

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'ELECTROTECHNIQUE

N° :/2024

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : Réseaux Électriques

Thème

**Effets de la Dépendance Fréquentielle des Paramètres
Electriques d'un Sol Multicouche sur l'Augmentation du
Potentiel de terre.**

**Présenté Par : M^r. Abderraouf ROUIBAH
M^r. Rabeh BOURAOUI**

Encadré Par : Dr. Senaa KAUCHE

Date de soutenance : 30/06/2024

Jury de Soutenance

Président : Mohamed MELIT

Grade de Pr.

Univ MSB Jijel

Encadreur : Senaa KAUCHE

Grade de M. C. B.

Univ MSB Jijel

Examineur 1 : Basma HARRAT

Grade de M. C. A.

Univ MSB Jijel

Promotion : 2023 /2024

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude envers « **Allah** », le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et le courage nécessaires pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, **Sznna KROUCHE**, pour avoir accepté de nous encadrer, pour sa grande disponibilité lors de nos différentes sollicitations, et pour ses précieux conseils qui ont permis de mener à bien la réalisation de notre projet.

Nous remercions l'ensemble des **membres du jury** qui nous feront l'honneur d'examiner notre travail.

Enfin, un grand merci à tous **les enseignants** qui ont contribué à notre formation.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail avec tout ce que j'ai de sentiments et d'amour :

- ❖ À ma chère maman *Ilham* que dieu l'accueille dans son vaste paradis.
- ❖ À mon chère papa *Yacoub*.
- ❖ À mes chères frères *Ayoub* et *Zakaria*.
- ❖ À toute ma famille et mes amis et collègues.
- ❖ À tous ceux qui me sont chères.

BOURAOUI Rabeh

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail avec tout ce que j'ai de sentiments et d'amour :

- ❖ Aux personnes les plus chères Ma mère, mon père qui ont été une source inépuisable d'encouragement
- ❖ À mes chères sœurs.
- ❖ À toute ma famille.
- ❖ À toute mes amis et collègues.
- ❖ À tous ceux qui me sont chères.

ROUBANI Abderraouf

SOMMAIRE :

Sommaire

<i>Introduction Générale</i>	1
 Chapitre I- <i>Etat de l'Art sur Les surtensions transitoires et Les Mises à La Terre.</i>	
<i>Introduction</i>	3
I.1. Surtensions transitoires 4	4
I.1.1. Définition	4
I.1.2. Origine des surtensions transitoires	4
<i>I.1.2.1. Surtensions transitoires de foudre</i>	5
<i>I.1.2.1.1. Les effets de la foudre</i>	6
<i>I.1.2.2. Surtensions transitoires de manœuvre</i>	7
<i>I.1.1.3. Les surtensions électrostatique(ESD)</i>	9
<i>I.1.2.4. Les impulsions électromagnétiques nucléaires (IEMN)</i>	9
I.2. Utilité des systèmes de mise à la terre	9
I.2.1. Définition d'un système de mise à la terre	10
I.2.2. Protection contre la foudre	11
<i>I.2.2.1. Protection contre les effets directs</i>	11
<i>I.2.2.2. Protection contre les effets indirects</i>	12
I.2.3. Protection contre les transitoires de manœuvres	15
I.2.4. Systèmes de mise à la terre en matière de protection	16
<i>I.2.4.1. Elévation du potentiel de terre (EPT, GPR en anglais)</i>	16
<i>I.2.4.1.1. La tension de pas</i>	16
<i>I.2.4.1.2. Tension de contact</i>	17
<i>I.2.4.2. Rôle des systèmes de mise à la terre</i>	17
I.2.5. Types des systèmes de mise à la terre	18
<i>I.2.5.1. Conducteurs enfouis horizontalement</i>	18
<i>I.2.5.2. Piquets verticaux</i>	19
<i>I.2.5.3. Plaques verticales</i>	19
<i>I.2.5.4. Prise de terre par grille</i>	20
I.3. Caractérisation du sol	21
I.3.1. Structure du sol	21
I.3.2. Caractéristiques électromagnétiques du sol	21

<i>I.3.2.1. Résistivité électrique</i>	21
<i>I.3.2.2. La permittivité électrique du sol</i>	22
<i>I.3.2.3. La perméabilité magnétique</i>	22
I.3.3. Facteurs influant sur les caractéristiques électriques du sol	22
<i>I.3.3.1. Nature du sol</i>	22
<i>I.3.3.2. Teneur en humidité</i>	23
<i>I.3.3.3. Température</i>	24
<i>I.3.3.4. Variations saisonnières</i>	24
<i>I.3.3.5. Formation géologique générale</i>	24
<i>I.3.3.6. Fréquence</i>	24
I.3.4. Hétérogénéité du sol : Stratification	24
<i>I.3.4.1. Sol homogène (monocouche)</i>	25
<i>I.3.4.2. Sol hétérogène (multicouche)</i>	25
I.3.5. La dépendance des paramètres du sol avec la fréquence	26
I.3.6. Mesure de la résistivité du sol	27
<i>I.3.6.1. Méthode Wenner</i>	27
<i>I.3.6.2. Méthode Schlumberger</i>	28
Conclusion	30
Références Bibliographiques- Chapitre I	31

Chapitre II- *Concepts Théoriques pour l'Etude de l'Augmentation du Potentiel de Terre dans un Sol Hétérogène et Dépendant de la Fréquence.*

Introduction	34
II.1. Méthodes numériques de modélisation des systèmes de mise à la terre	35
II.2. Modélisation des structures filaires par la théorie des lignes de transmission dans le domaine fréquentiel	36
II.2.1. Equations des lignes dans le cas d'une ligne bifilaire	36
II.2.2. Solution des équations d'ondes d'une ligne bifilaire	37
II.2.3. Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine fréquentiel	38
II.2.4. Modélisation d'un réseau de structures filaires par le formalisme topologique « $[A].[X] = [B]$ »	39
<i>II.2.4.1. Principe de ce formalisme</i>	39
II.2.5. Paramètres linéiques des électrodes de terre	41
<i>II.2.5.1. Paramètres linéiques d'une électrode enterrée horizontalement</i>	42
<i>II.2.5.2. Paramètres linéiques d'un piquet vertical</i>	42
II.3. Détermination de la résistivité apparente pour un sol stratifié	43
II.3.1. Cas d'un sol à deux couches de résistivités différentes	44
<i>II.3.1.1. Méthode de WENNER</i>	44
<i>II.3.1.2. Méthode de J. A. SULLIVAN</i>	44
<i>II.3.1.3. Méthode de C. J. BLATTNER (selon l'IEEE)</i>	45
<i>II.3.1.4. Méthode de H. R. SEEDHER et J. K. ARORA</i>	45
<i>II.3.1.5. Méthode d'E. D. SUNDE</i>	46
II.3.2. Cas d'un sol composé de trois couches de résistivités différentes	46

<i>II.3.2.1. Première méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches</i>	47
<i>II.3.2.2. Deuxième méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches</i>	48
<i>II.3.2.3. Troisième méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches</i>	49
<i>II.3.2.4. Quatrième méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches</i>	50
<i>II.3.2.5. Cinquième méthode : La résistivité apparente d'un sol à 3 couches selon l'IEEE</i>	52
<i>II.4. Modèles de la dépendance des paramètres du sol avec la fréquence</i>	52
<i>II.4.1. Modèle de J. H. SCOTT (S)</i>	53
<i>II.4.2. Modèle de K. S. SMITH and C. L. LONGMIRE (SL)</i>	53
<i>II.4.3. Modèle de M. MESSIER (M)</i>	54
<i>II.4.4. Modèle de F. S. VISACRO and C. M. PORTELA (VP)</i>	55
<i>II.4.5. Modèle de C. M. PORTELA (P)</i>	55
<i>II.4.6. Modèle de S. VISACRO and R. ALIPIO (VA)</i>	56
<i>Conclusion</i>	57
<i>Références Bibliographiques - Chapitre II</i>	58

Chapitre III- *Applications et Discussion des Résultats*

<i>Introduction</i>	60
III.1. Une comparaison des modèles du sol dépendant de fréquence	61
III.1.1. Comparaison des modèles avec des résultats de mesure.....	61
III.1.2. Application pour l'analyse d'une simple électrode horizontale.....	65
III.2. Méthodes du calcul de la résistivité apparente ρ_a d'un sol stratifié	69
III.2.1. Cas d'un sol stratifié à deux couches.....	69
III.2.2. Cas d'un sol stratifié à trois couches.....	75
III.3. Calcul du GPR et de l'impédance du sol pour des électrodes enterrées dans un sol stratifié à paramètres dépendants de la fréquence	79
III.3.1. Résultats pour le cas de la mise à la terre en piquet vertical.....	82
III.3.2. Résultats pour le cas de la mise à la terre en patte d'oie (croisée).....	86
III.4. Étude des GPRs lors de l'impact d'un courant de foudre sur une Tour munie de sa mise à la terre pour des sols stratifiés et dépendants de la fréquence	91
<i>Conclusion</i>	100
<i>Références Bibliographiques - Chapitre III</i>	101
 <i>Conclusion Générale</i>	 103

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Introduction Générale

Lors d'un défaut à la terre dans un poste ou sur une ligne de transport d'énergie, le courant de défaut cherche à s'écouler dans le sol à travers les électrodes de mise à la terre. Ce phénomène provoque une élévation du potentiel local du sol (**EPT** ou **GPR** en anglais pour « *Ground Potential Rise* ») par rapport à celui d'une terre éloignée.

Dans le domaine de l'ingénierie électrique, comprendre la *dépendance fréquentielle* des paramètres électriques du sol est essentiel pour la conception et l'analyse des systèmes de mise à la terre efficaces. Ces systèmes jouent un rôle important pour assurer la sécurité et la fiabilité des installations électriques, notamment dans les situations impliquant des courants transitoires élevés, comme ceux des coups de foudre. Par ailleurs, la *conductivité* et la *permittivité* du sol, qui varient en fonction de la fréquence, influencent directement le comportement de ces systèmes, car ils sont dedans du sol et en fonction de ses paramètres.

En outre, la dépendance fréquentielle des paramètres électriques des différentes couches d'un sol hétérogène (stratifié), les valeurs de leurs résistivités, leurs épaisseurs et leurs arrangements sont des facteurs entre autres qui ont des effets significatifs sur l'augmentation du potentiel de terre « **GPR** » lors d'une décharge d'un courant critique à travers les mises à la terre d'un système électrique.

Dans ce contexte s'intègre notre projet de fin d'études en Master II, option, Réseaux Electriques, intitulé : « **Effets de la Dépendance Fréquentielle des Paramètres Electriques d'un Sol Multicouche sur l'Augmentation du Potentiel de terre** ». Dans lequel, nous essayerons de comprendre ces effets, par l'examen de plusieurs aspects clés, notamment les *paramètres* électriques du sol, la *configuration multicouche* et l'impact de la *fréquence* sur ces paramètres.

Notre travail s'arrange en trois chapitres :

- Dans le *premier chapitre* nous présenterons quelques généralités sur les surtensions et les effets de la foudre, les stratégies et les moyens de protection contre cette dernière, puis nous aborderons les systèmes de mise à la terre et la caractérisation du sol ;

- Dans le *deuxième chapitre*, nous exposerons les concepts théoriques, les modèles et les méthodes de calcul nécessaires à notre modélisation afin d'analyser les effets de la stratification et de la dépendance fréquentielle des sols sur les performances des mises à la terre ;
- Le *troisième chapitre* est dédié principalement à l'étude de quelques exemples d'application dans lesquels en analysant le comportement transitoire des systèmes de mises à la terre enfouis dans des sols uniformes ou stratifiés et en apercevant l'effet de la dépendance fréquentielle des paramètres électriques de ces sols sur l'augmentation du potentiel de terre « GPR ».

Notre mémoire se clôt par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

*Etat de l'Art sur Les Surtensions
Transitoires et Les Mises à La Terre.*

Introduction

En exploitation, les installations électriques sont susceptibles d'être exposées à des surtensions, provenant à la fois de phénomènes atmosphériques tels que la *foudre* et d'autres sources telles que les *manœuvres* de commutation ou les phénomènes de résonance. Ces surtensions peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de l'énergie fournie.

En vue de se protéger contre cette perturbation, les réseaux électriques sont équipés par des *câbles de garde*, des *parafoudres* ainsi que des *mises à la terre*. L'utilisation des **systèmes de mise à la terre** de différentes géométries (grilles, conducteurs verticaux et horizontaux et/ou une combinaison appropriée de ceux-ci) est essentielle pour assurer la **sécurité** des personnes ainsi que la **protection** des équipements électriques.

En effet, dans ce premier chapitre, nous proposons un état de l'art sur les surtensions ainsi que sur les équipements de protection utilisés. Nous commencerons par les effets des surtensions transitoires sur le réseau notamment celles de « la *foudre* ». Nous exposerons également les techniques de protection contre ce phénomène et nous mettons l'accent sur les *systèmes de mise à la terre*. Nous présenterons ensuite, l'utilité de ces systèmes (*mises à la terre*) dans le réseau ainsi que leur rôle. Nous terminerons ce chapitre par la *caractérisation du sol* et la notion de son **hétérogénéité** .

I.1. Surtensions transitoires

I.1.1. Définition

Pendant l'exploitation, le matériel électrique est soumis à diverses contraintes, qui peuvent être causées par l'application continue de la tension de service ou par des phénomènes transitoires tels que les surtensions.

Les surtensions transitoires sont des fluctuations de courte durée, parfois oscillantes et généralement fortement atténuées, qui peuvent être superposées ou non à des surtensions temporaires. Ces surtensions transitoires se divisent en trois types [I-1] :

- ✓ **Les surtensions à front lent** : également appelées *surtensions de manœuvre*, se caractérisent par un temps de montée compris entre 20 et 5000 μs , et une durée totale jusqu'à la mi-amplitude de moins de 20 ms ;
- ✓ **Les surtensions à front rapide** : connues sous le nom de *surtensions de foudre*, présentent un temps de montée compris entre 0,1 et 20 μs , et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 300 μs ;
- ✓ **Les surtensions à front très rapide** : qui affichent un temps de montée inférieur à 0,1 μs et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 3 ms.

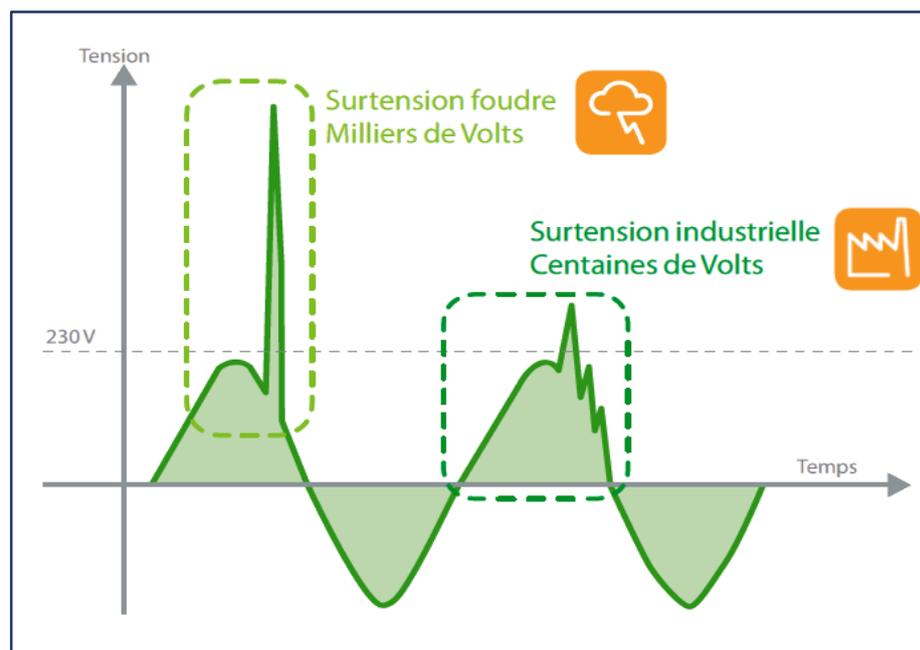


Figure I.1. Exemple de surtensions transitoires.

I.1.2. Origine des surtensions transitoires

Les surtensions transitoires peuvent être attribuées à *quatre principales causes* [I-2] :

- ✓ La foudre ;
- ✓ Les surtensions industrielles ou de manœuvres ;
- ✓ Les surtensions électrostatiques (ESD) ;
- ✓ Les impulsions électromagnétiques nucléaires (IEMN).

Ces différentes origines entraînent des variations dans les amplitudes, les énergies, les formes et les fréquences d'occurrence des surtensions transitoires. Alors que les phénomènes de foudre et de surtensions industrielles sont bien connus depuis de nombreuses années, les perturbations « ESD » ou « IEMN » sont beaucoup plus spécifiques et sont le résultat de récentes avancées technologiques [I-2].

1.1.2.1. Surtensions transitoires de foudre

La foudre est un *phénomène naturel* qui se produit pendant les **orages**, résultant de la **décharge électrique** entre un nuage et le sol, ou entre deux nuages. Cette décharge électrique se produit lorsque des charges électriques s'accroissent dans les nuages et cherchent à se dissiper vers la terre ou vers d'autres nuages, créant ainsi un éclair lumineux accompagné de tonnerre. La foudre est souvent associée à des conditions météorologiques instables et peut être accompagnée de pluie, de vents forts et d'autres phénomènes atmosphériques [I-3].



Figure I.2. Exemples de coup de foudre sur le réseau électrique.

Lorsqu'une **ligne** est frappée par la foudre, un courant de foudre de *forte intensité* est injecté dans le système électrique. Ce courant peut générer des **surtensions significatives** et *endommager les équipements électriques* le long de la ligne, notamment les transformateurs, les disjoncteurs, les isolateurs et les câbles.

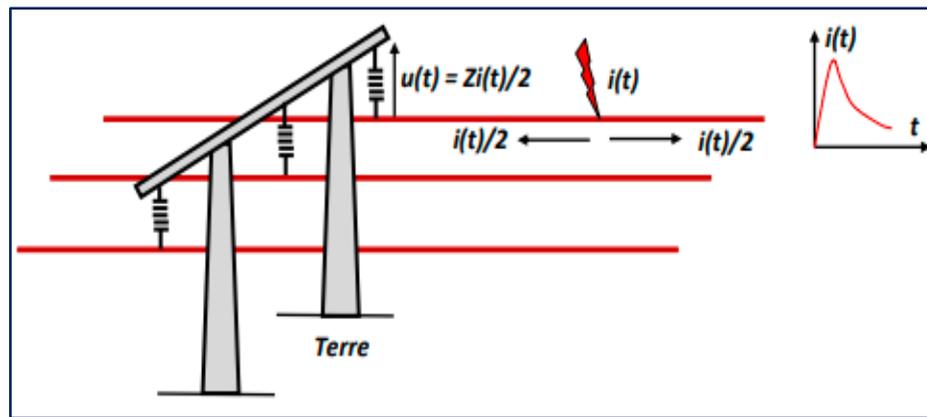


Figure I.3. Impact de foudre sur une phase d'une ligne aérienne [I-4].

1.1.2.1.1. Les effets de la foudre

Pour généraliser les effets indésirables de la foudre que ce soit sur les **objets** (bâtiments ou *systèmes électriques*/électroniques) ou sur les **êtres vivants** nous pouvons citer les effets suivants [I-5], [I-6] :

- ✚ **Effet électrique** : Dans le chemin complexe emprunté par la foudre pour s'écouler dans le sol, apparaissent des différences de potentiel importantes sur de faibles distances provoquant des claquages locaux qui endommagent les conducteurs présents dans le sol. Ces tensions présentent un grave danger pour les êtres vivants en surface (*tension de pas*) ;
- ✚ **Effets thermiques** : Les effets thermiques de la foudre se manifestent par la conversion de l'énergie en chaleur. Ils sont particulièrement significatifs pour les matériaux qui sont de mauvais conducteurs ou qui sont humides. Par exemple, la vaporisation de l'eau dans un sol humide peut entraîner *l'écrasement d'un câble souterrain* ;
- ✚ **Effets acoustiques (tonnerre)** : Les effets acoustiques, souvent associés au tonnerre produit par la foudre, sont le résultat des forces électrodynamiques générées par le courant qui traverse l'éclair. Ces forces provoquent une expansion de l'air le long du canal de foudre, entraînant une augmentation de la pression dans le canal. Cette surpression et sa disparition brutale crée une onde de choc ;
- ✚ **Effets lumineux (éclair)** : Lorsque le puissant courant d'arc en retour circule le long du canal ionisé que constitue le traceur, ce canal est brusquement très fortement chauffé et se transforme instantanément en un véritable arc électrique. Une **violente lumière** est alors émise ;

- ✚ **Effets électrodynamiques** : Les effets électrodynamiques de la foudre se manifestent par les *forces mécaniques* subies par les conducteurs exposés au champ magnétique généré par le courant électrique intense. Ces forces peuvent entraîner des **déformations** ou des **arrachements** de structures métalliques et causer des dommages aux câbles [I-7] ;
- ✚ **Effet électromagnétique** : Les effets électromagnétiques se manifestent par différents processus de **couplages sur une structure**. Le phénomène d'induction électromagnétique, lié à la propagation d'onde de courant sur les conducteurs, provoque des dégâts en leurs extrémités ainsi que les *signaux parasites* détruisent les composants électroniques sensibles aux surtensions ;

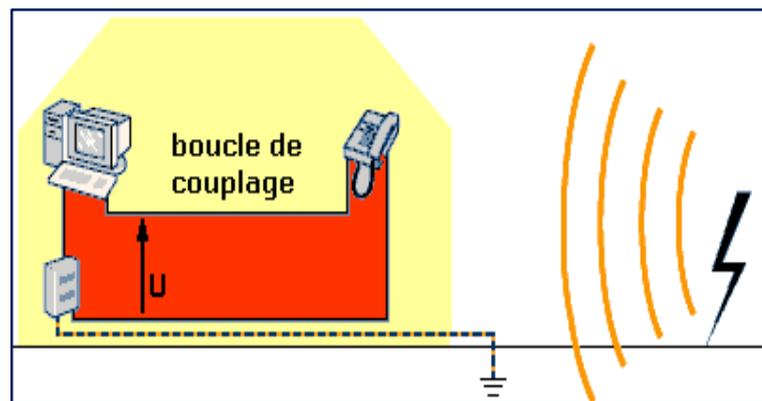


Figure I.4. Surtensions induites de la foudre.

- ✚ **Élévation du potentiel de terre** : Lorsqu'un point de la terre est frappé par la foudre, la circulation du courant crée dans le sol une **tension électrique** en fonction de la résistivité du sol et de la distance jusqu'au point d'impact. Cette différence de potentiel peut conduire à un courant circulant à travers les membres inférieurs, provoquant ce qu'on appelle la **tension de pas** [I-8] ;

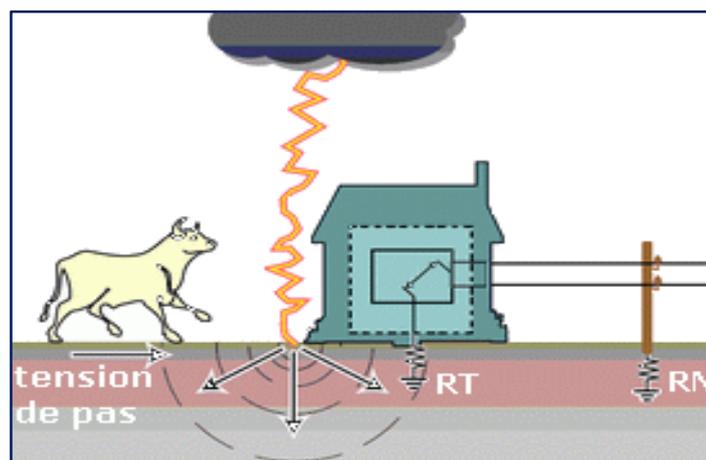


Figure I.5. Tension de pas due à l'élévation du potentiel de terre.

✚ **Effets sur un être vivant (humain ou animal)** : Le passage d'un courant électrique d'une certaine intensité, même pendant une courte durée, peut provoquer des risques d'**électrocution** par arrêt cardiaque ou arrêt respiratoire. Les dangers de **brûlures** sont également présents en raison de la chaleur générée par le passage du courant électrique.

1.1.2.2. Surtensions transitoires de manœuvre

Les surtensions de manœuvre, également connues sous le nom de *surtensions à front lent*, sont principalement générées lors de l'enclenchement ou du déclenchement des interrupteurs dans un système électrique.

Les surtensions de manœuvres peuvent être assimilées à un choc de manœuvre de forme normalisée (**figure I.6**), c'est-à-dire à une onde apériodique dont le front à une durée de l'ordre de quelques centaines de microsecondes [I-3].

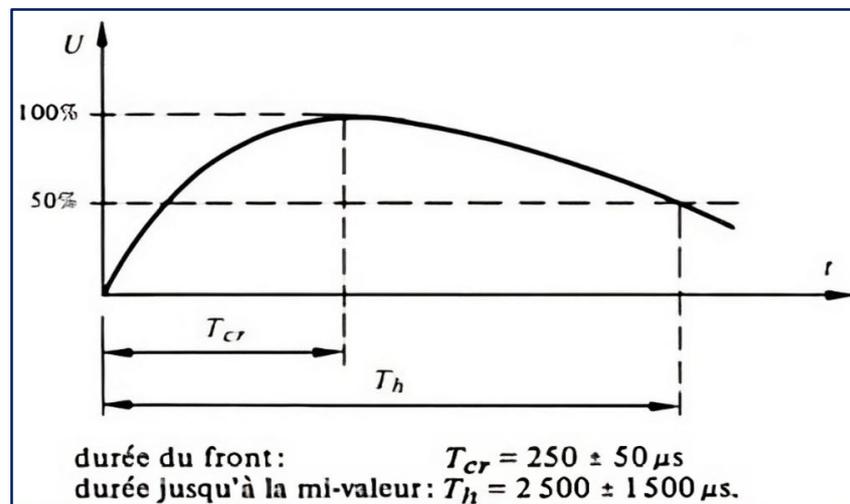


Figure I.6. Forme normalisée d'une surtension de manœuvre.

Les surtensions de manœuvre sont causées par plusieurs facteurs, notamment [I-3] :

- ✓ L'enclenchement et le ré-enclenchement d'une ligne ;
- ✓ L'apparition et la disparition d'un défaut ;
- ✓ La coupure de courants capacitifs ou inductifs ;
- ✓ La perte d'une charge.

1.1.1.3. Les surtensions électrostatiques (ESD)

Une décharge électrostatique (ESD) se manifeste par un transfert très rapide de charges électriques entre deux objets. L'origine de ce transfert vient d'un déséquilibre initial de charges

entre les deux objets.

Dans les zones de travail où sont utilisés des appareils électroniques ou des instruments de mesure sensibles, les décharges électrostatiques peuvent générer des tensions élevées qui ont le potentiel d'endommager et de détruire les composants et appareils électroniques [I-9].

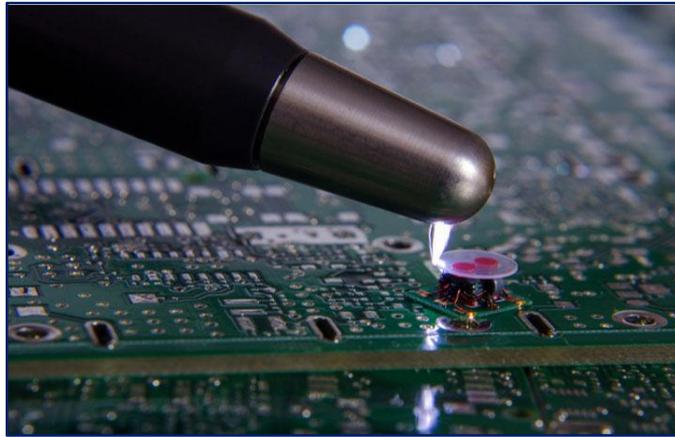


Figure I.7. Une décharge électrostatique.

1.1.2.4. Les impulsions électromagnétiques nucléaires (IEMN)

L'impulsion Électromagnétique Nucléaire (IEMN) est un phénomène qui survient à la suite d'une explosion nucléaire. Lorsqu'une explosion nucléaire se produit en haute amplitude, elle génère une onde électromagnétique capable de perturber ou endommager les systèmes électriques et électroniques sur de vastes étendues.

Cette onde électromagnétique se propage sous forme d'une onde plane et peut couvrir plusieurs milliers de kilomètres. Les effets de l'IEMN peuvent être destructifs pour les infrastructures critiques telles que les *réseaux électriques* [I-10].

I.2. Utilité des systèmes de mise à la terre

Les systèmes de mise à la terre jouent un rôle important dans la sécurité et la performance des installations électriques. En offrant un chemin sûr pour détourner les courants de défaut vers la terre, ils protègent les personnes et les équipements contre les risques et les défauts.

De plus, ces systèmes contribuent à réduire les interférences électromagnétiques, à ***prévenir les surtensions transitoires*** et à garantir une référence de tension stable. Leur utilité s'étend également à la conformité réglementaire, car de nombreuses normes exigent une mise à la terre adéquate pour assurer la ***sécurité des installations***.

Les **objectifs** des dispositifs de protection sont multiples [I-11] :

- ✓ Participer à la protection des personnes contre les électrocutions ;
- ✓ Éviter les détériorations des éléments du réseau (installations, postes, ... etc.) ;
- ✓ Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles sont soumis ces éléments pour éviter les détériorations du matériel ;
- ✓ Préserver la stabilité et la continuité de service du réseau électrique ;
- ✓ Protéger les installations voisines (réduire les tensions induites, ... etc.

Afin d'atteindre ces objectifs, il est indispensable que le système de protection soit à la fois rapide, sélectif, fiable et sensible. Toutefois, il est important de noter que la protection ne peut pas éliminer totalement toutes les perturbations, elle peut seulement en limiter les effets et la durée de défaut. En général, le compromis entre la sécurité et la disponibilité de l'alimentation électrique est influencé par le coût de conception de la protection, une analyse *technico-économique* est donc nécessaire pour choisir judicieusement le système de protection adapté.

I.2.1. Définition d'un système de mise à la terre

Un système de mise à la terre (*SMLT*) est un ensemble de connexions électriques qui relient les parties actives d'un équipement ou d'un élément conducteur étranger à une ou plusieurs prises de terre. Ces connexions visent à garantir une meilleure performance, une rentabilité de fonctionnement et un contrôle efficace des systèmes électriques [I-5].

En pratique, un système de mise à la terre comprend des connexions conductrices entre les équipements et les électrodes situées dans le sol, assurant ainsi le maintien du potentiel du bâti des équipements et du point neutre des circuits à une valeur proche de celle du sol environnant. Pour faciliter le passage du courant électrique vers le sol, contribuant ainsi à la sécurité et à la fiabilité des installations électriques [I-12]. La **figure I.8** montre l'emplacement des systèmes de mise à la terre le long de toute la chaîne depuis de la production jusqu'à la consommation de l'énergie électrique.

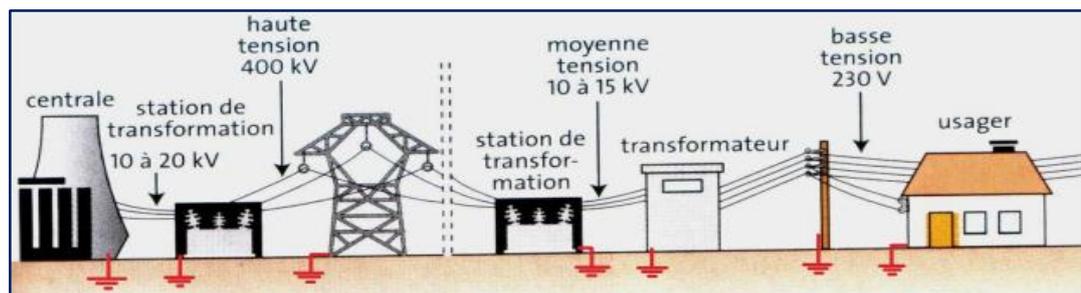


Figure I.8. Emplacement des SMLTs dans la chaîne production-consommation de l'électricité.

I.2.2. Protection contre la foudre

Deux stratégies différentes de protection sont utilisées celle contre *les effets directs* et l'autre contre *les effets indirects* de la foudre :

I.2.2.1. Protection contre les effets directs

Vu l'importance et la puissance de l'impact directe de foudre, des dispositifs de protection, qui reposent sur le principe de *capter* et *canaliser* la foudre, sont développés et mis en service dans différents systèmes électriques.

✚ Protection du réseau de transport contre la foudre

Dans le cas du coup de foudre direct sur le réseau de transport, la protection est assurée par l'utilisation d'un *câble de garde* pour les lignes aériennes et d'un *filet de garde* aérien relié à une *grille de mise à la terre* pour les postes aériens [I-5] ;

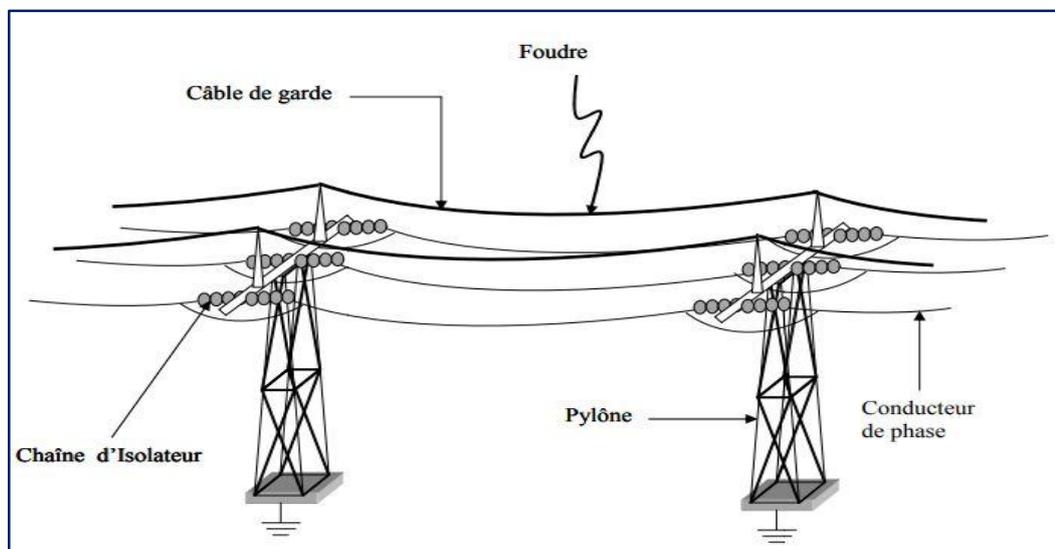


Figure I.9. Câble de garde pour la protection des lignes de transport contre la foudre.

✚ Protection des bâtiments contre la foudre

Les systèmes de protection extérieure tels que les *paratonnerres* ont pour rôle de capter les coups de foudre qui menacent les structures à protéger et d'écouler les courants de foudre vers la terre en supportant ses effets. Ces systèmes sont généralement composés de :

- un ou plusieurs *dispositifs de capture* des décharges atmosphériques : ce sont des tiges verticales terminées par des pointes ;
- *conducteurs de toiture* et de *descente* : leur rôle est d'écouler les courants vers les prises de terre ;
- *prises de terre*.

Afin de protéger un bâtiment, on peut utiliser les **paratonnerres** suivants [I-13] :

1. **Paratonnerres à tige simple** (pointe simple) ;
2. **Paratonnerre à dispositif d'amorçage** ;
3. **Fils tendus** ;
4. **Conducteurs maillés** (cages).

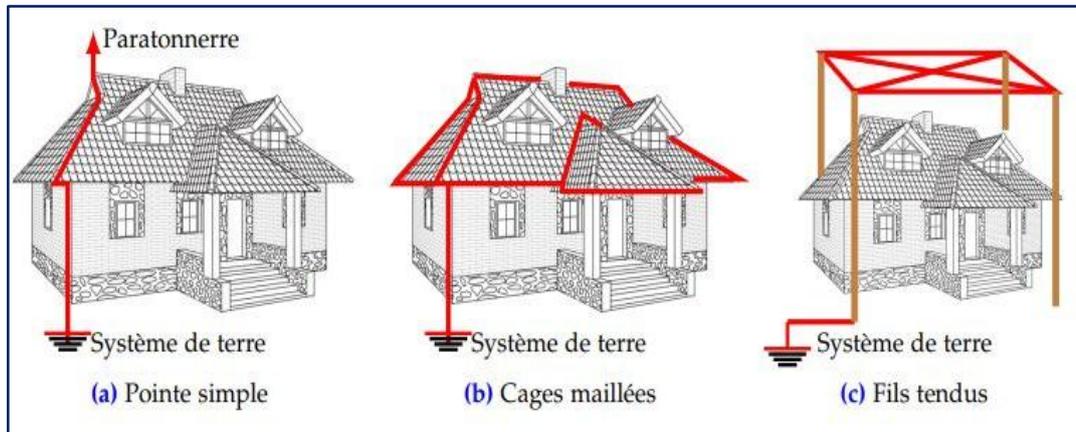


Figure I.10. Paratonnerres pour la protection contre la foudre.

1.2.2.2. Protection contre les effets indirects

Les réseaux de transport, qu'il s'agisse de lignes électriques aériennes ou de câbles souterrains, sont exposés aux **perturbations induites** par la foudre, telles que les **surtensions transitoires**. Ces surtensions peuvent endommager les équipements sensibles et compromettre le fonctionnement du réseau. Afin de minimiser ces risques, Pour protéger les systèmes électriques contre les effets indirects de la foudre, on utilise **les éclateurs et les parafoudres**.

✚ Eclateurs

Sont les plus utilisés en raison de leur simplicité, on distingue **deux** types d'éclateurs :

1. **Eclateur à cornes avec tige anti-oiseaux**

Il est constitué de deux électrodes, la première est reliée au conducteur à protéger, la deuxième est reliée à la terre. Ces deux électrodes sont montées sur une chaîne d'isolateurs. Les électrodes constituant les éclateurs, utilisés dans les réseaux de distribution moyenne tension, sont en *fer* de section moins de 80 mm², la liaison à la terre est établie par un conducteur en cuivre de 29 mm² de section [I-14].

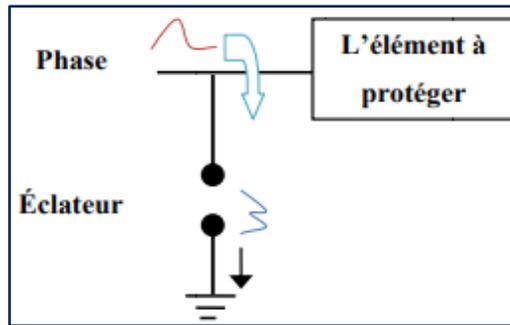


Figure I.11. Schéma de principe d'un éclateur.

L'intervalle entre électrodes étant réglé pour s'amorcer si les surtensions du réseau dépassent les niveaux de protection choisis. En effet, la lenteur à l'amorçage est environ de $1 \mu\text{s}$ [I-5].

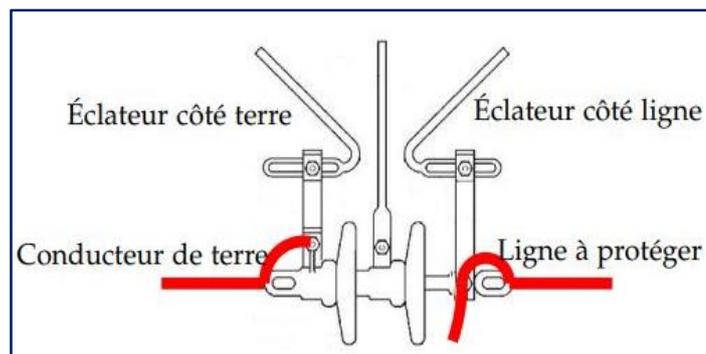


Figure I.12. Eclateur avec tige anti-oiseaux.

2. Eclateur à tige

Il est composé de deux tiges métalliques (électrodes) ajustables, entre lesquelles un arc électrique peut se former lorsqu'une surtension se produit. L'éclateur à tige aide à dissiper l'énergie de la surtension et à protéger les équipements connectés en aval. Les éclateurs à tiges sont utilisés à l'intérieur du poste, sur les réseaux à neutre mis à la terre où le courant de défaut franc à la terre peut atteindre 300 A.



Figure I.13. Eclateurs à air : arc électrique formé sous une différence de tension de 400 kV [I-5].

✚ Parafoudres

Le parafoudre est un dispositif destiné à limiter les surtensions transitoires et à dériver les ondes de courant vers la terre, afin de limiter l'amplitude de cette **surtension** à une *valeur non dangereuse* pour l'installation électrique et l'appareillage électrique. En cas de surtension supérieure au seuil U_c , le parafoudre devient conducteur et évacue rapidement l'énergie à la terre [I-14].

Il peut être de différents types :

1. Parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs

Un parafoudre SiC, ou parafoudre à carbure de silicium, est un dispositif de protection contre les surtensions constituées de **résistances non linéaires** en carbure de silicium associées à des éclateurs. Ces composants sont conçus pour réagir lorsque la tension électrique dépasse un certain seuil. Lorsque cela se produit, les éclateurs s'amorcent, permettant le passage d'un courant de décharge à travers les résistances en carbure de silicium. Ce courant de décharge contribue à réduire rapidement la surtension en diminuant la valeur de résistance du dispositif. Une fois que la tension revient à la normale du réseau, le courant est maintenu à une faible intensité et peut être facilement interrompu lors du premier passage par zéro [I-15].

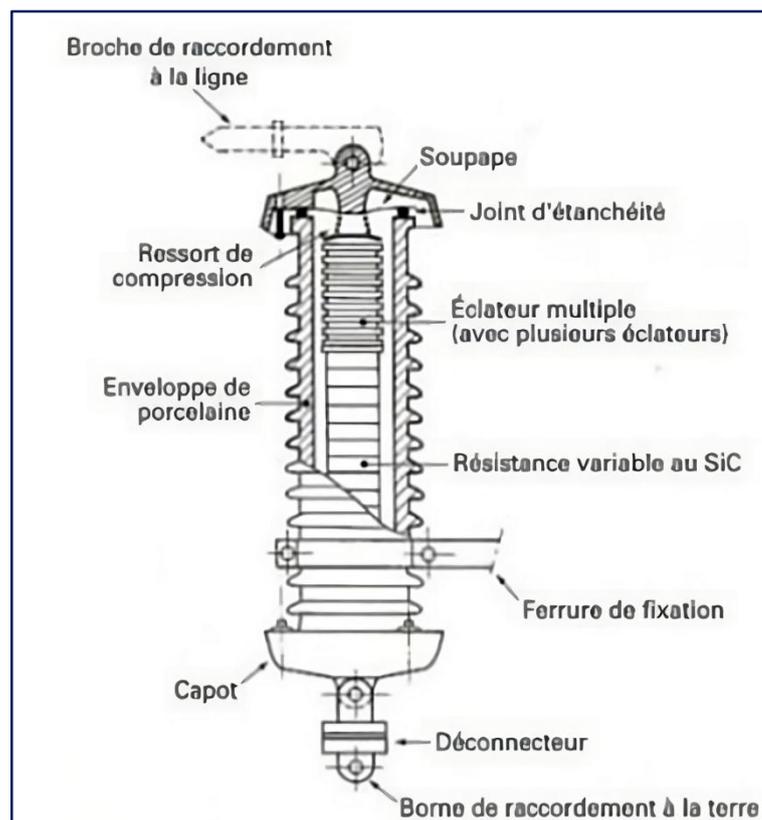


Figure I.14. Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs.

2. Parafoudres à Oxyde de Zinc

Le parafoudre à oxyde de zinc est constitué uniquement d'une résistance variable fortement non linéaire [I-14]. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante, généralement en porcelaine ou en matériau synthétique. Sous la tension de service, son impédance est très élevée et la varistance est parcourue par un courant très faible. Lorsqu'une **surtension** apparaît, la résistance diminue rapidement, la **varistance écrête** la surtension en lui livrant un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre [I-13]. Après le passage du courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre équivaut à la tension du réseau. Le courant traversant le parafoudre devient alors faible et se stabilise autour du niveau du courant de fuite vers la terre.

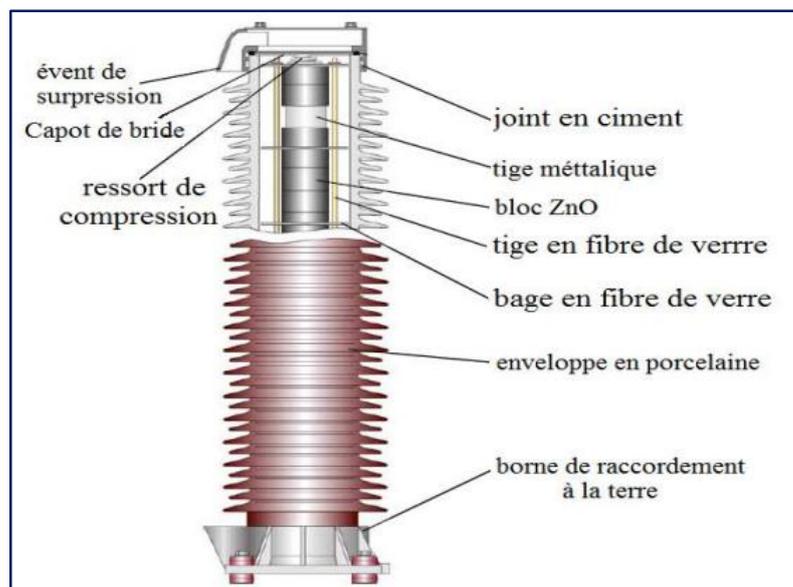


Figure I.15. Structure des parafoudres ZnO à enveloppe en porcelaine [I-14].

I.2.3. Protection contre les transitoires de manœuvres

Les surtensions de manœuvre proviennent essentiellement de l'enclenchement ou de déclenchement des interrupteurs dans un système électrique [I-5]. Plus précis, est une impulsion ou une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau. Elle est caractérisée par un temps de montée de l'ordre de microseconde avec un pic de tension transitoire de plusieurs kilovolts (dépendant de la puissance du système).

Pour protéger les appareils de ce type de surtensions, on peut utiliser des *parafoudres* ainsi que des *transformateurs à tension constante* [I-11].

I.2.4. Systèmes de mise à la terre en matière de protection

Les mises à la terre (MALT) sont des éléments vitaux des circuits électriques et jouent un rôle essentiel dans la protection contre les accidents électriques. Elles ont été introduites dans le domaine de l'électrotechnique par Benjamin Franklin [I-12], célèbre inventeur des parafoudres.

Un système de mise à la terre a pour but [I-16], [I-17] :

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

I.2.4.1. Elévation du potentiel de terre (EPT, GPR en anglais)

Une élévation du potentiel de terre se produit quand un ***courant de défaut de forte intensité*** circule à travers la structure des installations jusqu'au point de ***mise à la terre***. Le potentiel électrique est plus élevé au point où le courant pénètre dans le sol, et diminue avec l'éloignement de ce point. L'élévation du potentiel de terre peut causer des *tensions dangereuses* à plusieurs centaines de mètres de l'emplacement du défaut réel, et peut être si important qu'une personne pourrait être blessée en raison de la tension développée entre ses deux pieds (***tension de pas***), ou entre le sol et sa main en contact avec une masse métallique (***tension de contact***) [I-18].

I.2.4.1.1. La tension de pas

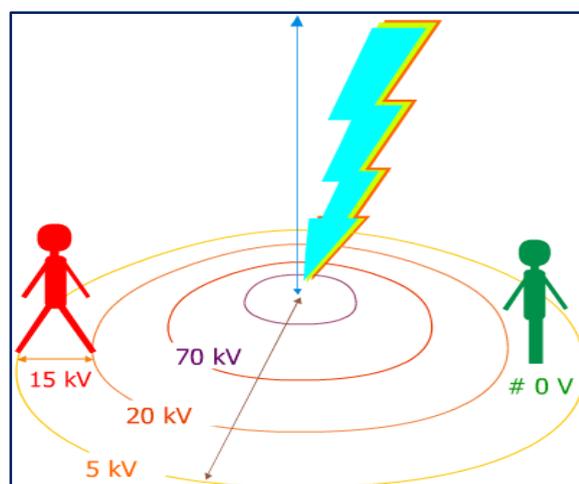


Figure I.16. Signification de la tension de pas.

La tension de pas est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas, que l'on assimile à un mètre, dans la direction du gradient

de potentiel maximum. La tension de pas dépend de la distribution de potentiel dans le sol. Si le sol est homogène, elle est directement proportionnelle à sa résistivité [I-19].

1.2.4.1.2. Tension de contact

La tension de contact ou la tension de toucher est la différence de potentiel entre une structure métallique mise à la terre et un point situé à la surface du sol généralement à une distance égale à 1 m [I-19]. Cette tension appliquée à la résistance d'une personne engendre un courant dans le corps de celle-ci qui subit alors un choc électrique.

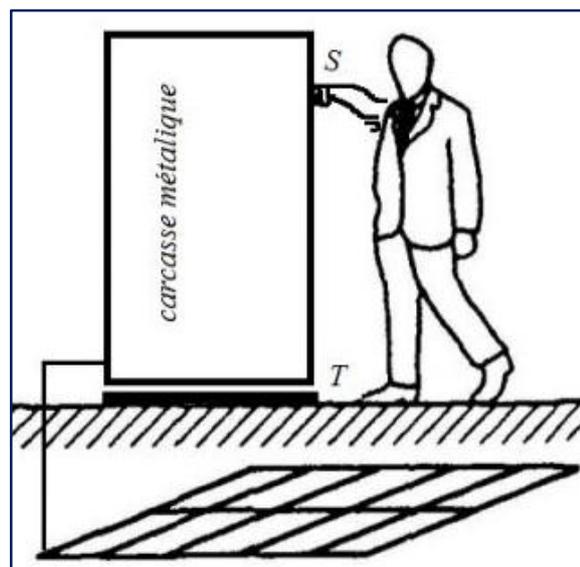


Figure I.17. Tension de contact entre le point S et la terre.

1.2.4.2. Rôle des systèmes de mise à la terre

Son rôle principal est de maintenir le potentiel du bâtiment ou du circuit électrique proche de celui du sol environnant. Cela permet de protéger les individus et les équipements en facilitant le passage du courant électrique vers la terre, limitant ainsi les risques d'accidents dus à des **défauts électriques** ou à la **foudre**. En résumé, la MALT assure la sécurité en *réduisant les tensions dangereuses* et en améliorant la qualité du fonctionnement des équipements électriques [I-12].

En effet, les systèmes de mise à la terre jouent un rôle important dans la **protection** des personnes et des installations électriques, puisqu'ils permettent d'écouler des courants atmosphérique (de foudre) et ceux des défauts vers la terre. En outre, ils sont utilisés pour **éviter les élévations dangereuses des potentiels de terre**.

Lors d'un défaut à la terre dans un ouvrage énergétique ou sur une ligne de transport d'énergie, le courant de défaut s'écoule dans le sol à travers le système de mise à la terre, ce qui fait monter le potentiel local du sol [I-11].

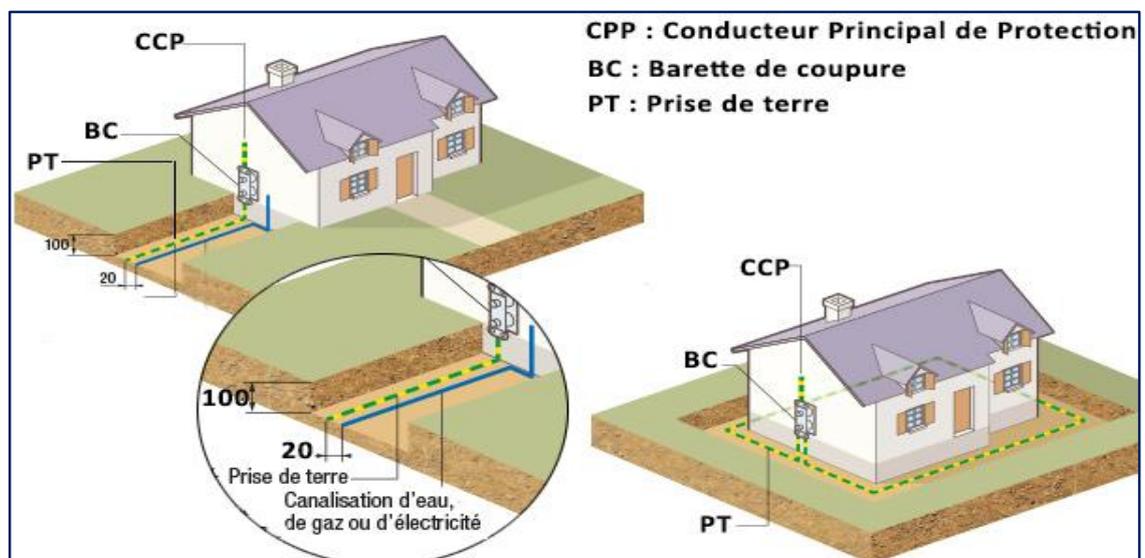
I.2.5. Types des systèmes de mise à la terre

L'efficacité des mises à la terre dépend des *conditions du terrain* et la valeur de la *résistance de la prise de terre*. La prise de terre peut être constituée [I-20] :

- soit par des *conducteurs nus horizontaux* ;
- soit par un *ceinturage à fond de fouille*, enfouis dans le sol, de dimensions suffisantes et de nature choisie pour résister à l'action destructive de ce milieu ;
- soit par des *piquets verticaux* ;
- soit par des *plaques verticales* ;
- soit par une *grille*.

I.2.5.1. Conducteurs enfouis horizontalement

Installer des conducteurs enfouis horizontalement est une recommandation courante pour les nouvelles constructions. Cette pratique implique de placer des câbles sous le béton de propreté ou contre les murs extérieurs, à une profondeur d'au moins un mètre. Généralement, on utilise un câble en cuivre nu de section 25 mm² (ou 95 mm² en acier galvanisé) pour cette configuration [I-21].



(1) Tranchée

(2) Boucle

Figure I.18. Prise de terre par boucle à fond de fouille et par conducteur enfoui horizontalement dans une tranchée.

1.2.5.2. Piquets verticaux

Les piquets verticaux de prise de terre doivent être installés à une profondeur suffisante pour garantir un contact adéquat avec le sol et assurer une résistance de terre aussi faible et stable que possible [I-22]. La profondeur minimale recommandée est au moins 2 mètres.

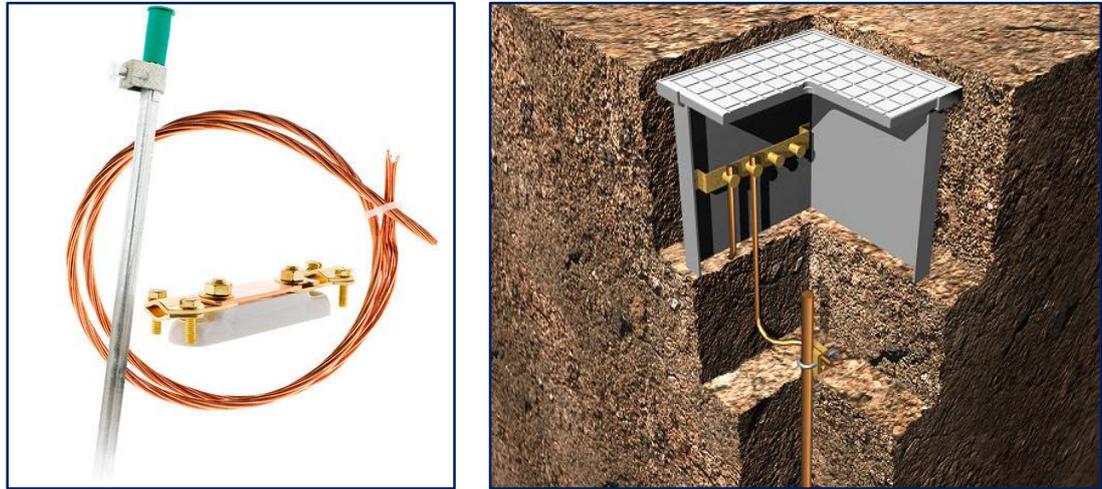


Figure I.19. Installation des piquets verticaux dans le sol.

1.2.5.3. Plaques verticales

Ces plaques peuvent être soit *carrées* soit *rectangulaires* (avec une longueur supérieure à 0,5 mètre). Il est recommandé de les enterrer de manière à ce que leur centre soit situé à au moins 1 mètre de profondeur sous la surface du sol. Les matériaux des plaques [I-21] peuvent être :

- Cuivre avec une épaisseur de 2 mm ;
- Acier galvanisé avec une épaisseur de 3 mm.

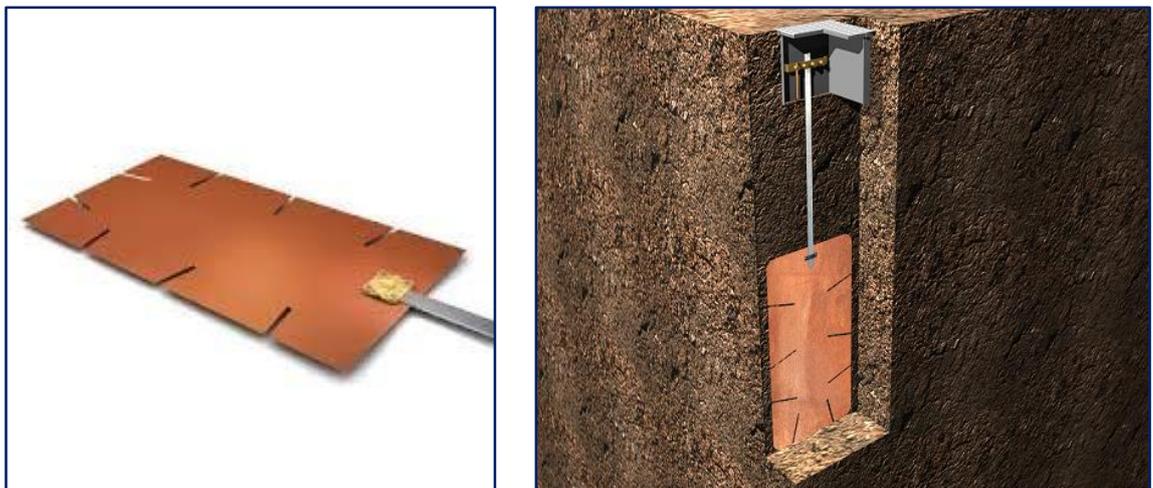


Figure I.20. Installation d'une plaque verticale en cuivre dans le sol.

1.2.5.4. Prise de terre par grille

La grille de terre est réalisée en fil de 3 mm en cuivre ou en acier galvanisé avec un câble de sortie de 29 mm² et de 2m de long. Le câble est constitué à partir des fils de la grille et donc sans raccord ni soudure, afin d'éviter tout risque d'augmentation de la résistance électrique par une éventuelle détérioration de ces liaisons.

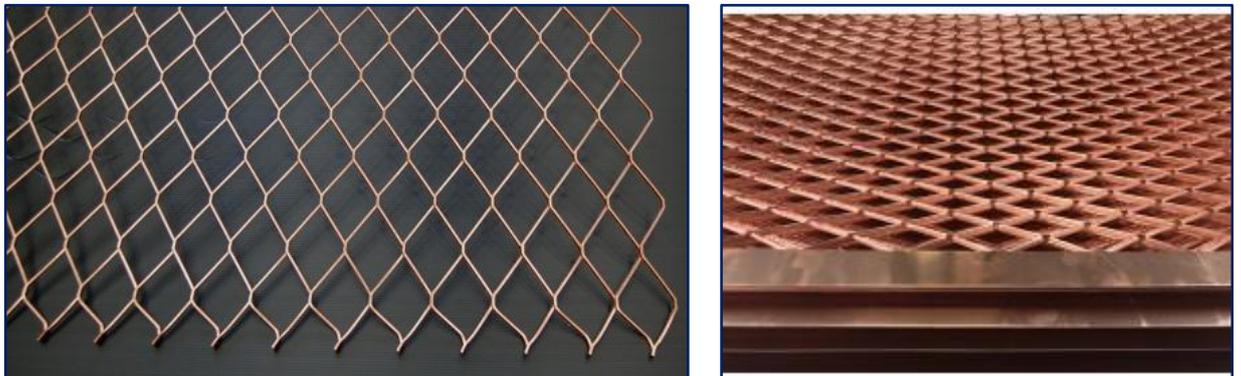


Figure I.21. Grilles de terre en cuivre.

Le principe de la grille permet d'obtenir un grand nombre de contacts avec le sol et ainsi de mieux résister aux variations de température et d'humidité [I-23]. Elle s'installe dans une tranchée horizontale, à une distance de 60 à 80 cm de la surface du sol.

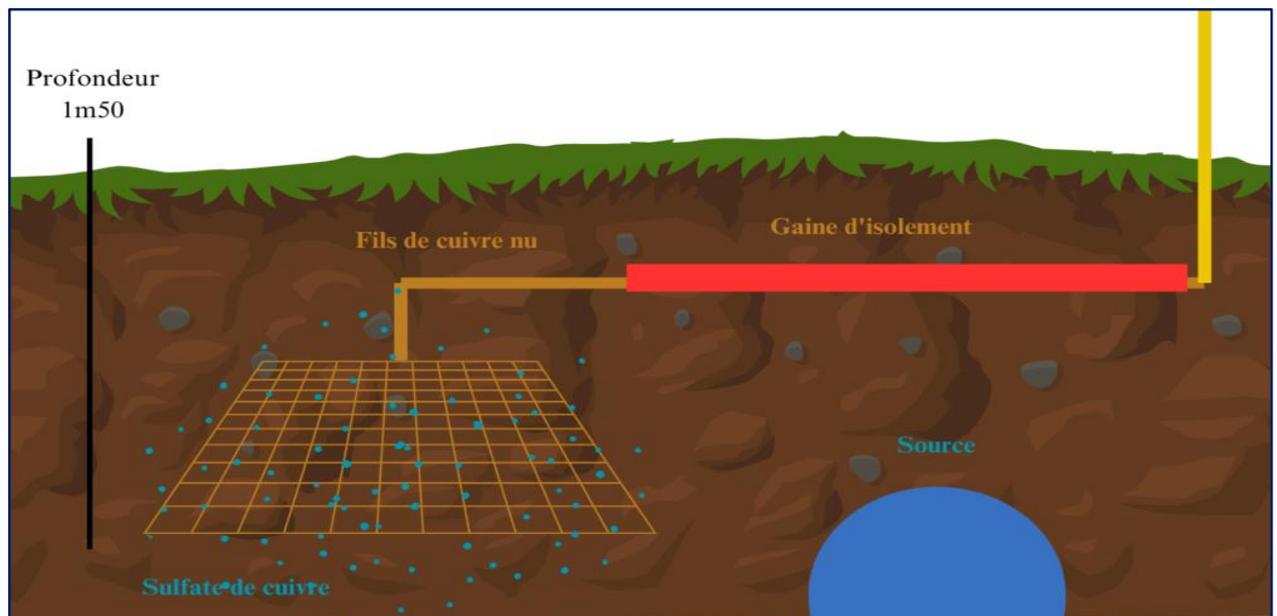


Figure I.22. Installation d'une grille de terre en cuivre dans le sol.

I.3. Caractérisation du sol

I.3.1. Structure du sol

Le sol est un système complexe composé de différentes phases : solide, liquide et gazeuse. La phase solide est généralement constituée de minéraux et de matière organique, formant la structure de base du sol [I-24]. La phase liquide se réfère à la solution aqueuse présente dans les vides entre les particules solides, tandis que la phase gazeuse est l'air qui occupe ces mêmes vides, comme le montre la **figure I.23**.

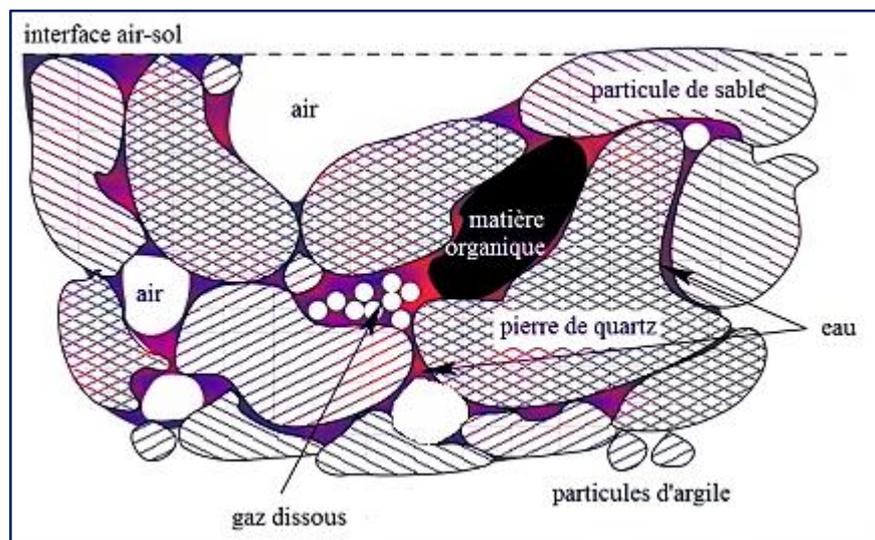


Figure I.23. Représentation de la composition typique du sol à l'échelle microscopique.

I.3.2. Caractéristiques électromagnétiques du sol

La conduction électrique dans le sol dépend de sa capacité à conduire le courant électrique, et cette capacité est influencée par plusieurs paramètres électromagnétiques macroscopiques. Les trois principaux *paramètres électromagnétiques* qui jouent un rôle important dans la **conduction électrique** du sol sont [I-25] :

- ✚ La résistivité électrique ρ_{sol} ;
- ✚ La permittivité électrique ϵ_{sol} ;
- ✚ La perméabilité magnétique μ_{sol} .

I.3.2.1. Résistivité électrique

La résistivité électrique, souvent représentée par le symbole ρ_{sol} , mesure la capacité d'un matériau à résister au passage du courant électrique. Elle est inversement proportionnelle à la conductivité électrique du sol σ_{sol} , qui est la capacité du sol à conduire le courant électrique.

Ainsi, plus la résistivité électrique d'un sol est élevée, moins il est conducteur. L'unité SI de la résistivité électrique est l'ohm-mètre ($\Omega.m$).

<i>Description</i>	<i>Résistivité ρ ($\Omega.m$)</i>
Bon conducteur	$10^{-3} - 10$
Conducteur de qualité moyenne	$10^2 - 10^9$
Conducteur de qualité médiocre	$10^{10} - 10^{17}$

Tableau I.1. Classification générale des résistivités [I-25].

1.3.2.2. La permittivité électrique du sol

La permittivité du sol ϵ_{sol} se réfère à la capacité du sol à permettre le passage des champs électriques. Elle détermine dans quelle mesure le sol peut polariser en réponse à un champ électrique appliqué. Elle joue un rôle important dans la propagation des ondes électromagnétiques à travers le sol. L'unité SI de permittivité électrique est le farad par mètre (F/m).

1.3.2.3. La perméabilité magnétique

La perméabilité du sol μ_{sol} mesure la capacité du sol à permettre le passage des champs magnétiques. Elle détermine la manière dont le sol réagit à un champ magnétique appliqué. Il est courant de supposer que la perméabilité magnétique du sol est égale à la perméabilité magnétique du vide (μ_0) dans la plupart des problèmes de propagation, ce qui implique que la perméabilité relative du sol $\mu_{rsol} = 1$ [I-25].

1.3.3. Facteurs influant sur les caractéristiques électriques du sol

Les valeurs équivalentes des caractéristiques électriques du sol sont déterminées par la nature du sol, sa teneur en humidité, sa température, et sa structure géologique générale et la fréquence.

1.3.3.1. Nature du sol

De nombreuses observations ont révélé que les caractéristiques électriques du sol varient en fonction de sa nature. Cette variation semble être moins attribuable à sa composition chimique qu'à ses propriétés d'absorption et de rétention de l'humidité. Par exemple, la

conductivité de l'argile se situe généralement autour de 10^{-2} S/m, mais elle peut chuter jusqu'à environ 10^{-4} S/m pour l'argile sèche, soit une valeur similaire à celle du granit.

<i>Types de sol</i>	<i>Résistivité ρ_{sol} ($\Omega.m$)</i>	
	<i>Plage</i>	<i>Valeur moyenne</i>
Marne, argile, sol tourbeux, sol organique, sol végétal, humus, sol marécageux	2 à 200	40
Argile sablonneuse, argile poussiéreuse, marne sablonneuse, sol blanc composé d'argile	30 à 260	100
Sable argileux et poussiéreux, sol blanc composé d'argile sablonneuse	50 à 600	200
Sable, gravier, sol blanc composé de sable et de gravier	50 à 3000	400
Sable et gravier sec au-dessous de 3m de profondeur	50 à 50000	1000
Sol pierreux	100 à 8000	2000
Sol rocheux	1000 à 20000	10000

Tableau I.2. La résistivité de divers types de sol [I-25].

Parfois, il est nécessaire d'ajouter des substances additionnelles pour augmenter la conductivité du sol. Parmi ces substances figurent les *chlorures*, les *nitrites*, les *sulfates* de *sodium*, le *potassium*, le *magnésium* ou le *calcium* [I-26].

1.3.3.2. Teneur en humidité

La teneur en humidité du sol est le principal facteur *influençant* sa *permittivité* et sa *conductivité*. Les recherches en laboratoire ont démontré que lorsque la teneur en humidité augmente à partir d'un niveau bas, la permittivité et la conductivité du sol augmentent également, atteignant leur pic pour des niveaux d'humidité proches de ceux généralement observés. À des profondeurs d'un mètre ou plus, l'humidité du sol reste généralement stable en un endroit donné, bien qu'elle puisse temporairement augmenter pendant les chutes de pluie.

Cependant, une fois la pluie terminée, l'écoulement et l'évaporation ramènent rapidement l'humidité à sa valeur normale.

Les variations de la teneur en humidité varient considérablement d'un endroit à un autre en raison des différences dans les formations géologiques, ce qui influe sur la vitesse d'écoulement des eaux [I-25].

1.3.3.3. Température

La température du sol influence également ses propriétés électriques. À des températures plus élevées, les particules de sol deviennent plus actives et la conductivité électrique du sol peut augmenter. Cependant, des températures extrêmes peuvent également modifier la structure du sol, ce qui peut avoir un effet sur sa permittivité électrique et sa résistivité électrique.

1.3.3.4. Variations saisonnières

Ces variations saisonnières dans la teneur en eau et la température de la couche supérieure du sol peuvent donc entraîner des changements significatifs dans les caractéristiques électriques du sol, ce qui peut avoir des implications importantes dans divers domaines tels que l'agriculture, l'ingénierie géotechnique, ... etc.

1.3.3.5. Formation géologique générale

D'une manière générale, les terrains au-dessus desquels s'effectue la propagation ne sont pas homogènes et les caractéristiques électriques équivalentes dépendent donc de plusieurs types de sol différents. C'est pourquoi il est important de connaître exactement la formation géologique d'ensemble de la région qu'on étudie [I-25].

1.3.3.6. Fréquence

La fréquence est un facteur influant sur les caractéristiques électriques équivalentes du sol. À des fréquences différentes, le comportement électrique du sol peut varier significativement.

1.3.4. Hétérogénéité du sol : Stratification

L'hétérogénéité du sol peut se manifester de différentes manières, notamment à travers la **stratification**. Cette stratification peut donner lieu à deux types de sols : les **sols homogènes** et

les *sols non homogènes*.

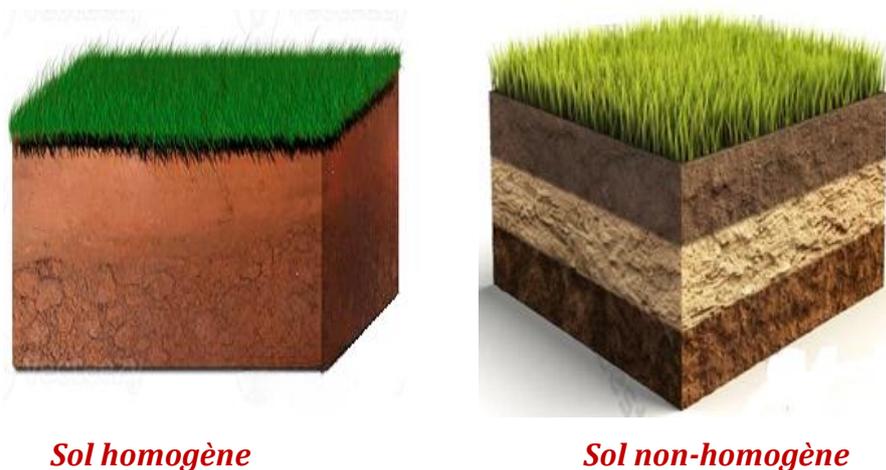


Figure I.24. Types de sols par rapport à la stratification.

1.3.4.1. Sol homogène (monocouche)

Dans le domaine électrique, un sol homogène fait référence à un sol dont les *propriétés électriques* sont **uniformes** et **constantes** à travers toute sa structure. Cela signifie que la *conductivité électrique*, la *résistivité* et d'autres caractéristiques électriques du sol restent constantes sans variations significatives. Un sol homogène est essentiel pour assurer une distribution uniforme du courant électrique et pour garantir des performances électriques stables dans diverses applications [I-27].

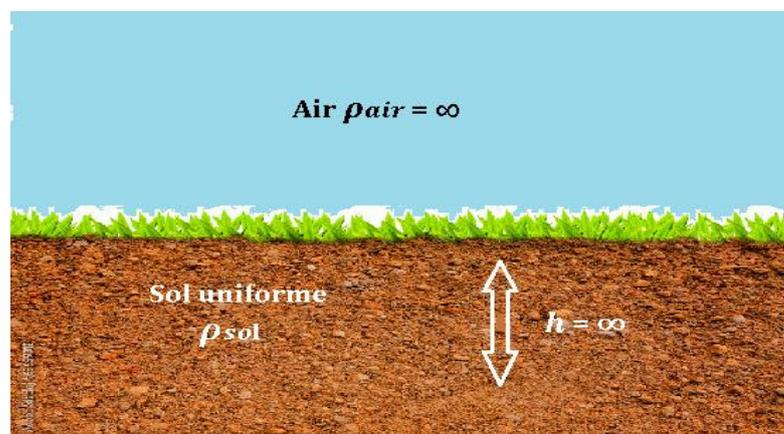


Figure I.25. Modélisation d'un sol monocouche (homogène).

1.3.4.2. Sol hétérogène (multicouche)

Un sol multicouche est composé de plusieurs matériaux différents, chacun ayant des caractéristiques électriques propres. Les composants du sol multicouche peuvent avoir des

perméabilités, des permittivités et des conductivités électriques **différentes**, ce qui peut affecter la propagation des ondes électromagnétiques et la distribution du champ électrique [I-27].

Les paramètres équivalents, tels que la conductivité électrique et la permittivité électrique équivalentes, sont calculés à partir des propriétés des différentes couches du sous-sol [I-28]. Ces valeurs équivalentes représentent le comportement global de la structure non homogène.

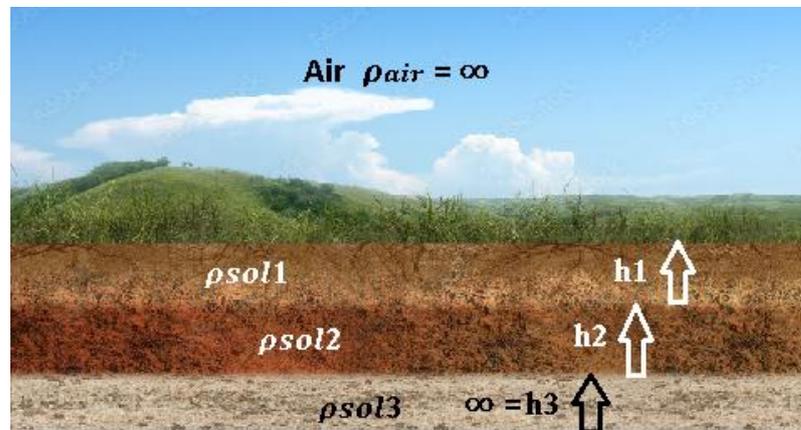


Figure I.26. Modélisation d'un sol multicouche (hétérogène).

I.3.5. La dépendance des paramètres du sol avec la fréquence

Il est important de prendre en compte la dépendance en fréquence de la résistivité et de la permittivité du sol pour évaluer correctement la réaction des systèmes de **mise à la terre** face aux courants de **foudre**. Cette dépendance en fréquence découle d'une multitude de facteurs, incluant les propriétés atomiques du sol et les mécanismes de conduction et de pertes qui opèrent à différentes fréquences. Une analyse approfondie de ces mécanismes et de leur variation en fonction de la fréquence est disponible dans la littérature spécialisée [I-29]. Il est à noter que de nombreuses études ont examiné la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol et ses répercussions sur les systèmes de mise à la terre. Ces études ont toutes mis en évidence une tendance générale à la diminution de la résistivité et de la permittivité par rapport aux valeurs observées à basse fréquence [I-29].

Cependant, il est fréquent que la dépendance en fréquence de la résistivité et de la permittivité du sol soit négligée lors de l'estimation de la fréquence de fonctionnement du réseau et lors de l'évaluation des performances des systèmes de mise à la terre en cas d'événements de foudre. Pourtant, *en négligeant cette dépendance*, on risque de **sous-estimer** ou de **surestimer** la **réponse du système de mise à la terre** face aux courants de foudre, ce qui peut entraîner des conséquences néfastes sur la sécurité des équipements et des personnes.

Par conséquent, une prise en compte précise de la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol est essentielle pour une évaluation précise des performances des systèmes de mise à la terre et pour garantir une protection adéquate contre les effets des courants de foudre. C'est dans ce contexte qu'on vise, dans notre projet de fin d'études, d'introduire cette dépendance afin de voir son effet sur la réponse d'une mise à la terre.

I.3.6. Mesure de la résistivité du sol

La résistivité du sol est un paramètre important qui peut être mesuré à l'aide de diverses méthodes électriques. La méthode de résistivité électrique [I-30] est une technique de géophysique terrestre qui permet de déterminer les variations dans le sol et d'estimer l'épaisseur d'une couche. Elle fonctionne en injectant un courant connu dans le sol à l'aide de deux électrodes pour créer une différence de potentiel mesurée par une autre paire d'électrodes. Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la résistivité du sol, chacune ayant ses propres avantages et limites. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la **méthode de Wenner** et la **méthode de Schlumberger**.

I.3.6.1. Méthode Wenner

C'est la méthode la plus couramment utilisée pour mesurer la résistivité du sol. Cette méthode consiste à utiliser *quatre électrodes* alignées dans une ligne droite.

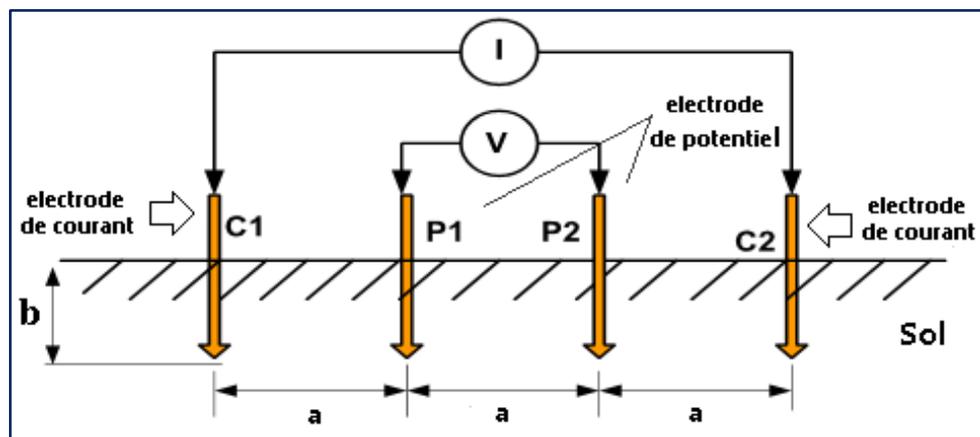


Figure I.27. Schéma de principe de mesure par la méthode de "Wenner".

Un courant électrique est injecté à travers les deux électrodes extérieures, tandis que la différence de potentiel est mesurée entre les deux électrodes intérieures [I-24].

La **résistivité du sol** ρ_{sol} peut ensuite être calculée à partir de ces mesures en utilisant la formule de Wenner [I-30] suivante :

$$\rho_{sol} = 2\pi a R \quad (I.1)$$

Avec :

- **R** : est la résistance mesurée ;
- **a** : est l'espacement entre deux électrodes adjacentes (appelée *base de mesure*).

1.3.6.2. Méthode Schlumberger

Cette méthode est similaire à la méthode Wenner, mais elle implique des distances plus grandes entre les électrodes. Cela permet de mesurer la résistivité sur une plus grande plage de profondeurs.

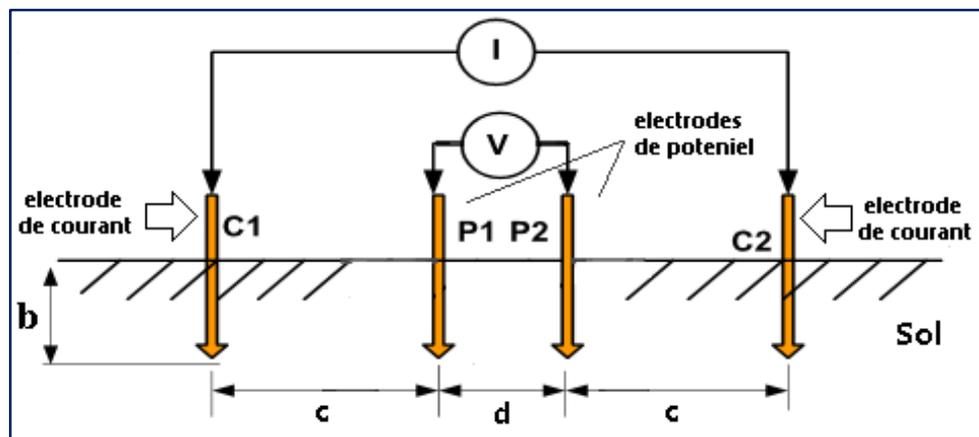


Figure I.28. Schéma de principe de mesure par la méthode de "Schlumberger".

Dans ce cas, la **résistivité du sol** est déterminée par la formule suivante [I-30] :

$$\rho_{sol} = (\pi c \cdot (c + d) \cdot R) / d \quad (I.2)$$

Où :

- **R** : est la résistance mesurée ;
- **c** : est l'espacement entre les électrodes de courant et de potentiel ;
- **d** : est l'espacement entre les deux électrodes de potentiel.

L'avantage majeur de la méthode Schlumberger est sa capacité à réduire le temps nécessaire pour effectuer des mesures de résistivité, surtout lorsqu'il est nécessaire de réaliser plusieurs tests. Contrairement à la méthode de Wenner où toutes les électrodes doivent être

déplacées pour chaque test, dans la méthode Schlumberger, seules les deux électrodes extérieures doivent être déplacées. Cela permet de gagner du temps et de simplifier le processus de mesure, ce qui est particulièrement avantageux lors de campagnes de mesure sur le terrain où l'efficacité est primordiale [I-24].

Conclusion

Le rôle des **systemes de mise à la terre** est d'écouler des courants de foudre et ceux des défauts vers la terre, et de protéger les personnes et les installations électriques. Ils sont étroitement liés aux types de réseaux (BT, MT ou HT) et peuvent donc être sous différentes formes à savoir boucles, plaques, piquets ou tubes et grilles ou réseaux maillés. L'étude du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre est étroitement liée aux phénomènes électromagnétiques transitoires tels que la foudre. En effet, la conception du système de terre doit être précédée par une étude de la **nature du sol** dans lequel il sera installé. Par ailleurs, une bonne connaissance de la structure du sol conduit à choisir la disposition des conducteurs de terre pour une meilleure conception d'un réseau de terre. Lors de l'écoulement du courant de défaut dans le sol à travers le système de terre, une **élévation de potentiel** est être générée sur la surface du sol. Cette élévation permet de déterminer la tension de pas et la tension de contact et joue donc un rôle important dans l'évaluation du degré de **protection contre les surtensions**.

Références Bibliographiques - Chapitre I

- [I-1] **Tatiana GUERRERO OLIVERA**, « *Etude expérimentale du contournement des isolateurs recouverts de glace sous tensions de foudre et de manœuvre* », Mémoire présenté à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Juillet 2004.
- [I-2] **CITEL**, « *Origine des surtensions transitoires* », Dossiers techniques, Article en ligne, sur le site : <https://citel.fr/fr/origine-des-surtensions-transitoires>.
- [I-3] **M. AGUET et J. J. MORF**, « *Traité D'électricité Volume XII* », Energie Electrique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, publié sous la direction de JACQUES NEIRYNCK, 1987.
- [I-4] **Youcef ZEBBOUDJ**, « *Généralités sur la haute tension* », Cours sur la Haut tension, CHAPITRE I, Professeur à l'Université de Bejaia.
- [I-5] **Omar KHERIF et Hossam Eddine MESSAOUDI**, « *Réponse transitoire de systèmes de mise à la terre utilisant l'approche des lignes de transmission* », Projet de Fin d'Études en vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, 2015.
- [I-6] **Manel BIDI**, « *CEM Compatibilité électromagnétique et réseaux d'énergie, perturbations, effets et solutions* », Thèse de Doctorat en Science, Université des frères Mentouri de Constantine, Département d'électrotechnique, Soutenue le 19/01/2017.
- [I-7] **Patrick ABATI**, « *Protection contre la foudre dans les installations BT* », Dossiers techniques, Article en ligne, sur le site : <https://sitelec.org/cours/abati/foudre/foudre.htm>.
- [I-8] **HELITA**, « *Protection contre la foudre* », Article en ligne, sur le site : <https://fr.scribd.com/document/123466306/la-foudre>.
- [I-9] **Christophe SALAMERO**, « *Méthodologie de prédiction du niveau de robustesse d'une structure de protection ESD à l'aide de la simulation TCAD* », Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, Spécialité : Electronique, Soutenue le 8 décembre 2005.
- [I-10] **Jean-Philippe PARMANTIER**, « *Approche topologique pour l'étude des couplages électromagnétiques* », Thèse de doctorat de l'université des sciences et techniques de Lille Flandres Artois, Spécialité : Electronique, Soutenue le 20 décembre 1991.
- [I-11] **Omar KHERIF**, « *Impact des Transitoires de Foudre et de Manœuvres sur le Comportement des Systèmes de Mise à la Terre : Application aux Fermes Eoliennes* », En vue de l'obtention du titre de Docteur Troisième Cycle en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Département d'Électrotechnique, Soutenue le : 02 Juillet 2019.
- [I-12] **Zouhair BEN ZAIED**, « *Analyse du comportement électrique d'une électrode de mise à la terre de forme géométrique complexe* », Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université du Québec, Juin 2019.

- [I-13] **Smail AHMIM et Amir SOUKANE**, « *Modélisation et simulation des électrodes de mise à la terre soumises à des transitoires de foudre en se basant sur les approches des antennes et des lignes de transmission* », Mémoire de diplôme d'Ingénieur d'état en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Soutenu le : 16 juin 2016.
- [I-14] **Mustapha AOUDIA, Ali AZZOUG et Merzouk BELHOCINE**, « *Etude Des Protections Du Poste Source FREHA 60/30kV Contre Les Surtensions Atmosphériques* », Mémoire de diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Option : Réseaux Electriques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [I-15] **Ait Messaoud BOUSSAD**, « *Particularités des surtensions d'amorçage d'arc dans les réseaux de 110KV et 35KV* », Mémoire de Master Académique, Spécialité : Réseaux électriques, Faculté du Génie électrique et d'informatique, Soutenu le : 28/ 09 / 2016.
- [I-16] **T. ROUIBAH**, « *Contribution à la modélisation et à la simulation des prises de terre des Installations électriques* », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Département d'Electrotechnique, Soutenu le : 11/11/2015.
- [I-17] **Boldiny Jiscar MATSINO**, « *Etude du réseau de mise à la terre Des Nouvelles installations de l'usine Essakane SA Burkina Faso* », Mémoire pour l'obtention du Master d'ingénierie, Option : Génie énergétique et Procédés industriels, Juin 2013.
- [I-18] **Darryl Junior ELLA ESSONO**, « *Etude sur l'amélioration des terres dans les postes HTB/HTA 90/20kv de Bellevue et Ambowé* », Mémoire de diplôme d'ingénieur, Spécialité : Réseau électrique, Société d'Energie et d'Eau du Gabon, Soutenu le : 20 janvier 2020.
- [I-19] **Djamel IDIR**, « *Modélisation et simulation d'une décharge atmosphérique sur les grilles de mise à la terre* », Mémoire de Maîtrise en Ingénierie, Université du Québec, Novembre 2017.
- [I-20] **Sahar ZAMOUCHE**, « *Analyse du Comportement Harmonique d'une Electrode de Terre Horizontale* », Mémoire de Master, Option : Réseaux électriques, Département d'Electrotechnique, Université MOHAMED SEDDIK BENYAHIA -JIJEL, Soutenu le : 07/07/2022.
- [I-21] **B. AITMOHAMMED et Dj. MANSOURI**, « *Etude d'une mise à la terre d'une installation électrique* », Mémoire pour l'obtention du diplôme d'un Master professionnel, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Spécialité : Electrotechnique Industriel, 2012.
- [I-22] **MICHAUD EXPORT**, « *Distribution Électrique : Mise à la terre* », Dossiers techniques, Extrait du Catalogue Énergie Basse Tension, sur le site : <https://www.michaud-export.com/group/wp-content/uploads/2019/11/Booklet-MALT-FR-2020-2021.pdf>.
- [I-23] **Pascale RIBET et Anick CASSAGNE**, « *Matériels et techniques de mise à la terre* », DERVIEUX, Dossier technique Edition JANVIER 2004, Article en ligne, sur le site : <https://fr.scribd.com/document/23824642/mise-a-la-terre>.
- [I-24] **J. He, R. ZENG, and B. ZHANG**, « *Methodology and technology for power system grounding* », IEEE Press, John Wiley & Sons, 28 Nov. 2012 - 576 pages.
- [I-25] **UIT**, « *Caractéristiques Électriques du sol* », Recommandation UIT-R P. 527-4, Série P Propagation des ondes radioélectriques, Union Internationale des Télécommunications, Publication électronique Genève, 2018.
- [I-26] **G. VIJAYARAGHAVAN, M. BROWN, and M. BARNES**, « *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection* », NEWNES, An imprint of Elsevier, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 200 Wheeler Road, Burlington, First published 2004.

- [I-27] **Gabriel PAPAIZ GARBINI**, « *Contribution au calcul des élévations de potentiel de sol en contexte ferroviaire.* », THÈSE DE DOCTORAT, GEEPS - Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris, École doctorale : STITS, Université Paris Sud, Soutenue le 25/06/2015.
- [I-28] **RAPPORT 229-6**, « *Caractéristique électrique du sol* », Article en ligne, P. 63-69, sur le site : https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.229-6-1990-PDF-F.pdf.
- [I-29] **M. NAZARI, R. MOINI, S. FORTIN, F. P. DAWALIBI and F. RACHIDI**, « *Impact of Frequency-Dependent Soil Models on Grounding System Performance for Direct and Indirect Lightning Strikes* », IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume: 63, Issue: 1, February 2021, Page(s): 134 – 144, Date of Publication: 28 April 2020.
- [I-30] **Hazlee AZIL ILLIAS, Chuang SHENG SU and Ab Halim ABU BAKAR**, « *Investigation on soil resistivity of two-layer soil structures using finite element analysis method* », Original research paper, IET Science, Measurement & Technology, p. 120–129, First published: 05 January 2021.

CHAPITRE II :

*Concepts Théoriques pour l'Etude de
l'Augmentation du Potentiel de Terre
dans un Sol Hétérogène et Dépendant
de la Fréquence.*

Introduction

Le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre soumis à des surtensions dues à la foudre ou bien aux manœuvres est considérablement influencé par de nombreux facteurs entre autres, *l'hétérogénéité* ou non du sol dans lequel ils sont enfouis ainsi que la prise ou non de la *dépendance fréquentielle* des paramètres électriques de ce sol.

Dans cette intention, nous présenterons dans ce deuxième chapitre, les concepts théoriques nécessaires pour étudier l'effet des facteurs suscités sur l'augmentation du potentiel de terre « *GPR* » lors de la décharge d'un courant de foudre à travers l'une des mise à la terre conçue à la protection des individus et des installations de tels risques. Nous entamerons par un bref rappel sur les méthodes numériques de modélisation des systèmes de mise à la terre. Ensuite, nous ferons un aperçu sur la modélisation des structures filaires par la théorie des lignes de transmission dans le domaine fréquentiel, dans lequel nous présenterons le formalisme topologique « $[A].[X] = [B]$ », basé sur la théorie des lignes de transmission dans le domaine fréquentiel, que nous utiliserons pour modéliser notre problème. Par la suite, nous aborderons les différentes méthodes pour calculer la *résistivité apparente* d'un sol stratifié, que ce soit à deux ou à trois couches. Enfin, nous exposerons plusieurs modèles qui expriment la dépendance fréquentielle des paramètres électriques du sol, qui sera le dernier élément abordé dans ce chapitre.

II.1. Méthodes numériques de modélisation des systèmes de mise à la terre

La modélisation du comportement transitoire complexe des systèmes de mise à la terre (MALT) soumis à un courant de foudre s'est améliorée au cours de ces dernières années. Des méthodologies numériques ont été développées et optimisées pour l'analyse transitoire des systèmes de MALT. Différentes approches sont présentées dans la littérature [II-1] pour modéliser l'impact d'une décharge atmosphérique sur une structure filaire comportant une *partie enterrée*.

Du point de vue théorique, la plupart des modèles numériques développés pour l'analyse transitoire des systèmes de mise à la terre peuvent être classés comme suit [II-1], [II-2] :

- Modèle des circuits équivalents [II-2] : Malheureusement, les *phénomènes de propagation* sont *négligés* (approximation ***quasi statique***, n'est pas rigoureux en *hautes fréquences*) ;
- Modèles électromagnétiques : les plus rigoureux, basés sur les *expressions rigoureuses* de l'électromagnétisme dans le sol (***équations de Maxwell***) avec un *minimum d'approximation*. Dont leurs expressions sont résolues soit par :
 - La méthode des moments (MOM, Method of Moments) [II-3] ;
 - La méthode des éléments finis (FEM) [II-4].
- Modèle hybride [II-5] : une *combinaison* des deux approches celle du champ électromagnétique et celle des circuits équivalents ;
- Modèle des lignes de transmission [II-6], [II-7] et [II-8] : il prend en compte les *phénomènes de propagation* et les *phénomènes non linéaires* dans le sol (l'ionisation par ex.), pour des mises à la terre simples, il est *facilement exploitable* dans les programmes de calcul des transitoires sur les réseaux électriques.

Malheureusement ce dernier modèle est limité en très hautes fréquences et surtout pour les structures non filiformes (complexes), puisque il se base sur des hypothèses simplificatrices [II-6] dans ce sens. Théoriquement, les modèles électromagnétiques, sont les plus exacts et rigoureux, mais leur implantation numérique est *lourde* et coûteuse en *temps de calcul*.

En effet, dans le cadre de notre travail de fin d'études en Master II, et afin d'étudier l'effet des caractéristiques *dépendantes de la fréquence* d'un sol *hétérogène* sur l'augmentation du potentiel de terre « **GPR** » lors du déchargement d'un courant de foudre dans le sol à travers des *mises à la terre*, nous adoptons un modèle basée sur la théorie des lignes de transmission accompli dans le domaine fréquentiel. Nous énonçons ci-dessous les concepts théoriques de notre modèle.

II.2. Modélisation des structures filaires par la théorie des lignes de transmission dans le domaine fréquentiel

La théorie des lignes est fondée sur la reproduction du comportement d'une structure filaire par des équations appelées « *les équations des lignes* ». Où les vecteurs champs électriques et champs magnétiques sont supposés se situer dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Le mode de propagation le long de la ligne est donc *transverse électromagnétique (TEM)*. Les autres modes de propagation ne sont pas pris en compte par le formalisme de la théorie des lignes. Ils peuvent apparaître lorsque la structure étudiée présente des dimensions transversales qui sont grandes face aux hautes fréquences du spectre d'excitation [II-7].

L'analyse des structures filaires par la théorie des lignes dans le *domaine fréquentiel* possède la potentialité de prendre en compte la *dépendance fréquentielle* des paramètres linéiques de ces structures ainsi que celle des paramètres électriques (*résistivité et permittivité*) du sol.

Pour notre étude les courants de foudre déchargés dans le sol, au moyen des mises à la terre, possédants un éventail de fréquences qui ne dépasse pas environ les **10** Mégahertz, donc l'utilisation du modèle des lignes de transmission est justifié puisque il permet la simulation de différentes configurations de mises à la terre avec *exactitude satisfaite*.

II.2.1. Equations des lignes dans le cas d'une ligne bifilaire

Pour le cas d'une ligne bifilaire dont le conducteur de retour est le sol (**Figure II.1**), les *équations des lignes* dans le domaine fréquentiel sont données par [II-8] :

$$\frac{d\underline{U}(x)}{dx} = -\underline{Z} \cdot \underline{I}(x) \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{d\underline{I}(x)}{dx} = -\underline{Y} \cdot \underline{U}(x) \quad (\text{II.2})$$

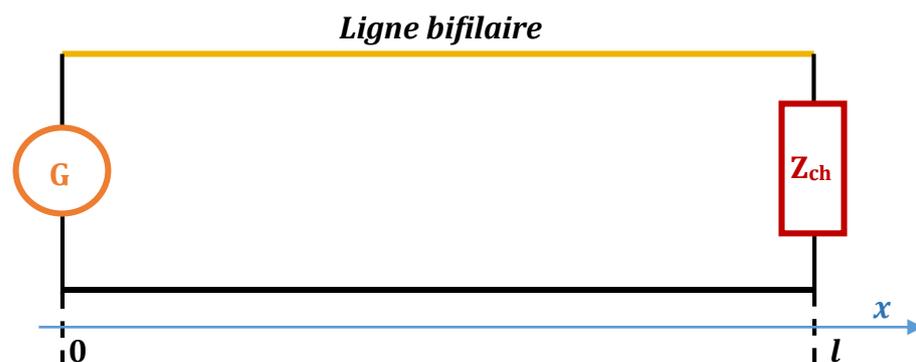


Figure II.1. Schéma d'une ligne bifilaire joignant la source à la charge.

Sachant que \underline{Z} et \underline{Y} sont l'impédance et l'admittance linéiques, respectivement, de la ligne qui s'expriment comme suit :

$$\underline{Z} = R + j\omega.L \quad (\text{II.3})$$

$$\underline{Y} = G + j\omega.C \quad (\text{II.4})$$

R, L, G, C sont respectivement la résistance, l'inductance, la conductance et la capacité linéiques de cette ligne. $\underline{U}(x)$ et $\underline{I}(x)$ représentent les tensions et les courants complexes de phases.

A partir de ces équations des lignes, équations (II.1) et (II.2), nous déduisons les *équations d'ondes* (de propagation) suivantes :

$$\frac{d^2 \underline{U}(x)}{dx^2} = \underline{Z} \cdot \underline{Y} \cdot \underline{U}(x) \quad (\text{II.5})$$

$$\frac{d^2 \underline{I}(x)}{dx^2} = \underline{Y} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I}(x) \quad (\text{II.6})$$

Ces équations d'ondes se formulent en fonction de la *constante de propagation* $\underline{\gamma}$ de la ligne, ainsi :

$$\frac{d^2 \underline{U}(x)}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \cdot \underline{U}(x) \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{d^2 \underline{I}(x)}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \cdot \underline{I}(x) \quad (\text{II.8})$$

Où :

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z} \cdot \underline{Y}} \quad (\text{II.9})$$

II.2.2. Solution des équations d'ondes d'une ligne bifilaire

La solution générale des équations différentielles d'ondes (II.7) et (II.8) est [II-8] :

$$\underline{U}(x) = \underline{U}^+ e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{U}^- e^{+\underline{\gamma}x} \quad (\text{II.10})$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}^+ e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{I}^- e^{+\underline{\gamma}x} = \frac{1}{Z_c} (\underline{U}^+ e^{-\underline{\gamma}x} - \underline{U}^- e^{+\underline{\gamma}x}) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} : \text{Impédance caractéristique de la ligne.}$$

Cette solution s'écrit sous forme matricielle en fonction de la *matrice chaîne* $[\underline{\Phi}]$ comme suit [II-8] :

$$\begin{bmatrix} \underline{U}(x) \\ \underline{I}(x) \end{bmatrix} = [\underline{\Phi}(x - x_0)] \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}(x_0) \\ \underline{I}(x_0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Où la matrice $[\underline{\Phi}(x - x_0)]$ est une *matrice de transition* d'état et x est un point arbitraire fixé le long de la ligne avec $x \geq x_0$. $\underline{U}(x_0)$ et $\underline{I}(x_0)$ la tension et le courant à l'entrée de la ligne.

La matrice $[\underline{\Phi}(x - x_0)]$ s'exprime sous la forme fractionnée pour une ligne bifilaire comme suit :

$$\begin{bmatrix} \underline{U}(x) \\ \underline{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\Phi}_{11}(x - x_0) & \underline{\Phi}_{12}(x - x_0) \\ \underline{\Phi}_{21}(x - x_0) & \underline{\Phi}_{22}(x - x_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}(x_0) \\ \underline{I}(x_0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

En mettant $x_0 = 0$ et $x = l$ (les deux extrémités de la ligne), le système (II.13) se transforme à la relation matricielle suivante (l est la longueur de la ligne) :

$$\begin{bmatrix} \underline{U}(l) \\ \underline{I}(l) \end{bmatrix} = [\underline{\Phi}(l)] \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}(0) \\ \underline{I}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Dont les éléments de la *matrice* $[\underline{\Phi}(l)]$ s'expriment comme suit [II-8] :

$$[\underline{\Phi}(l)] = \begin{bmatrix} \underline{\Phi}_{11}(l) & \underline{\Phi}_{12}(l) \\ \underline{\Phi}_{21}(l) & \underline{\Phi}_{22}(l) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\underline{\gamma}l) & -\underline{Z}_c \cdot \sinh(\underline{\gamma}l) \\ -\frac{1}{\underline{Z}_c} \cdot \sinh(\underline{\gamma}l) & \cosh(\underline{\gamma}l) \end{pmatrix} \quad (\text{II.15})$$

II.2.3. Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine fréquentiel

La matrice $[\underline{\Phi}(l)]$ peut être considérée comme un moyen pour caractériser la ligne à ses points d'extrémités comme un *quadripôle* à deux ports, cela est illustré sur la **Figure II.2**.



Figure II.2. Représentation quadripolaire d'une ligne bifilaire.

II.2.4. Modélisation d'un réseau de structures filaires par le formalisme topologique

$$\ll [A].[X] = [B] \gg$$

Notre analyse de l'effet de la dépendance fréquentielle du sol et son hétérogénéité (stratification) sur les augmentations du potentiel de terre « *GPRs* » en cas d'écoulement de courants de foudre dans le sol, sera accomplie en utilisant le *formalisme topologique* [II-9], $[A].[X] = [B]$. Ce formalisme a la possibilité de déterminer, *en une unique résolution*, les courants et les tensions, localisés dans tous les nœuds d'un réseau simple ou complexe de structures filaires qui peuvent être : soit des lignes aériennes, des câbles souterrains, des prises de terre, ... sinon une combinaison de ces structures.

II.2.4.1. Principe de ce formalisme

La construction du système matriciel à résoudre (système (II.16)), passe par une analyse topologique, où nous satisfaisons toutes les relations électriques courants - tensions présentes à chaque nœud du réseau sous examen (structures aériennes + mises à la terre dans notre cas). Cela permet de prendre en considération les interactions électriques entre les courants et les tensions engendrés aux divers nœuds du réseau électrique.

Ce système est de la forme :

$$[A].[X] = [B] \tag{II.16}$$

La matrice $[A]$ est constituée de deux sous matrices tel que :

$[A] = \begin{bmatrix} [A_1] \\ [A_2] \end{bmatrix}$: la matrice globale de la représentation *topologique* du réseau examiné ;

$[A_1]$: la sous *matrice supérieure*, déduite du recueil des représentations quadripolaires par matrice chaîne $[\underline{\Phi}(l)]$ de chaque structure appartient à ce réseau ;

$[A_2]$: la sous *matrice inférieure*, soustraite des lois de Kirchhoff (*KCL* et *KVL*) appliquées à l'ensemble des jonctions et des nœuds extrémités (*conditions aux limites*) de ce réseau ;

$[X]$: le vecteur *des inconnus* (les courants et tensions dans tous les nœuds) ;

$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix}$: le vecteur source, composé de deux sous vecteurs $[B_1]$ et $[B_2]$, qui contient les sources localisées de courant et/ou de tension qui sont soit propres aux réseaux ou bien des sources due aux excitations EM externes, foudre par exemple [II-9].

II.2.4.2. Construction du système matriciel $[A].[X] = [B]$

Nous expliquons ci-dessous les constituants du système $[A].[X] = [B]$.

1) Construction de la sous matrice des tubes $[A_1]$

Elle tient compte de la propagation sur toutes les structures filaires, et elle est construite à partir de la représentation par *matrice chaîne* donnée en (II.14) et (II.15), appliquée pour chaque structure filaire i . Où la contribution de la $i^{ème}$ structure sera :

$$[A_1] = \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & -\underline{\phi}_{11}(l) & -\underline{\phi}_{12}(l) & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \dots \\ \dots & -\underline{\phi}_{21}(l) & -\underline{\phi}_{22}(l) & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (II.17)$$

2) Construction de la sous matrice des nœuds $[A_2]$

La sous matrice $[A_2]$ est construite en appliquant les lois de Kirchhoff (*KCL* et/ou *KVL*) sur tous les nœuds du réseau considéré. A titre d'exemple, pour un nœud m interconnectant N structures filaires : les courants et les tensions en ce nœud sont liés par la *combinaison* des deux lois de Kirchhoff « *KCL* » et « *KVL* » suivante [II-8] :

$$\sum_{k=1}^N (Y_k^m U_k^m + Z_k^m I_k^m) = [P^m] \quad (II.18)$$

Avec :

k : est le numéro de toute structure filaire entrante ou sortante au nœud m ;

Z_k^m et Y_k^m : sont respectivement les impédances et les admittances résultantes de l'application des lois de Kirchhoff au nœud m et qui peuvent être : des impédances réelles, des admittances réelles, des 0 , des 1 ou des -1 , suivant les connexions des éléments du nœud m ;

$[P^m]$: est le vecteur qui assemble les *générateurs localisés* du courant et/ou de tension propres au nœud m .

3) Construction du sous vecteur $[B_1]$

Le sous vecteur $[B_1]$ est construit en arrangeant le second membre du système (II.14) écrit pour chaque structure i . En absence du couplage EM, le *second membre* est nul, et la contribution de la $i^{ème}$ structure est donc :

$$[\mathbf{B}_1] = \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

4) Construction du sous vecteur $[\mathbf{B}_2]$

Le sous vecteur $[\mathbf{B}_2]$ contient les générateurs localisés (de courant et/ou de tension) de l'ensemble des nœuds du réseau. Pour chaque nœud m , il contient le second membre « $[\mathbf{P}^m]$ » de la combinaison (II.18). Dont sa contribution est alors :

$$[\mathbf{B}_2] = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ [\mathbf{P}^m] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Nous notons que dans notre travail $[\mathbf{B}_2]$ contient que des zéros sauf pour le nœud d'injection du courant de foudre (impact direct).

5) Le vecteur des inconnus $[\mathbf{X}]$

L'ordre des inconnus dans le vecteur $[\mathbf{X}]$ est essentiel, puisque toute mutation dans cet ordre induit une permutation aussi dans la construction des deux sous-matrices $[\mathbf{A}_1]$ et $[\mathbf{A}_2]$. Pour la structure filaire i , à une fréquence f donnée, nous choisissons l'ordre suivant de sa contribution dans le vecteur $[\mathbf{X}]$:

$$[\mathbf{X}] = \left[\dots \quad \underline{U}_i(\mathbf{0}) \quad \underline{I}_i(\mathbf{0}) \quad \underline{U}_i(L) \quad \underline{I}_i(L) \quad \dots \right]^t \quad (\text{II.21})$$

Finalement, après la construction de tous ces sous vecteurs et sous-matrices, nous accomplirons la résolution du système matriciel (II.16) afin de déterminer les courants et les tensions sur l'ensemble des nœuds du réseau étudié.

II.2.5. Paramètres linéiques des électrodes de terre

Afin de calculer les éléments des matrices chaînes $[\underline{\Phi}(l)]$ des électrodes de terre, qui sont fonction de la *constante de propagation* $\underline{\gamma}$ et de l'*impédance caractéristique* \underline{Z}_c , nous passons par le calcul des paramètres linéiques de ces électrodes.

En effet, la représentation d'une électrode enterrée, soit horizontalement ou bien verticalement, a été introduite par **E. D. Sunde** [II-10] dans son livre. Ce dernier propose une approche basée principalement sur la *théorie des images* [II-10] pour calculer les paramètres

linéiques des électrodes de terre. Où, le sol est modélisé par un demi-espace caractérisé par une *résistivité* et une *permittivité relative électriques*, ce qui lui rend un *milieu dissipatif*. Dans lequel une partie de courant évacué circule le long de l'électrode, et l'autre passe radialement vers le sol.

II.2.5.1. Paramètres linéiques d'une électrode enterrée horizontalement

Pour une électrode enfouie horizontalement à une profondeur h , de longueur l , dans un sol de conductivité finie, les *constants reparties* (G , C et L) sont calculées en utilisant les expressions analytiques d'**E. D. Sunde** suivantes [II-10] :

$$G = \frac{\pi}{\rho_{sol} \cdot \left[\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}}\right) - 1 \right]} \quad (\text{II.22})$$

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_{sol}}{\left[\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}}\right) - 1 \right]} \quad (\text{II.23})$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.24})$$

En plus, la résistance linéique interne R_i est donnée par :

$$R_i = \frac{\rho_c}{S} \quad (\text{II.25})$$

Où : ρ_{sol} et ϵ_{sol} sont la *résistivité* et la *permittivité électriques* du sol, r le *rayon* de l'électrode, ρ_c sa *résistivité* et $S = \pi \cdot r^2$ sa *section*.

II.2.5.2. Paramètres linéiques d'un piquet vertical

En utilisant la théorie des images, **E. D. Sunde** a dérivé les expressions des paramètres linéiques d'un piquet vertical de longueur l , qui sont [II-10] :

$$G = \frac{2\pi}{\rho_{sol} \cdot \left[\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 \right]} \quad (\text{II.26})$$

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_{sol}}{\left[\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 \right]} \quad (\text{II.27})$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.28})$$

La résistance linéique interne R_i , garde la même expression qu'une électrode horizontale.

II.3. Détermination de la résistivité apparente pour un sol stratifié

La conception des systèmes de mise à la terre les plus efficaces et les plus économiques exige la connaissance de la valeur précise de la *résistivité du sol* du site où ils vont être enfouis. Plusieurs facteurs peuvent affecter la résistivité apparente des sols multicouches essentiellement :

- Le *nombre de couches* de la structure du sol et leur disposition ;
- L'*épaisseur* de chaque couche ;
- Le *facteur de réflexion* entre chaque couche (sauts de *résistivités* entre couches successives).

La composition du sol peut être de l'argile, du gravier, de la roche, du sable, du schiste, du limon, des pierres, ... etc. Où, dans de nombreux endroits, le sol peut être *assez homogène*, tandis que d'autres endroits peuvent être des *mélanges* de ces types de sols dans des proportions variables. Très souvent, la composition du sol est en couches c'est à dire *stratifié* [II-11].

À cet égard, dans ce passage, nous exposerons *les méthodes* du calcul de la *résistivité apparente* (équivalente) ρ_a pour un sol stratifié composé de *deux couches* et de *trois couches*.

II.3.1. Cas d'un sol composé de deux couches de résistivités différentes

Considérons un sol constitué de deux couches avec des résistivités ρ_{sol1} et ρ_{sol2} . La première couche a une épaisseur finie h_1 , tandis que la deuxième couche s'étend à l'infini en profondeur (voir **Figure II.3**).

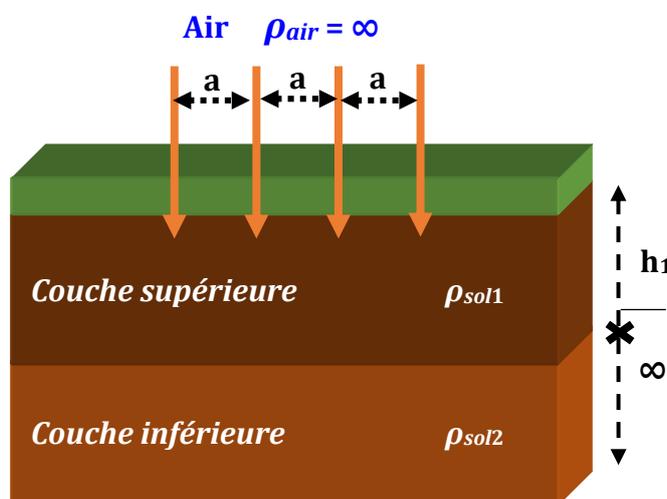


Figure II.3. Modélisation d'un sol stratifié à deux couches.

Un tel sol hétérogène peut être modélisé comme une couche unique homogène de *résistivité équivalente*, appelée la résistivité apparente « ρ_a » qui peut être calculée en utilisant l'une des **5 méthodes** présentées ci-après.

II.3.1.1. Méthode de WENNER

La résistivité apparente ρ_a d'un sol *stratifié bicouche* est donnée par la formule de **Wenner**, d'après [II-11] - [II-12], comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_a = \rho_{sol1} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} \right) \right\} \\ \text{et} \quad k = \frac{\rho_{sol2} - \rho_{sol1}}{\rho_{sol2} + \rho_{sol1}} \end{array} \right. \quad (II.29)$$

Avec :

- ρ_{sol1} : résistivité de la couche supérieure du sol ;
- ρ_{sol2} : résistivité de la couche inférieure du sol ;
- n : la somme totale des mesures (nombre entier variant de 1 à ∞) ;
- h_1 : l'épaisseur de la couche supérieure ;
- a : écartement des électrodes lors de la mesure dans le test de Wenner.

Nous notons que le *coefficient de réflexion* « k » assure le *changement brusque* de la résistivité à l'interface entre les deux couches du sol [II-11].

II.3.1.2. Méthode de J. A. SULLIVAN

La résistivité apparente ρ_a dans cette méthode est calculée à l'aide des expressions suivantes [II-13] - [II-14] :

✚ Si $\rho_{sol1} > \rho_{sol2}$ ($k < 0$) alors :

$$\rho_a = \rho_{sol1} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_{sol1}}{\rho_{sol2}} - 1 \right) \left[1 - e^{\frac{h_0}{k(h_1+2d)}} \right] \right\}^{-1} \quad (II.30)$$

✚ Si $\rho_{sol2} > \rho_{sol1}$ ($k > 0$) alors :

$$\rho_a = \rho_{sol1} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_{sol2}}{\rho_{sol1}} - 1 \right) \left[1 - e^{\frac{-h_0}{k(h_1+2d)}} \right] \right\} \quad (II.31)$$

d c'est la profondeur de l'électrode de terre (grille par exemple), $h_0 = 1$ m, h_1 l'épaisseur de la couche supérieure et k le coefficient de réflexion défini plus haut.

D'après **J. A. Sullivan [II-13]**, les équations (II.30) et (II.31) sont valables pour des épaisseurs h_1 supérieures ou égales à la profondeur d (c.-à-d. si $h_1 \geq d$). À des épaisseurs inférieures, la constante $2d$ dans les indices exponentiels est négligée pour prédire correctement ρ_a .

II.3.1.3. Méthode de C. J. BLATTNER (selon l'IEEE)

Dans le cas d'un piquet vertical enfoui dans un sol stratifié bicouche, la résistivité apparente ρ_a vue par cette électrode peut être déterminée par l'expression de **C. J. Blattner** (membre senior de l'IEEE) [II-15] suivante :

$$\rho_a = \frac{L \cdot \rho_{sol1} \cdot \rho_{sol2}}{\rho_{sol2} \cdot h_1 + \rho_{sol1} \cdot (L - h_1)} \quad (II.32.a)$$

Où L c'est la longueur de l'électrode et h_1 l'épaisseur de la couche supérieure.

Dans le cas de piquets profonds à une profondeur d , la résistivité apparente du sol peut être calculée comme suit [II-15] :

$$\rho_a = \frac{L \cdot \rho_{sol1} \cdot \rho_{sol2}}{\rho_{sol2} \cdot (h_1 - d) + \rho_{sol1} \cdot (L + d - h_1)} \quad (II.32.b)$$

II.3.1.4. Méthode de H. R. SEEDHER et J. K. ARORA

Wenner a proposé dans l'équation (II.29) une expression en série infinie pour calculer la résistivité apparente ρ_a d'un sol bicouche. **Arora et Seedher [II-11]** ont développé une expression finie de cette résistivité comme suit :

✚ Si $\rho_{sol2} > \rho_{sol1}$ ($k > 0$) alors :

$$\rho_a = \rho_{sol1} + 4\rho_{sol1} k \cdot a \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4h_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4h_1^2}} \right) + 4\pi V_b \cdot a \left(\sqrt{\frac{c}{c + (a/h_1)^\beta}} - \sqrt{\frac{c}{c + (2a/h_1)^\beta}} \right) \quad (II.33)$$

Où :

$$V_b = \rho_{sol1} [-k - \ln(1 - k)] / (2\pi \cdot h_1) \quad (II.34)$$

$$c = x_1 (\ln(\rho_{sol2} / \rho_{sol1}))^{x_3} \quad (II.35)$$

$$\beta = 2.0 - x_2 \cdot \ln(\rho_{sol2} / \rho_{sol1}) \quad (II.36)$$

$$\begin{cases} x_1 = 16.41330 \\ x_2 = 0.136074 \\ x_3 = 0.393468 \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

h_1 l'épaisseur de la couche supérieure, a l'écartement des électrodes dans la méthode de *Wenner* et k le coefficient de réflexion (définis déjà ci-dessus).

✚ Si $\rho_{sol1} > \rho_{sol2}$ ($k < 0$) donc [II-11] :

$$\rho_a = \rho_{sol2} + (\rho_{sol1} - \rho_{sol2}) \cdot [2e^{-b(a)} - e^{-b(2a)}] \quad (\text{II.38})$$

Avec :

$$\begin{cases} b = \frac{\left[b_m - (b_m - x_1) \cdot e^{-x_2 \left(\frac{a}{h_1} \right)} \right]}{h_1} \\ b_m = x_3 - x_4 \cdot \left(\frac{\rho_{sol2}}{\rho_{sol1}} \right)^{x_5} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Et :

$$\begin{cases} x_1 = 0.673191 \\ x_2 = 0.479513 \\ x_3 = 1.333350 \\ x_4 = 0.882645 \\ x_5 = 0.697106 \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

II.3.1.5. Méthode d'E. D. SUNDE

La résistivité apparente du sol ρ_a peut être évaluée en utilisant la formule développée par **E. D. Sunde** [II-10] suivante :

$$\rho_a = 2 \cdot (\rho_{sol2} - (\rho_{sol2} - \rho_{sol1}) \cdot e^{-j a}) - (\rho_{sol2} - (\rho_{sol2} - \rho_{sol1}) \cdot e^{-2j a}) \quad (\text{II.41})$$

Où :

$$j = \delta / (2 \cdot h_1) \quad (\text{II.42})$$

$$\delta = \frac{\ln(\rho_{sol1}/\rho_{sol2}) - \ln(0.0176)}{3.5} \quad (\text{II.43})$$

δ c'est un facteur d'échelle [II-10], h_1 et a sont auparavant définis.

II.3.2. Cas d'un sol composé de trois couches de résistivités différentes

Étant donné que les méthodes traitant les systèmes de mise à la terre dans des sols multicouches sont rares et complexes [II-12]. **Osama E. Gouda et al.** [II-16] suggèrent des

modèles pour le calcul de la *résistivité apparente* d'un sol stratifié à trois couches, où n'importe quel nombre de couches peut être raccourci en deux couches, puis il peut être réduit à une couche équivalente.

À ce propos, afin de calculer la résistivité apparente ρ_a d'un sol à trois couches (Figure II.4), nous présentons ci-après *cinq méthodes* qui sont inspirées et publiées par Osama E. Gouda et al. [II-16].

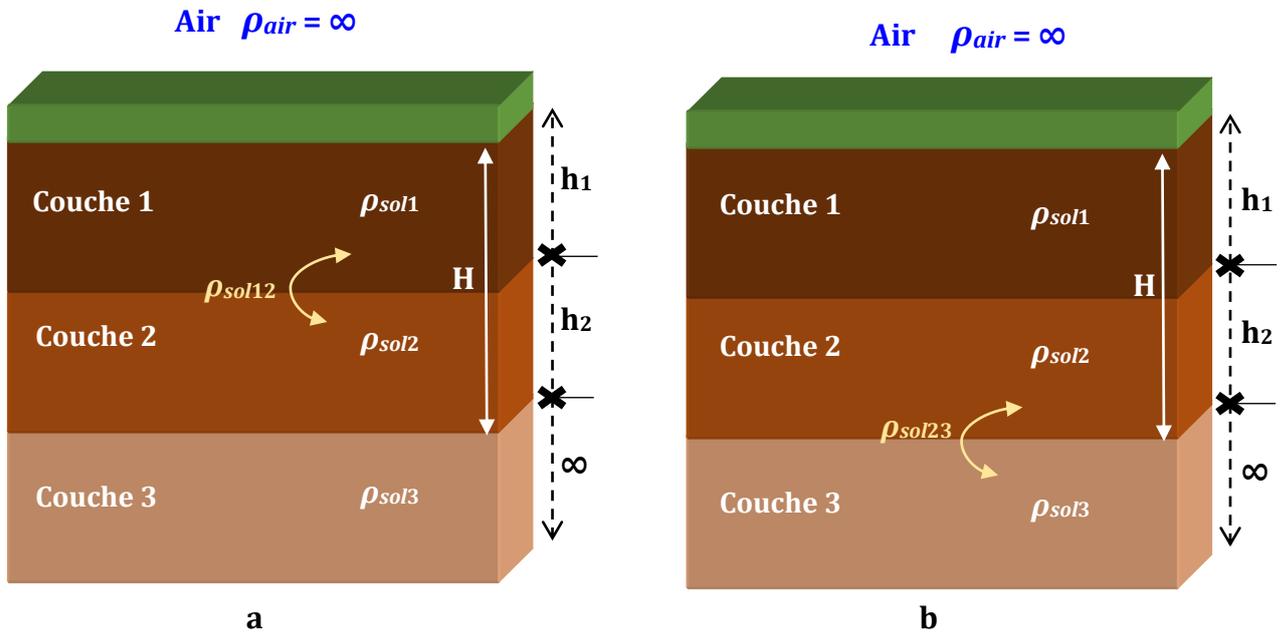


Figure II.4. Modélisation d'un sol stratifié à trois couches.

II.3.2.1. Première méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches

Dans cette méthode, Osama E. Gouda et al. [II-16] proposent, pour calculer la résistivité apparente ρ_a du sol à trois couches, d'évaluer tout d'abord la résistivité apparente initiale du sol entre la *première* couche et la *deuxième* couche représentée par « ρ_{sol12} » comme indiqué sur la Figure II.4.a, en utilisant l'expression d'E. D. Sunde :

$$\rho_{sol12} = 2 \cdot (\rho_{sol2} - (\rho_{sol2} - \rho_{sol1}) \cdot e^{-j \cdot a}) - (\rho_{sol2} - (\rho_{sol2} - \rho_{sol1}) \cdot e^{-2j \cdot a}) \quad (II.44)$$

Avec j est obtenue en utilisant les expressions (II.42) et (II.43).

Ensuite, on considère cette résistivité apparente initiale ρ_{sol12} évaluée entre la 1^{ère} et la 2^{ème} couche du sol comme la résistivité d'une simple couche supérieure, et la troisième couche de résistivité ρ_{sol3} comme une deuxième couche inférieure et on réapplique entre ces deux couches le même raisonnement avec un changement convenable dans les épaisseurs et les

résistivités des couches. Ainsi, la résistivité apparente ρ_a du sol stratifié à trois couches sera comme suit [II-16] :

$$\rho_a = 2 \cdot (\rho_{sol3} - (\rho_{sol3} - \rho_{sol12}) \cdot e^{-q a}) - (\rho_{sol3} - (\rho_{sol3} - \rho_{sol12}) \cdot e^{-2q a}) \quad (II.45)$$

Où :

$$q = \lambda / (2 \cdot H) \quad (II.46)$$

$$\lambda = \frac{\ln(\rho_{sol12}/\rho_{sol3}) - \ln(0.0176)}{3.5} \quad (II.47)$$

$H = (h_1 + h_2)$ est la somme des épaisseurs de la première et la deuxième couche du sol.

II.3.2.2. Deuxième méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches

Cette fois-ci, **Osama E. Gouda et al.** [II-16] proposent d'évaluer tout d'abord la résistivité apparente initiale du sol entre la 2^{ème} couche et la 3^{ème} couche indiquée « ρ_{sol23} » comme il est montré sur la **Figure II.4.b**, en utilisant l'expression d'**E. D. Sunde** comme suit :

$$\rho_{sol23} = 2 \cdot (\rho_{sol3} - (\rho_{sol3} - \rho_{sol2}) \cdot e^{-j a}) - (\rho_{sol3} - (\rho_{sol3} - \rho_{sol2}) \cdot e^{-2j a}) \quad (II.48)$$

Où :

$$j = \delta / (2 \cdot h_2) \quad (II.49)$$

$$\delta = \frac{\ln(\rho_{sol2}/\rho_{sol3}) - \ln(0.0176)}{3.5} \quad (II.50)$$

Après, on considère cette résistivité apparente initiale ρ_{sol23} évaluée entre la 2^{ème} et la 3^{ème} couche du sol comme la résistivité d'une seule couche inférieure, et la 1^{ère} couche de résistivité ρ_{sol1} comme une deuxième couche supérieure et on réapplique une autre fois la même expression avec un changement adéquat dans les épaisseurs et les résistivités des couches bien sûr. En conséquence, la résistivité apparente ρ_a du sol stratifié est alors [II-16] :

$$\rho_a = 2 \cdot (\rho_{sol23} - (\rho_{sol23} - \rho_{sol1}) \cdot e^{-q a}) - (\rho_{sol23} - (\rho_{sol23} - \rho_{sol1}) \cdot e^{-2q a}) \quad (II.51)$$

Où :

$$q = \lambda / (2 \cdot h_1) \quad (II.52)$$

$$\lambda = \frac{\ln(\rho_{sol1}/\rho_{sol23}) - \ln(0.0176)}{3.5} \quad (II.53)$$

II.3.2.3. Troisième méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches

Dans cette 3^{ème} méthode, et selon les modifications apportées par **Seedher et Arora [II-11]** pour obtenir une meilleure estimation de la résistivité apparente d'un sol à deux couches, voir **paragraphe II.3.1.4, Osama E. Gouda et al. [II-16]** suggèrent de calculer la résistivité apparente ρ_a du sol stratifié à trois couches en obtenant d'abord la résistivité apparente entre la 1^{ère} et la 2^{ème} couche, nommée ρ_{sol12} (**Figure II.4.a**) en utilisant les expressions de **Seedher et Arora [II-11]** précédentes, tel que :

✚ Si $\rho_{sol2} > \rho_{sol1}$ ($k_{12} > 0$) alors :

$$\rho_{sol12} = \rho_{sol1} + 4\rho_{sol1} k_{12} \cdot a \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4h_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4h_1^2}} \right) + 4\pi V_b \cdot a \left(\sqrt{\frac{c}{c+(a/h_1)^\beta}} - \sqrt{\frac{c}{c+(2a/h_1)^\beta}} \right) \quad (II.54)$$

Où :

$$k_{12} = (\rho_{sol2} - \rho_{sol1}) / (\rho_{sol2} + \rho_{sol1}) \quad (II.55)$$

$$V_b = \rho_{sol1} [-k_{12} - \ln(1 - k_{12})] / (2\pi \cdot h_1) \quad (II.56)$$

c, β sont donnés par les expressions (II.35), (II.36) et (II.37) plus haut.

✚ Si $\rho_{sol1} > \rho_{sol2}$ ($k_{12} < 0$) donc :

$$\rho_{sol12} = \rho_{sol2} + (\rho_{sol1} - \rho_{sol2}) \cdot [2e^{-b(a)} - e^{-b(2a)}] \quad (II.57)$$

Avec b est obtenue des équations (II.39) et (II.40) ci-dessus.

Ensuite, comme pour la 1^{ère} méthode, on considère cette résistivité apparente ρ_{sol12} comme la résistivité d'une seule couche supérieure, et la troisième couche de résistivité ρ_{sol3} comme une deuxième couche inférieure et on réapplique les mêmes expressions avec le changement approprié dans les coefficients de réflexion, les épaisseurs et les résistivités des couches. Donc, la résistivité apparente ρ_a du sol pour les trois couches sera [II-16] :

✚ Si $\rho_{sol3} > \rho_{sol12}$ ($k_{312} > 0$) alors :

$$\rho_a = \rho_{sol12} + 4\rho_{sol12} k_{312} \cdot a \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4H^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4H^2}} \right) + 4\pi V_b \cdot a \left(\sqrt{\frac{c}{c+(a/H)^\beta}} - \sqrt{\frac{c}{c+(2a/H)^\beta}} \right) \quad (II.58)$$

Avec :

$$k_{312} = \frac{(\rho_{sol3} - \rho_{sol12})}{(\rho_{sol3} + \rho_{sol12})} \quad (II.59)$$

$$V_b = \frac{\rho_{sol12} \cdot (-K_{312} - \ln(1 - K_{312}))}{(2\pi \cdot H)} \quad (II.60)$$

$$c = x_1 \cdot \left[\ln \left(\frac{\rho_{sol3}}{\rho_{sol12}} \right) \right]^{x_3} \quad (II.61)$$

$$\beta = 2.0 - x_2 \cdot \left[\ln \left(\frac{\rho_{sol3}}{\rho_{sol12}} \right) \right] \quad (II.62)$$

$H = (h_1 + h_2)$ et x_1, x_2, x_3 sont donnés par l'équation (II.37).

✚ Si $\rho_{sol12} > \rho_{sol3}$ ($k_{312} < 0$) alors :

$$\rho_a = \rho_{sol3} + (\rho_{sol12} - \rho_{sol3}) \cdot [2e^{-b(a)} - e^{-b(2a)}] \quad (II.63)$$

Où :

$$b = \frac{[b_m - (b_m - x_1) \cdot e^{-x_2 \left(\frac{a}{H} \right)}]}{H} \quad (II.64)$$

$$b_m = x_3 - x_4 \cdot \left(\frac{\rho_{sol3}}{\rho_{sol12}} \right)^{x_5} \quad (II.65)$$

x_1, x_2, x_3, x_4 et x_5 sont donnés par l'équation (II.40).

II.3.2.4. Quatrième méthode d'évaluation de la résistivité apparente d'un sol à 3 couches

La résistivité apparente ρ_a du sol pour les trois couches est évaluée en évaluant d'abord la résistivité apparente initiale entre la 2^{ème} et la 3^{ème} couche, symbolisée ρ_{sol23} (Figure II.4.b) en utilisant les expressions de Seedher et Arora [II-11], tel que [II-16] :

✚ Si $\rho_{sol3} > \rho_{sol2}$ ($k_{23} > 0$) alors :

$$\rho_{sol23} = \rho_{sol2} + 4\rho_{sol2} k_{23} \cdot a \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4h_2^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4h_2^2}} \right) + 4\pi V_b \cdot a \left(\sqrt{\frac{c}{c + (a/h_2)^\beta}} - \sqrt{\frac{c}{c + (2a/h_2)^\beta}} \right) \quad (II.66)$$

Où :

$$k_{23} = (\rho_{sol3} - \rho_{sol2}) / (\rho_{sol3} + \rho_{sol2}) \quad (II.67)$$

$$V_b = \rho_{sol2} [-k_{23} - \ln(1 - k_{23})] / (2\pi \cdot h_2) \quad (II.68)$$

$$c = x_1 \cdot \left[\ln \left(\frac{\rho_{sol3}}{\rho_{sol2}} \right) \right]^{x_3} \quad (II.69)$$

$$\beta = 2.0 - x_2 \cdot \ln(\rho_{sol3} / \rho_{sol2}) \quad (II.70)$$

x_1, x_2, x_3 sont ceux de l'équation (II.37).

✚ Si $\rho_{sol2} > \rho_{sol3}$ ($k_{23} < 0$) donc :

$$\rho_{sol23} = \rho_{sol3} + (\rho_{sol2} - \rho_{sol3}) \cdot [2e^{-b(a)} - e^{-b(2a)}] \quad (II.71)$$

Où :

$$b = \left[b_m - (b_m - x_1) \cdot e^{-x_2 \left(\frac{a}{h_2} \right)} \right] / h_2 \quad (II.72)$$

$$b_m = x_3 - x_4 (\rho_{sol3} / \rho_{sol2})^{x_5} \quad (II.73)$$

x_1, x_2, x_3, x_4 et x_5 sont ceux de l'équation (II.40).

Puis, comme pour la **2^{ième} méthode**, on considère cette résistivité ρ_{sol23} comme la résistivité d'une seule couche inférieure, et la 1^{ière} couche de résistivité ρ_{sol1} comme une deuxième couche supérieure et on réapplique les mêmes expressions avec la modification conforme dans les coefficients de réflexion, les épaisseurs et les résistivités des couches. De ce fait, la résistivité apparente ρ_a du sol pour les *trois couches* sera [II-16] :

✚ Si $\rho_{sol23} > \rho_{sol1}$ ($k_{123} > 0$) alors :

$$\rho_a = \rho_{sol1} + 4 \cdot \rho_{sol1} k_{123} \cdot a \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4h_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4h_1^2}} \right) + 4\pi V_b \cdot a \left(\sqrt{\frac{c}{c + (a/h_1)^\beta}} - \sqrt{\frac{c}{c + (2a/h_1)^\beta}} \right) \quad (II.74)$$

Où :

$$k_{123} = \frac{(\rho_{sol23} - \rho_{sol1})}{(\rho_{sol23} + \rho_{sol1})} \quad (II.75)$$

$$V_b = \frac{\rho_{sol1} \cdot (-k_{123} - \ln(1 - k_{123}))}{(2\pi \cdot h_1)} \quad (II.76)$$

$$c = x_1 \cdot \left[\ln \left(\frac{\rho_{sol23}}{\rho_{sol1}} \right) \right]^{x_3} \quad (II.77)$$

$$\beta = 2 \cdot 0 - x_2 \cdot \left[\ln \left(\frac{\rho_{sol23}}{\rho_{sol1}} \right) \right] \quad (II.78)$$

x_1, x_2, x_3 gardent les mêmes valeurs précédentes.

✚ Si $\rho_{sol1} > \rho_{sol23}$ ($k_{123} < 0$) donc :

$$\rho_a = \rho_{sol23} + (\rho_{sol1} - \rho_{sol23}) \cdot [2e^{-b(a)} - e^{-b(2a)}] \quad (II.79)$$

$$\text{Où : } \mathbf{b} = \frac{\left[b_m - (b_m - x_1) \cdot e^{-x_2 \left(\frac{a}{h_1} \right)} \right]}{h_1} \quad (\text{la même dans l'expression (II.39)})$$

$$\mathbf{b}_m = x_3 - x_4 \cdot \left(\frac{\rho_{sol23}}{\rho_{sol1}} \right)^{x_5} \quad (\text{II.80})$$

x_1, x_2, x_3, x_4 et x_5 gardent les mêmes valeurs antérieures.

II.3.2.5. Cinquième méthode : La résistivité apparente d'un sol à 3 couches selon l'IEEE

Dans le cas d'un piquet vertical enterré dans un sol stratifié à trois couches, d'une manière similaire aux méthodes précédentes, on fait un calcul d'une résistivité apparente initiale par exemple ρ_{sol12} entre la 1^{ère} et la 2^{ème} couche, en utilisant la méthode de C. J. Blattner [II-15] (IEEE) comme suit :

$$\rho_{sol12} = \frac{L \cdot \rho_{sol1} \cdot \rho_{sol2}}{\rho_{sol2} \cdot h_1 + \rho_{sol1} \cdot (L - h_1)} \quad (\text{II.81})$$

Après, en se basant sur le même principe, la résistivité apparente ρ_a du sol pour les trois couches est estimée par l'équation IEEE suivante [II-16] :

$$\rho_a = \frac{L \cdot \rho_{sol12} \cdot \rho_{sol3}}{\rho_{sol3} \cdot H + \rho_{sol12} \cdot (L - H)} \quad (\text{II.82})$$

L c'est la longueur de l'électrode et H est la somme des épaisseurs de la 1^{ère} et la 2^{ème} couche du sol (définies précédemment).

II.4. Modèles de la dépendance des paramètres du sol avec la fréquence

Il a été montré que les paramètres électriques du sol (la conductivité et la permittivité relative σ_{sol} et ϵ_{rsol}) sont *fortement* influencés par la *variation de la fréquence*. Par suite, cette *dépendance* agira sur le comportement des *électrodes de mise à la terre* lors le déchargement d'un courant de défaut (coup de foudre par exemple). La prise en compte de cette variation permet de produire des modèles théoriques capables de simuler avec *ponctualité* le *comportement* des systèmes de *mise à la terre* dans diverses topologies du sol, ce qui est indispensable pour assurer la *sécurité* des *personnes* et des *infrastructures*.

Pour cet usage, plusieurs modèles *semi-théoriques* ont été développés pour décrire la *dépendance fréquentielle* des *paramètres électriques* du sol dans la gamme de fréquences

représentative des courants de foudre. Nous avons choisis d'exposer dans ce paragraphe les **six modèles** les plus discutés dans la littérature.

II.4.1. Modèle de J. H. SCOTT (S)

J. H. Scott a exposé l'une des premières études abordant la dépendance des paramètres du sol avec la fréquence dans [II-17] et [II-18]. Cette recherche a permis d'obtenir des expressions représentant la permittivité relative du sol ϵ_{rsol} et la conductivité σ_{sol} , qui est l'inverse de la résistivité ρ_{sol} , en fonction de la fréquence f . Voici ces expressions [II-19] :

$$\epsilon_{rsol}(f) = 10^D \quad (II.83)$$

$$\sigma_{sol}(f) = 10^K \text{ [mS/m]} \quad (II.84)$$

Avec :

$$D = 5.491 + 0.946 \log_{10}(\sigma_{sol100 \text{ Hz}}) - 1.097 \log_{10}(f) + 0.069 \log_{10}^2(\sigma_{sol100 \text{ Hz}}) - 0.114 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{sol100 \text{ Hz}}) + 0.067 \log_{10}^2(f) \quad (II.85)$$

$$K = 0.028 + 1.098 \log_{10}(\sigma_{sol100 \text{ Hz}}) - 0.068 \log_{10}(f) + 0.036 \log_{10}^2(\sigma_{sol100 \text{ Hz}}) - 0.046 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{sol100 \text{ Hz}}) + 0.018 \log_{10}^2(f) \quad (II.86)$$

Où f représente la fréquence et $\sigma_{sol100 \text{ Hz}}$ représente la conductivité du sol, en [mS/m], mesurée à 100 Hz.

II.4.2. Modèle de K. S. SMITH and C. L. LONGMIRE (SL)

En utilisant les données expérimentales de **J. H. Scott** [II-17], **Longmire** et **Longley** [II-20] ont développé une autre représentation analytique des paramètres électriques du sol. Dans [II-20], des expressions ont été présentées pour la gamme de fréquences de 100 Hz à 1 MHz. Plus tard, **Smith** et **Longmire** [II-21] ont présenté un modèle d'*ajustement de courbe* (*curve-fit*) pour des fréquences allant de 1 à 10^{12} Hz en utilisant les données de mesure de **Wilkenfeld** correspondant à la conductivité et à la permittivité mesurées pour des échantillons de béton et de coulis (ciment), et ils ont dérivé ce qu'ils ont appelé le **modèle universel** de sol [II-21].

Remarque : L'*ajustement de courbes* « **Curve-fit** » est une technique d'analyse d'une *courbe expérimentale*, consistant à construire une courbe à partir de *fonctions mathématiques* et d'ajuster les paramètres de ces fonctions pour se rapprocher de la *courbe mesurée*.

Selon **Smith** et **Longmire** [II-21], la dépendance fréquentielle de la conductivité et de la permittivité relative du sol est la suivante :

$$\sigma_{sol}(f) = \sigma_{sol0} + 2\pi\epsilon_0 \sum_{n=1}^{13} a_n F_n \frac{\left(\frac{f}{F_n}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{F_n}\right)^2} \quad [\text{S/m}] \quad (\text{II.87})$$

$$\epsilon_{rsol}(f) = \epsilon_\infty + \sum_{n=1}^{13} \frac{a_n}{1 + \left(\frac{f}{F_n}\right)^2} \quad (\text{II.88})$$

Avec F_n est définie par l'expression suivante :

$$F_n = F(\sigma_{sol0}) 10^{n-1} \quad (\text{II.89})$$

$$F(\sigma_{sol0}) = (125 \cdot \sigma_{sol0})^{0.8312} \quad (\text{II.90})$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide ($\epsilon_0 \cong 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), ϵ_∞ la limite de la permittivité relative en hautes fréquences et est fixée à **5**, et σ_{sol0} [S/m] représente la conductivité du sol aux basses fréquences qui dans ce cas, est calculée en résolvant l'équation (II.87) pour la valeur spécifiée de $\sigma_{sol100 \text{ Hz}}$ et pour une fréquence de **100 Hz** [II-19]. a_n sont les *coefficients* présentés dans **Tableau II.1** ci-dessous.

n	1	2	3	4	5	6	7
a_n	3.40×10 ⁶	2.74×10 ⁵	2.58×10 ⁴	3.38×10 ³	5.26×10 ²	1.33×10 ²	2.72×10 ¹
n	8	9	10	11	12	13	14
a_n	1.25×10 ¹	4.80	2.17	0.98	0.392	0.173	0

Tableau II.1. Les coefficients " a_n " utilisés dans le modèle de Longmire et Smith.

II.4.3. Modèle de M. MESSIER (M)

Ce modèle, a été développé par **M. Messier** [II-22] et basé également sur les mesures de **J. H. Scott** [II-17]. Les expressions développées sont les suivantes [II-22] :

$$\sigma_{sol}(f) = \sigma_{sol0} \left(1 + \sqrt{\frac{4\pi \cdot f \cdot \epsilon_\infty}{\sigma_{sol0}}} \right) \quad (\text{II.91})$$

$$\epsilon_{rsol} = \frac{\epsilon_\infty}{\epsilon_0} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_{sol0}}{\pi f \epsilon_\infty}} \right) \quad (\text{II.92})$$

Ici, contrairement au modèle de **Smith-Longmire**, ϵ_∞ représente la permittivité en hautes fréquences et a été définie comme étant égale à **8**. ϵ_0 . De plus, la valeur de σ_{sol0} , qui est

supposée égale à $\sigma_{sol100\text{ Hz}}$, est également différente du modèle de **Smith-Longmire**. Ce modèle est valable dans la plage fréquentielle allant de **100 Hz** à **1 MHz**.

II.4.4. Modèle de F. S. VISACRO and C. M. PORTELA (VP)

Visacro et **Portela** [II-23] ont proposé des expressions empiriques (en utilisant leurs propres mesures) représentant la variation de la conductivité et de la permittivité relative du sol en fonction de la fréquence. Les expressions suivantes ont été obtenues [II-23] :

$$\sigma_{sol}(f) = \sigma_{sol0} \left(\frac{f}{100}\right)^{0.072} \quad (\text{II.93})$$

$$\epsilon_{rsol}(f) = 2.34 \times 10^6 \left(\frac{1}{\sigma_{sol0}}\right)^{-0.535} \cdot f^{-0.597} \quad (\text{II.94})$$

σ_{sol0} est supposée égale à $\sigma_{sol100\text{ Hz}}$.

Ces expressions sont basées sur des mesures en laboratoire effectuées sur différents échantillons du sol dans une plage fréquentielle de **40 Hz** à **2 MHz**.

II.4.5. Modèle de C. M. PORTELA (P)

C. M. Portela a présenté l'un des modèles les plus utilisés dans [II-24], en se basant sur ses propres mesures à l'aide d'échantillons prélevés sur un nombre considérable de sols obtenus dans la gamme de fréquences de **100 Hz** à **2 MHz**, il a proposé un modèle pour les *paramètres électriques* de cinq types de sols différents.

Tous les types de sols suivent la même loi suivante :

$$\sigma_{sol}(f) \pm j\omega \cdot \epsilon_{rsol}(f) = \sigma_{sol0} + \Delta i \left[\cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) \pm j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \times 10^6}\right)^\alpha \quad (\text{II.95})$$

Où :

ω représente la *vitesse angulaire* ($\omega = 2\pi \cdot f$ rad/s) et σ_{sol0} est supposée égale à $\sigma_{sol100\text{ Hz}}$. En ce qui concerne les *paramètres statistiques* Δi et α , ce travail utilisera leurs valeurs médianes, qui sont : $\Delta i = 11.71 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ et $\alpha = 0,706$, comme indiqué dans la référence [II-25].

II.4.6. Modèle de S. VISACRO and R. ALIPIO (VA)

Récemment, **Visacro** et **Alipio** ont réalisé un grand nombre de mesures sur le terrain, comprenant des expériences dans plus de **30** lieux différents pour déterminer la *dépendance fréquentielle* des paramètres électriques des sols dans leurs conditions naturelles [II-26]. Sur la base des données obtenues, ils ont proposé les expressions de la dépendance fréquentielle de la conductivité et de la permittivité relative du sol suivantes :

$$\sigma_{sol}(f) = \sigma_{sol100Hz} \times \left\{ 1 + \left[1,2 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{\sigma_{sol100Hz}} \right)^{0.73} \right] (f - 100)^{0.65} \right\} \quad (\text{II.96})$$

$$\varepsilon_{rsol}(f) = 7,6 \cdot 10^3 \cdot f^{-0.4} + 1,3 \quad \text{pour } f \geq 10\text{kHz} \quad (\text{II.97})$$

Selon **Visacro** et **Alipio** [II-26], une approche conservatrice a été suivie pour développer les expressions (II.96) et (II.97) afin d'éviter une *surestimation* de la réponse des systèmes de mise à la terre, résultante de la dépendance fréquentielle des paramètres du sol. Notez que (II.97) est valide pour des fréquences allant de **10 kHz** à **4 MHz**, tandis que (II.96) est valable pour des fréquences allant de **100 Hz** à **4 MHz**.

Pour exprimer la *permittivité relative* en dessous de **10 kHz**, **Visacro** et **Alipio** ont suggéré d'utiliser la valeur donnée par l'expression (II.97) à **10 kHz**, à savoir **192,2** (comme indiqué dans la référence [II-26]).

Conclusion

À la fin de ce deuxième chapitre, nous affirmons que le caractère filaire des structures aériennes et des électrodes de terres soit verticale, horizontale ou en réseau (patte d'oie, grille, ...), nous a autorisé d'utiliser un modèle de type « théorie des lignes de transmission ». Ce choix est justifié aussi dans notre étude, car le contenu spectral des courants de foudre n'excède pas généralement les 10 MHz (la limite de la théorie des lignes en hautes fréquences). Malgré ses limitations, la théorie des lignes possède l'avantage d'être plus simple du point de vue adaptation numérique comparativement aux modèles électromagnétiques les plus fiables ainsi d'avoir un temps de calcul de loin plus court.

À propos des effets de la *stratification* du sol et la *dépendance fréquentielle* de ses paramètres électriques, dont les méthodes et les modèles ont été présentés dans ce chapitre, nous les analysons auprès des résultats que nous obtiendrons dans le troisième chapitre qui se suit.

Références Bibliographiques - Chapitre II

- [II-1] **T. ROUIBAH**, « *Contribution à la modélisation et à la simulation des prises de terre des Installations électriques* », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Département d'Electrotechnique, Soutenu le : 11/11/2015.
- [II-2] **Sahar ZAMOUCHE**, « *Analyse du Comportement Harmonique d'une Electrode de Terre Horizontale* », Mémoire de Master, Option : Réseaux électriques, Département d'Electrotechnique, Université MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL, Soutenu le : 07/07/2022.
- [II-3] **L. GRCEV, F. DAWALIBI**, « *An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems* », IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, pp. 1773-1781, Nov. 1990.
- [II-4] **B. NEKHOUL, C. GUERIN, P. LABIE, G. MEUNIER, R. FEUILLET, X. BRUNOTTE**, « *A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems* », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 31, pp. 2150-2153, Mai 1995.
- [II-5] **S. VISACRO and A. SOARES**, « *HEM: A Model for Simulation of Lightning Related Engineering Problems* », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, N° 2, pp. 1206-1208, 2005.
- [II-6] **M. AMELLAL**, « *Modélisation l'immunité électromagnétique des composants en vue de la gestion de l'obsolescence des systèmes et modules électroniques* », Thèse de doctorat, INSA de Rennes, décembre 2015.
- [II-7] **Hassein BENKHARROUBI**, « *Etude des transitoires dans les systèmes de mise à la terre* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister, Ingénieur en Électrotechnique de l'Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2011.
- [II-8] **C. R. PAUL**, « *Analysis of Multiconductor Transmission Lines* », New York: Wiley, 1994.
- [II-9] **S. KAUCHE**, « *Analyse de Défauts dans un Réseau de Lignes ou de câbles* », Thèse de Doctorat, Université de Jijel, Juin 2007.
- [II-10] **E. D. SUNDE**, « *Earth Conduction Effects in Transmission Systems* », New York, N.Y Dover publications, Inc. 1968.
- [II-11] **H. R. SEEDHER and J. K. ARORA**, « *Estimation of two-layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions* », IEEE Trans. Power Deliv., PWDR 7, (3), pp. 1213-1217, 1992.
- [II-12] **A. PUTTARACH, N. CHAKPITAK, T. KASIRAWAT, and C. PONGSRIWAT**, « *Substation Grounding Grid Analysis with the Variation of Soil layer depth Method* », Power Tech 2007, 978-1-4244-2190-9/07/\$25.00 ©2007 IEEE, p. 1881-1886, 2007.
- [II-13] **J. A. SULLIVAN**, « *Alternative earthing calculations for grids and rods* », IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol. 145, No. 3, May 1998.

- [II-14] **Jovan NAHMAN and Ivica PAUNOVIC**, « *Resistance to earth of earthing grids buried in multi-layer soil* », Article in *Electrical Engineering*, p. 281–287, April 2006.
- [II-15] **C. J. BLATTNER**, « *Study of driven ground rods and four-point soil resistivity tests* », *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 8 August 1982.
- [II-16] **Osama E. GOUDA, Tamer EL-SAIED, Waleed A. A. SALEM and Asmaa M. A. KHATER**, « *Evaluations of the apparent soil resistivity and the reflection factor effects on the grounding grid performance in three-layer soils* », Research Article, *IET Science, Measurement & Technology*, Vol. 13 Iss. 4, pp. 572-581, 2019.
- [II-17] **J. H. SCOTT, R. D. CARROLL, and D. R. CUNNINGHAM**, « *Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements* », *Sensor and Simulation Note 116*, Kirtland AFB, NM, Aug. 1964.
- [II-18] **J. H. SCOTT**, « *Electrical and magnetic properties of rock and soil* », Theoretical Notes, Note 18, May 1966, U.S. Geological Survey [Online]. Available: <https://www.ece.unm.edu/summa/notes/Theoretical.html>.
- [II-19] **Pedro António Aparício VILELA DIAS**, « *Soil Parameters Dependency with Frequency – Its Influence in the Grounding Electrodes' Behaviour* », University of Lisbon, Instituto Superior Técnico, June 2018.
- [II-20] **C. L. LONGMIRE and H. J. LONGLEY**, « *Time domain treatment of media with frequency dependent parameters* », Theoretical Notes 113, Defense Nuclear Agency, Santa Barbara, CA, USA, 1973.
- [II-21] **K. S. SMITH and C. L. LONGMIRE**, « *A universal impedance for soils* », Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, USA, Topical Report for Period Jul. 1 1975–Sep. 30 1975, 1975.
- [II-22] **M. MESSIER**, « *Another soil conductivity model* », Internal report, Jaycor, Santa Barbara, CA, 1985.
- [II-23] **F. S. VISACRO and C. M. PORTELA**, « *Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems* », Presented at the Symp. High Voltage Eng., Braunschweig, Germany, 1987.
- [II-24] **C. M. PORTELA**, « *Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior* », in *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, 1999, vol. 2, pp. 1004–1009.
- [II-25] **C. M. PORTELA and M. C. TAVARES**, « *Modeling, simulation and optimization of transmission lines. Applicability and limitations of some used procedures.* », *IEEE T&D Latin America 2002*, Brazil, 38p, 2002.
- [II-26] **S. VISACRO and R. ALIPIO**, « *Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes* », *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.

CHAPITRE III :

Applications et Discussion des Résultats.

Introduction

Nous consacrerons ce dernier chapitre aux applications et les discussions des résultats obtenus par notre modélisation basée sur la théorie des lignes de transmission.

Après une comparaison des modèles du sol dépendant de la fréquence et leur application pour l'analyse d'une simple électrode horizontale, nous nous intéressons aux méthodes du calcul de la *résistivité apparente* « ρ_a » d'un sol stratifié, où nous effectuons des comparaisons entre ces méthodes pour des sols stratifiés *bicouches* ou bien à *trois couches*. Nous faisons, ensuite, un calcul des augmentations du potentiel de terre « les **GPRs** » et de l'*impédance harmonique du sol* $Z(\omega)$ pour des électrodes enterrées (piquet vertical et électrode croisée) dans un sol stratifié à paramètres dépendants de la fréquence.

Enfin, et pour faire un examen plus complet, nous terminerons ces applications par une étude des *GPRs* lors de l'impact d'un courant de foudre sur une *Tour* équipée de sa grille de mise à la terre pour des sols stratifiés et dépendants de la fréquence.

III.1. Une comparaison des modèles du sol dépendant de la fréquence : Application à l'analyse des mises à la terre

III.1.1. Comparaison des modèles avec des résultats de mesure

Comme première application de ce mémoire de fin d'études, nous proposons une analyse comparative entre les différents modèles du sol représentant la *dépendance fréquentielle* de ses paramètres électriques ρ_{sol} et ϵ_{rsol} (la *conductivité* et la *permittivité relative*). Ces modèles sont exprimés en termes d'expressions pour la conductivité et la permittivité relative du sol, basées sur des données expérimentales.

Notons que **six modèles** (six sortes d'expressions) disponibles dans la littérature [III-1] sont discutés et comparés en faisant référence à deux ensembles de *données expérimentales* dans [III-2] et [III-3]. Les expressions des modèles considérés sont déjà exposées dans le *chapitre II* de ce mémoire et qui sont :

- Les expressions de *Scott (S)* [III-4] et [III-5] ;
- Les expressions de *Smith et Longmire (SL)* [III-6] ;
- Les expressions de *Messier (M)* [III-7] ;
- Les expressions de *Visacro et Portela (VP)* [III-8] ;
- Les expressions de *Portela (P)* [III-9] ;
- Les expressions de *Visacro et Alipio (VA)* [III-10] ;

Donc, nous présentons sur les **Figures III.1 à III.6** des comparaisons entre les six modèles suscités pour trois valeurs de la *résistivité du sol* ρ_{solBF} basse fréquence (100 Hz) : **343- Ω .m**, **1806- Ω .m** et **4740- Ω .m**, respectivement. Ces valeurs adoptées correspondent aux *données expérimentales* de **Bigelow et Eberle [III-2]** et autres de **J. He et al. [III-3]**, qui sont également exposées dans la référence de **Damir CAVKA et al. [III-1]**.

Remarques :

- Les références de Bigelow et Eberle [III-2] et J. He et al. [III-3] portent respectivement les numéros [7] et [16] dans la référence de Damir CAVKA et al. [III-1] ;
- L'indication «* » dans les **Figures III.2, III.4 et III.6**, indiquent les résultats de mesure de Bigelow et Eberle [III-2] et J. He et al. [III-3] publiés par Damir CAVKA et al. [III-1].

Tout d'abord, nous constatons un bon accord, en *allure* et en *amplitude*, entre nos résultats de calcul et ceux publiés par Damir CAVKA et al. [III-1] qui sont déjà confrontés aux résultats de mesure de Bigelow et Eberle [III-2] et J. He et al. [III-3].

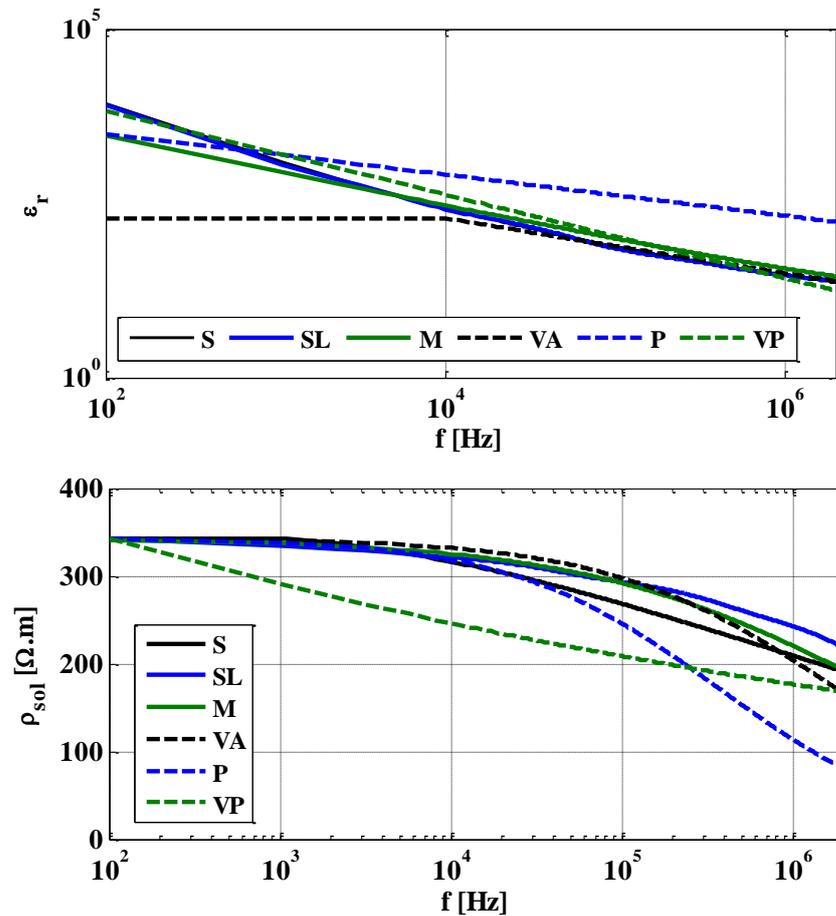


Figure III.1. Variations fréquentielle de ϵ_{rsol} et ρ_{sol} pour $\rho_{solBF} = 343 \Omega.m$.
- Nos résultats de calcul -.

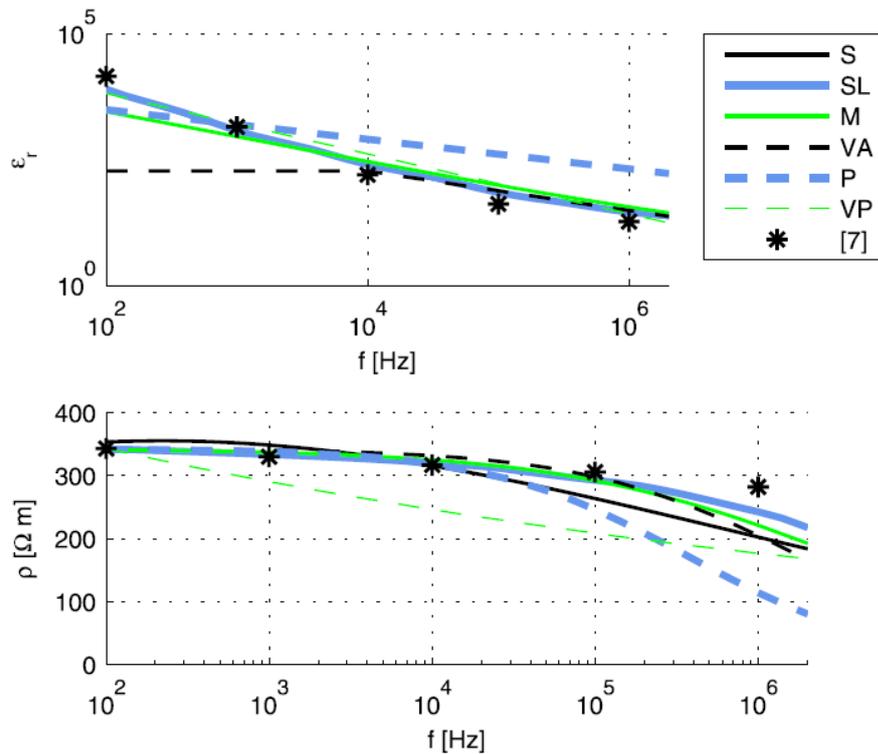


Figure III.2. Variations fréquentielle de ϵ_{rsol} et ρ_{sol} pour $\rho_{solBF} = 343 \Omega.m$.
- Résultats publiés en [III-1] -.

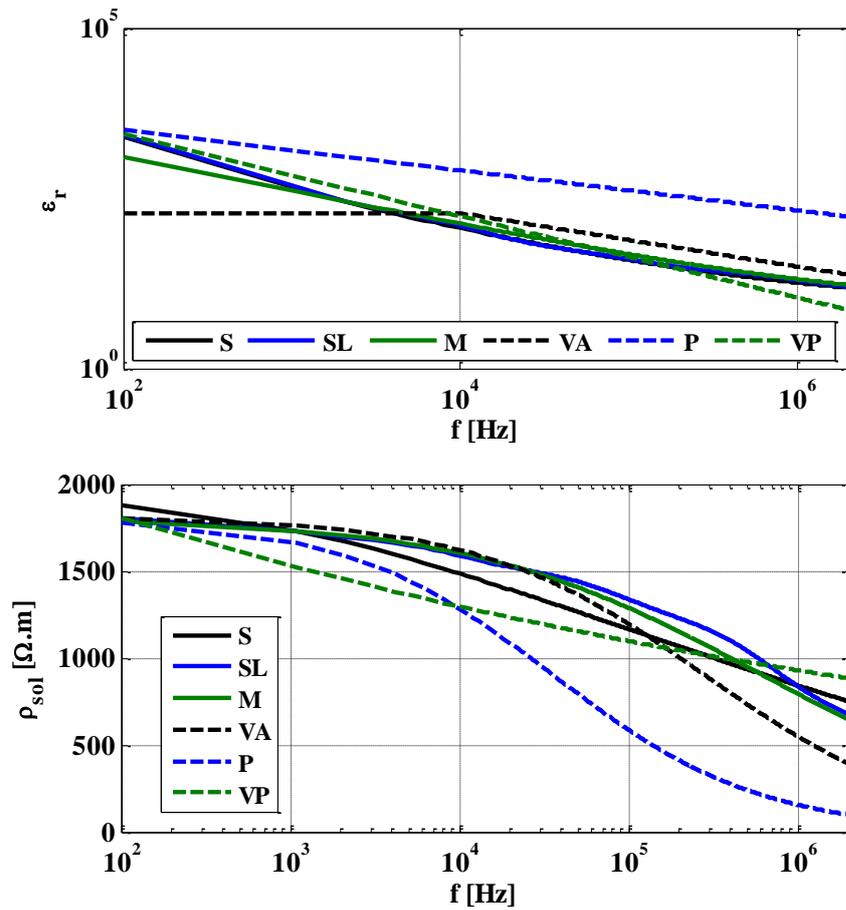


Figure III.3. Variations fréquentielle de ϵ_{rsol} et ρ_{sol} pour $\rho_{solBF} = 1806 \Omega.m$.
- Nos résultats de calcul.

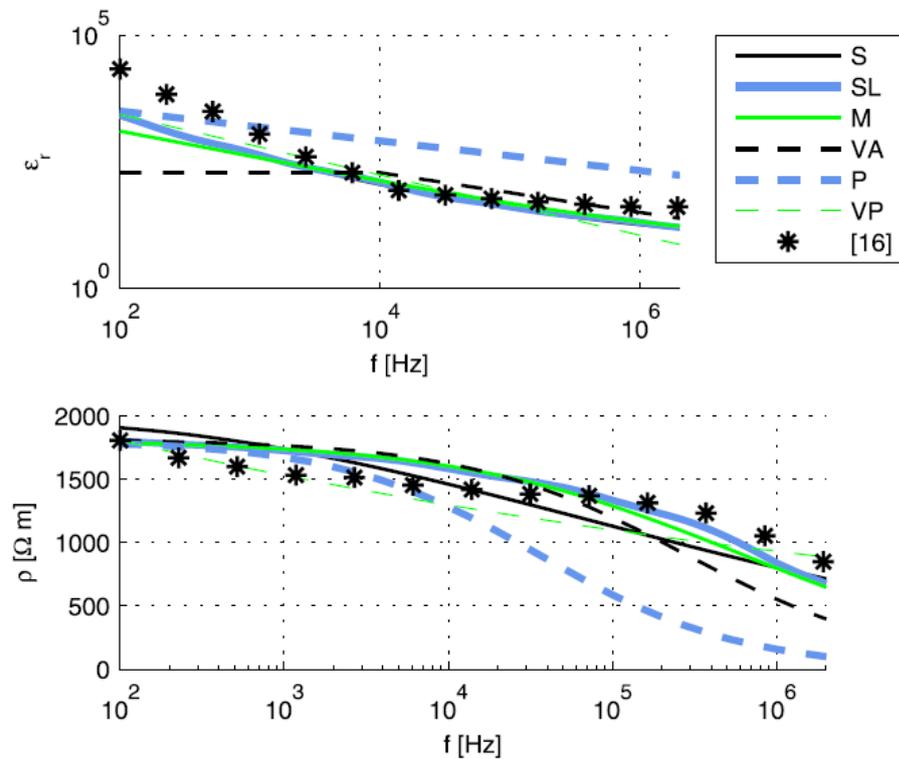


Figure III.4. Variations fréquentielle de ϵ_{rsol} et ρ_{sol} pour $\rho_{solBF} = 1806 \Omega.m$.
- Résultats publiés en [III-1]-

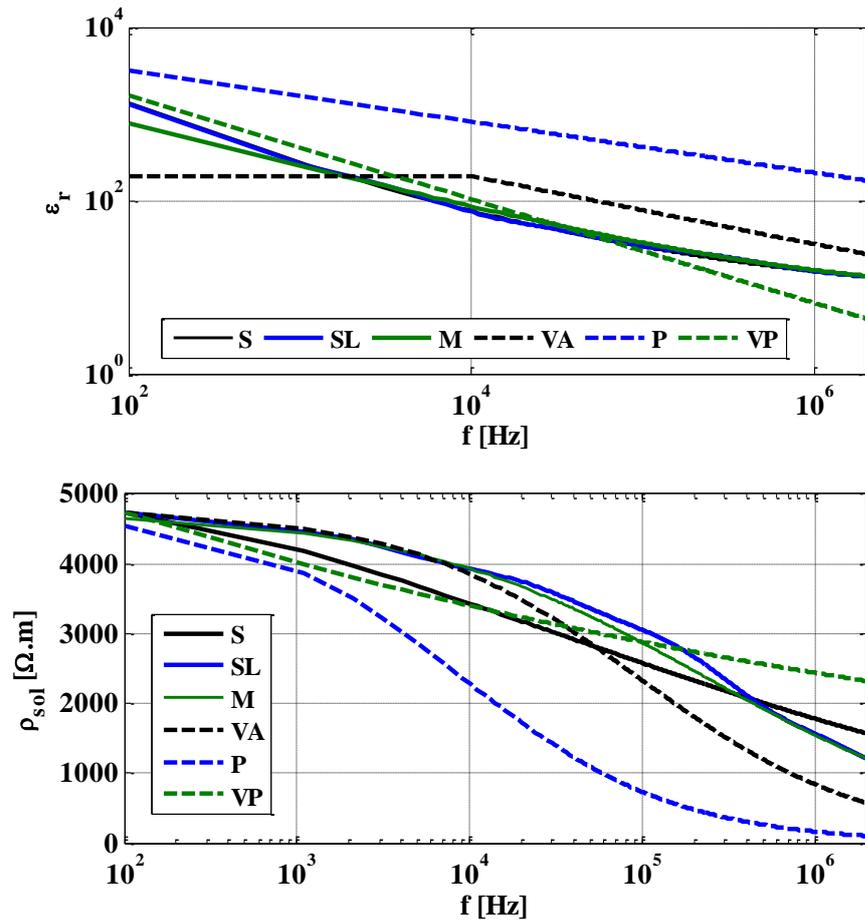


Figure III.5. Variations fréquentielle de ϵ_{rsol} et ρ_{sol} pour $\rho_{solBF} = 4740 \Omega.m$.
- Nos résultats de calcul -.

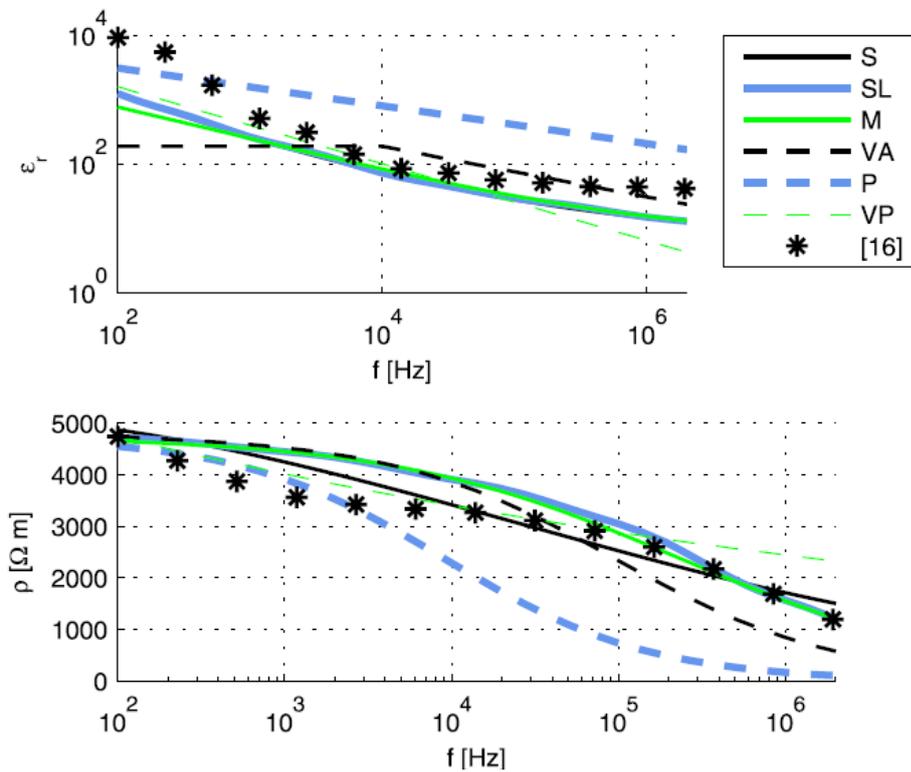


Figure III.6. Variations fréquentielle de ϵ_{rsol} et ρ_{sol} pour $\rho_{solBF} = 4740 \Omega.m$.
- Résultats publiés en [III-1] -.

D'après les résultats de calcul et ceux publiés exposés plus haut, nous apercevons globalement que :

- ✚ Les modèles de **Scott** (S), **Smith-Longmire** (SL), **Messier** (M) et **Visacro-Alipio** (VA) donnent des résultats globalement similaires, qui sont en accord raisonnable avec les données expérimentales (*indépendantes*) de **Bigelow-Eberle** et **J. He et al** ;
- ✚ Les différences entre les modèles s'avèrent **plus significatives** en *hautes fréquences* et pour les sols à *faible résistivité* ;
- ✚ En général, les prédictions des modèles de **Portela** et **Visacro-Portela** diffèrent considérablement de celles des autres modèles considérés (suscités).
- ✚ Pour l'ensemble des résultats, l'*augmentation de la fréquence* provoque des **diminutions importantes** sur les valeurs de la *résistivité* ρ_{sol} et la *permittivité relative* ϵ_{rsol} du sol.

III.1.2. Application pour l'analyse d'une simple électrode horizontale

Dans ce passage nous examinons les modèles comparés plus haut sur une simple électrode de mise à la terre horizontale. Nous reprenons le même examen effectué et publié par **Damir CAVKA et al. [III-1]**. Où différentes valeurs de résistivité du sol basse fréquence ont été prises en compte dans cette analyse : $\rho_{solBF} = 100 - 1000 - 10000 \Omega \cdot m$.

L'électrode est de longueur $L = 10 m$, de rayon $r = 5 mm$, et enterrée à une profondeur $d = 1 m$. Elle est excitée à son entrée par deux formes d'onde typiques du courant de décharge de **foudre**, associées au premier coup et au coup subséquent (**Figure III.7**). Ces deux formes d'onde sont reproduites à l'aide de la **fonction de Heidler [III-11]**, équation **(III.1)**, où le premier coup de foudre est reproduit par une *seule* fonction de Heidler alors que le subséquent par une *somme de deux*, dont les paramètres sont regroupés dans le **Tableau III.1**.

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

Avec :

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(n \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}\right)\right) \quad (III.2)$$

I_0 contrôle l'amplitude ; τ_1 est la constante du temps de montée ; τ_2 est la constante du temps de décroissance ; η le facteur de correction d'amplitude et n est un exposant qui contrôle la pente.

Formes de courant	I_0 (kA)	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)	n
1 ^{er} arc	28	1.80	95	2
Arc subséquent	10.7	0.25	2.5	2
	6.5	2	230	2

Tableau III.1. Paramètres utilisés pour reproduire le courant de foudre [III-12].

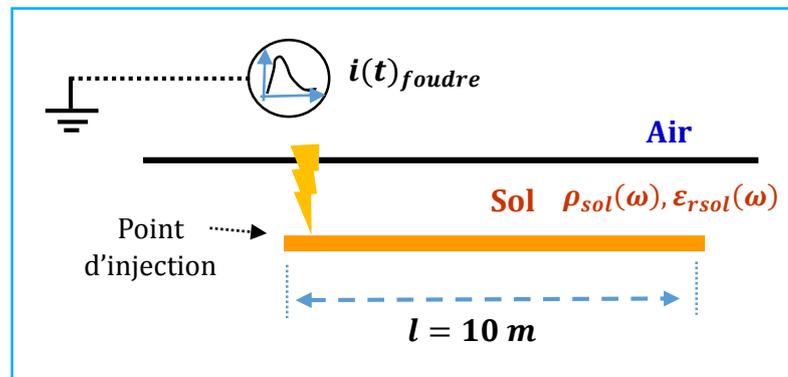


Figure III.7. Electrode horizontale enterrée dans un sol à paramètres dépendants de la fréquence, excitée par un courant de foudre.

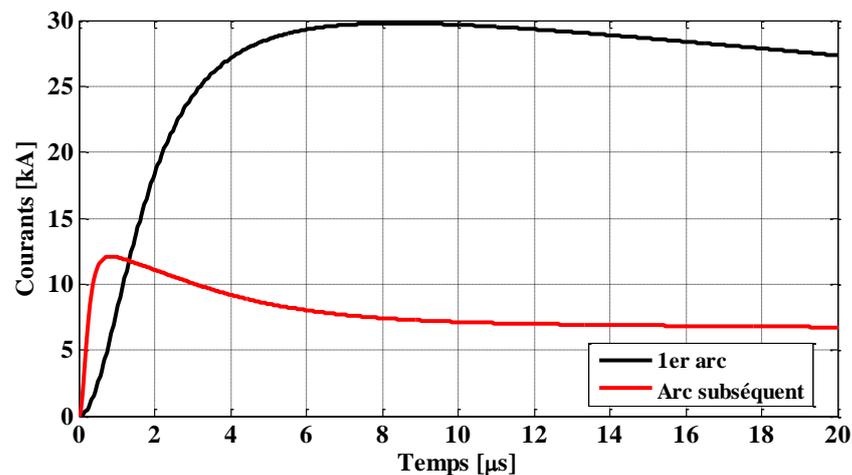


Figure III.8. Formes d'onde du premier arc et l'arc subséquent du courant de foudre.

Cette étude est effectuée aussi bien pour un sol considéré à *paramètres électriques constants*, que pour un sol à *paramètres dépendants de la fréquence* pour lesquels nous utilisons les **six modèles** discutés précédemment. Notons que dans le cas de paramètres de sol constants, la *permittivité relative* dans tous les cas est supposée être $\epsilon_r = 5$.

Remarque :

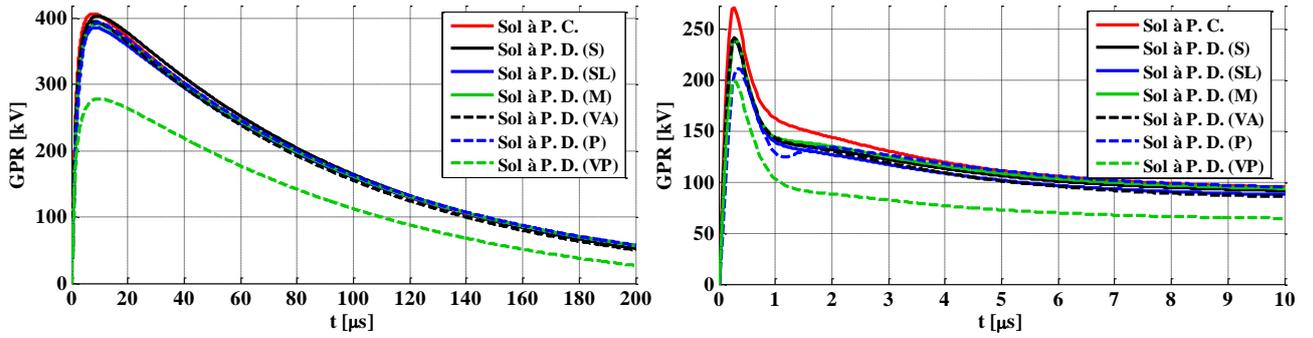
Le modèle informatique utilisé par *CAVKA et al.* [III-1] pour l'analyse d'un système de mise à la terre intégré dans un sol dépendant de la fréquence est basé sur l'approche

électromagnétique complète (*full wave*) initialement développée par **Grcev** et **Dawalibi** [III-13] et sur l'ensemble associé d'équations de type **Pocklington** pour les fils orientés arbitrairement. Pour obtenir l'augmentation du potentiel de mise à la terre (**GPR**), l'**impédance harmonique** de mise à la terre $Z(\omega)$ est multipliée par le *spectre* correspondant associé à la source de courant d'excitation pour obtenir la réponse en fréquence de l'électrode de mise à la terre. Enfin, la réponse transitoire est calculée au moyen de la transformée de Fourier inverse hybride [III-14]. En ce qui concerne notre modèle, il est basé sur la *théorie des lignes*, limitée en spectre fréquentiel (ne dépasse pas les 10 MHz), et le **GPR** est calculé directement par la transformée de Fourier inverse (en utilisant la fonction IFFT de MATLAB).

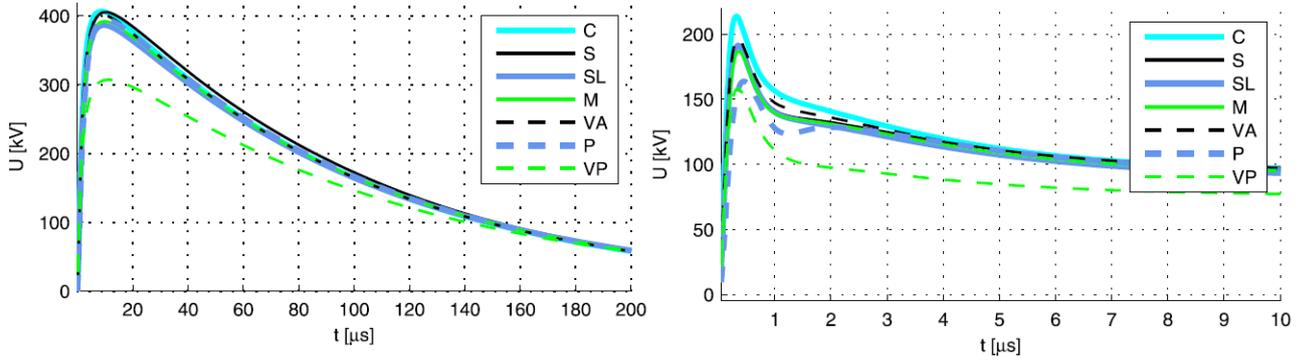
Les **Figures III.9 à III.11** montrent l'augmentation transitoire du potentiel du sol, **GPR**, pour le premier arc et l'arc subséquent de la foudre, pour différents modèles du sol et pour différentes valeurs de la résistivité du sol basse fréquence, à savoir 100, 1 000 et 10 000 $\Omega.m$. Ces figures annexent nos résultats de calcul et ceux publiés par **CAVKA et al.** [III-1]. Repérons que l'indication « **sol à P. C.** » sur ces figures signifie « *sol à paramètres constants* » et « **sol à P. D.** » indique « *sol à paramètres dépendants de la fréquence* ».

D'après ces résultats nous remarquons que :

- ✚ L'ensemble de nos résultats est en accord en allure et en amplitude pour la plus part des résistivités ρ_{solBF} et des modèles. A l'exception du modèle de **Visacro et Portela (VP)** qui montre parfois des différences en amplitude avec les résultats publiés ;
- ✚ La dépendance fréquentielle des paramètres du sol entraîne une **diminution** du potentiel de la terre (**GPR**) par rapport au cas où les paramètres du sol sont supposés constants. Encore, cette diminution est **plus significative** pour les sols ayant une **résistivité très élevée**.
- ✚ Les modèles (expressions) de **Scott, Smith-Longmire, Messier** aboutissent à des *niveaux de diminution similaires*, qui peuvent aller jusqu'à 45% (pour $\rho_{solBF} = 10000 \Omega.m$ et avec le courant d'**arc subséquent**, **Figure III.11** (b)). Ceci est attendu puisque ces trois modèles sont basés sur le même ensemble de données de mesure.
- ✚ Les prédictions de **Visacro-Alipio** sont également, en général, similaires à celles de Scott, Smith-Longmire et Messier, sauf dans le cas d'un sol à **haute résistivité** (voir **Figure III.11**) où les diminutions sont plus importantes.
- ✚ Les modèles de **Portela** et **Visacro-Portela** présentent parfois des niveaux de diminution significativement plus élevés.



- Nos résultats de calcul -

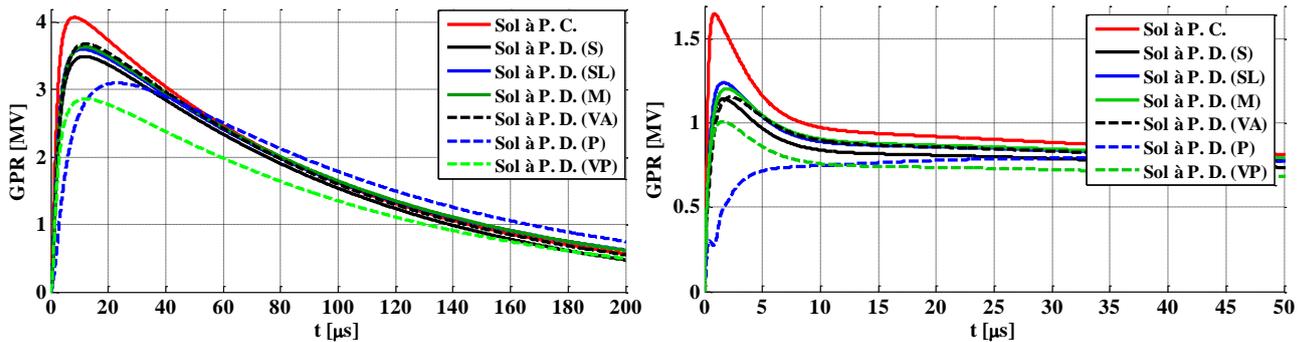


- Résultats publiés en [III-1]-

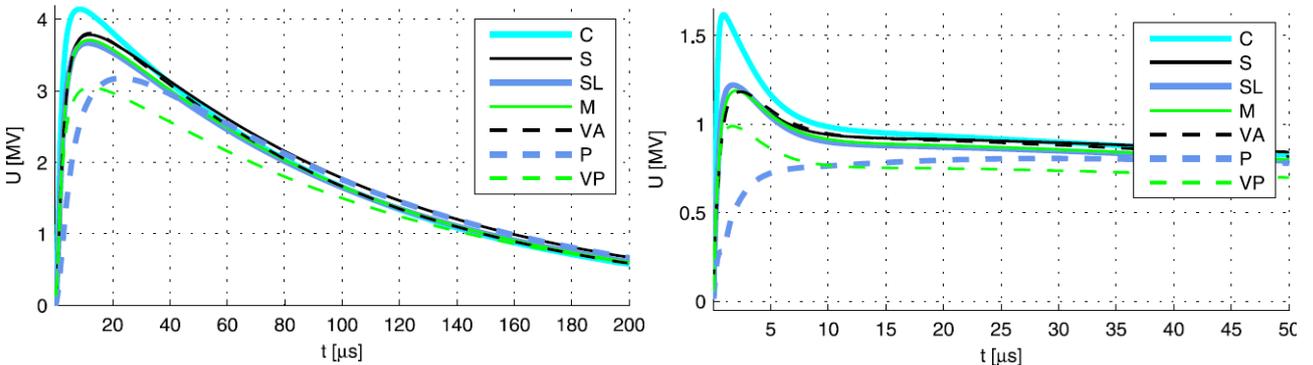
a- Premier arc en retour.

b- l'arc subséquent.

Figure III.9. GPR transitoire pour différents modèles du sol pour $\rho_{solBF} = 100 \Omega.m$.



- Nos résultats de calcul -



- Résultats publiés en [III-1]-

a- Premier arc en retour.

b- l'arc subséquent.

Figure III.10. GPR transitoire pour différents modèles du sol pour $\rho_{solBF} = 1000 \Omega.m$.

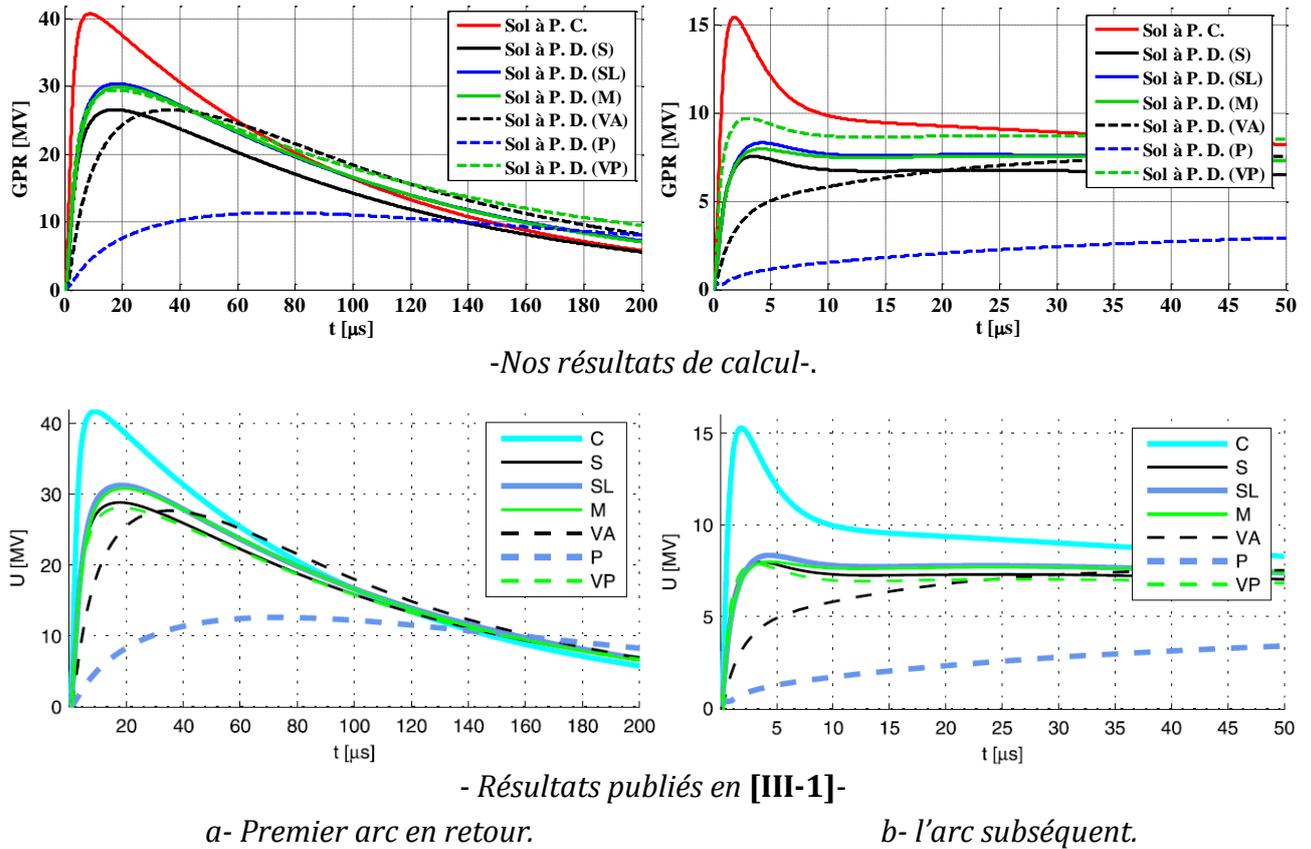


Figure III.11. GPR transitoire pour différents modèles du sol pour $\rho_{solBF} = 10000 \Omega.m$.

III.2. Méthodes du calcul de la résistivité apparente ρ_a d'un sol stratifié

La connaissance de la *structure de la terre* est importante pour la *conception des systèmes de mise à la terre*. Habituellement, le sol peut être représenté par des **modèles** de structures multicouches stratifiées horizontalement, dont il faut connaître le nombre de couches, l'épaisseur et la résistivité du sol dans chaque couche. Ces modèles nous permettent d'estimer la **résistivité électrique apparente** « ρ_a » qui peut refléter le *comportement électrique* d'un sol multicouche.

A cet effet, et dans cette deuxième partie de ce chapitre, nous nous intéressons aux méthodes permettant la détermination de cette caractéristique électrique équivalente (ρ_a) de tels sols. Nous traitons deux configurations du sol : un **sol stratifié bicouche** et un **sol stratifié à trois couches**, et pour chaque configuration nous confrontons les résultats de calcul obtenus par les méthodes utilisées (voir *chapitre II*).

III.2.1. Cas d'un sol stratifié à deux couches

Dans la 1^{ère} configuration du sol (*sol bicouche*) nous effectuons notre étude sur deux cas de sol bicouche (voir le **Tableau III.2**).

Où les deux couches sont caractérisées par les résistivités ρ_{sol1} et ρ_{sol2} , respectivement.

Pour chaque cas, nous faisons un calcul de la *résistivité apparente* ρ_a en fonction de la valeur de l'espacement « **a** » qui se trouve entre deux électrodes (*sondes*) successives de mesure définies dans la méthode de **Wenner** [III-15], afin de voir à quel point il influe sur la valeur de ρ_a et dans quel intervalle se trouve la différence entre les méthodes de calcul utilisées. Pour cela nous faisons varier « **a** » de **1m** jusqu'à **90m** avec un pas de **1m**. En plus, dans chaque cas du sol, nous prenons à chaque fois une valeur différente de l'épaisseur **h₁** de la 1^{ère} couche pour faire le **lien** entre la profondeur dans le sol et la valeur de l'espacement **a**.

Cas	h ₁ (m)	ρ_{sol1} ($\Omega \cdot m$)	ρ_{sol2} ($\Omega \cdot m$)
1	1	100	1500
	3		
	10		
	30		
2	1	2000	50
	3		
	10		
	30		

Tableau III.2. Caractéristiques des deux cas traités d'un sol bicouche.

Nous utilisons les *trois méthodes* suivantes, dont les expressions sont fonction de l'espacement « **a** », qui sont (voir *chapitre II*) :

- la méthode de **Wenner** [III-15] - [III-16] ;
- la méthode d'**Arora et Seedher** [III-15] ;
- la méthode de **Sunde** [III-17].

Les résultats obtenus sont présentés sur la **Figure III.12** pour le **cas 1** et sur la **Figure III.13** pour le **cas 2**. D'après ces résultats nous constatons ce qui suit :

- Pour le **cas 1** (**Figure III.12**), pour les 4 valeurs de l'épaisseur **h₁** de la 1^{ère} couche du sol, les variations de la résistivité ρ_a sont **croissantes** à partir d'une valeur d'environ $\rho_{sol1} = 100 \Omega \cdot m$ qui caractérise la couche supérieure vers des valeurs plus grandes aboutissons par fois à la résistivité $\rho_{sol2} = 1500 \Omega \cdot m$ et cela suivant la valeur de **h₁**. Ce résultat affirme la grande relation entre la valeur de « **a** » et la **profondeur** du sol, car le fait en augmentant l'espacement « **a** » progressivement la valeur de la résistivité ρ_a change entre ρ_{sol1} et ρ_{sol2} c'est-à-dire du **haut** du sol vers son **bas**, cela est équivalent à une **variation** dans la **profondeur du sol**.

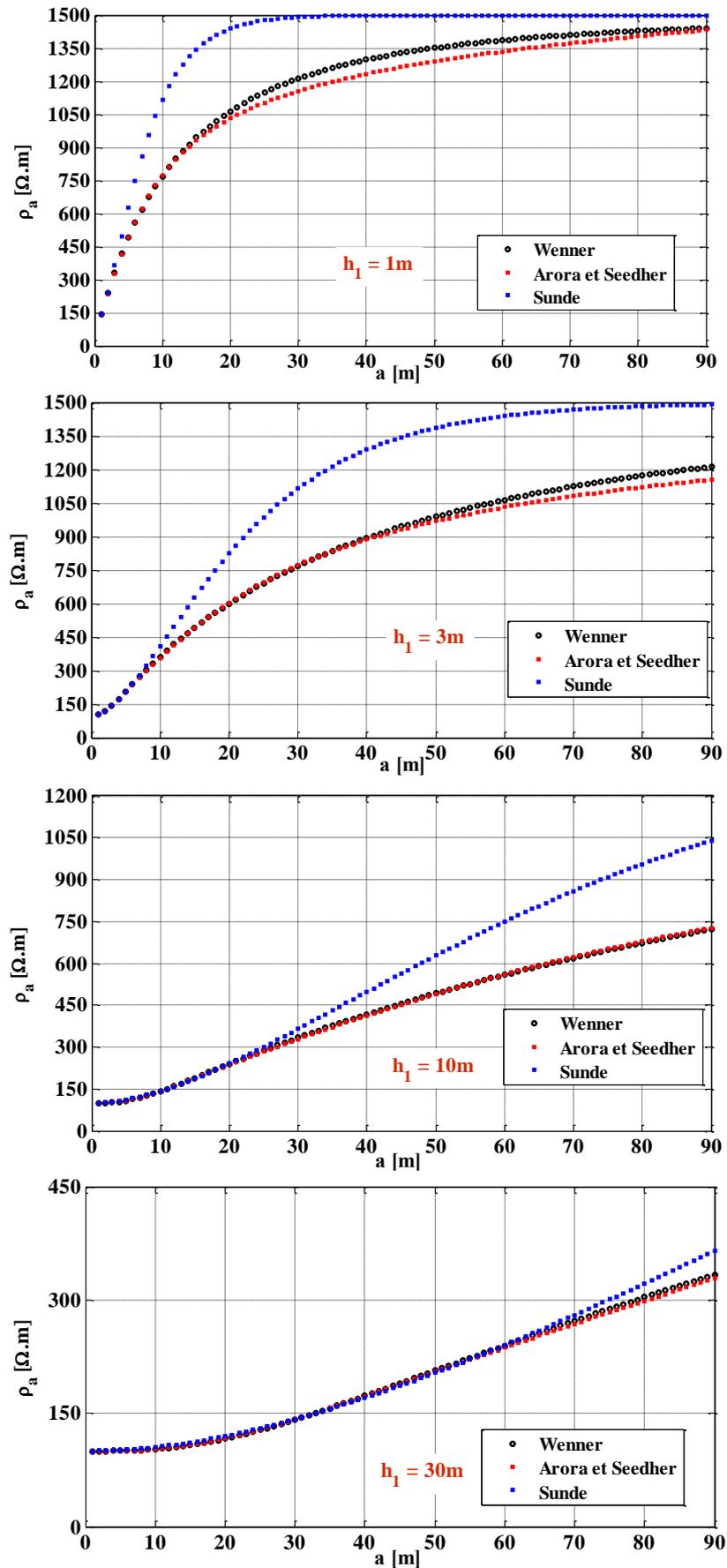


Figure III.12. Variations de ρ_a en fonction de l'espacement «a» pour différentes valeurs de h_1 (cas 1).

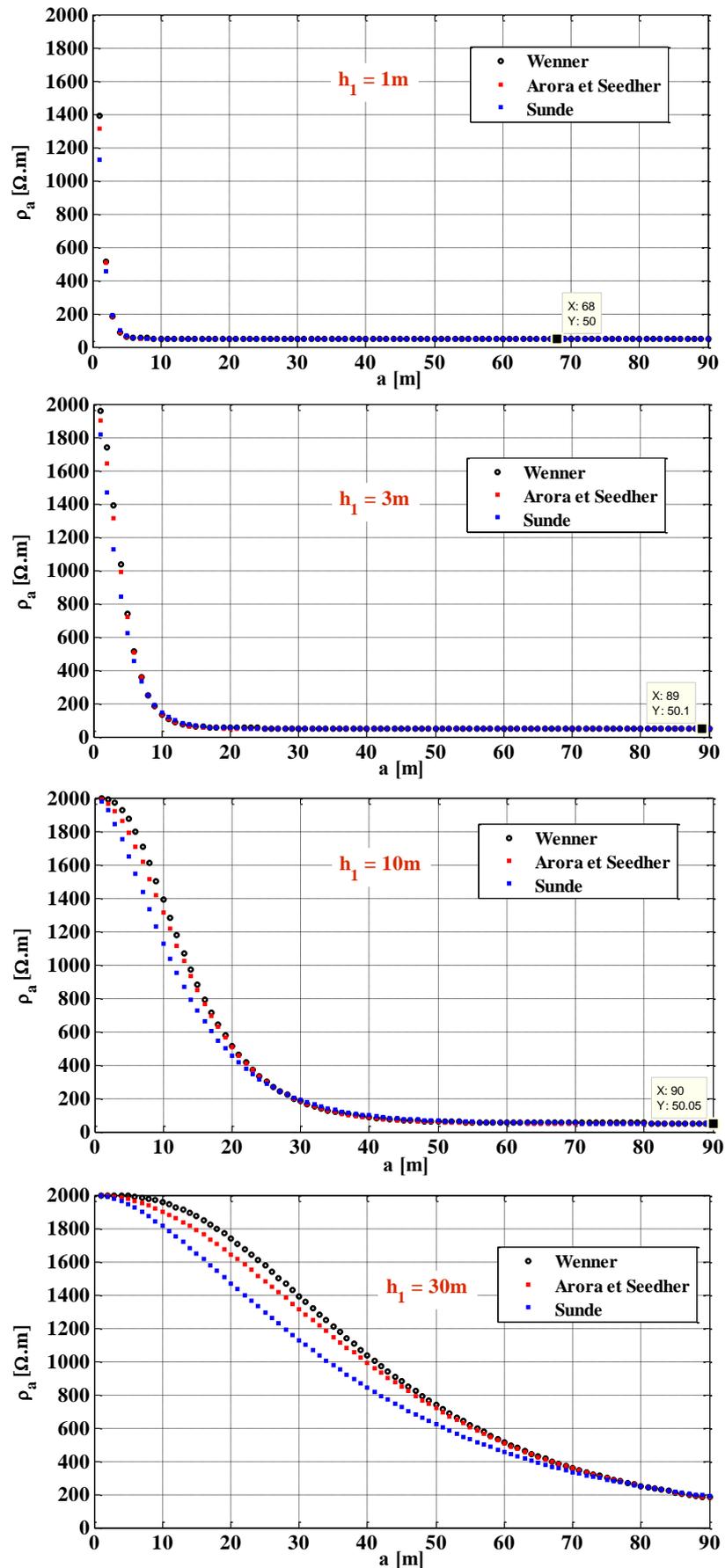


Figure III.13. Variations de ρ_a en fonction de l'espacement «a» pour différentes valeurs de h_1 (cas 2).

- Aussi, plus la valeur de l'épaisseur de la 1^{ière} couche h_1 est plus grande les variations de la résistivité ρ_a sont de plus en plus **lentes**. Où lorsque la valeur de l'espacement « a » est proche à l'épaisseur h_1 les valeurs de la résistivité ρ_a reste au voisinage de ρ_{sol1} , plus « a » est plus grand nous s'éloignons de ρ_{sol1} et nous allons vers ρ_{sol2} . Cela confirme la 1^{ière} observation et affirme que le **choix** de la valeur de l'espacement « a » est lié à combien de profondeur nous voulons estimer la résistivité de notre sol.
- Pour le **cas 2 (Figure III.13)**, pour les 4 valeurs de l'épaisseur h_1 de la 1^{ière} couche du sol, les variations de la résistivité ρ_a sont **décroissantes** d'une valeur proche à $\rho_{sol1} = 2000 \Omega.m$ qui caractérise la couche supérieure vers des valeurs plus petites qui peuvent atteindre parfois la résistivité $\rho_{sol2} = 50 \Omega.m$, suivant la valeur de h_1 . Ce qui reconferme les mêmes conclusions pour le **cas 1** : l'augmentation de l'espacement « a » varie la valeur de ρ_a entre ρ_{sol1} et ρ_{sol2} (variation dans la **profondeur du sol**). Et plus la valeur de h_1 est plus étendue les variations de ρ_a sont de plus en plus **lentes**. De même, lorsque la valeur « a » est proche à h_1 les valeurs de ρ_a reste à l'entourage de ρ_{sol1} , plus en augmentant « a » nous progressons vers ρ_{sol2} . Cela réaffirme une autre fois que le **choix** de la valeur de « a » est une suite au choix de la profondeur dans laquelle nous tentons d'estimer la résistivité du sol.

Remarque :

D'après la référence [III-18], la méthode de Wenner, spécifiée dans la norme IEEE 81 partie 1, BS EN 50522 ou BS 7430, est considérée comme l'une des méthodes les plus «*fiables*» pour tester les sols à des profondeurs plus profondes. Dans la **Figure III.14**, l'illustration montre comment l'espacement « a » des électrodes est lié à la **profondeur apparente testée**, par exemple un espacement des sondes de 6 m indique la résistivité du sol à une profondeur d'**environ 6 m** [III-18].

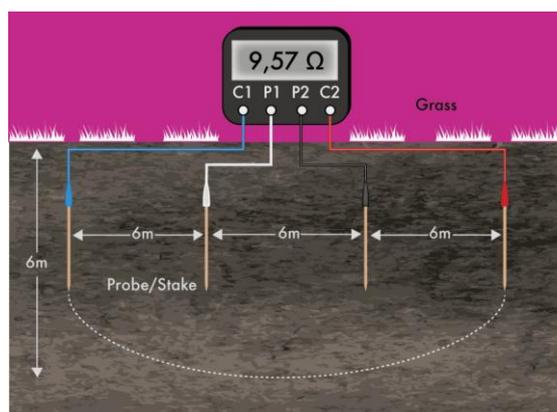


Figure III.14. Méthode de test de résistivité du sol – Le test Wenner [III-18].

- En confrontant les **3 méthodes** utilisées, les variations de la *résistivité apparente* sont en harmonie en allure et en ordre de grandeur, hormis la méthode de **Sunde** qui présente parfois des *surestimations* ou bien *sous-estimations* par rapport aux deux autres méthodes : de **Wenner** et d'**Arora et Seedher**.

Afin de compléter cette analyse, nous avons effectué des calculs de la *résistivité apparente* ρ_a pour **8 cas** de sols bicouches (avec **4 valeurs** de l'épaisseur de la 1^{ère} couche h_1). Deux choix de l'espacement inter-électrodes « **a** » sont effectués : soit « **a** » est une valeur double de h_1 , soit constant ($a = 3m$). Nous comparons les résultats obtenus par les **4 méthodes** présentées déjà dans le *chapitre II*, les **trois** appliquées déjà plus haut (de Wenner - d'Arora et Seedher - de Sunde) plus la méthode de **J. A. Sullivan [III-19]** dont ses expressions sont indépendantes de « **a** ». Le **Tableau III.3** ci-après regroupe ces résultats.

Cas	$h_1(m)$	$\rho_{sol1}(\Omega. m)$	$\rho_{sol2}(\Omega. m)$	$a(m)$	$\rho_a (\Omega. m)$			
					Wenner	Sullivan ($d = 0.5m$)	Arora et Seedher	Sunde
1	0.2	500	100	0.5	173	130	174	199
				3	101	130	100	100
2	0.2	100	500	0.5	221	385	220	235
				3	444	385	439	496
3	2.5	500	100	5	219	209	221	243
				3	348	209	339	346
4	2.5	100	500	5	193	239	192	200
				3	142	239	142	146
5	5	500	100	10	219	265	221	243
				3	463	265	446	441
6	5	100	500	10	193	188	192	200
				3	109	188	109	114
7	10	500	100	20	219	331	221	243
				3	494	331	485	481
8	10	100	500	20	193	151	192	200
				3	101	151	101	104

Tableau III.3. Les valeurs de la *résistivité apparente* ρ_a obtenues par les différentes méthodes.

D'après ce que montre ce tableau, nous remarquons que :

- Lorsque l'espacement « a » est variable avec h_1 et prend le double de sa valeur, c'est-à-dire l'estimation de ρ_a se fait à une profondeur localisée toujours dans la 2^{ième} couche pour tous les cas, nous remarquons que la résistivité ρ_a est comprise dans un intervalle entre **150 $\Omega.m$** et **250 $\Omega.m$** environ, suivant que les couches **1** et **2** ont des résistivités de 500 $\Omega.m$ et 100 $\Omega.m$ ou l'inverse. Nous notons que la méthode de **Sunde** donne toujours les valeurs les plus grandes et que la méthode de **Sullivan** est indépendante de « a » et donne parfois des valeurs hors l'intervalle des **3** autres méthodes, sachant que cette méthode est une fonction (influencée) par la profondeur d'enfouissement d (profondeur de l'électrode de terre) où nous avons pris une valeur $d = 0.5m$ à titre d'exemple.
- Lorsque l'espacement est constant ($a = 3m$) : l'estimation de ρ_a se fait à une profondeur qui est soit dans la 2^{ième} couche pour les **cas 1, 2, 3** ou **4**, soit dans la 1^{ière} couche et cela pour les **cas 5, 6, 7** ou **8**. Pour $h_1 = 0.2m$, les **3** méthodes estiment des valeurs de ρ_a qui sont toujours très proches à la résistivité de la 2^{ième} couche (**cas 1** et **2**). Pour $h_1 = 2.5m$, les valeurs de ρ_a sont plus voisins de la résistivité de la 1^{ière} couche (**cas 3** et **4**) car la valeur de « a » est proche à h_1 . Pour $h_1 = 5m$ ou $10m$, les valeurs de ρ_a sont de *plus en plus* proches de la résistivité de la 1^{ière} couche (**cas 5, 6, 7** ou **8**). Pour tous ces cas la méthode de **Sullivan** surestime parfois et sous-estime autres fois la valeur de ρ_a par rapport aux autres méthodes.
- D'après ces constatations nous confirmons que le choix de l'espacement « a » possède un grand impact sur les valeurs de la résistivité apparente ρ_a d'un sol multicouche, d'où un mauvais choix peut entraîner des **sur** ou **sous** estimations capables de dépasser le *double* ou la *moitié* des valeurs réelles (voir le **Tableau III.3**).

III.2.2. Cas d'un sol stratifié à trois couches

À propos de la 2^{ième} configuration du sol (*sol à trois couches*) nous réalisons notre étude sur **six cas** de sols à trois couches (voir le **Tableau III.4**). Dans lesquels les **3** couches sont caractérisées par les résistivités ρ_{sol1} , ρ_{sol2} , et ρ_{sol3} , respectivement.

Pour chaque cas, nous calculons les valeurs de la *résistivité apparente* ρ_a en fonction de l'espacement « a ». Pour se faire, nous varions « a » de **1m** à **90m** (pas de **1m**).

Nous utilisons les **4 premières méthodes** développées par **Osama E. Gouda et al. [III-20]** pour un sol stratifié à **3** couches, dont les expressions sont exposées dans le *chapitre II*.

Les résultats obtenus sont montrés sur la **Figure III.15** pour le **cas 1, cas 2** et **cas 3** et sur la **Figure III.16** pour le **cas 4, cas 5** et **cas 6**. À la suite de ces résultats nous observons ce qui suit :

Cas	$h_1(m)$	$h_2(m)$	$\rho_{sol1}(\Omega.m)$	$\rho_{sol2}(\Omega.m)$	$\rho_{sol3}(\Omega.m)$
1	1	1	20	150	1000
2	10	1	20	150	1000
3	1	10	20	150	1000
4	1	1	1000	150	20
5	10	1	1000	150	20
6	1	10	1000	150	20

Tableau III.4. Caractéristiques des sols multicouches étudiés.

- Pour le **cas 1**, **cas 2** et **cas 3** les variations de la résistivité apparente ρ_a sont **croissantes** avec l'augmentation de l'espacement «**a**». L'augmentation de «**a**» exprime une pénétration dans le sol ce qui fait que les valeurs de ρ_a démarrent à des valeurs proches de $\rho_{sol1} = 20\Omega.m$ et arrivant à des valeurs qui peuvent atteindre $\rho_{sol3} = 1000\Omega.m$ en passant par des valeurs voisines à $\rho_{sol2} = 150\Omega.m$ et cela suivant les valeurs de h_1 et h_2 (épaisseurs de la 1^{ière} et la 2^{ième} couches).
- Pour le **cas 1**, $h_1 = h_2 = 1m$, ρ_a démarre à des valeurs proches de ρ_{sol1} et ρ_{sol2} (ρ_{sol12}) et augmente **rapidement** vers ρ_{sol3} lorsque «**a**» devient supérieur à $(h_1 + h_2)$ et ceci pour les **méthodes 1** et **3** qui ont le même principe (calculer la *résistivité équivalente* ρ_{sol12} entre les couches **1** et **2**, ensuite calculer ρ_a entre ces couches (ρ_{sol12}) et la 3^{ième} (ρ_{sol3})). Pour les méthodes **2** et **4** qui ont aussi le même fondement (calculer la *résistivité équivalente* ρ_{sol23} entre les couches **2** et **3**, ensuite calculer ρ_a entre ces couches (ρ_{sol23}) et la 1^{ière} (ρ_{sol1})), les aboutissements de ρ_a sont plus faibles à cause, à notre avis, de l'effet de la résistivité très faible $\rho_{sol1} = 20\Omega.m$ sur ρ_a (*saut de résistivité*).
- Pour le **cas 2**, $h_1 = 10m$ et $h_2 = 1m$, nous avons les mêmes remarques ci-dessus, mais : les croissances de ρ_a sont plus **lentes**, surtout lorsque $a \leq 10m$, elle est de l'ordre de $\rho_{sol1} = 20\Omega.m$, les valeurs ensuite, en profondeur, sont plus **faibles** comparativement avec le **cas 1**, vu l'influence de la couche **1** ayant une épaisseur de $10m$.
- Pour le **cas 3**, $h_1 = 1m$ et $h_2 = 10m$, les augmentations de ρ_a sont plus **rapides** que le **cas 2**, et les valeurs sont plus grandes au **cas 2**, vu que la couche **2** ayant une épaisseur de $10m$ et se caractérise par une résistivité plus grande ($\rho_{sol2} = 150\Omega.m$). Pour ce cas la **méthode 2** a changé le comportement et accolé la **méthode 1**.

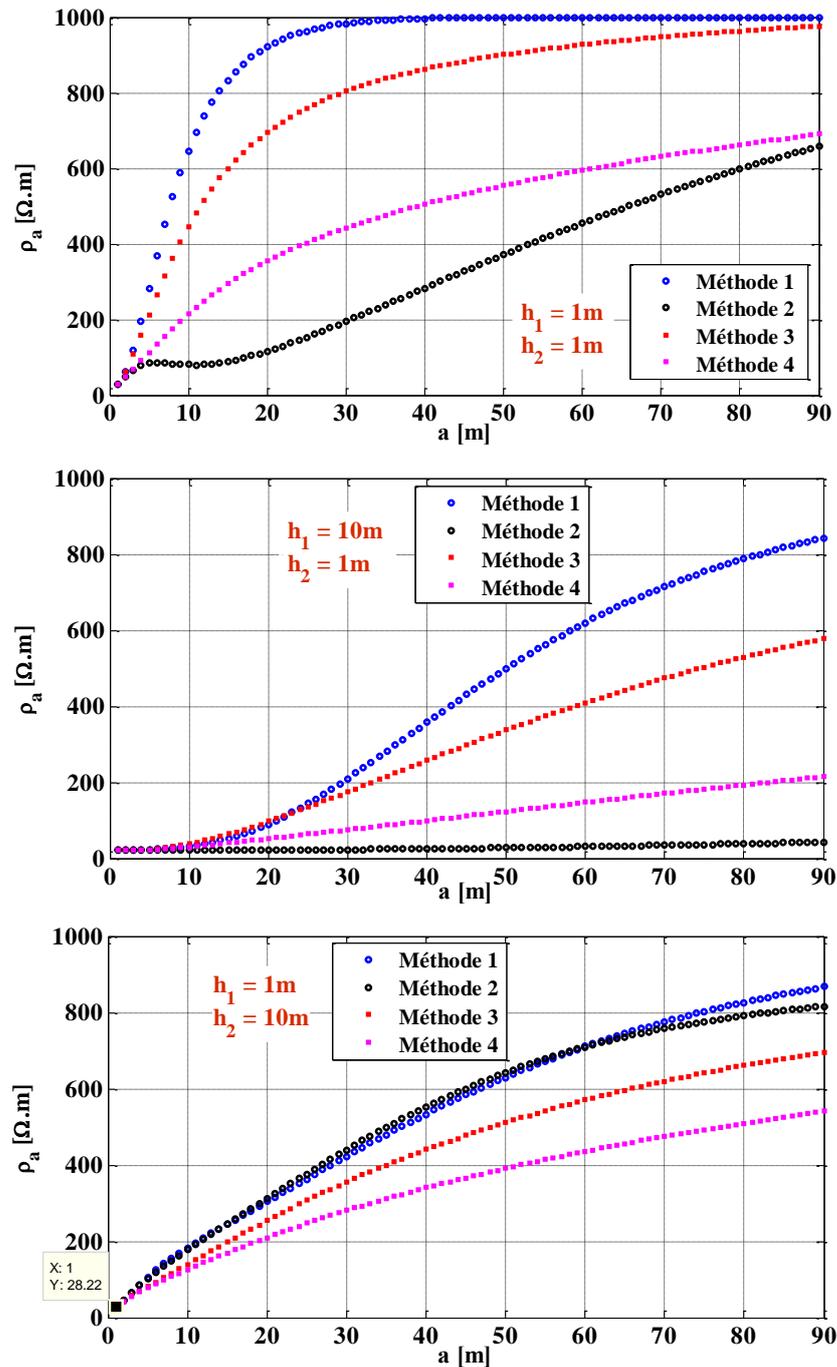


Figure III.15. Variations de ρ_a en fonction de l'espacement « a » pour différentes valeurs de h_1 et h_2 (cas 1, cas 2 et cas 3).

- Pour le cas 4, cas 5 et cas 6, les variations de la résistivité apparente ρ_a sont **décroissantes** avec l'augmentation de l'espacement « a ». Les valeurs de ρ_a commencent à des valeurs proches à $\rho_{sol1} = 1000\Omega.m$ et diminuent à $\rho_{sol3} = 20\Omega.m$ en passant par des valeurs voisines à $\rho_{sol2} = 150\Omega.m$ et cela suivant les valeurs de h_1 et h_2 .
- Pour le cas 4, $h_1 = h_2 = 1m$, la diminution de ρ_a est **rapide** vers ρ_{sol3} lorsque « a » est supérieur à $(h_1 + h_2)$ dans ce temps les 4 méthodes donnent les mêmes résultats.

- Pour le **cas 5**, $h_1 = 10m$ et $h_2 = 1m$, la diminution de ρ_a est plus **lent**, principalement lorsque $a \leq 10m$. Où, ρ_a débute de $1000\Omega.m$ et aboutisse à $20\Omega.m$ pour les plus grandes valeurs de « a ».
- Pour le **cas 6**, $h_1 = 1m$ et $h_2 = 10m$, la diminution de ρ_a est plus **rapide** que le **cas 5** au début, se stabilise à des valeurs proches à $\rho_{sol2} = 150\Omega.m$ à cause de l'épaisseur de la couche 2 et après tend plus tôt que le **cas 5** vers $\rho_{sol3} = 20\Omega.m$.
- Pour le **cas 4**, **cas 5** et **cas 6**, les 4 **méthodes** ont des **valeurs rapprochées**.

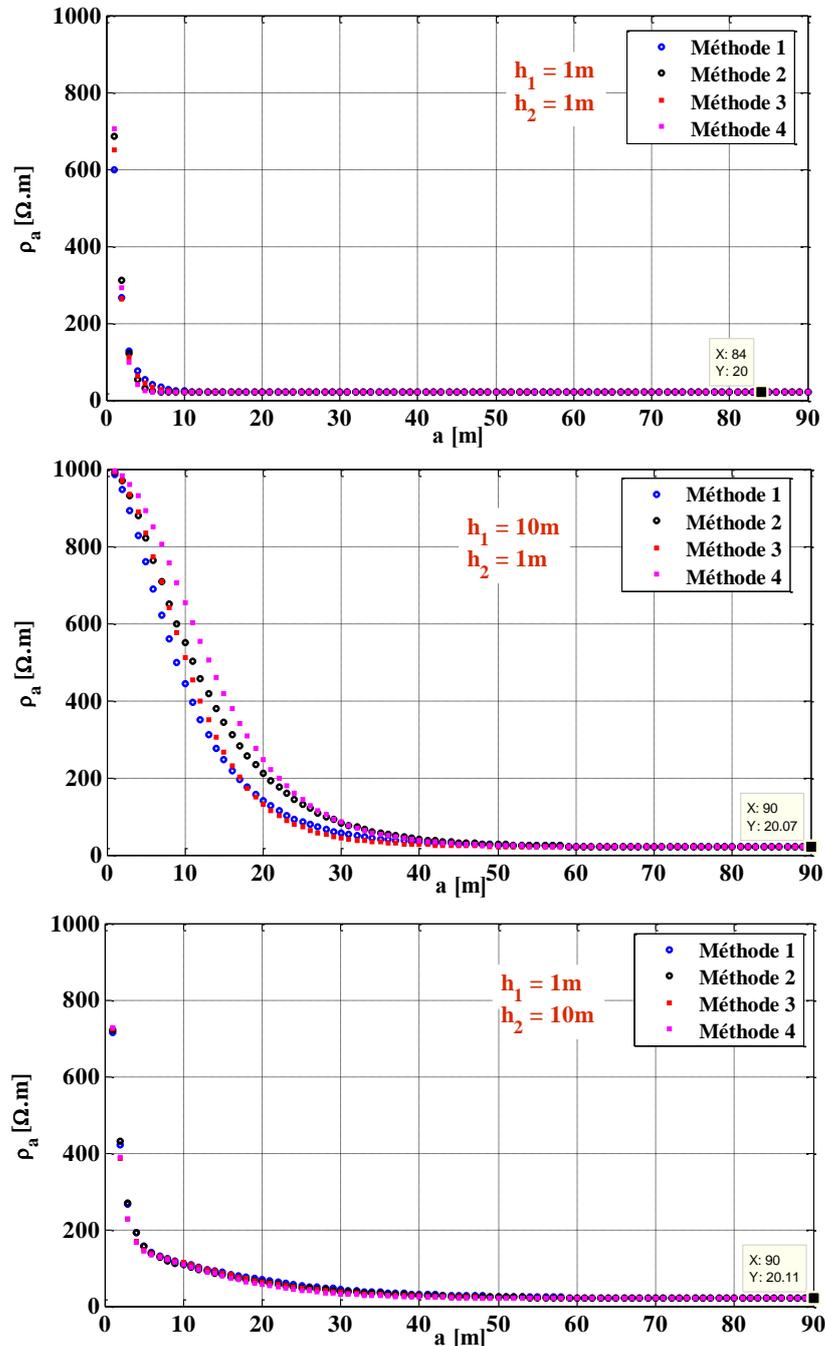


Figure III.16. Variations de ρ_a en fonction de l'espacement «a» pour différentes valeurs de h_1 et h_2 (cas 4, cas 5 et cas 6).

III.3. Calcul du GPR et de l'impédance du sol pour des électrodes enterrées dans un sol stratifié à paramètres dépendants de la fréquence

Les électrodes de mise à la terre sont utilisées pour fournir un chemin de dissipation à faible impédance pour les courants de foudre ou de défaut excessifs. Plusieurs études ont été consacrées au calcul de l'*impédance* de mise à la terre $Z(\omega)$ et de l'élévation du potentiel de terre (*GPR*) de différents agencements d'électrodes en considérant soit la *dépendance fréquentielle* des *paramètres du sol* (ϵ_{rsol} et ρ_{sol}), soit la *nature multicouche du sol* (sol hétérogène).

Ce mémoire de fin d'études vise à analyser le comportement des mises à la terre et les GPRs dus à l'injection d'un courant de foudre dans *diverses configurations de sol*, en considérant un « *sol stratifié* » et à « *paramètres dépendants de la fréquence* ».

Dans ce contexte, nous reprenons une analyse effectuée par les Brésiliens **Anderson R.J. DE Araújo et al. [III-21]**, dans laquelle ils ont étudié l'effet de la dépendance fréquentielle des paramètres électriques d'un sol multicouche (*stratifié*), où deux électrodes de mise à la terre différentes, « un *piquet vertical* » et « une *patte d'oie* (*électrode croisée*) », sont enterrées dans des configurations du sol variées.

Pour chaque type de mise à la terre nous traitons **5 topologies** du sol (*de sols homogènes aux sols stratifiés*) : **3 sols homogènes** à 3 valeurs différentes de la résistivité Basse Fréquence (ρ_{solBF1} , ρ_{solBF2} et ρ_{solBF3}), un sol *stratifié bicouche* et enfin un *sol stratifié à 3 couches*. Pour le *piquet vertical* les 5 topologies sont nommées **V₁, V₂, V₃, V₄ et V₅**. Pour l'électrode croisée, **3 profondeurs** $D_i = D_1, D_2$ et D_3 sont combinées avec les 5 configurations du sol et pour chaque D_i nous traitons les topologies nommées **C₁, C₂, C₃, C₄ et C₅**. Cela est expliqué sur les **Figures III.17 et III.18** ainsi que le **Tableau III.5**. Les données géométriques des deux électrodes examinées sont rassemblées dans **Tableau III.6**.

Nous introduisons également la *dépendance fréquentielle* des paramètres électriques du sol, pour se faire les expressions de **Visacro et Alipio** (VA) sont adoptées (les expressions sont exposées dans le *chapitre II*, équations (II.96) et (II.97)). Dans le cas du sol à paramètres indépendants de la fréquence, la permittivité relative $\epsilon_r = 10$ est considérée pour toutes les couches du sol stratifié.

Dans la référence [III-21], la simulation des systèmes de mise à la terre est réalisée à l'aide du solveur électromagnétique *pleine onde* du logiciel commercial FEKO/Altair Engineering [III-22]. FEKO utilise la *méthode des moments* (**MoM**) pour résoudre une *équation intégrale de*

champ électrique (EFIE) dans le **domaine fréquentiel** afin de calculer le rayonnement des champs électromagnétiques et l'impédance d'une antenne d'une topologie donnée. L'arrangement simple des électrodes de mise à la terre peut être interprété comme une antenne intégrée dans un milieu stratifié avec pertes dépendant de la fréquence (*sol*). Le solveur utilise une fonction de Green à milieu stratifié [III-21] pour représenter la topologie du sol, afin de calculer l'impédance de mise à la terre $|Z(\omega)|$ dans une plage de fréquences allant de **100 Hz** à **10 MHz**.

Les auteurs en [III-21], pour étudier l'effet de la dépendance fréquentielle des paramètres électriques d'un sol stratifié sur les tensions transitoires dans le domaine temporel, l'élévation du potentiel de terre (**GPR**) est analysée à la suite de l'injection de deux types de courants de foudre (1^{er} arc et l'arc subséquent). Au début, chaque réponse calculée en fréquentiel à l'aide de la méthode suscitée (MoM) est approchée par une *fonction rationnelle* utilisant la technique *Vector Fitting* (VF) [III-23]. Ensuite, une méthode de *convolution récursive* [III-24] est utilisée pour obtenir les formes d'onde des **GPRs** dans le domaine temporel. Pour notre formalisme, en se basant sur la théorie des lignes, le **GPR** est calculé comme avant par la transformé de Fourier inverse (MATLAB).

V ₁ ou C ₁	Sol homogène : $\rho_{solBF1} = 1000 \Omega.m$
V ₂ ou C ₂	Sol homogène : $\rho_{solBF2} = 500 \Omega.m$
V ₃ ou C ₃	Sol homogène : $\rho_{solBF2} = 100 \Omega.m$
V ₄ ou C ₄	Sol stratifié à deux couches : $\rho_{solBF1} = 1000 \Omega.m, \rho_{solBF2} = 500 \Omega.m$
V ₅ ou C ₅	Sol stratifié à trois couches : $\rho_{solBF1} = 1000 \Omega.m, \rho_{solBF2} = 500 \Omega.m, \rho_{solBF3} = 100 \Omega.m$

Tableau III.5. Les différentes topologies du sol pour les deux électrodes traitées.

Piquet vertical	La longueur $L = 3 m$; Le rayon $r = 12.5 mm$.
Electrode en patte d'oie (croisée)	La longueur de chaque pied $L_c = 2.5 m$; Le rayon $r = 12.5 mm$; La profondeur $D_i = \begin{cases} D_1 = 0.5 m \\ D_2 = 1.5 m \\ D_3 = 2.5 m \end{cases}$

Tableau III.6. Les données géométriques des deux électrodes examinées.

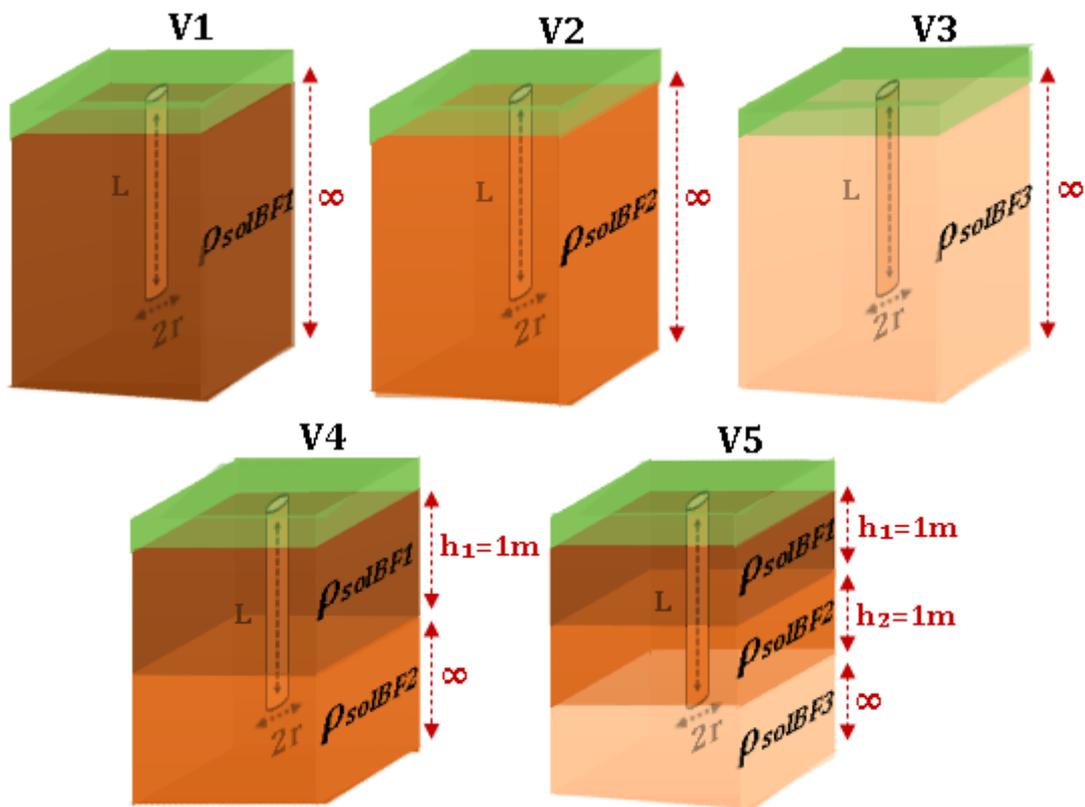


Figure III.17. Piquet vertical enterré dans différentes configurations du sol.

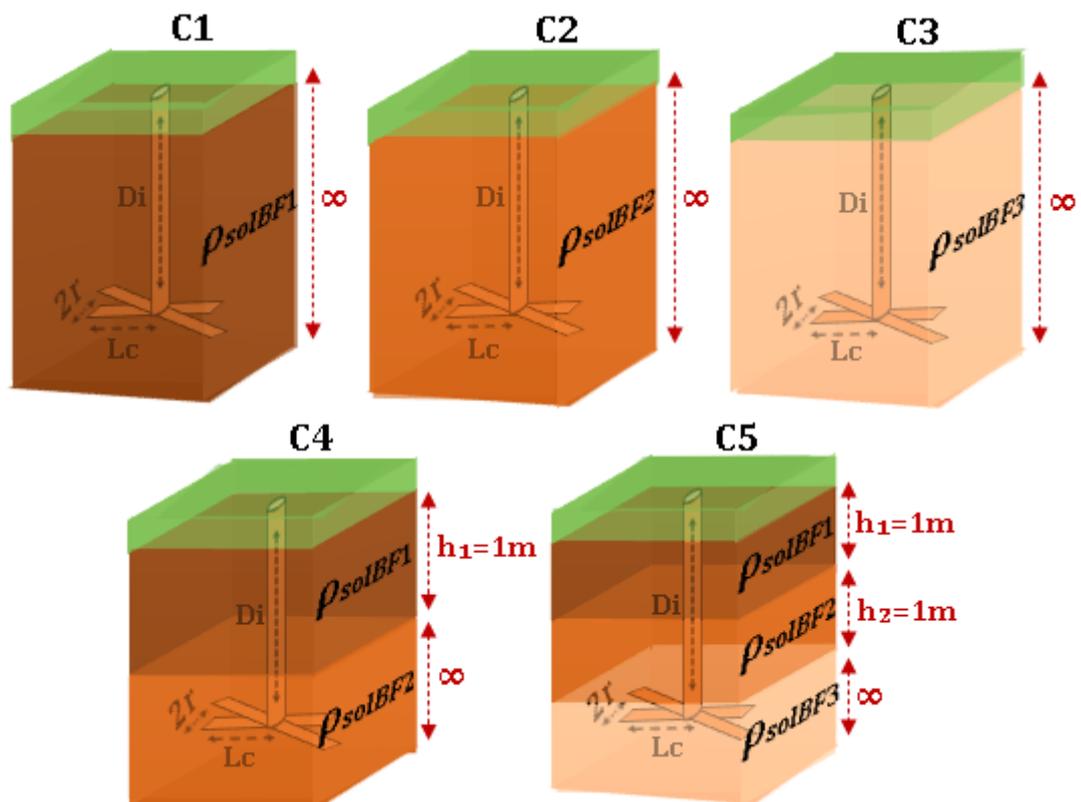


Figure III.18. Electrode croisée (patte d'oie) enterrée dans différentes topologies de sol.

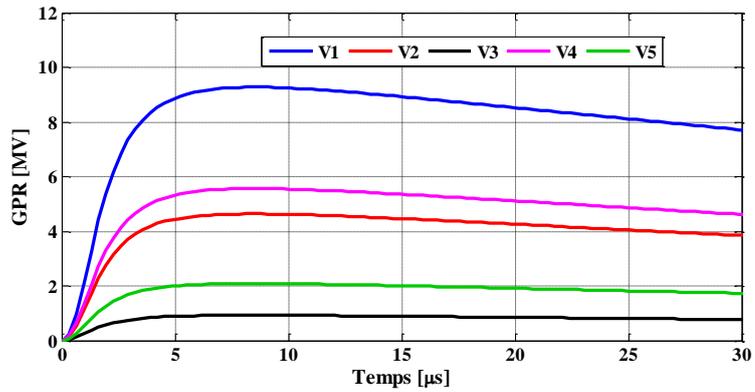
Remarques :

- ✚ Les deux formes d'onde des courants de foudre injectés sont celles utilisées dans le *paragraphe III.1.2*, **Figure III.8**, dont les paramètres de reproduction sont ceux du **Tableau III.1** ;
- ✚ Les expressions de **Visacro et Alipio** (VA) suscitées sont appliquées pour introduire la dépendance fréquentielle du sol afin de calculer l'*impédance de mise à la terre* et les *GPRs* où : dans l'étude menée en [III-21], chaque couche « *i* » du sol stratifié est modélisée comme ayant $\rho_{soli}(\omega)$ et $\varepsilon_{rsoli}(\omega)$ dépendants de la fréquence, cependant dans notre étude, nous modélisons les différentes résistivités des couches par une **résistivité apparente** équivalente dépendante de la fréquence tel que $\rho_a(\omega)$ et $\varepsilon_{rsol}(\omega)$.

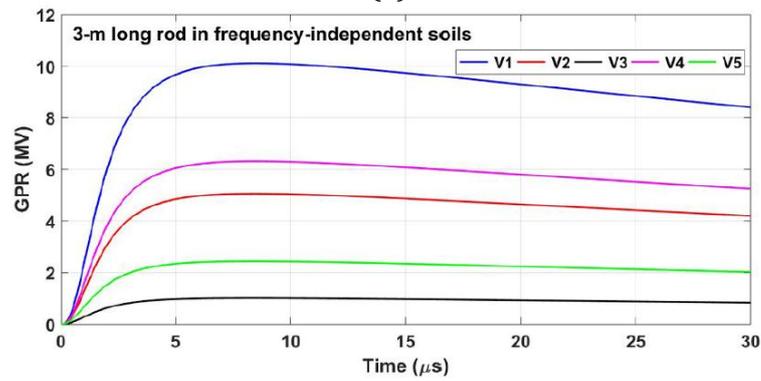
III.3.1. Résultats pour le cas de la mise à la terre en piquet vertical

Les formes d'onde transitoires des *GPRs*, nos résultats et ceux publiés en [III-21], pour le piquet vertical enfoui dans des sols (*homogènes ou stratifiés*) indépendants et dépendants de la fréquence, sont montrées sur les **Figure III.19** et **III.20**, obtenues pour le 1^{er} *arc* et l'*arc subséquent* du courant de foudre, respectivement.

- D'abord, nous affirmons une concordance très acceptable entre nos résultats de calcul et ceux publiés en allure et en ordre de grandeurs, vu les différences entre les modèles utilisés (*full wave* et la *théorie des lignes*) et les erreurs éventuelles qui peuvent être causés par l'utilisation de la transformée de Fourier (direct et inverse) ;
- En outre, les *GPRs* obtenus dans le cas **V₁** présentent les pics de tension les plus élevés en raison de la résistivité la plus élevée du sol (1000 $\Omega.m$). Nous pouvons voir qu'une **nette réduction** est obtenue dans la valeur maximale des *GPRs* lorsque le sol est considéré dépendant de la fréquence par rapport aux résultats obtenus avec les sols indépendants de la fréquence. Ces réductions sont **plus prononcées** lorsque l'*arc subséquent* du courant de foudre est injecté au sommet de l'électrode verticale (**Figure III.20**), notamment pour les *sols homogènes* de *résistivités élevées* et *modérées* (cas **V₁** et **V₂**) ainsi que pour le *sol stratifié bicouche* (cas **V₄**) possédant les mêmes résistivités (1000 et 500 $\Omega.m$). Cela est dû à l'abondance dans le contenu fréquentiel de l'*arc subséquent* de fréquences plus élevées (*temps de montée plus court*) par rapport à celui du 1^{er} *arc*. En conséquence, plus que les **fréquences** sont **plus élevés** et les **résistivités** sont plus ou moins **grandes** l'effet de la dépendance fréquentielle des paramètres du sol est **plus significatif** (mêmes remarques obtenues avec les résultats de l'application traitée dans le *paragraphe III.1.2*).

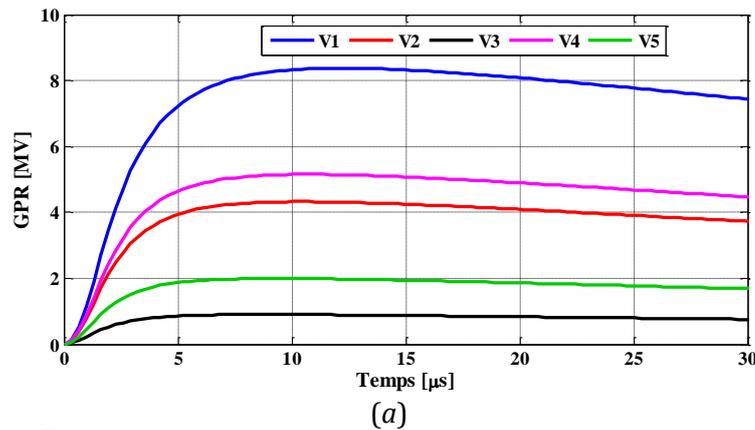


(a)

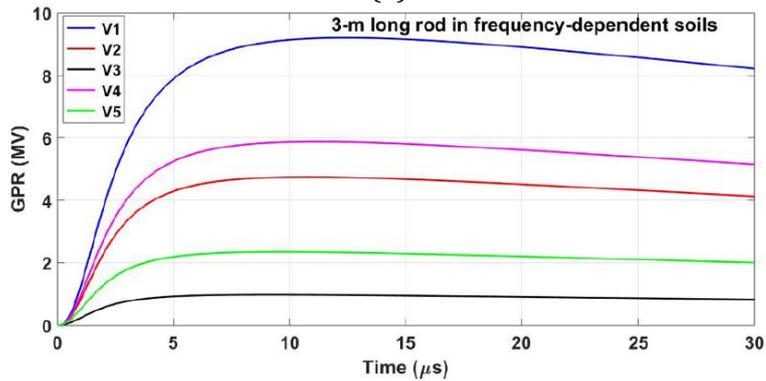


(b)

1- Sol indépendant de la fréquence.



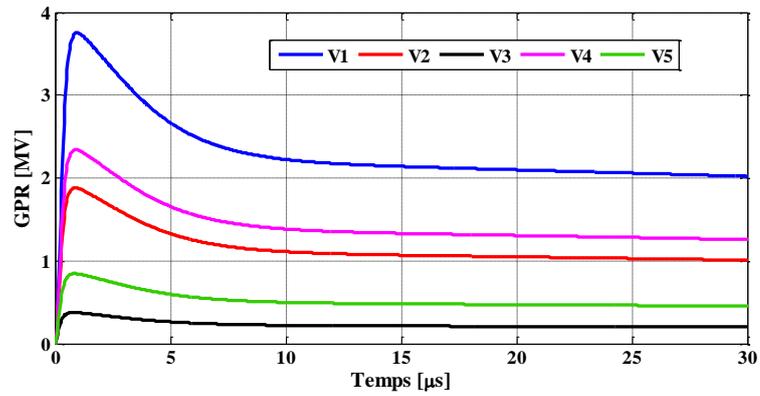
(a)



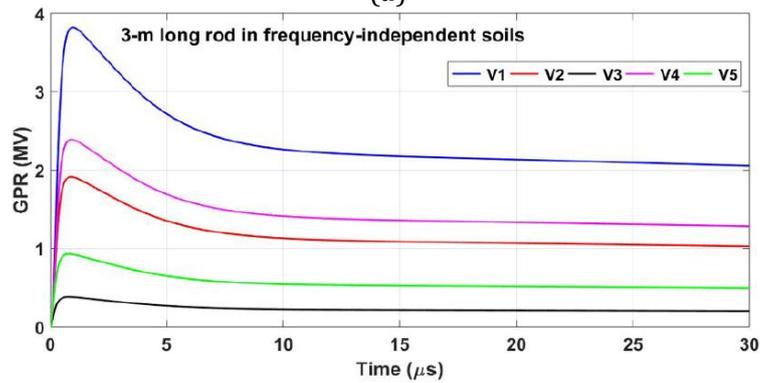
(b)

2- Sol dépendant de la fréquence.

Figure III.19. Les formes d'onde des GPRs pour le piquet vertical pour différentes topologies du sol, obtenues avec le 1^{er} arc : (a) Nos résultats de calcul - (b) Résultats publiés [III-21].

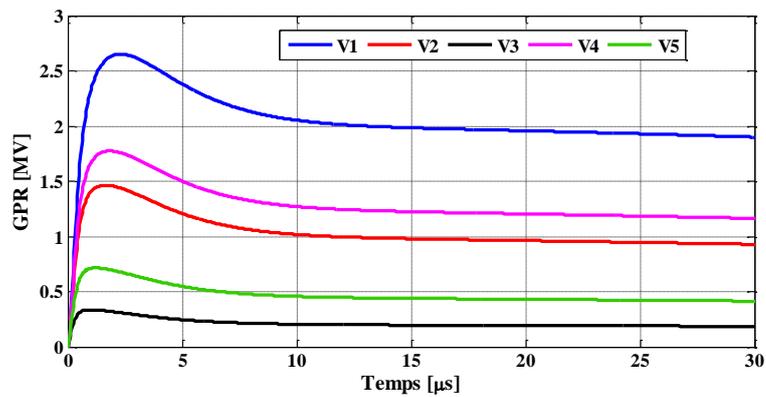


(a)

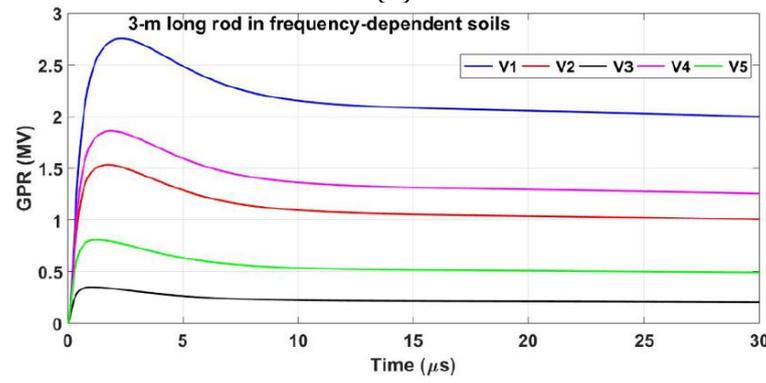


(b)

1- Sol indépendant de la fréquence.



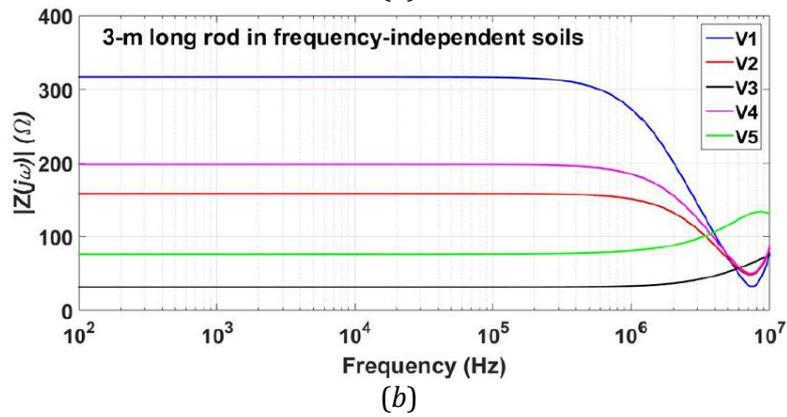
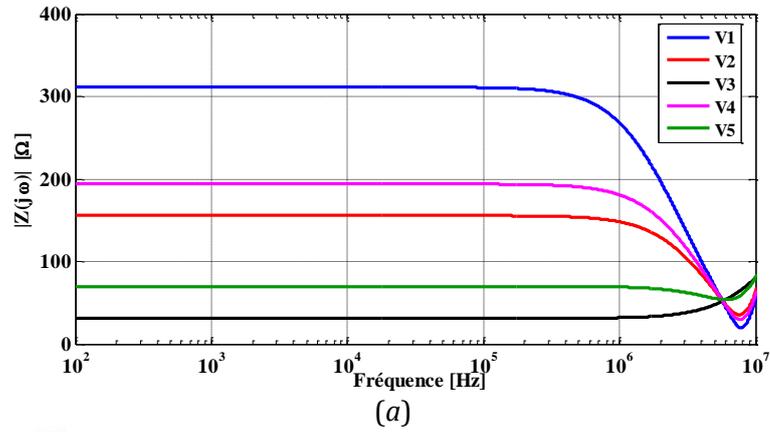
(a)



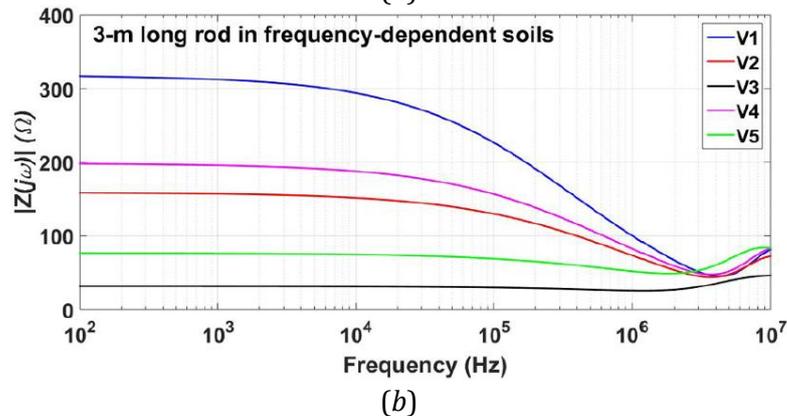
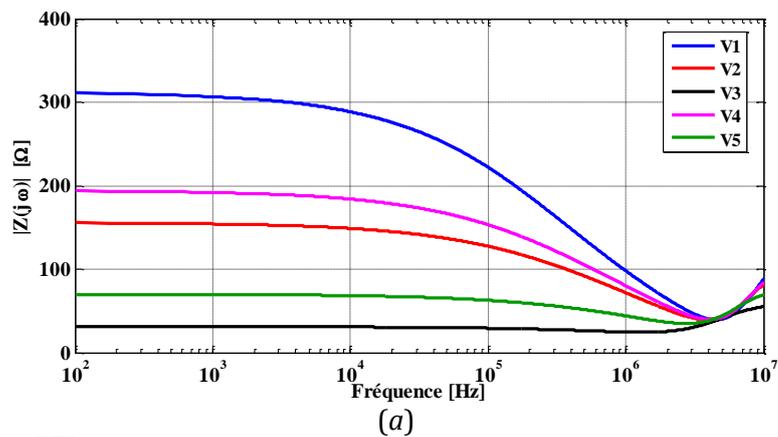
(b)

2- Sol dépendant de la fréquence.

Figure III.20. Les formes d'onde des GPRs pour le piquet vertical pour différentes topologies du sol, obtenues avec l'arc subséquent : (a) Nos résultats de calcul - (b) Résultats publiés [III-21].



1- Sol indépendant de la fréquence.



2- Sol dépendant de la fréquence.

Figure III.21. L'impédance harmonique $|Z(\omega)|$ du piquet vertical pour différentes topologies du sol : (a) Nos résultats de calcul - (b) Résultats publiés [III-21].

Effectivement, cet effet est *moins prononcé*, comme est observé dans les GPRs obtenus aux cas **V₃** (*résistivité faible* : 100 $\Omega \cdot m$), notamment lors de l'injection du courant du 1^{er} arc ;

- D'autre part, pour les deux **sols stratifiés**, la présence de couches à *haute résistivité* au-dessus d'une couche à *faible résistivité* (le cas **V₅** par rapport au cas **V₄**) a un **très fort impact** sur la forme d'onde du GPR où la *valeur de crête* est moins que la moitié.

D'autre part, les modules des **impédances** de mise à la terre du piquet vertical enfoui dans des sols (*homogènes ou stratifiés*) indépendants et dépendants de la fréquence, nos résultats et ceux publiés en [III-21], sont présentées sur la **Figure III.21**, respectivement.

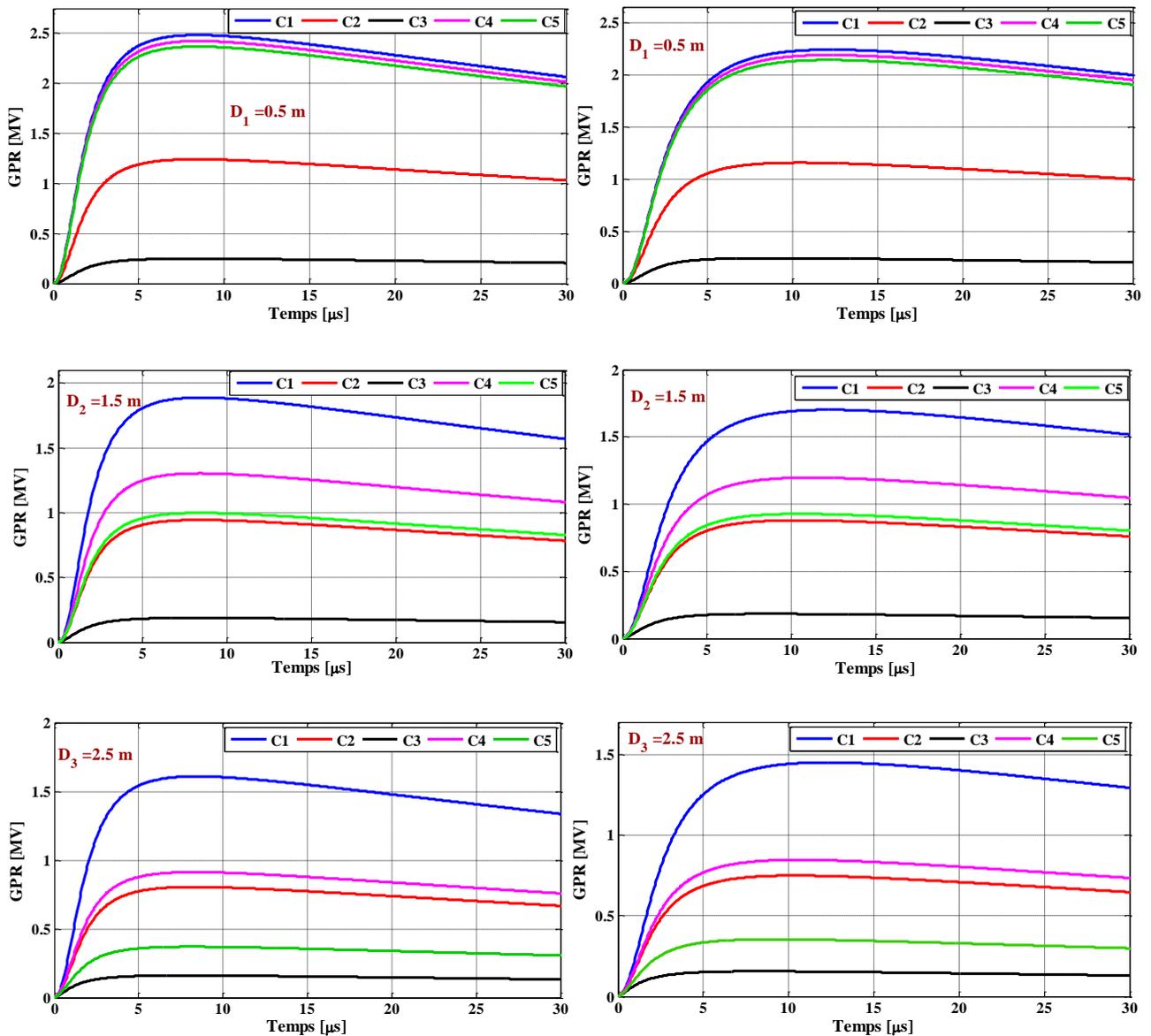
- Comme le montre cette figure, la prise en compte de la *dépendance fréquentielle* des paramètres du sol n'a aucun effet sur l'impédance de mise à la terre **basse fréquence** jusqu'à des fréquences ≈ 10 kHz. Cependant, elle conduit à une *variation remarquable* de l'impédance de mise à la terre à des fréquences plus élevées, *en particulier* pour les sols de **résistivité plus élevée**.
- Nous observons que pour les deux sols indépendants et dépendants de la fréquence, l'impédance de mise à la terre est **purement résistive** aux basses fréquences et est égale à ce que l'on appelle la *résistance basse fréquence* **R_{BF}**, qui est proportionnelle à la résistivité du sol. Au-dessus d'une certaine fréquence, appelée *fréquence caractéristique* «**f_c**», l'impédance de mise à la terre peut être **inductive** ou **capacitive**, selon la *fréquence*, la *longueur de l'électrode* et la *valeur des paramètres du sol* [III-25]. D'après les auteurs en [III-21], la valeur de **f_c** dépend de la *longueur du piquet*, de la *résistivité du sol* à basse fréquence et de la *teneur en eau* du sol.
- Comme nous le voyons, la valeur de la fréquence **f_c** d'un piquet vertical est **plus élevée** pour les sols *indépendants de la fréquence* dans tous les cas étudiés. Nous remarquons que la *dépendance fréquentielle* du sol fait reculer la valeur de la *fréquence caractéristique* **f_c** pour les **5 cas** traités (**V₁** à **V₅**) ce qui provoque une **diminution prématurée** de l'impédance $|Z(\omega)|$ (*tendance vers un comportement capacitif*) par rapport au sol indépendant de la fréquence. Cela est plus clair pour les *sols les plus résistifs* comme nous l'avons déjà mentionné plus haut.

III.3.2. Résultats pour le cas de la mise à la terre en patte d'oie (croisée)

Vu que les auteurs en référence [III-21] n'ont pas communiqué les résultats pour les sols indépendants de la fréquence et ils ont présenté que les sols dépendants de la fréquence, nous se contentons de nos résultats de calcul réalisés pour les deux types de sols.

Initialement, les réponses transitoires des **GPRs** pour le cas de l'électrode croisée avec les profondeurs d'enfouissement **D₁**, **D₂** et **D₃** sont présentées sur les **Figures III.22** et **III.23** pour le 1^{er} arc et l'arc subséquent, respectivement, aussi bien pour les deux cas des sols indépendants ou dépendants de la fréquence et pour les différentes topologies suscitées (*sols homogènes ou stratifiés*).

- Un résultat général basé sur ces figures est que la couche où se trouve l'électrode croisée est le principal facteur influençant le pic de la forme d'onde du *GPR*. Par exemple, lorsque l'électrode se trouve à **D₃ = 2.5 m** de profondeur dans le sol, les cas **C₃** et **C₅** (ainsi **C₂** et **C₄**) ont presque la même forme d'onde du *GRP*.
- Nous pouvons observer que le **pic** du *GPR* est proportionnel à la **résistivité** de la **couche** où se trouve l'électrode, pour les deux arcs du courant injecté et pour des sols dépendants ou non de la fréquence. Par exemple :
 - ✚ Pour **D₁ = 0.5 m** l'électrode se trouve dans la 1^{ère} couche des sols stratifiés à 2 et à 3 couches (cas **C₄** et **C₅**) d'où des *GPRs très voisins* au cas du *sol homogène* le plus résistif (1000 Ω.m, le cas **C₁**) (ici la stratification n'a pas un grand effet) ;
 - ✚ Si **D₂ = 1.5 m** l'électrode se trouve dans la 2^{ème} couche des sols stratifiés (cas **C₄** et **C₅**) alors les *GPRs* pour le sol stratifié **bicouche** (**C₄**) sont *voisins et plus grand* à ceux du 2^{ème} cas du *sol homogène* (500 Ω.m, le cas **C₂**) car cette 2^{ème} couche est influencée par la 1^{ère} ayant une résistivité plus grande (1000 Ω.m). Tandis que, les *GPRs* pour le sol stratifié à **trois couches** (**C₅**) sont *plus proches* à ceux du 2^{ème} *sol homogène* (cas **C₂**) car la 2^{ème} couche est influencée aussi cette fois-ci par la 3^{ème} couche ayant une *faible résistivité* (100 Ω.m) qui a un impact sur la forme d'onde des *GPRs* (*diminution*) ;
 - ✚ Si **D₂ = 2.5 m** l'électrode se trouve dans la 2^{ème} couche du sol stratifié **bicouche** (cas **C₄**) et dans la 3^{ème} couche du sol stratifié à **trois couches** (cas **C₅**). Les *GPRs* pour le sol stratifié **bicouche** (**C₄**) sont *plus en plus voisins* à ceux du 2^{ème} *sol homogène* (cas **C₂**) car l'électrode est plus loin de la 1^{ère} couche (*moins d'influence*). Les *GPRs* pour le sol stratifié à **trois couches** (**C₅**) se rapprochent à ceux du 3^{ème} *sol homogène* (cas **C₃**, 100 Ω.m) car l'électrode se situe dans la 3^{ème} couche ayant la même résistivité, mais elle reste toujours influencée par les couches les plus hautes.
- Pareillement, nous signalons que l'effet de la *dépendance fréquentielle* des paramètres électriques du sol se traduit, comme pour le piquet vertical, par des **diminutions visibles** dans la valeur maximale des *GPRs*. Ces diminutions sont **plus exprimées** pour l'arc **subséquent** du courant de foudre et, surtout pour les sols les plus **résistifs**.



- sol indépendant de la fréquence -

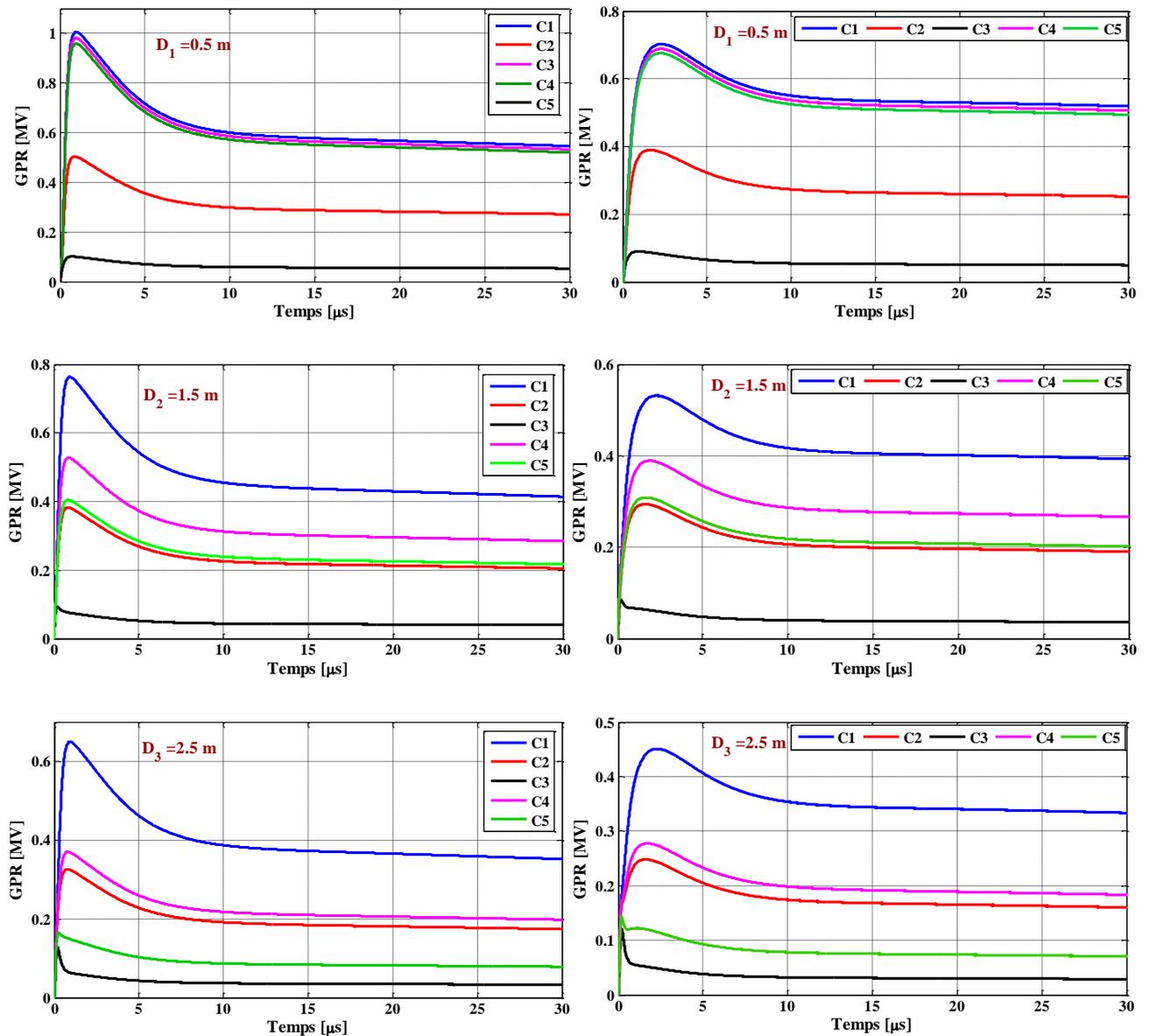
- sol dépendant de la fréquence -

Figure III.22. GPRs de l'électrode croisée pour différentes topologies du sol : pour le 1^{er} arc, avec $D_i = 0.5m, 1.5m$ ou $2.5m$.

- Aussi, nous constatons que l'accroissement de la profondeur d'enfouissement D_i provoque une diminution dans les GPRs pour tous les types du sol (homogène ou stratifié, dépendants de la fréquence ou non). Où, l'augmentation de la longueur de la *descende* de l'électrode croisée fait augmenter la quantité du cuivre utilisée et cela signifie une amélioration dans la conductivité du sol (augmentation de la conductance) et ainsi une réduction dans les GPRs.

Ensuite, nous illustrons sur la **Figure III.24**, les modules des *impédances* de mise à la terre de l'électrode croisée (patte d'oie) enfouie dans des sols (*homogènes ou stratifiés*)

indépendants et dépendants de la fréquence, pour les profondeurs d'enfouissement D_1 , D_2 et D_3 , respectivement.



- sol indépendant de la fréquence -

- sol dépendant de la fréquence -

Figure III.23. GPRs de l'électrode croisée pour différentes topologies du sol : pour l'arc subséquent, avec $D_i = 0.5m, 1.5m$ ou $2.5m$.

- Comme le montrent la **Figure III.24**, l'impédance de mise à la terre est considérablement influencée par la **position** de l'électrode croisée dans *une couche* du sol donnée.
- Pour $D_1 = 0.5 m$, l'électrode croisée est enfouie dans la première couche et son impédance n'est pas trop influencée par la structure du **sol stratifié** à 2 ou à 3 couches, en raison de la résistivité la plus élevée du sol dans la première couche ($1000 \Omega.m$), qui **prédomine** dans tous les cas (C1, C4 et C5).

- Pour la profondeur d'enfouissement D_2 , les cas C_2 et C_5 présentent presque la même impédance de mise à la terre et C_4 d'un degré moins (pour C_5 : la 2^{ème} couche est influencée par la 1^{ère} et 3^{ème} couches, une plus élevée et l'autre plus faible ; pour C_4 : la 2^{ème} couche est influencée que par la 1^{ère} couche la plus résistif), notamment aux fréquences les plus élevées ce qui se traduit par une réduction de l'effet des couches voisines.
- Pour la profondeur d'enfouissement D_3 , les impédances des cas C_2 et C_4 sont très proches car dans les deux cas l'électrode est située dans la même couche (c.-à-d. de même résistivité $500 \Omega \cdot m$). Il en va de même pour les cas C_3 et C_5 (résistivité pareil de $100 \Omega \cdot m$).

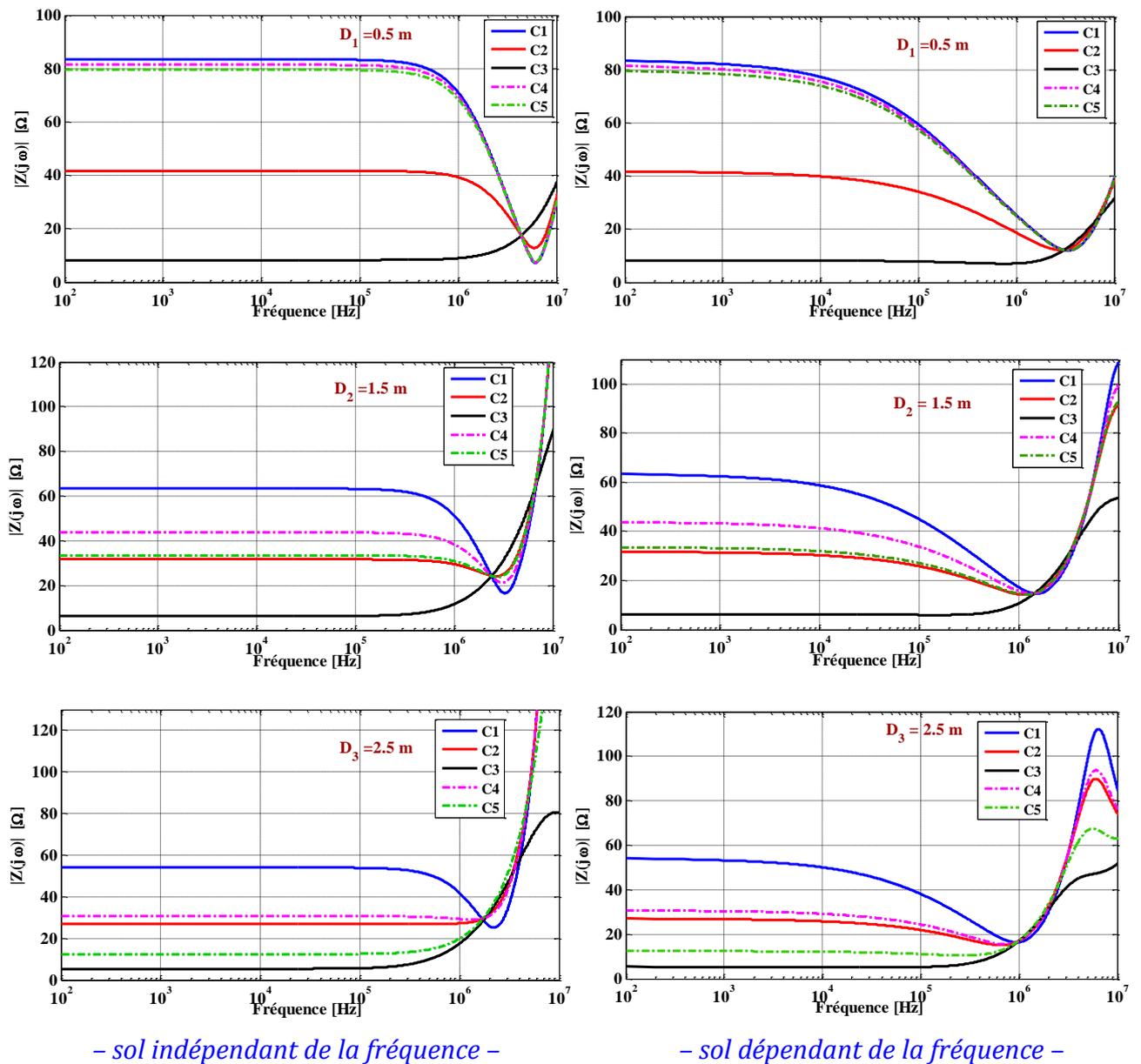


Figure III.24. L'impédance $|Z(\omega)|$ de l'électrode croisée pour différentes topologies du sol : pour $D_i = 0.5m, 1.5m$ ou $2.5m$.

- Comme le piquet vertical, la *dépendance fréquentielle* du sol fait diminuer la valeur de la *fréquence caractéristique* f_c ce qui conduit à une **diminution précoce** de l'impédance $|Z(\omega)|$ (*tendance vers un comportement capacitif*) par rapport au sol indépendant de la fréquence. Plus la profondeur d'enfouissement est plus grande le *comportement capacitif* change en *inductif* (pour D_2 et D_3). Cela est dû à notre avis à l'augmentation de la longueur de la descente de l'électrode croisée qui fait augmenter son inductance et par conséquent son effet aux fréquences les plus hautes (sauf le cas C_3 qui présente un comportement inductif pour tous les cas).
- Encore, nous remarquons que l'accroissement de la profondeur d'enfouissement D_i conduit à une réduction de l'impédance de mise à la terre aux basses fréquences (*résistance du sol basse fréquence* R_{BF}) pour tous les types du sol (*dû à l'augmentation de la conductance*). Dans les plus hautes fréquences, au contraire, nous constatons une élévation de l'impédance avec la profondeur, à cause de l'accroissement de l'*effet inductif* (augmentation de l'inductance).

En conclusion, les *paramètres du sol* de la couche dans laquelle l'électrode *croisée* est enterrée ont la *principale influence* sur son **impédance** dans le domaine fréquentiel (en particulier aux fréquences les plus élevées), alors que cela n'est pas vrai pour l'impédance du *piquet vertical* qui est **plus sensible** aux couches du sol.

La valeur du pic de la forme d'onde des **GPRs** pour l'électrode croisée est en fonction de la couche où elle se trouve et presque indépendante de la configuration du sol (homogène ou stratifié). Alors la prise en compte des couches du sol a un impact plus important sur les **GPRs** de l'électrode verticale que ceux de l'électrode croisée.

III.4. Étude des GPRs lors de l'impact d'un courant de foudre sur une Tour munie de sa mise à la terre pour des sols stratifiés et dépendants de la fréquence

L'application finale de ce chapitre est une application plus globale qui consiste en l'étude d'un impact direct d'une onde de foudre sur le sommet d'une **Tour** munie de sa **grille** de mise à la terre, voir la **Figure III.25**. Cette **Tour** symbolise, pour nous, un pylône, une éolienne, une colonne ferroviaire électrifiée, ...etc. c.-à-d. tout système électrique où les mises à la terre lui constituent une partie importante. Nous proposons pour la grille de terre une forme approchée (**Figure III.25**) que nous l'avons inspiré des formes usuelles utilisées pour la protection des pylônes, tours de télécommunication ou des éoliennes (voir **Figure III.26**).

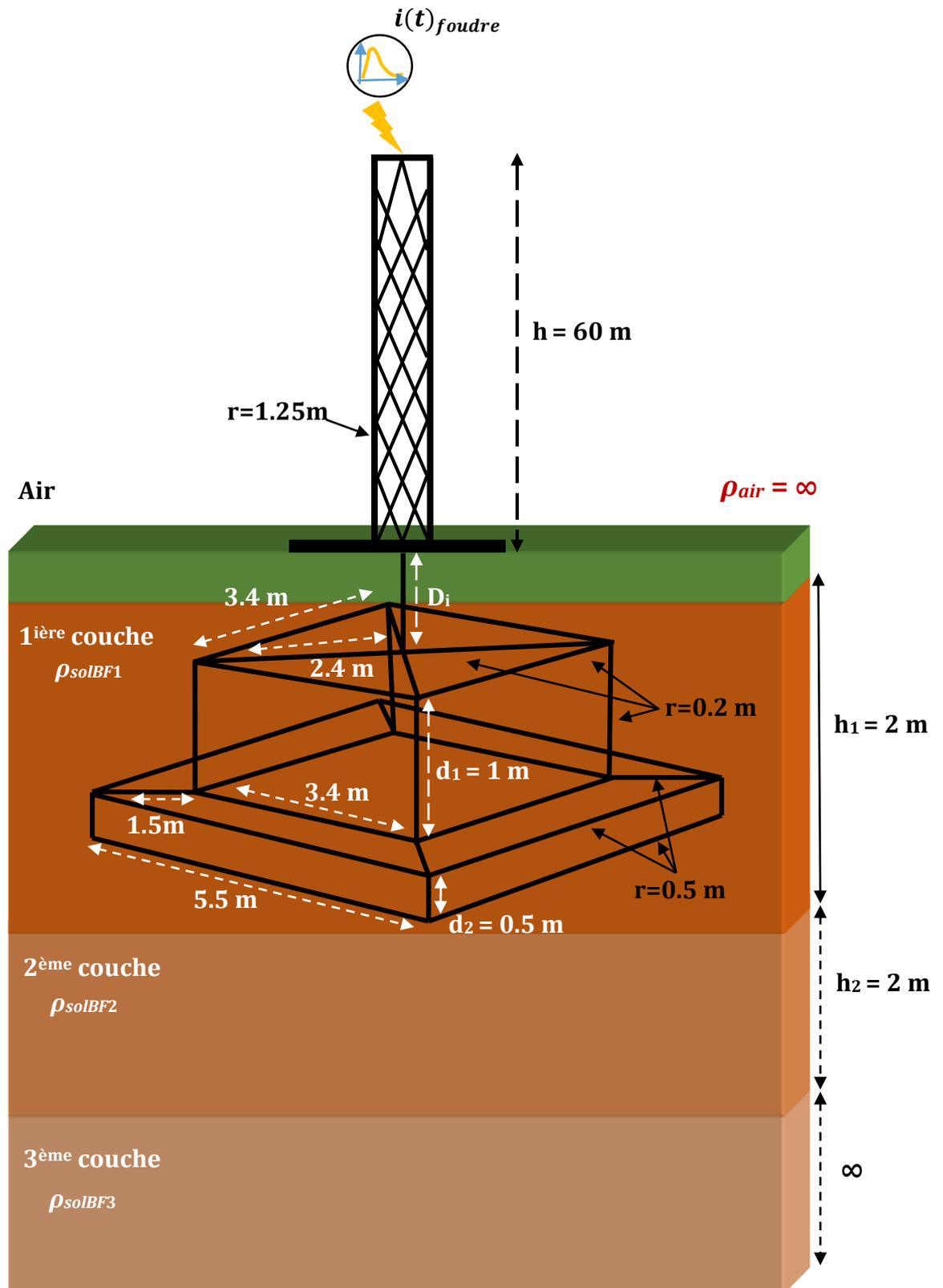
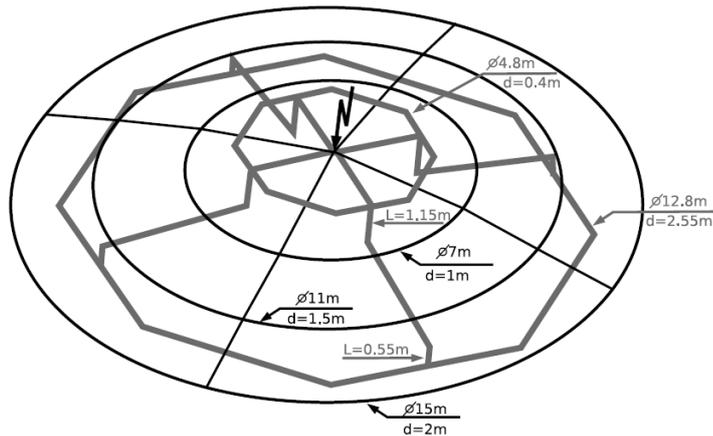


Figure III.25. Géométries de la Tour et de sa grille de mise à la terre dans un sol stratifié.

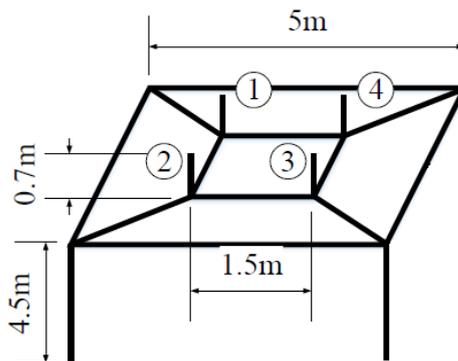
Nous traitons *quatre topologies* du sol : *deux sols homogènes* de résistivités ρ_{solBF1} ou ρ_{solBF2} , un *sol stratifié bicouche* et enfin un *sol stratifié à trois couches*. Ces topologies

étudiées sont symbolisées respectivement par G_1 , G_2 , G_3 et G_4 et regroupées dans le **Tableau III.7**. La Tour est agressée par un courant de foudre (*premier arc*) tiré de la référence [III-26], dont les paramètres utilisés dans la reproduction de cette onde sont regroupés dans le **Tableau III.8**. La forme du courant est présentée sur la **Figure III.27**.

En outre, et afin de prendre en compte la dépendance fréquentielle des paramètres du sol avec la fréquence nous adoptons le modèle de **Smith et Longmire [III-6]** exposé dans le *chapitre II*, expressions (II.87) et (II.88). Dans le cas du sol à paramètres indépendants de la fréquence, la permittivité relative $\epsilon_r = 10$ est considérée pour toutes les couches des sols stratifiés.



(a) Géométrie du système de mise à la terre d'une éolienne [III-1].



(b) Géométrie du système de mise à la terre d'une Tour dans une Station de Base Radio [III-27].

Figure III.26. Exemples de géométries des systèmes de mise à la terre.

G_1	<i>Sol homogène</i> : $\rho_{solBF1} = 3000 \Omega.m$
G_2	<i>Sol homogène</i> : $\rho_{solBF2} = 5000 \Omega.m$
G_3	<i>Sol stratifié à 2 couches</i> : $\rho_{solBF1} = 3000 \Omega.m$, $\rho_{solBF2} = 5000 \Omega.m$
G_4	<i>Sol stratifié à 3 couches</i> : $\rho_{solBF1} = 3000 \Omega.m$, $\rho_{solBF2} = 5000 \Omega.m$, $\rho_{solBF3} = 2000 \Omega.m$

Tableau III.7. Les différentes topologies du sol traitées.

Onde de courant	
	$i(t) = I_0 (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t))$
	$T_1 = 5 \mu\text{s}$ (temps de montée)
	$T_2 = 50 \mu\text{s}$ (durée d'impulsion)
	$I_p = 30 \text{ kA}$ (valeur crête du courant)
	$\alpha = 0.69/T_2$
	$\beta = 2.2/T_1$
	$I_0 = I_p / [1 + (\frac{\alpha}{\beta}) \cdot (\ln(\frac{\alpha}{\beta}) - 1)]$

Tableau III.8. Paramètres de reproduction du 1^{er} arc du courant de foudre [III-26].

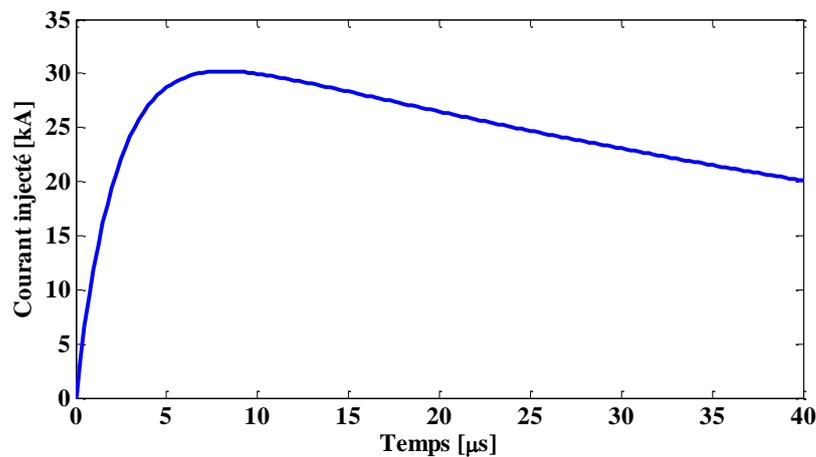


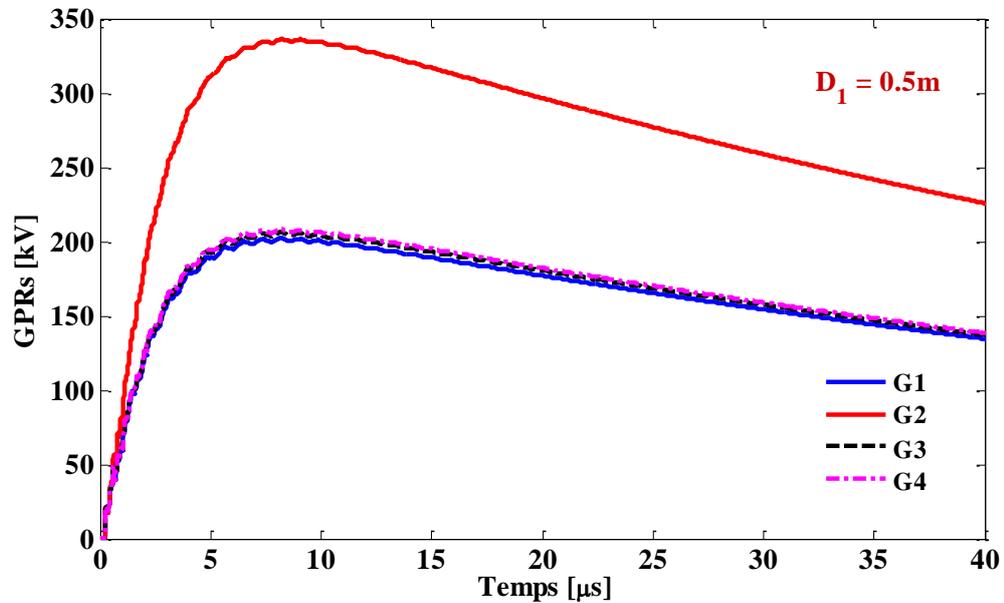
Figure III.27. Forme d'onde du courant de foudre injecté au sommet de la Tour.

Pour les 4 topologies du sol nous examinons deux profondeurs d'enfouissement de la grille de mise à la terre : $D_1 = 0.5 \text{ m}$ et $D_2 = 2 \text{ m}$ et, à titre indicatif, nous avons collectionné dans le **Tableau III.9**, les résistivités apparentes ρ_a des sols stratifiés et les méthodes de calcul utilisées pour les deux profondeurs examinées.

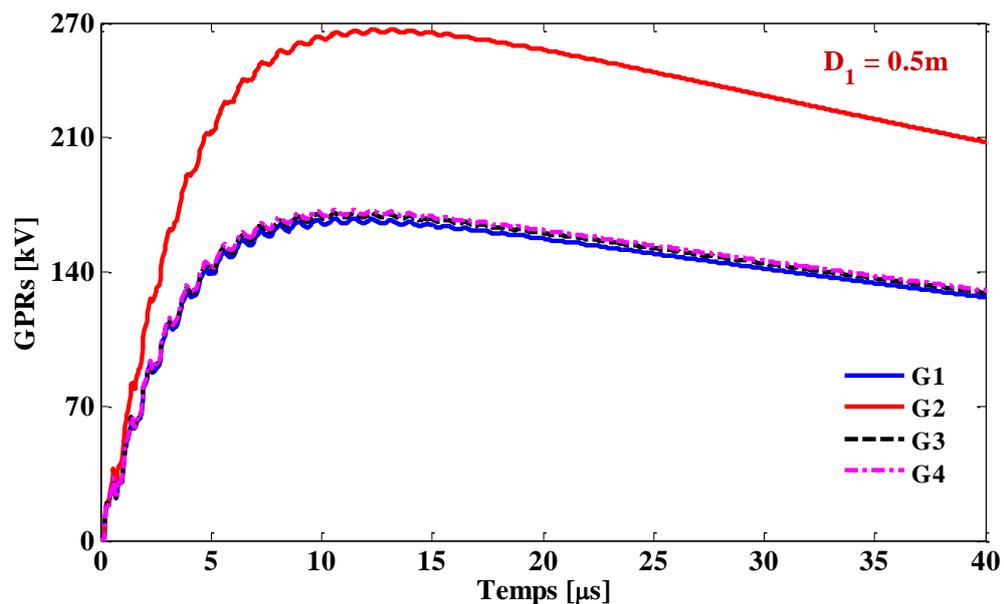
	Sol stratifié bicouche	Sol stratifié à 3 couches
$D_1 = 0.5 \text{ m}$ (profondeur) $a = 1 \text{ m}$ (espacement)	Méthode de Wenner $\rho_a = 3059 \Omega \cdot \text{m}$	2^{ème} Méthode de O. E. Gouda $\rho_a = 3088 \Omega \cdot \text{m}$
$D_2 = 2 \text{ m}$ (profondeur) $a = 3 \text{ m}$ (espacement)	Méthode de Wenner $\rho_a = 3594 \Omega \cdot \text{m}$	2^{ème} Méthode de O. E. Gouda $\rho_a = 3224 \Omega \cdot \text{m}$

Tableau III.9. Les différentes résistivités des sols stratifiés.

Nous montrons sur les **Figures III.28** et **III.29**, les **GPRs** obtenus pour des sols indépendants et dépendants de la fréquence pour les deux profondeurs D_1 et D_2 , respectivement.



a- Sol indépendant de la fréquence.



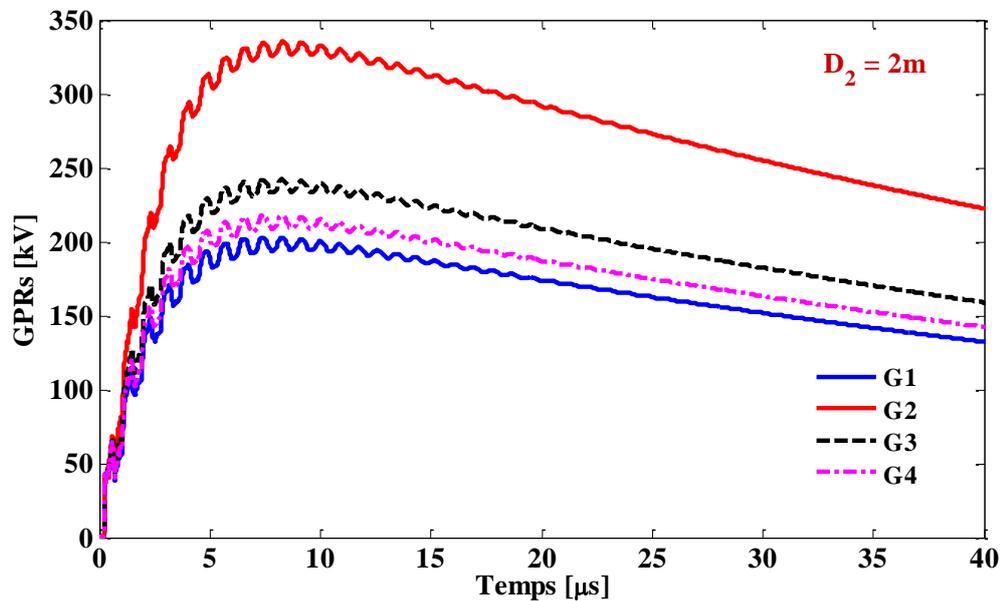
b- Sol dépendant de la fréquence.

Figure III.28. Les formes d'onde des GPRs pour une profondeur $D_1 = 0.5 \text{ m}$.

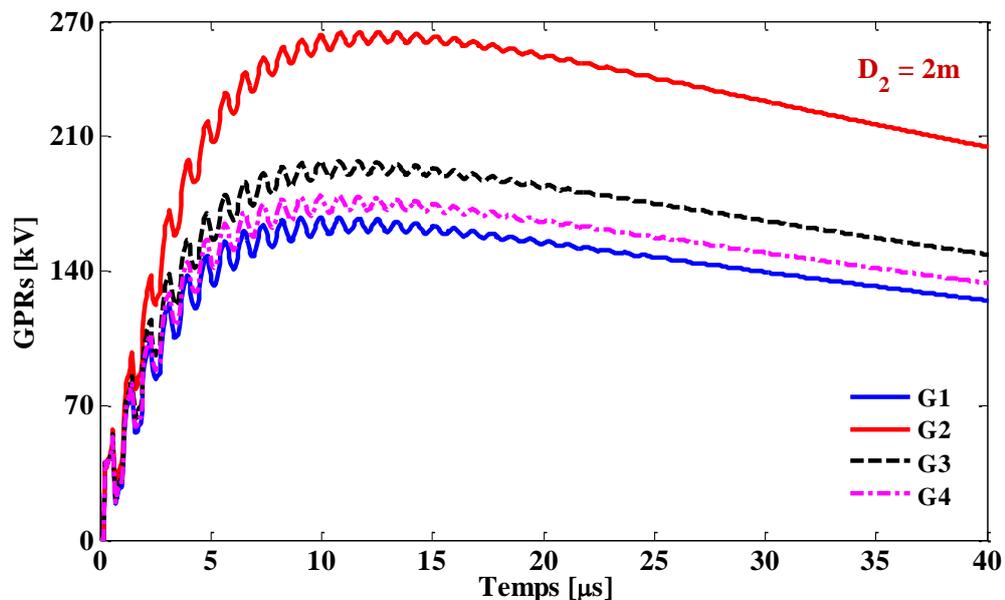
D'après les résultats obtenus nous apercevons que :

- ✚ Lorsque la profondeur $D_1 = 0.5 \text{ m}$, la grille de terre (de hauteur totale de 1.5 m sans compté la descente de profondeur D_1) se trouve **entièrement** dans la **1^{ère} couche** des sols stratifiés

(G_3 et G_4), dont son épaisseur $h_1 = 2m$. Dans ce cas les *GPRs* des deux sols stratifiés sont analogues à celui du *1^{ier} sol homogène* (G_1) de résistivité $\rho_{solBF1} = 3000 \Omega.m$. Donc, le *GPR* est proportionnel à la *résistivité* de la *couche* où se trouve la grille de terre (même résultat pour l'électrode croisée traitée auparavant). Pour cette profondeur D_1 et vu l'épaisseur de la *1^{ière}* couche, la stratification n'a pas un grand effet pour ce cas.



a- Sol indépendant de la fréquence.



b- Sol dépendant de la fréquence.

Figure III.29. Les formes d'onde des *GPRs* pour une profondeur $D_2 = 2 m$.

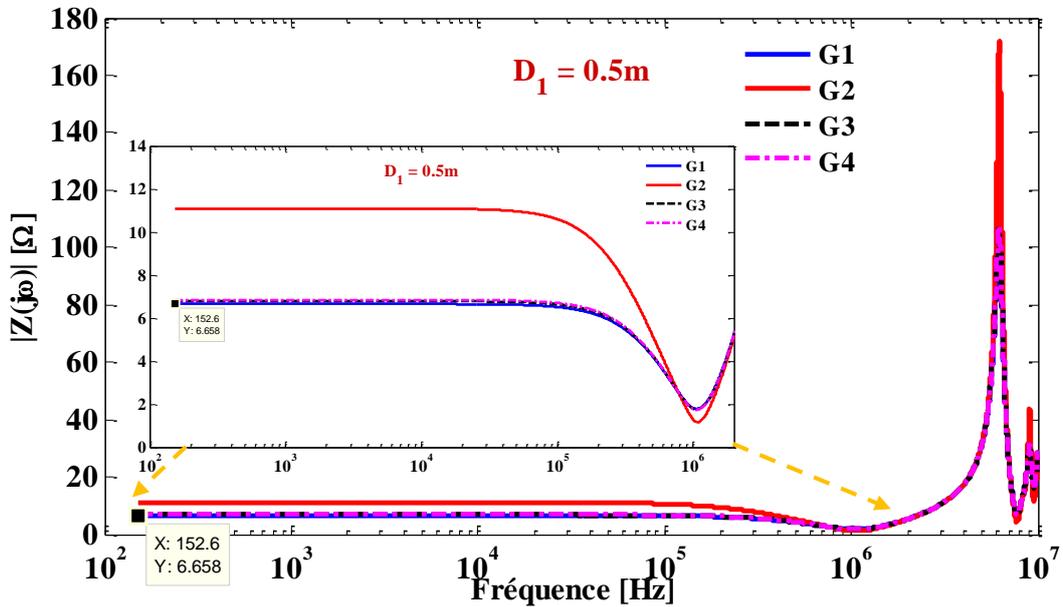
- ✚ Quand la profondeur $D_2 = 2 \text{ m}$, la grille de terre se trouve à la surface de la **2^{ème} couche** des sols stratifiés (la descente est dans la **1^{ère} couche** : $D_2 = h_1 = 2m$). Dans ce cas, l'effet des autres couches a commencé d'apparaître. Le **GPR** du *sol stratifié bicouche* (**G3**) a pris des **valeurs plus grandes** par rapport au **1^{er} sol homogène** (**G1**) en raison de l'effet de la résistivité élevée de la **2^{ème} couche** ($\rho_{\text{solBF2}} = 5000 \Omega.m$) dans laquelle nous avons fait dévaler la grille à sa surface. Le **GPR** du *sol stratifié à trois couches* (**G4**) a aussi pris des valeurs plus grandes mais pas autant que le *sol bicouche* (**G3**), car il est influencé par la résistivité de la **3^{ème} couche** ($\rho_{\text{solBF3}} = 2000 \Omega.m$) qui est plus faible.
- ✚ L'effet de la **dépendance fréquentielle** des paramètres électriques du sol sur les **GPRs** (pour les deux profondeurs) est bien *visible*, compte tenu des *valeurs élevées* des résistivités des sols. Une bonne diminution des *valeurs maximales* qui peut atteindre jusqu'à 24 % pour les sols les plus résistifs (voir **Figures III.28** et **III.29**). Ce résultat, à notre avis, est dû à la **diminution importante** de la résistivité du sol avec l'**augmentation** de la fréquence (voir **paragraphe III.1.1**) ce qui fait réduire les *valeurs maximales* des **GPRs** (équivalentes aux *hautes fréquences*).
- ✚ Le petit changement dans la longueur de la descente de la grille ($D_2 = 2 \text{ m}$), a causé plus d'ondulations dans les **GPRs** relativement au **1^{er} cas** ($D_1 = 0.5 \text{ m}$) avec une *diminution négligeable* dans l'amplitude.

Afin de compléter cette étude, nous proposons sur les **Figures III.30** et **III.31**, les modules des **impédances harmoniques** $Z(\omega)$ de la grille de terre obtenues pour des sols indépendants et dépendants de la fréquence pour les deux profondeurs **D₁** et **D₂**, respectivement.

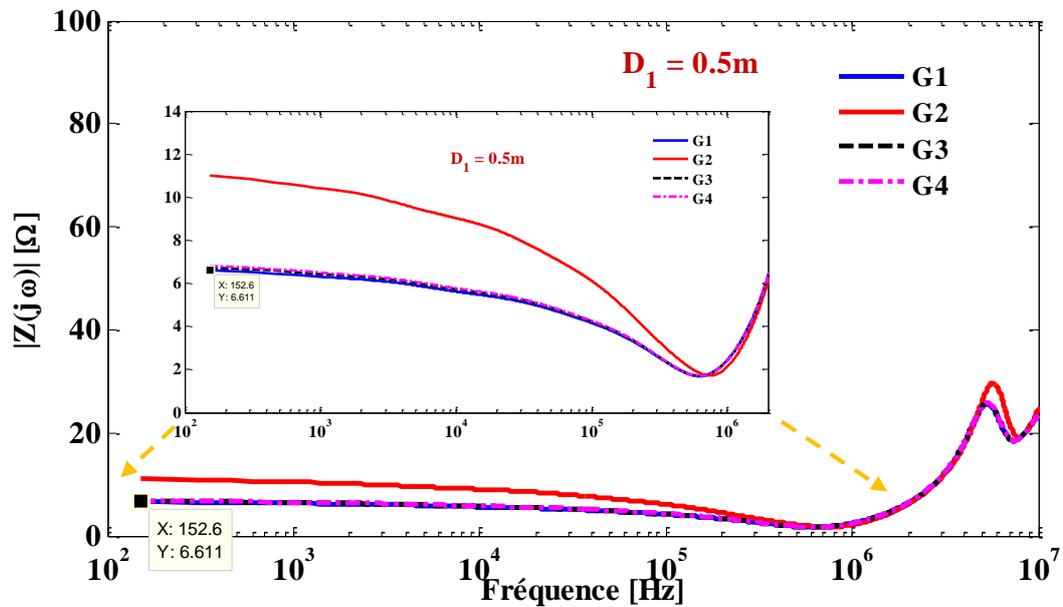
D'après ces résultats nous observons ce qui suit :

- ❖ La prise en compte de la *dépendance fréquentielle* des paramètres du sol n'a pas un effet remarquable sur l'impédance de la grille de terre **basse fréquence**. Cependant, elle provoque des **diminutions bien visibles** à des fréquences plus élevées (à partir de la *fréquence f_c*), en particulier pour les sols les plus résistifs. C'est une *conséquence* de la *diminution* de la résistivité avec l'*augmentation* de la fréquence pour les sols qui lui dépendent.
- ❖ La *dépendance fréquentielle* du sol *baisse* la valeur de la *fréquence caractéristique f_c* à moins de 1 kHz au lieu de 100 kHz pour les sols indépendants de la fréquence. A partir de cette fréquence le comportement de l'impédance harmonique change du *résistif* au *capacitif* ensuite il devient *inductif*.

- ❖ Pour le 2^{ème} sol homogène (G_2), qui est le plus résistif, l'impédance exprime des pics à partir d'une fréquence d'entourage 4MHz dans le cas où il est indépendant de la fréquence.
- ❖ Pour la profondeur $D_1 = 0.5 m$, l'impédance harmonique des sols stratifiés (G_3 et G_4) est pareille à celle du sol 1^{er} sol homogène (G_1), résultat prévisible (même résultat pour les GPRs).

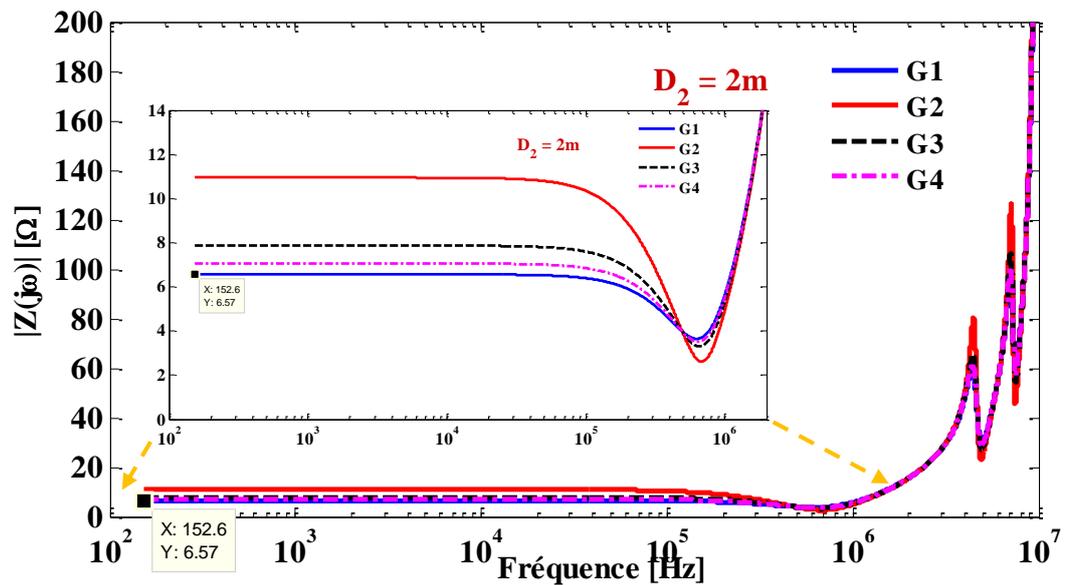


a- Sol indépendant de la fréquence.

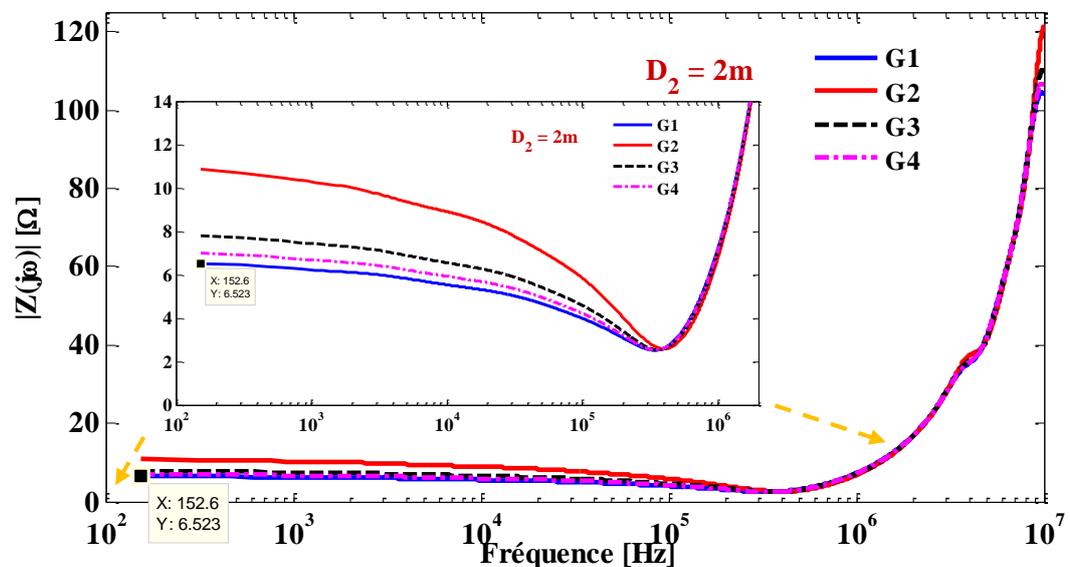


b- Sol dépendant de la fréquence.

Figure III.30. L'impédance harmonique de la grille de terre (profondeur $D_1 = 0.5 m$).



a- Sol indépendant de la fréquence.



b- Sol dépendant de la fréquence.

Figure III.31. L'impédance harmonique de la grille de terre (profondeur $D_2 = 2\text{ m}$).

- ❖ Pour la profondeur $D_2 = 2\text{ m}$, l'impédance harmonique en basses fréquences, pour les sols stratifiés (G_3 et G_4), prend des valeurs plus grandes ($7.9\ \Omega$ et $7\ \Omega$ respectivement pour G_3 et G_4) à celle pour le 1^{er} sol homogène (G_1), égale à $6.5\ \Omega$.
- ❖ En hautes fréquences, tous les sols homogènes et stratifiés conduisent à des impédances pareilles on dirait bien que la stratification n'a pas d'effet, sauf sur les pics où on l'aperçoit.

Remarque :

Nous signalons que les paramètres linéiques de la Tour ont été calculés en utilisant la méthode d'A. AMETANI et al. [III-28] employée pour le cas des conducteurs aériens verticaux.

Conclusion

Le rôle des systèmes de mise à la terre est de dévier les courants de défauts dans le sol pour protéger les individus et le matériel électrique. Malheureusement, le comportement et l'efficacité des mises à la terre dépendent de plusieurs facteurs, y compris la *résistivité du sol* et sa *dépendance aux variations de la fréquence*. De ce fait, l'hétérogénéité du sol, où les différentes couches possèdent des valeurs parfois très différentes en épaisseurs et en résistivités, ainsi la dépendance de ces résistivités avec la fréquence peuvent avoir une grande influence sur les **GPRs** produits lors d'un impact du courant de foudre par exemple sur une structure filaire équipée de sa mise à la terre.

Donc, les systèmes de mise à la terre, pour une structure de sol stratifié multicouche, doivent être soigneusement conçus pour des raisons de protection et de sécurité. Nous avons constaté que la *résistivité* du sol dans chaque couche, ainsi que les *épaisseurs* des couches supérieures du sol, influencent le comportement de ce réseau de terre. En outre, la prise en compte de la dépendance fréquentielle des paramètres du sol conduit à des valeurs nettement *plus faibles* pour les maximums des *GPRs* et les *impédances harmoniques* en hautes fréquences que celles estimées pour des sols considérés indépendants de la fréquence.

Une étude pareille est cruciale car elle permet au concepteur d'obtenir des variations plus réalistes des *GPRs* et de $Z(\omega)$ afin de prévoir les scénarios possibles dans tel ou tel sol, dans le but d'adapter les formes et les dimensions des mises à la terre selon la constitution des terrains pour une meilleure protection.

Références Bibliographiques - Chapitre III

- [III-1] **Damir CAVKA, Nicolas MORA and Farhad RACHIDI**, «*A Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems*», IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, VOL. 56, NO. 1, February 2014.
- [III-2] **R. C. BIGELOW and W. R. EBERLE**, «*Empirical predictive curves for resistivity and dielectric constant of earth materials: 100 Hz to 100 MHz*», Open-File, Report 83-911, U.S. Geological Survey, 1972.
- [III-3] **J. HE, R. ZENG, and B. ZHANG**, «*Methodology and Technology for Power System Grounding*», Singapore: Wiley, 2013, p. 35.
- [III-4] **J. H. SCOTT, R. D. CARROLL, and D. R. CUNNINGHAM**, «*Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements*», Sensor and Simulation Note 116, Kirtland AFB, NM, Aug. 1964.
- [III-5] **J. H. SCOTT**, «*Electrical and magnetic properties of rock and soil*», Theoretical Notes, Note 18, U.S. Geological Survey [Online], May 1966, Available: <https://www.ece.unm.edu/summa/notes/Theoretical.html>
- [III-6] **C. L. LONGMIRE and K. S. SMITH**, «*A universal impedance for soils*», Defense Nuclear Agency, Santa Barbara, CA, USA, *Topical Rep.*, Jul. 1–Sep. 30, 1975.
- [III-7] **M. MESSIER**, «*Another soil conductivity model*», internal rep., JAYCOR, Santa Barbara, CA, 1985.
- [III-8] **F. S. VISACRO and C. M. PORTELA**, «*Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems*», presented at the Symposium High Voltage Eng., Braunschweig, Germany, 1987.
- [III-9] **C. M. PORTELA**, «*Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior*», in Proc. IEEE Int. Symposium Electromagnetic Compatibility, 1999, vol. 2, pp. 1004–1009.
- [III-10] **S. VISACRO and R. ALIPIO**, «*Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes*», IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- [III-11] **F. HEIDLER**, «*Traveling Current Source Model for LEMP Calculation*», In 6th Symposium and Technical Exhibition Electromagnetic Compatibility, pp. 157-62, Zurich, Switzerland, 1985.
- [III-12] **F. RACHIDI, W. JANISCHEWSKYJ, A. M. HUSSEIN, C. A. NUCCI, S. GUERRIERI, B. KORDI, and J-S CHANG**, «*Current and Electromagnetic Field Associated With Lightning-Return Strokes to Tall Towers*», IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, N° 3, August 2001.
- [III-13] **L. GRCEV and F. DAWALIBI**, «*An electromagnetic model for transients in grounding systems*», IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 4, pp. 1773–1781, Oct. 1990.

- [III-14] **D. CAVKA, D. POLJAK, V. DORIC, and S. ANTONIJEVIC**, «*Some computational aspects of using current and voltage sources in electromagnetic models of lightning return strokes*», Presented at the Int. Conf. Lightning Protection, Vienna, Austria, Sep. 2012.
- [III-15] **H. R. SEEDHER and J. K. ARORA**, «*Estimation of two-layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions* », IEEE Trans. Power Deliv., PWDR 7, (3), pp. 1213–1217, 1992.
- [III-16] **A. PUTTARACH, N. CHAKPITAK, T. KASIRAWAT, and C. PONGSRIWAT**, «*Substation Grounding Grid Analysis with the Variation of Soil layer depth Method*», Power Tech 2007, 978-1-4244-2190-9/07/\$25.00 ©2007 IEEE, p. 1881-1886, 2007.
- [III-17] **E. D. SUNDE**, «*Earth Conduction Effects in Transmission Systems* », New York, N.Y Dover publications, Inc. 1968.
- [III-18] **GREYMATTERS**, «*Soil resistivity testing method – the Wenner 4 probe test* », Protecting Critical assets and life, from the harmful effects of High Voltages and Lightning globally since 1995, Article - February 8, 2023.
- [III-19] **J. A. SULLIVAN**, «*Alternative earthing calculations for grids and rods*», IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol. 145, No. 3, May 1998.
- [III-20] **Osama E. GOUDA, Tamer EL-SAIED, Waleed A. A. SALEM, Asmaa M. A. KHATER**, «*Evaluations of the apparent soil resistivity and the reflection factor effects on the grounding grid performance in three-layer soils* », IET Science, Measurement & Technology, 2019, Vol. 13 Iss. 4, pp. 572-581.
- [III-21] **Anderson R. J. de ARAÚJO, Jaimis S. L. COLQUI, Claudiner M. de SEIXAS , Sérgio KUROKAWA, Bamdad SALARIEH, José Pissolato FILHO, and Behzad KORDI**, «*Computation of ground potential rise and grounding impedance of simple arrangement of electrodes buried in frequency-dependent stratified soil*», Elsevier, Electric Power Systems Research 198 (2021) 107364.
- [III-22] **ALTAIR-HYPERWORKS**, «*Altair FEKO 2019.3.3-User Guide*», Altair Engineering, 2019.
- [III-23] **B. GUSTAVSEN and A. SEMLYEN**, «*Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting*», IEEE Trans. Power Deliv. 14 (3) (1999) 1052–1061, <https://doi.org/10.1109/61.772353>.
- [III-24] **J. S. L. COLQUI, A. R. J. de ARAÚJO, C. M. de SEIXAS, S. KUROKAWA, J. Pissolato FILHO**, «*Performance of the recursive methods applied to compute the transient responses on grounding systems*», Electr. Power Syst. Res. 196 (2021) 107281.
- [III-25] **L. GRCEV**, «*High-frequency grounding*», In Lightning Protection, V. Cooray Ed., London, The Institution of Engineering and Technology, pp. 503–529, 2010.
- [III-26] **O. KHERIF, S. CHIHEB, M. TEGUAR, A. MEKHALDI and N. HARID**, «*Investigation of Horizontal Ground Electrode's Effective Length Under Impulse Current* », IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, VOL. 61, N° 5, October 2019.
- [III-27] **Hongcai CHEN and Yaping DU**, «*Lightning Grounding Grid Model Considering Both the Frequency-Dependent Behavior and Ionization Phenomenon* », IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Page(s) 157 – 165, Volume: 61, Issue 1, February 2019.
- [III-28] **A. AMETANI, Y. KASAI, J. SAWADA, A. MOCHIZUKI, and T. YAMADA**, «*Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model* », in Pro. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist., Vol. 141, No. 4, pp. 339-345, 1994.

CONCLUSION GÉNÉRALE :



Conclusion Générale

Étant donné sa simplicité, l'approche des lignes de transmission a été utilisée dans cette étude pour analyser le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre enfouis dans des sols hétérogènes et dépendants de la fréquence. Diverses structures de terre, simples telles que les électrodes horizontale et verticale, la configuration en patte d'oie et la grille au pied d'une Tour, ont été examinées. Ces systèmes représentent la passerelle à la terre de courants impulsionnels (provenant de la foudre).

Dans ce projet de fin d'études, nous avons réalisé un code sous l'environnement MATLAB, qui nous a permis d'estimer diverses grandeurs électriques, à savoir : les valeurs de résistivités et de permittivités relatives des sols en fonction de la fréquence, les *résistivités apparentes* des différents sols hétérogènes (stratifiés) bicouches et à trois couches, les élévations du potentiel de terre « *GPRs* », la résistance R_G basse fréquence des mises à la terre et leur *impédance harmonique* en hautes fréquences. Ces grandeurs permettent d'étudier le changement du comportement d'une mise à la terre avec la modification de la structure du sol ou bien avec la variation fréquentielle de ses paramètres électriques lors d'une décharge du courant de foudre.

Plusieurs *constatations* et *conclusions* ont été faites lors de nos études effectuées dans plusieurs applications, où les plus cruciales sont :

- ❖ La *dépendance des paramètres électriques* du sol (ρ_{sol} et ϵ_{rsol}) avec la fréquence se traduit par des **diminutions importantes** des valeurs de la *résistivité* et la *permittivité relative* du sol avec l'*augmentation de la fréquence*. Plus que la fréquence est *haute* et le sol est *résistif* la diminution est *plus palpable*.
- ❖ La *dépendance fréquentielle* des paramètres du sol entraîne une **réduction** dans les valeurs *crêtes* des augmentations du potentiel de la terre (*GPRs*) par rapport au cas où les paramètres du sol sont supposés constants. Également, cette réduction est **plus significative** pour les sols ayant une **résistivité très élevée**. Cela est dû à la constatation précédente (diminution de ρ_{sol} en hautes fréquences).
- ❖ La *dépendance fréquentielle* des paramètres du sol n'a pas un effet remarquable sur l'impédance de terre en **basses fréquences**. Alors qu'elle entraîne des **diminutions bien**

visibles à des fréquences plus élevées (à partir de la *fréquence f_c*), *en particulier* pour les sols les plus résistifs (idem, diminution de ρ_{sol} en hautes fréquences).

- ❖ Les méthodes du calcul de la résistivité apparente ρ_a d'un sol **multicouche**, qui sont fonction de l'espacement « **a** » inter-électrodes (mesure de Wenner), montrent qu'un mauvais choix de ce dernier a un grand effet sur les valeurs de la résistivité apparente qui peut conduire à des *surestimations* ou *sous-estimations* capables de dépasser le *double* ou d'être moins la *moitié* des valeurs réellement existantes.
- ❖ L'espacement « **a** » est extrêmement lié à la **profondeur apparente testée**, un espacement des sondes de « **x m** » indique la résistivité du sol à une *profondeur* de **voisinage** « **x m** ».
- ❖ Pour les **sols stratifiés**, la présence de couches à *haute résistivité* au-dessus d'une couche à *faible résistivité* a un **très fort effet** sur le *GPR* où sa *valeur de crête* peut se réduire à moins de la moitié.
- ❖ La valeur du pic des **GPRs** pour **l'électrode croisée** est en fonction de la couche où elle est enfouie et quasi indépendante de la configuration du sol (homogène ou stratifié). Cependant, la prise en compte des couches du sol a un effet plus important sur les *GPRs* de **l'électrode verticale**.
- ❖ Les *paramètres du sol* de la couche dans laquelle **l'électrode croisée** est enfouie ont la *capitale action* sur son **impédance**, alors que cela n'est pas correct pour l'impédance du **piquet vertical** qui est **plus sensible** aux couches du sol.
- ❖ Pour la **grille** au pied de la Tour, le **GPR** est proportionnel à la **résistivité** de la **couche supérieure** où elle se trouve entièrement. Si elle se trouve entre deux couches du sol stratifié (*par changement de profondeur d'enfouissement ou même de l'épaisseur de la 1^{ière} couche*) leur effet *s'implique* dans la valeur du **GPR** et cela dépend des valeurs des résistivités de ces couches.

Pour clôturer, en perspectives, dans le but d'une meilleure compréhension de ces effets, il sera mieux de faire des études futures plus larges et plus approfondies dans lesquelles nous varions un paramètre et nous fixons les autres (résistivités des couches, leurs épaisseurs, leurs dispositions, types d'électrodes de terre, le contenu fréquentiel des courants déchargés, ... etc.). Ce qui permet de comprendre l'effet et le rôle de chaque paramètre sur les amplitudes des **GPRs** et des impédances du sol qui reflètent un comportement donné des électrodes de mise à la terre dans des conditions réelles. Une bonne compréhension de ces comportements équivaut à une meilleure conception de ces dernières.

Résumé

Lors d'un défaut à la terre, comme lors d'un coup de foudre, le courant de défaut se dirige vers le sol à travers les électrodes de mise à la terre. Ce phénomène cause une augmentation du potentiel local du sol (GPR) par rapport à une terre éloignée. Les paramètres électriques des différentes couches d'un sol hétérogène, tels que les résistivités, les épaisseurs et leurs arrangements, ainsi que la dépendance fréquentielle de ces paramètres, influencent significativement le GPR.

L'objectif de ce mémoire est de comprendre ces effets en examinant plusieurs aspects clés : les paramètres électriques du sol, la configuration multicouche du sol et l'impact de la fréquence sur ces paramètres.

Mots clés : Courant de défaut, Électrodes de mise à la terre, Potentiel local du sol (GPR), Sol hétérogène, Dépendance fréquentielle des paramètres électriques.

Abstract

During a ground fault, such as a lightning strike, the fault current flows to the ground through the grounding electrodes. This phenomenon causes an increase in the local ground potential (GPR) compared to distant land. The electrical parameters of the different layers of a heterogeneous soil, such as resistivities, thicknesses and their arrangements, as well as the frequency dependence of these parameters, significantly influence the GPR.

The objective of this dissertation is to understand these effects by examining several key aspects: the electrical parameters of the ground, the multilayer configuration of the ground and the impact of frequency on these parameters.

Keywords : Fault current, Grounding electrodes, Local ground potential (GPR), Heterogeneous ground, Frequency dependence of electrical parameters.

ملخص

عند حدوث عطل أرضي، مثل الصاعقة، يتجه تيار العطل نحو الأرض عبر أقطاب التأريض. يسبب هذا الظاهرة زيادة في الجهد المحلي للأرض مقارنةً بالأرض البعيدة. تؤثر المعلمات الكهربائية للطبقات المختلفة من تربة غير متجانسة، مثل المقاومات الكهربائية، السماكات، وتوزيعها، وكذلك التردد المعتمد لهذه المعلمات، بشكل كبير على الجهد المحلي للأرض.

هدف هذا البحث هو فهم هذه التأثيرات من خلال فحص عدة جوانب رئيسية: المعلمات الكهربائية للتربة، التكوين متعدد الطبقات للتربة وتأثير التردد على هذه المعلمات.

الكلمات المفتاحية: تيار العطل، أقطاب التأريض، الجهد المحلي للأرض، تربة غير متجانسة، التردد المعتمد للمعلمات الكهربائية.