

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique



Projet de Fin d'Etude en vue de l'obtention
du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

Intitulé

**Comportement des systèmes de mise à la terre en
fonction de divers paramètres électrogéométriques**

Effectué par :

- BOUCHENAK Hocine
- CHEBBATA Adel

Encadré par :

Pr M.Teguar

Promotion 2013

Remerciement

Nous remercions Dieu de nous avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

Nous tenons à remercier en premier lieu, Mr Teguar Madjid, notre promoteur, qui a été d'une grande aide pour que nous puissions finaliser ce travail. Il a toujours veillé à ce que nous effectuons un bon travail digne d'être une référence bibliographique pour l'avenir. Que ce monsieur, Teguar Madjid, soit remercié pour sa totale disponibilité, ses conseils, son suivi constant et surtout sa confiance envers nos capacités.

Nous remercions également notre co-promoteur Mr. Alík Benamrane qui n'a jamais hésité de nous donner les conseils et de nous orienter et a toujours répondu présent pour résoudre les problèmes que nous avons rencontrés durant ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants Mrs Mekhaldi Abdelouahab, Boubakeur Ahmed ainsi que tous ceux qui nous ont, de près ou de loin, soutenue et orienté durant notre carrière d'étudiant.

Enfin, nous ne pouvons pas oublier nos proches, et surtout nos parents pour tout ce qu'ils ont fait pour nous soutenir, nous encourager, financier nos études et nous donner tout leur soutien durant notre cursus universitaire.

Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, trouvent ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

:

يتلخص في تحليل تغيرات الممانعة الكهربائية لنظامين تأريضيين وهي متوازية قضيب . هندسية (المسافة بينهما) كهربائية (مقاومية سماحية) . هذا FEMM 4.2 . و لكل شكل نقترح دائرة كهربائية موافقة و مقارنة ممانعتها مع الممانعة المستخرجة FEMM 4.2 . بمجرد التحقق من موافقة هذه الدارة، يتم استخدام التي تم الحصول عليها الكهربائي الناتج عن التعرض لتيار كهربائي . المفتاحية : نظام تأريض قضيب أرضي مقاومة الأرض سماحية الأرض.

Résumé:

Notre travail consiste à analyser la variation de l'impédance électrique de deux systèmes de mise à la terre, à savoir trois tiges en parallèle, et une seule tige verticale. Divers paramètres géométriques (le rayon et la longueur des tiges ainsi que la distance entre elles) et électriques (la résistivité et la permittivité du sol) ont été considérés. Pour cela, le code de calcul FEMM 4.2 a été utilisé. Pour chaque configuration, un circuit électrique équivalent est proposé dont les valeurs de son impédance sont comparées à celles trouvées en se basant sur le code de calcul susmentionné. Une fois validé, le circuit obtenu est utilisé pour reproduire l'onde de la tension de sortie suite à un choc de courant de foudre normalisée.

Mots clés : système de mise à la terre, impédance, tige de terre, fréquence, résistivité du sol, permittivité du sol.

Abstract:

Our work consists in analyzing the variation of the electrical impedance of two systems of earthing, namely three parallel rods, and a single vertical rod. Various geometric parameters (length and radius of the rods as well as the distance between them) and electrical ones (resistivity and permittivity of the soil) have been considered. For this purpose, FEMM 4.2 computing code has been used. For each configuration, an equivalent circuit is proposed whose impedance values are compared to those found using the previous code. Once validated, the obtained circuit is used to reproduce the wavelength of the output voltage due to a normalized current lightning stroke.

Key words : earthing system, impedance, earthing rod, frequency, soil resistivity, soil permittivity.

REMERCIEMENT	i
RESUME	ii
Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les systèmes de mise à la terre	
I.1. Introduction	6
I.2. Définitions	6
I.2.1. Mise à la terre.....	6
I.2.2 Prise de terre	5
I.2.2.1 Prise de terre "profonde"	7
I.2.2.2 Prise de terre de "surface"	7
I.2.3.Éléments d'une mise à la terre.....	7
I.2.4.Masse	7
I.2.5. Conducteur de terre	6
I.2.6.Réseau de terre.....	8
I.3. Adéquation de performance	8
I.3.1. Critères de conception d'une électrode de mise à la terre.....	8
I.3.2. Adéquation de fiabilité	8
I.3.3.Adéquation des effets sur l'environnement.....	9
I.4. Conduction du courant électrique dans le sol	9
I.5. Caractéristiques électriques du sol	10
I.5.1. Résistivité	10
I.5.2. Permittivité.....	13
I.5.3. Perméabilité.....	14
I.6. Matériaux utilisées pour la construction des systèmes de mise à la terre	14
I.7. Régime de neutre et schémas de liaison à la terre en basse tension	16
I.7.1. Schémas de liaison	16
I.7.2. Domaines d'utilisation des régimes de neutre	18
I.8. Régimes de neutre utilisés en haute tension	18

I.8.1. Mise à la terre par neutre isolé	18
I.8.2. Mise à la terre directe	19
I.8.3. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance	19
I.8.4. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance	19
a) Réactance accordée (bobine de Petersen)	19
b) Réactance de limitation	19
I.9 la foudre	20
I.9.1 Bases physiques	20
I.9.2 Courant de foudre	21
I.10. Conclusion	23

Chapitre II Détermination de la résistivité et de la résistance de terre

II.1. Introduction	25
II.2. Réseau de terre	25
II.3. Rôle des systèmes de mise à la terre	25
II.4. Résistance et résistivité de la terre.....	26
II.5. Propriétés électriques d'une prise de terre.....	27
II.6. Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre	27
II.7. Résistance d'une électrode hémisphérique	28
II.8. Evaluation de la résistivité du sol.....	39
II.9. Modélisation de la résistivité des sols	30
II.9.1. Sol homogène	30
II.9.2. Sol en deux couches de résistivités différentes	31
II.9.3. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes	31
II.10. Détermination de la résistance de quelques configurations de mise à la terre	32
II.10. 1 Sol homogène :.....	32
II.10. 1.1 L'hémisphère.....	32
II.10.1.2 Piquet de terre de forme cylindrique et vertical	33
II.10.1.3 Electrodes en ligne droite	34

II.10.1.4 Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral.....	35
II.10.1.5 Electrodes sur les côtés d'un carré.....	35
II.10.1.6. Câble enterré horizontalement	36
II.10.1.7. Plusieurs (n) câbles rayonnant de longueur l , enfouis à la même profondeur h ..	37
II.10.1.8. Réseau maillé ou grille.....	37
II.10.1.9. Boucle enterrée	37
II.10.2. Sol non homogène.....	38
II.10.2 1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches	38
II.10. 2.2. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches	39
II.11. Principales méthodes de mesure de la résistivité de sol	40
II.11.1. Méthode de Wenner.....	40
II.11.2. Méthode de Schlumberger.....	41
II.11.3. Méthodes de mesure à 3 pôles.....	42
II.11.4. Mesures sans piquets de terre.....	43
II. 12. Conclusion.....	44
Chapitre III simulation et modélisation d'un système de terre de trois tiges parallèles	
III.1. Introduction	46
III.2. Présentation du logiciel FEMM :.....	46
III.3. Etude de l'impédance pour un système de trois tiges	47
III.3.1. Basses Fréquence	48
III.3.2. Hautes fréquences	49
III.3.3. Variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes permittivités	54
III.4. Limites du FEMM 4.2	55
III.5. Circuit électrique équivalent	56
III.6. Choc de foudre	59
III.6.1. Choc de foudre généralisé	59
III.6.2. Onde de foudre	60

III.6.3. La tension de sortie du circuit soumis à une onde de courant de foudre.....	62
III.7. Conclusion	66
Chapitre IV effet des paramètres géométriques liés aux trois tiges de terre parallèles	
IV.1. Introduction	68
IV.2. Présentation du système	68
IV.3. Variation du rayon de l'électrode:.....	69
IV.3.1. Impédance en fonction de la fréquence	69
IV.3.2. Impédance en fonction du rayon :.....	70
IV.3.3. Circuit électrique équivalent :.....	71
A. Etude des paramètres du circuit :.....	71
B. Validation du circuit électrique équivalent :.....	73
C. Comportement du circuit électrique équivalent suite à un choc de foudre :.....	73
IV.4. Effet de la longueur des tiges :.....	75
IV.4.1. Impédance en fonction de la fréquence :.....	75
IV.4.2. Impédance en fonction de la longueur des tiges :.....	76
IV.4.3. Circuit électrique équivalent :.....	77
IV.5. Effet de la distance inter-tiges :.....	80
IV.5.1. Impédance en fonction de la fréquence	80
IV.5.2. Impédance en fonction de la distance.....	82
IV.5.3. Circuit électrique équivalent	82
IV.6. Conclusion	87
Chapitre V Effet des caractéristiques électriques du sol sur la tige de terre	
V.1. Introduction	89
V.2. Résistivité et nature du sol :.....	89
V.3. Sol homogène :.....	90
V.3.1. Impédance en fonction de la fréquence :.....	91
V.3.2. Circuit équivalent et choc de foudre :.....	93
V.4. Sol hétérogène à deux couches :.....	97

V.4.1. Tige se situe dans la couche supérieure :.....	97
V.4.1.1 : Impédance en fonction de la fréquence :.....	98
V.4.1.2. Circuit équivalent et choc de foudre :.....	103
V.4.2. Tige pénétrant dans la couche inférieure :.....	109
V.4.2.1. Impédance en fonction de la fréquence :.....	109
V.4.2.2. Circuit équivalent et choc de foudre :.....	114
V.5. Comparaison entre la configuration d'une tige verticale dans un sol homogène et dans un sol hétérogène à deux couches	118
V.5.1. Tige située dans la couche supérieure.....	118
V.5.1.1. Impédance en fonction de la fréquence	118
V.5.1.2 : Variation temporelle de la tension de sortie	122
V.5.2. Tige traversant les deux couches	125
V.5.2.1. Impédance en fonction de la fréquence	125
V.5.2.2. Variation temporelle de la tension de sortie.....	129
V.6. Conclusion	132
Conclusion générale	133

Introduction générale

Introduction générale

Le courant de défaut cherche à s'écouler dans le sol à travers le système de mise à la terre lors d'un défaut à la terre d'un ouvrage énergétique ou sur une ligne de transmission de l'énergie électriques. En général, de tels défauts sont dus aux courts-circuits causés souvent par la foudre, la pluie ou les surtensions créées lors de l'ouverture et la fermeture des disjoncteurs [Georges, 2001]. Les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes en cas de défauts [Nzuru, 2009]. La conception des systèmes de mise à la terre de bonne qualité, dont les caractéristiques sont conservées dans le temps, s'avère indispensable pour protéger les biens et améliorer la qualité du service.

De tels systèmes de terre, ont pour rôles de protéger ou réduire le risque de détérioration du matériel en cas de foudre ou de courant de défaut, de protéger les personnes contre les éventuels défauts d'isolement des équipements sous tension et d'éviter les risques d'électrocution, d'améliorer la qualité du service et de limiter les surtensions nuisibles aux appareils avoisinants.

Etant donné l'importance de système de terre, plusieurs études ont été effectuées afin de prévoir le comportement de tels systèmes sous différentes charges rencontrées, lors d'un défaut du réseau électrique [Nzuru, 2009 et all]. Un tel comportement repose sur les propriétés du sol, la forme géométrique des électrodes de terre et le nombre d'électrodes connectées. Les propriétés électriques du sol sont caractérisées par la résistivité et la permittivité de la terre, qui dépendent du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité.

Le travail, que nous avons entrepris, porte sur l'étude du comportement des systèmes de mise à la terre. Dans cette intension, nous avons étudié le comportement de l'impédance de tels systèmes sous divers paramètres électrogéométriques. Les paramètres géométriques sont liés aux systèmes de terre, à savoir le rayon et la longueur des tiges ainsi que la distance entre elles. Les paramètres électriques concernent la résistivité et la permittivité de sol et la fréquence de l'onde courant à évacuer à la terre.

Les systèmes de mise à la terre que nous avons étudiés sont : trois tiges en parallèle et une seule tige verticale. Deux procédures ont été suivies lors de la détermination des impédances équivalentes correspondantes en fonction des paramètres électrogéométriques susmentionnés. Nous avons utilisé, en premier lieu, le code de calcul FEMM dans sa version 4.2. Nous proposons par la suite, pour chaque configuration, un circuit électrique équivalent adéquat. L'impédance relative à ce circuit est comparée à celle obtenue en utilisant le FEMM 4.2. Une fois validé, le

circuit obtenu est utilisé pour reproduire l'onde de la tension de sortie suite à un choc de courant de foudre normalisée (1,2/50 μ s).

Ainsi notre manuscrit s'articule sur cinq chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, nous citons quelques définitions de base concernant la mise à la terre. En outre, les différents types de régime du neutre et de schémas de liaisons à la terre, ainsi que les critères de conception d'une électrode y sont présentés. Nous y trouvons également, les différents matériaux utilisées pour la construction des systèmes de mise à la terre. Nous terminons ce chapitre, par la présentation du phénomène de foudre.

Dans le deuxième chapitre, nous citons les propriétés électriques d'une prise de terre ainsi que la répartition de potentiel autour d'un tel réseau de terre. Nous précisons quelques formes utilisées pour de tels les systèmes ainsi que leurs relations analytiques permettant de calculer les leurs résistances dans le cas de sols homogène et hétérogène. Les principales méthodes de mesure de la résistivité du sol y sont finalement présentées.

Le troisième chapitre porte sur l'étude d'un système de mise à la terre ayant la configuration de 3 tiges en parallèle, placé dans un sol homogène. Nous nous intéressons à analyser la variation de l'impédance de ce système en fonction de la fréquence, pour différentes caractéristiques électriques du sol. Une telle analyse nous permettra de proposer un circuit électrique équivalent pour la modélisation d'un système de terre. Pour cela, nous utilisons le logiciel FEMM 4.2. Nous vérifions la validité de ce dernier en confrontant, dans les mêmes conditions, ses résultats à ceux trouvés par les relations analytiques conventionnelles rapportées dans la littérature. Enfin, nous étudions le comportement d'un tel système, via son circuit électrique équivalent adéquat, face un choc de foudre. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la détermination de la tension de sortie d'un tel circuit.

Le quatrième chapitre est consacré pour examiner l'effet des paramètres géométriques liés aux dimensions du système de 3 tiges en parallèle, sur le comportement fréquentielle de son impédance. Nous utilisons le même système de terre que celui adopté en chapitre 3. Par voie de conséquence, un même circuit électrique équivalent au système précédent est proposé. Ce dernier permet d'étudier le comportement de la tension de sortie, suite à un choc de foudre, en tenant comptes des variations des paramètres géométriques.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous étudions l'effet du type de sol sur la variation de l'impédance du système de terre équivalent à une seule tige verticale. A cet effet, nous considérons deux types de sols : homogène et hétérogène en deux couches suivant une

stratification verticale. Deux configurations relatives à l'emplacement de la tige dans le sol hétérogène, ont été examinées : (i) tige située dans la couche supérieure, (ii) tige pénétrant dans la couche inférieure. Nous effectuons, pour les deux types de sol, une étude fréquentielle de l'impédance, suivie par une modélisation du système par un circuit électrique équivalent. Une étude du comportement du système de terre face à un choc de foudre a été également examinée. Pour clore ce chapitre, nous présentons une étude comparative des résultats ainsi obtenus.

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

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes de mise à la terre

I.1. Introduction

Etant donné l'importance de la mise à la terre, les centrales, les postes et les lignes de transport d'énergie doivent être mis à la terre. Cela assure l'écoulement du courant en cas de défaut vers la terre.

Une mise à la terre est incontournable du moment qu'elle permet la protection contre la foudre et les surtensions ainsi qu'une protection des individus contre les chocs électriques, et donc la sécurité des personnes par limitation des tensions de pas et de contact à des valeurs de sécurité, le fonctionnement correct du réseau d'alimentation électrique afin d'assurer une bonne qualité d'énergie et la protection des bâtiments et des installations contre la foudre [Georges, 2001 ; Klajn, 2009].

Les normes exigent que toutes les liaisons de terre d'une installation soient interconnectées, ne formant ainsi qu'un seul réseau [Dusseldorf, 1999]. Il s'agit donc d'utiliser une mise à la terre unique. En effet, les parties d'un système de mise à la terre prévues pour assurer une fonction particulière, doivent obligatoirement faire partie du même réseau de mise à la terre.

I.2. Définitions

I.2.1. Mise à la terre

Mettre un équipement à la terre c'est relier son enveloppe métallique à une prise de terre, à condition que cette enveloppe soit considérée comme une masse [EDF, 1997 ; Lefouili, 2007].

I.2.2 Prise de terre

Corps conducteur enterré, ou ensemble de conducteurs enterrés et connectés, assurant une liaison électrique avec la terre (câble, piquet, grille) [EDF, 1997]. On distingue deux types de prise de terre en fonction de leur profondeur d'enfouissement, une prise de terre profonde et une prise de terre de surface.

I.2.2.1. Prise de terre "profonde"

Une prise de terre est dite "profonde" dès que la profondeur atteinte est supérieure à 3 mètres [EDF, 1997]. En effet, cette prise de terre est réalisée par l'enfoncement dans le plan vertical de piquets auto-allongeables.

I.2.2.2. Prise de terre de "surface"

Elle est également réalisée par l'enfouissement dans le plan horizontal de câbles, de grilles, etc. suivant une forme géométrique adaptée. La profondeur d'enfouissement est de 0,80 m à 1 m [EDF, 1997].

I.2.3. Éléments d'une mise à la terre

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales (piquets) ou horizontales (grilles). La forme de la prise de terre est normalement commandée par l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre. Par exemple, la prise de terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste [Klajn et Markiewics, 2004].

I.2.4. Masse

C'est la partie conductrice d'un matériel électrique, qui n'est pas normalement sous tension, mais qui peut le devenir en cas de défaut d'isolement des parties actives de ce matériel [EDF, 1997 ; Lefouili, 2007].

I.2.5. Conducteur de terre

C'est un conducteur qui relie une partie d'installation électrique, une partie conductrice accessible ou une partie métallique conductrice situées dans l'environnement électrique, à la prise de terre ou qui relie différentes prises de terre. Le conducteur de terre chemine sur le sol ou, s'il est enterré dans le sol, doit être isolé de celui-ci [Nzuru, 2009].

I.2.6. Réseau de terre

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. D'une manière générale, il a pour but :

- ✓ d'assurer et maintenir à tout moment la sécurité des biens et des personnes ;
- ✓ d'écouler dans le sol les courants de défaut et de foudre ;
- ✓ de maintenir un potentiel de référence.

I.3. Critères de conception d'une électrode de mise à la terre

La conception d'une électrode de terre doit considérer l'adéquation de performance, de la fiabilité et des effets sur l'environnement.

I.3.1. Adéquation de performance

C'est la caractéristique de fonctionnement désirée comme prescrite par un client. Elle implique normalement des paramètres tels que, la résistance de terre maximale acceptable, le champ électrique et la densité de courant, l'électrode de terre et son environnement, la durée de vie prévue et la capacité de manipuler des conditions anormales. Un facteur important ici est l'effet thermique. Le sol environnant de l'électrode est soumis au chauffage dû aux écoulements de courants, ayant pour résultat l'évaporation de l'humidité et par conséquent l'augmentation de la résistance et l'échauffement progressivement.

I.3.2. Adéquation de fiabilité

La conception finale doit être fiable avec un entretien minimum durant toute sa durée de vie. La capacité du système d'électrodes d'exécuter en juste proportion sous une configuration inachevée, est un dispositif désiré. Ce dispositif permet d'entretenir le système d'électrode section par section, tout en maintenant une performance globale satisfaisante.

I.3.3. Adéquation des effets sur l'environnement

Il est inévitable que l'installation d'un système d'une énorme électrode du sol cause quelques effets sur l'environnement. La tâche finale ici est de rechercher un équilibre entre une conception de technologie de l'électrode et la nature du sol.

I.4. Conduction du courant électrique dans le sol

Le courant de conduction dans le sol résulte du déplacement des charges électriques sous l'effet d'un champ électrique appliqué [Sunde, 1968]. Ce mécanisme dépend de la structure physique et chimique du globe terrestre.

Sous l'action d'un courant électrique, tout corps, qui à l'état soluble, peut se dissocier en anions et cations. Il est appelé électrolyte. La présence d'eau dans un milieu est une condition essentielle à la conduction électrolytique. La combinaison des sels, des acides et des bases avec l'eau, comme par exemple dans les océans et dans les couches de sol humide, forment des solutions conductrices. On distingue deux types de conduction dans le sol [Georges, 2001] :

a) La conduction électrolytique : sous l'effet du champ électrique, les électrolytes sont soumis à l'électrolyse. Ils sont donc décomposés en anions et cations. Les charges négatives sont appelées anions ou ions négatifs. Elles se dirigent vers l'anode. Les charges positives sont appelées cations ou ions positifs. Elles se dirigent vers la cathode. Les ions qui atteignent les électrodes se départissent de leur charge, ils se déposent sur ces électrodes ou réagissent chimiquement avec elles. Le déplacement des ions engendre le passage d'un courant électrique. La vitesse de déplacement des ions est proportionnelle à l'intensité du champ électrique. Le nombre des particules dissociées ou le nombre des ions varie avec la température. Par exemple, pour une augmentation de 1°C, le nombre d'ions libérés augmente et la résistivité de l'électrolyte diminue d'environ 2%. Ainsi, le courant électrique augmente avec l'augmentation du champ électrique ou de la température.

b) La conduction électronique : elle est assurée par la présence des électrons libres qui sont caractérisés par une grande mobilité et se trouvent sur l'orbite externe de l'atome. Ce type de conduction est rencontré dans les milieux du globe où il y a une concentration des minerais et dépend de l'intensité du champ électrique. En général, les électrons libres sont rares dans les couches extérieures du globe, mais quand même une faible conduction est toujours possible à cause de la grande superficie du milieu.

Un autre phénomène qui mérite quelques explications est la décharge électrique. Lorsque l'intensité du champ électrique atteint une valeur critique de 1 à 3 kV/cm. il peut y avoir une formation de décharges électriques dans la partie gazeuse du sol sous forme d'étincelles ou d'arcs électriques selon l'intensité du champ.

I.5. Caractéristiques électriques du sol

Comme pour tout milieu conducteur, le comportement électrique du sol est caractérisé par les trois grandeurs suivantes :

- sa résistivité ;
- sa permittivité ;
- sa perméabilité.

Le sol est composé de plusieurs matériaux dont la proportion va avoir une influence sur chacune de ces grandeurs (notamment l'eau, dont la proportion varie en fonction du temps) [Legrand, 2007].

I.5.1. Résistivité

Le sol (la terre) 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 conductivité du sol est principalement de type électrolytique. La résistivité (qui est l'inverse de la conductivité), notée ρ , est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle dépend de la densité de porteurs libres (ions) et est donc très étroitement liée à [Nzuru, 2009 ; Georges, 2001].

- la nature du sol ;
- la pression ;
- la dimension des grains ;
- la porosité (pourcentage de volume des vides dans le sol) ;
- le pourcentage d'eau contenu dans le sol ;
- le pourcentage de sels solubles ;
- le pourcentage d'acides et de bases ;
- la température.

Dans cette section, nous présentons brièvement l'influence de la température et l'humidité sur la résistivité du sol.

Une augmentation de la température du sol permet à un électrolyte de mieux se dissocier. Ce qui réduit la résistivité du sol. Par contre, une augmentation de la température à 100°C cause l'évaporation de l'eau du sol et ainsi une augmentation de la résistivité. Lorsque la température tombe au-dessous de 0°C comme le cas des régions froides, la conductivité de l'électrolyte diminue et ainsi un accroissement rapide de la résistivité se produit.

Par ailleurs, l'humidité peut varier sur une large gamme, en fonction de la situation géographique et des conditions atmosphériques, depuis un faible pourcentage dans les régions désertiques, jusqu'à 80% pour les régions marécageuses. La résistivité de terre dépend principalement de ce paramètre. La figure I.6 illustre ce rapport entre la résistivité et l'humidité dans le cas d'une argile. On peut constater que, pour des valeurs d'humidité supérieures à 30%, les variations de sont faibles et non significatives. Cependant, lorsque le sol est sec, c'est-à-dire pour des valeurs d'humidité inférieures à 20%, la résistivité augmente rapidement [Nzuru, 2009 ; Georges, 2001].

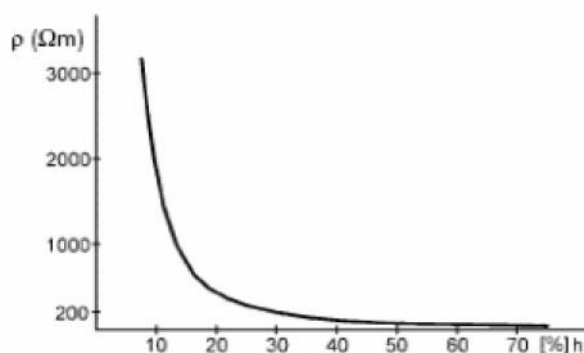


Figure I.1. Résistivité du sol de l'argile en fonction de l'humidité du sol h

Dans les régions tempérées, les pays européens par exemple, la résistance de terre varie en fonction des saisons à cause de la dépendance de l'humidité du sol avec la résistivité de terre. En Europe, cette dépendance est approximativement de forme sinusoïdale, où la valeur maximale de la résistance de la terre apparaît en février et la valeur minimale en août.

La valeur moyenne apparaît en mai et en novembre. L'amplitude en février est approximativement 30% supérieure à la moyenne, tandis qu'en août elle est de 30 % inférieure à cette moyenne.

Il est bon de rappeler que les effets du gel sont similaires à la sécheresse où la résistivité augmente significativement [Legrand, 2007].

Pour ces raisons, les calculs d'une résistance de terre et la conception d'une prise de terre peuvent être réalisés jusqu'à un niveau limité d'exactitude.

Les connaissances de la résistivité réelle et des différentes couches composants du sol aux diverses profondeurs, sont les bases principales pour déterminer la configuration du réseau de terre.

En général, la résistance augmente avec la résistivité. Le sol peut généralement être considéré comme une résistance pure [Nzuru, 2009]. 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, ...

La résistance de terre dépend essentiellement du type de sol, de l'humidité et de la température. Elle varie donc en fonction des saisons qui influent sur la température et la teneur en eau du sol. Pour être efficace, un système de mise à la terre doit assurer une résistance de terre qui reste faible même lorsque les conditions sont les plus défavorables. Le terrain et l'eau étant plus stables dans les couches profondes. Il est conseillé, d'enfoncer la prise de terre le plus profondément possible (c'est-à-dire en dessous du niveau de la nappe phréatique).

Le tableau I.1 donne une indication sur les résistivités des différents types de sol [EDF, 1984].

Nature du sol	Résistivité en $\Omega \cdot m$
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Limon	20 à 30
Humus	10 à 20
Tourbe humide	5 à 10
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 500
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000

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

I.5.2. Permittivité

La permittivité d'un matériau, notée ϵ , caractérise son comportement diélectrique. Elle est fonction de la permittivité propre des différents composants du sol et de leurs proportions.

Dans la nature, le liquide polarisé le plus répandu est l'eau, dont la permittivité relative à 50Hz est d'environ 80, contre environ 5 pour le quartz, constituant majeur des sols sableux. Comme c'est le cas pour la résistivité, la permittivité apparente d'un sol poreux est donc largement influencée par son taux d'humidité [Johnson et al., 1998]. Pour les agronomes, la mesure de la permittivité apparente est même un excellent moyen de sondage non destructif du taux d'humidité des sols [Stoffregen et al., 2002].

On dispose de plusieurs méthodes pour mesurer la permittivité apparente du sol, parmi lesquelles les deux plus utilisées sont [Robinson, 2003] :

- la méthode TDR (Time Domain Reflectometry), qui permet la mesure de la vitesse de l'onde électromagnétique dans le sol pour en déduire la permittivité du milieu ;
- la méthode SCIP (Surface Capacitance Insertion Probe), qui permet la mesure de la capacité C du condensateur créé entre deux plaques parallèles plongées dans le milieu, et l'estimation de la permittivité du milieu à partir de la relation :

$$C = g \epsilon_0 \quad (I.1)$$

avec g une constante qui dépend de la géométrie de l'installation, ϵ_0 la permittivité relative du milieu, et ϵ_0 la permittivité du vide.

On retiendra que g est généralement comprise entre 5 (sol sec) et 30 (sol humide) (ces valeurs ont été obtenues pour des fréquences voisines de 50Hz) [Stoffregen et al., 2002].

I.5.3. Perméabilité

On considère que le sol est constitué de matériaux amagnétiques (ce qui se vérifie toujours en pratique, sauf dans le cas de quelques roches riches en oxyde de fer comme la magnétite). Sa perméabilité relative μ est donc égale à 1 et nous ne considérerons plus ce paramètre dans la suite [Legrand, 2007].

I.6. Matériaux utilisés pour la construction des systèmes de mise à la terre

Le tableau (I.2) illustre les matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation [CEI, 2006].

D'autres produits sont disponibles sur le marché pour ce faire. Dans tous les cas, il faut éviter toute solution tendant à réduire les performances de la mise à la terre avec le temps. C'est souvent le cas en pratique, les produits à base de sel permettent d'obtenir des faibles résistivités des sols mais perdent leurs caractéristiques dans le temps [Nzuru, 2009].

Matériau	Utilisation			Corrosion		
	A l'air libre	Enterré	Sous béton	Résistance	Accrue par	Peut être détruit par couplage galvanique avec
Cuivre	Massif Torsadé	Massif Torsadé En revêtement	Massif Torsadé En revêtement	Bonne dans de nombreux environnements	Composés sulfureux Matériaux Organisés	-
Acier galvanisé à chaud	Massif Torsadé	Massif	Massif Torsadé	Acceptable dans l'air, le béton et en sol normal	Contenu important de chlorides	Cuivre
Acier Inoxydable	Massif Torsadé	Massif Torsadé	Massif Torsadé	bonne dans de nombreux environnements	Solutions alcalines	-
Aluminium	Massif Torsadé	Pas bon	Pas bon	Bonne dans des atmosphères contenant des concentrations faibles de sulfure et de chlore	Sols acides	Cuivre
Plomb	Massif En revêtement	Massif En revêtement	Pas bon	Bonne dans des atmosphères contenant des fortes concentrations de sulfates	Sols acides	Cuivre acier inox

Note 1 : Ce tableau ne donne que des indications générales, dans des conditions particulières, à des considérations sur l'immunité contre la corrosion est requise.

Note 2 : Les conducteurs torsadés sont plus vulnérables à la corrosion que les conducteurs massifs. Les conducteurs torsadés sont aussi vulnérables s'ils entrent ou sortent du béton ou du sol. C'est pourquoi les conducteurs torsadés galvanisés ne sont pas recommandés dans le sol.

Note 3 : L'acier galvanisé peut être corrodé dans des sols argileux ou humides.

Tableau I.2 : Matériaux des systèmes de protection contre la foudre et conditions d'utilisation.

I.6. Régime de neutre et schémas de liaison à la terre en basse tension

I.6.1. Schémas de liaison

Le régime de neutre symbolise la situation d'une installation électrique par rapport au potentiel de la terre. Du fait que cette situation ne concerne que le neutre, la normalisation utilise l'expression des schémas des liaisons à la terre (SLT).

Le schéma de liaison à la terre représente tout simplement la manière dont les neutres du transformateur d'alimentation et des masses des récepteurs sont (ou pas) reliés à la terre ou au neutre du réseau d'alimentation. On distingue trois schémas possibles TT (Figure I.2), IT (Figure I.3) et TN (TN-C ou TN-S) (Figure I.4). Ces différentes codifications sont données selon les normes NF C 15-100, NF C 13-100 et NF C13-200 et définies comme suit [Lefouili, 2007 ; Prévé, 2005] :

- ❖ **La première lettre** caractérise le point neutre du transformateur ou de la source ;
 - **T** : liaison directe du neutre à la **T**erre ;
 - **I** : liaison est **I**solée ou relie à la terre par l'intermédiaire d'une **I**mpédance (1 à 2 k Ω).
- ❖ **La deuxième lettre** caractérise les masses électriques des récepteurs ;
 - **T** : liaison des masses à une prise de **T**erre ;
 - **N** : liaison des masses au **N**eutre.
- ❖ **La troisième lettre** : concerne le régime TN
 - **C** : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur neutre N sont Confondus ; il appelé PEN ;
 - **S** : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur Neutre sont Séparés.

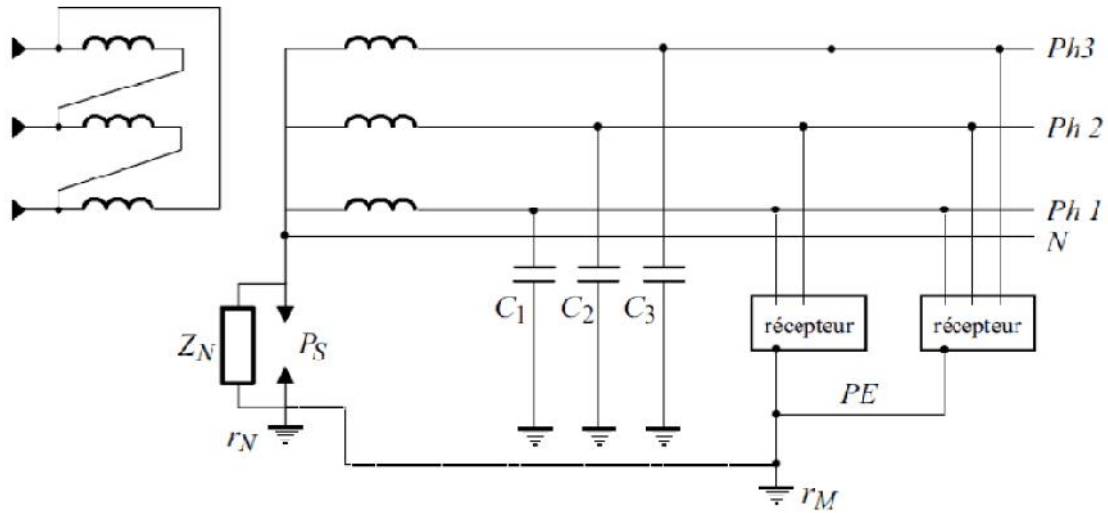


Figure I.2 : Schéma de liaison à la terre en basse tension : TT.

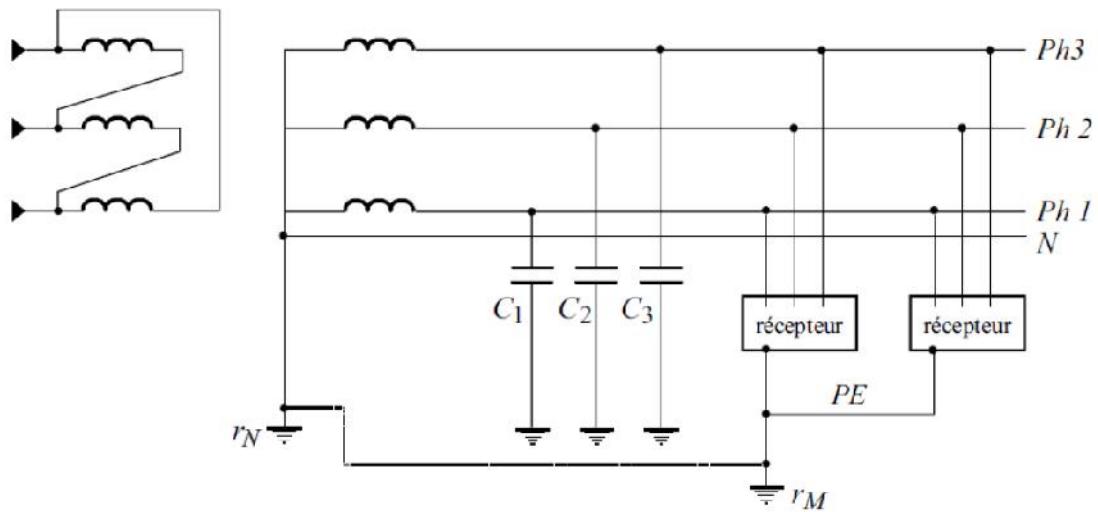


Figure I.3 : Schéma de liaison à la terre en basse tension : IT.

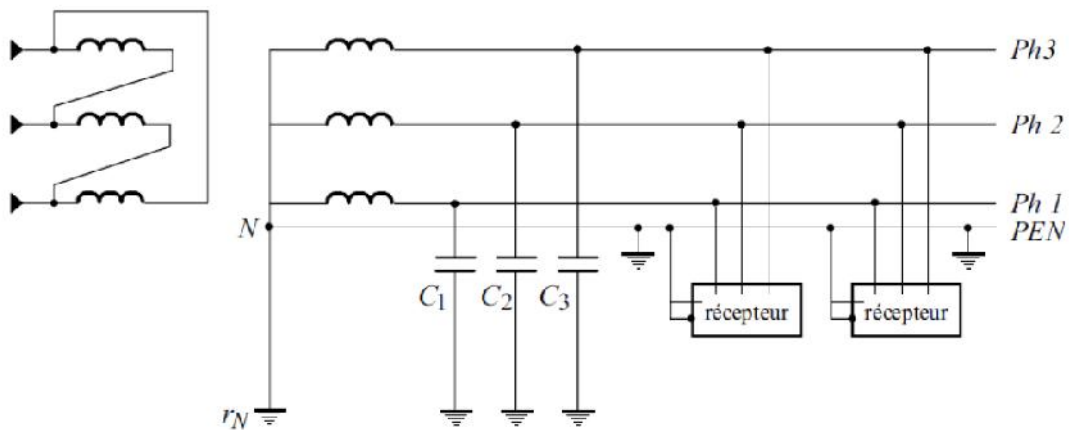


Schéma TN-C.

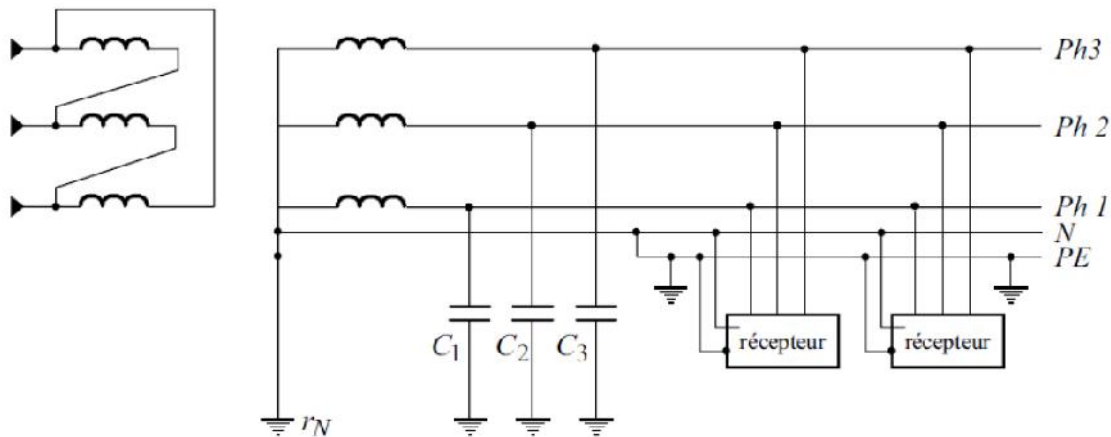


Schéma TN-S.

Figure I.4 : Schémas de liaison à la terre en basse tension : TN.

I.6.2. Domaines d'utilisation des régimes de neutre

Les trois SLT, mondialement utilisés et normalisés par la CEI 60364-5-54 [CEI,2002], ont pour objectif commun la recherche de la meilleure sûreté. Sur le plan de la protection des personnes, les 3 régimes sont équivalents si l'on respecte toutes les règles d'installation et d'exploitation. Etant donné les caractéristiques spécifiques à chaque régime, il ne peut donc être question de faire un choix à priori. Ce choix doit résulter d'une concertation entre l'utilisateur et le concepteur de réseau (Bureaux d'études, installateur...) sur [Bensoam, 2003]:

- les caractéristiques de l'installation ;
- les conditions et les impératifs d'exploitation.

I.7. Régimes de neutre utilisés en haute tension

Lorsque l'on considère, sans distinction, les réseaux de distribution publique et les réseaux privés industriels ou tertiaires, on rencontre tous les principes de mise à la terre du point neutre, à savoir [Schneider, 1997 ; Sautriau, 1991] :

I.7.1. Mise à la terre par neutre isolé

Il n'existe aucune liaison électrique intentionnelle entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection. C'est une solution souvent utilisée pour les réseaux industriels (≤ 15 kV) nécessitant la continuité de service [Schneider, 2008].

I.7.2. Mise à la terre directe

Ce type de mise à la terre limite au mieux les surtensions, et la sélectivité des protections ne présente pas de difficultés.

Par contre, en cas de défaut à la terre, le courant n'est pas limité, les dégâts et les perturbations sont maximales et le danger pour le personnel est important pendant la durée du défaut.

Cette solution n'est pas utilisée pour la distribution en haute tension. Elle peut être utilisée quand la puissance de court-circuit de la source est faible [Sautriau, 1991 ; Schneider, 2008].

I.7.3. Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance

Cette solution doit être appliquée lorsque le neutre MT du transformateur d'alimentation est accessible et lorsque son impédance propre est insuffisante pour limiter convenablement les courants de défaut, ce qui est le cas le plus courant [EDF, 1959 ; MG, 2005].

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

a) Réactance accordée (bobine de Petersen)

Cette solution est parfois utilisée sur les réseaux HT de distribution publique. Elle est peu utilisée en distribution industrielle. Des relais de protection sensibles à la composante active du courant homopolaire sont nécessaires pour obtenir la sélectivité [Sautriau, 1991 ; Schneider, 2008].

b) Réactance de limitation

Cette solution peut provoquer des surtensions sévères. Elle n'est applicable que si l'impédance de limitation a une valeur faible [Sautriau, 1991 ; Schneider, 2008].

I.8. La foudre

La foudre est un phénomène perturbateur naturel important et dangereux dû aux mouvements et aux déséquilibrages des charges dans le nuage ou entre le nuage et le sol. Par conséquent, se créent des décharges électriques qui sont à l'origine des diverses sources de

perturbations électromagnétiques. La foudre demeure, par son caractère imprévisible et ses effets directs ou indirects, l'une des premières causes qui peuvent mener à des dysfonctionnements et des destructions d'équipements électriques et électroniques.

I.8.1. bases physiques

Les documents [CIGRE,1991], [C.Gary,1984] et [CIGRE ,2007] présentent un état de l'art sur les caractéristiques et mécanismes du phénomène de foudre. Ces connaissances sont basées sur des observations et mesures de coups de foudre naturels ou déclenchés.

D'une manière générale, l'origine de la foudre est un nuage orageux volumineux dont la base est chargée de façon opposée au sol. Lorsque le champ électrique résultant est suffisant, une pré-décharge peu lumineuse progresse en direction du sol (coup de foudre descendant) ou du sol vers le nuage (coup de foudre ascendant). Cette pré-décharge, appelée traceur, se déplace par bonds à une vitesse variant de 2 à $6 \cdot 10^4$ m/s. Au moment où le traceur atteint le sol ou le nuage, un intense courant électrique s'engouffre dans le canal ionisé (c'est l'arc en retour).

Plusieurs types de coups de foudre sont définis selon la polarité et la direction du traceur.

Dans nos régions à climat tempéré, 80 à 90% des coups de foudre sont négatifs (charges -). De plus, on rencontre généralement dans les plaines des coups de foudre descendants, alors que les montagnes sont plus propices à des coups de foudre ascendants.

On représente en Figure I.5 l'évolution du traceur pour un coup de foudre descendant négatif.

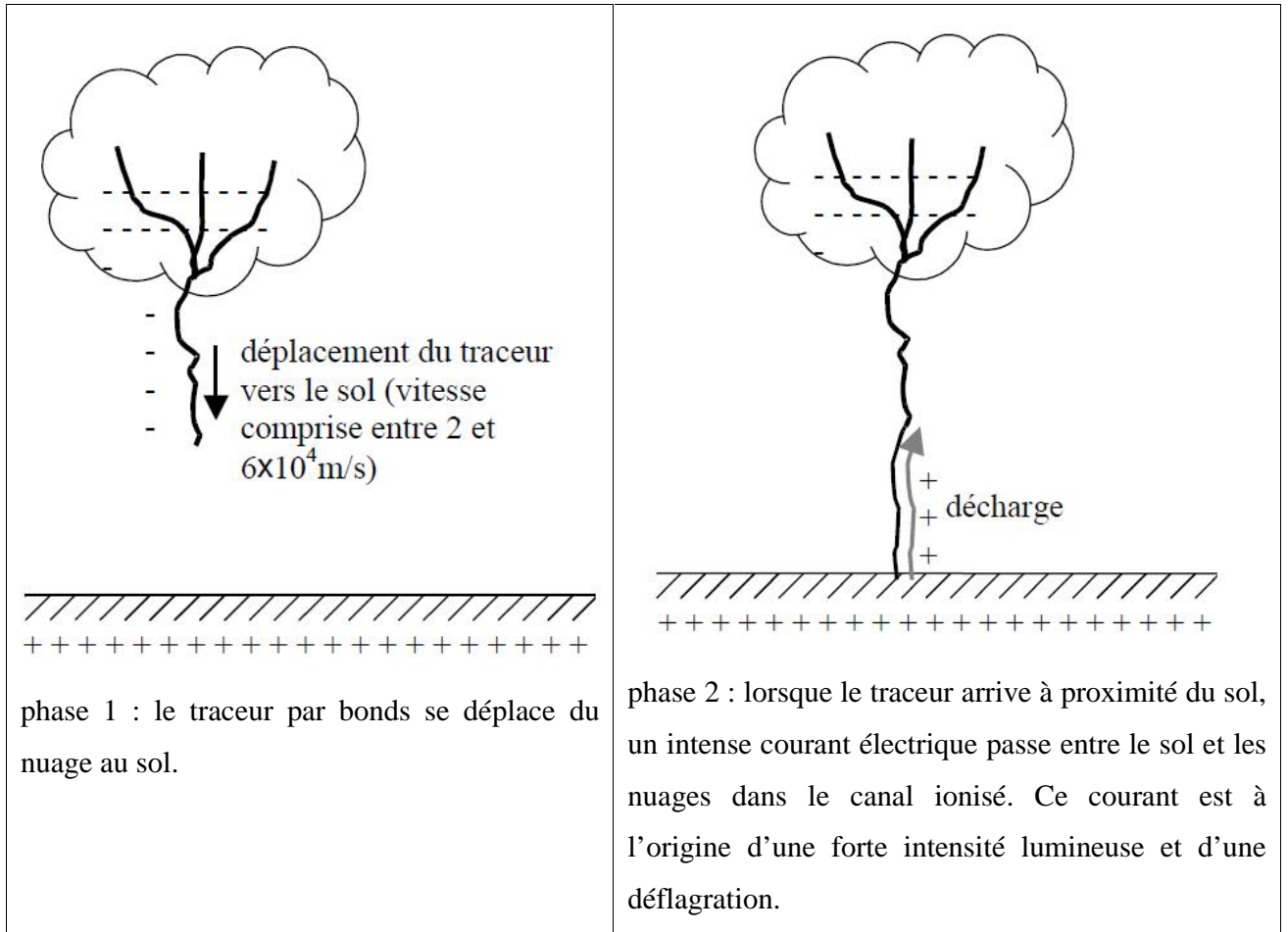


Figure I.5: Coup de foudre descendant négatif.

I.8.2.Courant de foudre

On peut considérer que la décharge est constituée d'une ou de plusieurs impulsions de courant de très forte intensité (de quelques kA à plus de 100kA pour la première impulsion) se superposant à un courant persistant.

La Figure I.6, inspirée de la référence [CIGRE ,1991], montre l'aspect de ce courant dans le cas d'un coup de foudre multiple.

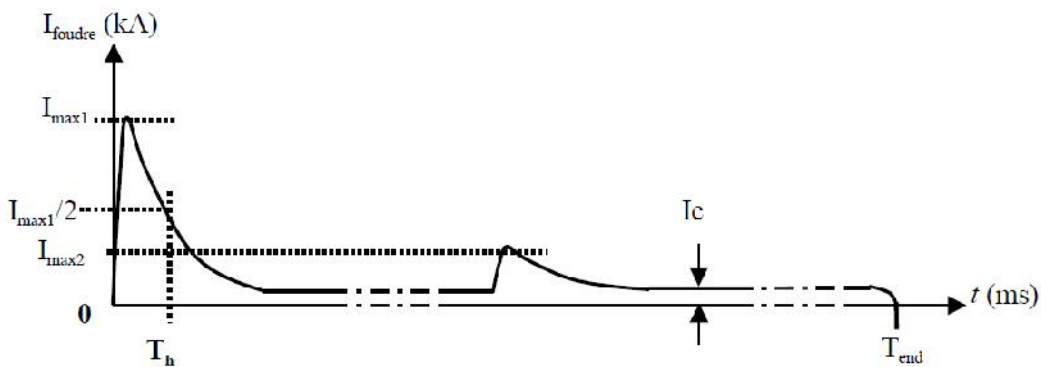


Figure I.6 : Forme du courant de foudre, coup de foudre multiple.

Il y a en moyenne 3 impulsions, espacées chacune de 50ms. Le courant persistant peut durer jusqu'à une seconde (T_{end}) et son intensité I_c varie entre 100 et 1000 ampères.

Conclusion :

Lors d'un défaut d'isolement, ou de la mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre. Un neutre direct à la terre contribue à limiter les surtensions ; par contre, il engendre des courants de défaut très importants. Un neutre isolé limite les courants de défaut à des valeurs très faibles, mais favorise l'apparition de surtensions élevées. Le choix du régime du neutre dépend à la fois de la nature de l'installation et de celle du réseau.

En raison de son importance dans l'étude des systèmes de mise à la terre, le calcul de la résistivité des sols et de la résistance des mises à la terre a fait l'objet d'un second chapitre.

Chapitre 2

Détermination de la résistivité et de la résistance de terre

II.1.Introduction

La résistance de terre est fortement liée à la résistivité du sol. Ces deux grandeurs sont les paramètres majeurs caractérisant les propriétés électriques des prises de terre. Ces dernières dépendent de la forme géométrique de l'électrode de terre ainsi que des propriétés du sol dans lequel est enfoncée cette électrode. Le sol, constitué de strates (couches géologiques), est loin d'être homogène. La résistance varie sensiblement d'une strate à l'autre en fonction de la profondeur. Il faut détecter le bon endroit du sol ayant une faible résistivité permettant de maintenir une faible résistance des électrodes de terre. Par ailleurs, il serait préférable d'utiliser plusieurs prises de terre que l'on branche en parallèle.

II.2. Réseau de terre

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact directe avec le sol et reliés électriquement entre eux. D'une manière générale, il a pour but :

- d'écouler, dans le sol, les courants de défaut à la terre et de foudre ;
- d'assurer et maintenir, à tout moment, la sécurité des biens et des personnes ;
- de maintenir un potentiel de référence.

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 (dans une moindre mesure, sa permittivité aussi), 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.

II.3. Rôle des systèmes de mise à la terre

Les guides [IEEE, 2000] et [EDF, 1984] définissent le rôle et les objectifs des systèmes de mise à la terre. D'une manière générale, il s'agit de relier les masses à la terre par l'intermédiaire d'un ou plusieurs conducteurs, afin de permettre aux courants permanents et aux courants de défaut de s'y écouler. Une bonne mise à la terre doit assurer [Legrand, 2007] :

- la sécurité des personnes à proximité des installations, notamment dans les zones fréquentées (abords de piscines, terrains de camping, ...) ;
- la protection des équipements (qualité de service) ou des installations de tiers, reliés, ou à proximité (canalisations de transport de fluide, installations de télécommunication,). Le courant à écouler dans le sol peut être de différente nature :

- courant à fréquence industrielle (par exemple suite à un court-circuit phase/pylône) ;
- courant harmonique ;
- courant transitoire d'origines diverses (foudre, manoeuvre, ...).

Un système de mise à la terre peut être composé d'un ou plusieurs sous-systèmes qui ne sont pas nécessairement connectés directement mais sont mutuellement influencés par couplage électromagnétique [Legrand, 2007].

II.4. Résistance et résistivité de la terre

Le sol (la terre) 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 : la nature des sols, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température, ...

Le tableau II.1 donne une indication sur les résistivités des différents types de sol [EDF, 1984].

Nature du sol	Résistivité en $\Omega \cdot m$
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Limon	20 à 30
Humus	10 à 20
Tourbe humide	5 à 10
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 500
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000

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

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, ... [Nzuru, 2009].

II.5. Propriétés électriques d'une prise de terre

Les propriétés électriques d'une prise de terre dépendent essentiellement de deux paramètres :

- la résistance de la terre ;
- la configuration de la prise de terre.

La résistance de terre détermine la relation entre la tension de terre VE et la valeur du courant circulant dans la terre [Dusseldorf, 1999]. La configuration de la prise de terre détermine la répartition du potentiel à la surface de la terre, qui se présente comme le résultat de la circulation du courant dans la terre. La distribution du potentiel à la surface du sol est une considération importante dans l'évaluation du degré de protection contre les chocs électriques, car cela détermine les tensions de contact et de pas [CEI, 2002]. Ces points sont brièvement abordés ci-dessous.

La résistance de terre a deux composantes [Biddle, 1947] :

- la résistance de dissipation RD qui est la résistance de la terre située entre la prise de terre et la terre de référence ;
- la résistance RL des parties métalliques de la prise de terre et du conducteur de terre.

La résistance RL est normalement plus faible que la résistance de dissipation RD .

La résistance de terre est donc normalement supposée être égale à la résistance de dissipation RD . Dans la littérature, la "résistance de terre" désigne habituellement la résistance de dissipation [Nzuru, 2009].

N'importe quelle connexion de terre rendue disponible par le distributeur d'énergie, apparaît en parallèle avec la terre fournie localement et l'on peut s'attendre à ce qu'elle ait une impédance plus faible pour l'ensemble du spectre en fréquence. Toutefois, la disponibilité et les caractéristiques de cette connexion sont indépendantes de la maîtrise du concepteur et par conséquent, elle ne peut pas être prise en compte dans la conception d'une prise de terre qui doit être adaptée au besoin du contexte. [Nzuru, 2009].

II.6. Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre :

Avant d'étudier le comportement d'un réseau de terre écoulant un courant, il faut examiner la nature de la propagation des courants dans le sol, c'est-à-dire la répartition des potentiels autour du réseau de terre.

Le cas le plus simple est celui d'une électrode hémisphérique de rayon r , enterrée dans un sol supposé homogène, de résistivité ρ . Le potentiel, à une distance x du centre de l'hémisphère parcouru par un courant I est donné par la relation :

$$U(x) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{II.1})$$

La figure ci-dessous donne la répartition du potentiel (en V) dans le sol pour une électrode hémisphérique en cuivre, de diamètre 0.25 m, pour un courant de 10 A. Les calculs ont été effectués par la méthode des éléments finis que nous abordons dans le second chapitre.

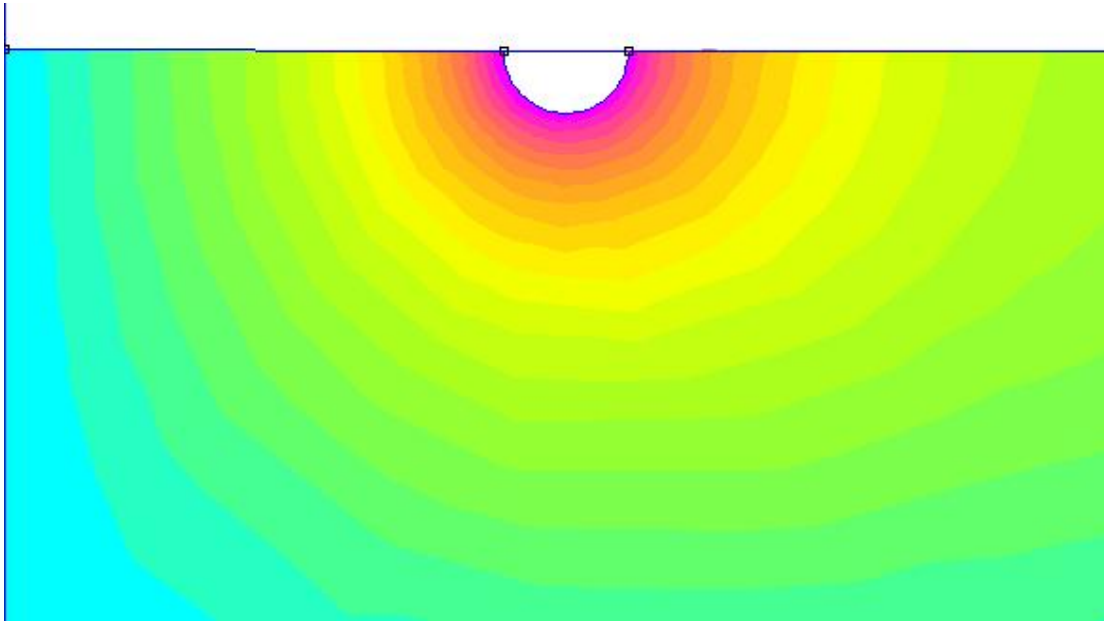


Figure II.1: Répartition du potentiel dans le sol

II.7. Résistance d'une électrode hémisphérique

La résistance de l'électrode hémisphérique est calculée à partir de la relation $R = \frac{U}{I}$, on aura donc

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Si } x \rightarrow \infty \quad R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (\text{II.3})$$

Cette relation est la plus simple expression qui représente la résistance d'une mise à la terre réalisée avec une électrode hémisphérique. L'hypothèse $x \rightarrow \infty$ donne un résultat autant précis que x est très

grand. Au deuxième chapitre, nous donnons les résistances d'une électrode hémisphérique en utilisant les relations (II.2) et (II.3).

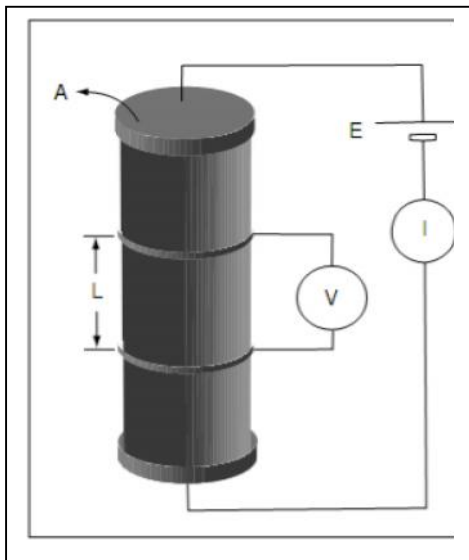
II.8. Evaluation de la résistivité du sol :

La résistance mesure l'opposition au passage d'un courant électrique, et peut permettre de caractériser un matériau. La loi d'Ohm stipule que la résistance électrique R est donnée par le quotient du potentiel V appliqué aux bornes d'un matériau par le courant I qui circule, soit :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{II.4})$$

Cependant, en prospection électrique la notion de résistance n'a pas vraiment de signification puisque si on prend deux échantillons de longueur différente du même matériau, ils n'auront pas la même résistance, tandis que deux échantillons de matériaux différents peuvent présenter la même valeur. Puisque la résistance dépend de la géométrie du corps, on doit se baser sur une propriété qui, tout en caractérisant la facilité de laisser passer le courant, est indépendante de la géométrie de l'échantillon choisi. Cette propriété s'appelle la résistivité électrique et est reliée à la résistance par [Chouteau et Giroux, 2006] :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{II.5})$$



A : la section du cylindre ;
L : la longueur du cylindre.

Figure II.2 : Mesure de la résistivité en laboratoire.

Pour un cylindre de longueur L et de section A (figure II.4). L'inverse de la résistivité est appelée la conductivité électrique ($\sigma = 1/\rho$) et ses unités des S/m ou siemens/m. Notons que la loi

d'Ohm sous la forme exprimée à l'équation (II.5), est une forme simplifiée de la forme générale qui s'écrit :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \tag{II.6}$$

où \vec{j} est la densité de courant (courant par unité de surface traversée $\vec{j} = I/A$ (ampères/m²)), et \vec{E} est le champ électrique. Par définition $\vec{E} = -\nabla V$ (V est une fonction scalaire) [Chouteau et Giroux, 2006] :

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} = -\vec{E} \tag{II.7}$$

Si on réécrit la loi d'Ohm pour le cylindre de la figure II.4, on a alors $\vec{E} = V/L$, d'où

$$\vec{E} = \frac{RA}{L} \vec{j} \tag{II.8}$$

$$\rho = \frac{EA}{j} \tag{II.9}$$

II.9. Modélisation de la résistivité des sols

En général, les modèles du sol uniforme et en deux couches de résistivités différentes sont les plus utilisés, mais pour plus de précision dans les calculs, on peut appliquer le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes.

II.9.1. Sol homogène

Cette modélisation fait l'hypothèse du sol en une seule couche de résistivité ρ . Elle ne peut être utilisée que si les variations des résistivités de différentes couches sont modérées, ce qui n'est pas souvent le cas en réalité. Les calculs des résistances des mises à la terre se basant sur cette modélisation ne donnent que des résultats approximatifs, donc peu précis.

II.9.2. Sol en deux couches de résistivités différentes

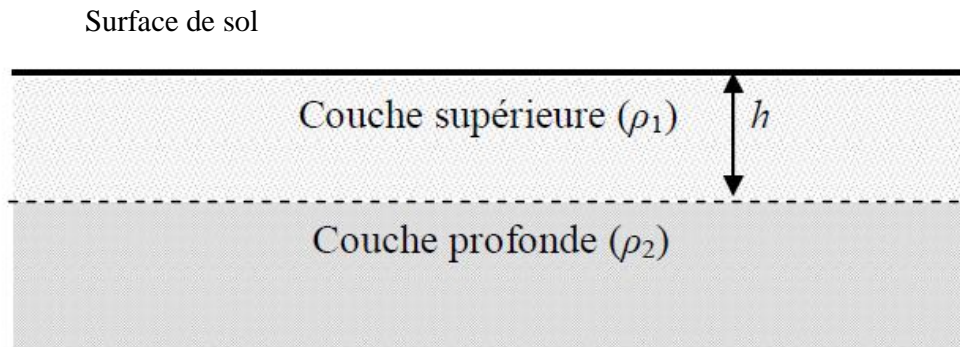


Figure II.3 : Sol en deux couches de résistivités différentes.

La modélisation du sol en deux couches de résistivités différentes est la plus utilisée dans les calculs de mise à la terre. 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, établie : [Tagg G.F., 1964].

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1+(2n\frac{e}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(2n\frac{e}{a})^2}} \right] \quad (\text{II.10})$$

avec a , la distance entre les électrodes de terre lors de la mesure,

h , la profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 ,

K , coefficient de réflexion, donné par la relation

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{II.11})$$

, la résistivité de la couche profonde du sol

II.9.3. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes

Cette modélisation de sol en différentes couches (elles peuvent être verticales ou horizontales) requiert des méthodes numériques ou graphiques car les méthodes analytiques sont limitées.

On peut aussi considérer le sol comme uniforme en lieu et place du sol en plusieurs couches de résistivités différentes. La résistivité apparente ρ_a du sol supposée homogène peut, dans ce cas, être trouvée par les deux relations suivantes [IEEE, 2000].

$$\rho_a = \frac{\rho(a_1) + \rho(a_2) + \rho(a_3) + \dots + \rho(a_n)}{n} \quad (\text{II.12})$$

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

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} \quad (\text{II.13})$$

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

II.10. Détermination de la résistance de quelques configurations de mise à la terre

II.10. 1 Sol homogène :

Tagg, Rudenberg, Dwight, Sunde et beaucoup d'autres auteurs ont mis en évidence les méthodes analytiques pour évaluer la résistance de mise à la terre pour différentes configurations d'électrodes. Les relations qui sont données dans les paragraphes qui suivent supposent une résistivité uniforme du sol (sol homogène).

II.10. 1.1.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 :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (\text{II.14})$$

avec r 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.

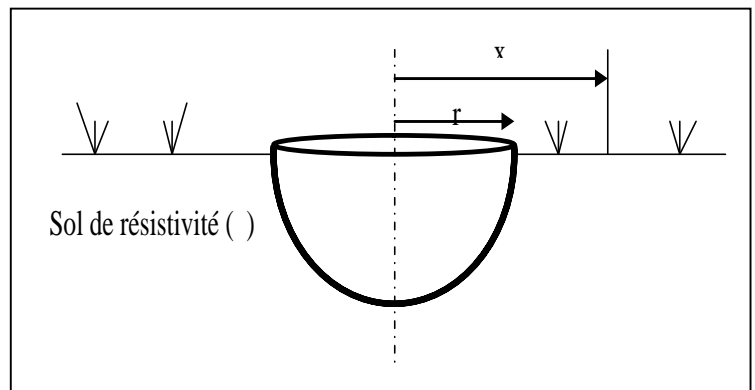


Figure II.4 : Electrode hémisphérique

II.10.1.2 Piquet de terre de forme cylindrique et vertical :

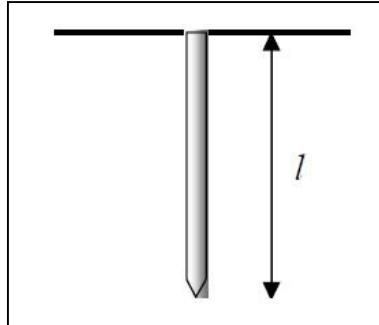


Figure II.5 : Electrode cylindrique verticale.

Trois relations ont été développées dans la littérature pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical, de forme cylindrique [Laforest et al., 1989 ; Chong, 2000 ; Kiessling, 2003]

a) **La relation de Rudenberg :**

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} \right) \quad (\text{II.15})$$

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

b) **La relation de Dwight-Sunde :**

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (\text{II.16})$$

c) **La relation de Liew-Darveniza**

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{r+l}{r} \right) \quad (\text{II.17})$$

r étant le rayon de l'électrode.

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

$$r_{eq} = \frac{\rho}{2\pi R_{piquet}} \quad (\text{II.18})$$

R_{piquet} est la résistance du piquet.

Ces relations, bien que différentes, donnent des résultats très proches. La Figure II.6 donne les valeurs des résistances pour les différentes valeurs de la longueur de l'électrode cylindrique de rayon 0.0125 m, pour un sol homogène de résistivité 100 $\Omega \cdot m$.

Cette figure montre que les résultats de calcul de la résistance de l'électrode cylindrique en utilisant ces différentes formules sont d'autant plus proches que la longueur de l'électrode est relativement grande (au-delà de 1.5 m).

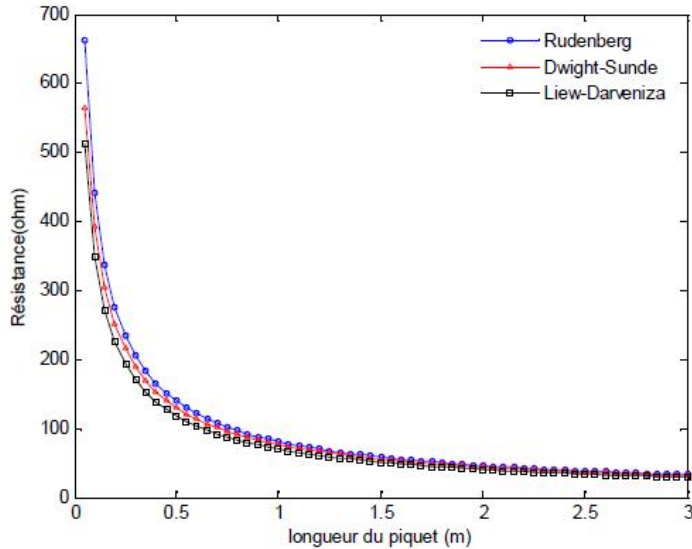


Figure II.6 : Résistance d'une électrode cylindrique.

Pour obtenir une résistance faible, une seule électrode verticale ne suffit généralement pas. Il est important d'utiliser plusieurs électrodes en parallèle. Les relations analytiques pour déterminer la résistance pour différentes configurations ont été données principalement par Tagg [Tagg G.F., 1964]. Ces configurations sont les suivantes :

II.10.1.3 Electrodes en ligne droite :

La résistance équivalente de deux électrodes en ligne droite est donnée par la formule suivante :

$$R_2 = R \left(\frac{1+\alpha}{2} \right) \quad (\text{II.19})$$

avec $\alpha = \frac{r_{eq}}{d}$, d étant la distance entre les électrodes.

La résistance équivalente de trois électrodes en ligne droite est donnée par la formule suivante :

$$R_{32} = R \left(\frac{2+\alpha-4\alpha^2}{2} \right) \quad (\text{II.20})$$

En général, pour N électrodes en ligne droite, pour $d > L$, la résistance équivalente est donnée par la relation approchée suivante [Electricité de France, Direction des études et recherches, 1984] :

$$R \approx \frac{1}{n} \left[\frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi r} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (II.21)$$

II.10.1.4 Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral :

Si trois électrodes sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral de côté d , la résistance équivalente est donnée par la relation suivante :

$$R_{3t} = R \left(\frac{1+2\alpha}{3} \right) \quad (II.22)$$

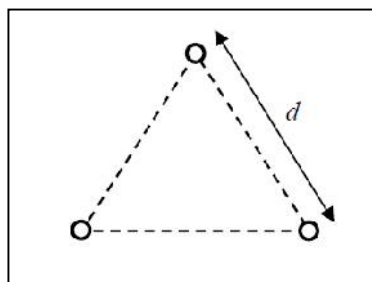


Figure II.7 : Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral.

II.10.1.5 Electrodes sur les côtés d'un carré :

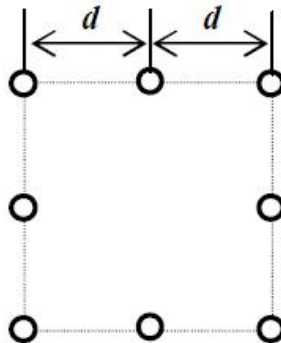


Figure II.8 : Electrode sur les côtés d'un carré.

Soit N le nombre d'électrodes. La résistance équivalente est donnée par la relation

$$R_N = R \left(\frac{1+K\alpha}{N} \right) \quad (II.23)$$

Les coefficients k sont donnés par le tableau ci-dessous.

Nombre d'électrodes par côté	Nombre total d'électrodes	K
2	4	2.7071
3	8	4.2583
4	12	5.3939
5	16	6.0072
6	20	6.4633
7	24	6.8363
8	28	7.1479
9	32	7.4195
10	36	7.6551

Tableau II.1 : Coefficients k pour des électrodes sur les côtés d'un carré

II.10.1.6. Câble enterré horizontalement :

La résistance d'un câble de longueur L et de rayon r , enterré horizontalement à une profondeur h est donnée par [Electricité de France, Direction des études et recherches, 1984]

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2r^2 h}} - 1 \right) \quad (\text{II.24})$$

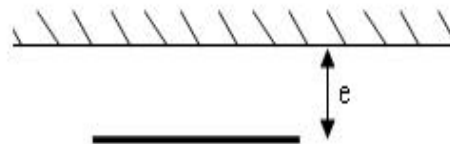


Figure II.9 : Câble enterré horizontalement.

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

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2redd'}} - 1 \right) \quad (\text{II.25})$$

avec $d' = \sqrt{d^2 + 4e^2}$

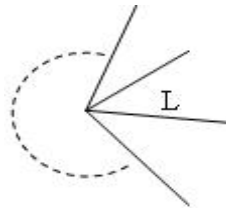
II.10.1.7. Plusieurs (n) câbles rayonnant de longueur l , enfouis à la même profondeur h 

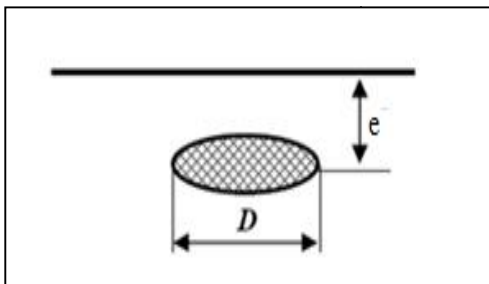
Figure II.10 : Plusieurs câbles rayonnants.

La résistance équivalente est donnée par la relation :

$$R = \frac{\rho}{n\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt{2re}} - 1 + N(n) \right) \quad (\text{II.26})$$

avec les $N(n)$ donnés par le tableau suivant :

n	2	3	4	6	8	12	100
N	0.7	1.53	2.45	4.42	6.5	11	116

Tableau II.2 : Coefficients $N(n)$ pour n électrodes rayonnant.**II.10.1.8. Réseau maillé ou grille :**

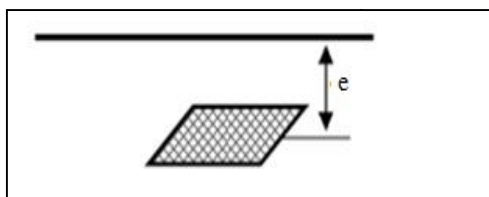
pour $e \ll D$:

$$R = \frac{\rho}{4D} \left(1 - \frac{4e}{D} \right) \quad (\text{II.27})$$

et pour $e \gg D$:

$$R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi e} \quad (\text{II.28})$$

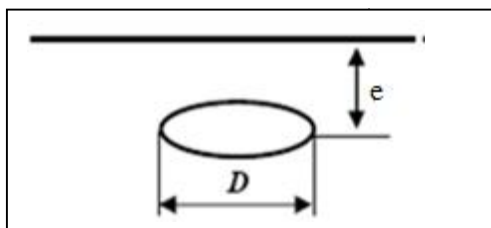
Figure II.11 : Grille forme disque.



$$R \approx \frac{2\rho}{P} \quad (\text{II.29})$$

Avec P : périmètre de la grille.

Figure II.12 : Réseau maillé.

II.10.1.9. Boucle enterrée :

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{er} \quad (\text{II.30})$$

D : le diamètre de la boucle ;

h : la profondeur d'enfouissement ;

ρ : la résistivité du sol ;

r : le rayon du conducteur.

Figure II.13 : Boucle enterrée.

II.10.2. Sol non homogène :

II.10.2 1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches

Tagg a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique verticale de longueur l et de rayon r dans un sol en deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 [Tagg G.F.,1964]. Deux cas sont alors considérés : l'électrode peut se situer entièrement dans la couche supérieure ou elle peut traverser les deux couches.

Pour une électrode se situant dans la couche supérieure de résistivité ρ_1 (Figure II.14), la résistance correspondante est donnée par :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k^i}{2} \ln \left(\frac{\frac{iz}{l} + 1}{\frac{iz}{l} - 1} \right) \right] \quad (\text{II.31})$$

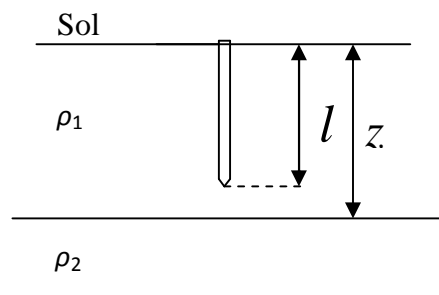


Figure II.14 : Electrode se situant dans la couche supérieure

avec :

l : longueur de l'électrode ;

k : coefficient de réflexion donnée par la relation ;

z : profondeur de la couche de résistivité ρ_1 .

i : nombre entière variée de 1 à ∞

Pour une électrode qui traverse deux couches de résistivités différentes (Figure II.15), la résistance est donnée par :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+k)}{(1-k)+2k\frac{z}{l}} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{i=1}^{\infty} k^i \ln \left(\frac{2iz+l}{2z(i-1)+l} \right) \right] \quad (\text{II.32})$$

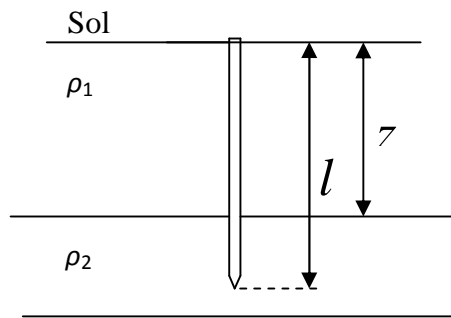


Figure II.15 : Electrode traversant les deux couches

II.10. 2.2. Résistance d’une électrode horizontale dans un sol en deux couches :

Tagg (1964) a établi la relation donnant la résistance d’une électrode cylindrique horizontale de longueur l et de rayon r , enterrée à une profondeur e ($e < z$) dans un sol en deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 (Figure II.16) Elle est donnée par la relation [Nzuru, 2009]:

$$R = R_1 + R_a$$

R_1 est la résistance de l’électrode horizontale dans un sol homogène de résistivité ρ_1 ;

R_a est la résistance additionnelle due au changement de la résistivité du sol.

La résistance R_a est donnée par la relation suivante [Nzuru, 2009] :

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{i=1}^{\infty} k^i \left[4 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1}}{2i\frac{z}{l}} \right) + 8i\frac{z}{l} - 4\sqrt{\left(\frac{2iz}{l}\right)^2 + 1} \right] \quad (II.33)$$

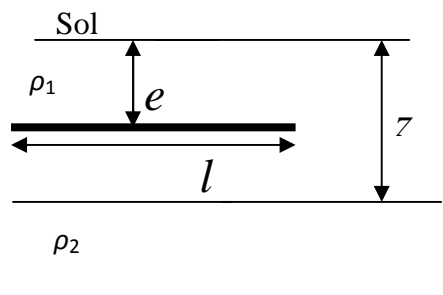


Figure II.16 : Electrode horizontale dans un sol en deux couches

II.11. Principales méthodes de mesure de la résistivité du sol :

II.11.1. Méthode de Wenner :

Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes qui sont disposées en ligne et équidistantes d'une distance a (Figure II.17), ces électrodes sont enfoncées dans le sol à une profondeur de $(3a/4)$. Entre les deux électrodes extrêmes E et H, on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur. E et H s'appellent électrodes de courant. Entre les deux électrodes centrales S et ES, on mesure le potentiel V grâce à un voltmètre. S et ES s'appellent électrodes de potentiel. Le terme V/I est la résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes [Chauvin, 2010].

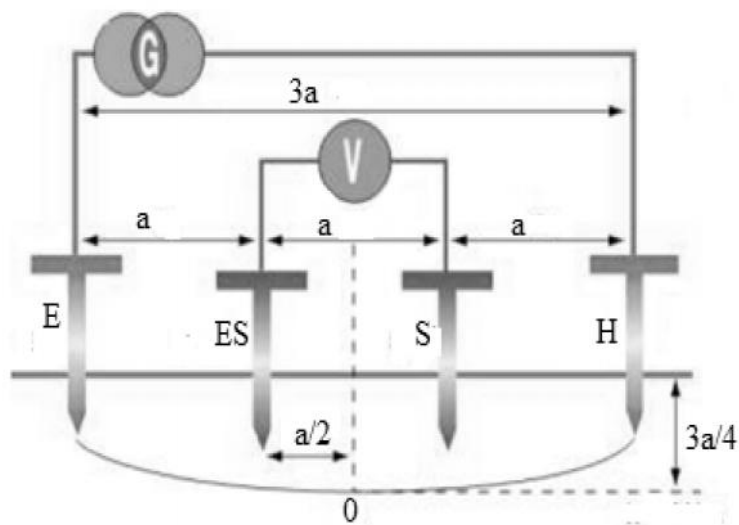


Figure II.17 : Schéma de principe de la méthode de Wenner

La valeur de la résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité (ρ) au point situé sous le point O, à une profondeur de $e = \frac{3}{4}a$, par l'expression simplifiée suivante obtenue dans le cas d'un sol homogène :

$$\rho = 2 \pi a R \quad (\text{II.34})$$

où :

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

a : distance entre les sondes [m] ;

R : résistance affichée sur l'appareil de mesure de terre [Ω].

La méthode de Wenner est utilisée souvent pour la stratification verticale des terrains [Chouteau et Giroux, 2006].

II.11.2. Méthode de Schlumberger

La méthode de Schlumberger est basée sur le même principe de mesure de Wenner. La seule différence se situe au niveau du positionnement des électrodes (Figure II.18) :

- ✓ la distance entre les deux électrodes E et H de courant est $2d$;
- ✓ la distance entre les deux électrodes E et ES de potentiel est a .

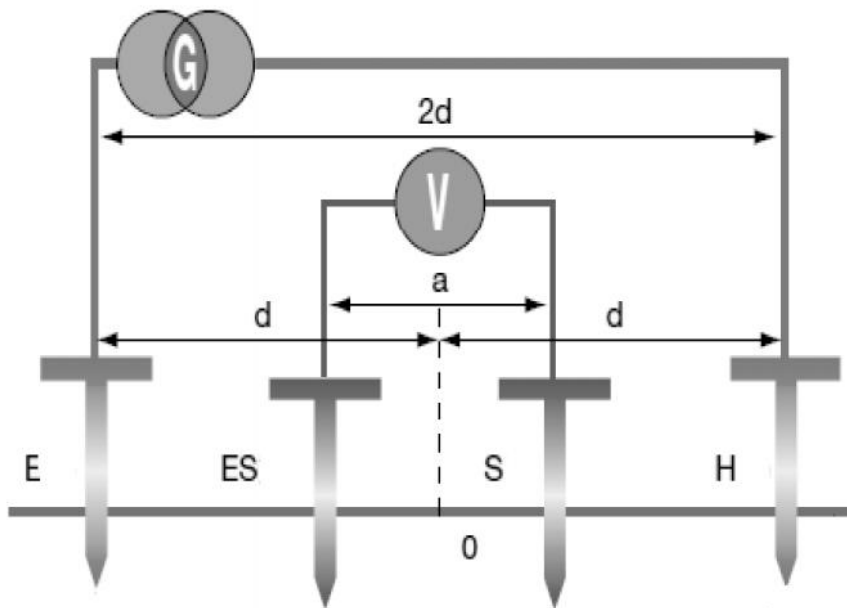


Figure II.18 : Schéma de mesure de la méthode de Schlumberger

La valeur de résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule [Chauvin, 2010].

$$\rho = \left[\pi \left(d^2 - \frac{a^2}{4} \right) R \right] / 4 \quad (\text{II.35})$$

La méthode de Schlumberger permet un gain de temps considérable sur le terrain notamment si l'on désire réaliser plusieurs mesures de résistivité. En effet, seules les deux électrodes de courant doivent être déplacées, contrairement à la méthode de Wenner nécessitant de déplacer les quatre électrodes en même temps [Chauvin, 2010]. La méthode de Schlumberger est utilisée souvent pour la stratification horizontale des terrains [Chouteau et Giroux, 2006].

II.11.3. Méthodes de mesure à 3 pôles

Bien souvent, un dispositif de mise à la terre est constitué de plusieurs prises de terre branchées en parallèle ou en série. La méthode de mesure à trois pôles (Figure II.19) donne la valeur de la résistance de terre équivalente à toutes les prises de terre du système (résistance de terre globale). Pour obtenir la valeur de la résistance d'une prise de terre individuelle, il faut déconnecter la prise de terre des autres. Mais surtout, cette méthode est peu pratique à mettre en œuvre dans de bonnes conditions. Il faut en effet, s'assurer que pendant la déconnexion de la prise de terre à contrôler, le dispositif de protection (disjoncteur différentiel) continue à être opérationnel, afin d'éviter tout risque d'électrocution de ceux qui travaillent sur le site. Pour éviter tout risque, il faut donc arrêter l'alimentation électrique de l'installation (ou de la partie de celle-ci concernée par la prise de terre à contrôler). Ceci n'est en général pas envisageable [Demuynck, 2002].

Il existe une méthode où il n'est plus nécessaire de déconnecter la résistance de terre qu'on appelle méthode de mesure sélective, cette méthode de mesure sélective permet de vérifier la conductivité de terres individuelles, de systèmes maillés, de terres de fondation et d'autres systèmes de mise à la terre. Elle permet également de mesurer la résistance des prises de terre individuelles sur des systèmes complexes comportant des systèmes maillés ou des réseaux de grilles, tels que ceux utilisés pour les postes de distribution publique, pour les pylônes des lignes à haute tension comportant des câbles de garde, et pour les installations industrielles à terres multiples. La mesure sélective utilise une pince ampérométrique en plus des deux piquets de mesure. Au lieu de prendre en compte le courant généré par le mesureur de terre, qui traverse donc tout le dispositif maillé, la pince ampérométrique permet de mesurer individuellement chaque courant qui passe dans chaque prise de terre. On parvient ainsi à éliminer l'influence des autres prises de terre en parallèle [Megger, 2010].

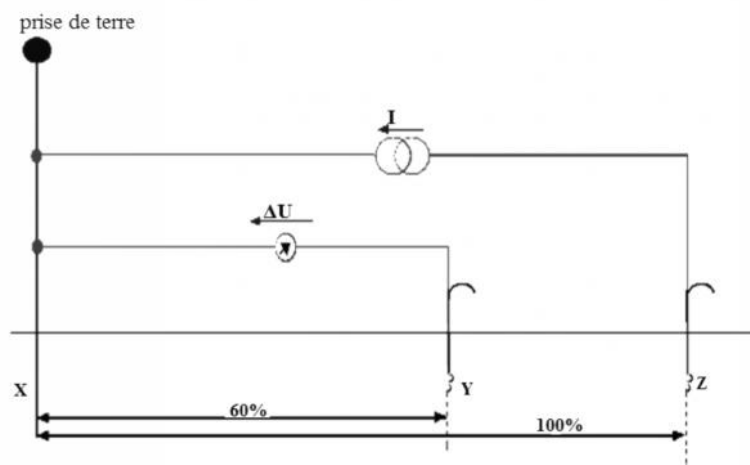


Figure II.19 : Principe de la méthode à 3 pôles

Le principe de la méthode de mesure à trois pôles repose sur trois éléments (Figure II.19).

Le premier est une prise de terre (X), les deux autres sont des piquets de terre. Le piquet situé le plus loin de la prise de terre assure le bouclage du courant I généré par l'ohmmètre de terre, c'est la sonde auxiliaire ou terre auxiliaire (Z). Le deuxième piquet est la sonde de tension (Y) qui permet de mesurer la différence de potentiel V par rapport à la prise de terre. La sonde de tension doit être positionnée entre la prise de terre et la sonde auxiliaire selon la règle des 62%. Cette règle qui consiste à placer la sonde de tension à 62% de la distance XZ permet de s'assurer de se trouver en dehors des zones d'influence de chaque pôle et donc de réaliser une mesure assez précise. Connaissant la différence de potentiel et le courant, on calcule la résistance de terre à l'aide de la loi d'ohm [Megger, 2010].

II.11.4. Mesures sans piquets de terre

La méthode sans piquets consiste à effectuer une mesure de résistance de boucle, sans planter de piquets (Figure II.20). On mesure les différentes résistances de terre sur des installations de mise à la terre complexes à l'aide de deux pinces ampérométriques. avec ce système, il n'est plus nécessaire de déconnecter les prises de terre parallèles, ce qui est dangereux et fastidieux, ni de rechercher la meilleure position pour les sondes. La méthode est basée sur le fait que dans les installations disposant de prises de terre multiples en parallèle, la résistance de terre effective globale est nettement inférieure à la résistance de terre individuelle qu'il faut mesurer. La première pince ampérométrique injecte une tension, tandis que la deuxième pince mesure le courant qui passe effectivement. L'appareil mesure alors la tension et le courant et calcule la résistance en question. Cette méthode n'est donc utilisable que dans le cas d'un réseau maillé. Lorsque le reste du système de mise à la terre n'est pas directement en parallèle de la prise de terre à mesurer, la mesure est impossible [Demuynck, 2002].

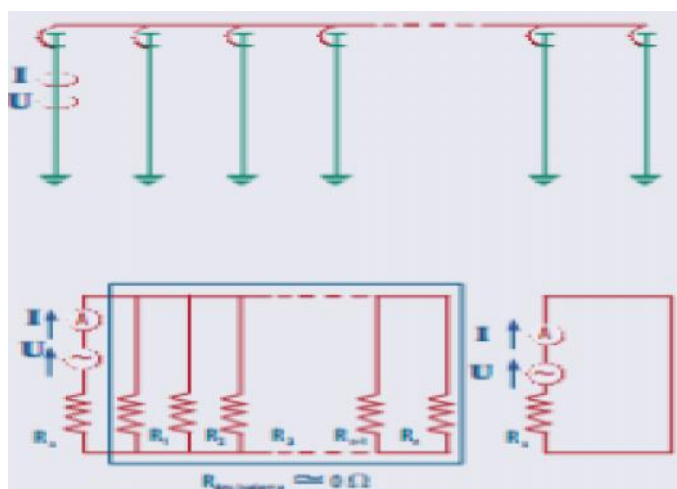


Figure II.20 : Principe de la méthode sans piquets

II.12. Conclusion

En général, les relations décrivant la résistance de mise à la terre proviennent de l'hypothèse que le sol a une structure homogène et une résistivité constante. En pratique, la résistivité du sol n'est pas homogène, le sol est constitué de plusieurs couches de résistivités différentes. Les modèles du sol uniforme et en deux couches de résistivités différentes sont les plus utilisés. Cependant, pour plus de précision dans les calculs, on peut appliquer le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes.

La mesure de la résistivité du sol permet la détermination de la résistance de celui-ci. Il existe, en effet, diverses méthodes pour mesurer la résistivité de terre. Les plus populaires sont la méthode de Wenner et celle de Schlumberger. La première est employée souvent pour la stratification verticale des terrains. La deuxième est utilisée souvent pour la stratification horizontale des terrains.

Chapitre 3

Simulation et modélisation d'un système de terre de trois tiges parallèles

III.1. Introduction :

Une évaluation fiable du régime transitoire de la foudre s'écoulant dans un système de mise à la terre, nécessite une modélisation convenable et précise des composants de ce dernier. En effet, le modèle d'une résistance, malgré qu'il soit simple et suffisant pour certains cas d'études, il ne donne pas assez d'informations et de précision, vu que [Visacro et De Conti, 2007]:

- il n'est valable que pour les basses fréquences ; à des fréquences élevées le modèle de la résistance devient de plus en plus non-approprié et donne des résultats qui divergent de la réalité ;
- les paramètres du sol (,) sont liés à la fréquence ;
- l'ionisation du sol se manifeste à des courants élevés.

Dans ce chapitre, nous étudions l'impédance d'un modèle de terre, sous forme de trois (3) tiges en parallèle, utilisé fréquemment pour la mise à la terre des parafoudres ou des clôtures avec mise à la terre. Nous proposons pour ce modèle un circuit RC équivalent. Ce dernier est destiné à être facile à mettre en œuvre que les modèles de terre rigoureux disponibles dans la littérature, mais suffisamment précis pour fournir des résultats raisonnables dans certaines limites. Il est également destiné à être une meilleure alternative pour l'étude des surtensions de foudre que le modèle d'une résistance simple.

III.2. Présentation du logiciel FEMM :

C'est un logiciel basé sur les éléments finis 2D cartésien et 2D axisymétrique dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques. Ce logiciel est destiné aux problématiques du génie électrique : ses menus utilisent le vocabulaire du domaine et il possède un ensemble de pré et de post-traitement dédié à ces problématiques (introduction de la courbe B(H) pour les matériaux magnétiques non linéaires, conditions de périodicité, calcul des pertes par effet Joule, visualisation des champs électromagnétiques, calcul de forces électromagnétiques, etc).

Il est constitué de trois modules principaux : [Teresa Gomez-Diaz, 2012]

- Un module "Pré-processeur et Post-processeur" qui permet, à travers d'une interface graphique, la saisie de la géométrie et la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis. La saisie de la géométrie peut se faire avec la définition de points clefs que l'on relie pour former des régions ou par l'importation de structures AUTOCAD au format DXF. Ce module intègre également des outils de post-traitement : visualisation et différents calculs inhérents au problème (inductance, flux, pertes Joule, etc.)

- Un module de maillage (logiciel Triangle) qui permet d'obtenir une triangulation de chaque région du domaine de calcul.
- Un module de résolution par éléments finis : ce solveur 2D cartésien et axisymétrique permet de résoudre des problèmes d'électrostatique linéaires, de magnétostatique linéaires et non linéaires, de magnétodynamique en régime harmonique linéaires et non linéaires et de thermique en stationnaire.

III.3. Etude de l'impédance pour un système de trois tiges :

Nous étudions dans ce qui suit, l'impédance d'un système de mise à la terre de 3 tiges parallèles. Ces dernières sont faites en cuivre et représentées avec leurs dimensions et les conditions aux limites sur la figure III.1. Nous nous sommes intéressés à l'étude d'un tel système via son impédance, dans les basses et les hautes fréquences.

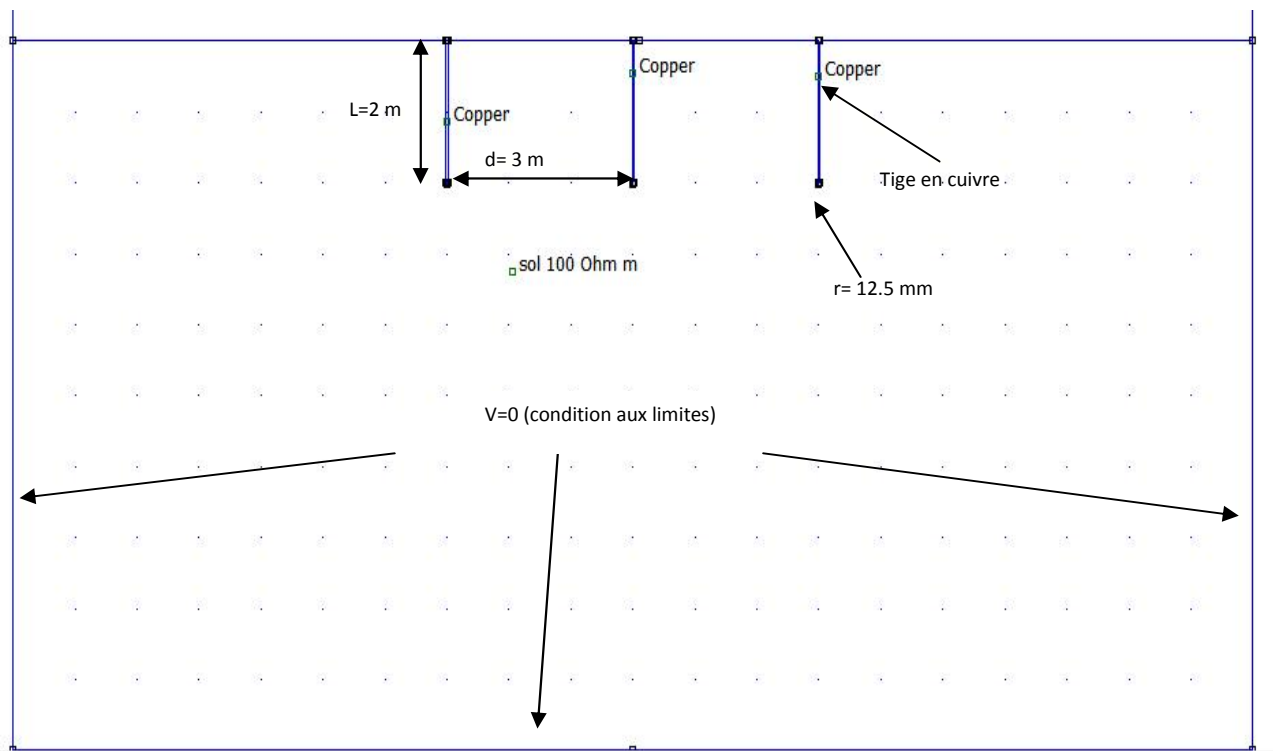


Figure III.1 : Système de mise à la terre sous forme de 3 tiges verticales sous environnement FEMM 4.2

III.3.1. Basses Fréquence :

Pour les fréquences qui ne dépassent pas la fréquence de coupure, le modèle de terre à N tiges est représenté par une résistance simple R donnée par la relation II.21 (mentionnée dans le chapitre 2) suivante [EDF, 1984] :

$$R \approx \frac{1}{N} \left[\frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{N} \right) \right]$$

Pour notre cas (3 tiges) nous prenons N=3 :

$$R \approx \frac{1}{3} \left[\frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6} \frac{\rho}{\pi d} \right] = \frac{\rho}{3} \left[\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right] \dots \text{(III.1)}$$

d : Distance entre les électrodes ;

ρ : Résistivité du sol ;

r : Rayon de l'électrode ;

l : Longueur de l'électrode ;

N : Nombre de tiges.

La résistivité est exprimée comme suit [Bernou, 2011]:

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \dots \text{(III.2)}$$

Pour un sol homogène, la résistivité ne dépendant pas de la fréquence lorsque celle-ci est basse, s'exprime comme suit:

$$\rho = \frac{E}{J} \dots \text{(III.3)}$$

E : Champ électrique en (V/m) ;

J : Densité surfacique du courant en (A/m²).

Nous avons utilisé le logiciel FEMM 4.2 pour calculer la résistance de notre système de mise à la terre à fréquence industrielle 50 Hz.

Afin de valider ce logiciel, les résultats ainsi trouvés sont comparés à celles trouvées par la relation analytique III.1. Pour cela, différentes valeurs de la résistivité du sol allant de 100 jusqu'à 2000 Ωm et trois valeurs de la permittivité relative ($\epsilon_r=5$, $\epsilon_r=15$ et $\epsilon_r=30$) ont été choisies.

L'ensemble des résultats trouvés est présenté dans le tableau III.1.

$r=5$						
(Ωm)	100	200	350	1000	1500	2000
R(Ω) par la relation (numéro)	17.434	34.869	61.020	174.343	261.515	348.686
R(Ω) par le FEMM 4.2	17.434	34.868	61.022	174.288	261.503	348.248
$r=15$						
(Ωm)	100	200	350	1000	1500	2000
R(Ω) par la relation (numéro)	17.434	34.869	61.020	174.343	261.515	348.686
R(Ω) par le FEMM 4.2	17.434	34.869	61.023	173.853	259.859	344.818
$r=30$						
(Ωm)	100	200	350	1000	1500	2000
R(Ω) par la relation (numéro)	17.434	34.869	61.020	174.343	261.515	348.686
R(Ω) par le FEMM 4.2	17.434	34.869	61.023	172.409	255.107	333.944

Tableau III.1 : Résistance analytique (relation III.1) et numérique (FEMM).

D'après le tableau les résultats analytiques et numériques sont pratiquement les mêmes. En effet, le modèle d'une résistance simple est suffisant pour modéliser une prise de terre pour les basses fréquences. Cependant, la résistance devient dépendante de la fréquence si cette dernière dépasse une certaine valeur dite de coupure.

III.3.2. Hautes fréquences :

Comme nous l'avons cité auparavant, le modèle d'une résistance simple n'est plus valable pour les hautes fréquences. Dans cette section, nous étudions l'impédance du même système de mise à la terre en fonction de la fréquence. Pour cela, l'utilisation du FEMM pour le calcul de

l'impédance est indispensable vu que la formule analytique III.1 n'est valable que dans les basses fréquences :

Nous avons :

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}}$$

avec $\vec{E} = \vec{E}_n + \vec{E}_t$ (III.4)

et $\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_t$ (III.5)

Nous pouvons écrire \vec{E} et \vec{J} sous la forme complexe suivante : $\vec{E} = |E| e^{j\theta_E}$ (III.6)

$$\vec{J} = |J| e^{j\theta_J} \quad \dots(III.7)$$

Dans ces conditions, l'expression de ρ devient: $\rho = \frac{|E|}{|J|} e^{j(\theta_E - \theta_J)}$ (III.8)

En combinant les deux relations III.1 et III.8, l'impédance de notre système peut être exprimée par :

$$|Z| = \frac{|E|}{3|J|} \left[\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right] \quad \dots (III.9)$$

avec :

Z : Impédance du système de mise à la terre (Ω) ;

\vec{E} : Vecteur champ électrique (A/m) ;

\vec{E}_n, \vec{E}_t : Composantes normales et tangentielles du vecteur champs électrique \vec{E} ;

\vec{J} : Vecteur densité volumique de courant ;

\vec{J}_n, \vec{J}_t : Composantes normales et tangentielles du vecteur densité de courant.

Le FEMM 4.2 nous donne directement les valeurs de $|E|$ et $|J|$, ce qui nous permettra de calculer l'impédance de mise à la terre (3 tiges parallèles). La figure III.2 nous montre les variations de cette impédance $|Z|$ en fonction de la fréquence, pour des différentes résistivités de la terre (200, 500, 1000 et 2000 Ωm) et pour une permittivité relative $\epsilon_r=30$

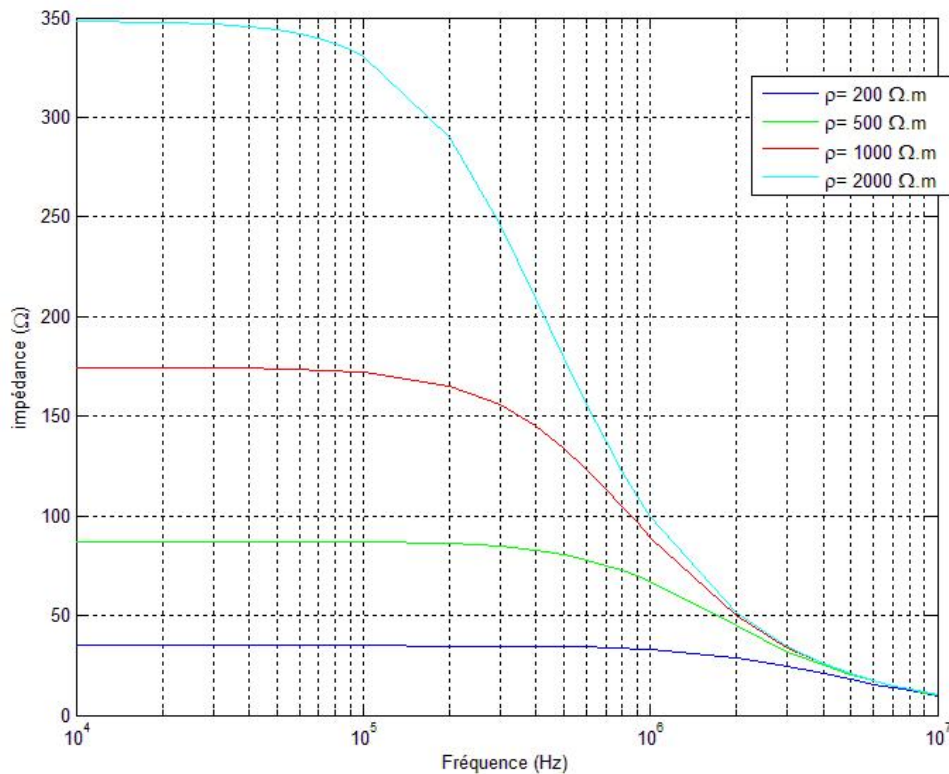


Figure III.2 : Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour $\rho=30$ et $\rho=200, 500, 1000$ et $2000 \Omega \cdot m$

L'impédance $|Z|$ augmente avec l'augmentation de la résistivité de la terre. Ceci nous ramène à dire qu'il faut faire une étude des caractéristiques du sol et en particulier sa résistivité avant de dimensionner un système de mise à la terre.

Nous remarquons également, que la variation de l'impédance en fonction de la fréquence met en évidence deux phases. Durant la première correspondant aux basses fréquences, l'impédance est constante, ce qui est traduit par le comportement purement résistif du système. Dans la deuxième phase, l'impédance du système commence à diminuer à partir de la fréquence de coupure. Nous remarquons qu'à des fréquences dépassant les 10 MHz, les valeurs de l'impédance chutent jusqu'à une valeur limite d'environ 10 Ω.

La fréquence de coupure varie avec la résistivité du sol. En effet, elle diminue avec l'augmentation de la résistivité. Nous avons enregistré les fréquences de coupure de 1 MHz, 300, 100 et 20 kHz pour les résistivités 200, 500, 1000 et 2000 Ω.m respectivement. Nous remarquons qu'à des fréquences dépassant les 10 MHz, les valeurs de l'impédance chutent jusqu'à une valeur faible d'environ 10 Ω.

Discussion :

En magnétostatique, le théorème d'Ampère lie la circulation de l'induction magnétique sur un contour fermé, et le courant I qui traverse toute surface S s'appuyant sur ce contour [M.Meyer, 2008]:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I \quad \dots(\text{III.10})$$

Sous forme locale, la circulation de l'induction magnétique s'écrit en termes du vecteur densité de courant \vec{J} :

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad \dots(\text{III.11})$$

Maxwell a complété l'équation locale précédente, en introduisant le courant de déplacement \vec{J}_d de

$$\text{Maxwell : } \vec{J}_d = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

relation III.11 devient :

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu (\vec{J} + \vec{J}_d) = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \dots(\text{III.12})$$

En utilisant les formes sinusoïdales complexes des vecteurs \vec{E} et \vec{J} tels que : $\vec{E} = E e^{j\omega t}$;
 $\vec{J}_d = J_d e^{j\omega t}$.

$$\text{Nous aurons: } J_d e^{j\omega t} = \epsilon \frac{\partial (E e^{j\omega t})}{\partial t} \quad \dots(\text{III.13})$$

pour un sol homogène : $E = \rho J$

$$\text{L'équation III.13 peut s'écrire : } J_d e^{j\omega t} = \epsilon \frac{\partial (\rho J e^{j\omega t})}{\partial t} = \epsilon \rho J \frac{\partial e^{j\omega t}}{\partial t} = j\omega \epsilon \rho J e^{j\omega t} \quad \dots(\text{III.14})$$

$$\text{Enfin, le module du courant de déplacement: } |J_d| = \rho \epsilon \omega |J| \quad \dots(\text{III.15})$$

On sait que $\sigma = 1/\rho$ (σ est la conductivité du sol) donc $\rho = \frac{\omega \epsilon}{\sigma}$

σ : Conductivité du sol

ϵ : Permittivité du sol

\vec{J}_d : vecteur courant de déplacement

μ : La perméabilité du sol

: la pulsation du signal injecté vers les électrodes de terre

La figure III.3 représente la variation du rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ en fonction de la fréquence, pour $r = 500$ m et $r = 30$. Pour des fréquences dépassant 1MHz, le rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ devient très petit et quasiment nul. Ce qui correspond à un facteur assez élevé. Dans ces conditions, le courant de déplacement est beaucoup plus important que le courant de conduction de la terre.

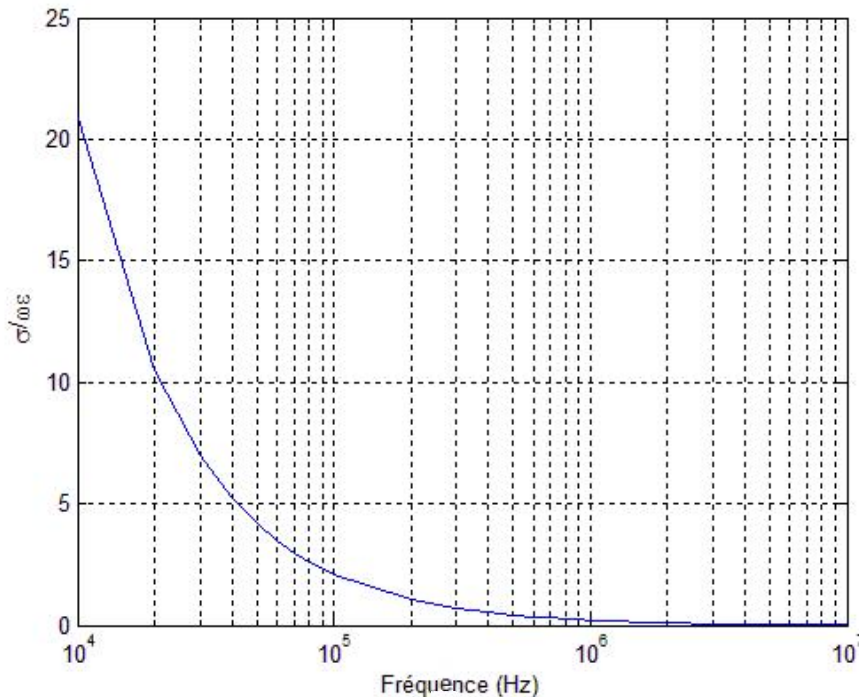


Figure III.3: Variation du rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ en fonction de la fréquence, pour $r = 500$ m et $r = 30$

D'après cette figure, le rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ est inversement proportionnel en fonction de la fréquence, car la pulsation $\omega = 2\pi f$. Pour les basses fréquences, le rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ est important. Ceci correspond à de faibles courants de déplacement. Le système de mise à la terre est modélisé par une simple résistance. Cependant, pour des fréquences assez élevées c'est-à-dire $f \approx 10^6$ Hz, l'effet du courant de déplacement apparaît de manière évidente et devient aussi important que le courant de conduction, ce qui engendre une diminution considérable de l'impédance. Dans ces conditions, le système de mise à la terre est simulé par un circuit RC parallèle. Cette analyse a été confirmée par Visacro et De Conti [Visacro et De Conti 2007].

III.3.3. Variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes permittivités :

Le rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$, considéré comme paramètre important, permet d'expliquer aussi l'évolution de l'impédance de notre système que celle de la fréquence de coupure en fonction des paramètres électriques du sol (résistivité et permittivité). Pour une résistivité du sol donnée (σ est fixe), Le rapport montre que le courant de déplacement augmente avec la fréquence ; l'impédance diminue en conséquence. Par ailleurs, lorsque la permittivité croît, le courant de déplacement augmente et l'impédance totale diminue.

La figure III.4 illustre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes permittivités.

Cette figure montre que l'augmentation de la permittivité relative conduit à une diminution de la fréquence de coupure. Par ailleurs, l'augmentation de la résistivité engendre une diminution du rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$. Ce qui conduit à une augmentation du courant de déplacement. Dans ces conditions, l'impédance capacitive diminue. En revanche, la résistance a augmenté avec la résistivité. L'augmentation de l'impédance totale est due au fait que l'augmentation de la résistance est plus significative que la diminution de l'impédance capacitive l'impédance.

Pour une résistivité donnée, la résistance correspondante est invariante. L'augmentant des valeurs de la fréquence ou de la permittivité du sol, dans ces circonstances, entraîne la diminution du rapport $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$. Cela implique aussi une augmentation du courant de déplacement. Ce qui engendre la diminution de la capacité et par conséquent de l'impédance totale diminue.

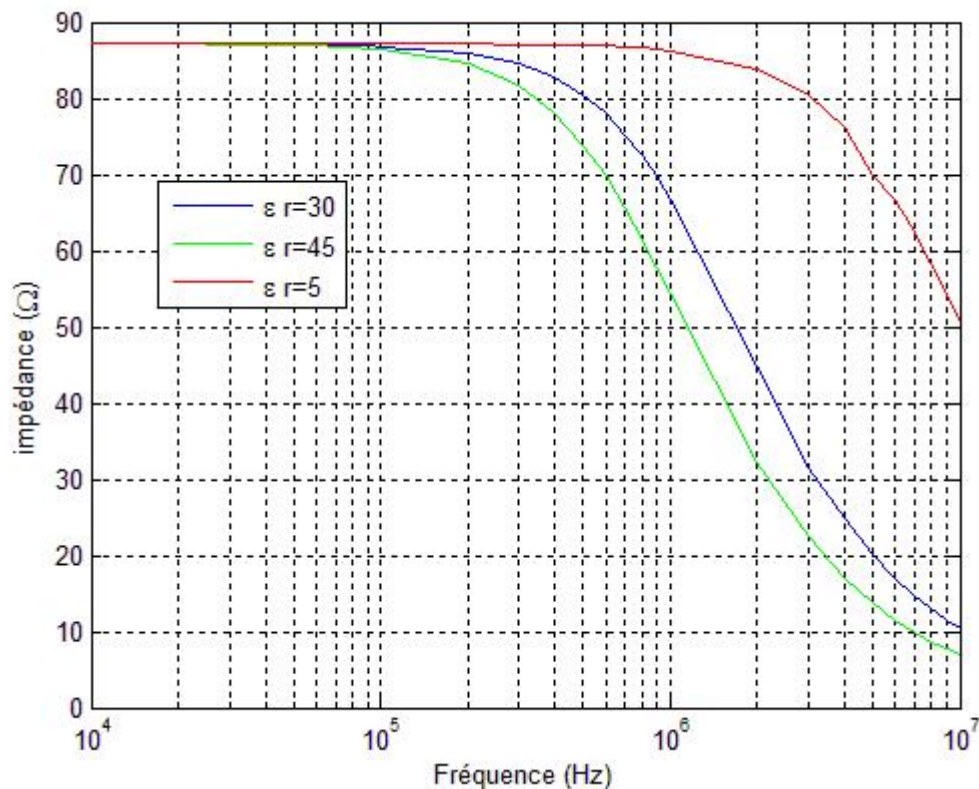


Figure III.4 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction de la fréquence pour $\epsilon_r=500$ et $r=5, 30, 45$

III.4. Limites du FEMM 4.2 :

Le logiciel FEMM 4.2 nous permet de déterminer l'impédance de mise à la terre, et de varier les paramètres du sol et du matériau utilisé. Néanmoins, les limites du FEMM apparaissent en comparant, pour le même système de terre, nos résultats avec ceux obtenus par Visacro et De Conti [2007]. Cependant, l'évolution de l'impédance en fonction de la fréquence (Figure III.5), trouvée pas ces deux auteurs, présente des pics de résonance pour les ultra fréquences dépassant les 2 MHz. De tels sont dus, selon les mêmes chercheurs, à l'effet inductif de la configuration de mise à la terre dans cette gamme de fréquence. Etant donné que ces pics n'apparaissent lors de l'utilisation du logiciel FEMM 4.2, ce dernier ne prend pas en considération ce phénomène, même pour des fréquences dépassant 5 MHz.

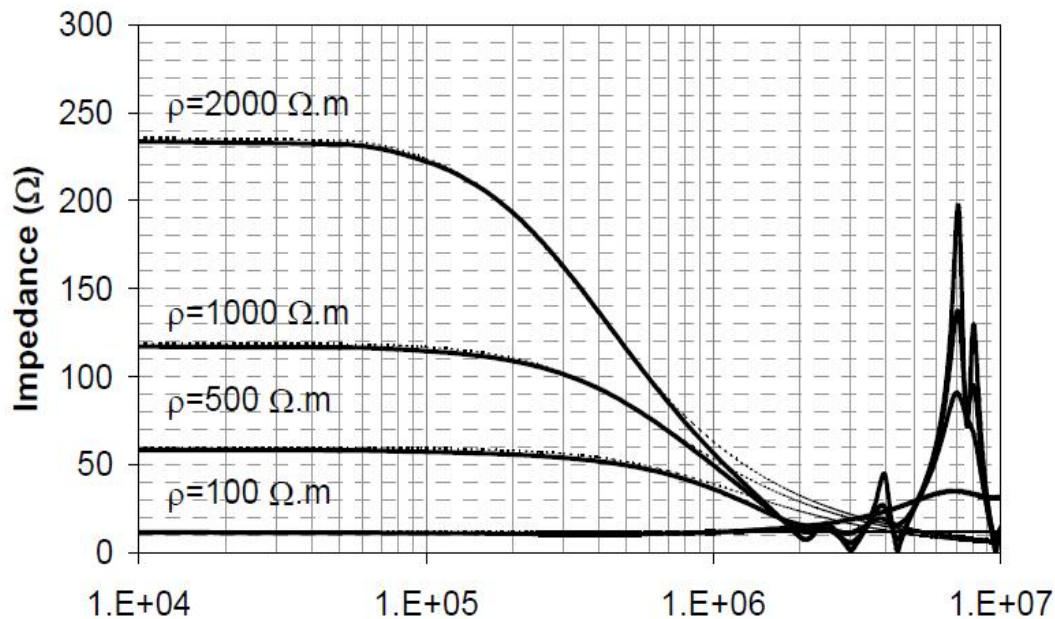


Figure III.5 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction de la fréquence étudié par Visacro et De Conti 2007

III.5. Circuit électrique équivalent :

L'étude de la variation de l'impédance nous a permis de constater qu'une simple résistance n'est pas valable à représenter réellement le système de terre pour les hautes fréquences. Ce qui revient à dire que l'impédance totale dépend de la fréquence. En effet, un circuit RC parallèle sera plus convenable comme modèle pour notre configuration de système de mise à la terre, tout en prenant en compte les considérations suivantes :

- Le domaine d'étude se limite à quelques MHz. Pour un certain niveau de fréquence, le modèle RC parallèle ne sera pas en concordance avec les résultats réels du fait du phénomène d'ionisation du sol qui apparait en ultra-fréquence.
- Malgré le fait que l'effet inductif n'apparaisse pas de manière importante en ultra-fréquence, la résistance doit être suffisamment grande de manière à limiter et neutraliser cet effet.

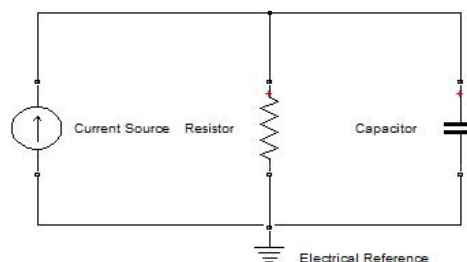


Figure III.6 : Circuit RC parallèle équivalent pour la configuration 3 tiges en parallèle de mise à la terre

L'impédance du circuit précédent s'écrit comme suit :

$$Z_{RC} = \frac{R}{1+(RC\omega)^2} - j \frac{R^2 C\omega}{1+(RC\omega)^2} \dots\dots(\text{III.16})$$

où par la forme trigonométriques : $Z_{RC} = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}} e^{-j.\text{arctg}(RC\omega)} \dots\dots(\text{III.17})$

avec : $|Z_{RC}| = R/\sqrt{1+(RC\omega)^2} \dots\dots(\text{III.18})$

R : la résistance du circuit équivalent trouvée à l'aide de la formule III.1 en basses fréquences.

C : la capacité du circuit équivalent donnée par la formule [Visacro et Di Conti]

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\frac{1}{3} \left[\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right]} \dots\dots(\text{III.19})$$

avec $\rho = \rho_0 \left(\rho_0 = 8,85418782 \times 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \right)$

Nous dressons le tableau suivant relatif aux valeurs de la résistance et de la capacité pour différentes résistivités ($\rho = 200, 500, 1000 \text{ et } 2000 \Omega\text{m}$) et permittivités relatives ($\epsilon_r = 5, 15, 30, 45$) du sol.

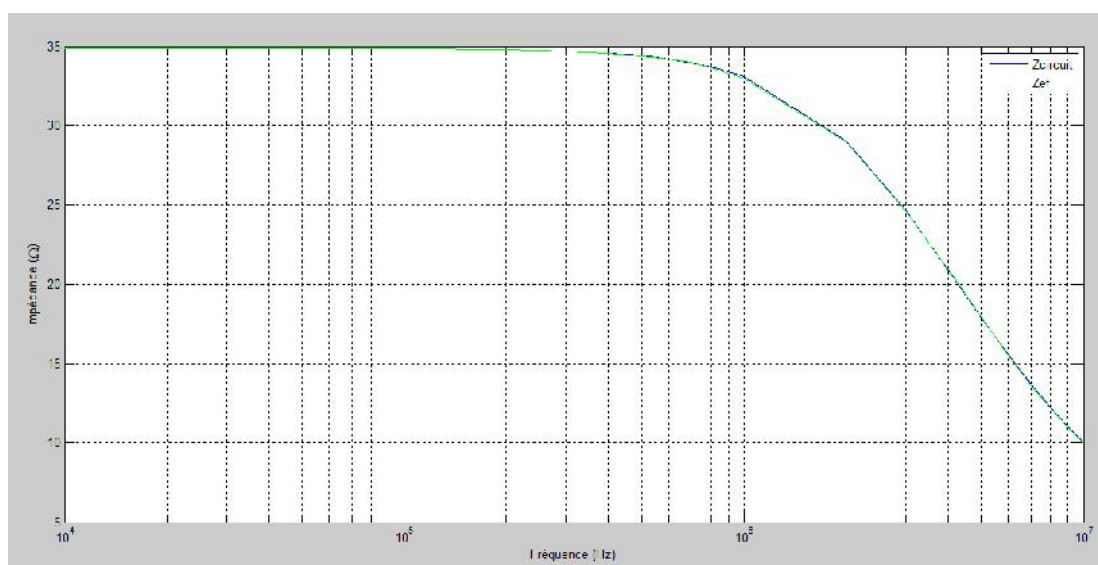
$\rho = 200 \Omega\text{m}$				
ϵ_r	5	15	30	45
R (Ω)	35	35	35	35
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285
$\rho = 500 \Omega\text{m}$				
ϵ_r	5	15	30	45
R (Ω)	87	87	87	87
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285
$\rho = 1000 \Omega\text{m}$				
ϵ_r	5	15	30	45

R (Ω)	174	174	174	174
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285
=2000 Ω m				
r	5	15	30	45
R (Ω)	348	348	348	348
C (nF)	0.254	0.762	1.524	2.285

Tableau III.2 : les valeurs de la résistance R et la capacité C du circuit électrique équivalent

Nous remarquons que la résistance ne dépend que de la résistivité du sol et ceci de manière linéaire comme le montre la formule III.1. Quant à la capacité, elle ne varie que linéairement en fonction de la permittivité relative du sol ($C = \frac{\rho \varepsilon}{R} = \frac{\rho \varepsilon_r \varepsilon_0}{constane \cdot \rho} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{constane} = A \cdot \varepsilon_r$)

Les trois figures III.7.a, III.7.b, III.7.c présentent les caractéristiques relatives à l'évolution de l'impédance de la terre en fonction de la fréquence trouvée en se basant le modèle RC proposé, et celle déterminée via le FEMM, respectivement pour les résistivités du sol de 200, 500 et 2000 Ω m. Etant donné que les courbes sont confondues, le modèle RC est bien valide et convenable pour représenter la configuration de notre système de mise à la terre (3 tiges en parallèle).



(a) : =200 Ω m

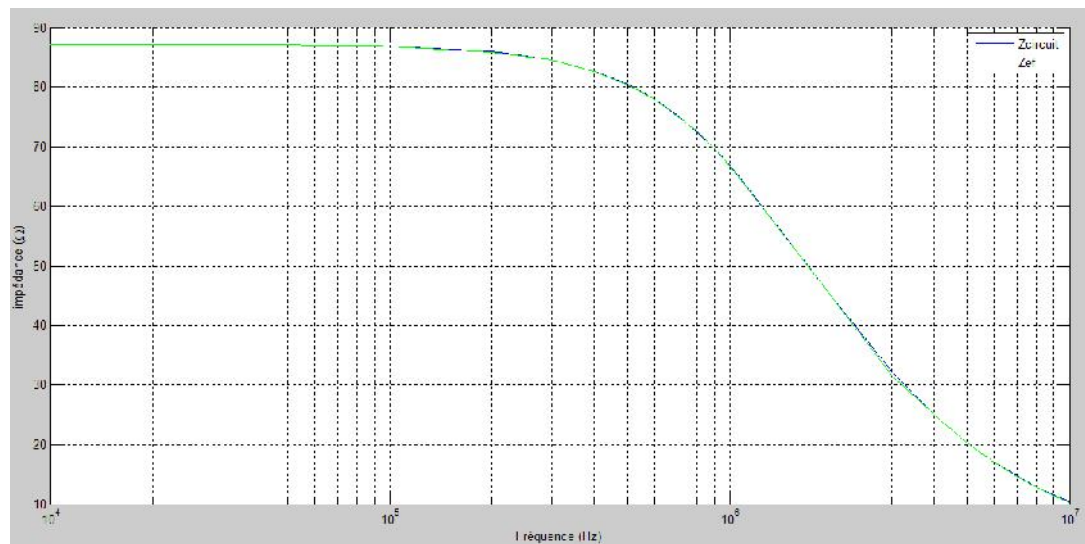
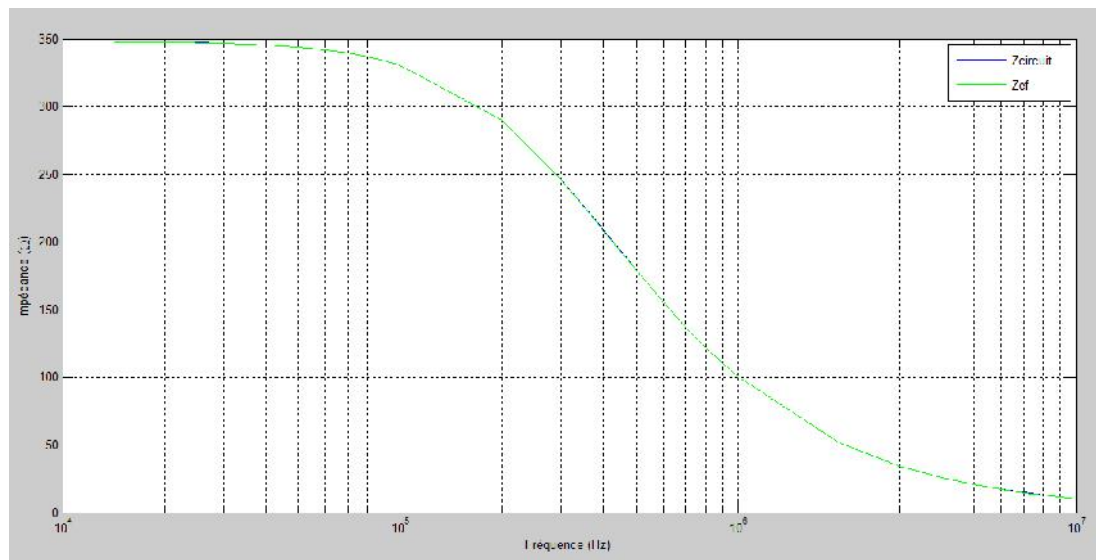
(b) : $\rho = 500 \Omega\text{m}$ (c) : $\rho = 2000 \Omega\text{m}$

Figure III.7 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM Z_{ef} et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent $Z_{circuit}$

III.6. Choc de foudre :

III.6.1. Choc de foudre généralisé :

La foudre est un phénomène perturbant de manière considérable le fonctionnement de toutes les installations électriques :

- Les différents niveaux de puissance et de tension sont concernés : du transport d'énergie THT jusqu'aux circuits intégrés en passant par les alimentations BT et les transmissions de données et les configurations des mises à la terre.
- Elle peut être à l'origine de perturbations momentanées du service et de la qualité des alimentations.
- Elle peut causer des destructions de matériels, et en conséquence de longues interruptions du service.
- Elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre). [Benoît de Metz-Noblat, 1993]

L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Cette foudre génère une surtension importante.

Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé. Plusieurs décharges secondaires apparaissent après la décharge principale à environ de 100 ms.

- L'amplitude des courants des CdF (Coups de Foudre) positifs peut être considérable, supérieure à 150 kA dans 10% des cas. Dans 50% des cas, l'intensité du courant est de 25 kA.

- L'amplitude des CdF négatifs est moins grande. Dans 10% des cas, elle est de l'ordre de 50 kA.

Dans

50% des cas, l'intensité des CdF négatifs est de 18 kA [A.Tilmatine, 1999].

III.6.2. Onde de foudre :

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps. La forme d'onde réelle est très variable (Figure III.8). Elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelques microsecondes à 20 microsecondes) suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes. Le domaine spectral associé s'étend dans une bande de 10 kHz à plusieurs MHz) [Benoît de Metz-Noblat, 1993].

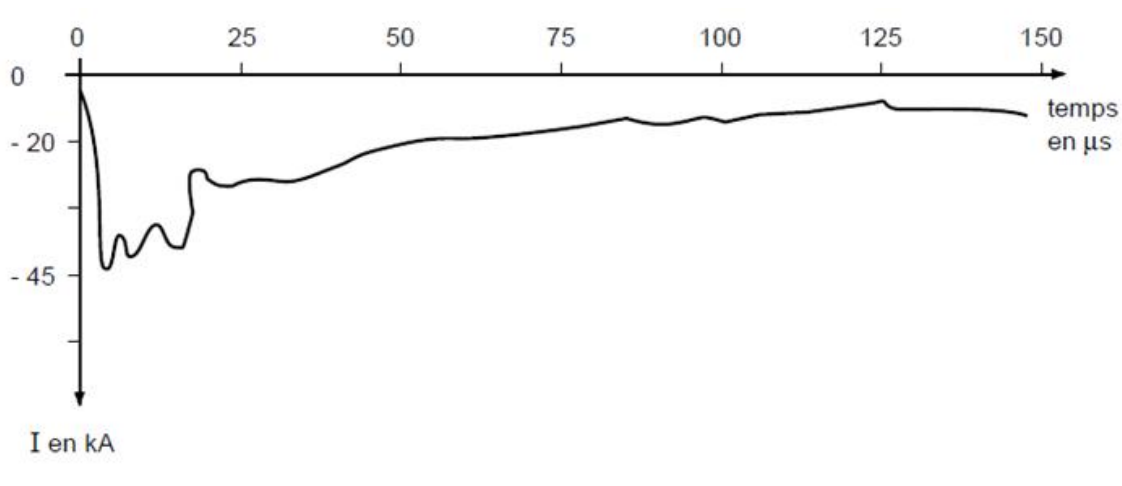


Figure III.7: oscillogramme d'un courant de foudre

L'onde de choc conventionnelle est une onde normalisée que tous les constructeurs d'appareillage électriques utilisent pour effectuer les tests de contrôle ou de simulation du comportement des appareils électriques et appareils de protection contre la foudre. La forme de l'onde de choc à appliquer est fixée par les recommandations CEI 60 [IEC 60071, 1996]. L'onde conventionnelle universellement admise comme représentative du courant de foudre est l'onde pleine dite 1,5/50 µs. Elle est caractérisée par une durée de montée $T_1=1.2$ µs et une durée de mi-amplitude $T_2 = 50$ µs (Figure III.8).

Cette onde est la somme de deux exponentiels et s'écrit sous la forme suivante [A.Boubakeur, 2012].

$$I = I_0 \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad \dots(\text{III.20})$$

avec :

$$\approx 1 \text{ et}$$

I_0 : Valeur de crête (l'amplitude maximale de l'onde) = 100 kA ;

$$T_1 \approx 2,7 \cdot \tau_1 ;$$

$$T_2 \approx 0,7 \cdot \tau_2.$$

La figure III.8 illustre l'onde ayant l'équation analytique III.20.

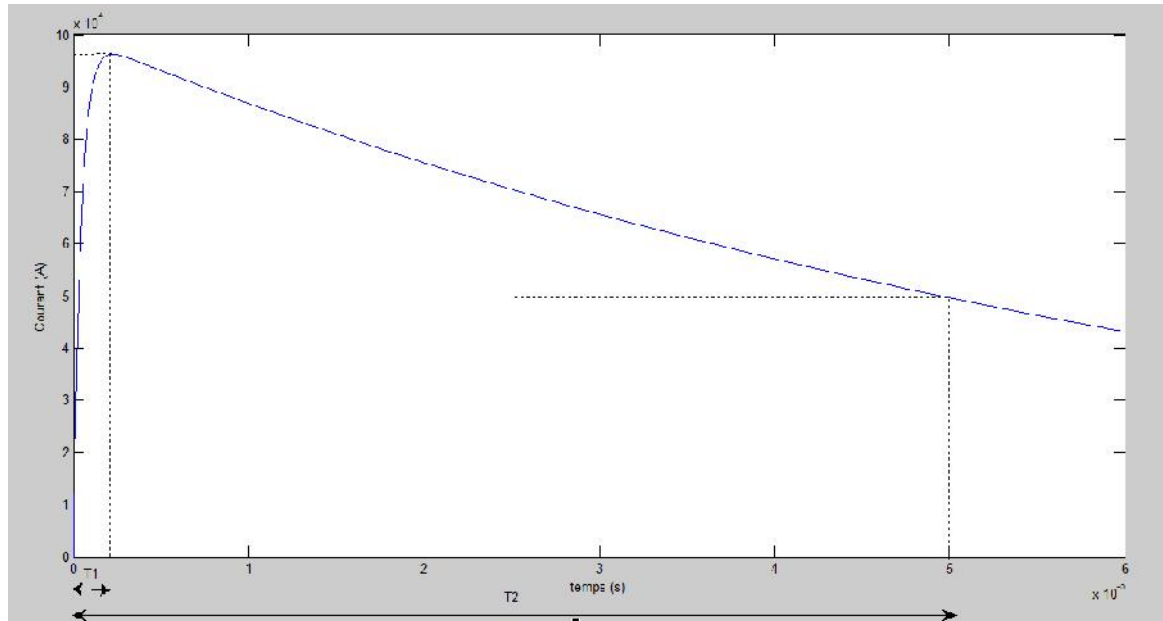


Figure III.8: Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50 μ s

III.6.3. La tension de sortie du circuit soumis à une onde de courant de foudre :

Dans le but d'étudier le comportement du circuit RC parallèle équivalent (Figure III.9) que nous avons proposé, nous lui injectons une onde de courant de foudre normalisé 1.2/50 μ s de valeur de crête égale à 100 kA. Nous reproduisons et étudions l'évolution de la tension. Pour cela, nous fixons dans le premier cas, la permittivité et faisons varier la résistivité. Dans le deuxième cas, nous fixons la résistivité et faisons varier la permittivité.

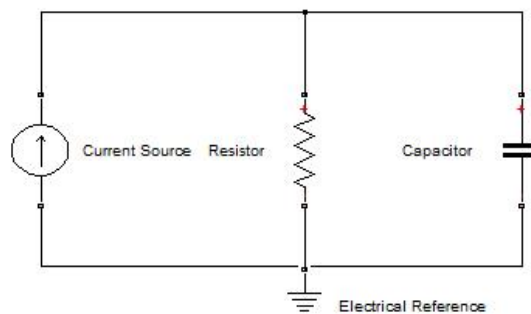


Figure III.9 : Circuit RC parallèle équivalent pour la configuration 3 tiges en parallèle de mise à la terre

En écrivant les équations de maille de ce circuit, la tension V aux bornes de la résistance (identique à celle aux bornes de la capacité) s'écrit comme suit :

$$V = R \cdot i_r = R (i - i_c) \text{ avec } i_c = c \frac{dV}{dt}$$

$$\text{donc } V = Ri - RC \frac{dV}{dt}$$

$$\text{D'où: } \dot{V} = -\frac{1}{RC} V + \frac{1}{c} I \quad \dots(\text{III.21})$$

Il s'agit d'une équation différentielle du premier ordre de la forme : $\dot{X} = aX + bU$. Elle a comme solution :

$$X = X_0 e^{at} + \int_0^t b U(\tau) e^{a(t-\tau)} d\tau$$

avec: X_0 : valeur initiale

$$\text{Dans notre cas : } X = V ; a = -\frac{1}{RC}; b = \frac{1}{c}; U = I$$

$$\text{avec : } I = I_0 \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \text{ et } T_1 \approx 2,7 \cdot \tau_1 \text{ et } T_2 \approx 0,7 \cdot \tau_2$$

$$\text{Par conséquent: } I = I_0 \left(e^{-\frac{0,7t}{T_2}} - e^{-\frac{2,7t}{T_1}} \right)$$

Sachant que: $V_0 = V(t=0) = 0$

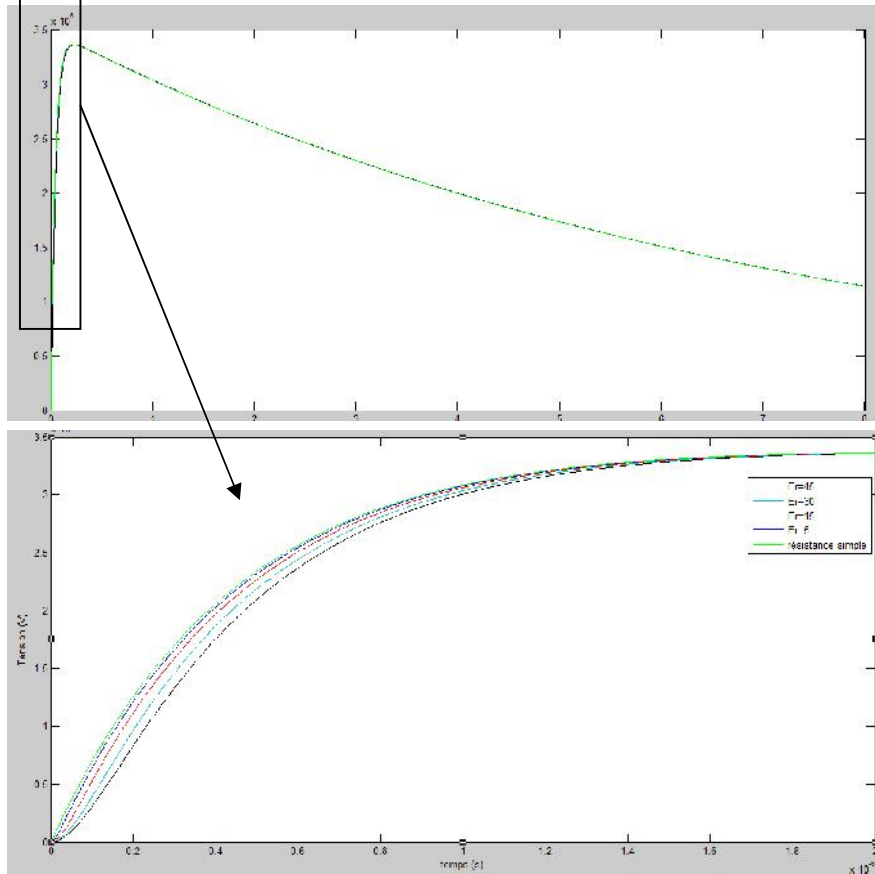
En tenant compte de la condition initiale précédente, la solution de l'équation III.21 devient:

$$V = \frac{1}{c} I_0 \int_0^t \left(e^{-\frac{0,7\tau}{T_2}} - e^{-\frac{2,7\tau}{T_1}} \right) e^{-\frac{1}{RC}(t-\tau)} d\tau$$

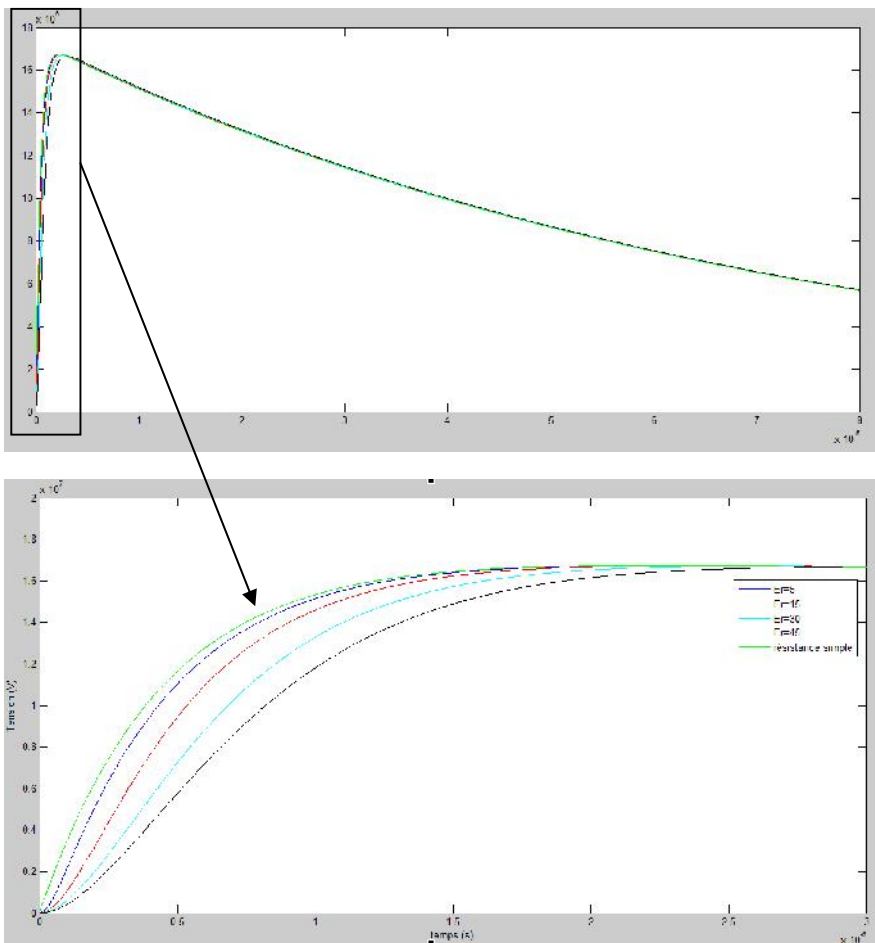
finalement :

$$V = \frac{1}{c} I_0 \left[\frac{1}{-\frac{0,7}{T_2} + \frac{1}{RC}} e^{-\frac{0,7}{T_2}t} - \frac{1}{-\frac{2,7}{T_1} + \frac{1}{RC}} e^{-\frac{2,7}{T_1}t} - \left(\frac{-\frac{0,7}{T_2} + \frac{2,7}{T_1}}{\left(\frac{2,7}{T_1} + \frac{1}{RC} \right) \left(-\frac{0,7}{T_1} + \frac{1}{RC} \right)} \right) e^{-\frac{1}{RC}t} \right] \dots(\text{III.22})$$

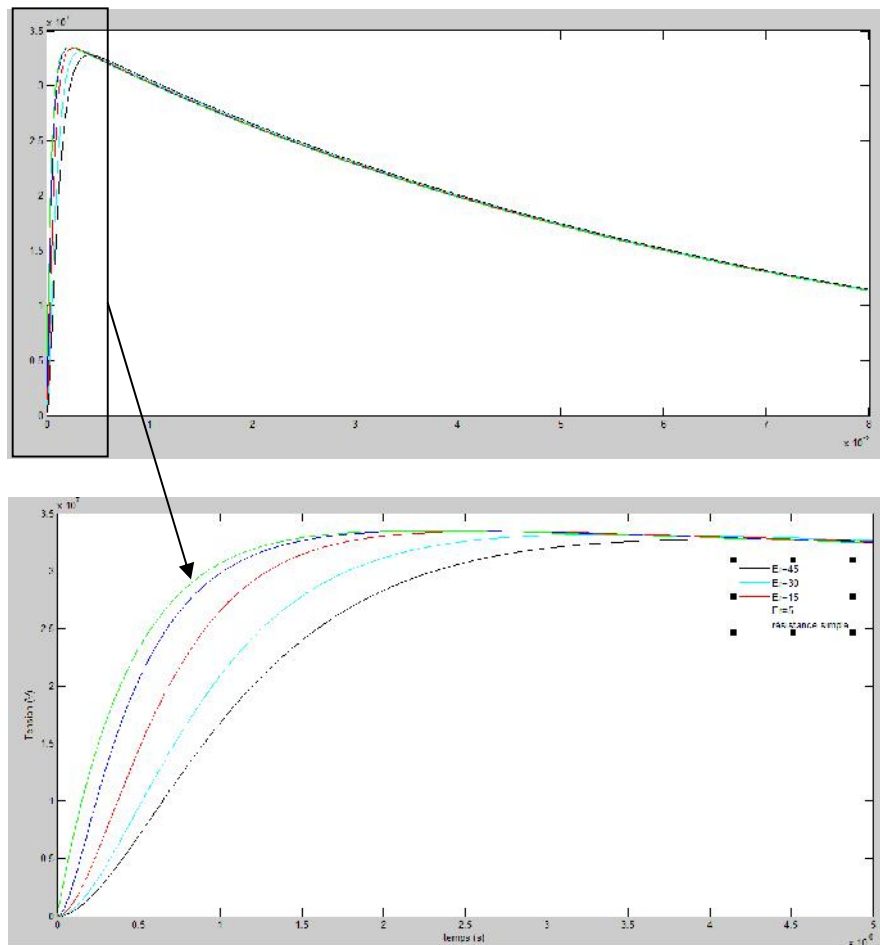
A partir des valeurs de la résistance et de la capacité présentées dans le tableau III.2, nous avons calculé la tension V en utilisant la formule précédente. Les figures III.10.a, III.10.b, III.10.c illustrent la variation temporelle de la tension de sortie V , pour différentes résistivités et permittivités.



(a) : = 200 hm



(b) : = 1000 hm



(c) : $\rho = 2000 \Omega\text{m}$

Figure III.10: Variation de la tension de sortie du circuit équivalent RC parallèle pour différentes permittivités du sol

Ces graphes montrent que la réponse du circuit RC à une onde de foudre suit pratiquement la même allure que l'onde elle-même (somme de deux exponentiels). Pour une résistivité donnée du sol, la tension de sortie augmente avec la diminution de la permittivité. Comme nous l'avons cité auparavant, la capacité C dépend de la permittivité du sol. A cet effet, varier la permittivité du sol revient à varier la capacité du circuit équivalent. La tension de sortie, dépendant de cette capacité, varie en conséquence.

En outre, la tension de sortie est plus grande pour les grandes résistivités. Notons une tension maximale de 3.4 MV pour $\rho = 200$, 16.7 MV pour $\rho = 1000$ et 34 MV pour $\rho = 2000$.

La tension de sortie varie beaucoup plus avec la résistivité qu'avec la permittivité. En effet, la variation en fonction de la permittivité n'est remarquable que dans un intervalle de temps très petit.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons considéré une configuration de mise à la terre constituée de trois tiges en parallèle utilisé. Ce système est fréquemment utilisé pour la mise à la terre des parafoudres, des clôtures, etc. Nous avons étudié l'évolution de l'impédance de ce système en fonction de la fréquence, pour différentes propriétés (résistivité et permittivité) du sol, en utilisant le logiciel de simulation FEMM 4.2. Nous avons montré que pour les basses fréquences, notre système peut être assimilé à une simple résistance. Cependant, ce modèle n'est plus valable dans les hautes fréquences. Nous avons opté donc pour un circuit équivalent composé d'une résistance et d'une capacité en parallèle. Ce circuit représente parfaitement le système de terre, du fait qu'il nous a permis de trouver des impédances identiques à celles obtenues en utilisant le FEMM 4.2. Nous avons injecté une onde de courant de foudre normalisée à ce circuit et récupéré à la sortie la tension aux bornes de la résistance et/ou la capacité. Cette tension dépend des caractéristiques (la résistivité et la permittivité du sol) du sol. Cependant, elle est affectée beaucoup plus par la résistivité que par la permittivité.

Chapitre 4

Effet des paramètres
géométriques liés aux
trois tiges de terre
parallèles

IV.1. Introduction :

L'impédance du système de mise à la terre dépend, comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, de la nature du sol (la résistivité et la permittivité du sol) et de la fréquence de l'onde de courant. Avant de concevoir un réseau de terre et en particulier une prise de terre, il faut étudier les paramètres du sol et choisir un modèle de mise à la terre convenable à ce sol en tenant compte bien sûr des contraintes technico-économiques. Enfin déterminer les dimensions et les matériaux nécessaires pour sa conception.

Dans ce chapitre nous considérons le même modèle de mise à la terre de 3 tiges parallèles que nous avons étudié dans le 3^{ème} chapitre en prenant un sol homogène. Nous analysons le comportement de son impédance en fonction des dimensions de système de terre en question. Nous étudions aussi le comportement de ce modèle face à un choc de foudre en proposant un circuit électrique équivalent comme c'était le cas pour le chapitre précédent. Il s'agit plus particulièrement d'examiner la variation de la tension de sortie en fonction des dimensions.

IV.2. Présentation du système :

Nous nous intéressons, dans ce qui suit, à examiner l'impédance d'une prise de terre sous forme de 3 tiges en parallèle en fonction de la fréquence. Divers diamètres, longueurs et distance entre les tiges ont été adoptés. Pour cela nous utilisons le logiciel FEMM 4.2. Le contour d'étude ainsi que les conditions aux limites sont présentés à la figure IV.1. Notons que dans cette partie, notre système de mise à la terre est enterré dans un sol homogène ayant une résistivité $\rho = 1000 \Omega\text{m}$, et une permittivité relative $\epsilon_r = 30$.

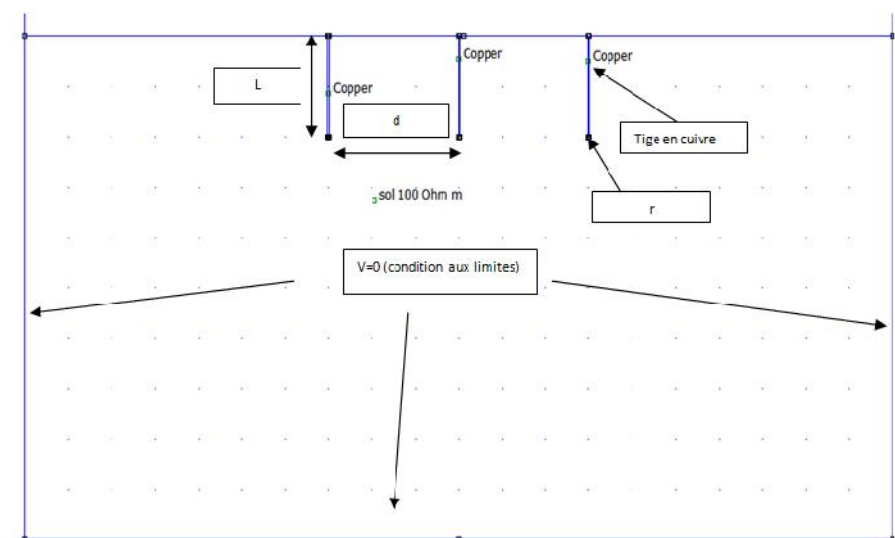


Figure IV.1: Système de mise à la terre de 3 tiges parallèles sous environnement FEMM

Le FEMM permet, entre autre, de calculer les paramètres $|E|$ et $|J|$:

$|E|$: Le module du vecteur champ électrique ;

$|J|$: Le module du vecteur densité de courant électrique.

Le module de l'impédance $|Z|$ de notre système de terre peut être calculé par la relation suivante [EDF, 1984] :

$$|Z| = \frac{|E|}{3 \cdot |J|} \left[\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right] \dots \text{(IV.1)}$$

l : La longueur de l'électrode ;

r : Le rayon de l'électrode ;

d : La distance entre les tiges.

IV.3. Variation du rayon de l'électrode:

IV.3.1. Impédance en fonction de la fréquence :

Le sol homogène considéré possède une résistivité égale à 1000 Ωm et une permittivité relative $\epsilon_r=30$. Le système de terre est constitué de 3 tiges en parallèle. Ces tiges sont de forme cylindrique. Plusieurs rayons des tiges ont été considérés. Pour chaque rayon nous étudions l'impédance de ce modèle en fonction de la fréquence. Pour cela nous utilisons le logiciel FEMM 4.2 et la formule précédente. Les résultats de ce travail sont représentés dans la figure IV.2.

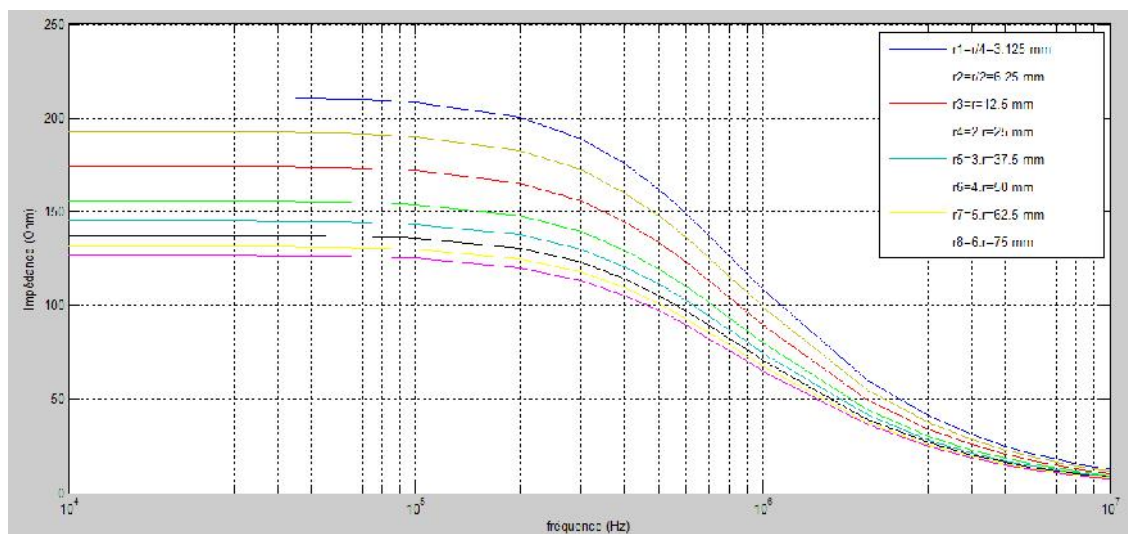


Figure IV.2: Evolution de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents rayons de l'électrode

Pour un rayon donné, l'allure de l'impédance peut être décomposée en 2 phases distinctes :

- La première phase correspond aux basses fréquences. Elle est caractérisée par une impédance constante. Ce qui est traduit par le comportement purement résistif de la prise de terre.
- La deuxième phase commence à partir d'une certaine fréquence dite de coupure. Cette dernière dépend de la nature du sol, donc de sa résistivité et sa permittivité. Au delà de cette fréquence l'impédance du système diminue en fonction de la fréquence. ceci peut être expliqué par le fait que le comportement de la prise de terre pour les hautes fréquences ne devient plus un comportement purement résistif. En effet un circuit RC parallèle conviendrait mieux pour ce genre de comportement.

En outre, nous remarquons que l'impédance augmente avec la diminution du rayon. Nous remarquons aussi que l'écart entre les caractéristiques devient de plus en plus petit quand le rayon de l'électrode augmente.

IV.3.2. Impédance en fonction du rayon :

La figure IV.3 illustre la variation de l'impédance en fonction du rayon de l'électrode. Pour cela, la fréquence a été fixée à 50 Hz (fréquence industrielle).

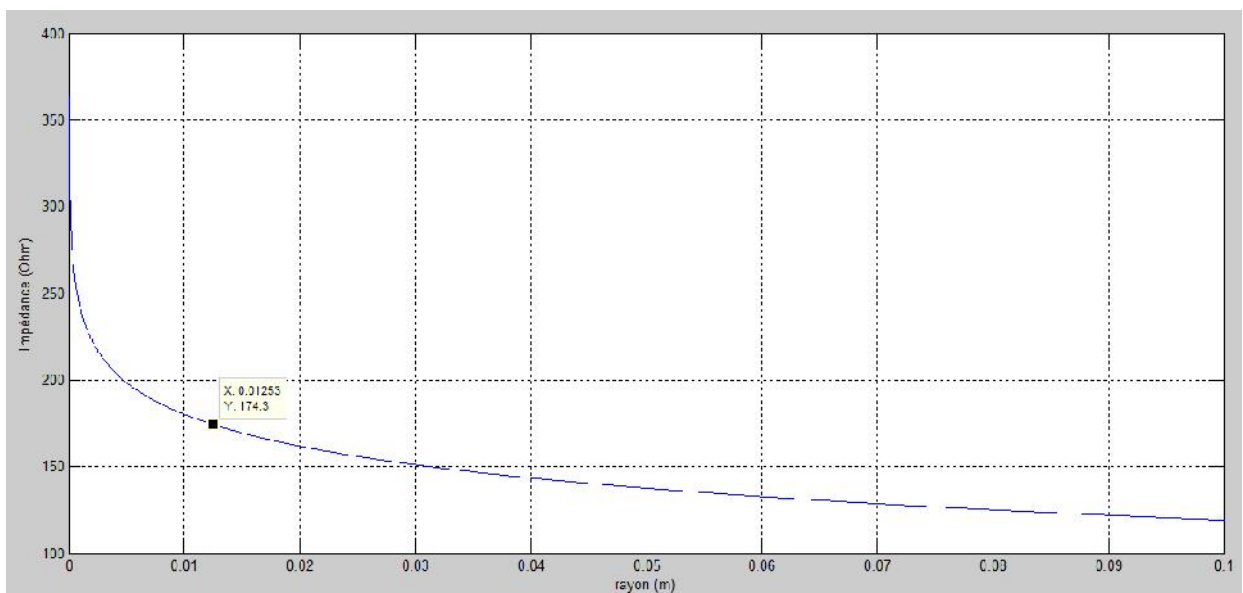


Figure IV.3: Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction du rayon de l'électrode pour $\rho=1000 \text{ hm}$, $r=30$

Avec l'augmentation du rayon, l'impédance du système de terre diminue rapidement pour les rayons appartenant à l'intervalle [0,20] mm, et lentement ailleurs en tendant vers un palier constant. Cette caractéristique met en évidence un rayon limite à ne pas dépasser pour lequel l'impédance du système demeure pratiquement constante.

IV.3.3. Circuit électrique équivalent :

Nous proposons pour ce modèle de mise à la terre (3 tiges en parallèle) le même circuit électrique équivalent utilisé dans le chapitre 3. Il s'agit d'une résistance en parallèle avec une capacité comme le montre la figure

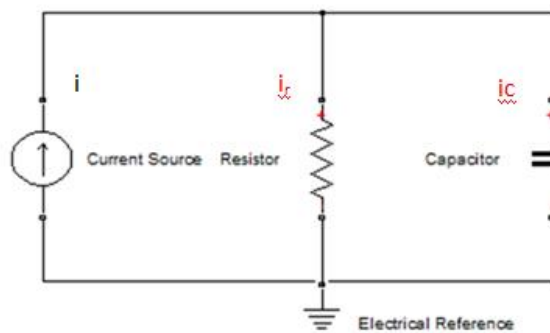


Figure IV.4 : Circuit électrique équivalent

A. Etude des paramètres du circuit :

La résistance R et la capacité de ce circuit se calculent en utilisant les formules analytiques III.1 et III.19 (mentionnée dans le chapitre 3) respectivement [EDF, 1987 ; Visacro et De Conti 2007]:

$$R \approx \frac{\rho}{3} \left[\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right]$$

$$C = \frac{\rho \epsilon_0 \epsilon_r}{R \left[\frac{1}{3} \left[\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{5}{6\pi d} \right] \right]}$$

Les variations respectives, de la résistance R, de la capacité C et de l'impédance capacitive $Z_c = \frac{1}{C\omega}$ en fonction du rayon de l'électrode sont illustrées sur les figures VI.5, IV.6 et IV.7 respectivement. Ces figures montrent, qu'avec l'augmentation du rayon, la résistance ainsi que l'impédance capacitive (respectivement la capacité) du circuit électrique équivalent diminuent (respectivement augmente) pour des rayons ne dépassant pas 20 mm et lentement ailleurs en tendant vers une valeur limite.

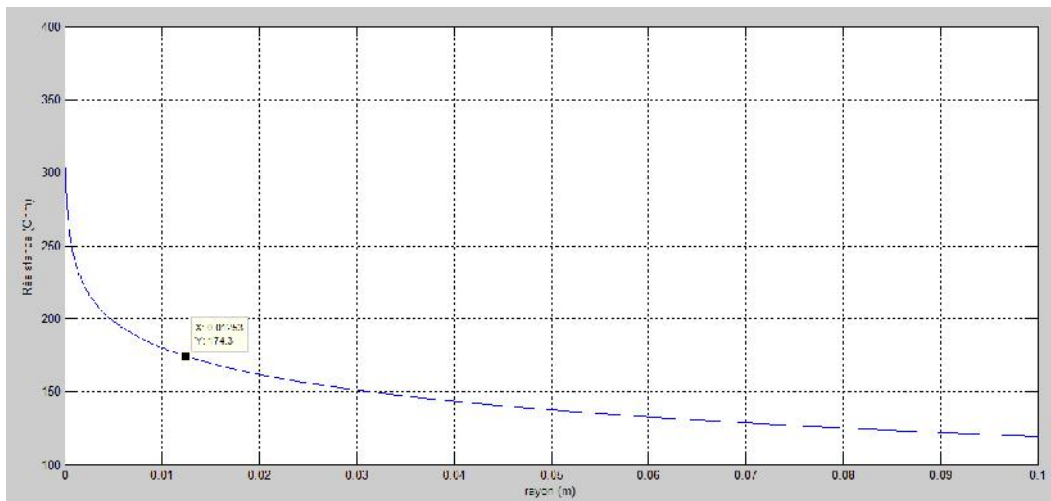


Figure IV.5 : Variation de la résistance R du circuit électrique équivalent en fonction du rayon pour $\rho=1000 \text{ hm}$ et $r=30$

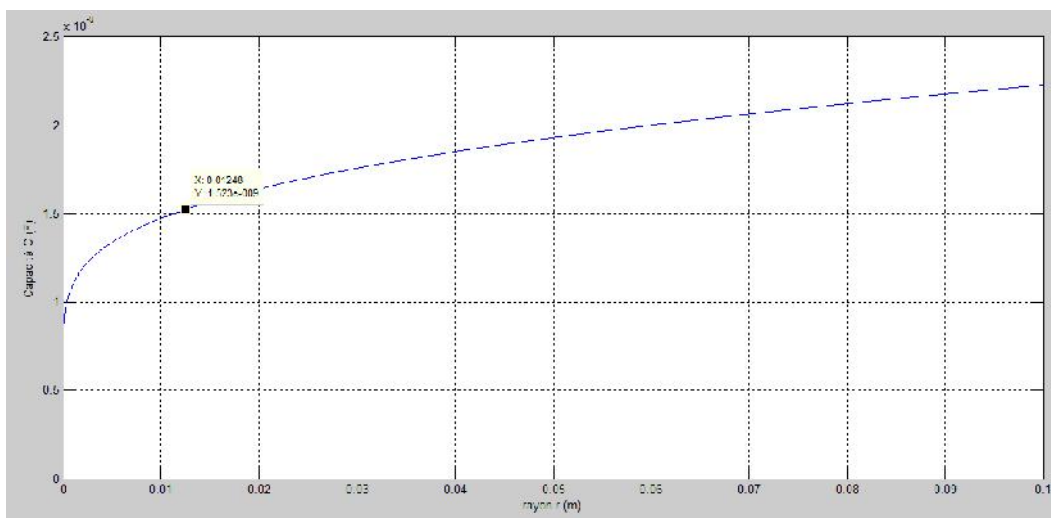


Figure IV.6 : Variation de la capacité C du circuit électrique équivalent en fonction du rayon pour $\rho=1000 \text{ hm}$ et $r=30$

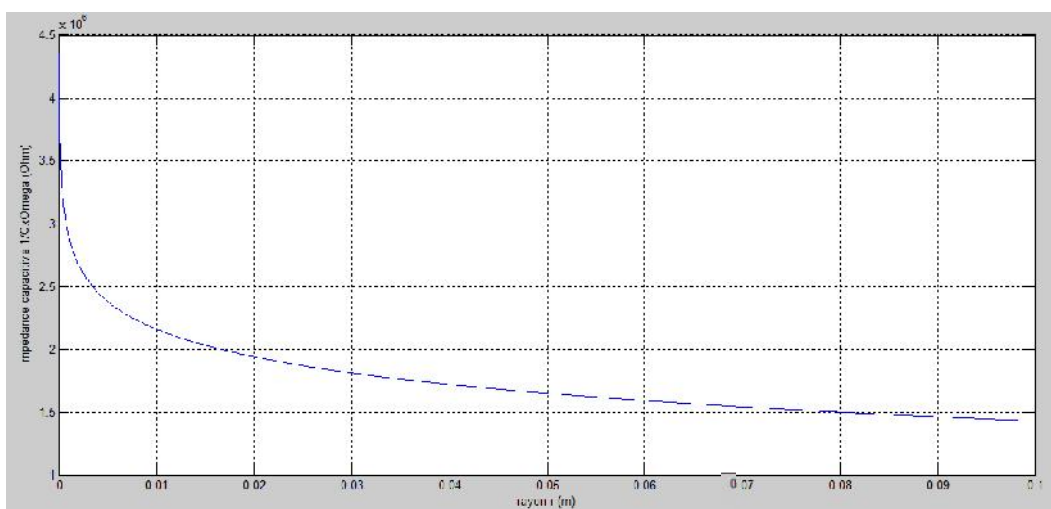


Figure IV.7 : Variation de l'impédance capacitive ($\frac{1}{C_a}$) du circuit électrique équivalent à 50 Hz en fonction du rayon pour $\rho=1000 \text{ hm}$ et $r=30$

L'impédance du circuit électrique équivalent est donnée par la relation suivante :

$$|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$$

Tenant compte de la variation de la résistance et de la capacité en fonction du rayon de l'électrode, l'impédance du circuit équivalent varie en conséquence.

B. Validation du circuit électrique équivalent :

Nous confrontons les résultats relatifs à l'impédance calculés en se basant sur le circuit électrique équivalent à ceux obtenus en appliquant le FEMM. Pour cela nous traçons les deux caractéristiques sur la figure IV.8, pour une fréquence de 1 MHz. D'après cette figure les deux caractéristiques sont confondues, ce qui valide le circuit électrique équivalent proposé.

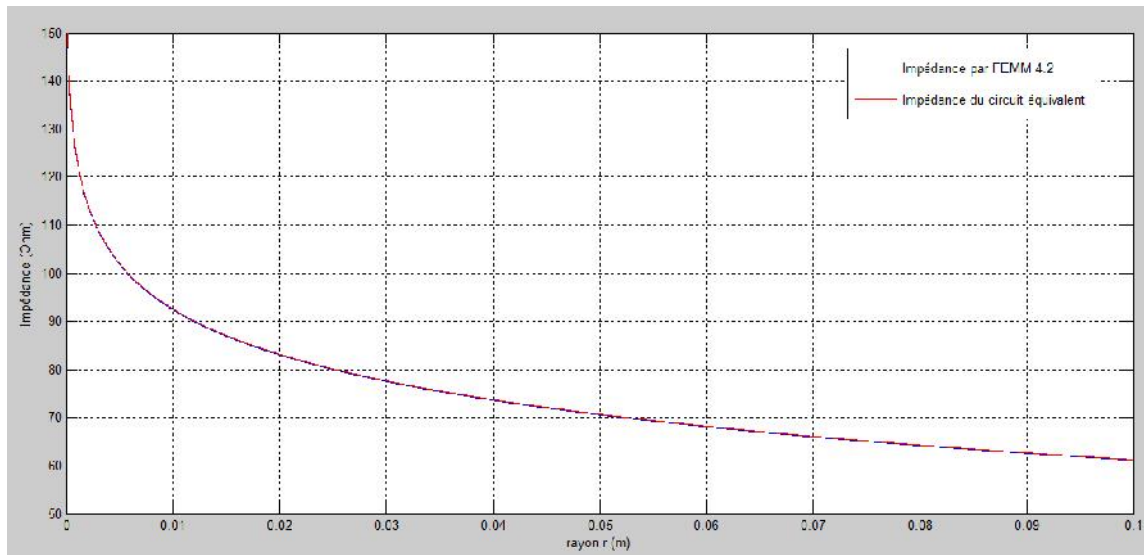


Figure IV.8 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent Z_{RC} pour une fréquence de 1 MHz

C. Comportement du circuit électrique équivalent suite à un choc de foudre :

Pour étudier un tel comportement nous générons une onde de foudre à front très rapide (1.2/50 μ s) dans le circuit électrique équivalent. La valeur crête de ce courant 100 kA. La forme de l'onde est montrée sur la figure IV.9.

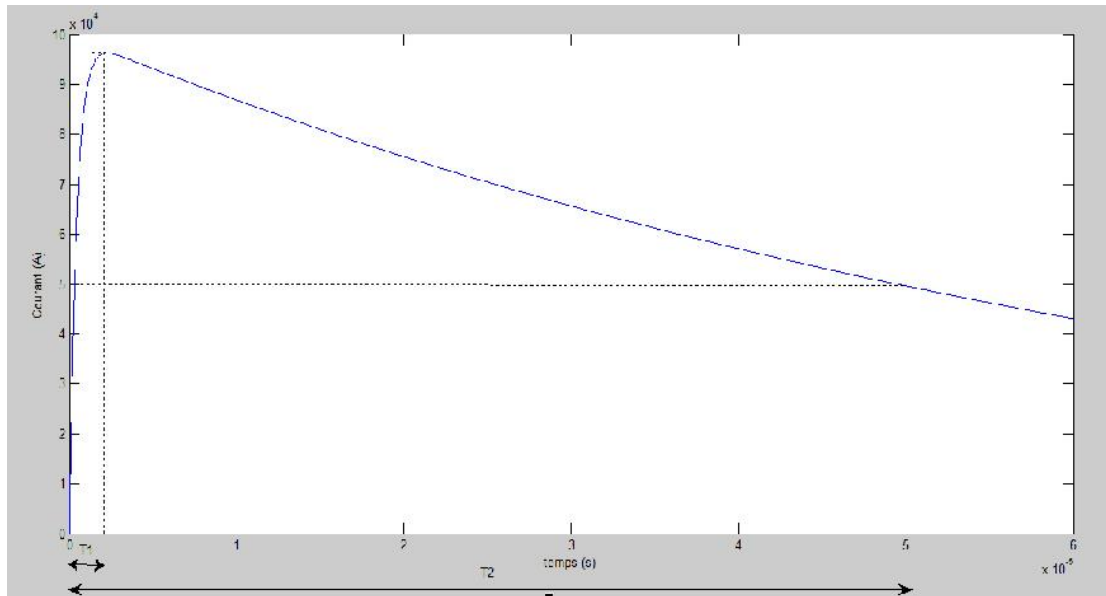


Figure IV.9 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50 μ s

La variation temporelle de la tension de sortie du circuit électrique aux bornes de la résistance R ou la capacité C est montrée sur la figure IV.10 pour différents rayons de l'électrode de terre.

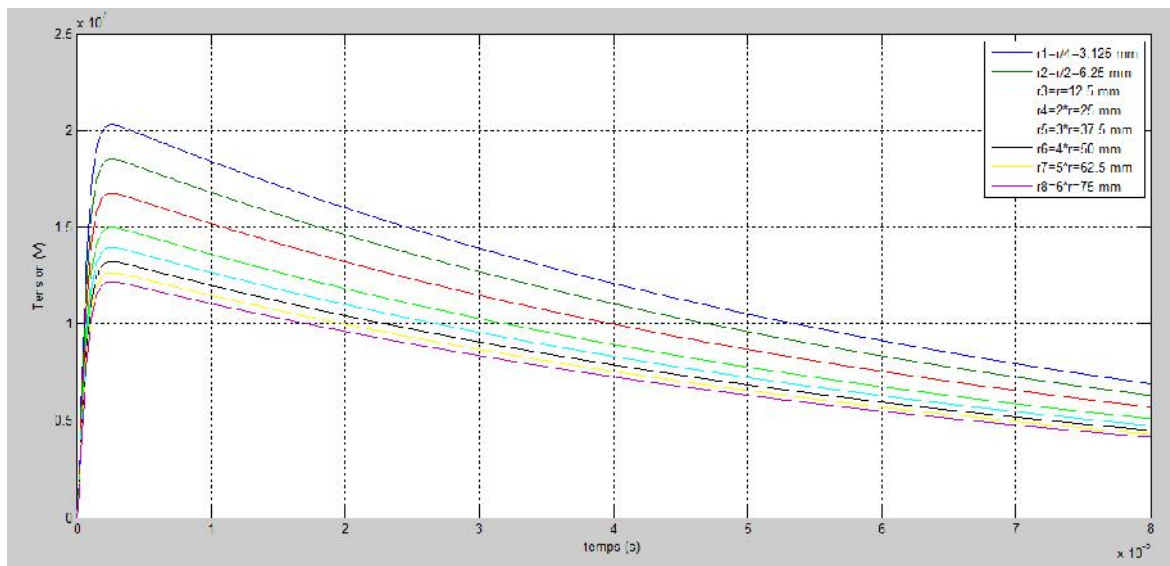


Figure IV.10 : Variation temporelle de la tension de sortie du circuit équivalent pour différents rayons de l'électrode

D'après la figure IV.10 et pour un même rayon de l'électrode de terre la forme de l'onde de foudre a été conservée. La tension de sortie du circuit électrique équivalent possède une variation similaire que celle de l'impédance en fonction du rayon de l'électrode de terre. En effet la tension

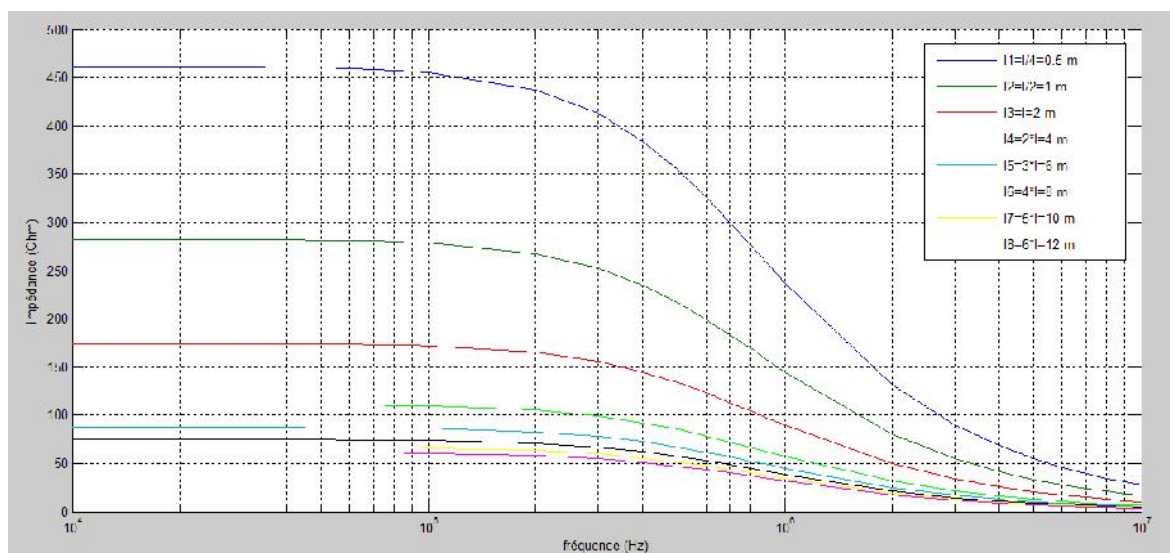
diminue avec l'augmentation du rayon. A titre d'exemple, la tension maximale est de l'ordre de 20 MV pour un rayon $r=3,125$ mm, et de l'ordre de 12 MV pour un rayon $r=75$ mm.

IV.4. Effet de la longueur des tiges :

IV.4.1. Impédance en fonction de la fréquence :

L'évolution de l'impédance du système de mise à la terre constitué de 3 tiges en parallèle, en fonction de la fréquence est présentée sur la figure IV.11. Cette impédance est calculée à partir de la relation IV.1 faisant appel aux modules du champ et de la densité de courant calculés par le FEMM 4.2. Dans ces conditions la longueur (la même pour les trois tiges) a été variée de 0,5 à 12 m.

Il est à noter que sur le marché une autre grandeur (donnée) est utilisée. On parle souvent de la *Grosseur de la tige* représentant le produit diamètre x longueur.



IV.11 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction de la fréquence pour différentes longueurs des tiges

La figure IV.11 présente une variation analogue à celle de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents rayons (Figure IV.2). En effet le système de terre présente deux comportements :

- Comportement purement résistif pour les basses fréquences, caractérisé par une impédance constante ;

- Comportement capacitif pour les hautes fréquences à partir de la fréquence de coupure où l'impédance commence à diminuer. Ce comportement pourrait être modélisé par une résistance en parallèle avec une capacité.

Nous pouvons également tirer de la figure précédente, que plus la longueur des tiges est grande l'impédance devient plus faible. A titre d'exemple, cette impédance atteint 460Ω pour la plus faible longueur $l=0,5$ m, et diminue jusqu'à 60Ω pour la plus grande valeur de longueur $l=12$ m. Nous remarquons aussi que la différence entre les courbe diminue avec l'augmentation de la longueur ; l'écart devient de plus en plus étroit entre les courbes.

IV.4.2. Impédance en fonction de la longueur des tiges :

Pour la fréquence industrielle 50 Hz, la variation de l'impédance de 3 tiges en parallèle en fonction de la longueur est donnée à la figure IV.12. L'impédance de mise à la terre diminue avec l'augmentation de la longueur des tiges de façon hyperbolique. En effet, la diminution est accentuée pour les longueurs entre 1 et 4 mètres ; elle passe de 280Ω pour $l=1$ m à 133Ω pour $l=3$ m (soit un écart de 147Ω pour une différence de 2 mètre de longueur). Au-delà de 4 mètres, la diminution devient de plus en plus lente. L'impédance passe, par exemple, de 133Ω pour $l=3$ m à 97Ω pour $l=5$ m (soit un écart de 36Ω pour une différence de 2 mètres de longueur). Cela explique l'écart entre les différentes courbes de l'impédance en fonction de la fréquence, qui devient de plus en plus étroit lorsque la longueur des tiges augmente.

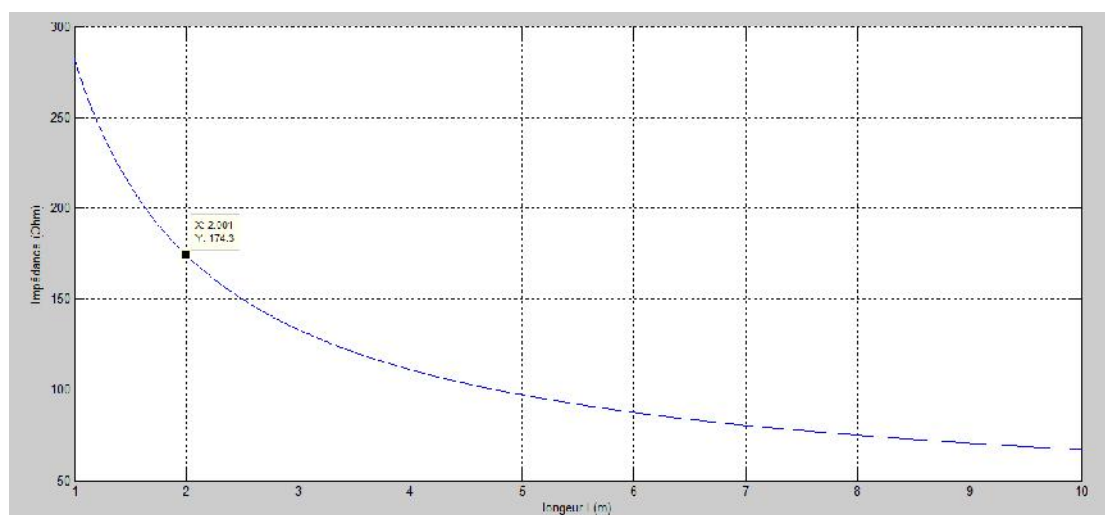


Figure IV.12 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration de trois tiges en parallèle en fonction de la longueur des tiges pour $\rho=1000 \text{ hm}$, $r=30$

IV.4.3. Circuit électrique équivalent :

Un circuit analogue à celui proposé précédemment est adopté pour le système de mise à la terre lorsque la longueur des tiges parallèles varie. Ce circuit est composé d'une résistance R en parallèle avec une capacité C. Nous conservons, à cet effet, les expressions III.1 et III.19 pour la détermination des éléments électriques R et C du même circuit.

En variant la longueur des tiges, les valeurs des deux composants électriques passifs (R et C) varient. Les figures IV.13, IV.14 et IV.15 représentent les variations de la résistance, la capacité et l'impédance capacitive du circuit équivalent en fonction de la longueur des tiges.

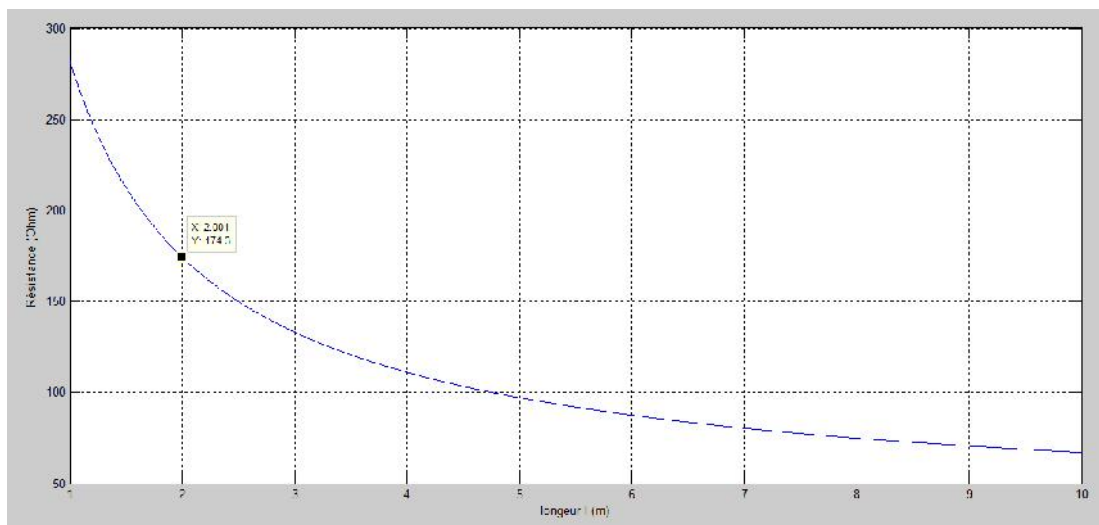


Figure IV.13 : Variation de la résistance R du circuit électrique équivalent en fonction de la longueur des tiges pour $h=1000$ m et $r=30$

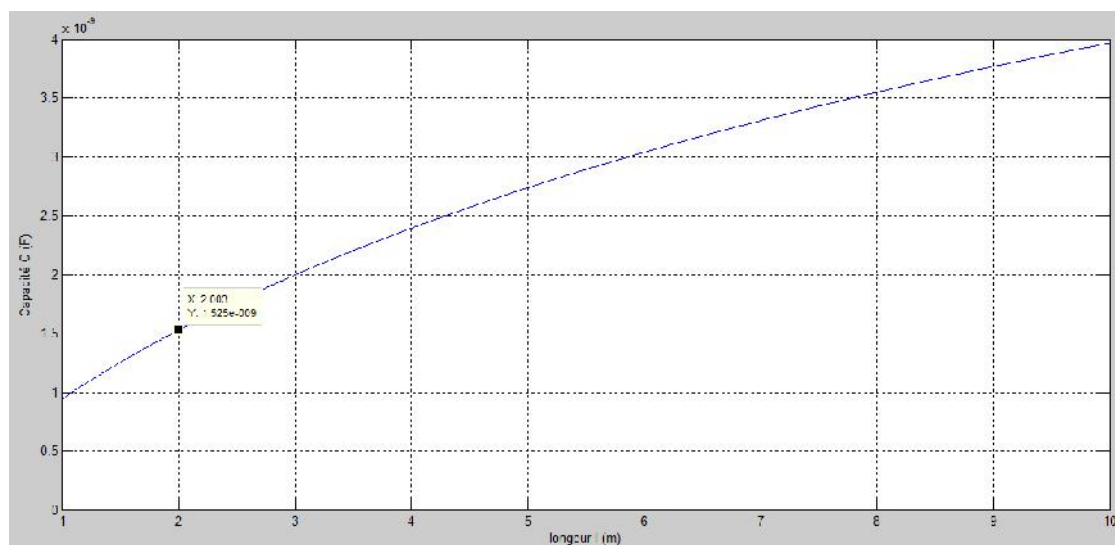


Figure IV.14 : Variation de la capacité C du circuit électrique équivalent en fonction de la longueur des tiges pour $h=1000$ m et $r=30$

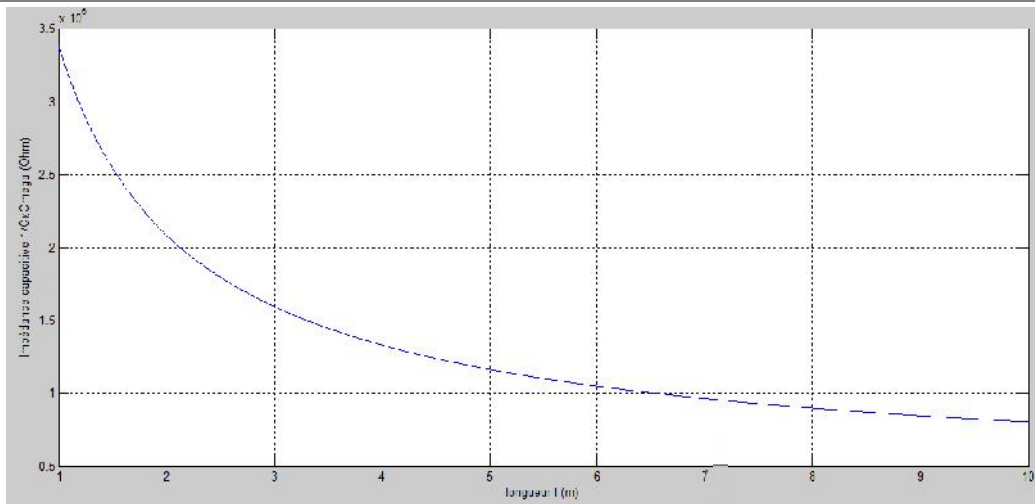


Figure IV.15 : Variation de l'impédance capacitive ($\frac{1}{C_a}$) du circuit électrique équivalent à 50 Hz en fonction de la longueur des tiges pour $r=1000$ hm et $r=30$

D'après les trois dernières figures, l'augmentation de la longueur des tiges dans l'intervalle [1,4] m engendre une diminution rapide de la résistance ainsi que l'impédance capacitive d'une part, et l'augmentation brusque de la capacité d'autre part. Ces diminutions (de la résistance et de l'impédance capacitive) et augmentation (de la capacité) deviennent de plus en plus lentes en tendant vers une limite, une fois la longueur des tiges dépasse 4 m.

Etant donné la variation de la résistance R et de la capacité du circuit électrique équivalent; l'impédance totale varie en conséquence car : $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$

Sur la figure IV.16, nous comparons pour une fréquence de 1 MHz les valeurs de l'impédance du système de mise à la terre calculées en se basant sur le logiciel FEMM 4.2 (Z_{EF}) à celles déterminées à partir du circuit électrique équivalent (Z_{RC}). Une parfaite concordance a été obtenue. Le circuit électrique que nous avons proposé reflète d'une façon très précise le comportement du système de mise à la terre (3 tiges parallèle).

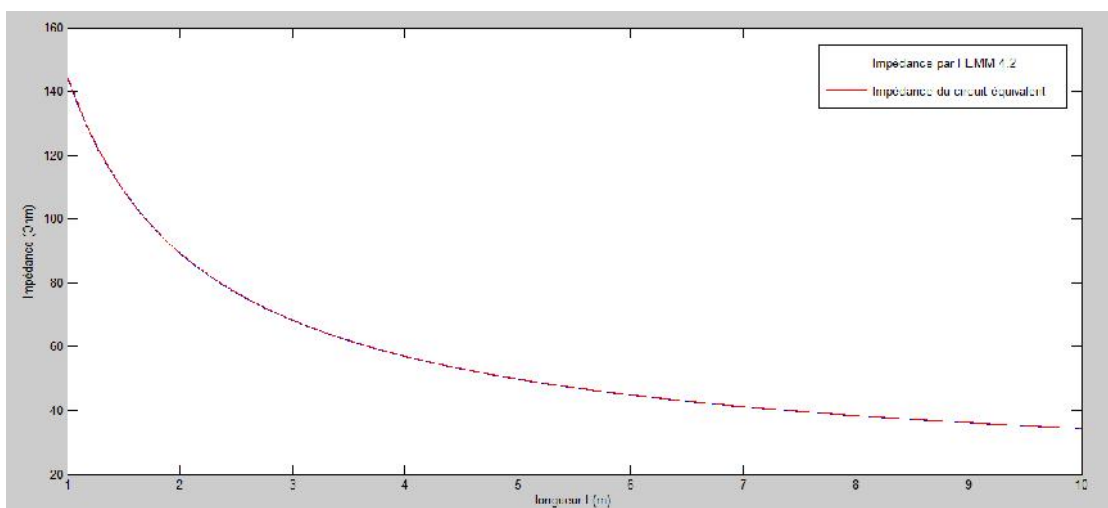


Figure IV.16 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent Z_{RC} pour une fréquence de 1 MHz

Au circuit électrique équivalent précédemment proposé, nous injectons une onde de courant de choc de foudre à front très rapide ($1.2/50 \mu\text{s}$) ayant une amplitude (valeur crête) de 100 kA. Une telle opération, permet la détermination de la tension de sortie du circuit électrique.

L'onde de courant injectée est illustrée sur la figure IV.17 suivante :

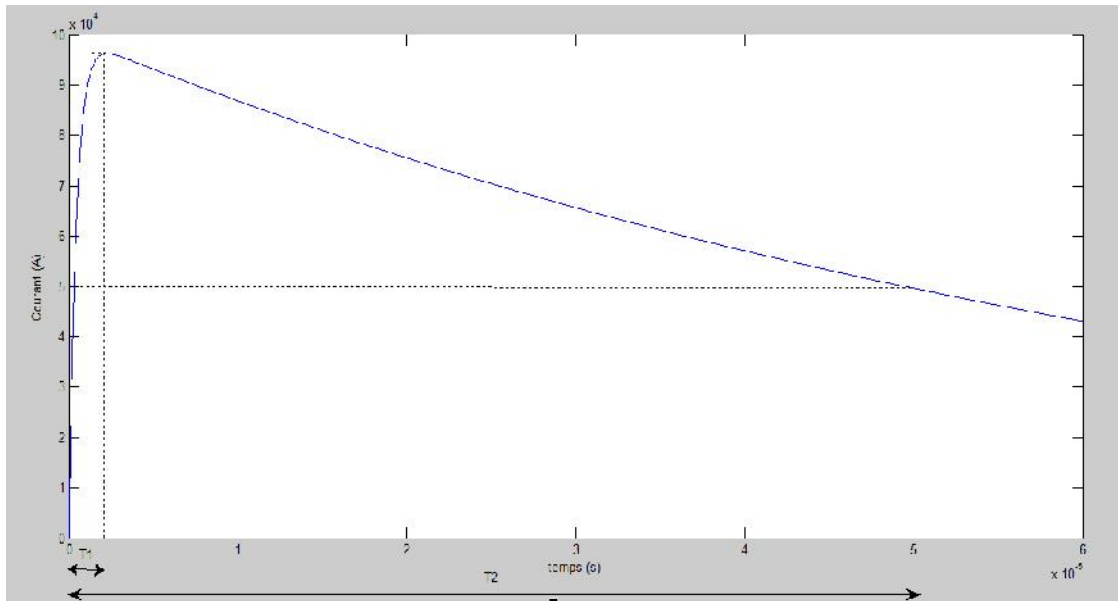


Figure IV.17 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50 μs

Ainsi, l'évolution temporelle de la tension de sortie aux bornes de la résistance R ou bien la capacité C (du moment que R et C sont en parallèle) du circuit équivalent, pour des différentes longueurs des tiges est montrée sur la figure IV.18. Cette évolution temporelle reflète l'onde de la tension de sortie.

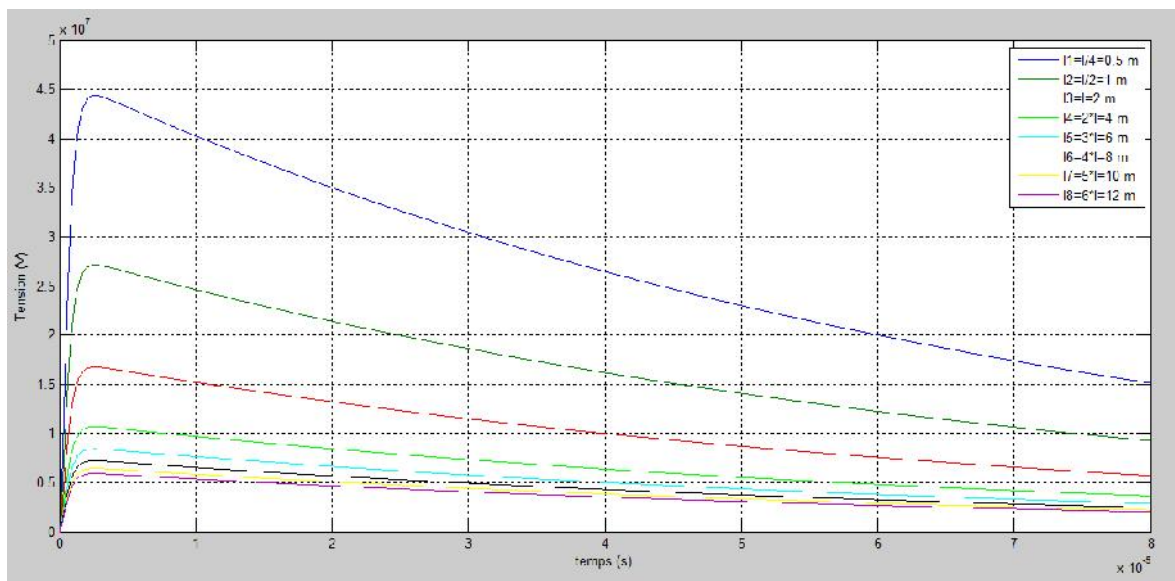


Figure IV.18 : La tension de sortie du circuit équivalent pour des différentes valeurs de la longueur des tiges pour $r=1000 \text{ hm}$ et $r=30$

Pour un temps donné, la tension de sortie diminue avec l'augmentation de la longueur des tiges.

Sur la figure précédente, nous lisons une valeur de crête de 45 MV pour la plus faible longueur $l=0.5$ m et 6 MV pour la plus grande longueur $l=12$ m.

De même que la variation de l'impédance en fonction de la longueur des tiges, l'écart entre les caractéristiques temporelles de la tension, devient de plus en plus étroit quand la longueur augmente. Ceci est évident vu la relation entre les deux grandeurs électriques précédentes:
 $V = |Z_{RC}| \cdot I.$

IV.5. Effet de la distance inter-tiges :

IV.5.1. Impédance en fonction de la fréquence :

Nous prenons toujours le modèle de mise à la terre composé de 3 tiges en parallèle. Nous étudions la variation de l'impédance d'un tel système de terre en fonction de la fréquence pour différentes distances inter-tiges. Les tiges sont alignées (suivant une droite). La distance d entre la tige centrale et celles situées aux deux extrémités est la même comme illustré sur la figure IV.19. Nous proposons par la suite, un circuit équivalent reflétant le comportement de l'impédance de terre. Enfin nous examinons le comportement du système de mise à la terre réel (3 tiges parallèle) via le circuit électrique équivalent, face à un choc de foudre.

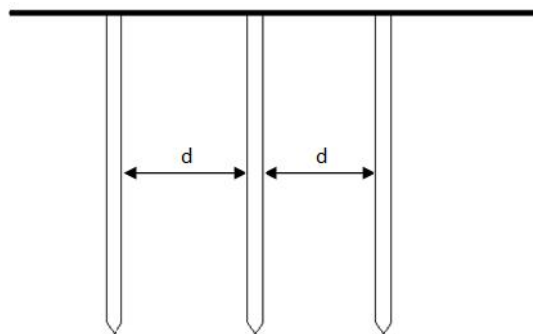


Figure IV.19 : Disposition des tiges

A l'aide du logiciel FEMM 4.2 et la formule IV.1, nous déterminons l'impédance des 3 tiges parallèles en fonction de la fréquence, pour différentes valeurs de d . Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure IV.20.

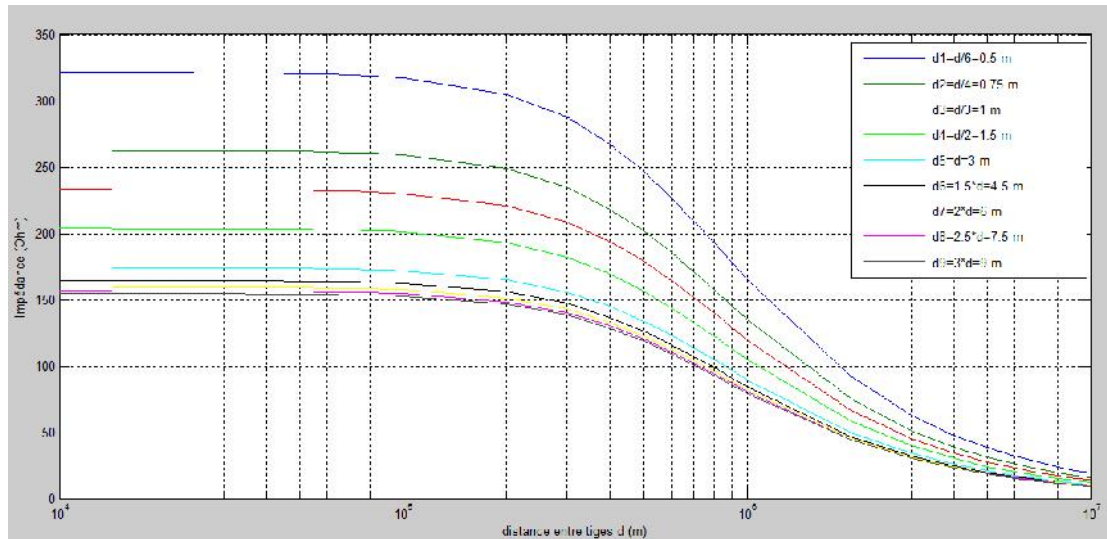


Figure IV.20 : Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour $r=1000$ hm, $r=30$ pour des différentes distance inter-tiges

Pour une distance d donnée, et avec l'accroissement de la fréquence, l'impédance demeure constante tant que la fréquence reste inférieure à celle de coupure (basses fréquences). Au-delà de la fréquence de coupure l'impédance diminue rapidement puis lentement en tendant vers une limite. La partie constante de l'impédance correspond au comportement purement résistif du système de terre. Pour les hautes fréquences, ce comportement est capacitif qui peut être modélisé par une résistance (obtenue pour les basses fréquences) en parallèle avec une capacité.

Par ailleurs nous pouvons tirer d'après les courbes de la figure IV.20 que l'impédance de mise à la terre diminue quand la distance entre les tiges augmente. Nous enregistrons une valeur de 322Ω pour une distance $d=0,5$ m et 154Ω pour une distance $d=9$ m.

Sur les plans économique et pratique, adapter la distance inter-tiges pour avoir telle ou telle impédance, mieux que changer le rayon et/ou la longueur des tiges. Ceci nous permet de gagner dans la quantité du matériau utilisé.

Nous remarquons aussi que l'écart entre les courbes diminue quand la distance d devient de plus en plus grande. Par exemple nous pouvons noter un écart de 60Ω entre les distances $d=0,5$ m et $d=0,75$ m (une différence de 25 cm) contre un écart de seulement 2Ω entre les distances $d=7,5$ m et $d=9$ m (une différence de 1,5 m).

IV.5.2. Impédance en fonction de la distance:

La figure IV.21 représente la variation de l'impédance en fonction de la distance inter-tiges pour la fréquence industrielle 50 Hz. D'après la caractéristique, l'impédance du système de mise à la terre diminue rapidement en fonction de la distance dans l'intervalle [0,2] m. Cependant La diminution devient lente pour les distances qui dépassent 2 m. L'impédance tend vers une limite quand la longueur augmente excessivement. Ceci explique ce que nous avons mentionné auparavant : l'écart entre les caractéristiques de la figure IV.20 diminue avec l'augmentation de la distance inter-tiges.

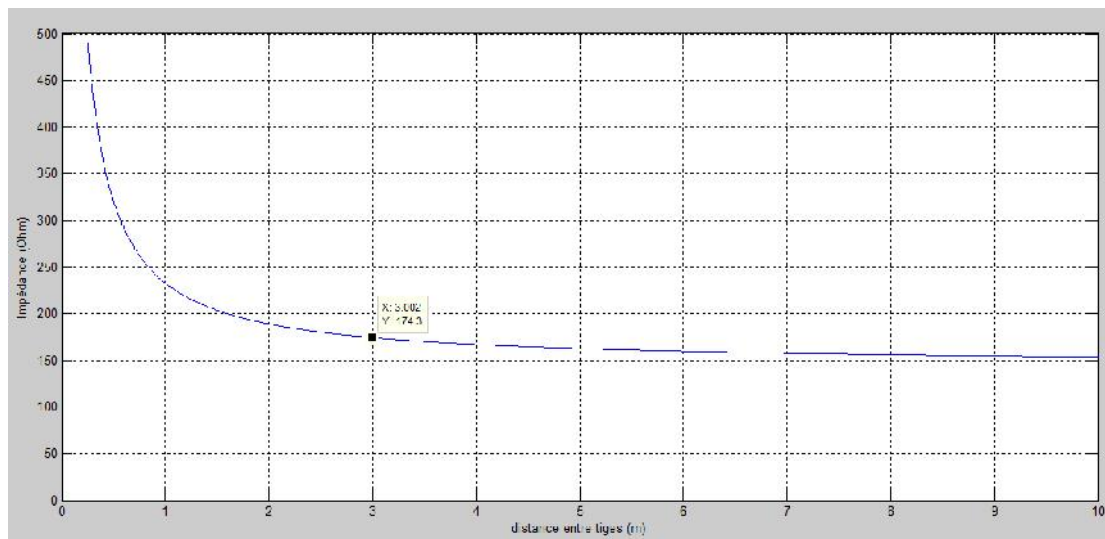


Figure IV.21 : Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la distance entre les tiges pour $r=1000$ hm, $r=30$ et $f=50$ Hz

IV.5.3. Circuit électrique équivalent :

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence nous emmène à proposer un circuit électrique équivalent valable pour modéliser notre système de mise à la terre (3 tiges parallèles). Ce circuit n'est qu'une mise en parallèle d'une résistance R avec une capacité C.

La résistance R et la capacité C de ce circuit sont déterminées à partir des expressions III.1 et III.19 respectivement.

Les figures IV.22, IV.23, IV.24 représentent la variation de la résistance, la capacité et l'impédance capacitive du circuit électrique équivalent en fonction de la distance inter-tiges. Ces caractéristiques montrent que, pour des distances comprises entre 0 et 2 mètres, la résistance ainsi

que l'impédance capacitive diminuent rapidement, au moment où la capacité augmente brusquement. Au-delà de 2 m, nous observons de lentes diminutions de la résistance et l'impédance capacitive et augmentation de la capacité, en se rapprochant vers des valeurs limites.

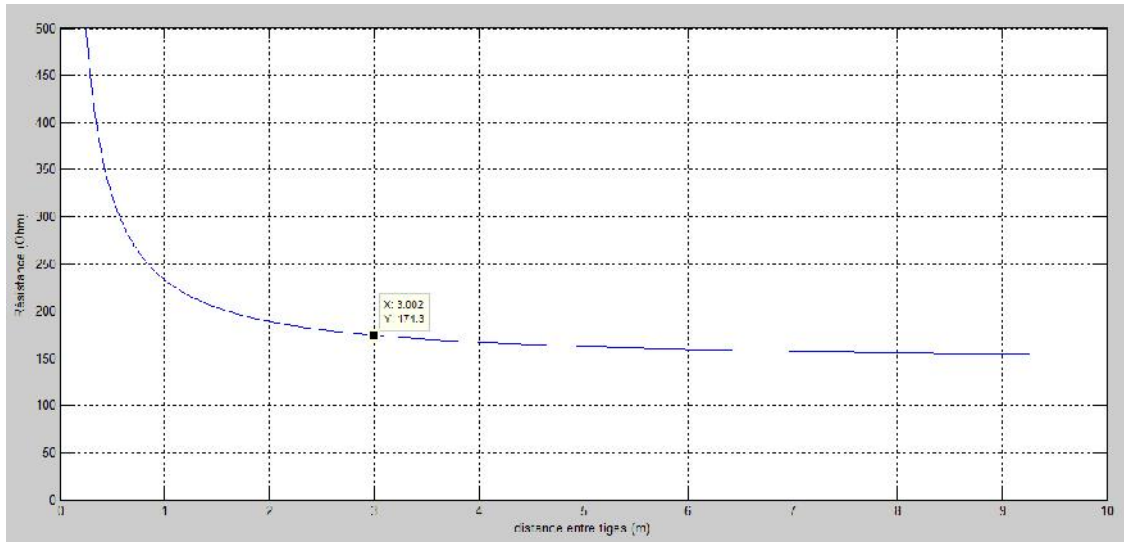


Figure IV.22 : Variation de la résistance R du circuit électrique équivalent en fonction de la distance inter-tiges

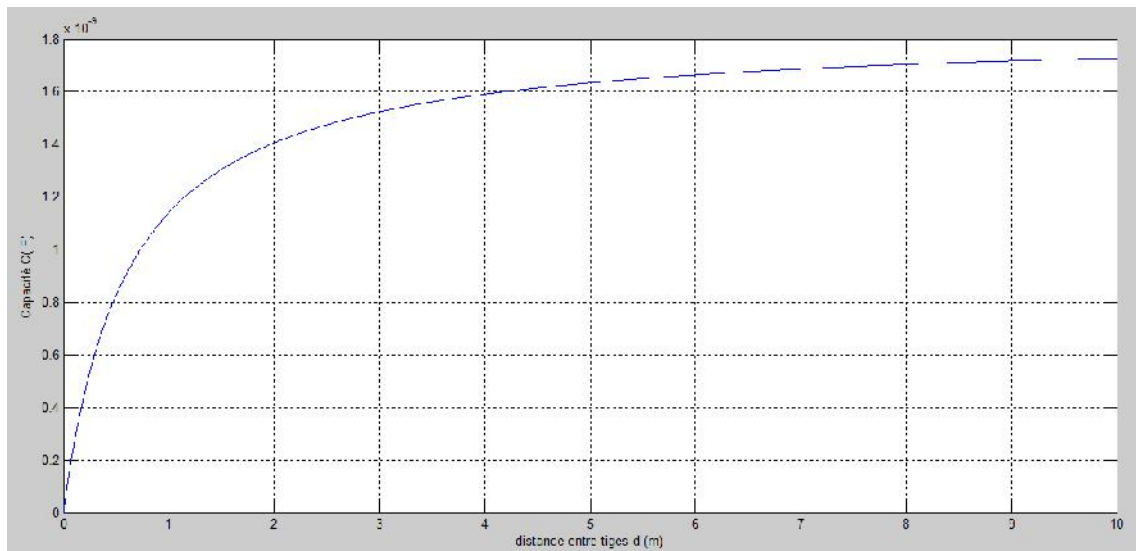


Figure IV.23 : Variation de la capacité C du circuit électrique équivalent en fonction de la distance inter-tiges

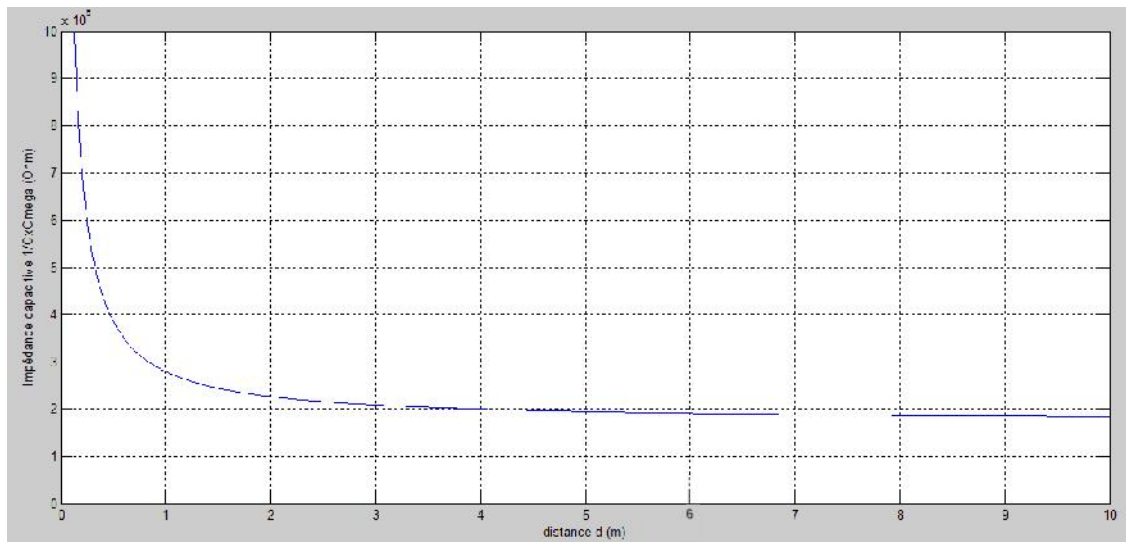


Figure IV.24 : Variation de l'impédance capacitive ($\frac{1}{C\alpha}$) du circuit électrique équivalent à 50 Hz en fonction de la distance inter-tiges

Etant donné que $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$, l'impédance totale du circuit est affectée au même titre que la résistance et la capacité, par la variation de la distance inter-tige.

En se basant sur la relation précédente, nous traçons la variation de l'impédance du circuit électrique équivalent en fonction de la distance inter-tiges. Les résultats ainsi obtenus sont comparés avec ceux trouvés en utilisant le logiciel FEMM. Cette comparaison est faite pour une fréquence de 1 MHz et illustrée sur la figure IV.25.

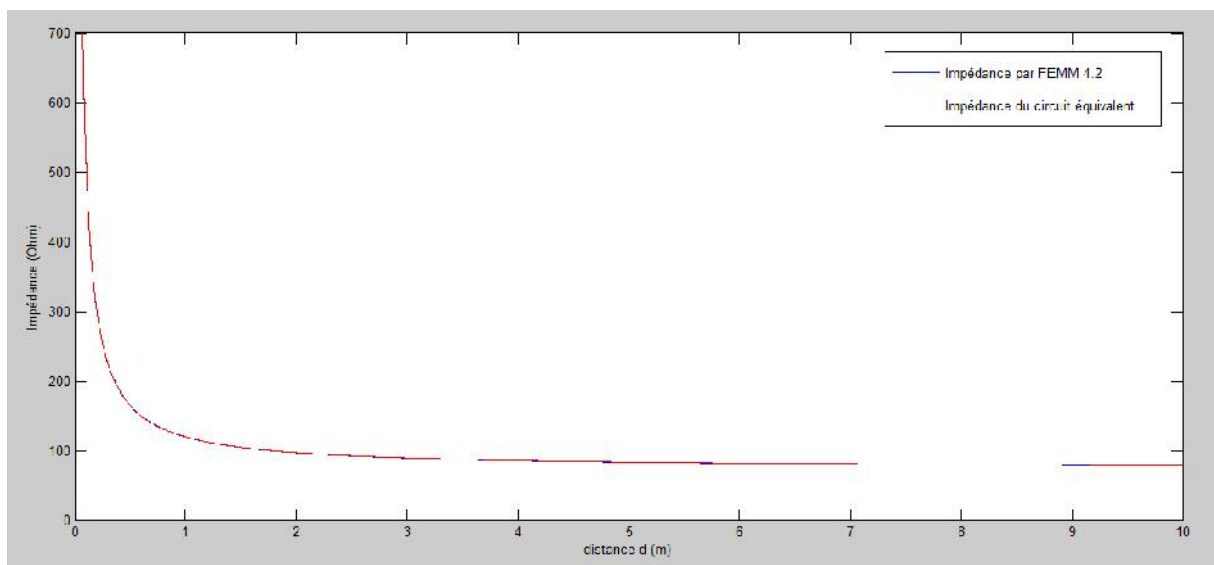


Figure IV.25 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent Z_{RC} pour une fréquence de 1 MHz

La figure précédente montre que les résultats de la variation de l'impédance en fonction de la distance inter-tiges déterminés par le FEMM d'une part, et en utilisant le circuit électrique équivalent d'autre part, sont confondus. Ceci permet de valider le circuit pour simulant le système de mise à la terre.

Après avoir vérifié la validité du circuit équivalent, nous passons à l'étude du comportement du système de terre ainsi modélisé face à un choc de foudre. Nous injectons en effet, une onde de courant à ce circuit. Il s'agit d'une onde à front très rapide ($1.2/50 \mu\text{s}$), et une valeur de crête de 100 kA, comme le montre la figure IV.26.

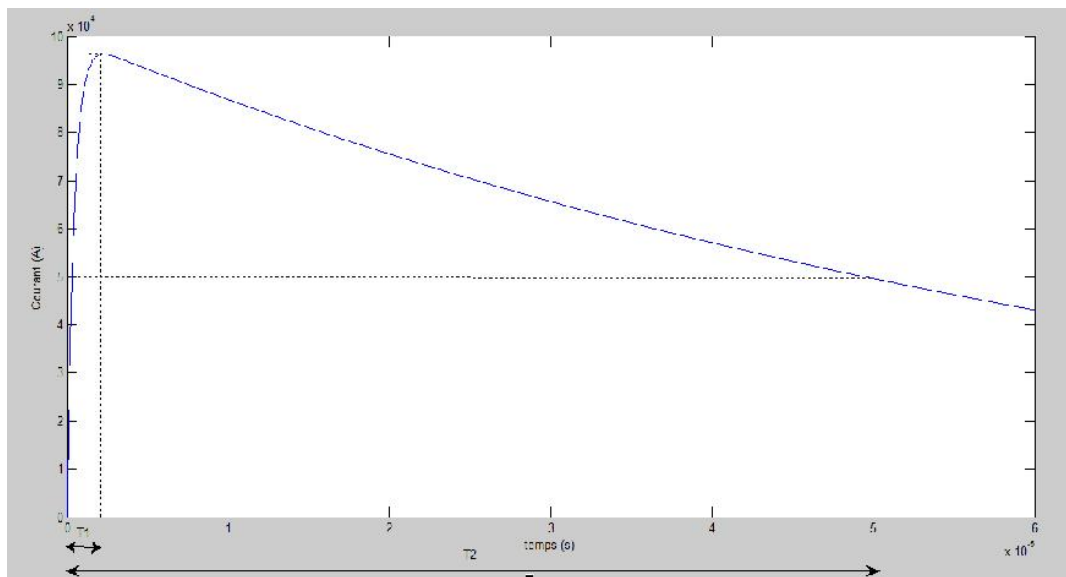


Figure IV.26 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50 μs

Nous déterminons ensuite, la variation temporelle de la tension de sortie du circuit équivalent aux bornes de la résistance R ou de la capacité C pour différentes distance inter-tiges d (figure IV.27).

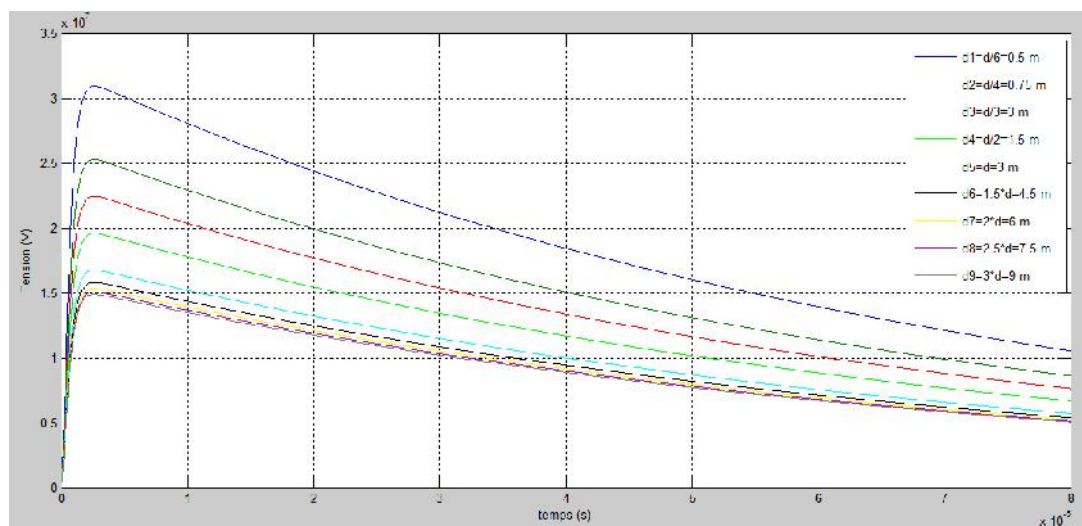


Figure IV.27 : La tension de sortie du circuit équivalent pour différentes valeurs de distance pour $\rho = 1000 \text{ hm}$ et $r = 30$

La figure précédente montre que nous obtenons des variations temporelles de la tension de sortie sous forme d'ondes. Pour un instant donné, ces tensions diminuent avec l'augmentation de la distance inter-tiges. Notons à titre d'exemple, une valeur de crête de 31 MV pour une distance $d=0,5$ et de 15 MV pour $d=9$ m.

En outre, l'écart entre les courbes est de plus en plus faible quand la distance d atteint des valeurs assez grandes. Par exemple, nous notons une différence de 6 MV de tension maximale entre les deux premières courbes ($d_1=0,5$ et $d_2=0,75$ m) et une différence de 0,6 MV entre les deux dernières courbes ($d_8=7,5$ m et $d_9=9$ m).

Il est judicieux d'agir sur la distance inter-tiges que sur les dimensions des tiges, pour diminuer la tension en cas d'un défaut de court-circuit ou un choc de foudre ou de manœuvre. Ce qui représente un avantage économique énorme.

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons analysé l'impédance du système de terre constitué de 3 tiges en parallèle, en fonction de la fréquence, sous divers paramètres électro-géométriques. Ces derniers consistent en le rayon et la longueur des tiges, et la distance inter-tiges.

L'impédance du système de terre diminue avec l'augmentation du rayon, de la longueur et de la distance inter-tiges. Cette diminution est brusque dans les intervalles [0,20] mm, [0,4] m et [0,2] m respectivement. En dehors de ces intervalles, la diminution devient de plus en plus lente en tendant vers un palier constant.

Le système de terre étudié peut être modélisé par une simple résistance, pour les basses fréquences. Nous rajoutons à cette résistance, une capacité en parallèle, dans le cas des hautes fréquences.

La variation temporelle de la tension de sortie du circuit électrique équivalent obtenue, suite à une injection d'une onde de courant de foudre, est similaire à celle de l'impédance en fonction des paramètres électro-géométriques relatifs aux tiges susmentionnés.

Chapitre 5

Effet des caractéristiques électriques du sol sur la tige de terre

V.1. Introduction

Comme nous l'avons montré dans le 3^{ème} chapitre, l'impédance de mise à la terre dépend des caractéristiques du sol, c'est-à-dire sa résistivité et sa permittivité. En effet, cette impédance est grande pour des sols ayant une grande résistivité ou des sols avec une faible permittivité. Cependant, l'effet de la permittivité du sol n'apparaît qu'à partir de la fréquence de coupure. Au-delà de laquelle, nous avons vu que l'impédance du système de mise à la terre est plus faible pour les grandes permittivités. La fréquence de coupure dépend, en fait, de la permittivité et de la résistivité du sol.

Nous étudions, dans ce chapitre, la variation de l'impédance d'un système de terre constitué d'une tige verticale en fonction de la fréquence. Deux types de sol ont été considérés : homogène et stratifié (composé de deux couches de différentes résistivités). Ceci nous permet de proposer, pour chaque type de sol, un circuit électrique équivalent. Une étude comparative des résultats ainsi obtenus dans les deux cas y est présentée

V.2. Résistivité et nature du sol

L'impédance du système de mise à la terre est une donnée fondamentale pour optimiser la sécurité d'un système électrique. Comme nous l'avons cité en haut, cette impédance est fonction de la résistivité du sol. Celle-ci dépend du type de sol dans lequel est enfoui le système de mise à la terre. La résistivité du sol dépend aussi du climat ; plus un sol est humide et plus sa résistivité est faible. Par ailleurs, le gel et la sécheresse augmente la résistivité. [Université de Louvain, 1988]

Le tableau suivant donne la résistivité d'un terrain selon sa composition : [Université de Louvain, 1988]

Nature de terrain	Résistivité moyenne (Ωm)
sol marécageux	3 -30
Limon	20-100
Humus	10-150
tourbe humide	5-100
argile plastique	50
marnes et argiles compactes	100-200
marnes du jurassique	30-40
sable argileux	50-500
sable siliceux	200-3000

sol pierreux	1500-3000
sol pierreux et gazon	300-500
sol calcaire tendre	100-500
sol calcaire compact	1000-5000
Schiste	50-300
Micaschiste	800
granit et grés	1500-10000
granit et grés altérés	100-600

Tableau V.1 : résistivité d'un terrain selon sa composition

On peut rencontrer (c'est le cas le plus fréquent), des terrains qui comprennent à la fois plusieurs terrains cités dans le tableau précédent, c'est-à-dire des sols à plusieurs couches et donc à plusieurs résistivités, appelés : **les sols hétérogènes ou sols stratifiés**. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux sols stratifiés verticalement ayant deux couches de résistivités différentes.

V.3. Sol homogène

Le système de mise à la terre considéré dans cette section est constitué d'une tige verticale enterrée dans un sol homogène. Cette tige possède les mêmes propriétés et dimensions que celles des tiges utilisées en chapitre 3 ; matériau en cuivre, rayon de l'électrode $r=12.5$ et longueur de l'électrode $l=2$ m. Le choix d'une telle tige est justifié du fait qu'elle est fréquemment utilisée pour la mise à la terre des parafoudres ou des électrificateurs des clôtures et même pour les mises à la terre des branchements des petites résidences [Alain Charoy, 2005].

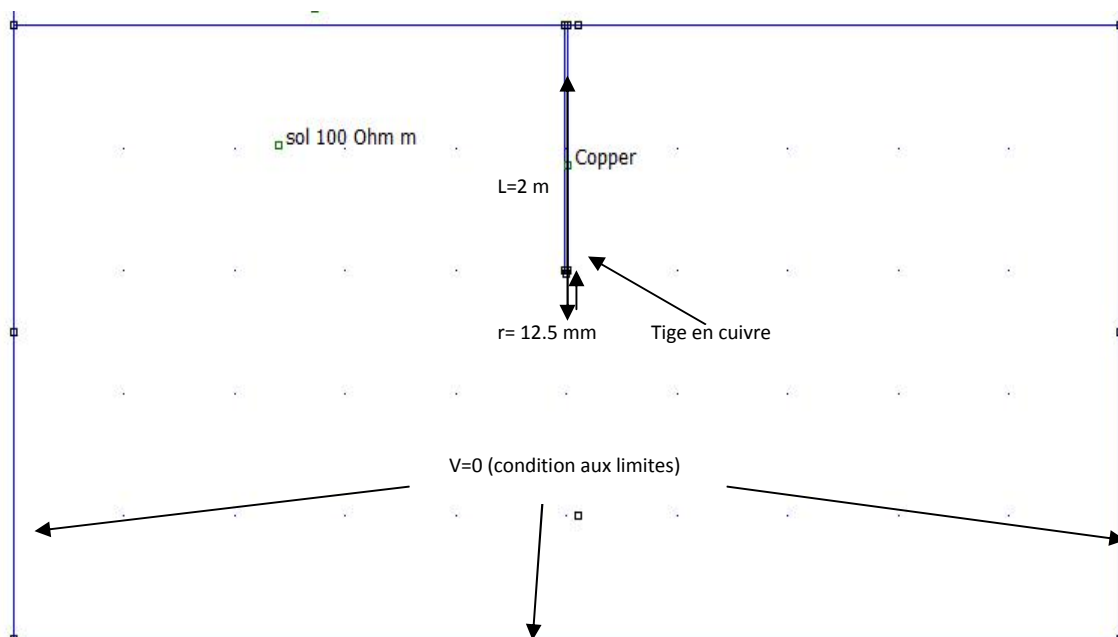


Figure V.1 : Tige de terre verticale sous environnement FEMM 4.2

V.3.1. Impédance en fonction de la fréquence

En utilisant le logiciel FEMM 4.2, nous étudions la variation de l'impédance de cette configuration de mise à la terre en fonction de la fréquence, pour différentes résistivités du sol.

Pour le calcul de l'impédance de mise à la terre de cette configuration, nous utilisons la relation II.16 déjà mentionnée dans le chapitre 2.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right)$$

La relation de l'impédance de mise à la terre peut être déduite à partir de la relation précédente en substituant R par $|Z_{EF}|$ et $\frac{\rho}{2\pi l}$ par $\frac{|E|}{|J|}$. Nous obtenons :

$$|Z_{EF}| = \frac{|E|}{|J| \cdot 2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right)$$

avec :

$|Z_{EF}|$: Le module de l'impédance de mise à la terre calculée par le FEMM ;

$|E|$: Le module du vecteur champ électrique ;

$|J|$: Le module du vecteur densité de courant électrique ;

ρ : La résistivité du sol ;

l : La longueur de la tige ;

r : Le rayon de la tige.

Nous calculons les variations de l'impédance en fonction de la fréquence pour les valeurs de résistivité suivantes : $\rho = 200, 500, 1000$ et $2000 \Omega\text{m}$ et pour une permittivité relative $\epsilon_r = 30$.

Ensuite, nous examinons la variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour les valeurs de permittivité suivantes : $\epsilon_r = 5, 30$ et 45 pour une résistivité $\rho = 1000 \Omega\text{m}$.

Les résultats ainsi obtenus sont présentés aux figures V.2, V.3 respectivement.

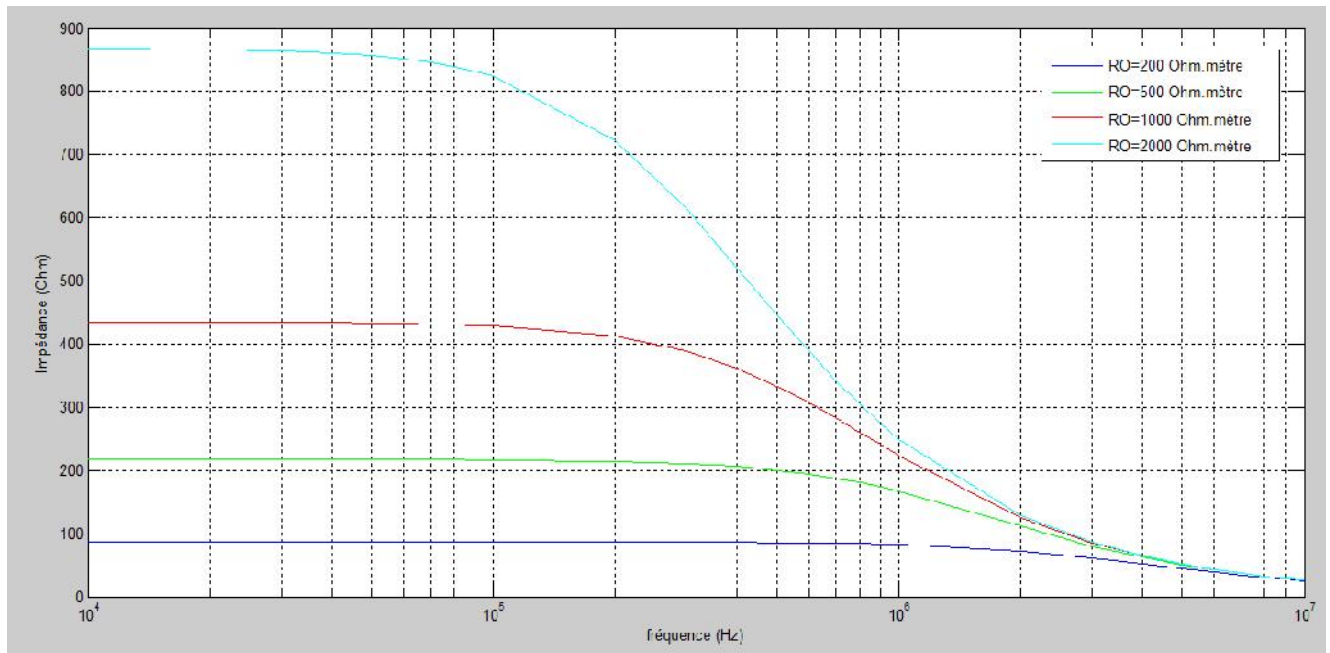


Figure V.2 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration d'une tige verticale en fonction de la fréquence pour différente résistivité ; $\epsilon_r=30$

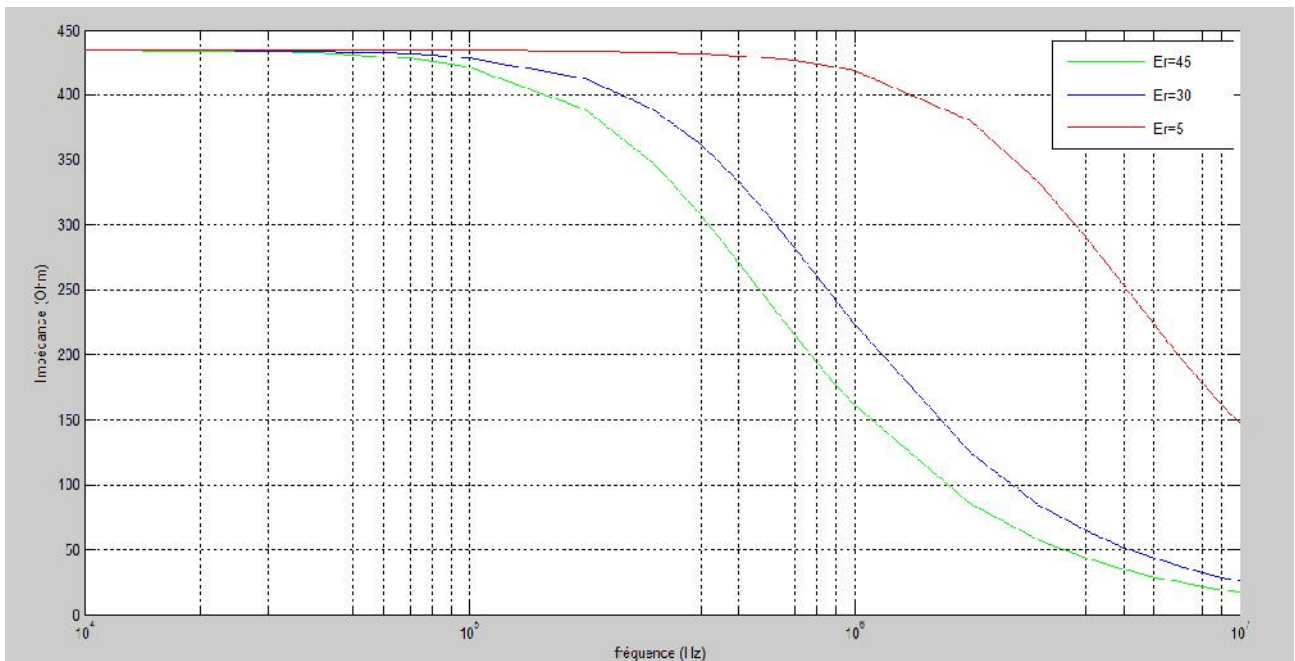


Figure V.3 : Evolution de l'impédance de mise à la terre pour la configuration d'une tige verticale en fonction de la fréquence pour différentes permittivités ; $\rho=1000 \text{ hm}$

Comme c'est le cas pour une configuration de 3 tiges en parallèle, l'impédance de mise à la terre pour une seule tige verticale dépend de la résistivité du sol ; plus la résistivité du sol augmente, l'impédance devient plus grande.

Elle dépend également de la permittivité du sol. Plus la permittivité est faible, l'impédance présente des valeurs plus grandes. Mais l'effet de la permittivité n'apparaît qu'à partir d'une certaine fréquence de coupure. Sachant que la fréquence de coupure dépend des caractéristiques électriques du sol ; elle diminue avec l'augmentation de la résistivité et de la permittivité du sol.

Pour un même sol ayant une résistivité et permittivité fixes, la variation de l'impédance en fonction de la fréquence présente deux parties :

- Une première partie caractérisée par une impédance constante, correspondant à un comportement purement résistif pour les fréquences ne dépassant pas la fréquence de coupure ;
- Une seconde partie où l'impédance commence à diminuer lorsque la fréquence dépasse celle de coupure. Donc le modèle d'une résistance simple n'est plus valable et il faudrait donc rajouter une capacité en parallèle avec la résistance précédente.

V.3.2. Circuit équivalent et choc de foudre

Afin d'étudier le comportement de la tige de terre dans un sol homogène face à un choc de foudre, nous proposons un circuit électrique équivalent. Suivant l'étude faite précédemment concernant la variation de l'impédance de la tige en fonction de la fréquence, nous optons pour un circuit électrique composé d'une résistance R en parallèle avec une capacité C (figure V.4).

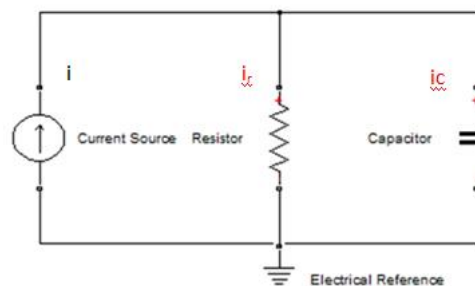


Figure V.4 : Circuit électrique équivalent

La résistance de ce circuit est calculée par la relation II.16 [EDF, 1984] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right)$$

La capacité est déterminée par la relation suivante [Visacro et De Conti, 2007] :

$$C = \frac{\rho \varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right)} \dots (V.1)$$

L'impédance totale du circuit équivalent est par conséquent: $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}} \dots\dots(V.2)$

En utilisant la relation précédente, nous traçons l'allure de l'impédance totale du circuit électrique équivalent $|Z_{RC}|$ en fonction de la fréquence. Nous avons considéré une résistivité égale à 1000 Ωm , et une permittivité équivalente à 30.

La courbe ainsi trouvée est comparée à celle de la variation fréquentielle de l'impédance du système tirée à partir du logiciel FEMM.

Les résultats de l'étude comparative sont illustrés sur la figure V.5. Cette dernière montre que les deux courbes mentionnées précédemment sont confondues. Ceci reflète que le circuit RC parallèle ainsi proposé modélise parfaitement la tige de terre enterrée dans un sol homogène.

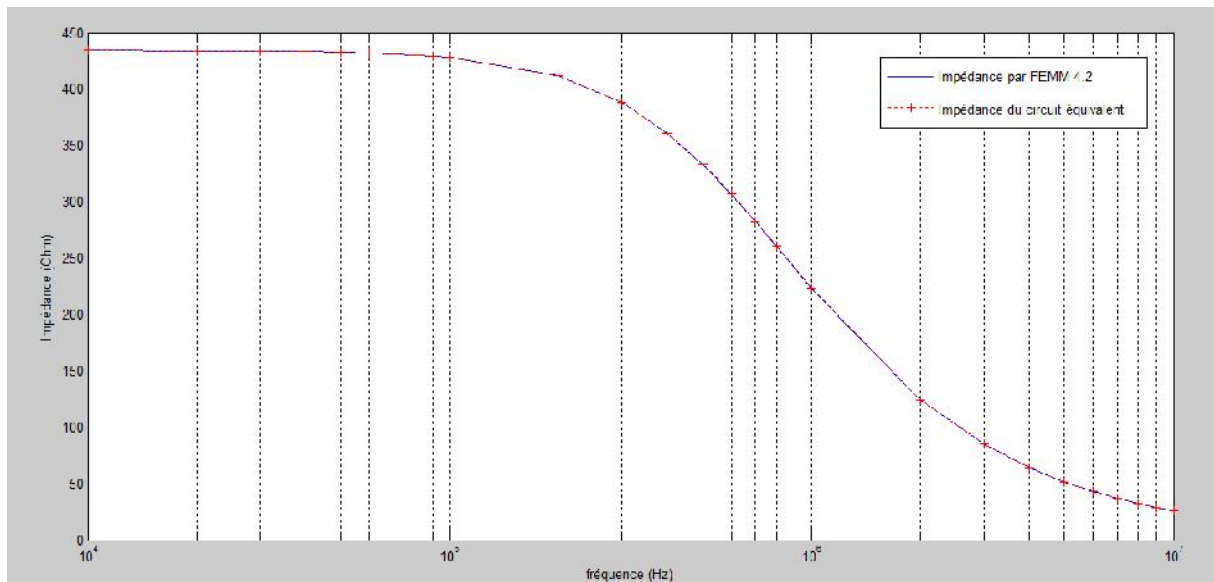
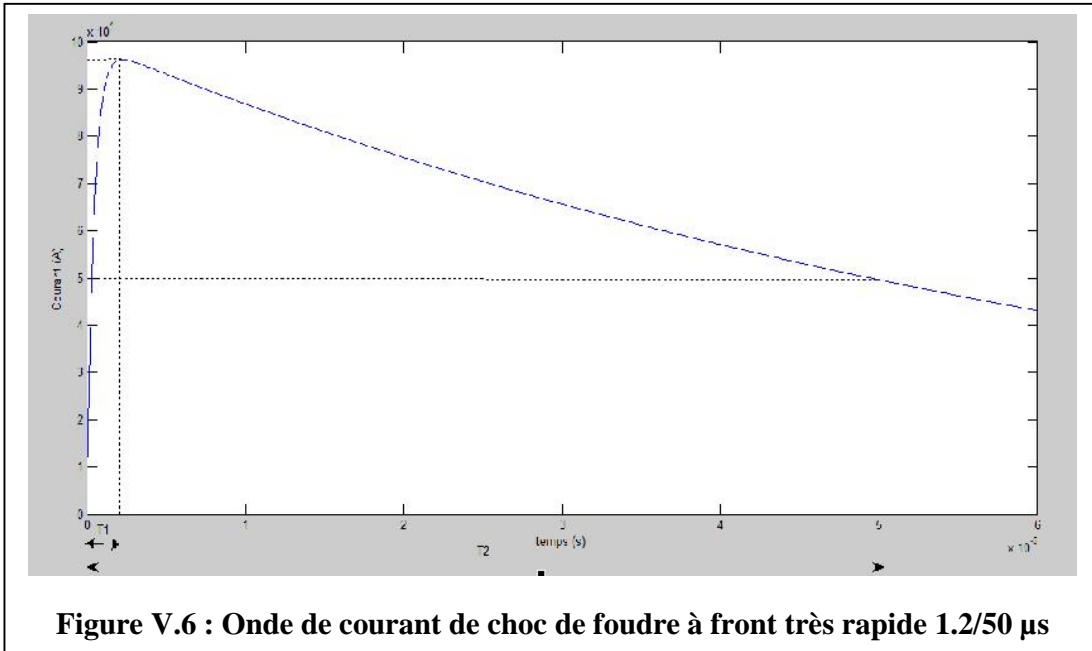
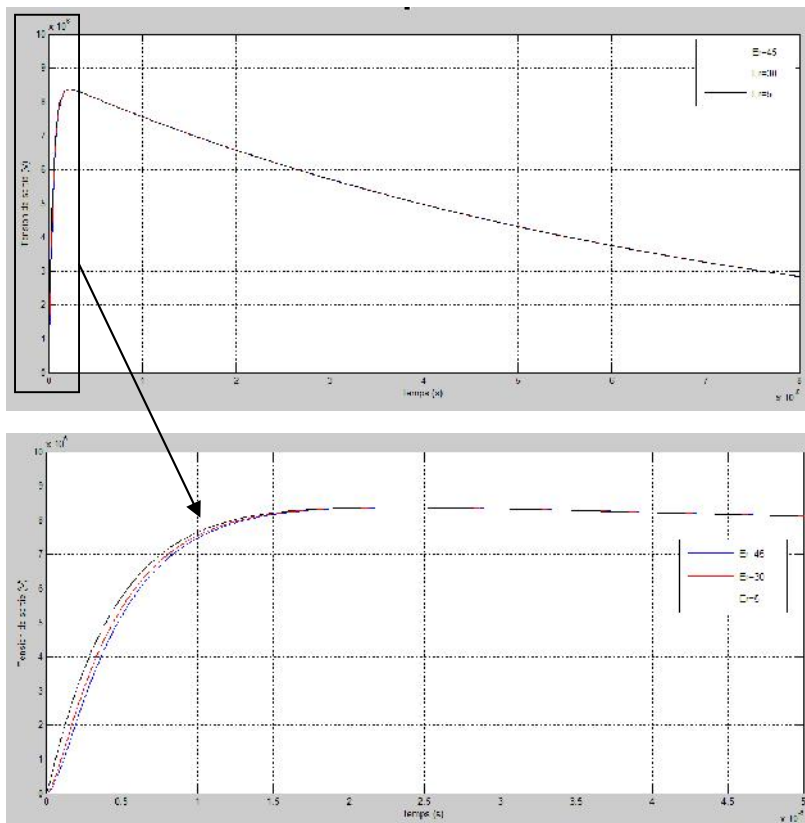


Figure V.5 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent Z_{RC} pour $\rho = 1000 \text{ } \Omega\text{m}$ et $\epsilon_r = 30$

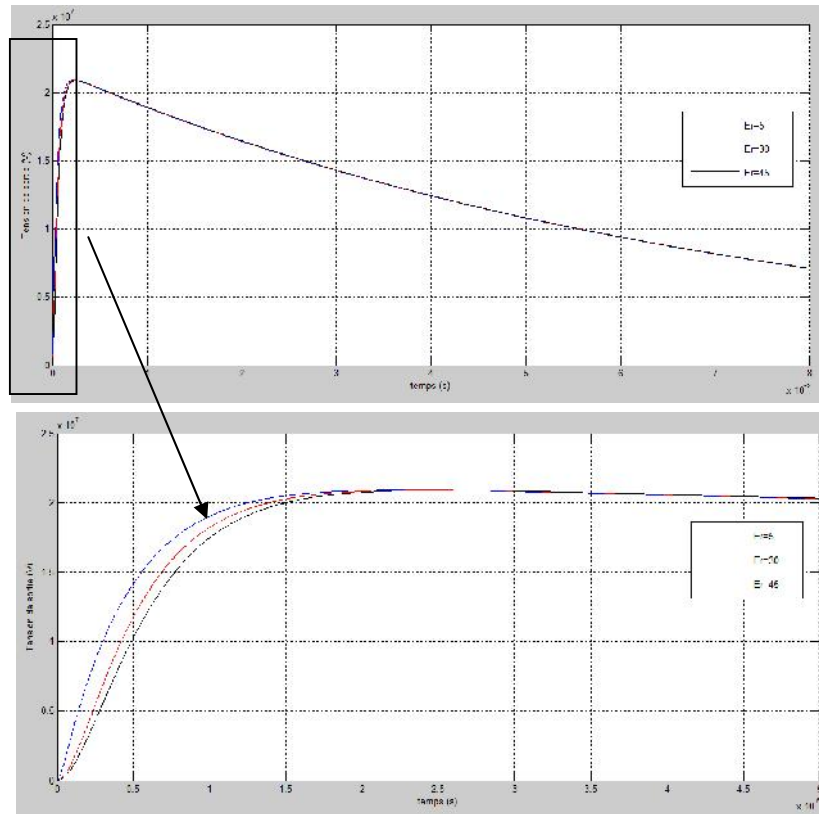
Une fois le circuit équivalent validé, nous lui injectons une onde de courant de foudre pour but d'étudier son comportement face à un choc de foudre. Cette onde est à front très rapide (1.2/50 μs), de valeur maximale de 100 kA, comme le montre la figure V.6 :



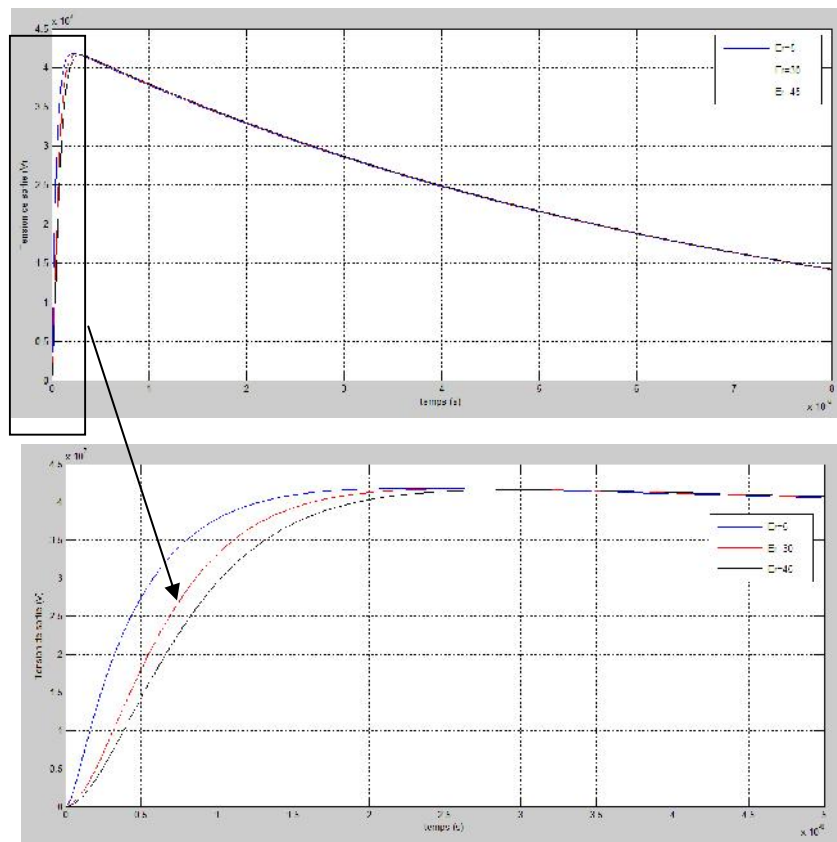
Les figures V.7.a, V.7.b, V.7.c représentent la variation temporelle de la tension de sortie aux bornes de la résistance du circuit électrique équivalent suite à un choc de foudre. Plusieurs résistivités du sol ($\rho = 200, 500$ et $1000 \Omega\text{m}$) ont été prises pour cette simulation. Pour chacune d'elles, 3 valeurs de permittivités relatives ($\epsilon_r = 5, 30, 45$) ont été considérées pour représenter la variation temporelle de la tension.



(a) : $\rho = 200 \text{ hm}$



(b) : $\rho=500 \text{ hm}$



(c) : $\rho=1000 \text{ hm}$

Figure V.7 : Variation de la tension de sortie du circuit équivalent configuration d'une tige verticale dans un sol homogène

Pour un même sol (une résistivité et une permittivité relative données), la variation temporelle de la tension de sortie, d'après les figures précédentes, prennent une forme d'onde. Son amplitude dépendant, entre autres, de la résistivité et de la permittivité relative, diffère d'un sol à un autre. En effet, nous remarquons que la tension de sortie est plus grande pour les sols ayant une résistivité plus grande. A titre d'exemple, notons une tension maximale de 8,4 MV pour une résistivité 200 Ωm , 21 MV pour 500 Ωm et 42 MV pour 1000 Ωm .

Par ailleurs, cette tension diminue quand la permittivité du sol augmente. Cependant, l'effet de la variation de la permittivité du sol n'est pas aussi remarquable que celle de la résistivité ; nous ne l'apercevons que dans un intervalle très petit du temps [0,5] μs .

V.4. Sol hétérogène à deux couches

Dans ce qui suit, nous gardons le même système de mise à la terre (tige verticale) et changeons uniquement le type de sol. A cet effet, la tige est enterrée dans un sol stratifié (hétérogène) à deux couches de résistivités différentes. Deux cas de figure sont considérés lors de l'enfouissement de la tige dans un tel sol:

- la tige est entièrement placée dans la première couche ;
- la tige pénètre dans la deuxième couche.

Pour ces deux cas, nous étudions le comportement fréquentielle de l'impédance. Par la suite, nous proposons un circuit électrique équivalent. Nous étudions finalement, à l'aide de ce circuit, le comportement de la tige de terre face à un choc de foudre. Nous supposons que les deux couches possèdent la même permittivité.

V.4.1. Tige se situe dans la couche supérieure

La figure V.8 montre le 1^{er} cas considéré pour notre étude du système de mise à la terre dans un sol hétérogène. La tige est située entièrement dans la couche supérieure de résistivité ρ_1 .

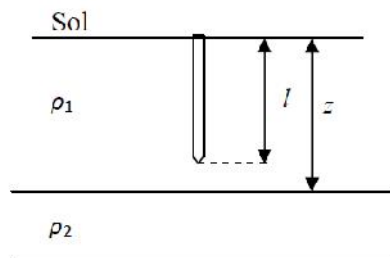


Figure V.8 : Tige de terre enfouie dans la couche supérieure d'un sol stratifié à deux couches

V.4.1.1 : Impédance en fonction de la fréquence

Nous calculons l'impédance de mise à la terre de la configuration présentée sur la figure précédente en fonction de la fréquence. En vue de cela, nous utilisons le logiciel FEMM 4.2. Ce dernier nous permet de trouver les grandeurs suivantes : $|E_1|$, $|J_1|$, $|E_2|$, $|J_2|$, tel que : $\rho_1 = \frac{|E_1|}{|J_1|}$ et $\rho_2 = \frac{|E_2|}{|J_2|}$.

avec:

$|E_1|, |E_2|$: Modules des vecteurs champs électriques des couches supérieure et inférieure respectivement ;

$|J_1|, |J_2|$: Modules des vecteurs densités de courant des couches supérieure et inférieure respectivement ;

ρ_1 : Résistivité de la couche supérieure ;

ρ_2 : Résistivité de la couche inférieure.

En se basant sur la formule II.31 mentionnée dans le chapitre 2, et en substituant ρ_1 et ρ_2 respectivement par $\frac{|E_1|}{|J_1|}$ et $\frac{|E_2|}{|J_2|}$, l'impédance de mise à la terre dans notre cas (une tige verticale située dans la couche supérieure) est déterminée par la relation suivante :

$$|Z| = \frac{|E_1|}{|J_1| 2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \left(\frac{\frac{nz}{l} + 1}{\frac{nz}{l} - 1} \right) \right]$$

avec :

l : Longueur de l'électrode ;

K : Coefficient de réflexion donné par la relation : $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$;

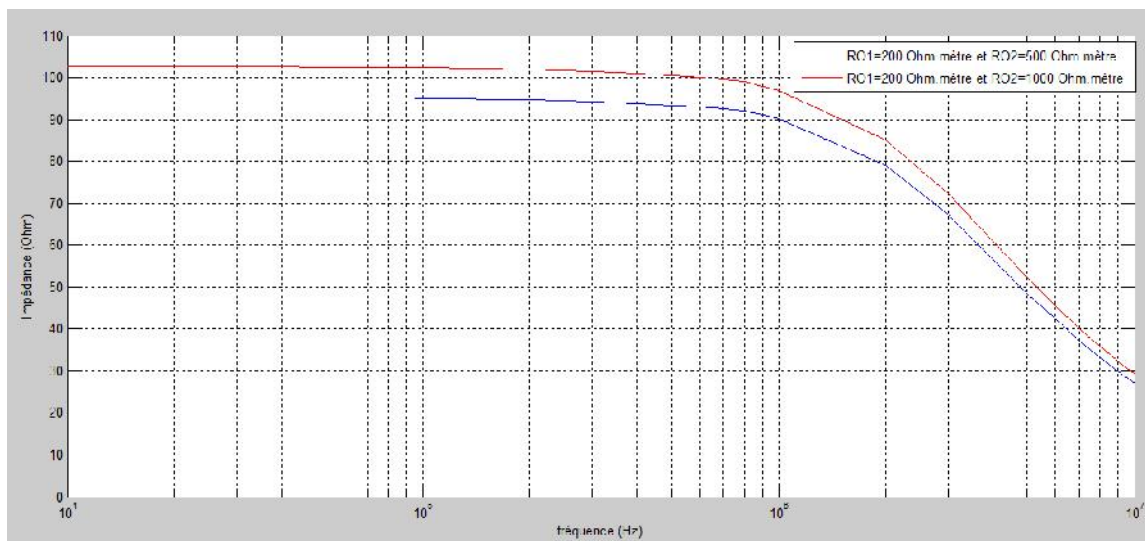
z : Profondeur de la couche supérieure ;

r : Rayon de la tige.

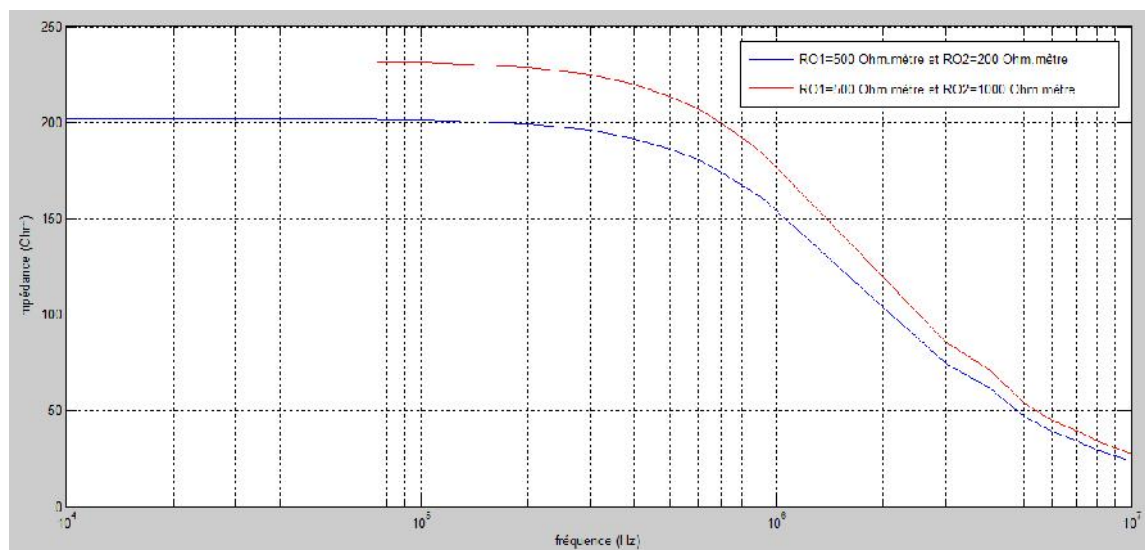
Comme applications, nous traçons la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le cas où le sol est caractérisé par une permittivité relative de 30, et de résistivités :

1. $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$;
2. $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
3. $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$;
4. $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
5. $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$;
6. $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$.

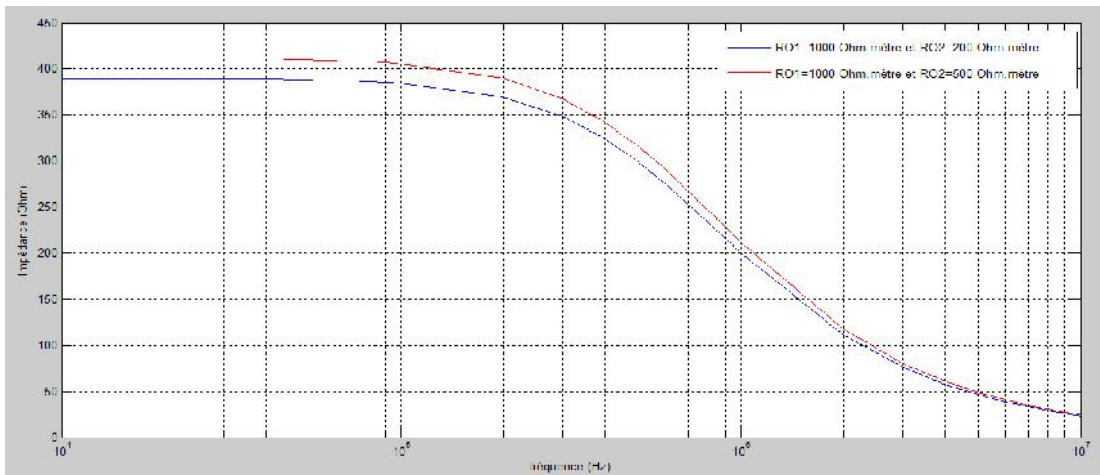
Les courbes V.9.a, V.9.b, V.9.c, ont été obtenues en gardant la valeur de la résistivité ρ_1 constante et changeant uniquement la résistivité ρ_2 . Il s'agit de comparer l'impédance dans le cas des sols : (1) et (3), (2) et (5), et finalement (4) et (6).



(a) : $\rho_1=200 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$; $\rho_1=200 \text{ hm}$ et $\rho_2=1000 \text{ hm}$

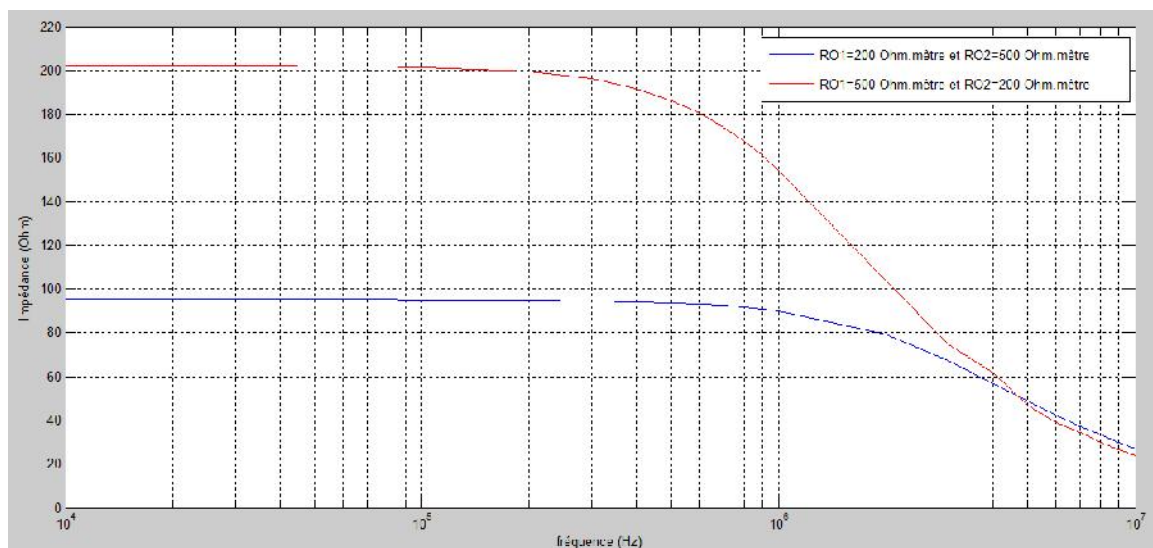


(b) : $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=200 \text{ hm}$; $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=1000 \text{ hm}$

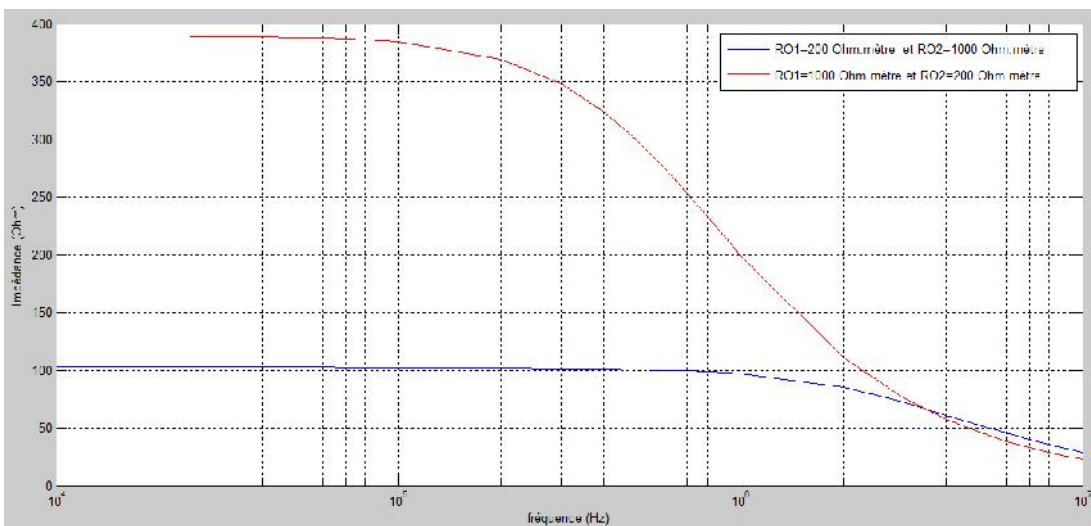


(c) : $r_1=1000 \text{ hm}$ et $r_2=200 \text{ hm}$; $r_1=1000 \text{ hm}$ et $r_2=500 \text{ hm}$

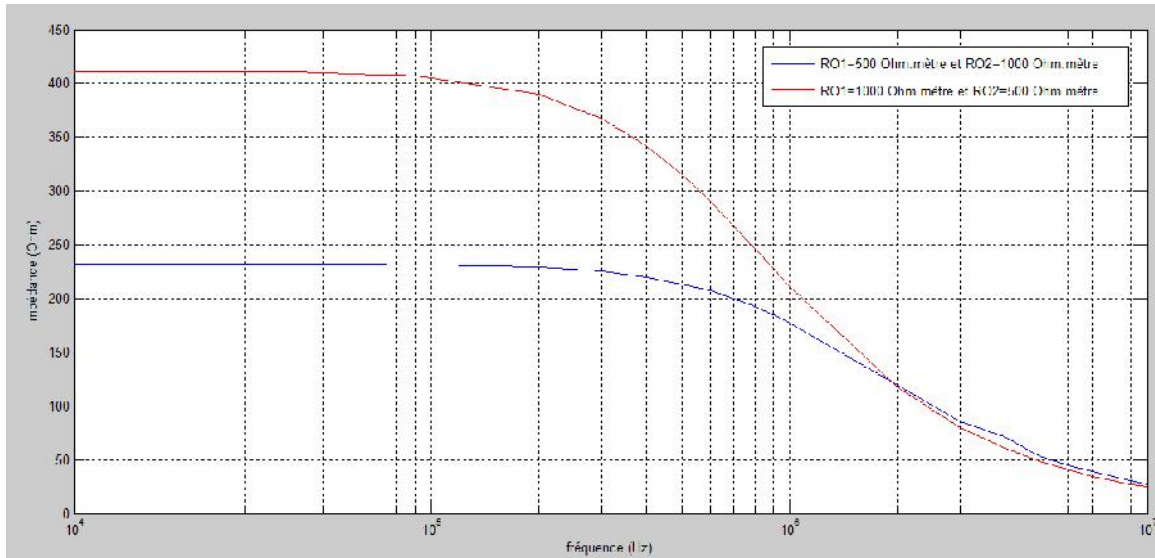
Les courbes V.9.d, V.9.e, V.9.f ont été obtenues en confrontant les valeurs de l'impédance inversant les valeurs de résistivités (courbes D, E et F correspondent aux sols (1) et (2), (3) et (4), (5) et (6) respectivement).



(d) : $r_1=200 \text{ hm}$ et $r_2=500 \text{ hm}$; $r_1=500 \text{ hm}$ et $r_2=200 \text{ hm}$



(e) : $r_1=200 \text{ hm}$ et $r_2=1000 \text{ hm}$; $r_1=1000 \text{ hm}$ et $r_2=200 \text{ hm}$



(f) : $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=1000 \text{ hm}$; $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$

Figure V.9: Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour la configuration d'une tige verticale dans un sol hétérogène à deux couches de résistivités ρ_1 , ρ_2 et $r_r=30$

Nous remarquons d'après les 6 figures précédentes, que pour un même sol (ρ_1 et ρ_2 donnés), l'impédance de mise à la terre est constante pour les basses fréquences ne dépassant pas la fréquence de coupure. Cette dernière diffère d'un sol à un autre tout dépend de ses deux résistivités ρ_1 et ρ_2 . Dans cette plage de fréquence, le système peut être modélisé par une simple résistance. Au-delà de la fréquence de coupure, nous remarquons que l'impédance diminue en tendant vers une valeur fixe. Dans ce cas là, un circuit électrique capacitif serait plus convenable pour la modélisation de la tige de terre qu'une simple résistance. Un tel circuit, dont nous vérifierons la validité plus tard, est composé d'une résistance en parallèle avec une capacité.

Même si la tige de terre est entièrement enfouie dans la couche supérieure de résistivité ρ_1 , les figures V.9.a, V.9.b, V.9.c, montrent que pour deux sols ayant la même résistivité ρ_1 et différentes résistivités ρ_2 , l'impédance de la tige de terre n'est pas la même. Pour une valeur donnée de ρ_1 , l'impédance de mise à la terre devient plus grande si nous augmentons la résistivité de la couche inférieure ρ_2 . Prenons comme exemple le cas de la figure V.9.a, nous voyons bien que l'impédance dans le cas où : $\rho_1=200 \text{ } \Omega\text{m}$ et $\rho_2=1000 \text{ } \Omega\text{m}$ est égale à $102 \text{ } \Omega$, et pour : $\rho_1=200 \text{ } \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \text{ } \Omega\text{m}$ est égale à $95 \text{ } \Omega$. En effet, l'impédance dépend des deux résistivités ρ_1 et ρ_2 (donc des deux couches) peu importe l'emplacement de la tige.

Les courbes V.9.d, V.9.e, V.9.f montrent qu'en inversant entre les valeurs de résistivités des deux couches nous n'aurons pas les mêmes impédances. Ces courbes montrent aussi que l'impédance de la tige de terre est beaucoup plus sensible à la variation de ρ_1 que ρ_2 . En effet, en fixant une valeur donnée pour ρ_1 , les résultats trouvés pour l'impédance seront proches pour différentes résistivités ρ_2 (résistivité de la couche inférieure). En outre, ces résultats s'éloignent d'autant plus que cette résistivité ρ_2 augmente.

A titre d'exemple, notons pour des basses fréquences, que l'impédance de mise à un la terre dans un sol ayant $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$ est de 95Ω , et pour un sol ayant $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$, cette impédance est de 102Ω (une différence de seulement 7Ω)

Nous pouvons dire donc que dans le cas où la tige est située entièrement dans la couche supérieure, l'impédance est plus influencée par la variation de la résistivité de la couche supérieure que par celle de la couche inférieure.

Nous considérons maintenant un sol hétérogène à deux couches de résistivités $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$. La permittivité relative, gardée la même pour les deux couches, a été variée. Nous optons pour les valeurs suivantes : 5, 30 et 45.

La figure V.10 montre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans de telles circonstances. Nous remarquons que l'impédance de mise à la terre est plus grande pour des valeurs plus faibles de la permittivité du sol. Une constatation analogue a été faite pour le cas d'un sol homogène.

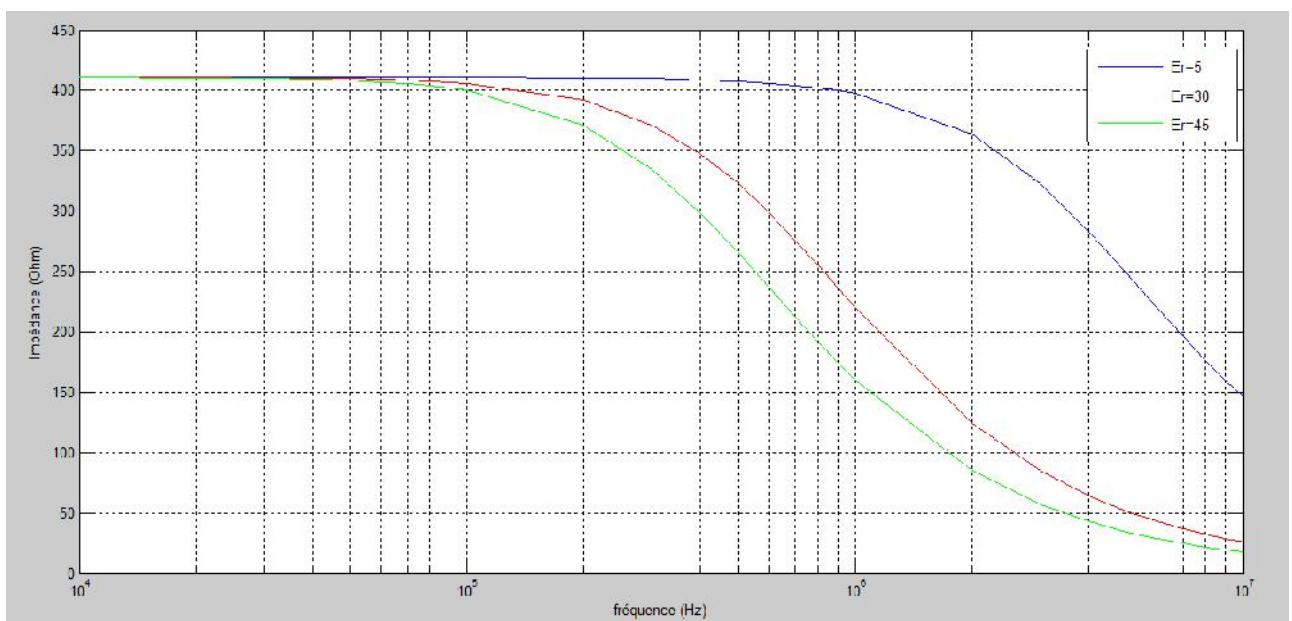


Figure V.10 : Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$ et différentes permittivités relatives

V.4.1.2. Circuit équivalent et choc de foudre

Nous proposons, suite à l'analyse faite précédemment, un circuit électrique équivalent pour la modélisation de la tige de terre en question. La variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour un sol quelconque (ϵ_1 et ϵ_2 donnés), nous conduit à proposer un circuit capacitif. Ce dernier est composé d'une résistance en parallèle avec une capacité, comme le montre la figure V.11.

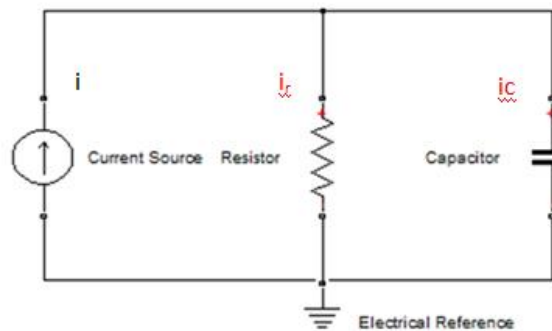


Figure V.11: Circuit électrique équivalent

La résistance R est déterminée par la relation II.31 [Chong, 2000 ; Nzuru, 2009]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \left(\frac{\frac{n^2}{l} + 1}{\frac{n^2}{l} - 1} \right) \right] ; \text{ avec } k = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}$$

A partir de la formule de la résistance précédente, nous pouvons déduire l'expression de la capacité en remplaçant ρ_1 par $\frac{1}{\epsilon_1 \epsilon_0}$ et en inversant le reste. Le facteur de réflexion devient dans ces conditions devient :

$$k = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

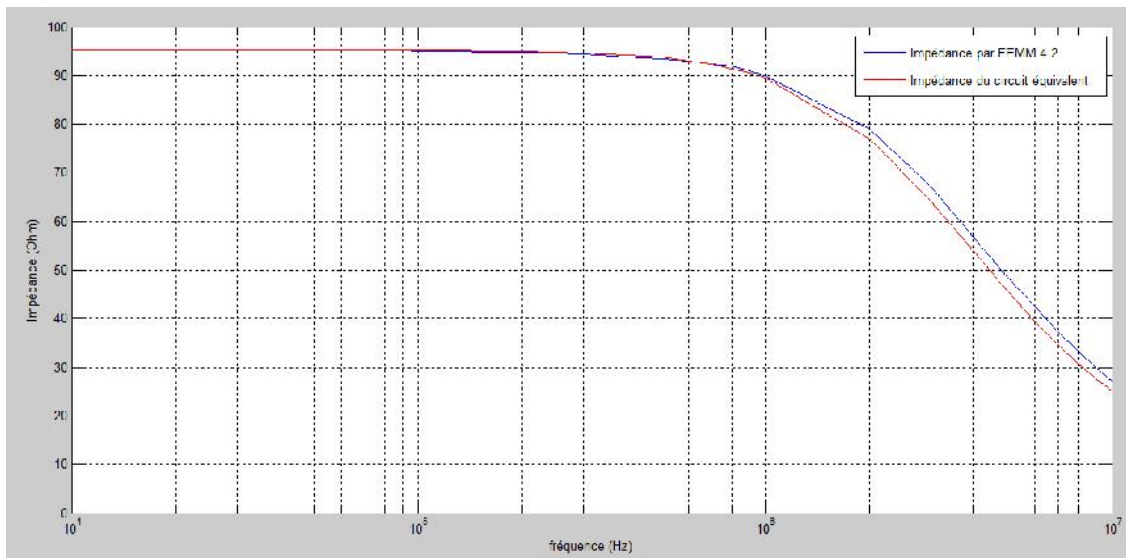
Etant donné que nous avons pris $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 30$ (la même permittivité des deux couches), le deuxième terme de la somme comprenant le facteur de réflexion devient nul. La relation finale de la capacité C que nous proposons est alors :

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 2\pi l}{\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right)} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot 2\pi l}{\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right)}$$

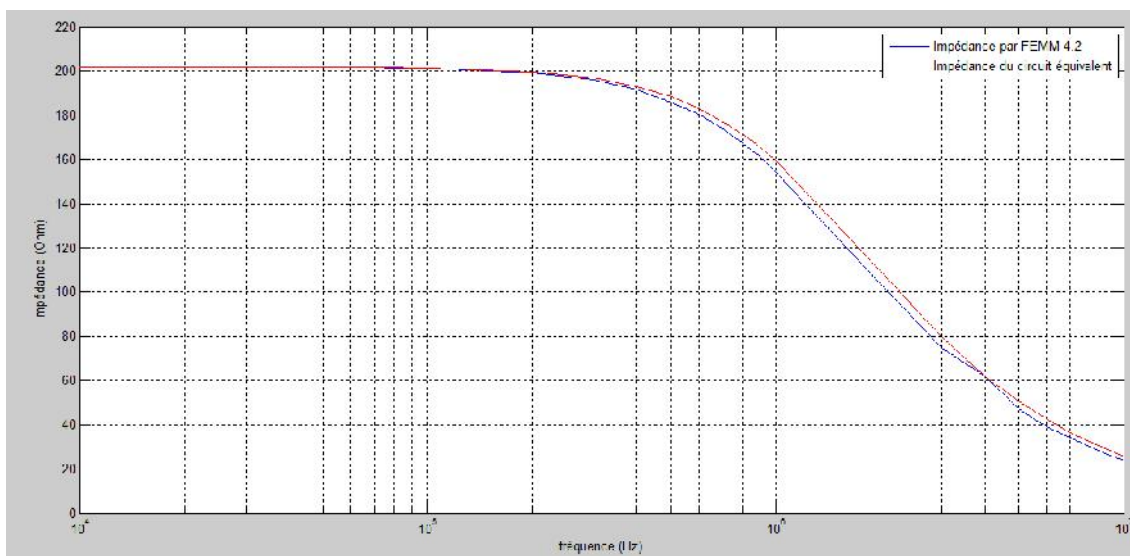
L'impédance totale du circuit est : $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$

Nous traçons ainsi, la variation de l'impédance totale en fonction de la fréquence déduite du circuit équivalent. Nous comparons les résultats trouvés avec ceux déterminés en se basant sur le logiciel FEMM 4.2 afin de vérifier la validité d'un tel circuit électrique. A cet effet, nous présentons, sur les figures V.12.a, V.12.b, V.12.c 3 exemples de calcul :

- Exemple 1 : $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$;
- Exemple 2 : $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
- Exemple 3 : $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$.



(a) : $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$



(b) : $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$

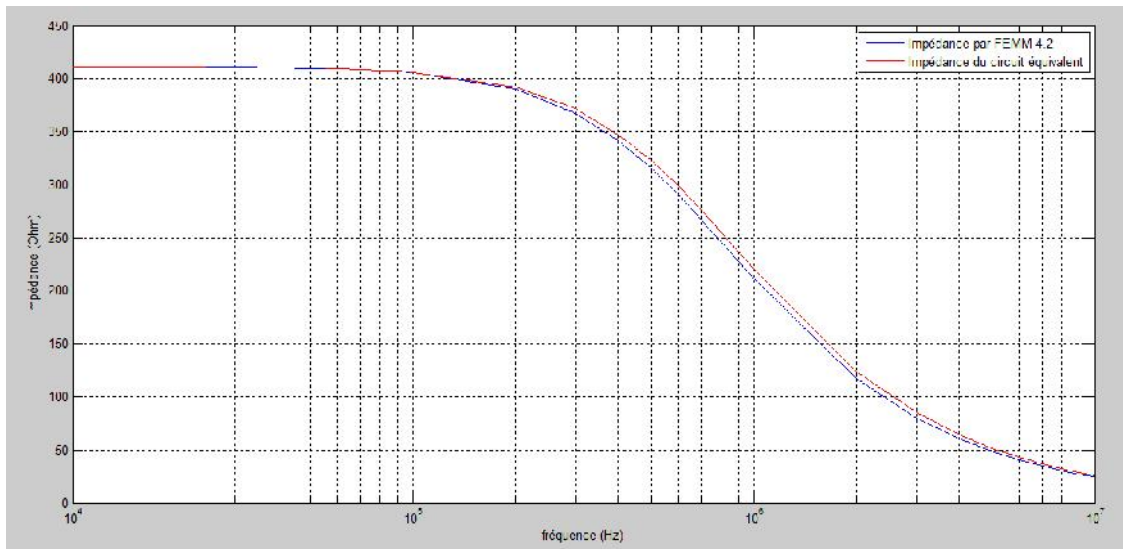
(c) : $r_1=1000 \text{ hm}$ et $r_2=500 \text{ hm}$

Figure V.12 : Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC Z_{RC} pour $r_1=30$ et différentes valeurs de r_1 et r_2

Les trois figures précédentes montrent que les résultats de la variation de l'impédance trouvés par les deux méthodes de calcul, sont très proches entre eux. Pour les basses fréquences les courbes de l'impédance sont confondues, alors que pour les hautes fréquences nous remarquons un léger décalage. Pour les 3 cas, nous notons une erreur qui ne dépasse pas 4,2 %. En effet, nous pouvons conclure que le circuit électrique proposé est suffisamment adéquat pour modéliser notre système de mise à la terre.

Le circuit électrique équivalent validé en haut, est utilisé pour l'étude du comportement du système de mise à la terre suite à un choc de foudre. Nous lui injectons, dans cette intensité, une onde de courant de foudre à front très rapide 1.2/50 μs , et de valeur de crête égale à 100 kA (figure V.13).

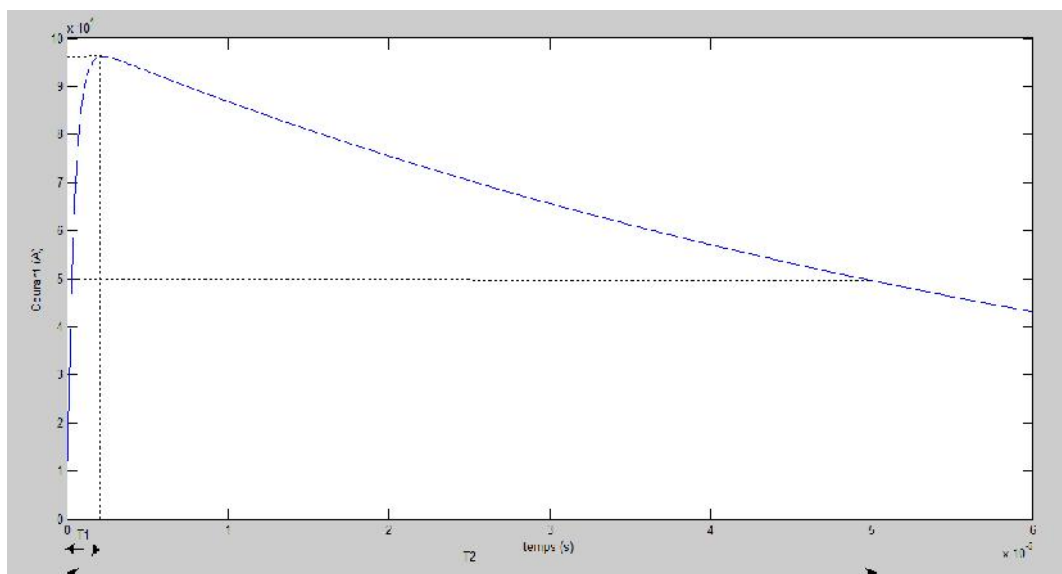
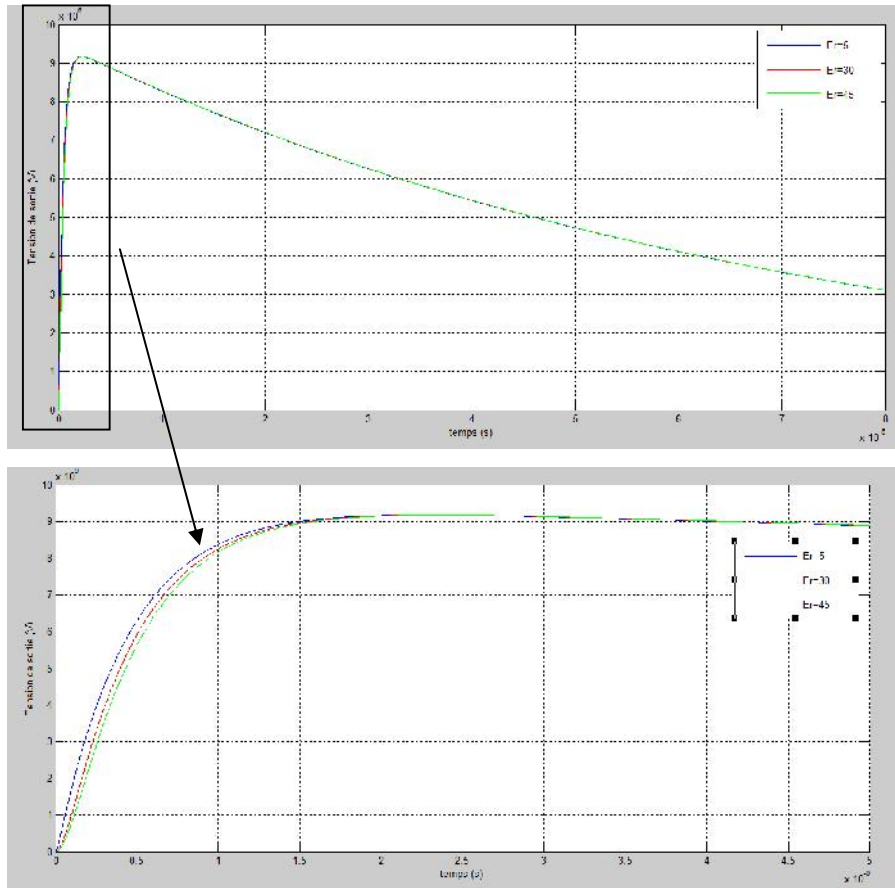


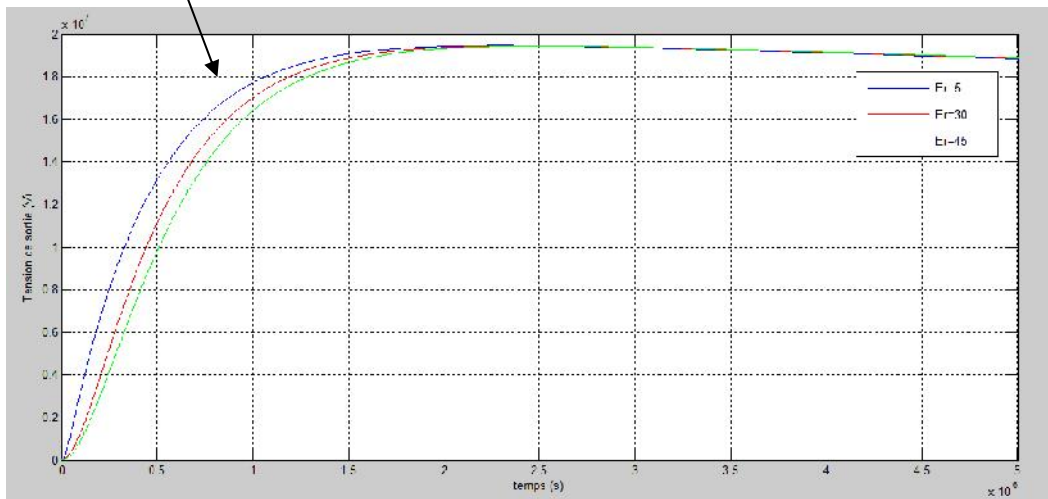
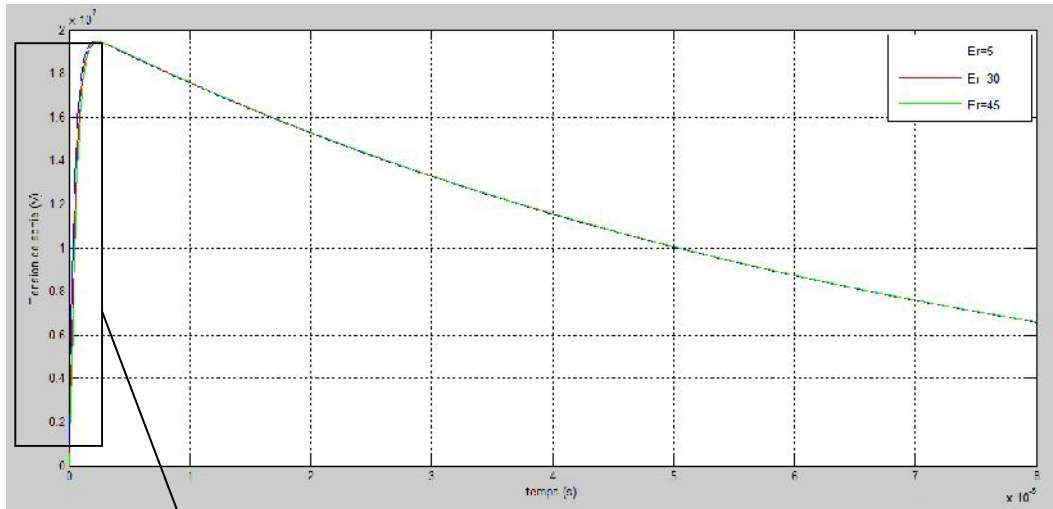
Figure V.13 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50 μs

Nous déterminons ensuite les tensions de sortie du circuit aux bornes de la résistance R ou la capacité C (R et C sont en parallèle). Nous prenons pour ceci 3 cas, et pour chaque cas 3 valeurs différentes de la permittivité : ($\epsilon_r=5, 30$ et 45) ont été adoptées..

- 1^{er} cas : $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$;
- 2^{ème} cas : $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
- 3^{ème} cas : $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$.



(a) : $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$



(b) : $r_1=500$ hm et $r_2=200$ hm

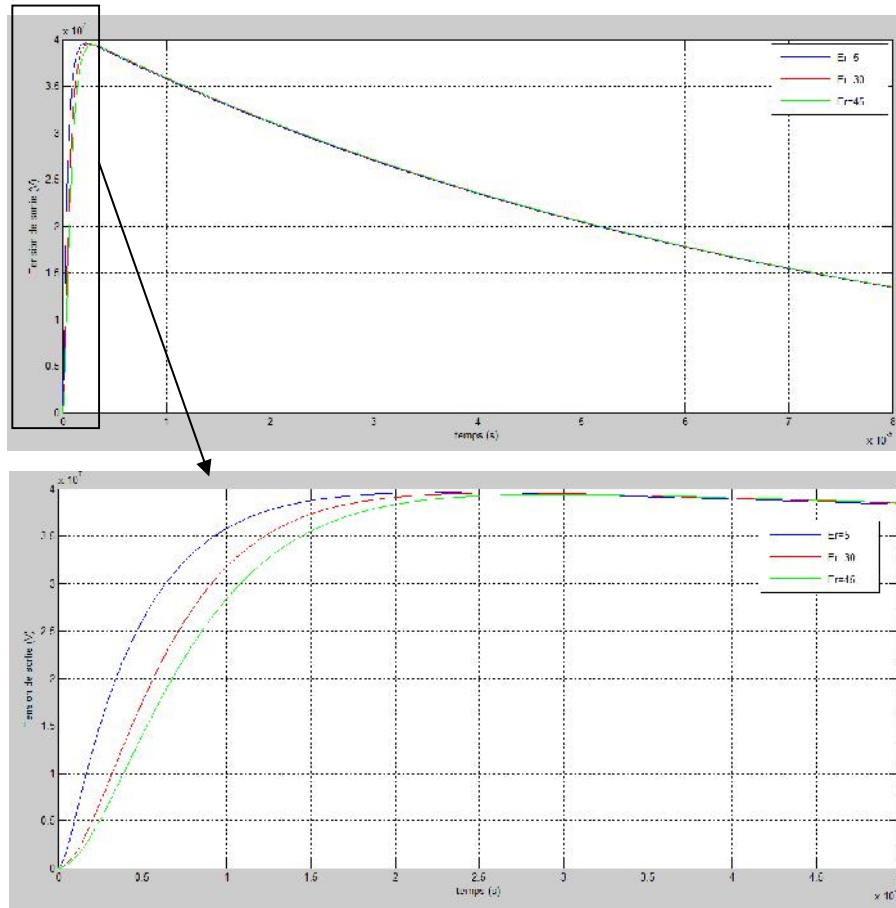


Figure V.14 : Variation de la tension de sortie du circuit équivalent pour différentes permittivités relatives $\epsilon_r=5, 30,$ et 45 et pour différentes résistivités des deux couches

Les figures V.14.a, V.14.b, V.14.c nous laissent tirer les mêmes constatations que celles faites pour le cas d'un sol homogène. La tension de sortie varie en fonction des propriétés du sol. Pour une même permittivité des deux couches de sol, cette tension varie beaucoup plus avec la variation de la résistivité de la couche supérieure ρ_1 que celle de la couche inférieure ρ_2 . Plus ρ_1 augmente la tension de sortie devient plus importante. Par ailleurs, pour une même résistivité ρ_1 , la tension augmente avec l'augmentation de ρ_2 . Nous citons par exemple les tensions maximales pour les 3 cas de figure suivants:

- 9,1 MV pour $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$;
- 17,4 MV pour $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
- 39 MV pour $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$.

Pour de mêmes résistivités, la tension de sortie augmente avec la diminution de la permittivité du sol ϵ_r . Cette augmentation reste modérée et n'est visible que dans un intervalle de temps très petit $[0,5] \mu\text{s}$.

V.4.2. Tige pénétrant dans la couche inférieure

La figure V.15 illustre le 2^{ème} cas considéré pour l'étude d'une tige de terre enfouie dans un sol stratifié verticalement. La tige pénètre dans la deuxième couche après avoir traversé complètement la première couche.

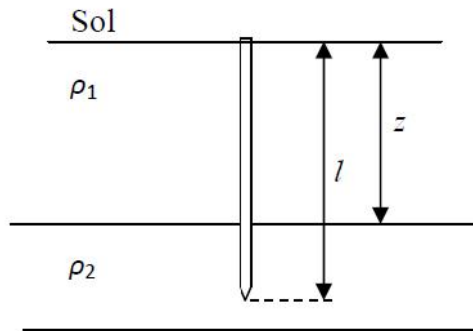


Figure V.15 : Tige de terre pénétrant la couche inférieure du sol hétérogène à deux couches

V.4.2.1. Impédance en fonction de la fréquence

Nous refaisons le même travail réalisé dans le premier cas. A l'aide du logiciel FEMM 4.2 et en se basant sur la formule II.32 (mentionnée dans le chapitre 2), nous calculons en fonction de la fréquence, l'impédance du système de mise à la terre, présenté sur la figure précédente. Le FEMM 4.2, comme nous l'avons précisé auparavant, permet de calculer les grandeurs suivantes : $|E_1|$, $|E_2|$, $|J_1|$, $|J_2|$; tels que : $|E_1| = \frac{|J_1|}{\sigma_1}$ et $|E_2| = \frac{|J_2|}{\sigma_2}$.

En remplaçant ces expressions dans la relation II.32, nous obtenons la formule suivante permettant de calculer l'impédance en fonction de la fréquence :

$$|Z| = \frac{|E_1|}{|J_1| \cdot 2\pi l} \frac{(1+k)}{(1-k) + 2k \frac{z}{l}} \left[\ln\left(\frac{2l}{r}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln\left(\frac{2nz+l}{2z(n-1)+l}\right) \right]$$

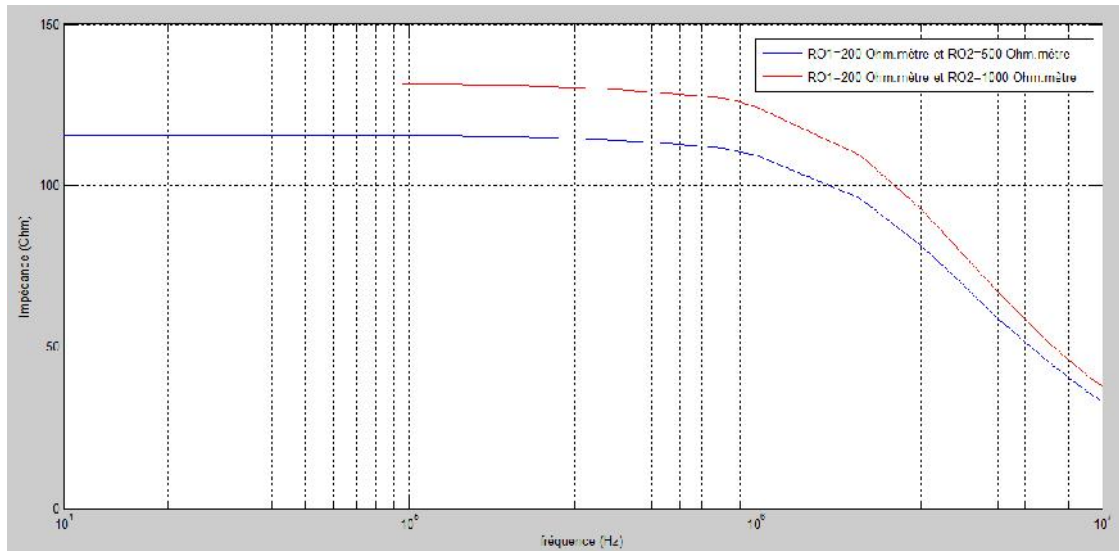
$$\text{avec : } k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Nous considérons les cas suivants :

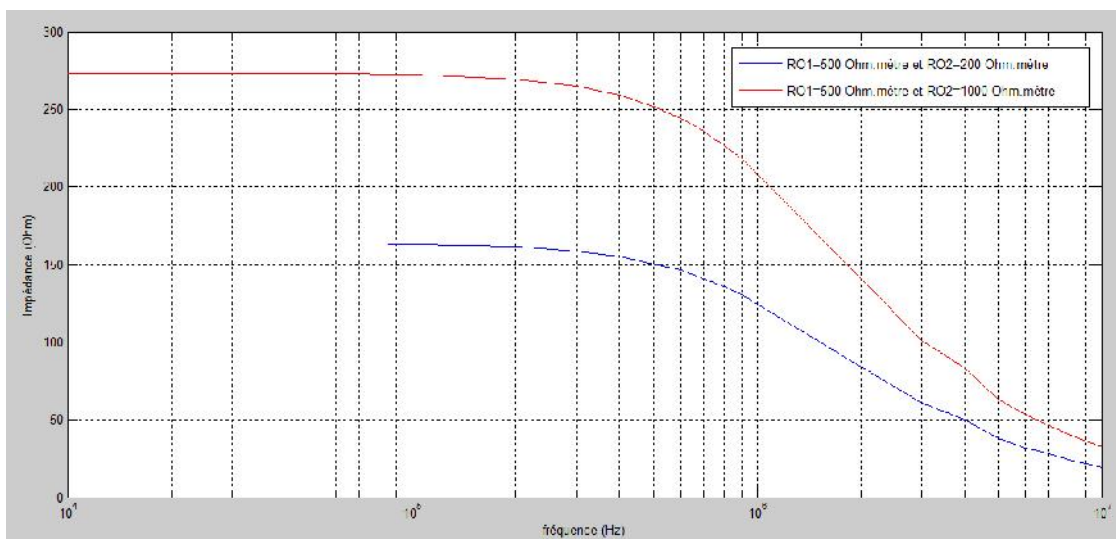
1. $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$;
2. $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
3. $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$;
4. $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
5. $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=1000 \Omega\text{m}$;

6. $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$.

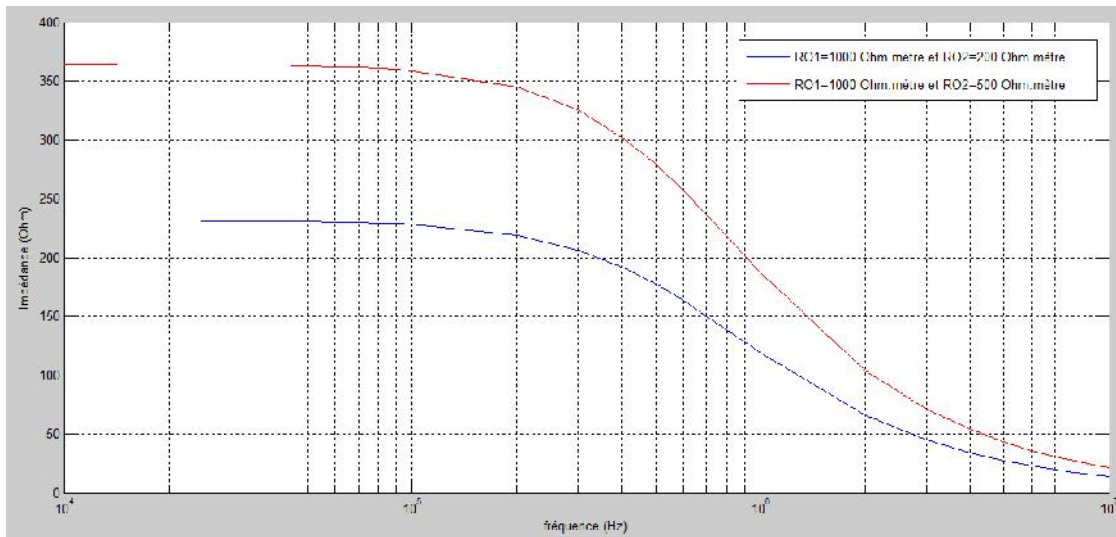
En gardant constante la résistivité ρ_1 pour deux sols donnés, les courbes V.16.a, V.16.b, V.16.c ont été trouvées en traçant l'évolution fréquentielle de l'impédance pour deux résistivités ρ_2 . Il s'agit de comparer l'impédance dans le cas des sols : (1) et (3), (2) et (5), et finalement (4) et (6).



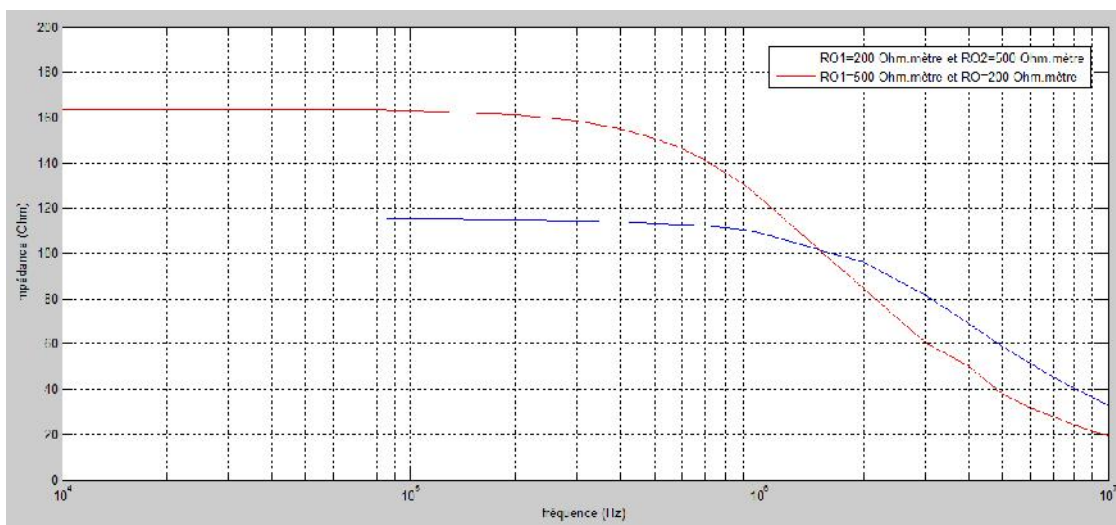
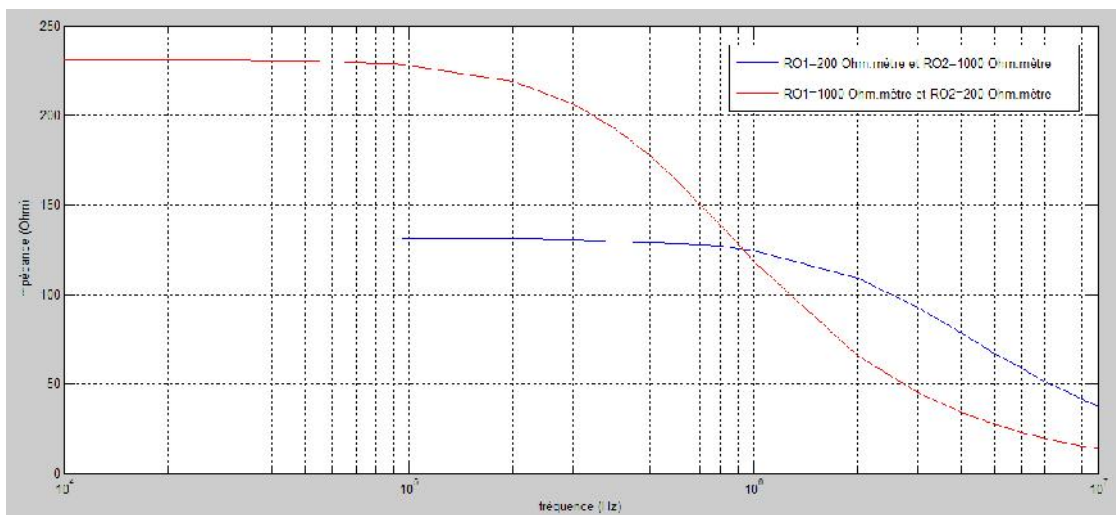
(a) : $\rho_1=200 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$; $\rho_1=200 \text{ hm}$ et $\rho_2=1000 \text{ hm}$

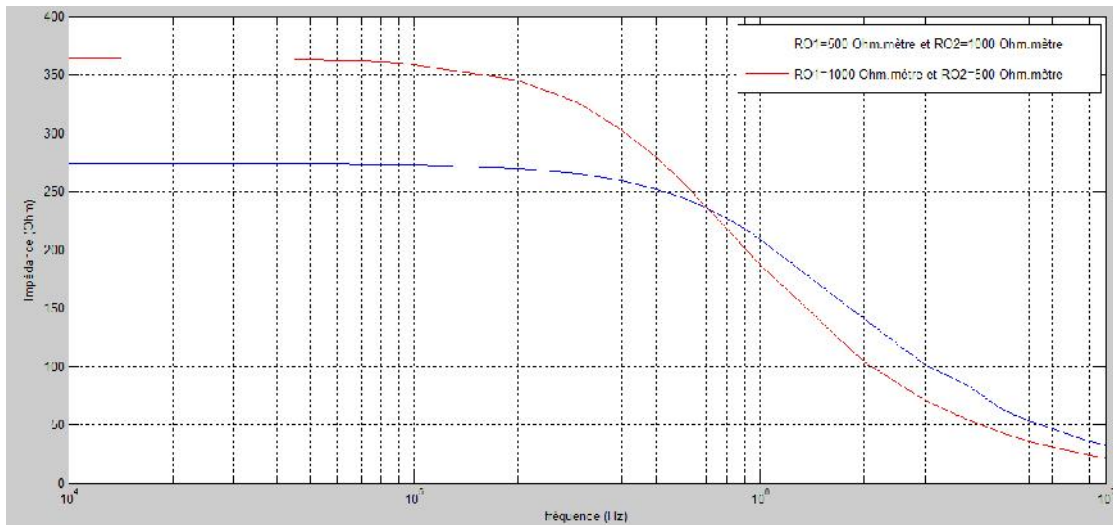


(b) : $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=200 \text{ hm}$; $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=1000 \text{ hm}$

(c) : $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=200 \text{ hm}$; $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$

Dans ce qui suit, nous comparons les valeurs de l'impédance pour un cas quelconque à ceux obtenus en inversant entre les valeurs des deux résistivités ρ_1 et ρ_2 (ρ_1 prend la valeur de ρ_2 et vice-versa). Les courbes V.16.d, V.16.e, V.16.f obtenues correspondent aux sols (1) et (2), (3) et (4), (5) et (6) respectivement.

(d) : $\rho_1=200 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$; $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=200 \text{ hm}$ (e) : $\rho_1=200 \text{ hm}$ et $\rho_2=1000 \text{ hm}$; $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=200 \text{ hm}$



(f) : $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=1000 \text{ hm}$; $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$

Figure V.16: Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour la configuration d'une tige verticale traversant deux couches de résistivités différentes ρ_1 et ρ_2 et $r=30$

Les figures V.16.a, V.16.b, V.16.c montrent que, pour une même résistivité ρ_1 de la couche supérieure, l'impédance de mise à la terre augmente avec la résistivité ρ_2 de la couche inférieure. Nous remarquons que dans notre cas, où la tige traverse les deux couches du sol, la variation de ρ_2 affecte grandement celle de l'impédance totale. Ceci n'était pas le cas quand la tige était entièrement enfouie dans la couche supérieure, où l'impédance varie peu en fonction de ρ_2 .

En outre, les figures V.16.d, V.16.e, V.16.f montrent qu'en inversant les valeurs de résistivités entre les deux couches, l'impédance totale varie. Nous expliquons quantitativement cette variation. Pour cela, nous prenons deux sols (A) et (B) tels que :

Sol (A) : ρ_{11} : Résistivité de la couche supérieure ;

ρ_{21} : Résistivité de la couche inférieure ;

Z_1 : Impédance de mise à la terre.

Sol (B) : ρ_{12} : Résistivité de la couche supérieure ;

ρ_{22} : Résistivité de la couche inférieure ;

Z_2 : Impédance de mise à la terre.

Si nous considérons que $\rho_{11} > \rho_{12}$, logiquement, nous nous attendions, en se basant sur les résultats obtenus dans le 1^{er} cas (tige située dans la première couche), à ce que $Z_1 > Z_2$ et ce quelle que soit la fréquence. Cependant cette hypothèse ($Z_1 > Z_2$) est valable jusqu'à une valeur limite de la fréquence, au-delà de laquelle la situation est inversée où Z_2 devient plus importante que Z_1 .

En revanche, nous remarquons que si nous prenons $\rho_1 = \rho_2$ et $\epsilon_1 > \epsilon_2$ alors forcément Z_1 sera plus grande que Z_2 .

Dans une seconde étape, nous étudions la variation de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour différentes permittivités. Les valeurs prises sont $\epsilon_r = 5, 30$ et 45 , alors que les résistivités sont maintenues constantes ($\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$) comme le montre la figure V.17. D'après les caractéristiques relatives aux trois permittivités considérées, les impédances sont non seulement constantes mais confondues tant que la fréquence ne dépasse pas celle de coupure. Au-delà de cette fréquence, nous remarquons que l'impédance, diminue avec l'augmentation de la permittivité du sol. Cette diminution n'apparaît qu'au-delà de la fréquence de coupure.

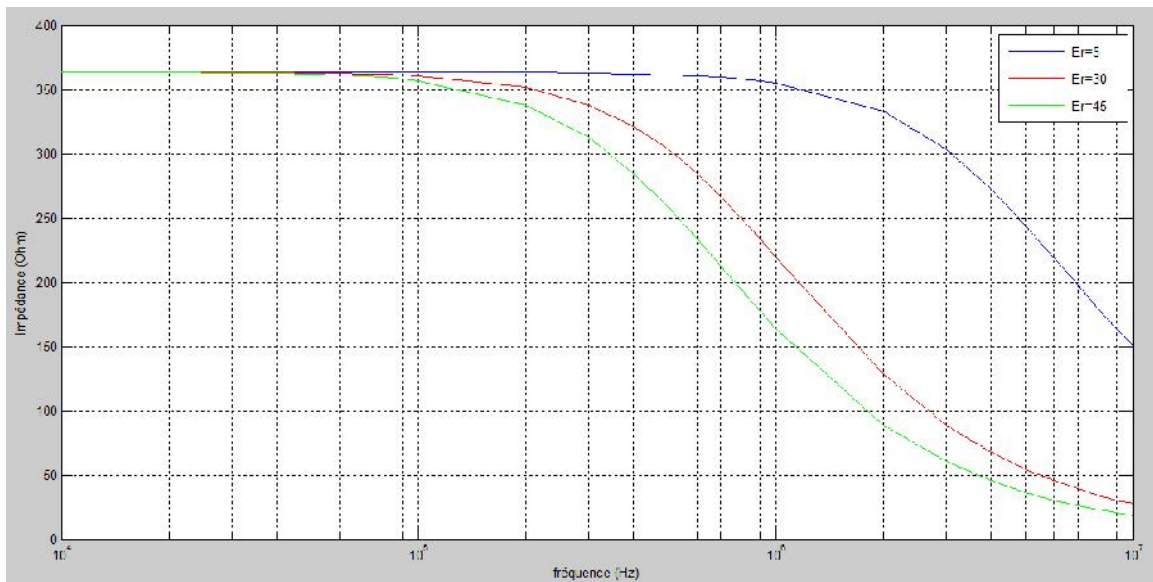


Figure V.17: Evolution de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence pour $\rho_1 = 1000 \text{ hm}$ et $\rho_2 = 500 \text{ hm}$ pour $\epsilon_r = 5, 30$ et 45

En général, l'impédance de la tige de terre enfouie dans un sol quelconque stratifié verticalement (pénétrant dans la 2^{ème} couche) est constante pour les basses fréquences inférieure à celle de coupure. Dans ce cas là, la tige de terre est modélisée par une simple résistance. Pour les hautes fréquences, l'impédance diminue en allant vers une valeur limite. Ceci peut être traduit par un comportement capacitif. Nous allons proposer, suite à cette analyse, un circuit électrique équivalent dont nous vérifierons la validité plus tard. Ce circuit est sous forme d'une résistance en parallèle avec une capacité.

V.4.2.2. Circuit équivalent et choc de foudre

L'interprétation des résultats trouvés précédemment, nous conduit à proposer un circuit électrique équivalent. En effet, comme nous l'avons précisé, ce circuit est une mise en parallèle d'une résistance R avec une capacité C comme déjà illustré sur la figure V.11.

La résistance R du circuit est déterminée par la relation II.32 [Chong, 2000 ; Nzuru, 2009]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+k)}{[(1-k)+2k^2]} \left[\ln\left(\frac{2l}{r}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln\left(\frac{2nz+l}{2z(n-1)+l}\right) \right], \quad \text{avec : } k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

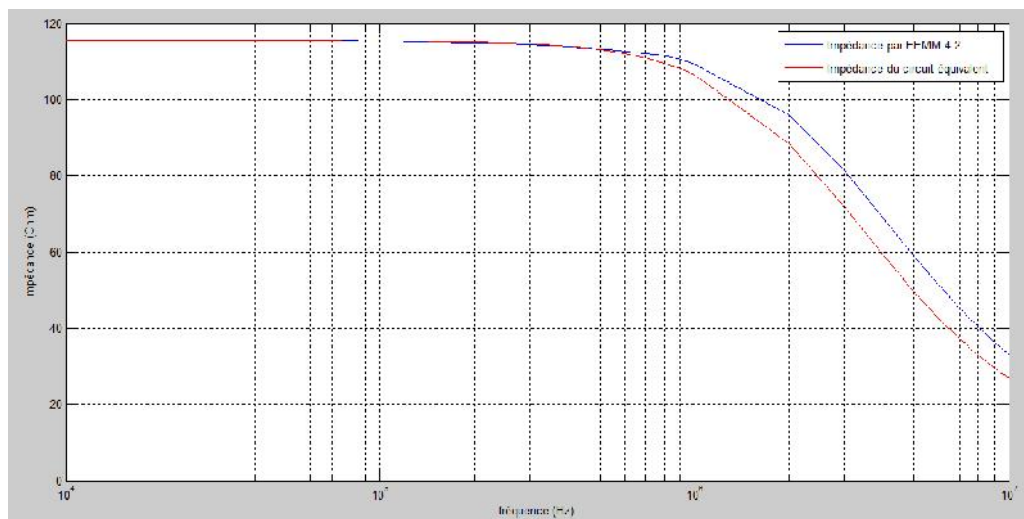
Nous proposons une expression de la capacité en s'inspirant de la formule de la résistance précédente. Pour cela, nous substituons ρ_1 par ϵ_1 et inversons le reste. Etant donné que nous avons pris une même permittivité des deux couches ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 30$), le facteur de réflexion $k = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$ devient nul. Dans ces conditions, la relation finale de la capacité C que nous proposons est alors :

$$C = \frac{\epsilon}{\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} \right)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\frac{1}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} \right)}, \quad \text{avec } \epsilon_r = 30$$

L'impédance totale du circuit est $|Z_{RC}| = \frac{R}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$

Pour vérifier la validité de ce circuit équivalent, nous faisons une comparaison entre l'impédance trouvée par le FEMM et celle du circuit électrique équivalent. Pour cela, nous traçons conjointement sur les figures V.18.a, V.18.b, V.18.c les deux impédances précédentes pour 3 sols caractérisés par :

- $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$
- $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$



(a) : $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$

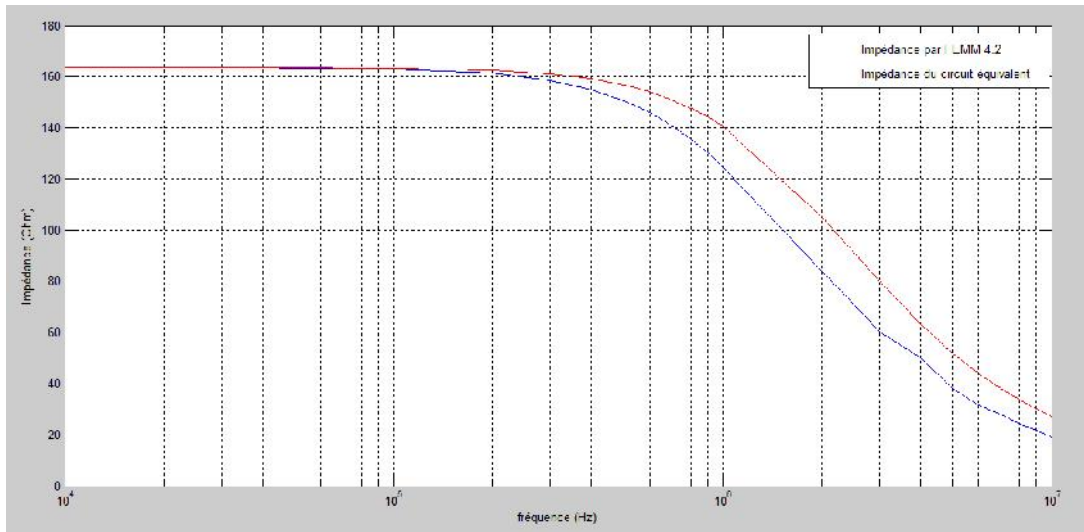
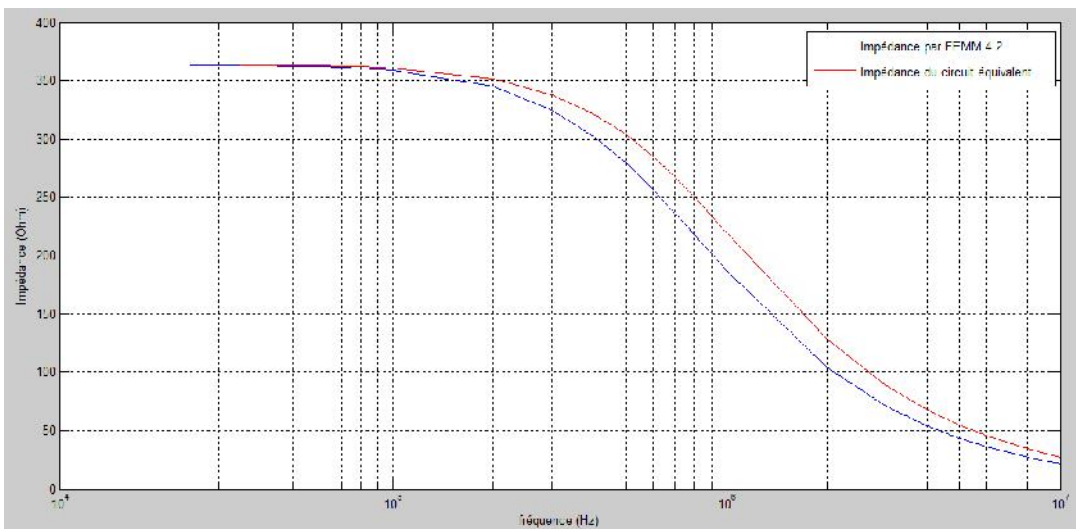
(b) : $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=200 \text{ hm}$ (c) : $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$

Figure V.18: Comparaison entre l'impédance de mise à la terre trouvée par le FEMM et celle trouvée en utilisant le circuit RC équivalent Z_{RC} pour $r=30$ et différentes valeurs de ρ_1 et ρ_2

Nous remarquons que les résultats trouvés en utilisant l'impédance totale du circuit sont proches à ceux trouvés en se basant sur le FEMM 4.2. L'écart initialement inexistant pour les basses fréquences devient relativement considérable pour les très hautes fréquences (une erreur maximale de 14 %). Nous pouvons dire donc qu'un circuit RC parallèle est valable pour modéliser la tige de terre traversant deux couches de résistivités différentes, tant que la fréquence ne dépasse une valeur limite de quelques MHz.

Après la validation du circuit équivalent, nous l'utilisons pour étudier le comportement de la tige de terre face à un choc de foudre. A cet effet, nous introduisons dans ce circuit une onde de courant à front très rapide (1.2/50 μs) ayant une valeur maximale de 100 kA (Figure V.19) :

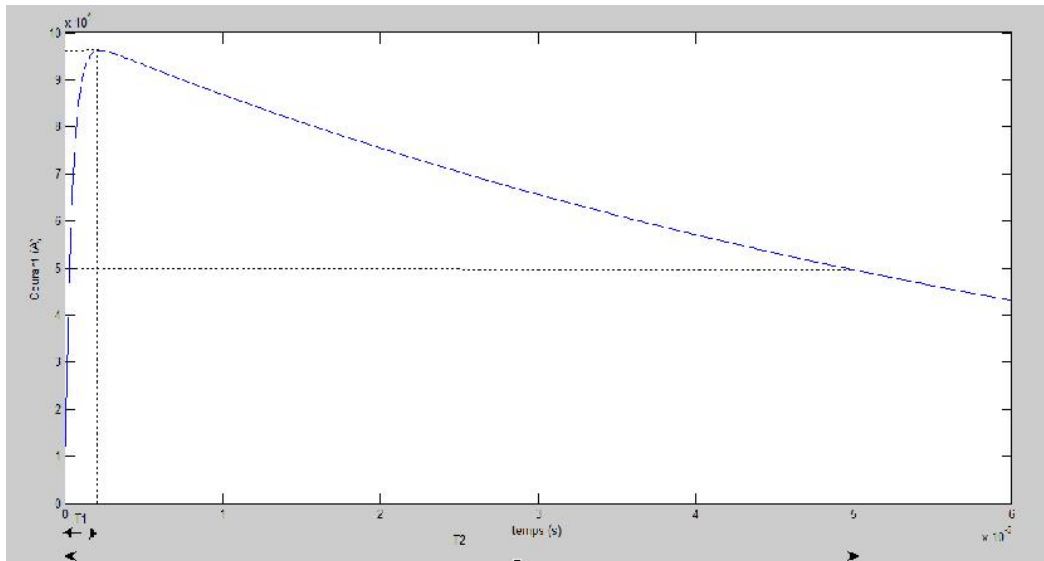
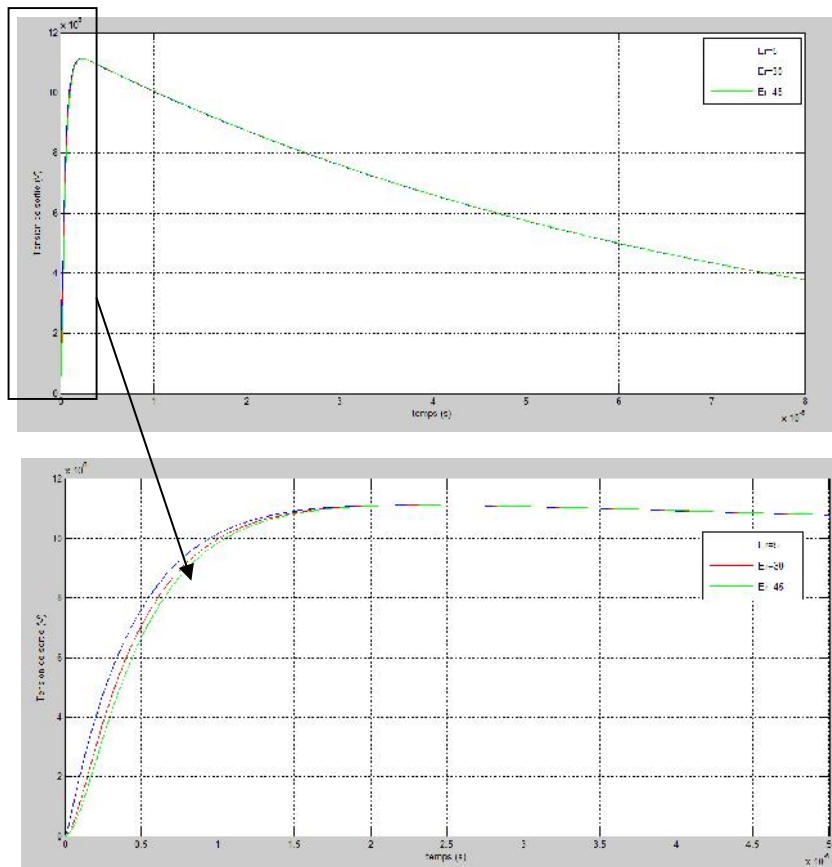


Figure V.19 : Onde de courant de choc de foudre à front très rapide 1.2/50 μ s

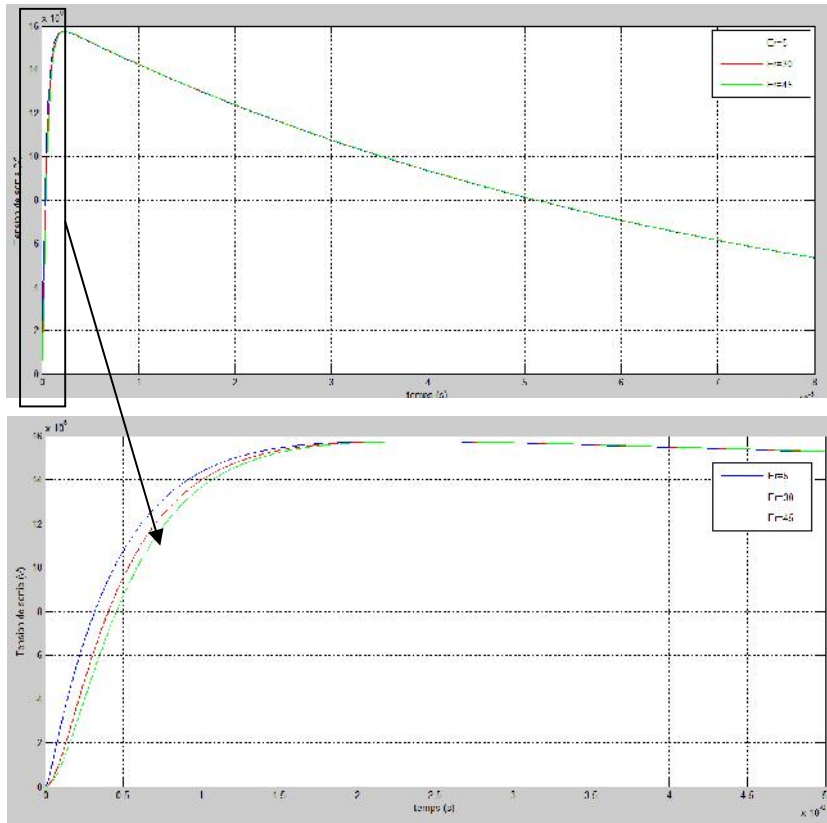
Suite à un choc de foudre, nous déterminons les tensions de sortie du circuit aux bornes de la résistance R ou la capacité C (R et C sont en parallèle). Nous considérons pour ce faire 3 sols :

- Sol 1 : $r_1=200 \Omega\text{m}$ et $r_2=500 \Omega\text{m}$;
- Sol 2 : $r_1=500 \Omega\text{m}$ et $r_2=200 \Omega\text{m}$;
- Sol 3 : $r_1=1000 \Omega\text{m}$ et $r_2=500 \Omega\text{m}$.

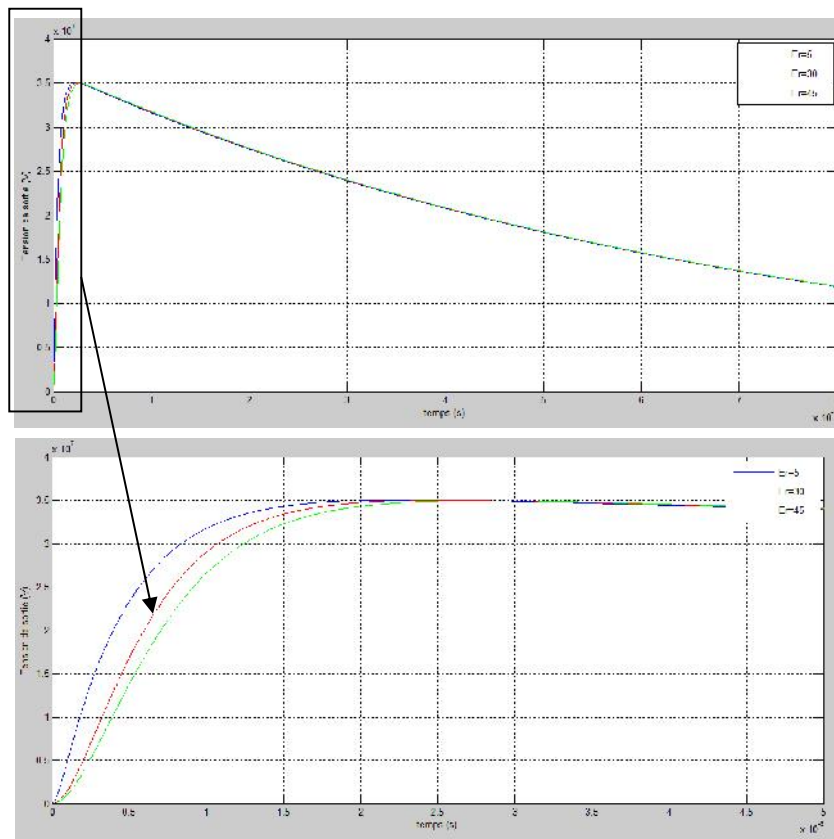
Pour chaque sol, trois permittivités différentes ont été choisies : $\epsilon_r=5, 30$ et 45 . Les figures V.20.a, V.20.b, V.20.c représentent des exemples typiques à ce genre de variation



(a) : $r_1=200 \text{ hm}$ et $r_2=500 \text{ hm}$



(b) : $\rho_1=500 \text{ hm}$ et $\rho_2=200 \text{ hm}$



(c) : $\rho_1=1000 \text{ hm}$ et $\rho_2=500 \text{ hm}$

Figure V.20: Variation de la tension de sortie du circuit équivalent pour différentes permittivités relatives $\epsilon_r=5, 30, \text{ et } 45$ et pour différentes résistivités des deux couches

Les figures V.20.a, V.20.b, V.20.c montrent que la tension de sortie du circuit équivalent qui subit un choc de foudre, varie en fonction des caractéristiques électriques du sol en l'occurrence, ρ_1 , ρ_2 et ρ_r . Cette tension augmente de façon remarquable avec l'augmentation de la résistivité, et plus particulièrement avec celle de la couche supérieure. Nous relevons les résultats suivants :

- 11 MV pour $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$;
- 15,7 MV pour $\rho_1=500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=200 \Omega\text{m}$;
- 35 MV pour $\rho_1=200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$.

Pour de mêmes résistivités, la permittivité n'affecte la tension de sortie que dans l'intervalle [0,5] μs . Dans cet intervalle, la tension augmente légèrement quand la permittivité diminue.

La variation de la tension de sortie suit celle de l'impédance totale. En d'autres termes, quand cette dernière est plus grande, la tension de sortie sera évidemment plus grande vu que $V = Z_{RC} I$.

V.5. Comparaison entre la configuration d'une tige verticale dans un sol homogène et dans un sol hétérogène à deux couches

Nous avons étudié, dans les deux sections précédentes, un système de mise à la terre d'une tige verticale dans un sol homogène et dans un sol hétérogène à deux couches. Dans cette 3^{ème} section du chapitre 5, nous faisons une comparaison et une étude de l'influence de la nature du sol sur l'impédance et le comportement de la tige de terre. En vue de ceci, nous rassemblons tous les résultats et les courbes réalisés dans les deux sections précédentes. Ainsi, nous comparons les résultats de la variation de l'impédance en fonction de la fréquence et la variation temporelle de la tension de sortie dans les deux types de sol. Nous considérons les deux cas de figures : le cas où la tige est enterrée entièrement dans la couche supérieure et le cas où elle traverse les deux couches.

V.5.1. Tige située dans la couche supérieure

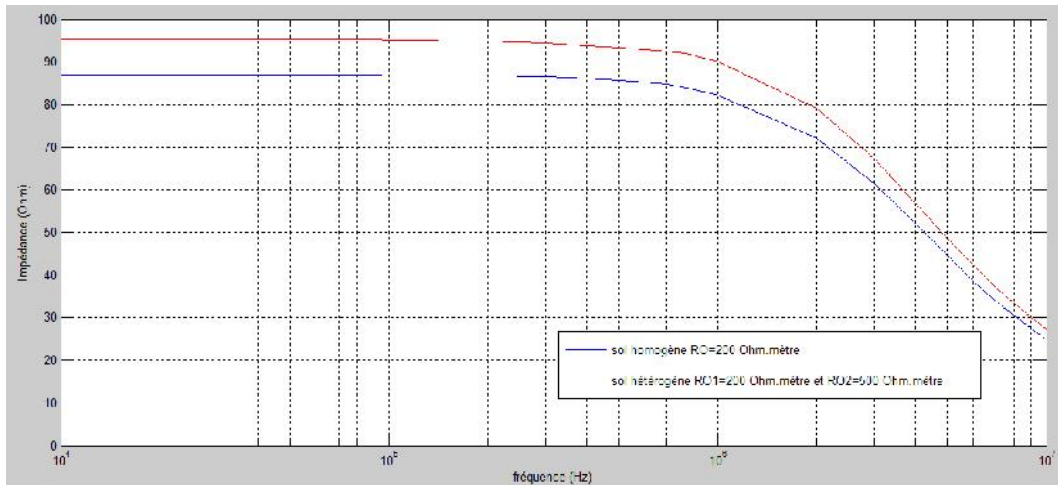
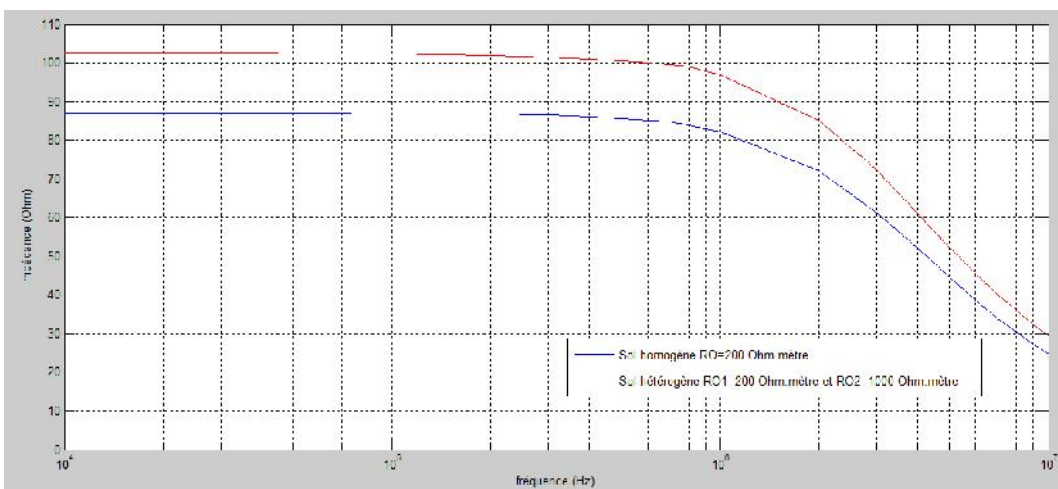
V.5.1.1. Impédance en fonction de la fréquence

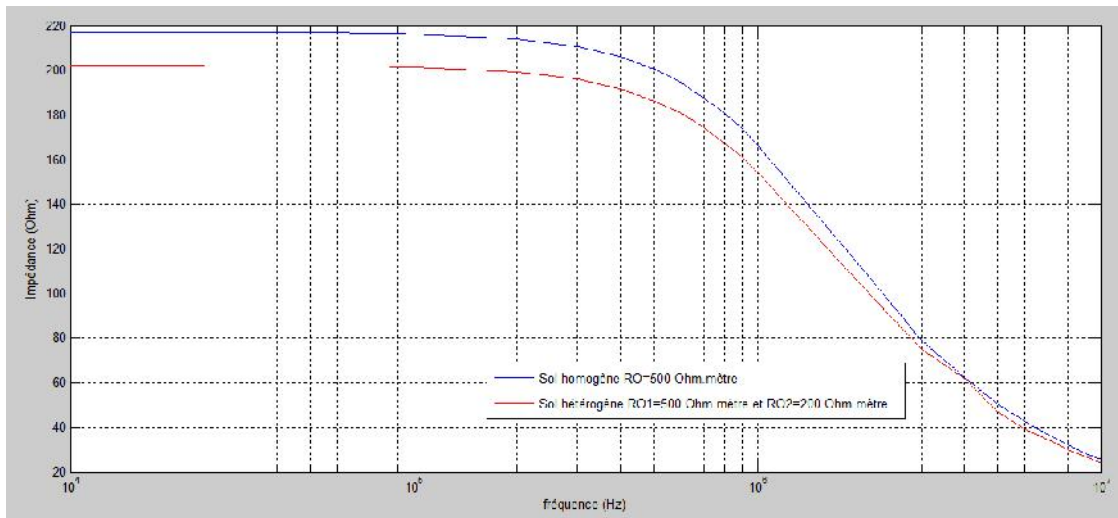
Nous faisons une comparaison de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence dans les sept cas présentés dans le tableau V.2. Ainsi, nous obtenons les figures V.21.a, V.21.b, V.21.c, V.21.d, V.21.e, V.21.f, V.21.g.

	Sol homogène	Sol hétérogène
1 ^{er} cas	$\rho = 200 \Omega\text{m}$	$\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$

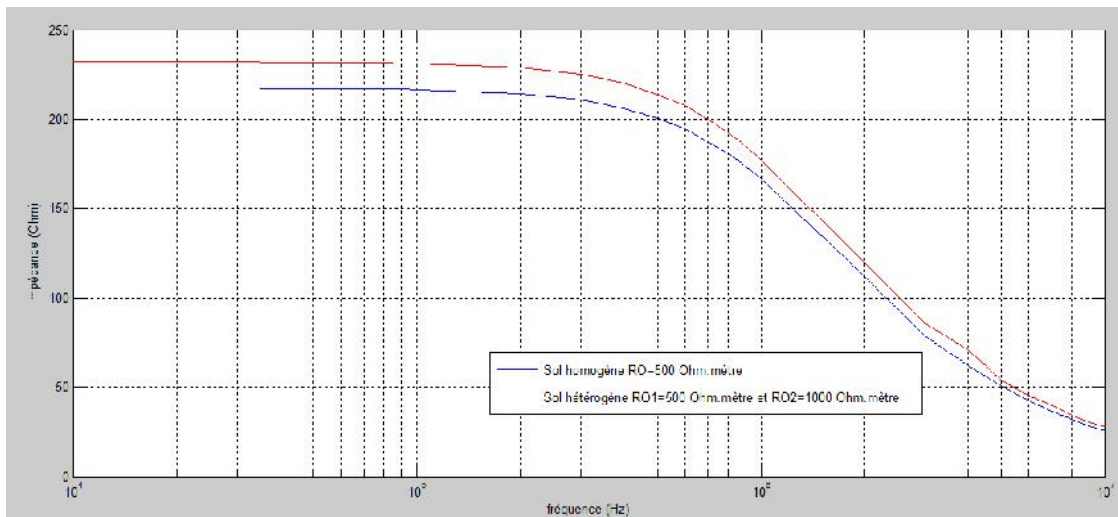
2 ^{ème} cas	= 200 Ω m	$\rho_1 = 200 \Omega$ m et $\rho_2 = 1000 \Omega$ m
3 ^{ème} cas	= 500 Ω m	$\rho_1 = 500 \Omega$ m et $\rho_2 = 200 \Omega$ m
4 ^{ème} cas	$\rho = 500 \Omega$ m	$\rho_1 = 500 \Omega$ m et $\rho_2 = 1000 \Omega$ m
5 ^{ème} cas	= 1000 Ω m	$\rho_1 = 1000 \Omega$ m et $\rho_2 = 200 \Omega$ m
6 ^{ème} cas	= 1000 Ω m	$\rho_1 = 1000 \Omega$ m et $\rho_2 = 500 \Omega$ m
7 ^{ème} cas	= 1000 Ω m	$\rho_1 = 1000 \Omega$ m et $\rho_2 = 2000 \Omega$ m

Tableau V.2 : les sept cas de comparaison

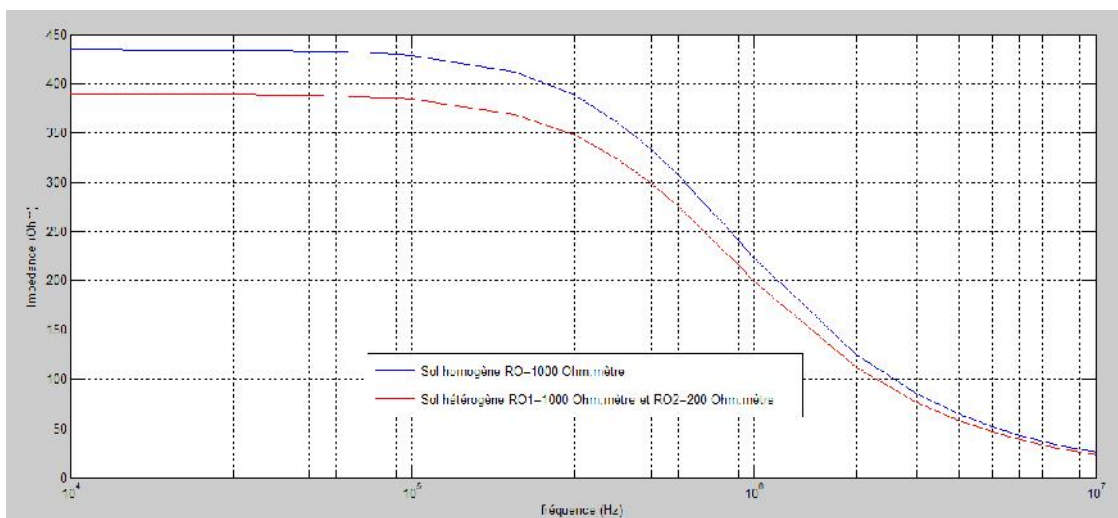
(a) : = 200 hm ; $\rho_1 = 200 \text{ hm}$ et $\rho_2 = 500 \text{ hm}$ (b) : = 200 hm ; $\rho_1 = 200 \text{ hm}$ et $\rho_2 = 1000 \text{ hm}$



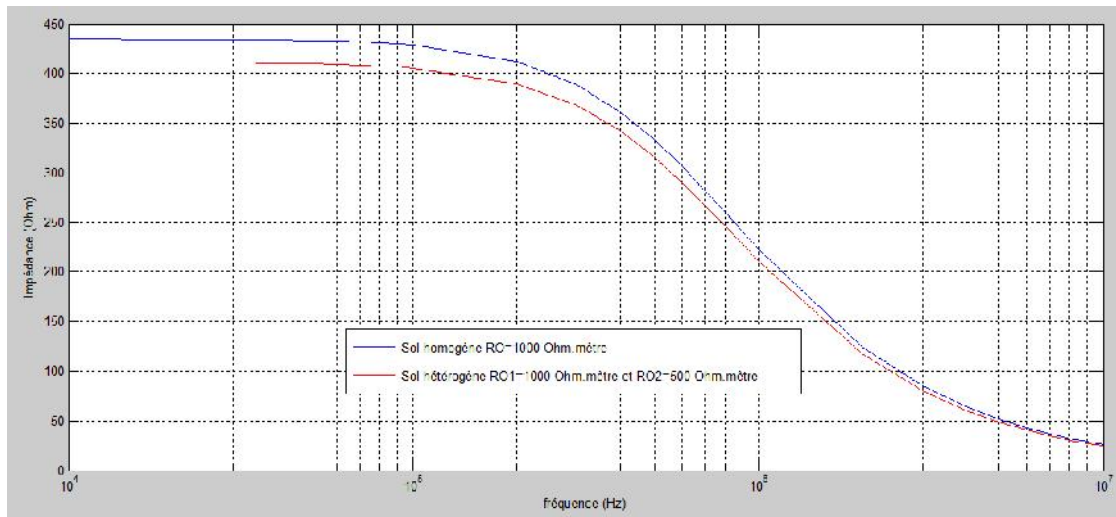
(c) : $h = 500$ hm ; $r_1 = 500$ hm et $r_2 = 200$ hm



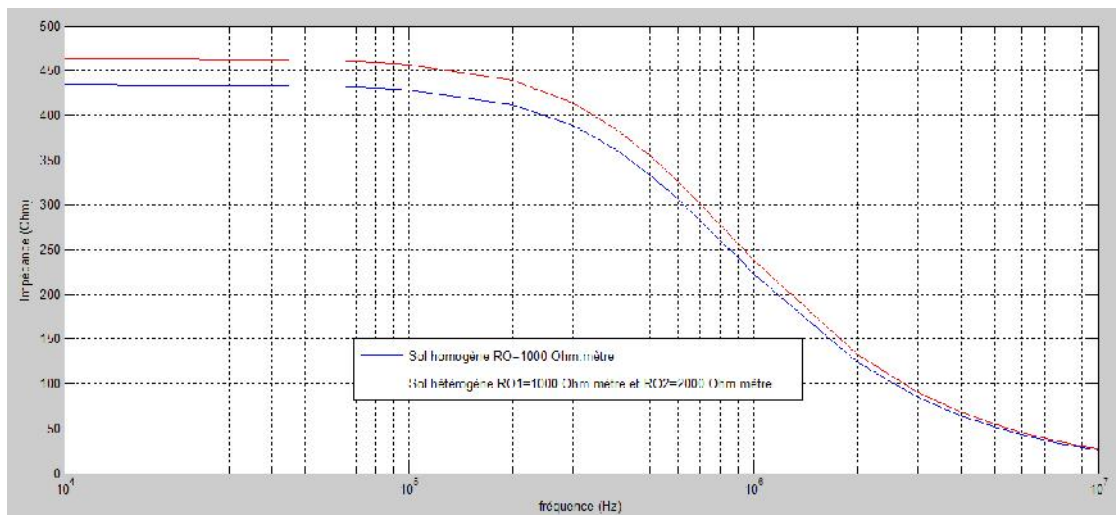
(d) : $h = 500$ hm ; $r_1 = 500$ hm et $r_2 = 1000$ hm



(e) : $h = 1000$ hm ; $r_1 = 1000$ hm et $r_2 = 200$ hm



(f) : $r = 1000 \text{ hm}$; $r_1 = 1000 \text{ hm}$ et $r_2 = 500 \text{ hm}$



(g) : $r = 1000 \text{ hm}$; $r_1 = 1000 \text{ hm}$ et $r_2 = 2000 \text{ hm}$

Figure 21 : Comparaison entre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le cas d'un sol homogène et un sol hétérogène à deux couches (la tige est située dans la couche supérieure), $r_1=30$

Nous préférons rappeler les expressions de l'impédance dans le cas d'un sol homogène et dans un sol hétérogène qui nous aident à mieux interpréter les caractéristiques précédentes :

- Pour un sol homogène l'impédance est calculée par la formule suivante :

$$|Z| = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) ; \text{ Avec : } \rho = \frac{|E|}{|J|}$$

- Pour un sol hétérogène (la tige est entièrement située dans la couche supérieure) :

$$|Z| = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \left(\frac{\frac{nz}{l} + 1}{\frac{nz}{l} - 1} \right) \right]; k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

$$\text{avec : } \rho_1 = \frac{|E_1|}{|J_1|} \text{ et } \rho_2 = \frac{|E_2|}{|J_2|}$$

Selon les valeurs de ρ_1 et ρ_2 le facteur de réflexion k prend une valeur positive ou négative. Lorsque k est positif, la somme (comprenant ce facteur k) possède une valeur positive. Cependant, quand k est négatif, nous ne pouvons pas nous prononcer ; car la somme globale, constituant de termes alternés, peut être positive ou négative.

D'après les figures précédentes, nous remarquons que l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus grande que celle d'un sol homogène dans les cas où $\rho_2 > \rho_1$ suivants :

- $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$; $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$ et $\rho_3 = 500 \Omega\text{m}$;
- $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$; $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$ et $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$;
- $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$; $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$ et $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$; $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_3 = 2000 \Omega\text{m}$.

Du fait que ρ_2 est supérieur que ρ_1 , le facteur k ainsi que la somme globale sont positifs. Ce qui explique que l'impédance dans le cas hétérogène est plus grande que dans le cas homogène.

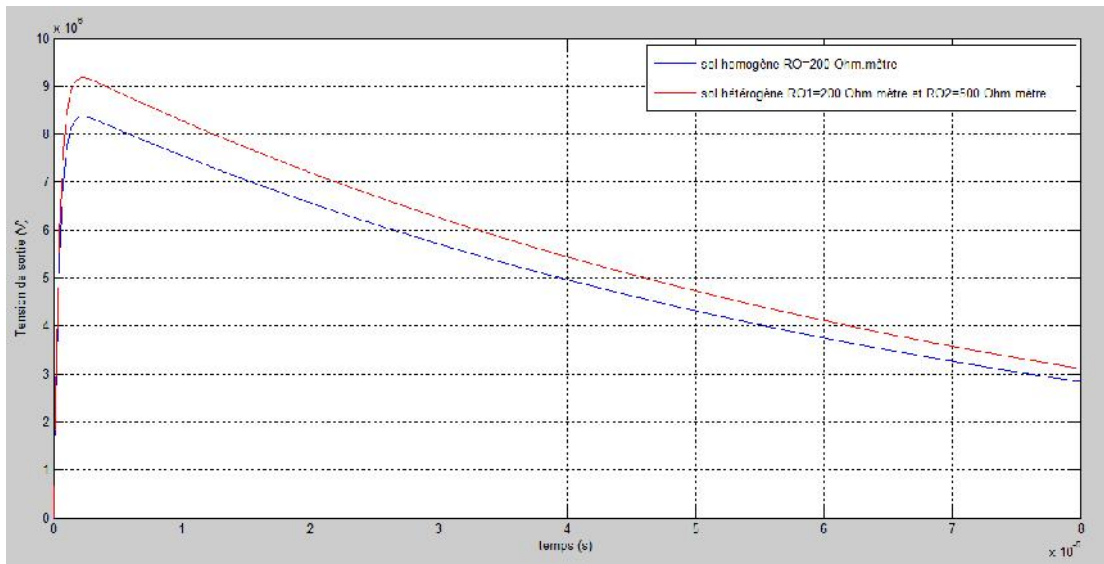
En revanche pour les cas où $\rho_2 < \rho_1$ suivants, l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus faible que celle d'un sol homogène :

- $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$; $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$ et $\rho_3 = 200 \Omega\text{m}$;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$; $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_3 = 200 \Omega\text{m}$;
- $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$; $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_3 = 500 \Omega\text{m}$.

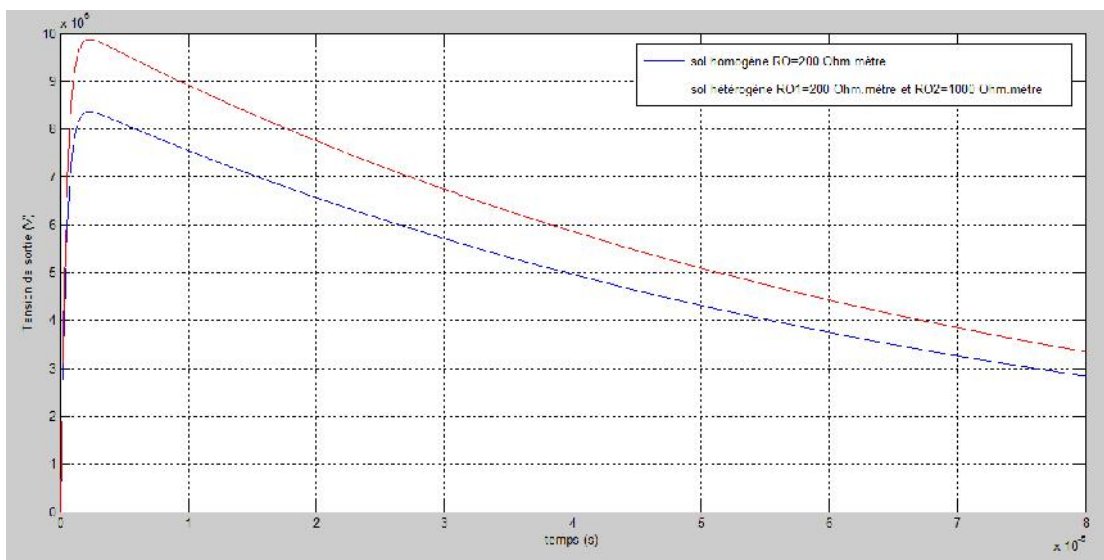
Dans ces conditions le facteur k est négatif, la somme globale l'est également. C'est pour cette raison que l'impédance dans le sol hétérogène est trouvée inférieure que dans le sol homogène.

V.5.1.2 : Variation temporelle de la tension de sortie

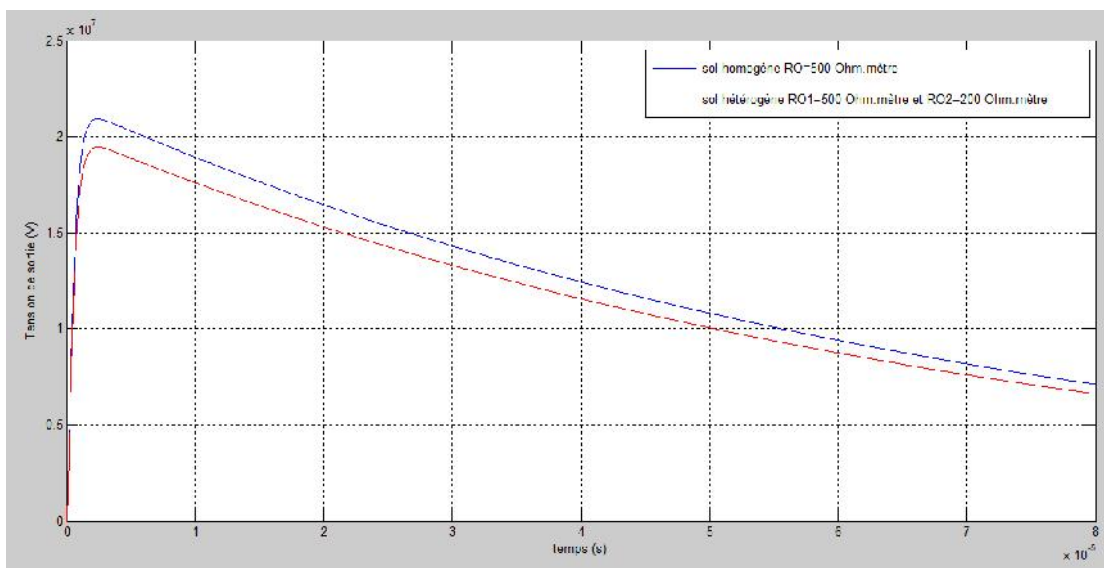
Les figures V.22.a, V.22.b, V.22.c, V.22.d, V.22.e, V.22.f et V.22.g illustrent les variations de la tension de sortie de la tige de terre subissant un choc de foudre pour les deux types de sol (sol homogène et sol hétérogène à deux couches). La tige est entièrement enfouie dans la couche supérieure. Nous faisons une étude comparative des résultats en considérant les 7 cas présentés dans la tableau V.2.



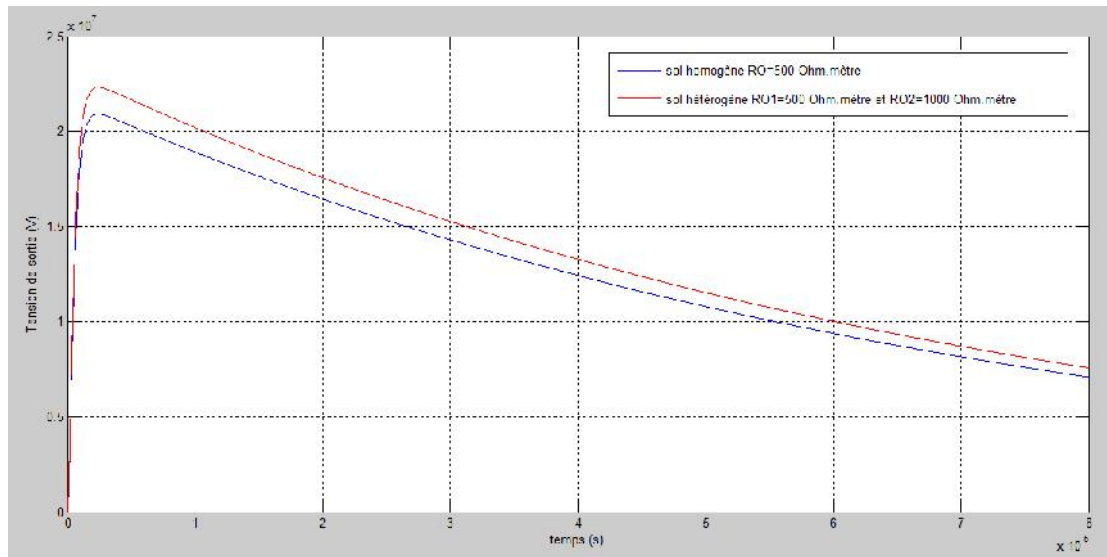
(a) : $h = 200$ hm ; $r_1 = 200$ hm et $r_2 = 500$ hm



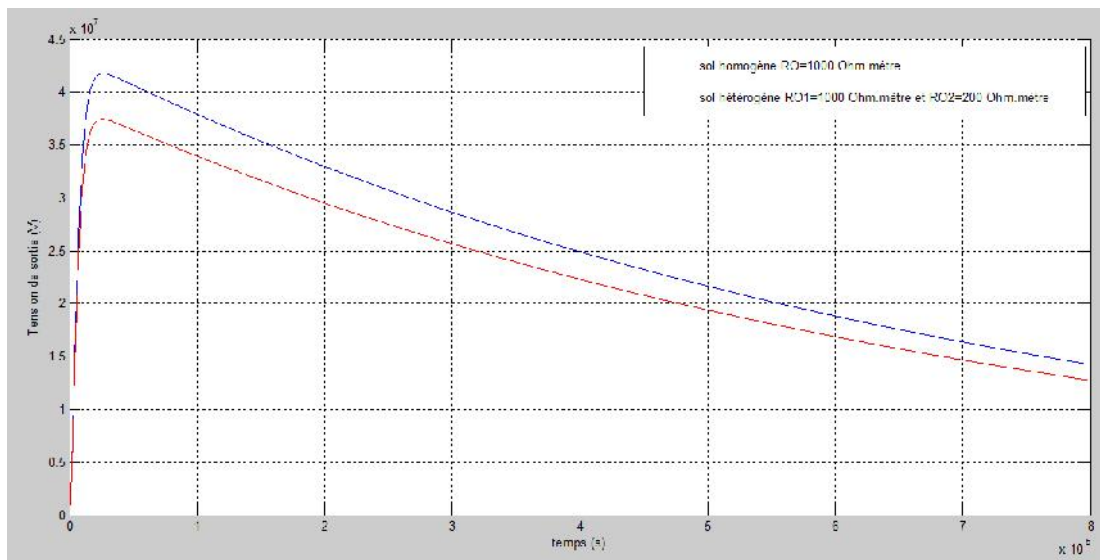
(b) : $h = 200$ hm ; $r_1 = 200$ hm et $r_2 = 1000$ hm



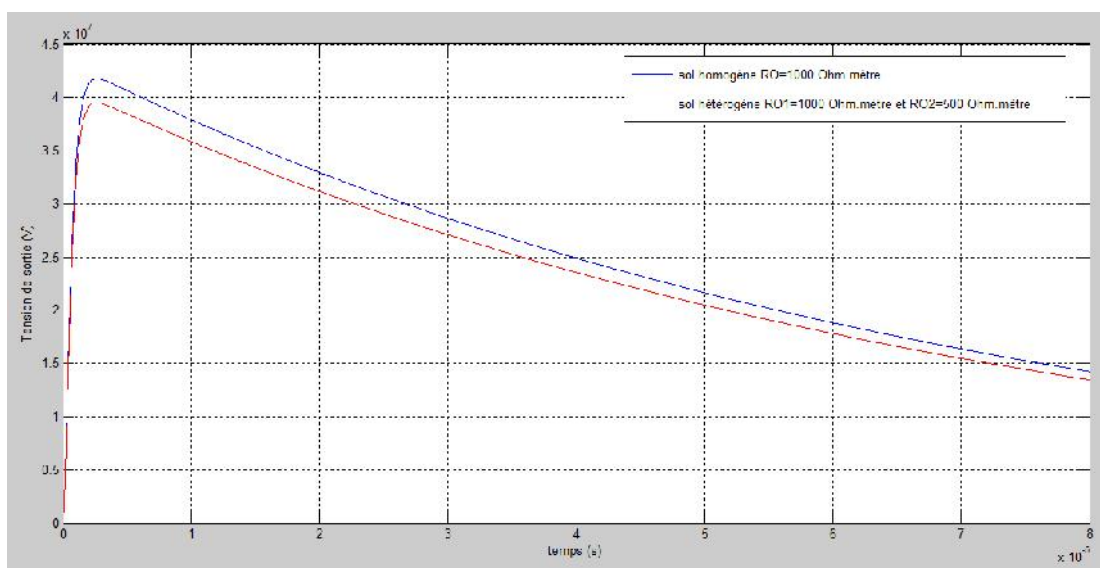
(c) : $h = 500$ hm ; $r_1 = 500$ hm et $r_2 = 200$ hm



(d) : $h = 500$ hm ; $r_1 = 500$ hm et $r_2 = 1000$ hm



(e) : $h = 1000$ hm ; $r_1 = 1000$ hm et $r_2 = 200$ hm



(f) : $h = 1000$ hm ; $r_1 = 1000$ hm et $r_2 = 500$ hm

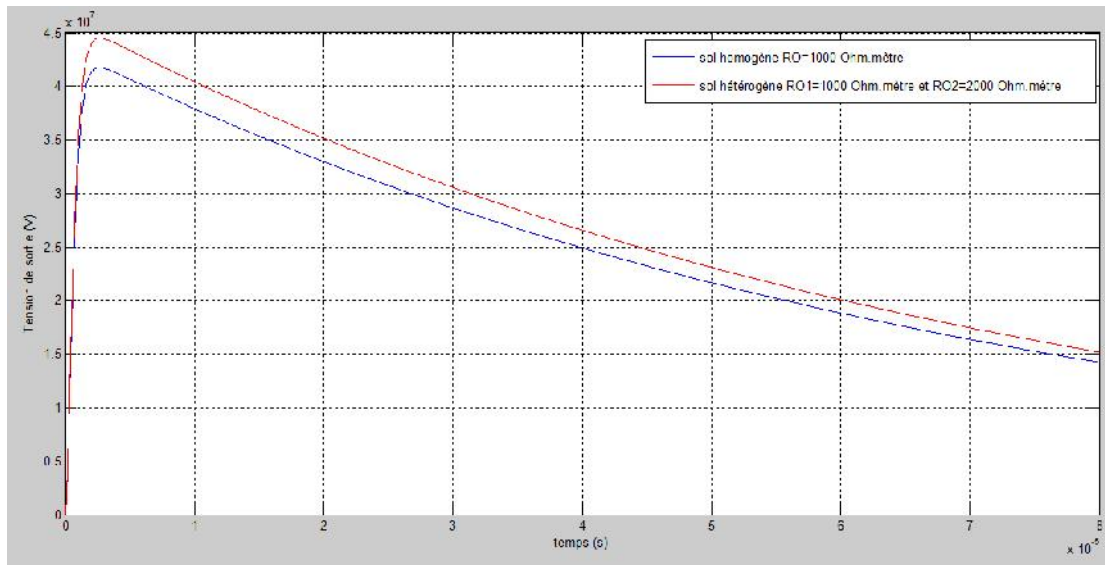
(g) : $\rho_1 = 1000 \text{ hm}$; $\rho_2 = 1000 \text{ hm}$ et $\rho_3 = 2000 \text{ hm}$

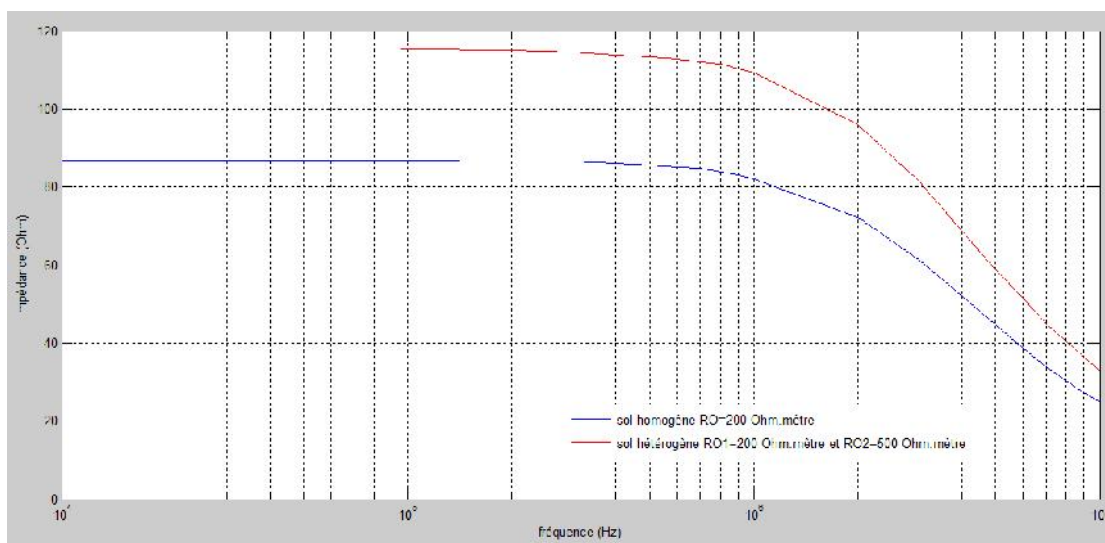
Figure V.22 : Comparaison entre la tension de sortie du circuit équivalent dans le cas d'un sol homogène et dans le cas d'un sol hétérogène à deux couches (la tige est située dans la couche supérieure), $\epsilon_r=30$

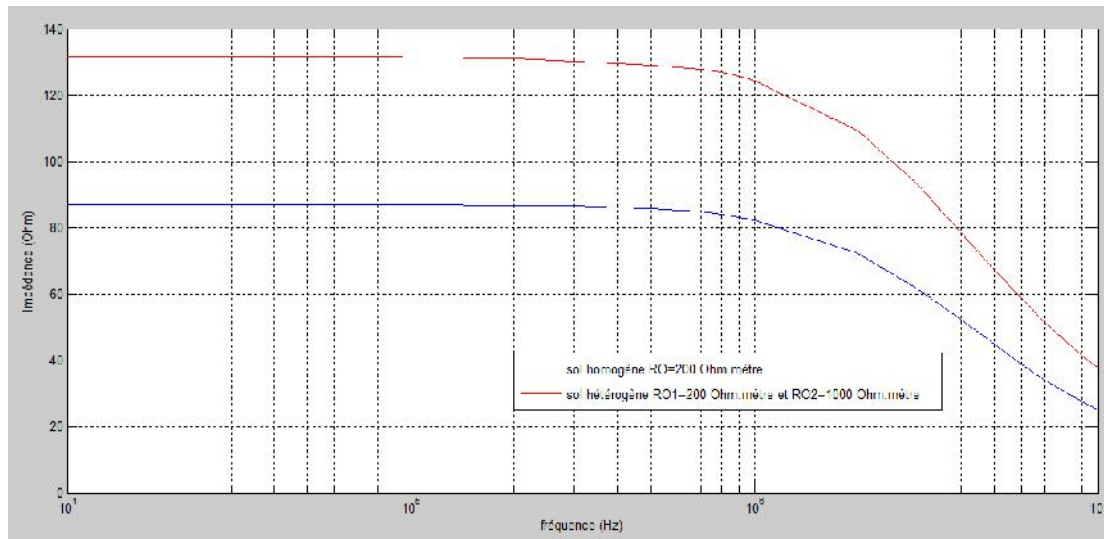
hétérogène que dans un sol homogène, si le premier possède une résistivité ρ_2 plus importante que ρ_1 . Dans le cas contraire, la tension de sortie est plus faible dans le sol hétérogène que celle dans le sol homogène.

V.5.2. Tige traversant les deux couches

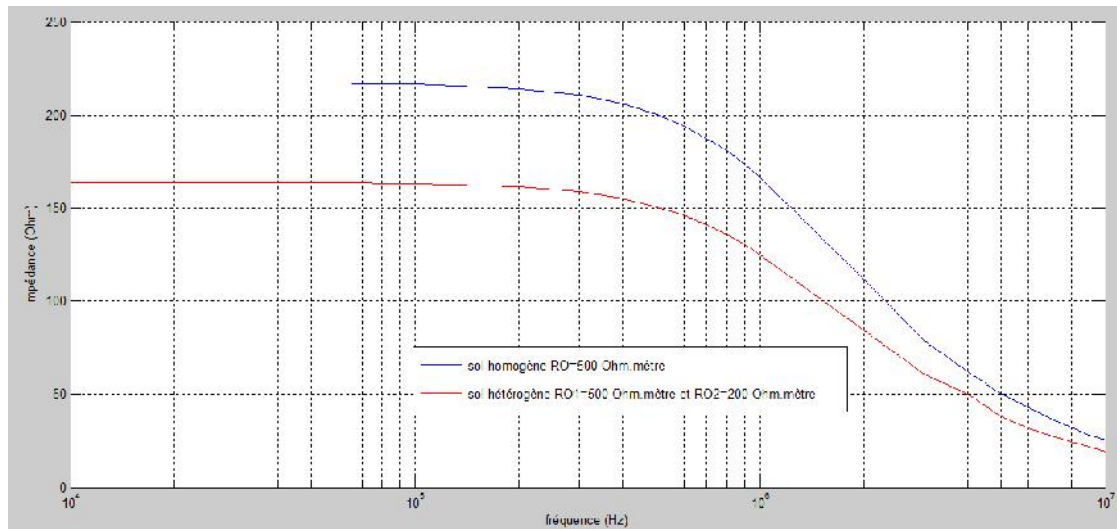
V.5.2.1. Impédance en fonction de la fréquence

Dans cette section, nous confrontons, pour les sept cas mentionnés dans le tableau V.2, les valeurs de l'impédance d'une tige de terre traversant deux couches de résistivités différentes, avec celles obtenues lorsque le sol homogène. Les figures V.23.a, V.23.b, V.23.c, V.23.d, V.23.e, V.23.f et V.23.g illustrent de telles comparaisons.

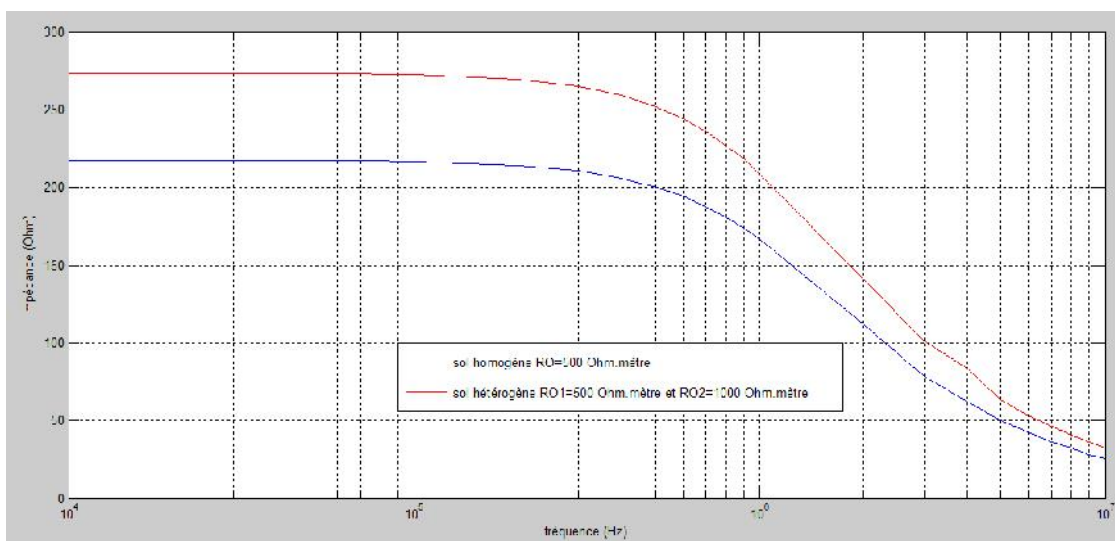
(a) : $\rho_1 = 200 \text{ hm}$; $\rho_2 = 200 \text{ hm}$ et $\rho_3 = 500 \text{ hm}$



(b) : $h = 200 \text{ hm}$; $h_1 = 200 \text{ hm}$ et $h_2 = 1000 \text{ hm}$



(c) : $h = 500 \text{ hm}$; $h_1 = 500 \text{ hm}$ et $h_2 = 200 \text{ hm}$



(d) : $h = 500 \text{ hm}$; $h_1 = 500 \text{ hm}$ et $h_2 = 1000 \text{ hm}$

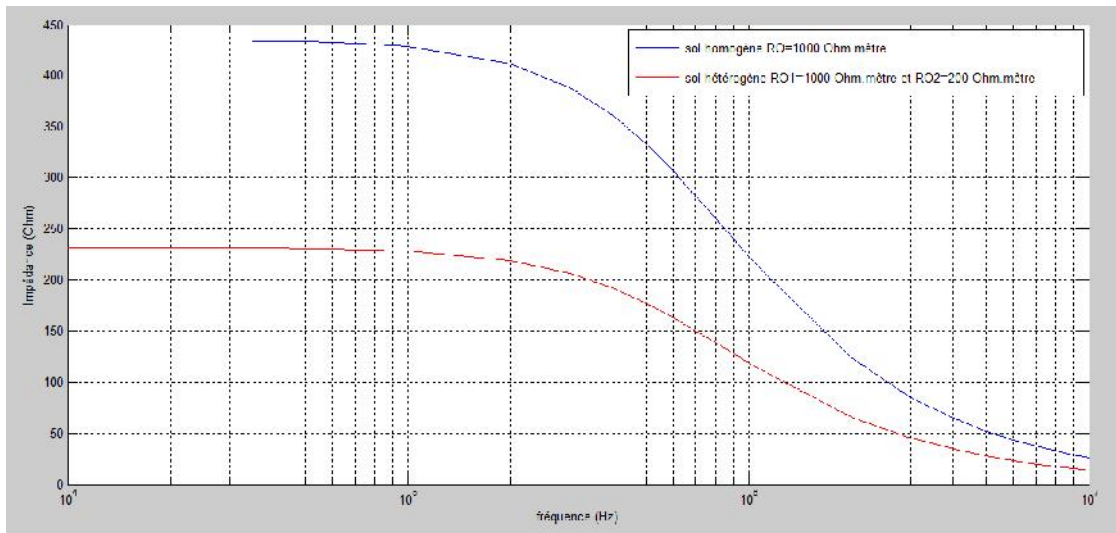
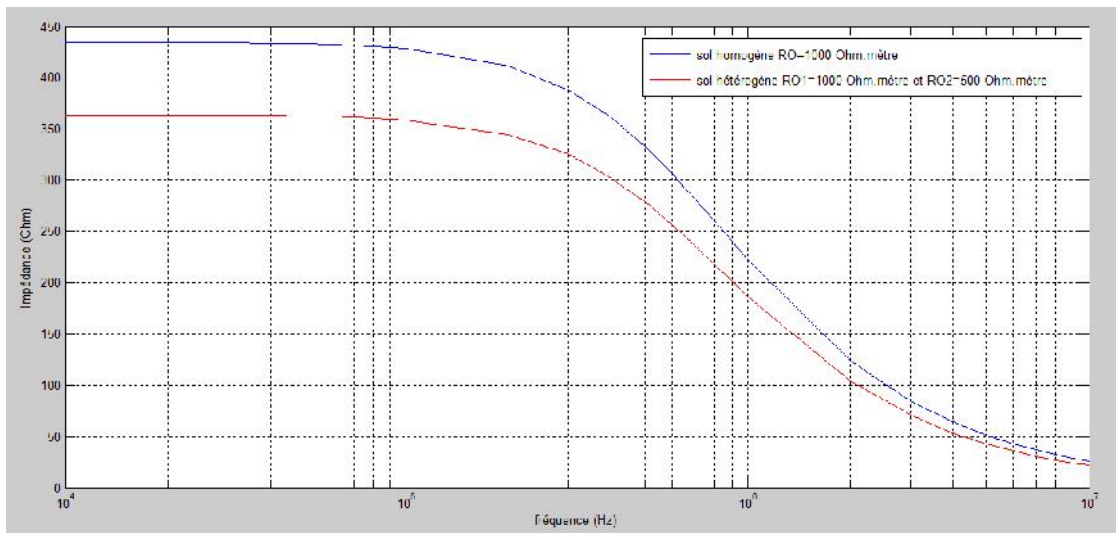
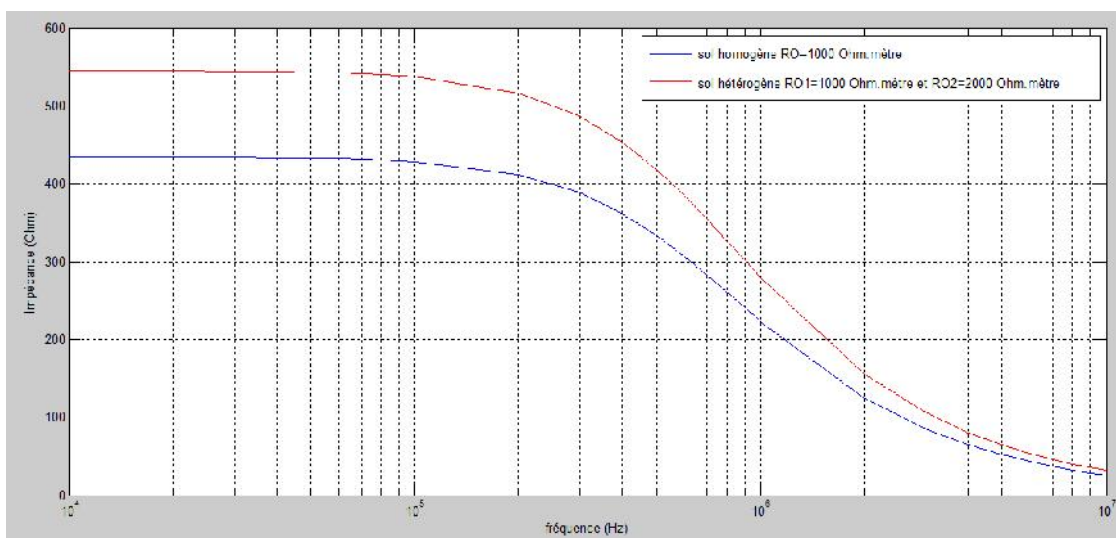
(e) : $l = 1000 \text{ hm}$; $r_1 = 1000 \text{ hm}$ et $r_2 = 200 \text{ hm}$ (f) : $l = 1000 \text{ hm}$; $r_1 = 1000 \text{ hm}$ et $r_2 = 500 \text{ hm}$ (g) : $l = 1000 \text{ hm}$; $r_1 = 1000 \text{ hm}$ et $r_2 = 2000 \text{ hm}$

Figure V.23 : Comparaison entre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le cas d'un sol homogène et un sol hétérogène à deux couches (la tige traverse les deux couches), $r_1=30$

Nous préférons rappeler les expressions de l'impédance dans le cas d'un sol homogène et dans un sol hétérogène qui nous aident à mieux interpréter les caractéristiques précédentes :

- Pour un sol homogène l'impédance est calculée par la formule suivante :

$$|Z| = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) ; \text{ Avec : } \rho = \frac{|E|}{|J|}$$

- Pour un sol hétérogène (la tige pénétrant dans la couche inférieure) :

$$|Z| = \frac{|E_1|}{|J_1| \cdot 2\pi l} \frac{(1+k)}{\left[(1-k) + 2k \frac{z}{l} \right]} \left[\ln \left(\frac{2l}{r} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left(\frac{2nz+l}{2z(n-1)+l} \right) \right]$$

$$\text{avec : } k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} ; \rho_1 = \frac{|E_1|}{|J_1|} \text{ et } \rho_2 = \frac{|E_2|}{|J_2|}$$

De même que précédemment, l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus grande que celle d'un sol homogène dans les cas où $\rho_2 > \rho_1$ suivants :

- $\rho = 200 \Omega\text{m}$; $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$;
- $\rho = 200 \Omega\text{m}$; $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$;
- $\rho = 500 \Omega\text{m}$; $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$;
- $\rho = 1000 \Omega\text{m}$; $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 2000 \Omega\text{m}$.

Cependant, l'impédance de mise à la terre pour un sol hétérogène est plus faible que celle d'un sol homogène, pour les cas correspondant à $\rho_2 < \rho_1$ suivants :

- $\rho = 500 \Omega\text{m}$; $\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$;
- $\rho = 1000 \Omega\text{m}$; $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$;
- $\rho = 1000 \Omega\text{m}$; $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$.

Cette impédance dépend de l'interface des deux couches caractérisée par le facteur de réflexion

$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$. L'écart entre les valeurs des impédances (obtenues respectivement dans les cas de sols

homogène et hétérogène) augmente avec la valeur absolue de k .

Prenons comme exemple les figures V.23.e et V.23.f, nous remarquons que pour une fréquence de 10 kHz, l'écart entre les courbes est de :

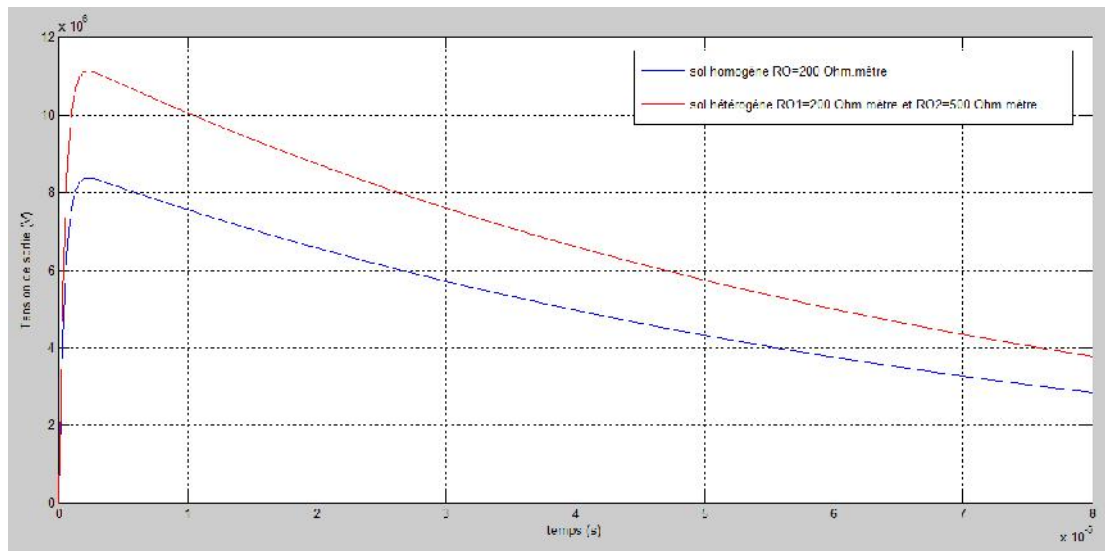
- $203,4 \Omega$ quand $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$, c'est-à-dire $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = -0,66$;

- $70,7 \Omega$ quand $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$ et $\rho_2=500 \Omega\text{m}$, c'est-à-dire $k = \frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2+\rho_1} = -0,33$.

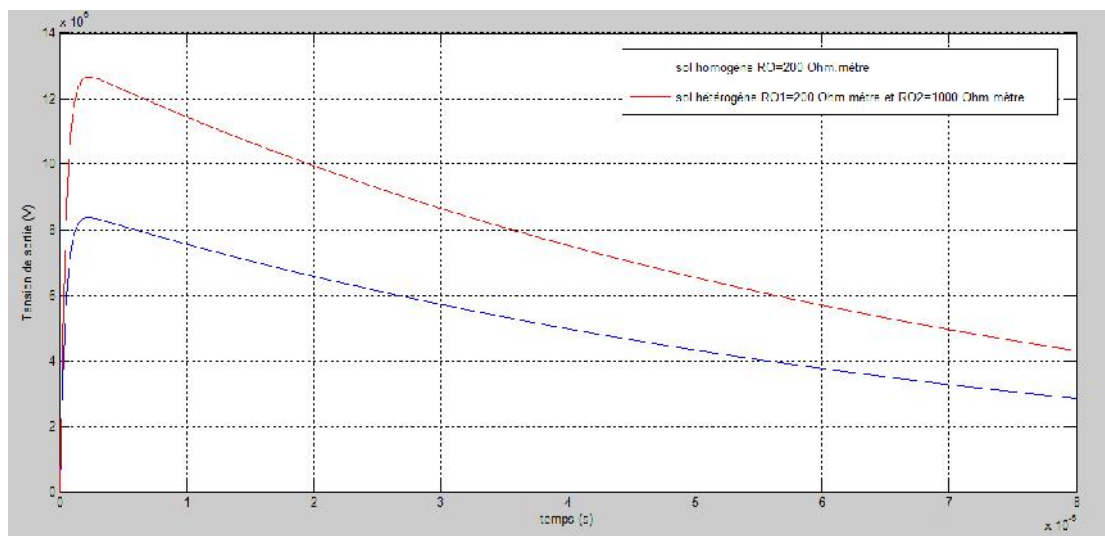
V.5.2.2. Variation temporelle de la tension de sortie

Les figures V.24.a, V.24.b, V.24.c, V.24.d, V.24.e, V.24.f et V.24.g montrent les tensions de sortie du circuit équivalent du système de mise à la terre, suite à un choc de foudre. Les deux cas suivants ont été considérés : tige enfouie dans un sol homogène, tige qui traverse deux couches de résistivités différentes.

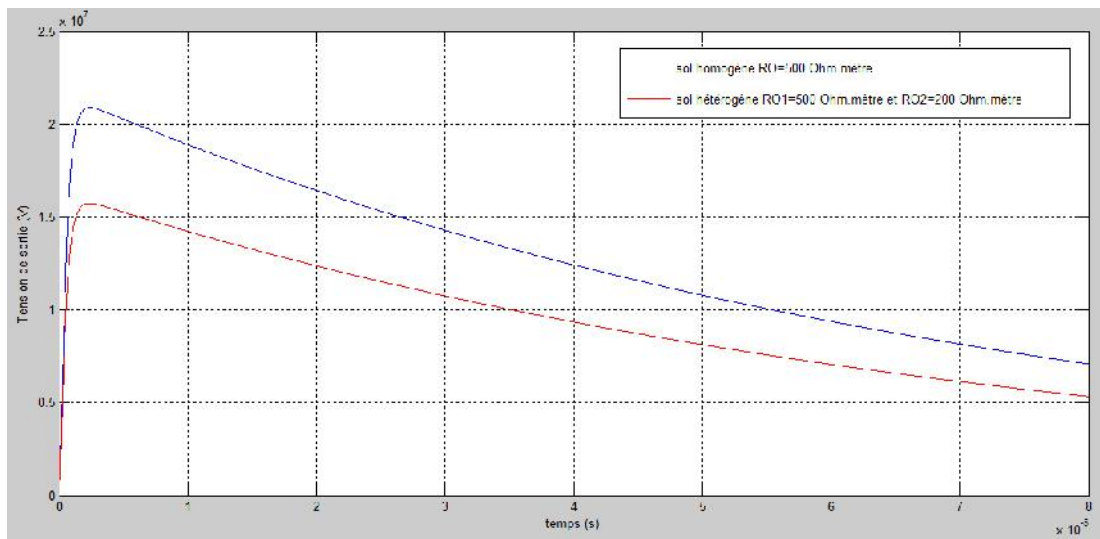
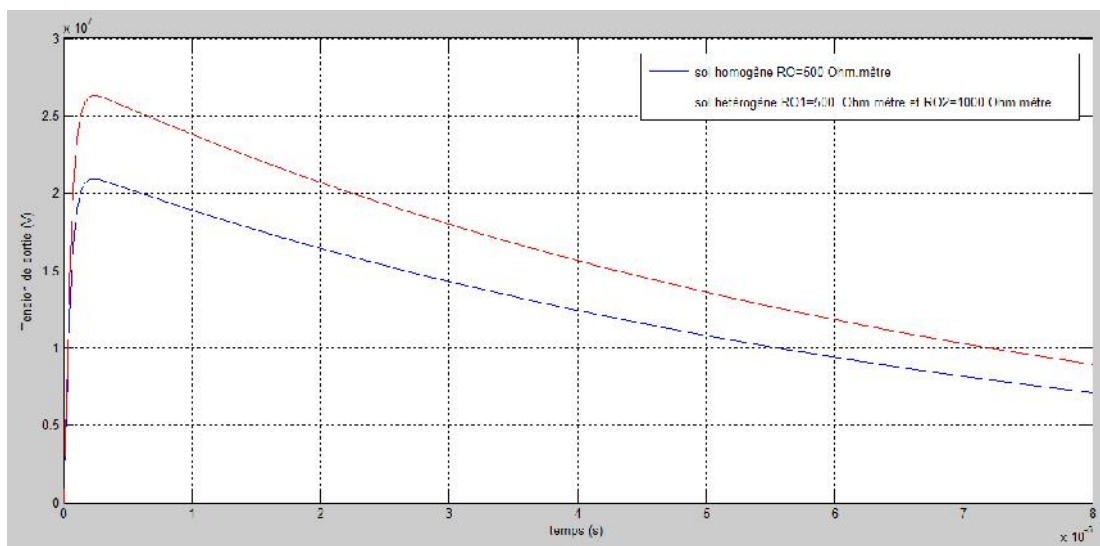
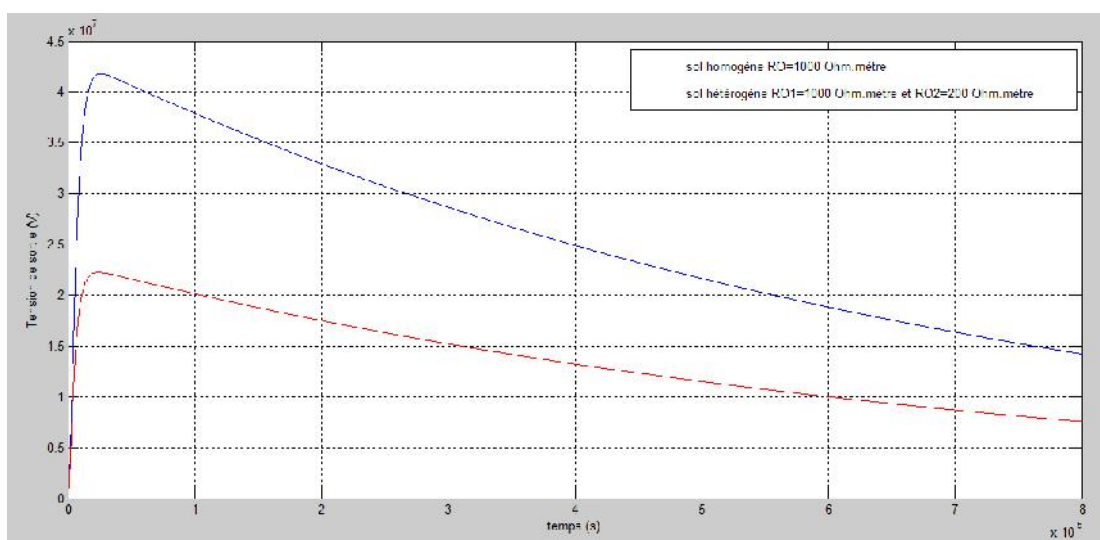
Nous comparons les résultats ainsi trouvés pour les 7 cas mentionnés dans le tableau V.2.

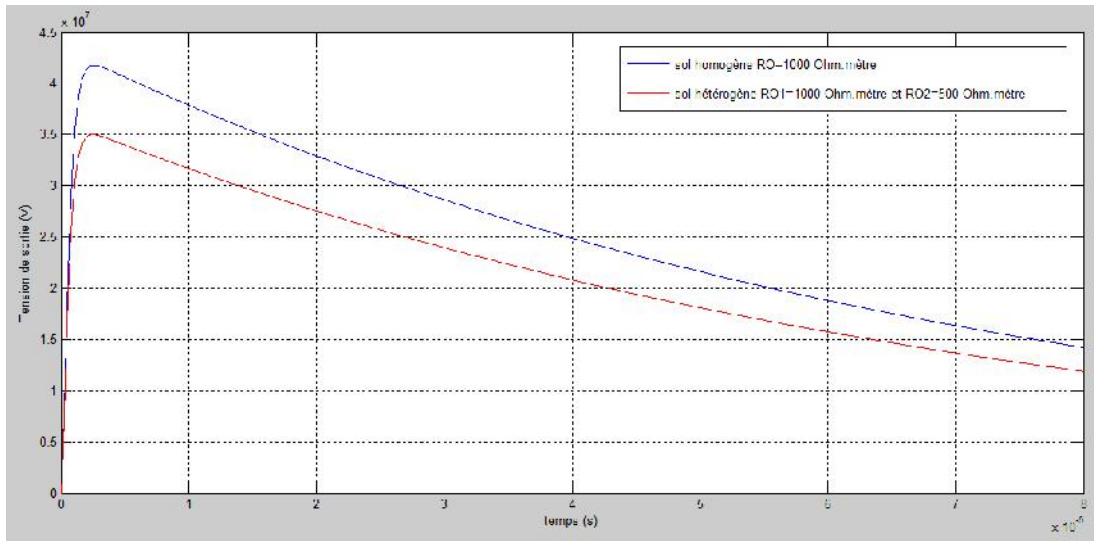


(a) : $h = 200 \text{ hm}$; $\rho_1 = 200 \text{ hm}$ et $\rho_2 = 500 \text{ hm}$

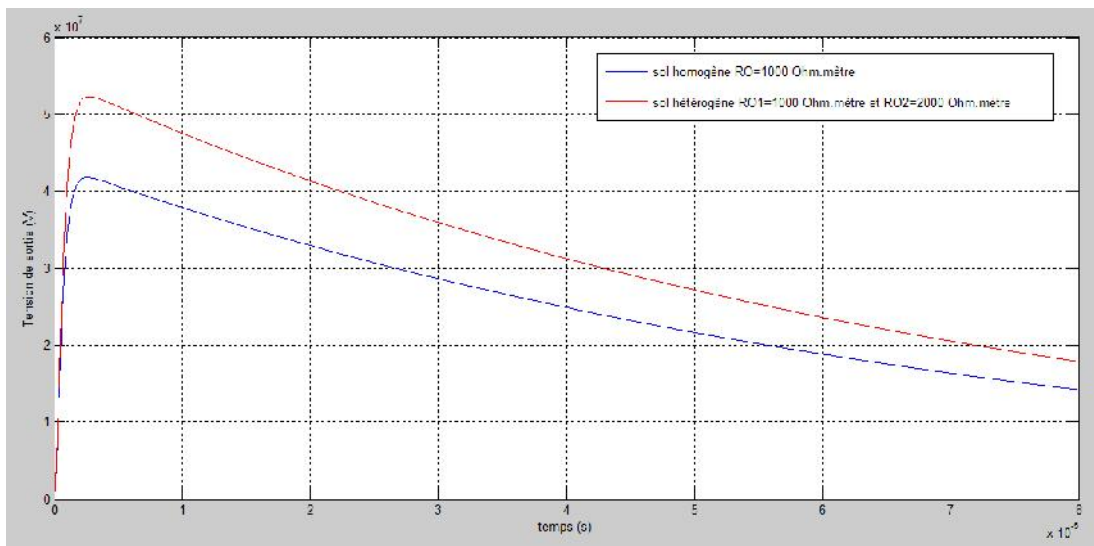


(b) : $h = 200 \text{ hm}$; $\rho_1 = 200 \text{ hm}$ et $\rho_2 = 1000 \text{ hm}$

(c) : $h = 200$ hm ; $r_1 = 500$ hm et $r_2 = 200$ hm(d) : $h = 500$ hm ; $r_1 = 500$ hm et $r_2 = 1000$ hm(e) : $h = 1000$ hm ; $r_1 = 1000$ hm et $r_2 = 200$ hm



(f) : $r_2 = 1000 \text{ hm}$; $r_1 = 1000 \text{ hm}$ et $r_2 = 500 \text{ hm}$



(g) : $r_2 = 1000 \text{ hm}$; $r_1 = 1000 \text{ hm}$ et $r_2 = 2000 \text{ hm}$

Figure V.24 : Comparaison entre la tension de sortie du circuit équivalent dans le cas d'un sol homogène et dans le cas d'un sol hétérogène à deux couches (la tige traverse les deux couches), $r_1=30$

Nous pouvons relever les mêmes constatations relatives à l'impédance de mise à la terre faites précédemment. En effet, suite à un choc de foudre, la tension de sortie est plus grande dans un sol hétérogène, que celle trouvée dans le cas d'un sol homogène, si r_2 (la résistivité de la couche inférieure du sol hétérogène) est supérieur r_1 (la résistivité à la fois du sol homogène et de la de couche supérieure du sol hétérogène). Dans le cas contraire, la tension de sortie est plus faible dans le sol hétérogène que celle dans le sol homogène.

V.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement d'une tige de terre verticale dans deux types de sol ; homogène et hétérogène à deux couches de résistivité différentes (ρ_1 la résistivité de la couche supérieure et ρ_2 la résistivité de la couche inférieure du sol). Pour le sol hétérogène, deux cas pour l'emplacement de la tige se présentent; (i) tige enfouie dans la couche supérieure, (ii) tige pénétrant dans la deuxième couche.

Pour un sol homogène, l'impédance de la tige de terre augmente avec la résistivité. Cette impédance, initialement constante, n'augmente avec la diminution de la permittivité, qu'au-delà de la fréquence de coupure. Cette dernière dépend des caractéristiques du sol ; elle diminue avec l'augmentation de la résistivité et de la permittivité du sol.

Dans le cas d'un sol hétérogène étudié, il est évident que l'impédance est affectée par les deux résistivités des ses deux couches. Elle augmente avec l'une ou l'autre ou les deux. Cette impédance est beaucoup plus influencée par la résistivité de la couche supérieure que celle de la couche inférieure, lorsque la tige est enterrée dans la couche supérieure. Cependant, dans le cas où cette tige pénètre dans la couche inférieure, toute variation de l'une des deux résistivités affecte grandement l'impédance.

Supposons un sol hétérogène dont la résistivité de la couche supérieure est identique à celle d'un sol homogène. Supposons également que la résistivité de la couche inférieure est plus importante que celle de la couche supérieure. Dans ces conditions, l'impédance équivalente augmente. Dans le cas contraire, elle diminue. Ceci est valable quelque soit l'emplacement de la tige dans le sol.

La modélisation de notre système de terre par un circuit électrique composé d'une simple résistance en parallèle avec une capacité, a été validée pour tous les cas étudiés. Dans ces conditions, la tension de sortie du circuit électrique équivalent que nous avons trouvée lors de l'application d'une onde de courant de foudre, possède un même comportement que celui de l'impédance en fonction des caractéristiques électriques des sols.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce mémoire, nous avons étudié le comportement de l'impédance des systèmes de mise à la terre, constitués des trois tiges en parallèle et d'une seule tige verticale, en fonction de divers paramètres électro-géométriques. Ces derniers consistent en le rayon et la longueur des tiges, la distance entre elles, la résistivité et la permittivité de sol et la fréquence de l'onde à écouler à la terre. Cette impédance a été déterminée en utilisant le code de calcul FEMM 4.2, et comparée à celle déduite du circuit électrique équivalent proposé. Ce dernier a été utilisé pour la reproduction de l'onde de la tension de sortie lors de l'application d'un choc de courant de foudre normalisé.

Les principales conclusions retenues pour les deux systèmes de terre placés dans un sol homogène sont les suivantes :

- ✓ Pour les basses fréquences (cas de la fréquence industrielle 50 Hz), la résistance de mise à la terre obtenue en utilisant le FEMM 4.2 pour une fréquence de 50 Hz coïncide parfaitement avec celle calculées à partir des formules données dans la littérature. Ceci permet non seulement de valider le FEMM 4.2.
- ✓ L'impédance équivalente est constante pour les basses fréquences inférieure à celle de coupure. Dans ce cas là, le système de terre est modélisé par une simple résistance. Pour les hautes fréquences, l'impédance diminue en allant vers une valeur limite. Dans ces conditions, le comportement capacitif. Ainsi, le circuit électrique équivalent est constitué par une résistance en parallèle avec une capacité.
- ✓ Une parfaite concordance a été obtenue en comparant les valeurs de l'impédance déduites à partir du circuit électriques équivalent à celle obtenues en utilisant le FEMM 4.2 vis-à-vis des paramètres électro-géométriques considérés.
- ✓ L'impédance du système dépend des caractéristiques électriques (résistivité et permittivité) du sol. L'impédance augmente avec la résistivité. Par ailleurs, la permittivité n'affecte l'impédance qu'au-delà de la fréquence de coupure. Dans ces conditions, l'augmentation de la permittivité engendre une diminution de l'impédance.

Quant au système de trois tiges parallèle placées dans un sol homogène, l'impédance diminue brusquement avec l'augmentation du rayon et de la longueur des tiges, ainsi que de la distance inter-tiges, dans les intervalles [0,20] mm, [0,4] m et [0,2] m respectivement, et lentement ailleurs. Sur le plan économique, il serait préférable d'agir sur la distance inter-tiges au lieu de changer le rayon et/ou la longueur pour diminuer l'impédance. Ceci nous permet d'éviter de changer les tiges, ou d'ajouter une quantité de matière.

Il ressort des travaux effectués relatifs à la tige de terre placée dans un sol hétérogène (stratifié verticalement en deux couches) les points suivants :

- ✓ L'impédance est affectée par les deux résistivités des ses deux couches. Elle augmente avec l'une ou l'autre ou les deux. En effet, l'impédance est beaucoup plus influencée par la résistivité de la couche supérieure, quant la tige est placée dans la couche supérieure du sol. Par ailleurs, l'impédance est grandement affectée par les deux résistivités, lorsque la tige pénètre dans la couche inférieure.
- ✓ La littérature ne donne que les relations de la résistance dans le cas d'un sol hétérogène. En s'inspirant de ces relations, nous avons proposé deux expressions de la capacité relatives à l'emplacement de la tige dans la couche supérieure et inférieure respectivement.
- ✓ Etant donné la grande plage de variation de l'impédance, il serait bon de placer la tige de terre de façon à ce qu'elle pénètre dans la couche inférieure, mieux que de l'enterrer entièrement dans la couche supérieure.
- ✓ Considérons un sol homogène ayant des caractéristiques électriques spécifiques. A ce sol, nous insérons une couche interne pour constituer un sol hétérogène. Si la résistivité de cette dernière couche est supérieure à celle du départ, l'impédance équivalente, peu importe l'emplacement de la tige, augmente. Dans le cas contraire, elle diminue.
- ✓ L'écart, entre les valeurs de l'impédance trouvés en utilisant le circuit et celles trouvées en se basant sur le FEMM 4.2, est initialement inexistant pour les basses fréquences. En revanche, l'écart devient relativement considérable pour les très hautes fréquences (une erreur maximale de 14 %). Cet écart pourrait être éliminé en corrigeant les expressions de la capacité ainsi proposées. Par conséquent, le circuit RC parallèle ainsi proposé est valable pour modéliser la tige de terre dans un sol hétérogène, pourvu que la fréquence ne dépasse une valeur limite (de quelques MHz, dans notre cas).

Dans les mêmes conditions, l'impédance du système de mise à la terre de 3 tiges parallèles est plus faible que celle d'une seule tige verticale. Donc, il serait préférable d'utiliser plusieurs prises de terre que l'on branche en parallèle.

Finalement, les résultats suivants, sont valables pour les deux systèmes et les deux sols considérés dans cette présente étude :

- ✓ L'augmentation de la résistivité et de la permittivité du sol entraîne une diminution de la fréquence de coupure.
- ✓ Les variations de la tension de sortie du circuit RC proposé obtenues lors de l'injection d'une onde de courant de foudre, sont similaires à celles de l'impédance en fonction des paramètres électrogéométriques.

Bibliographie :

Alain Charoy, « *Compatibilité électro-magnétique* », Dunod, 2005, 701 p

A.Tilmatine, « Cours de techniques de la Haute Tension ; Chapitre 5 : La foudre », Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Djillali Liabes, 1999.

Bensoam M., « Qualité de la prise de terre et sécurité des personnes », Cours, Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, octobre 2003

Bernou A., « Caractéristiques des systèmes de mise à la terre des installations HT utilisant CYMGRD et FEMM ; Proposition d'un circuit électrique dans le cas des hautes fréquences » Thèse de Magister en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2011.

Biddle C., « Manual of Ground Resistance Testing », Megger, Ground testers, Catalogue de produits, December 1947.

Boubakeur.A, « cours de techniques de la haute tension 4^{ème} année Electrotechnique », Ecole Nationale Polytechnique, Département de l'électrotechnique, laboratoire de haute tension, 2012.

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Protection Contre la Foudre-Partie 1: Principes Généraux », CEI 62305-01, Première édition 2006-01.

CEI (Commission Electrotechnique Internationale), « Installations électriques des bâtiments, choix et mise en œuvre des matériels électriques – Mises à la terre, conducteurs de protection et d'équipotentialité », CEI 60364-5-54, 2ème édition 2002-06.

CIGRE, "Guide to procedure for estimating the lightning performance of transmission lines", Working Group 01 (lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination), octobre 1991.

C.Gary, "51, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", Collection de la Direction des Etudes et Recherches d' Electricité de France, éditions Eyrolles, pp 231-250, 1984.

CIGRE, “Cloud-to-ground lightning parameters derived from lightning detection systems, the effects of System Performance”, draft document, CIGRE task Force C4.404A, juin 2007.

Chouteau M. & Giroux B., « Géophysique appliquée II : Méthodes électriques - Notes de cours », Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 148, 2006.

Chauvin Arnoux Group, « Guide de la Mesure de Terre : Contrôleurs de Terre et/ou de Résistivité », Catalogue de produits, Première édition 2010. Site internet : www.chauvin-arnoux.fr

Chong Kiat Ng, « Simplified numerical based method for calculation of dc ground electrode resistance in multi-layered earth », Thesis of Master of Science, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba Winnipeg, Manitoba, Canada, June 2000.

Dusseldorf., « Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre », ABB Switchgear Manual, 10th Edition, Cornelsen Verlag 1999.

Demuyneck P., « Mesures électriques : Mesurer une résistance de terre », Cours, Lem France, leader mondial dans le développement et la production de capteurs de courants de très haute précision, Janvier 2002.

EDF (Electricité De France), « Principes de conception et de réalisation des mises à la terre », Electricité de France, Centre de Normalisation, H 115, Janvier 1984.

EDF (Electricité De France), « Prises de Terre pour Réseaux Electriques de Distribution », Electricité de France, Centre de Normalisation, HN 64-S-55, Avril 1997.

EDF (Electricité De France), « La mise à la terre du neutre des réseaux MT aériens et souterrains », Electricité de France, Centre de Normalisation, H 80, Avril 1959.

Georges S., « Evaluation de l'Effet de la Mer et du Contrepoids sur le Profil de la Tension d'un Système de Mise à la Terre d'une Ligne de Transport d'Energie à Haute Tension dans un Sol Résistif », Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Septembre 2001.

IEEE, "Modeling guidelines for fast front transients", Fast Front Transients Task Force of Modeling and Analysis of System Transients Working Group, 1996.

IEEE Standard 80-2000, « IEEE guide for safety in AC substation grounding », Revision of IEEE Std 80-1986, New York, USA, 2000.

International Standard, « INSULATION CO-ORDINATION », Third edition, IEC 60071, 1996.

Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F. & Kaintzyk U., « Overhead Power Lines : Planning, Design, Construction », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2003.

Klajn A. & Markiewicz H., « Mise à la Terre, Aspects Fondamentaux de Construction, Section 6 : CEM et Mise à la Terre », Leonardo Energy, France, Août 2007.
www.leonardo-energy.org

Lefouili M., « Caractérisation Numérique d'une Prise de Terre à Géométrie Complexes », Thèse de Doctorat, Département d'Electrotechnique, Université de Ferhat Abbas, Setif, Juillet 2007.

Legrand X., « Modélisation des systèmes de mise a la terre des lignes électriques soumis a des transitoires de foudre », Thèse de Doctorat en Sciences, l'Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique et Automatique de Lyon, 2007.

Laforest J., Comber M. & Zaffanella L., « Transmission Line Referenc Book », Catalogue de produits, Copyright, 2ème édition, 1989.

MG (Merlin Gerin), « Choix techniques : Régimes de neutre », Merlin Gerin, Catalogue distribution électrique HT/BT, 2005.

Megger, « Getting down to earth: A practical guide to earth resistance testing », Catalogue de produits, 2010.Site Internet: www.megger.com

M.Meyer, « Licence de sciences physiques 1^{ère} année U.E. physique 1.1 », cours d'électromagnétisme 1, Université de la Nouvelle Calédonie, 2008.

Nzuru N. J. P., « Contribution à l'Analyse et à la Réalisation des Mises à la Terre des Installations Electriques dans les Régions Tropicales », Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Février 2009.

Robinson. D.A, C.M.K. Gardner, J.D. Cooper, «Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity», Elsevier, Journal of Hydrology 223, pp 198-211, 1999.

Sunde E.D., «Conduction Effects in Transmission Systems, New York», Dover Publications Inc, 1968.

Stoffregen.H, U. Yamamanci, T. Zenker, G. Wessolek, “Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data”, Elsevier, Journal of Hydrology 267, pp 201-206, 2002.

Schneider Electric Industries, Christophe P. & Robert J., « Guide de conception des réseaux électriques industriels : Les régimes de neutre », DAS Transport et Distribution, Activité Ensembles et Applications, 6 883 427/A, France, Février 1997.Site internet : www.schneiderelectric.com

Schneider Electric Industries, « la foudre et les installations électriques HT », cahier Technique n° 168, France, CT 168 édition, 1993.

Sautriau F., « Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension », Cahier Technique Merlin Gerin n° 62, édition septembre 1991.

Schneider Electric Industries, « Protection des réseaux électriques : Guide de la protection », ART.065191, France, première édition, 2008.Site internet : www.schneider-electric.com

Tagg G.F., « Earth resistances », George Newnes Limited, London, first published, 1964.

Visacro S. & De Conti A., « A simplified model to represent typical grounding configurations applied in medium voltage and low voltage distribution lines », IX International Symposium on Lightning Protection, Federal University of Minas Gerais, Lightning Research Center, Brazil, November 2007.

Violaine Louvet. Teresa Gomez-Diaz l'a reprise en mai 2012., « **PROMOUVOIR LES LOGICIELS UTILES MAITRISES ET ECONOMIQUE** dans l'enseignement supérieur et la recherche » ; PLUME, mai 2012. Site internet : <https://www.projet-plume.org/fiche/femm>.