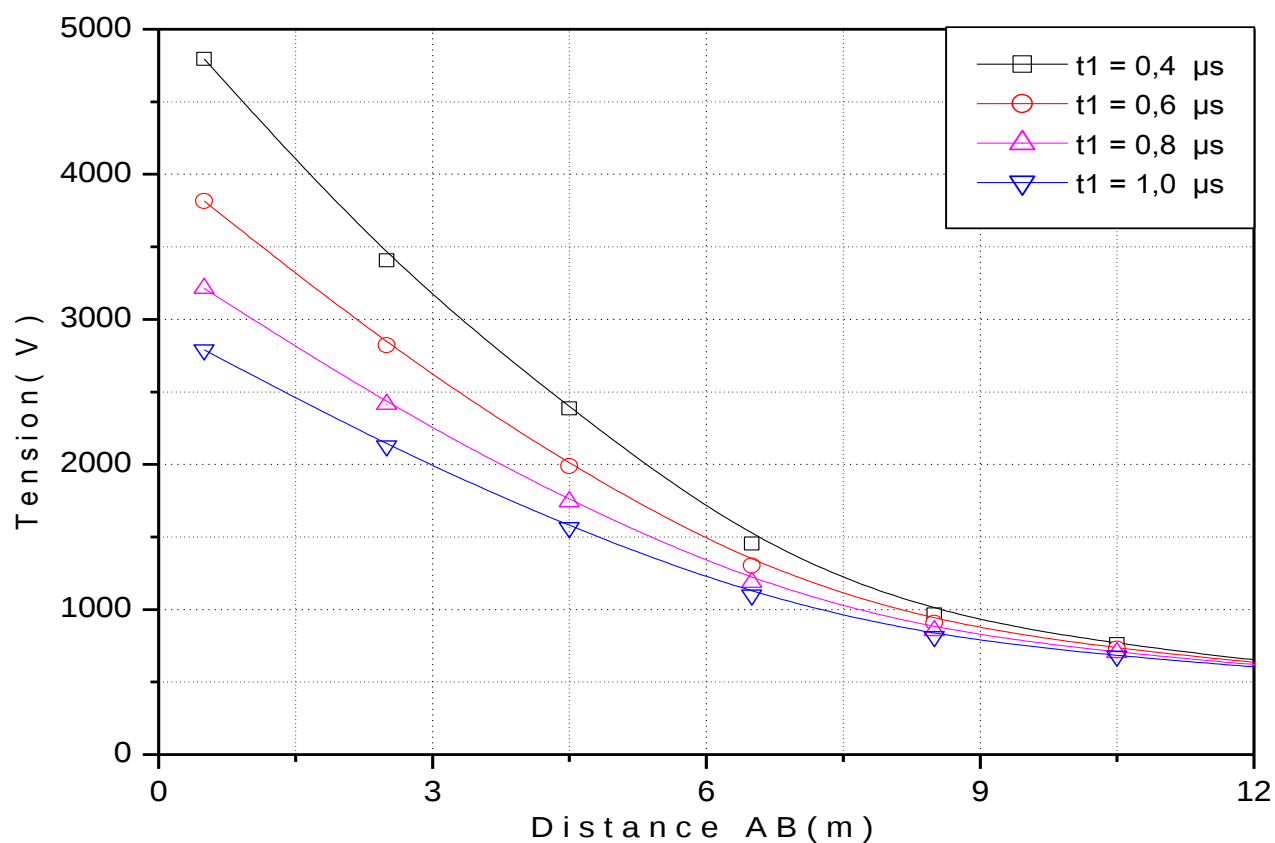


Figure 3.36 Répartition de tension pour des différents temps de montée.

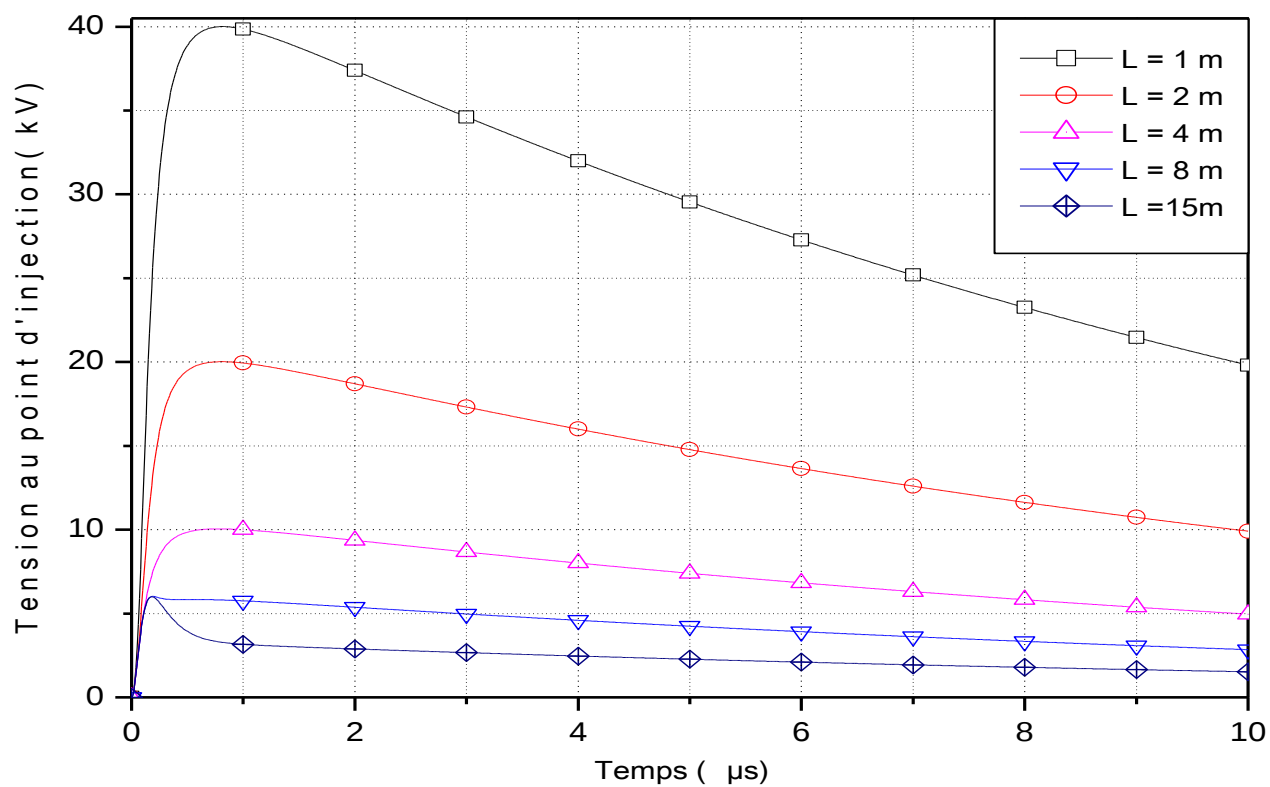


Figure 3.37 Tensions pour différents longueur d'électrode.

3.5.5. Effet de l'Augmentation de la longueur de l'électrode

La figure 3.37 représente les tensions au point d'injection du courant d'une onde de foudre sur des électrodes cylindriques horizontal en cuivre, de rayon $a=12$ mm, des différentes longueurs, enfoncées dans un sol homogène, de résistivité $\rho = 70\Omega.m$ et pour 0.283m longueur de chaque segment, pour un courant injecté I de type foudre comme montre la relation (3.1) d'amplitude $I=2$ kA en utilisant le modèle de circuiterie sous l'EMTP.

Cette figure montre bien l'effet de la longueur d'électrode, la diminution de pic de tension à chaque augmentation de longueur jusqu'à une longueur dite longueur effective (entre 8 et 15 m de longueur).

3.6. Conclusion

L'utilisation de NEC-4 nous a permis d'appliquer le modèle électromagnétique se basant sur la méthode des moments pour la réponse transitoire de système de mise à la terre suite à un courant de foudre.

Une comparaison a été faite entre les résultats obtenus à l'aide de NEC-4 et les résultats obtenus à l'aide de l'ATP-EMTP. La première méthode est basée sur mineurs néglige, par contre la deuxième est contraint par des approximations.

L'étude des effets des différents facteurs sur la réponse des réseaux de terre nous a permis de conclure que la performance impulsionnelle de prises de terre dépend essentiellement de trois facteurs : La géométrie de la mise à la terre, les propriétés électriques du sol et du Courant de foudre (forme d'onde), c'est à dire l'intensité du courant et le temps de montée d'onde et le point d'excitation.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Plusieurs études ont été menées dans ce domaine depuis plusieurs dizaines d'années. Ces recherches ont mis en évidence des méthodes de calcul, pour réduire la complexité, Etant donné que la résistance de la mise à la terre doit être faible et compte tenu des grandes valeurs des résistivités en régions tropicales, les moyens pour réduire cette résistance à moindre coût sont proposés.

La modélisation mathématique de l'impact de la foudre sur les installations des mise à la terre a fait l'objet de plusieurs travaux, dont les plus utilisés sont :

- La modélisation par la théorie des réseaux ;
- La modélisation par la théorie des lignes ;
- La modélisation par la théorie antennes ;
- La modélisation par les éléments finis.

Dans ce mémoire on a exposé un état de l'art dont lequel on a donné une analyse ainsi une synthèse des travaux sur les modélisations des différents mise à la terre.

On a passé en suite à l'étude de la réponse transitoire de mise à la terre. On a utilisé la méthode électromagnétique pour cela on a utilisé le NEC-4 (Numerical Electrmagnetic Code) qui est basé sur la théorie antennes. Pour faciliter l'utilisation du ce dernier, une interface dans l'environnement MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010 à été développée. L'utilisation du formalisme des antennes permet une modélisation plus rigoureuse avec prise en compte des interactions entre les différentes barres. On a utilisé la méthode approche par circuit pour cela on a utilisé EMTP qui basé sur la théorie des lignes, pour le but de comparaison des premiers résultats.

Les résultats obtenus pour ces applications nous ont bien montrés la difficulté de notre problème d'optimisation qui certainement doit intégrer un élément bien important qui est la statistique qui prend en compte :

- L'amplitude de l'onde de courant ;
- Le temps de montée de l'onde de courant ;
- Le point d'impact ;
- La résistivité de sol.

Une perspective intégrant une dose de statistique constituerait un prolongement fort intéressant de cette analyse.

Annexe A1- Calcule analytiques des résistances de terre

A1.1.Introduction

Tagg, Rudenberg, Dwight, Sunde et beaucoup d'autres auteurs [7] ont mis en évidence les méthodes analytiques pour évaluer la résistance de mise à la terre pour différentes configurations d'électrodes. Les relations qui sont données dans les paragraphes qui suivent supposent une résistivité uniforme du sol (sol homogène). En pratique, pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol, on fait souvent l'hypothèse de deux couches de résistivités différentes. Les différentes configurations dépendent de la forme de la prise de terre.

A1.2.Piquet de terre de forme cylindrique et vertical

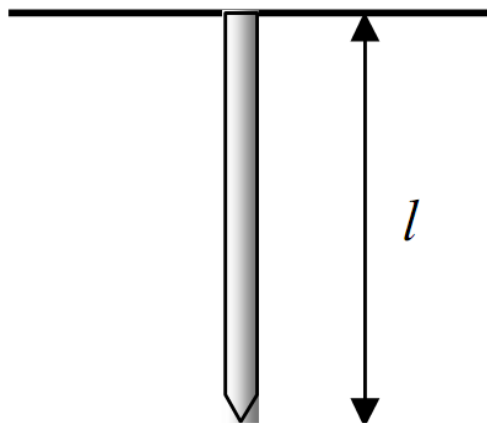


Figure A1.1 *Electrode cylindrique verticale.*

Trois relations ont été développées dans la littérature pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical :

A1.2.1.Relation de Rudenberg

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} \right) \quad (\text{A1.2})$$

Avec ρ la résistivité du sol, l la longueur de l'électrode et d le diamètre de l'électrode.

A1.2.2.Relation de Dwight-Sunde

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (\text{A1.3})$$

A1.2.3.Relation de Liew-Darveniza

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{r+l}{r} \right) \quad (\text{A1.4})$$

r étant le rayon de l'électrode.

Ces relations, bien que différentes, donnent des résultats très proches. La figure A2.2 représente les valeurs des résistances pour les différentes relations de la longueur de l'électrode cylindrique de rayon 0.0125 m, pour un sol homogène de résistivité $100\Omega.m$.

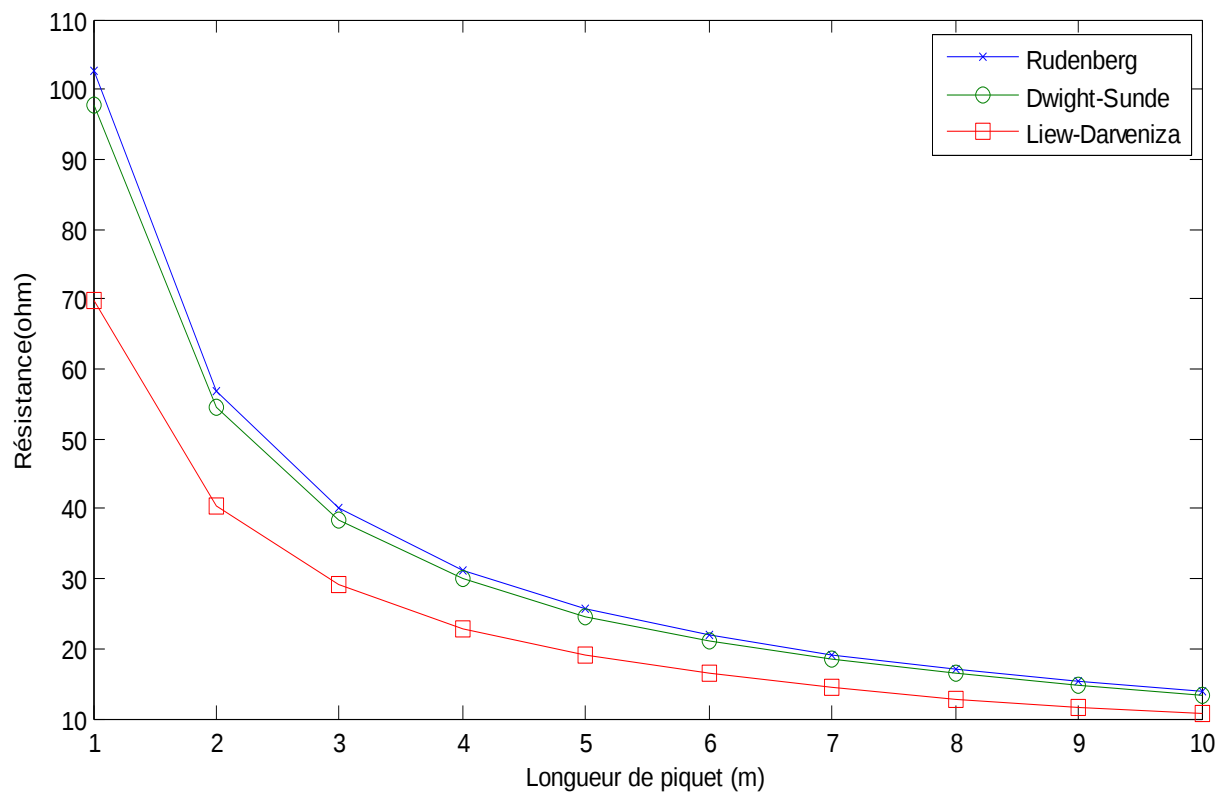


Figure A1.2 La résistance on fonction de longueur pour différents formules

Il est assez important de connaître le rayon équivalent de l'hémisphère qui aurait la même résistance qu'un piquet de terre. C'est le rayon équivalent. Il est donné par la relation :

$$r_{eq} = \frac{\rho}{2\pi R_{piquet}} \quad (A1.5)$$

R_{piquet} est la résistance du piquet

A1.3.L'hémisphère

C'est la forme la plus générale d'une prise de terre. Comme on l'a montré au premier chapitre, dans un sol homogène de résistivité ρ , la résistance d'une prise de terre hémisphérique est donnée par la relation :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_h} \quad (A1.6)$$

Avec r_h le rayon de l'hémisphère.

Toutes les autres configurations se rapportent à un hémisphère équivalent qui donnerait la même résistance que la prise de terre considérée.

A1.4. Câble enterré horizontalement

La résistance d'un câble de longueur L et de rayon r , enterré horizontalement à une profondeur h est donnée par

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (A1.7)$$

Le problème de la détermination de la résistance d'un réseau de terre est extrêmement complexe. A part les méthodes de calculs analytiques et numériques, il est nécessaire dans la pratique d'utiliser des électrodes auxiliaires d'une part pour injecter du courant dans la prise de terre étudiée et d'autre part pour mesurer l'élévation de potentiel de cette dernière.

Pour un conducteur en cuivre de rayon 0.0125 m enterré à 1 m de profondeur, la figure (A1.3) donne la valeur de la résistance de mise à la terre en fonction de sa longueur, pour une résistivité du sol de 100 Ωm .

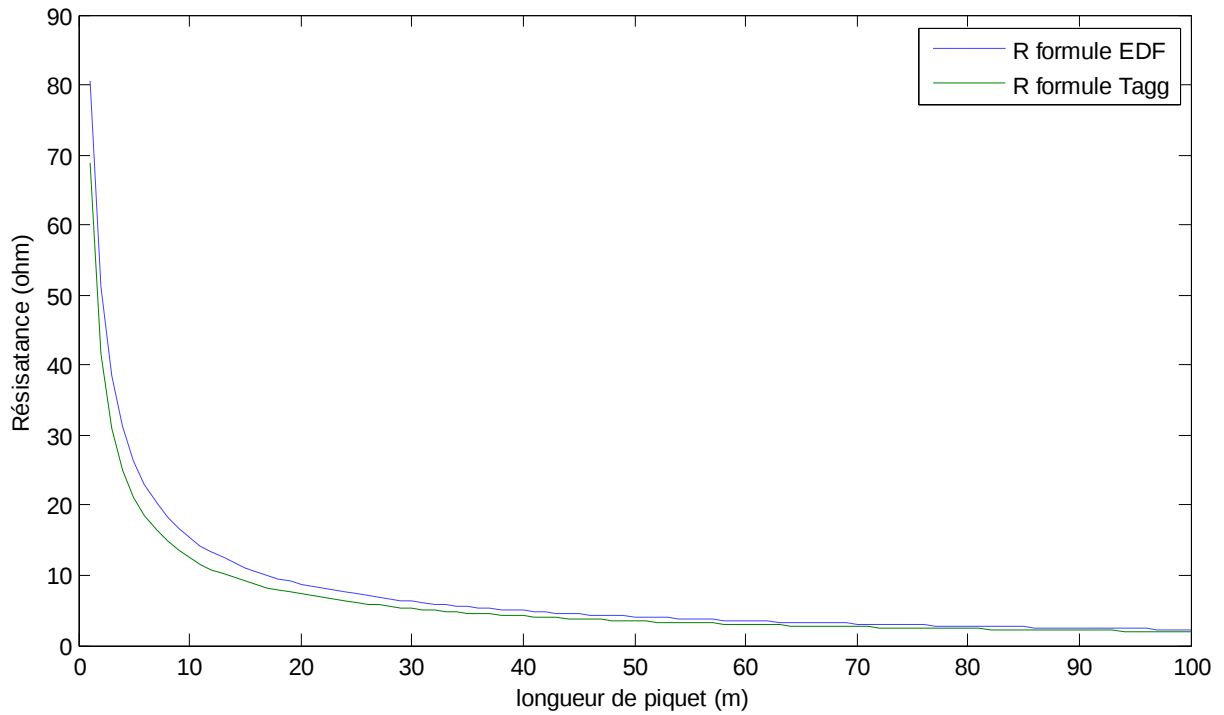


Figure A1.3 Résistance de prise de terre (mesure et calcul)

Si l'on dispose de deux câbles horizontaux en parallèle, écartés d'une distance e ($e \ll L$), la résistance devient.

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (\text{A1.8})$$

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rhe\acute{e}}} - 1 \right) \quad (\text{A1.9})$$

$$\acute{e} = \sqrt{e^2 - 4h^2} \quad (\text{A1.10})$$

A1.5. Electrodes sur la circonférence d'un cercle

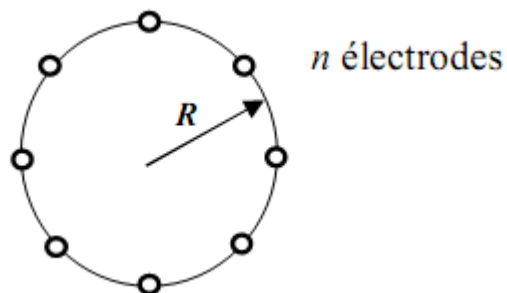


Figure A1.4 Electrodes sur une circonférence.

La résistance équivalente est donnée par la relation :

$$R_N = R \left[\frac{1 + 0.5\alpha + \alpha \sum_{s=1}^{s=\left(\frac{n-1}{2}\right)} \cos\left(\frac{S\pi}{n}\right)}{n} \right] \quad (\text{A1.11})$$

avec $\alpha = \frac{r}{R}$

Dans ce cas, la distance entre deux électrodes est donnée par la relation

$$d = 2R \sin\left(\frac{2\pi}{R}\right) \quad (\text{A1.12})$$

A1.6. Réseau maillé ou grille

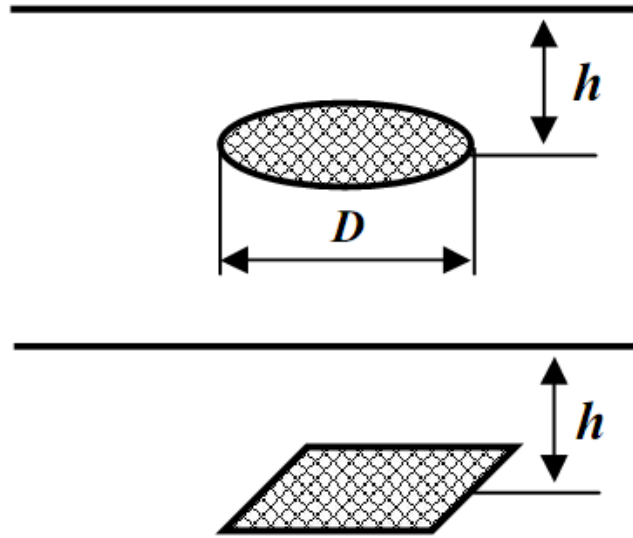


Figure A1.5 Réseau maillé.

$$h \ll D, R = \frac{\rho}{4D} \left(\frac{4h}{D} \right) \quad (\text{A1.13})$$

$$h \gg D, R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi h} \quad (\text{A1.14})$$

Pour évaluer la résistance d'une grille de terre combinée avec des piquets de terre,

Schwartz a utilisé l'équation suivante introduite par Sunde et Rudenberg .

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (A1.15)$$

R_1 est la résistance de conducteurs de la grille ;

R_2 est la résistance des piquets de terre ;

R_m est la résistance mutuelle entre la grille et les piquets de terre.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\hat{a}} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (A1.16)$$

ρ est la résistivité du sol

L_c est la longueur totale de tous les conducteurs de la grille

$\hat{a} = \sqrt{a \cdot 2h}$ si la grille est enterrée à une profondeur h

$\hat{a} = a$ si la grille est sur la surface du sol

a est le rayon des conducteurs de la grille

A est l'aire occupée par les conducteurs

k_1 et k_2 sont des coefficients données.

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n L_c} \left[\ln \left(\frac{4l}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 l}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (A1.17)$$

l est la longueur des piquets

b est le rayon des piquets

n est le nombre de piquets

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{l} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (A1.18)$$

A1.7. Boucle enterrée

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{hr} \quad (\text{A1.19})$$

r est le rayon du conducteur.

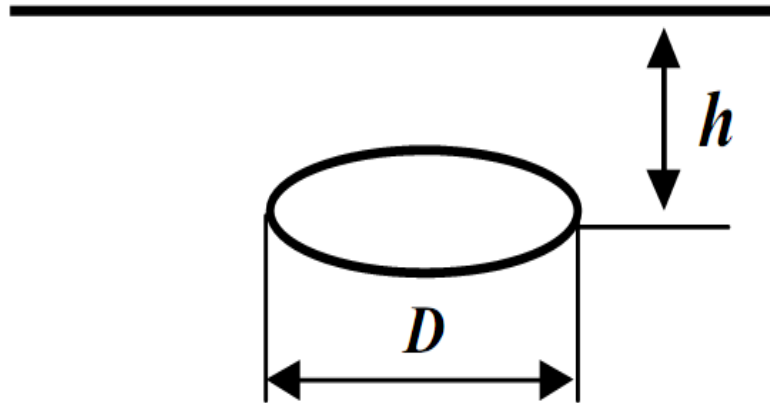


Figure A1.6 *Boucle enterrée.*

Annexe A2- L'essentiel sur le NEC4.

Le NEC est un code développé pour le traitement du rayonnement et du couplage électromagnétique, il est maintenant reconnu et utilisé par les plus grandes instances de recherches dans le monde ; son fondement théorique est celui des antennes qui consiste à résoudre par la méthode numérique dite des moments d'une équation intégrale dans les milieux continus déduite à partir des équations de Maxwell en champ électrique ou en champ magnétique. Pour l'utilisation de ce logiciel, on va donner les indications suivantes :

CE (Text to Document Output) : Une commande qui peut être employée n'importe où pour insérer la documentation.

GW (Straight Wire Specification) : la commande pour spécifier la configuration de la mise à la terre avec les paramètres suivants : ITG 0 XW1 YW1 ZW1 XW2 YW2 ZW2 RAD .

ITG : Nombre des segments d'électrode.

XW1, YW1 et ZW1 : les coordonnées cartésiennes de la première extrémité de l'électrode (en m).

XW2, YW2 et ZW2 : les coordonnées cartésiennes de la deuxième extrémité de l'électrode (en m).

Rad : Rayon d'électrode (en m).

GE (Geometry Input): c'est la géométrie du sol, -1 pour le cas d'électrode enterré dans le sol (notre cas).

GN (Ground Parameters): la commande qui définit les paramètres de la terre qui sont : EPSR SIG

EPSR : Constante diélectrique relative de la terre (en p.u).

SIG : Conductivité de la terre (en siemens).

FR (Set Frequencies): la commande qui spécifie l'analyse en le domaine fréquentiel, ses paramètres sont: IFRQ NFRQ FMHZ DEL

IFRQ : la commande qui détermine le type de progression de fréquence qui est employée, 0 pour la progression linéaire et 1 pour la progression multiplicative.

NFRQ : Nombre de pas de progression.

FMHZ : Fréquence initial (en MHz).

DEL : L'incrément de progression de fréquence(en MHz).

EX (Excitation Structure) : la commande qui définit les paramètres d'excitation qui sont : I1 EX F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7

I1 : Détermine le type d'excitation employée, pour le cas de source de courant I1=4.

F1-F3 : Les coordonnées d'excitation

F4 : L'angle α (degrés) entre le plan de xy et le courant (figure A2.1).

F5 : L'angle β (degrés) entre l'axe de x et la projection de courant sur plan de xy (figure A2.1).

F6 : Moment de courant de la source (A.m).

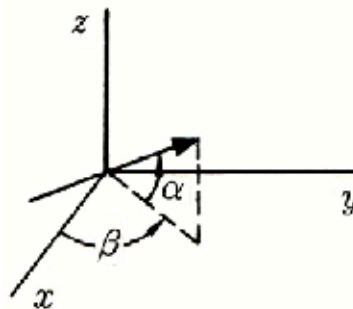


Figure A2.1 Orientation de la source d'élément courant.

NE (Near Electric Field) et **NH** (Near Magnetic Field) : Les commandes pour le calcul de champ électrique et le champ magnétique respectivement, les paramètres à spécifier sont : NEAR NRX NRY NRZ XNR YNR ZNR DXNR DYNR DZNR

NEAR : Type de localisation des d'évaluation, 0 pour le cas des coordonnées cartésiennes et 1 pour le cas des coordonnées sphériques.

NRX, NRY et NRZ : Les nombre des points dans la direction x, y et z respectivement.

XNR, YBR et ZNR : Les cordonnées initial en mètre (en mètres).

DXNR, DYNR et DZNR : Incrémentations sur les trois axes x, y et z (en mètres).

XQ (Executer): La commande de lancement d'exécution.

En (End of Run): La commande de fin d'exécution

Références Bibliographiques

- [1] J.A.Güemes, F.E.Hernando, " Method for Calculating the Ground Resistance of Grounding Grids Using FEM, " *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.19, No.2, pp 595-600, Avril 2004.
- [2] Henryk Markiewicz , Dr Antoni Klajn, " Mise à La Terre – Bases de Calcul et De Conception , " *Guide Power Quality Section 6: Cem et Mise à La Terre* www.leonardo-energy.org/France, Edition Août 2007.
- [3] Tony Mitton , Robin Watson, " Practical Testing of Grounding Systems by Current Injection", Mitton Consulting Ltd Christchurch ,New Zealand, Mai 2005.
- [4] J. Nzuru Nsekere, " Contribution à L'analyse et à La Réalisation des Mises à La Terre des Installations Electriques dans Les Régions Tropicales, " thèse de doctorat, Université de Liège Faculté des sciences appliquées, Février 2009.
- [5] Yaqing Liu, " Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments, " thèse de doctorat , université de uppsala ,2004.
- [6] Elvis R. Sverko, " Ground-Measuring Techniques: Electrode Resistance to Remote Earth & Soil Resistivity, " ERICO, Inc. Facility Electrical Protection, February 1999.
- [7] Electricité de France, " Principes de conception et de réalisation des mises à la terre, " EDF NI 115, Direction des études et recherches, 1984.
- [8] IEEE Standard 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, " *IEEE Power Engineering Society*, No.8, Decembre 1991.
- [9] G.F.Tagg, B.Sc, Ph.D, M.I.E.F, F.Inst.P, " Earth Resistances, " Tower House,Southampton Street, London W.C.2 ,1964.
- [10] Ahmed Mghairbi , " Caractrisation of Transmission Line Earthing System , " these de master ,Electrical and Electronic Division Universitie de Wales,2003.
- [11] IEEE Standard, " IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement, " *IEEE Power Engineering Society*, pp. 118-1978.1992.
- [12] C. Korasli, " Ground Resistance Measurement with Alternative the Fall-of-Potential Method, " *IEEE Power Engineering Society*, pp. 1657-1661, 2005
- [13] C. Korasli, " Ground Resistance Measurement Fall-of-Potential Method Using Capacitive Test Probes, " *IEEE Power Engineering Society*,2006.
- [14] Kazuo Murakawa ,Hiroshi Yamane, " Earthing Resistance Measurement Technique without Using Auxiliary Electrodes, " *IEEE Power Engineering Society*, pp 213-216, 2003.
- [15] B. Nekhoul, P. Labie, F. X. Zgainski and G. Meunier, " Calculating the Impedance of a Grounding System," *IEEE Power Engineering Society*, Vol 32, No3,pp 1509-1512, Mai 1996.
- [16] L.Grcev, " Impulse Efficiency of Ground Electrode, " *IEEE Power Engineering Society*, Vol.24, No.1, Janvier 2009.
- [17] G.Vijayaraghavan, Mark Brown, Malcolm Barnes,"Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection, " Elsevier, 2004.
- [18] QingboMeng,Jinliang He F. P. Dawalibi, " A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions, " *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3,pp 911-916, , Juillet 1999.

-
- [19] Jinliang. He, Gang Yu, Jingping Yuan, " Decreasing Grounding Resistance of Substation by Deep-Ground-Well Method, " *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp 738-744, Avril 2005.
 - [20] B.R. Gupta, B.Thapar, "Impulse Impedance of Grounding Grid, " *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol PAS-99 No.6, Nov/Dec 1980.
 - [21] A.Meliopoulos ,M Mohram, " Transient Analysis of Grounding Systems , " *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol PAS-102 No.2, pp.389-399, 1983.
 - [22] A.D. Papalexopoulos et A.P.Meliopulos , " Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol 2, pp.1073-1081, Octobre.1987.
 - [23] M.Ramamoory, M.M.Babu Narayanan, S.Parameswaran , " Transient Performance of Grounding Grids, " *IEEE Trans Power Delivry* , Vol.4, pp.2053-2059, October 1989.
 - [24] L.V. Bewely, "Travelling wave in transmission systems", New York: John Wiley and Sons, Inc., pp.211-212, 1951.
 - [25] P.L.Belaschi , "Impulse and 60-cycle Characteristics of Driven ground, Part III Effect of Lead in Ground Installation, " *AIEE Trans*, Vol.62, pp.334-345, 1943.
 - [26] E. D. Sunde, "Earth conduction effects in transmission systems ", 1949 by Bell Telephone Laboratories, Incorporated.
 - [27] A.Geri, " Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: The Model and Its Validation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp.1008-1017, Juillet 1999.
 - [28] A. F. Otero, J. L. del Alarno, "Frequency-Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, Juillet 1999.
 - [29] Grcev L., Dawalibi F, "An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems, " *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No4, pp. 1773-1781, November 1990.
 - [30] B. Nekhoul, C. Guerin, P. Labie, G. Meunier and R. Feuillet, " A Finite Element Method for Calculating the Electromagnetic Fields Generated by Substation Grounding Systems , " *IEEE Transactions On Magnetics*. Vol 31., No 3., Mai 1995.
 - [31] X. Brunotte, G. Meunier and JF Imhoff, " Finite Element Solution of Undounded Problems Using Transformation: a Rigorous Powerful and Easy Solution, " *IEEE Transactions On Magnetics*. Vol. 25, No. 2 , pp. 1663- 1666, Mars 1992.
 - [32] F. Dawalibi, " Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors, Part I- Single Conductor, " *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, No. 4 , p. 105-111, 1986.
 - [33] R. Andolfato, L.Bernardi and L.Fellin, "Aerial and Grounding System Analysis by the Shifting Complex Images Method", *IEEE Trans. Power Delivrey*, Vol. 15, No. 3, pp. 1001-1009, July 2000.
 - [34] R. Verma and D. Mukhedkar, "Impulse to Impedance of Buried Ground Wires," vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003-2007, Septembre 1980.
 - [35] G. Cell, F.Pilo, "A Distributed Parameter Model for Grounding Systems in the PSCAD/EMTDC Environment, " *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp1650-1655, 2003.
 - [36] Basma Harrat, " Caractérisation et Optimisation Numérique d'Une Mise a La Terre, " thèse de doctorat, département de génie électrique Jijel, 1998.
 - [37] R.W.AdamsK, K.HazardE.K.Miller , " NEC Users Manual, " partI.1988.
 - [38] R.F.Harrigton, "Field Computation by Moment Methods," Macmillan, New York, 1993.
 - [39] M. Chouki , H. Harrat , B. Nekhoul , F. Hafsaoui , K. Kerroum et K. El Khamlichi Drissi , "Optimisation Numérique du Rôle d'Un Couplage de Deux Electrodes de Mise à La Terre, " 1 Conférence Nationale sur la Compatibilité électromagnétique ,Tiaret, 22-24 novembre 2009.
-

- [40] Xavier Legrand, " Modélisation des Systèmes de Mise a La Terre des Lignes Electrique Soumis des Transitoires de Foudre, " thèse de doctorat, L'école doctorale de Lyon, 2007.
- [41] Menterand F., Grcev L, "EMTP-Based Model for Grounding System Analysis, " *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, pp. 1838-1849, October 1994.
- [42] F.Hiedler, Z.Flisowski,, " Parameters of Lightnig Current Given in IEC 62305 Background, Experience and Outlook, " *29th Internationam Conference on Lightning Protection* 23-26 Juin 2008.Sweden.
- [43] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning ashes," *Electra*, no. 41, pp. 23–37, 1975.
- [44] R.G.Olsen and M.C.Willis, "A Comparison of Exact and Quasistatic Methods for Evaluating Grounding Systems at High Frequencies," *IEEE Trans Power Delivery*, vol.11, pp.1071–1081, Avril1996.
- [45] Vittorio. C, Antonino M,Antonella R, "New Circuital Models of Grounding Systems and PDS for EMI Analysis During a Lightning Strike, " *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp1726-1731, 2005.
- [46] S. Bourg, B. Sacepe,T. Debu, "Deep Earth Electrodes In Highly Resistive Ground : Frequency Behaviour, " *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility* , pp 584-589.1995.
- [47] R.Velazquez,D.Mukhedkar, " Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior," *IEEE on Transactions Power* ,Vol..103, no.6, pp 1314-1322, Juin 1984
- [48] Jorge R,Simon D,Baudilio V et Miquel M, " Models of Grounding Systems Under Lightning Discharges Simple Electrode Configurations, " 2000.
- [49] L.Grcev, " Impulse Efficiency of Simple Grounding Electrode Arrangements, " *18th Int.Zurich Symp.Electromagn Compat*, pp.325-328, 2007.
- [50] L.Grcev, " Grounding Systems Modeling for High Frequencies and Transients: Some Fundamental Considerations, " *IEEE Bologna PowerTech Conference*, Italy, 2003.
- [51] Rachidi, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, C. A. Nucci, S. Guerrieri, B. Kordi, and J.-S. Chang, "Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 43, no. 3, pp. 356–367, Aug.2001.
- [52] Yaquin Liu, M. Zitnik, R. Thottappillil, "An Improved Transmission Line Model of Grounding System" *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 43, No. 3, Aout 2001.
- [53] I.Gonos,F.Topalis ,I.Stathopulos , " Influence of The Soil Non-uniformity to The Potential Distribution Around a Driven Rod,"High Voltage Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering.2000.

ملخص:

تهتم هذه المذكرة بدراسة نمذجة أنظمة الربط بالأرض، هذه الأخيرة يتم استخدامها لحماية المنشآت والمعدات الكهربائية ضد التوترات العالية. الأساليب المستخدمة للنمذجة متعددة، لذلك قمنا بتحليل وتجميع هذه الأساليب. في هذه المذكرة تم استخدام النظرية الكهرومغناطيسية باستعمال برنامج NEC-4 الذي يركز على نظرية الهوائي لتسهيل استخدام هذا الأخير قمنا ببرمجة واجهة باستعمال برنامج MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010. للتحقق من النتائج، قمنا باستخدام نظرية الدارة المقاربة باستعمال برنامج ATP-EMTP الذي يركز على نظرية *théorie des lignes*. أخيراً، قمنا بدراسة العوامل المختلفة التي تؤثر على أداء الاستجابة للشبكات الأرضية.

كلمات مفتاحية : أنظمة الأرضية، النمذجة، NEC-4، ATP-EMTP

Résumé :

Ce mémoire est consacré à l'étude et la modélisation des systèmes de mise à la terre. Ces derniers sont utilisés pour la protection des installations et des équipements électriques contre les surtensions. Les méthodes utilisées pour la modélisation sont multiples pour cela, une analyse et une synthèse de ces méthodes a été faite. Dans ce mémoire On a utilisé la méthode électromagnétique à partir de logiciel NEC-4 (Numerical Electromagnetic Code) qui est basé sur la théorie des antennes. Pour faciliter l'utilisation du NEC-4, une interface dans l'environnement MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010 a été développée. On a utilisé la méthode approche par circuit à partir de ATP-EMTP qui est basé sur la théorie des lignes pour le but de vérifier les premiers résultats. A la fin on a étudié les différents facteurs qui influent sur la réponse des systèmes de terre pour évaluer la performance impulsionnelle.

Mots Clés : system de terre, modélisation, NEC-4, ATP-EMTP

Abstract

This thesis is for the study and the modeling of grounding systems. These systems are used to protect the electrical installations and equipments against the overvoltage. Many methods are used in the literature, an analysis and a synthesis of these methods was given. In this memory, the electromagnetic method was used through NEC-4 (Numerical Electromagnetic Code) which is based on antenna's theory. To facilitate the use of NEC-4, a graphical interface has been developed using Microsoft Visual Studio 2010. The circuit approach method was used through ATP-EMTP which is based on lines' theory to verify the results. A various factors influencing grounding systems response was investigated to evaluate the impulsionnel performance,

Key Words: grounding system, modeling, NEC-4, ATP-EMTP...