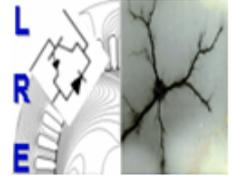


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique
Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique



Mémoire de Master
en Électrotechnique

Présenté par :

MESSAOUDI Hossam Eddine

INTITULÉ

**Réponse transitoire d'une électrode de terre
enterrée dans un sol à deux couches utilisant
l'approche des lignes de transmission**

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

Membres du Jury d'examen

Président

H. SAHROUI

Docteur ENP – Alger

Rapporteur

M. TEGUAR

Professeur ENP – Alger

Examineurs

L. NEZLI

Professeur ENP – Alger

ENP 2015

Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) - École Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

www.lre.enp.edu.dz

www.enp.edu.dz

Table des matières

| | |
|--|------------|
| Table des Matières | i |
| Remerciement | iii |
| Résumé | iv |
| Introduction Générale | 1 |
| 1 Généralités sur les Systèmes de Mise à la Terre | 2 |
| 1.1 Généralités sur les SMLT | 2 |
| 1.1.0.1 Terre | 2 |
| 1.1.0.2 Électrode de terre | 2 |
| 1.1.0.3 Prise de terre | 2 |
| 1.1.0.4 Mise à la terre | 3 |
| 1.1.0.5 Conducteur de protection | 3 |
| 1.1.0.6 Conducteur de terre | 3 |
| 1.1.0.7 Tension de pas | 3 |
| 1.1.0.8 Tension de contact | 4 |
| 1.2 Rôle des SMLT | 4 |
| 1.3 Réalisation d'un SMLT | 5 |
| 1.3.0.9 Éléments d'un SMLT | 5 |
| 1.3.0.10 Matériaux utilisés | 5 |
| 1.3.1 Caractérisation du sol | 6 |
| 1.3.1.1 Structure du sol | 6 |
| 1.3.1.2 Caractéristiques électromagnétiques du sol | 6 |
| 1.4 Classification des SMLT | 7 |
| 1.4.0.3 SMLT de fonctionnement | 7 |
| 1.4.0.4 SMLT de protection | 7 |
| 1.4.0.5 SMLT de protection contre la foudre | 8 |
| 1.4.0.6 SMLT de référence | 8 |
| 2 Différent Modèles - Techniques dans le Domaine | 9 |
| 2.1 Propriétés Électriques des SMLT | 9 |
| 2.1.1 Résistance d'une électrode | 9 |
| 2.1.1.1 Électrode hémisphérique | 10 |
| 2.1.1.2 Piquet de terre vertical de forme cylindrique | 11 |
| 2.1.1.3 Électrodes en ligne droite (dans le même plan) | 12 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.1.1.4 | Électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral | 13 |
| 2.1.1.5 | Électrodes sur les côtés d'un carré | 13 |
| 2.1.1.6 | Électrode enterrée horizontalement | 14 |
| 2.1.1.7 | Plusieurs électrodes enfouies à la même profondeur | 14 |
| 2.1.1.8 | Réduction de la résistivité entourant l'électrode | 15 |
| 2.1.1.9 | Résistance d'une électrode enfouie dans un sol à deux couches | 15 |
| 2.1.2 | Mesure de la résistivité du sol | 16 |
| 2.1.2.1 | Méthode de Wenner | 16 |
| 2.1.2.2 | Méthode de Schlumberger | 17 |
| 2.1.2.3 | Méthodes de mesure à trois pôles | 18 |
| 2.1.2.4 | Détermination de la résistivité apparente pour un sol stratifié | 19 |
| 2.2 | Différents Modèles d'Étude des SMLT Lors l'apparition d'un défaut | 20 |
| 2.2.1 | Méthodes analytiques et empiriques | 20 |
| 2.2.2 | Méthodes numériques | 20 |
| 3 | Simulation d'une Électrode de terre enfouie dans un Sol Stratifié | 21 |
| 3.1 | Méthode des Lignes de Transmission (TLM) | 21 |
| 3.2 | Phénomènes d'ionisation de sol et de couplage mutuel | 22 |
| 3.2.0.1 | Représentation du phénomène d'ionisation | 23 |
| 3.2.0.2 | Représentation du phénomène de couplage mutuel inter-segments | 25 |
| 3.3 | Électrode Enterrée Horizontalement | 25 |
| 3.3.0.3 | Réponse du système en ignorant les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel | 26 |
| 3.3.0.4 | Réponse du système en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage inter-segments | 27 |
| 3.3.0.5 | Temps d'exécution | 27 |
| 3.4 | Électrode Enterrée Verticalement | 28 |
| 3.4.0.6 | Réponse du système en ignorant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel | 29 |
| 3.4.0.7 | Réponse transitoire du système en présence des phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel inter-segments | 30 |
| | Conclusion Générale | 31 |
| | Bibliographie | 32 |

Remerciement

*“Je tiens tout d’abord à remercier mon promoteur **Pr. M. Tegar** pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension ainsi que ses précieux conseils dans le domaine de la recherche scientifique, sa précieuse directive et son suivi continu.”*

*“Je remercie **Dr. H. Sahraoui** pour l’intérêt qu’elle a porté à mon modeste travail, pour avoir accepté de juger ce travail et m’avoir fait l’honneur de présider le jury de soutenance.”*

*“Mes remerciements vont également à **Pr. L. Nezli** pour avoir accepté d’examiner et critiquer ce mémoire.”*

“Enfin, je tiens également à remercier tous les enseignants ayant contribué à mon formation et ce depuis le tronc commun jusqu’à la dernière année de graduation.”

ملخص - اعتمد هذا العمل على نهج خطوط النقل (TLM) ، الذي يعتمد على حل معادلات التلغراف المعبر عنها بمعادلات حالة. الهدف الرئيسي هو دراسة سلوك نموذج من تكوينات مختلفة من أنظمة التأسيس في المجال الزمني (قطب الأفقي وقطب رأسي). كلا النظامين يعتبر دفنت في تربة طبقية ذات طبقتين. تم فحص مثل هذا السلوك في وجود أو عدم وجود بعض الظواهر الفيزيائية مثل التأين التربة والاقتران المتبادل بين الشرائح المختلفة من نظام التأسيس. وقد وضعت العديد من الخوارزميات في بيئة MATLAB . النتائج التي تم الحصول عليها قورنت مع تلك التي وجدت من قبل باحثين آخرين.

كلمات مفتاحية - نظام تأسيس ، استجابة عابرة ، نهج خطوط النقل (TLM) ، تأين التربة ، الاقتران المتبادل .

Résumé - L'approche des lignes de transmission (TLM), dont la résolution des équations de télégraphiste est représentée sous forme d'équations d'état, a été adoptée dans ce travail. L'objectif principal est de modéliser le comportement transitoire de différentes configurations de mise à la terre dans le domaine temporel. Les systèmes de terre consistent en une électrode horizontale et une électrode verticale. Les deux systèmes considérés ont été enfouis dans un sol ou stratifié à deux couches. Un tel comportement a été examiné en présence ou en absence de certains phénomènes physiques à savoir l'ionisation du sol et le couplage mutuel entre les différents segments du système de terre. De nombreux algorithmes ont été établis sous environnement MATLAB. Les résultats que nous avons obtenus ont été confrontés à ceux trouvés par d'autres chercheurs dans le domaine.

Mots-clés : système de mise à la terre, réponse transitoire, TLM, ionisation, couplage, sol stratifié.

Abstract - The transmission lines of approach (TLM), whose resolution is of telegrapher equations represented as equations of state, has been adopted in this work. The main objective is modeling the transient behavior of different configurations of grounding in the time domain. The grounding systems consist of a horizontal electrode and a vertical electrode. Both systems considered were buried in soil with two-layer. Such behavior was examined in the presence or absence of certain physical phenomena : ionization of the soil and the mutual coupling between the different segments of the grounding system. Many algorithms were developed in MATLAB environment. the results we obtained were compared to those found by other researchers.

Key-words : grounding system, transient behavior, transmission lines, lightning, soil ionization, mutual coupling, injection point.

Introduction Générale

Le terme "grounding" devient de plus en plus important dans les systèmes électriques. Souvent, il combine entre différents aspects et phénomènes physiques, notamment les décharges électrostatiques, la compatibilité électromagnétique et aussi l'étude de la protection et de la sécurité. Dans ce travail, nous commençons par présenter les propriétés électriques des systèmes de mise à la terre. Il s'agit plus particulièrement de la résistance du système de terre et de la résistivité du sol qui le contient. Pour cela, plusieurs configurations de mise à la terre ont été considérées. Les plus populaires techniques de mesure de la résistivité du sol y sont également exposées. Nous présentons aussi approche numérique des lignes de transmission pour analyser le comportement transitoire des systèmes de terre étudiés.

Nous nous sommes intéressés par la modélisation du comportement transitoire d'un système de mise à la terre d'une topologie simple ; il s'agit d'une tige horizontale ou une tige verticale. Nous commençons par exprimer notre système sous forme d'équations d'état. Puis, nous faisons une étude détaillée qui prend en compte les caractéristiques de l'électrode et celles du sol. Dans notre travail, nous considérons la présence ou non du couplage mutuel inter-segments de l'électrode ainsi que l'ionisation du sol. Lors de cette étude, le sol considéré étant un sol stratifié à deux couches. Afin de valider nos programmes, élaborés sous environnement MATLAB, nous comparons les résultats que nous avons obtenus à ceux trouvés par d'autres chercheurs[1].

Chapitre 1

Généralités sur les Systèmes de Mise à la Terre

1.1 Généralités sur les SMLT

1.1.0.1 Terre

Ce terme désigne aussi bien la terre comme un conducteur, par exemple le type de sol, humus, sable, gravier ou rocher. Ce terme est associé par la protection des équipements et des personnes [2, 3].

1.1.0.2 Électrode de terre

L'électrode de terre est une pièce conductrice enfouie dans le sol, elle assure une liaison électrique avec la terre. La partie utile de la prise de terre est la partie située en dessous de la limite de gel à 60 *cm* sous la surface du sol [3].

1.1.0.3 Prise de terre

La prise de terre est une ou plusieurs électrodes de terre qui sont interconnectées en permanence. On les connecte en parallèle avec tous les équipements pour assurer la protection des personnes et des équipements électriques contre tous les défauts transitoires [3, 4].

On appelle prise de terre électriquement distinctes, une prise de terre suffisamment éloignées par les unes des autres pour que le courant maximal susceptible d'être écoulé par l'une d'entre elle ne modifie pas sensiblement le potentiel des autres [3].

1.1.0.4 Mise à la terre

La mise à la terre est une connexion d'une partie active d'une masse ou d'un élément conducteur étranger à une ou plusieurs prises de terre pour assurer une meilleure performance et rentabilité de fonctionnement et de contrôle des systèmes électriques [3, 4].

1.1.0.5 Conducteur de protection

Le conducteur de protection est un conducteur utilisé dans certaines mesures de protection contre les contacts indirects et reliant des masses, soit [5];

- à d'autre masse ;
- à des éléments de conducteurs étrangers ;
- à une prise de neutre ;
- à une partie active reliée à la terre.

On l'appelle aussi conducteur principale de protection. Il est un conducteur auquel sont reliés d'une part le/les conducteur(s) de terre, et d'autre part les conducteurs de protection des masses et, si nécessaire, ceux des éléments conducteurs étrangers et éventuellement le neutre [5].

1.1.0.6 Conducteur de terre

Le conducteur de protection relie la borne de terre principale à la prise de protection. Le sectionneur de terre éventuel est considéré comme faisant partie du conducteur de terre [5].

1.1.0.7 Tension de pas

Partie de l'élévation du potentiel de terre qui peut être appliqué à une personne ayant une longueur de pas de $1m$, lorsque le courant traverse le corps humain de pied à pied [3].

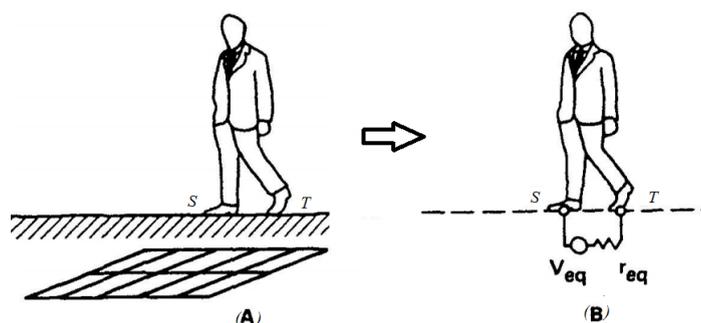


FIGURE 1.1: Schéma équivalent pour l'estimation du courant à travers le corps humain pour une tension de pas [6]

La tension de pas est la différence de potentiel (ddp) entre les points S et T présentés sur la figure (1.1A). Pour estimer le courant qui peut traverser le corps humain, la figure (1.1B) montre le circuit équivalent de "Thevenin" proposé.

1.1.0.8 Tension de contact

Tension existante entre la masse métallique d'un appareil électrique et la terre. C'est à dire le ddp entre le point S et T présentés sur la figure (1.2). C'est la tension à laquelle nous sommes soumis lorsque nous touchons cette masse métallique [3].

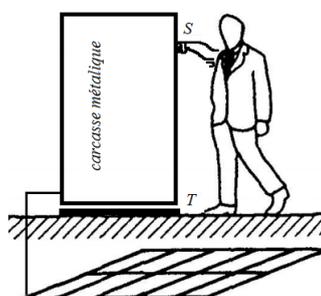


FIGURE 1.2: Représentation pour la tension de contact

Cette tension appliquée à la résistance d'une personne engendre un courant dans le corps de celle-ci qui subit alors un choc électrique.

1.2 Rôle des SMLT

Le rôle principal d'un système de mise à la terre est d'écouler des courants du défaut "courant homopolaire" et d'intensités diverses vers la terre. Dans notre cas, nous nous intéressons aux courants produits par un coup de foudre [5].

Le système de mise à la terre a été utilisé pour éviter les élévations dangereuses du potentiels des masses et une mise sous tension accidentelle de masses métalliques ou conductrices peuvent être touchée par un individu. Quand une tension anormale (tension du défaut) est apparue, l'écoulement via la prise de terre du courant de défaut associé, permettra le déclenchement si nécessaire des dispositifs de protection en vue d'assurer la protection des personnes et des équipements électriques [6].

En plus, il permet d'assurer un fonctionnement correct des installations électriques, de fournir la protection durant un fonctionnement dans des conditions normales ou des défauts et de stabiliser la tension durant les conditions transitoires [6].

1.3 Réalisation d'un SMLT

1.3.0.9 Éléments d'un SMLT

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales, horizontales et/ou une grille pour établir un chemin de faible résistance (un chemin de faible impédance) vers le sol. La forme de la prise de terre dépend de l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques à mettre dans la terre. Par exemple, la prise de terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste. Les éléments du systèmes de mise à la terre doivent être interconnectés pour un bon fonctionnement du système électrique [7].

1.3.0.10 Matériaux utilisés

Lorsqu'on veut choisir un matériau conducteur, il faut bien tenir compte, de sa stabilité thermique, sa résistivité contre la corrosion dans le sol, sa performance conductrice et bien sûr son coût.

Nous allons citer quelques matériaux utilisables dans ce domaine [8] :

- ❑ **Le Cuivre** : Comme un matériau commun, des barres en cuivre sont utilisées pour les systèmes de mise à la terre. Auprès de sa bonne conductivité, le cuivre est un matériau qui résiste à la corrosion lorsqu'on l'enfouie dans le sol [8].
- ❑ **L'Aluminium** : Des barres en aluminium sont rarement utilisables dans les systèmes de mise à la terre, mais des fois, on utilise ses alliages, car dans quelques structures du sol l'aluminium lui-même peut être corrodé et l'aluminium corrodé ne représente pas un bon conducteur [8]. Par ailleurs, la résistance de l'aluminium est bonne dans des environnements contenant des faibles concentrations de sulfure et de chlore.
- ❑ **L'Acier** : L'acier est généralement utilisé comme support mais aussi comme conducteur dans le cas d'un système de mise à la terre. Sa conductivité est faible par rapport au cuivre et l'aluminium, donc on doit l'utiliser sous autres formes à savoir :
 - Acier galvanisé à chaud qui acceptable dans l'air, le béton et en sol normal¹. L'acier galvanisé peut être détruit par couplage galvanique avec le cuivre et encore, il peut être corrodé dans des sols argileux ou humides ;
 - Acier inoxydable, il est bon dans nombreux environnement [8].
- ❑ **Autres matériaux** : Le plomb peut être utilisé dans les systèmes de mise à la terre car sa résistance est bonne dans des environnements contenant des concentrations fortes de sulfure. Cependant, le plomb peut être détruit par couplage galvanique avec les cuivre [8].

1. Sol normal : sol sans aucune intervention d'un agent extérieure.

1.3.1 Caractérisation du sol

1.3.1.1 Structure du sol

Le sol est un système complexe, constitué des composantes solides (représentent la structure de base), liquides et gazeuses.

La phase solide introduit les minéraux ainsi que les substances organiques ; la phase liquide représente les solutions aqueuses en général. La phase gazeuse correspond généralement à l'air contenu entre les particules solides [8]. La figure (1.3) présente la structure du sol à l'échelle microscopique.

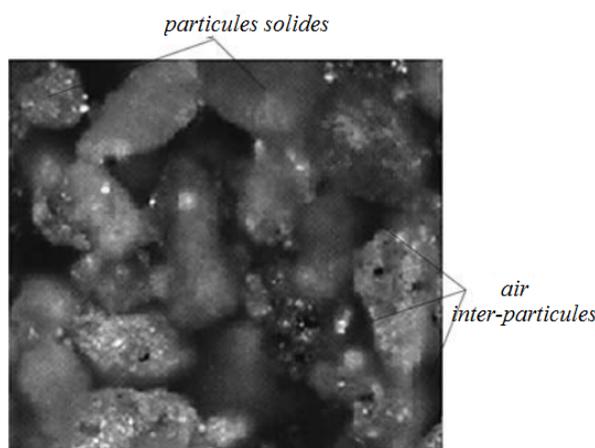


FIGURE 1.3: Structure du sol à l'échelle microscopique [8]

1.3.1.2 Caractéristiques électromagnétiques du sol

La composition du sol peut varier d'un cas simple où le sol est constitué d'un seul matériau, à un cas complexe dont le sol est constitué de plusieurs matériaux. En pratique, il est rare que les différentes composantes du sol soient réparties uniformément pour un volume donné. En général, La structure du sol est stratifiée et présente une anisotropie². Les couches peuvent avoir différents pendages. Les caractéristiques électromagnétiques d'un sol donné peuvent avoir des valeurs différentes selon le sens de la mesure [9].

Trois paramètres peuvent exprimer les caractéristiques électriques de tout milieu. Il s'agit de la perméabilité μ , la permittivité ϵ et la conductivité σ . Ces trois paramètres influent sur la propagation des ondes conformément à l'expression (1.1), qui donne le coefficient de propagation γ [9] :

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = j\omega\sqrt{\mu\left(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}\right)} \quad (1.1)$$

La dépendance de temps $\exp(j\omega t)$ étant sous-entendue.

2. n'est pas les même caractéristiques pour les différents directions

La perméabilité du sol μ , peut être considéré comme égale à la perméabilité en espace libre [9], de sorte que, dans la plupart des problèmes de propagation, il suffit de connaître la permittivité ε et la conductivité σ . Lorsqu'on se réfère au sol, le coefficient de propagation peut être décrit comme suit :

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r - j60\sigma\lambda} \quad (1.2)$$

où ε_r est la perméabilité relative, σ est la conductivité en S/m et λ est la longueur d'onde en espace libre, en m . La perméabilité relative μ_r des matériaux ne varie pas dans une large gamme. Sa valeur maximale est celle du magnétite : $\mu_r = 5$ [9].

La valeur de la constante diélectrique des minéraux varie de l'unité à la centaine. Elle est liée à la polarisation électrique des matériaux, qui de sa part varie avec la fréquence du champ électrique appliqué pour sa mesure. Cette variation est due à la présence des différents types de polarisation dans les matériaux en question. Ces types de polarisation peuvent être électroniques, ioniques ou moléculaires.

Dans certaines bandes de fréquences, pour lesquelles il convient d'étudier d'autres facteurs qui ont une influence sur la propagation de l'onde du sol, tels que les irrégularités du terrain (nombre de couches), la couverture végétale, les objets présents à la surface du sol, etc, on peut étendre cette notion en appliquant la méthode de l'affaiblissement de l'onde de sol, ou par des méthode analytiques [10].

1.4 Classification des SMLT

Les dispositifs du système de mise à la terre pour les équipements électriques peuvent être diviser en trois catégories suivant leurs fonctions.

1.4.0.3 SMLT de fonctionnement

Il est basé sur la connexion du point neutre à la terre, un système d'énergie peut être classé en deux catégories : un système de point neutre utile mis à la terre ou un système d'énergie de point neutre inutile mis à la terre (inclure les systèmes de point neutre n'est pas mis à la terre, les systèmes de point neutre impédant et les systèmes de point neutre réactant). Pour réduire la tension de fonctionnement sur l'isolement des dispositifs électriques, les points neutres du système électrique sont connectés à la terre. Ce mode de mise à la terre est appelé système de mise à la terre de fonctionnement [8].

1.4.0.4 SMLT de protection

Lorsque l'isolement d'une installation électrique est échoué, leurs clôtures deviennent directes et la personne va éprouver un choc électrique s'il touche leurs clôtures. Pour protéger les personnes, les clôtures de toutes les installations électriques doivent être

mises à la terre. Ce genre de mise à la terre est appelé système de mise à la terre de protection [8].

1.4.0.5 SMLT de protection contre la foudre

Pour prévenir, empêcher et éviter les risques de la foudre des équipements électriques et des personnes, les paratonnerres en générale sont usuellement adaptés. Pour tels équipements de protections doivent être connectés convenablement à la terre pour capter, canaliser et dissiper le courant de foudre vers la terre. Ce genre de mise à la terre est appelé système de mise à la terre de protection contre la foudre [8].

1.4.0.6 SMLT de référence

Des nombreux instruments de mesure et de contrôle sont des dispositifs électroniques robustes. De tels dispositifs ont besoin d'un signal de référence durant leur fonctionnement. La terre est choisie comme un bon signal de référence, pour que les dispositifs de mesure et les systèmes de contrôle fonctionnent convenablement. Ce genre de mise à la terre est appelé système de mise à la terre de référence [8]. Dans ce présent chapitre, nous avons évoqué le phénomène de foudre, son origine, ses caractéristiques principales, sa modélisation et ses effets. Étant donné, les effets de la foudre qui sont néfastes aussi bien sur les êtres vivants que sur les dispositifs électriques, des techniques de protection contre ce phénomène ont été exposées. Nous avons insisté plus particulièrement sur les systèmes de mise à la terre ayant un rôle d'écouler le courant de foudre vers le sol à travers un réseau de terre. En effet, des généralités sur ces systèmes ont été présentées en montrant leur rôle principal, leur réalisation et leur classification. Par ailleurs, les caractéristiques géologique et électromagnétique du sol ainsi que les facteurs affectant de telles caractéristiques ont été également examinés. Ce chapitre a été clôturé par la présentation des différents schémas relatifs au régime du neutre.

Chapitre 2

Différent Modèles - Techniques dans le Domaine

2.1 Propriétés Électriques des SMLT

Les propriétés électriques d'une prise de terre dépendent essentiellement de deux facteurs. Le premier est la configuration géométrique de la prise de terre et le deuxième consiste en la résistivité du sol.

Il est à noter que la résistance d'une électrode est généralement composée de trois parties [7, 11] :

- La résistance de l'électrode (matériau),
- La résistance de contact électrode - sol,
- La résistance du sol autour de l'électrode.

2.1.1 Résistance d'une électrode

C'est en partant des résultats d'une expérience, que le physicien *Georg – Simon Ohm* énonça en 1827 la loi suivante :

"Le rapport entre la tension appliquée aux bornes d'un conducteur et le courant qui le parcourt est un nombre constant".

Ce nombre caractérise une propriété du conducteur : sa résistance.

La différence de potentiel V est obtenue en calculant la circulation du champ électrostatique \vec{E} entre ces bornes :

$$V = \int_{\Omega} \vec{E} d\vec{l} \quad (2.1)$$

D'autre part, l'intensité I du courant qui traverse la section S du conducteur, est égale au flux du vecteur densité de courant \vec{j} à travers S :

$$I = \iint_{\Omega} \vec{j} d\vec{S} \quad (2.2)$$

Donc, la résistance est donnée par :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\int_{\Omega} \vec{E} d\vec{l}}{\iint_{\Omega} \vec{j} d\vec{S}} \quad (2.3)$$

En simplifiant l'expression par la supposition que $\rho = Cste$ (sol homogène), on obtient alors :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.4)$$

La résistance d'une électrode dépend essentiellement de la forme géométrique de l'électrode. Les relations qui sont données par la suite sont mis sous l'hypothèse d'une résistivité uniforme du sol.

Il est important de noter que la forme hémisphérique est la forme la plus générale d'une prise de terre, par ce qu'elle est la plus simple à traiter (grâce au symétrie). Toutes les autres configurations se rapportent à une hémisphère équivalente qui donnerait la même résistance que la prise de terre considérée [6, 12, 13].

2.1.1.1 Électrode hémisphérique

Une telle électrode hémisphérique de rayon r est représentée sur la figure suivante (Fig.2.1) : En appliquant la loi d'Ohm, on obtient :

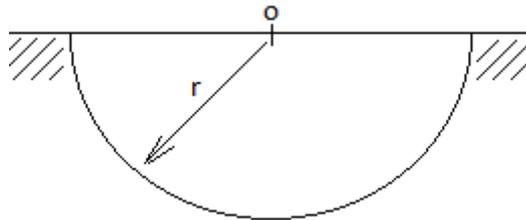


FIGURE 2.1: Schéma d'une électrode hémisphérique du rayon r

$$R = \rho \frac{r}{\int_{\Omega} dS} \quad (2.5)$$

$$R = \rho \frac{r}{\int_0^r 4\pi r dr} \quad (2.6)$$

$$R = \frac{\rho r}{2\pi r^2} \quad (2.7)$$

Alors l'expression de la résistance s'écrit [6, 12, 13] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2.8)$$

2.1.1.2 Piquet de terre vertical de forme cylindrique

Trois relations ont été développées dans la littérature pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical de forme cylindrique (Fig.2.2), qui sont :

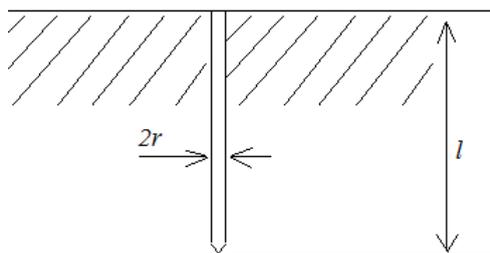


FIGURE 2.2: Schéma d'une électrode verticale de forme cylindrique du rayon r

Relation de Rudenberg : La résistance d'une électrode verticale de forme cylindrique enterrée dans un sol homogène peut être calculée par [13] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \quad (2.9)$$

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

Relation de Dwight-Sunde : *Dwight* et *Sunde* ont donné une relation qui permet de déterminer la résistance d'une électrode verticale de forme cylindrique. La relation en question est donnée par [7, 14] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 \right) \quad (2.10)$$

avec : ρ est la résistivité du sol, l est la longueur de l'électrode et r est le rayon de l'électrode.

Relation de Liew-Darveniza : *Liew* et *Darveniza*, en 1974, ont trouvé une expression qui permet de déterminer la valeur de la résistance d'un piquet de terre. Elle est donnée par [15] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{r+l}{r}\right) \quad (2.11)$$

avec : ρ la résistivité du sol, l la longueur de l'électrode et r le rayon de l'électrode.

Il est important de connaître le rayon équivalent r_{eq} d'une électrode hémisphérique qui aurait la même résistance qu'un piquet de terre. Il est donné par :

$$r_{eq} = \frac{\rho}{2\pi R} \quad (2.12)$$

2.1.1.3 Électrodes en ligne droite (dans le même plan)

La résistance équivalente de deux électrodes identiques en ligne droite est donnée par l'expression suivante [12, 16] :

$$R_{2\text{-piquets}} = R_{\text{piquet}} \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right) \quad (2.13)$$

où : $\alpha = \frac{r_{eq}}{D}$ et D est la distance entre les deux électrodes.

Par ailleurs, la résistance équivalente de trois électrodes identiques en ligne droite est donnée par [12, 16] :

$$R_{3\text{-piquets}} = R_{\text{piquet}} \left(\frac{1 + \alpha - 4\alpha^2}{2} \right) \quad (2.14)$$

En généralisant la formule pour n électrodes identiques en ligne droite séparées entre elles par la même distance D , la formule approximative suivante donne la résistance du système [12] :

$$R_{n\text{-piquets}} \approx \frac{1}{n} \left\{ \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{4l}{r}\right) + \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right\} \quad (2.15)$$

Pour la même configuration (n -électrodes), *Brown* et al. [7] ont trouvé la formule suivante :

$$R_{n\text{-piquets}} = \frac{R_{\text{piquet}}}{n} F \quad (2.16)$$

où :

- R_{piquet} est la résistance d'un seul piquet,
- $R_{n\text{-piquet}}$ est la résistance du système,
- F est un coefficient dépend du nombre d'électrodes utilisées, ses valeurs données dans la table (2.1).

Ces chercheurs ont utilisé la relation de *Dwight-Sunde* pour calculer la résistance d'une seule électrode (R_{piquet}).

TABLE 2.1: Valeurs des coefficients F [7]

| Nombre d'électrodes | Valeur du coefficient F |
|---------------------|---------------------------|
| 2 | 1,16 |
| 3 | 1,29 |
| 4 | 1,36 |
| 8 | 1,68 |
| 12 | 1,80 |
| 16 | 1,92 |
| 20 | 2,00 |
| 24 | 2,16 |

2.1.1.4 Électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

Dans le cas de trois électrodes identiques placées aux sommets d'un triangle équilatéral de côté D , la résistance équivalente est donnée par la relation suivante :

$$R_{3\text{-piquets-}\Delta} = R_{\text{piquet}} \left(\frac{1 + 2\alpha}{3} \right) \quad (2.17)$$

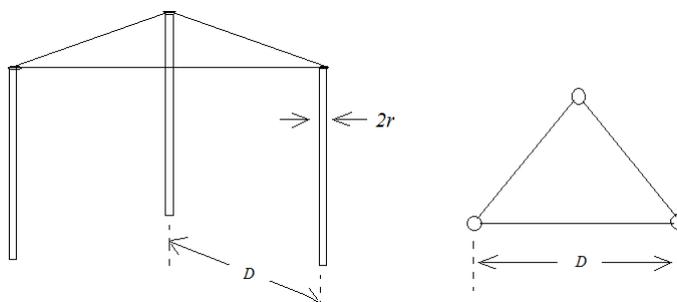


FIGURE 2.3: Schéma des électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

2.1.1.5 Électrodes sur les côtés d'un carré

Soit un nombre n d'électrodes identiques (piquet de terre vertical de forme cylindrique), la résistance équivalente est donnée par :

$$R_{n\text{-piquets-carree}} = R_{\text{piquet}} \left(\frac{1 + k\alpha}{n} \right) \quad (2.18)$$

où k est un coefficient qui dépend du nombre d'électrodes. Les valeurs de ce coefficient sont données dans la table (2.2).

TABLE 2.2: Valeurs des coefficients k pour des électrodes sur les côtés d'un carré

| Nombre d'électrode par côté | Nombre totale d'électrodes | Valeurs des coefficients k |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 2 | 4 | 2,7071 |
| 3 | 8 | 4,2583 |
| 4 | 12 | 5,3939 |
| 5 | 16 | 6,0072 |
| 6 | 20 | 6,4633 |
| 7 | 24 | 6,8363 |
| 8 | 28 | 7,1479 |
| 9 | 32 | 7,4195 |
| 10 | 36 | 7,6551 |

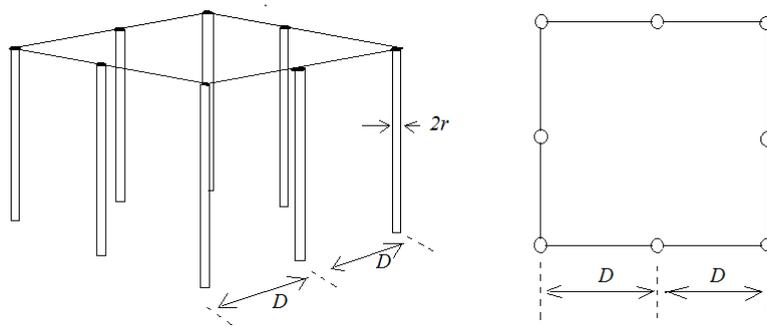


FIGURE 2.4: Schéma des électrodes sur les côtés d'un carré

2.1.1.6 Électrode enterrée horizontalement

La résistance d'une électrode de longueur l et de rayon r , enterrée horizontalement à une profondeur h (Fig.2.5) est donnée par [12] :

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2rh}}\right) - 1 \right) \quad (2.19)$$

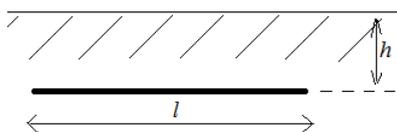


FIGURE 2.5: Schéma d'une électrode enterrée horizontalement

Si on dispose de deux électrodes enterrées horizontalement en parallèle à la même profondeur h et écartées d'une distance D ($D \ll l$), la résistance devient [12] :

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln\left(\frac{2l}{\sqrt[4]{2rhDD'}}\right) - 1 \right) \quad (2.20)$$

avec : $D' = \sqrt{D^2 + 4h^2}$

2.1.1.7 Plusieurs électrodes enfouies à la même profondeur

La résistance d'un nombre n d'électrodes identiques de longueur l , reliées entre elles et enfouies à la même profondeur h est donnée par [12] :

$$R = \frac{\rho}{n\pi l} \left(\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2rh}}\right) - 1 + N(n) \right) \quad (2.21)$$

avec $N(n)$ est un coefficient dépend du nombre d'électrodes, ses valeurs numériques sont citées dans la table (2.3) :

TABLE 2.3: Les valeurs des coefficients $N(n)$ [12]

| | | | | | | | |
|---|-----|------|------|------|-----|----|-----|
| n | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 12 | 100 |
| N | 0,7 | 1,53 | 2,45 | 4,42 | 6,5 | 11 | 116 |

2.1.1.8 Réduction de la résistivité entourant l'électrode

Cette technique permet d'entourer l'électrode de terre d'une couche de matière peu résistive. Elle ne devra pas causer une corrosion aux piquets métalliques (qui sont souvent en cuivre ou en acier inoxydable). Plusieurs produits de faible résistivité sont utilisés (la bentonite, poussière de coke, etc.). La matière qui conviendrait et coûte moins cher dans les régions tropicales est le charbon de bois. Cette pratique a été déjà utilisée où la relation analytique suivante a été obtenue [17].

$$R_m = \frac{1}{2\pi l} \left\{ \rho_m \left(\ln \left(\frac{r_m}{r} \right) \right) + \rho \left(\ln \left(\frac{4l}{r_m} \right) - 1 \right) \right\} \quad (2.22)$$

où l est la longueur du piquet, ρ la résistivité du sol, ρ_m est la résistivité de la matière entourant de l'électrode, r le rayon de l'électrode et r_m le rayon de la matière entourant de l'électrode. Les conditions pour que cette relation soit valable sont :

- $\rho \gg \rho_m$
- $r_m > \frac{4l}{e}$ où $e = 2,7$ est la constante de Neper.

2.1.1.9 Résistance d'une électrode enfouie dans un sol à deux couches

Résistance d'un piquet de terre : *Tagg* a établi la relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique verticale de longueur l et de rayon r dans un sol composé de deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 . Deux cas sont alors considérés : l'électrode peut se situer entièrement dans la couche supérieure ou elle peut traverser les deux couches.

Pour une électrode se situant dans la couche supérieure de résistivité ρ_1 , la résistance correspondante est donnée par [18] :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left\{ \left(\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \ln \left(\frac{\frac{nH}{l} + 1}{\frac{nH}{l} - 1} \right) \right\} \quad (2.23)$$

avec :

- l : longueur de l'électrode,
- K : coefficient de réflexion donnée par la relation :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.24)$$

- H : profondeur de la couche de résistivité ρ_1 .

Pour une électrode qui traverse deux couches de résistivités différentes, la résistance est calculée par [18] :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+K)}{((1-K) + 2K\frac{H}{l})} \left\{ \ln\left(\frac{2l}{r}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln\left(\frac{(2nH+l)}{(2H(n-1)+l)}\right) \right\} \quad (2.25)$$

Résistance d'une électrode horizontale : *Tagg* a établi une autre relation donnant la résistance d'une électrode cylindrique horizontale de longueur l et de rayon r , enterrée à une profondeur h ($h < H$) dans un sol à deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 . Elle est donnée par la relation :

$$R = R_1 + R_a \quad (2.26)$$

R_1 est la résistance de l'électrode horizontale dans un sol homogène de résistivité ρ_1 et R_a est la résistance additionnelle due au changement de la résistivité du sol.

La résistance additionnelle est donnée par la relation suivante [18] :

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ 4 \ln\left(\frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2nH}{l}\right)^2 + 1}}{2n\frac{H}{l}}\right) + 8n\frac{H}{l} - 4\sqrt{\left(\frac{2nH}{l}\right)^2 + 1} \right\} \quad (2.27)$$

2.1.2 Mesure de la résistivité du sol

Le comportement d'un système de mise à la terre dépend largement des caractéristiques électriques de son environnement immédiat, c'est-à-dire du sol et des fondations.

2.1.2.1 Méthode de Wenner

Cette méthode, qui est universellement reconnue, a été développée en 1915 par Frank Wenner. Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes équidistantes qui sont disposées en ligne droite sur le sol (Fig.2.6). Entre les deux électrodes extrêmes $E1$ et $E2$ (appelées électrodes de courant), on injecte un courant I . Entre les deux électrodes centrales $E4$ et $E3$ (appelées électrodes de potentiel), on mesure le potentiel ΔV . Le terme $\frac{V}{I}$ est la résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes [6, 11, 14, 18]. La valeur de la résistance R indiquée par l'ohmmètre permet de calculer la résistivité (ρ) au point situé sous le point O , à une profondeur de $h = \frac{3}{4}D$, par l'expression simplifiée suivante obtenue dans le cas d'un sol homogène [14] :

$$\rho = 2\pi DR \quad (2.28)$$

Cette méthode nous permet de mesurer directement la résistivité à l'aide de quatre électrodes verticales en ligne droite (même plan), séparées par une distance D , et enfouies à une profondeur H_e dans le sol. La résistivité est donnée, en fonction de ces deux

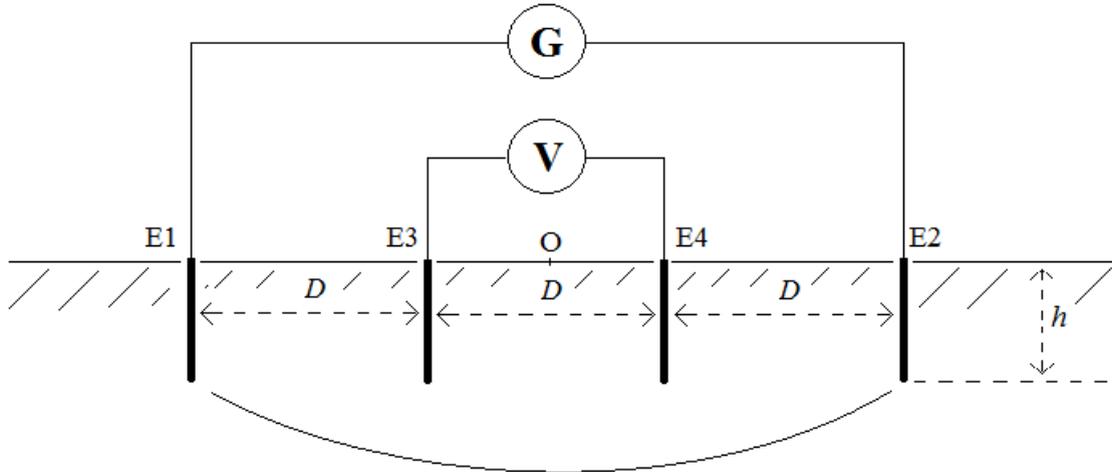


FIGURE 2.6: Schéma de mesure de la méthode de Wenner

grandeurs et la valeur de la résistance R mesurée aux bornes des électrode de l'extrémité, par [19] :

$$\rho_a = \frac{4\pi DR}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4H_e^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + H_e^2}}} \quad (2.29)$$

Dans le cas de deux couches d'épaisseur finie (H) pour la première couche, et infinie pour la deuxième, la résistivité apparente est donnée par la formule (2.30) suivante [19] :

$$\rho_a = \rho_1 \left(1 + 4 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K^i}{\sqrt{1 + (2n \frac{H}{D})^2}} - \frac{K^i}{\sqrt{4 + (2n \frac{H}{D})^2}} \right) \quad (2.30)$$

avec ; K est le coefficient de réflexion donné par :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.31)$$

2.1.2.2 Méthode de Schlumberger

La méthode de "Schlumberger" est basée sur le même principe de mesure de "Wenner". La seule différence est le positionnement des électrodes :

- la distance entre les deux piquets extérieurs est $2D'$.
- la distance entre les deux piquets intérieurs est D .

La valeur de résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité par la formule suivante :

$$\rho = \frac{\pi R}{4} \left\{ (D'^2 - \frac{D^2}{2}) \right\} \quad (2.32)$$

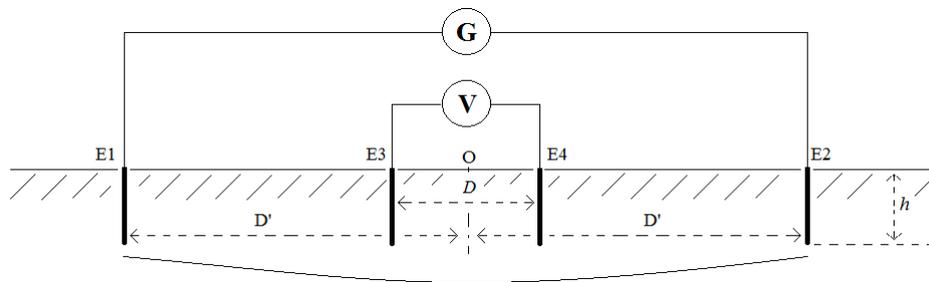


FIGURE 2.7: Schéma de principe de mesure par la méthode de "Schlumberger"

La méthode de "Schlumberger" permet de réduire considérablement le temps de mesure sur le terrain, notamment si on désire réaliser plusieurs mesures de résistivité. En effet, seules les deux électrodes extérieures doivent être déplacées contrairement à la méthode de "Wenner". La méthode de "Schlumberger" est utilisée souvent pour la stratification horizontale des terrains.

2.1.2.3 Méthodes de mesure à trois pôles

Le principe de la méthode de mesure à trois pôles repose sur trois électrodes $E1$, $E2$ et $E3$ (Fig.2.8). On utilise un voltmètre pour mesurer la différence de potentiel entre $E1$ et $E3$ et un ampèremètre pour mesurer le courant circulant entre les piquets de terre $E1$ et $E2$. L'électrode $E3$ de tension doit être positionnée entre $E1$ et $E2$ selon la règle des 62%. Cette règle qui consiste à placer l'électrode $E3$ de tension à 62% de la distance totale $\overline{E1E2}$ permet de réaliser une mesure assez précise. Autres références indiquent que la distance par rapport à la première électrode doit être deux fois plus grande ($D \gtrsim 2D'$)[11].

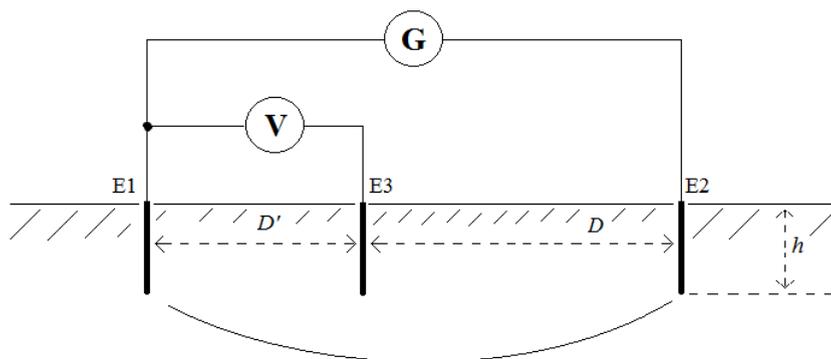


FIGURE 2.8: Schéma de principe de mesure par la méthode de trois pôles

Conformément à la loi d'Ohm, on calcule la résistance R par la formule suivante :

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.33)$$

La résistivité est donnée par la formule suivante [20] :

$$\rho = R.2\pi D \left(\frac{D + D'}{D'} \right) \quad (2.34)$$

2.1.2.4 Détermination de la résistivité apparente pour un sol stratifié

Soit un sol à deux couches de résistivités ρ_1 et ρ_2 respectivement. La première couche a une épaisseur finie. Tandis que la deuxième couche possède une épaisseur infinie. Un tel sol peut être modélisé par une seule couche (sol homogène) de résistivité équivalente appelée également résistivité apparente ρ_a . Cette dernière peut être calculée comme suit [21] :

Si $\rho_1 > \rho_2$ alors :

$$\rho_a = \frac{\rho_1}{-1 + \left(1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+2h)}{}}\right)\right)} \quad (2.35)$$

Sinon :

$$\rho_a = \rho_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+2h)}{}}\right)\right) \quad (2.36)$$

Ces deux expressions sont valides pour $H \leq h$. Si la profondeur de l'électrode h est très faible devant l'épaisseur finie H de la couche supérieure, la résistivité peut être calculée par :

si $\rho_2 > \rho_1$,

$$\rho_a = \rho_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+2h)}{}}\right)\right) \quad (2.37)$$

sinon :

$$\rho_a = \rho_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+15h)}{}}\right)\right) \quad (2.38)$$

Dans le cas d'une électrode verticale enfouie dans un tel sol stratifié, la résistivité apparente peut être donnée par l'expression suivante [22] :

$$\rho_a = \frac{l\rho_1\rho_2}{\rho_2 H + \rho_1(l - H)} \quad (2.39)$$

où :

- H est l'épaisseur de la première couche,
- l est la longueur de l'électrode,
- ρ_1 et ρ_2 sont les résistivités des couches supérieure et inférieure respectivement,

2.2 Différents Modèles d'Étude des SMLT Lors l'apparition d'un défaut

À des fréquences industrielles (basses fréquences), les systèmes de mise à la terre sont modélisés seulement par leurs résistances équivalentes. Par contre, à des fréquences élevées, le cas d'une onde de courant de foudre par exemple, il faut tenir compte des inductances et des capacités du fait qu'elles dépendent de la fréquence d'onde.

En partant de cette considération, des chercheurs ont développés plusieurs modèles pour évaluer les caractéristiques impulsionnelles des mises à la terre. Bewley en 1934 a essayé de développer les systèmes de protection contre la foudre lui permettant de trouver l'impédance d'entrée au point d'injection pour une tension appliquée [23]. Après les travaux de Bewley, plusieurs chercheurs [1, 19, 24, 25] sont intéressés par ce domaine.

Le calcul des différents paramètres des systèmes de mise à la terre peut être classé en deux catégories [8] : (i) Estimation des paramètres en utilisant des formules empiriques et (ii) Calcul précise en utilisant des méthodes d'analyse numérique.

2.2.1 Méthodes analytiques et empiriques

Différentes normes telle que IEEE Standard 80-2000 [26] et IEEE Standard 665-1995 [5] ont confirmé l'utilisation des simples formules empiriques pour l'analyse des paramètres des systèmes de mise à la terre. Ces formules empiriques sont obtenus sur la base des traitements approximatifs des systèmes de mise à la terre en utilisant l'analyse théorique, le calcul numérique et des tests de simulation.

2.2.2 Méthodes numériques

Plusieurs méthodes numériques ont été développées pour l'étude des comportements transitoires des systèmes de mise à la terre. Les approches les plus utilisées sont :

- L'approche des circuits,
- L'approche électromagnétique,
- L'approche hybride,
- L'approche des lignes de transmission.

Lors de ce travail, nous utilisons l'approche des lignes de transmission.

Chapitre 3

Simulation d'une Électrode de terre enfouie dans un Sol Stratifié

3.1 Méthode des Lignes de Transmission (TLM)

Dans la théorie des circuits, l'effet des lignes de transmission est négligé. La tension ou le courant à la sortie d'une source directement connectée à une charge est supposée identique à celle aux bornes de la charge, malgré l'atténuation possible et/ou le délai de propagation le long de la ligne qui joint les deux éléments. Tant que la ligne est électriquement courte¹, la supposition n'a pas des conséquences importantes [27].

Pour introduire la modélisation d'une ligne générale, nous supposons une électrode enfouie dans le sol comme une ligne de transmission. Une telle ligne est représentée sur la figure (3.1). Le champ électromagnétique est complètement contenu dans le sol. Cette ligne doit aussi confirmer les hypothèses de validité suivantes [27] :

- La distance de séparation entre les deux conducteurs et le rayon des fils doivent être petits devant la longueur d'onde ;
- Les paramètres distribués de la ligne de transmission demeurent constants ;
- Un segment de longueur Δz tend vers dz .

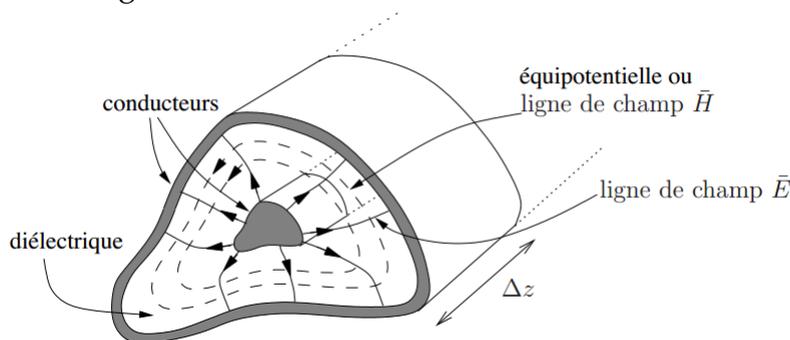


FIGURE 3.1: Représentation d'une coupe de ligne de transmission de section quelconque [27]

1. par rapport à la longueur d'onde

Lorsque la longueur de la ligne L est très supérieure devant la longueur d'onde λ ($L \gg \lambda$), les lois classiques de l'électricité ne s'appliquent plus. L'idée consiste à transformer la ligne pour en faire une représentation avec des éléments de circuits électriques [27].

La validité d'une telle démarche pour des fréquences élevées repose sur des dimensions petites pour assurer un mode quasi-statique. Avec une segmentation de plus en plus petite, la ligne est assimilée à un grand nombre de segments mis bout à bout. C'est le modèle distribué d'une ligne. Le travail consiste maintenant à déduire le comportement d'un segment plutôt que la ligne entière. Les paramètres qui nous allons utiliser (R' , L' , G' et C') sont des éléments par unité de longueur (ou les paramètres distribués) tels que [27] :

- L' caractérise la densité d'énergie magnétique stockée dans le milieu,
- C' correspond la densité d'énergie électrique stockée dans le milieu,
- R' est lié aux pertes par effet Joule,
- G' représente les pertes par le courant de fuite dans le diélectrique.

La figure (3.2) représente les différents schémas équivalents possibles d'une portion de ligne de longueur dx .

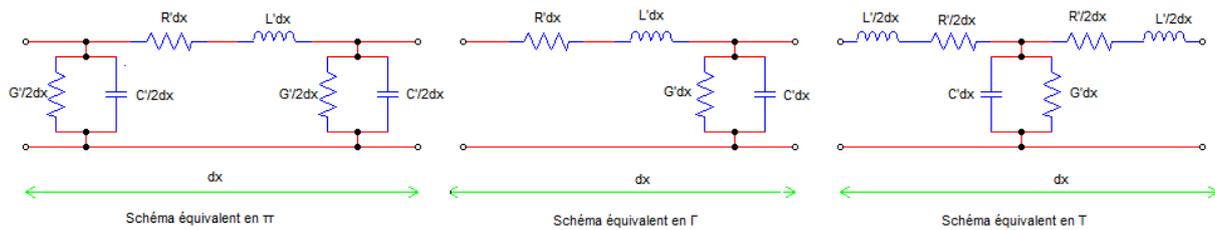


FIGURE 3.2: Différentes représentations d'un segment de ligne de transmission

Les équations de la dérivée de tension par rapport au courant et la dérivée de courant par rapport à la tension s'appellent les équations du télégraphiste ou encore les équations des lignes de transmission, car ils expliquent la manière dont les signaux électriques se transmettent le long d'une ligne.

Les paramètres distribués permettent la modélisation des lignes de transmission sous forme d'un circuit électrique. Sachant que ces paramètres distribués dépendent des caractéristiques électromagnétiques du diélectrique et de la géométrie du conducteur.

3.2 Phénomènes d'ionisation de sol et de couplage mutuel

Dans le but de décrire le comportement des systèmes de mise à la terre, deux principaux aspects doivent être pris en considération, il s'agit (i) du phénomène d'ionisation dépendant seulement des propriétés du sol, et (ii) phénomène de couplage mutuel influencé beaucoup plus par la configuration géométrique du système de mise à la terre.

3.2.0.1 Représentation du phénomène d'ionisation

Pour une très grande densité du courant près de la surface de l'électrode (des valeurs très prononcées), le champ électrique dans cette région peut dépasser les limites critiques ($E > E_{CR} = 0.2 \text{ à } 1.7 \text{ MV/m}$). Au-delà de ces limites critiques, un processus d'ionisation apparaît dans le sol. Ce phénomène est similaire à l'effet de couronne. Des nombreux chercheurs ont expliqué cet phénomène par une augmentation de la section de l'électrode (Fig.3.3).

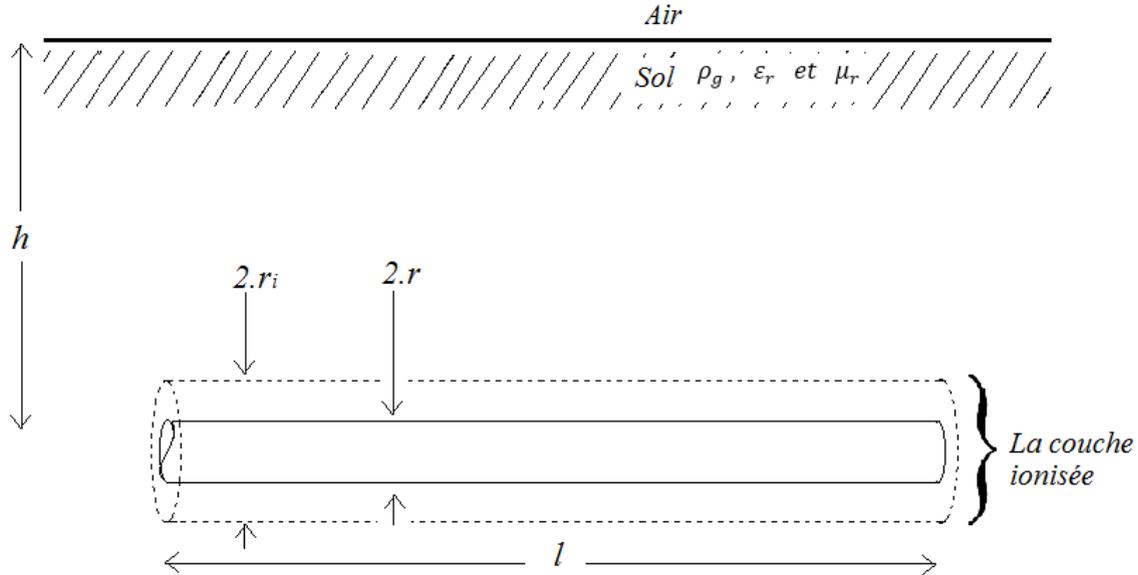


FIGURE 3.3: Représentation de la couche ionisée pour un champ uniforme

En résumé, le phénomène d'ionisation apparaît lorsque la valeur du champ électrique atteint un certain seuil appelé "champ critique" E_{CR} . Ce dernier paramètre est liée à la valeur de la résistivité du sol.

La valeur du rayon équivalent de la zone ionisée peut être déterminé par [28] :

$$\begin{cases} J = \frac{E}{\rho_g} = \frac{\Delta I}{2\pi r \Delta l} \\ r_i = r \frac{E}{E_{CR}} \end{cases} \quad (3.1)$$

où, J est la densité du courant sur chaque segment, ΔI est le courant de fuite vers la terre de chaque segment, Δl est la longueur du segment et enfin r_i le rayon équivalent de la couche ionisée.

Il est à noter que l'augmentation du rayon n'est pas homogène le long de l'électrode, puisqu'il dépend de l'intensité du champ électrique sur chaque segment.

Plusieurs études ont révélé que le champ électrique critique est obtenu quand la caractéristique $V-I$ devient non-linéaire. A la base des résultats expérimentaux, des formulations relatives au champ critique ont été proposées :

□ 1^{ère} **expression** : Oettle [29] a proposé la formule suivante :

$$E_{CR} = 241.\rho^{0,215} \text{ kV/cm} \quad (3.2)$$

□ 2^{ème} **expression** : Une deuxième formulation a été donnée par Manna [30] :

$$E_{CR} = 843.\rho^{0,124} \text{ kV/cm} \quad (3.3)$$

où : E_{CR} est le champ électrique critique d'ionisation et ρ est la résistivité du sol.

□ 3^{ème} **expression** : Compte tenu de la configuration cylindrique du dispositif expérimental, et afin de tenir compte de l'évaluation de la zone d'ionisation, la formule suivante est également utilisée [30] :

$$E_{CR} = \frac{V_{th}}{r_{ion} \cdot \ln\left(\frac{r_{out}}{r_{ion}}\right)} \text{ kV/cm} \quad (3.4)$$

où

- V_{th} : la tension critique d'ionisation en (kV),
- r_{out} : le rayon externe de l'électrode en (m),
- r_{ion} : le rayon de la zone d'ionisation en (m).

L'application de cette troisième expression nécessite à la fois la conception du dispositif adéquat et la détermination de tous les paramètres intervenant dans cette expression.

La figure (3.4) illustre la variation du champ critique en fonction de la résistivité du sol obtenue lors de l'application des expressions empiriques d'Oettle et de Manna. Les deux expressions présentent une même allure. Cependant, pour une valeur donnée de la résistivité du sol, le champ critique calculé à partir de la formule de Manna est plus important que celui estimé par celle d'Oettle.

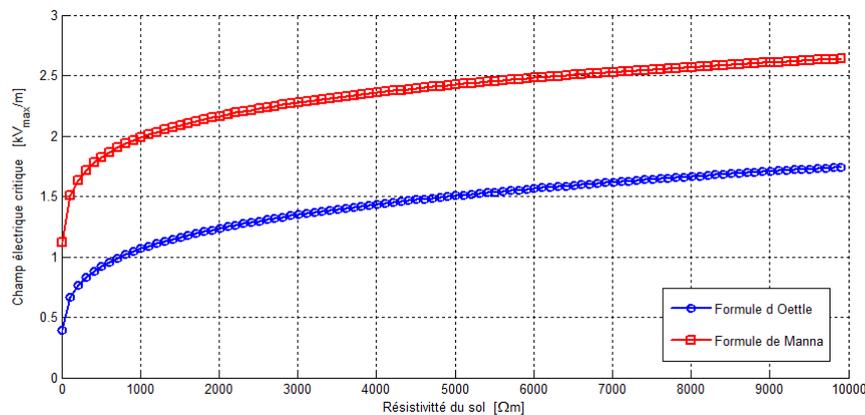


FIGURE 3.4: Variation du champ électrique critique en fonction de la résistivité du sol selon les formules d'Oettle et de Manna

Lors de notre étude, nous nous sommes intéressés au cas le plus défavorable. En effet, nous avons utilisé l'expression d'Oettle, étant donné que cette dernière donne le plus faible champ critique.

3.2.0.2 Représentation du phénomène de couplage mutuel inter-segments

3.3 Électrode Enterrée Horizontalement

Dans la nature, le sol est loin d'être homogène, linéaire et isotrope. Dans le but de nous rapprocher de la réalité, nous introduisons la notion d'un sol à stratification. Le sol le plus simple qui puisse exister est celui à deux couches. Ces dernières ont été considérées verticales dans la suite de cette étude. La première couche a une profondeur finie H et une résistivité ρ_1 . Cette couche est suivie d'une deuxième ayant une résistivité de ρ_2 et une profondeur infinie. L'électrode considérée est de longueur l et de rayon r enfouie horizontalement à une profondeur h dans le sol composé de deux couches verticales (3.5).

Le comportement transitoire relative au courant au milieu de l'électrode a été examiné lors d'un impact direct d'une impulsion de tension. Pour cela, l'approche des lignes de transmission a été utilisée. Les équations différentielles d'ordre 1 ainsi obtenues ont été résolues en appliquant la méthode de Runge Kutta tout en considérant que les courants et les tensions en chaque segment et en chaque point initiaux sont nuls.

Pour déterminer la réponse transitoire, nous avons injecté dans les programmes élaborés, une seule résistivité correspondante à celle apparente. Celle-ci a été déterminée à partir des deux résistivités des deux couches de sol, en utilisant l'équation (2.37) exposée au chapitre (2). Lors de cette étude, l'influence des phénomènes d'ionisation et de couplage est examinée.

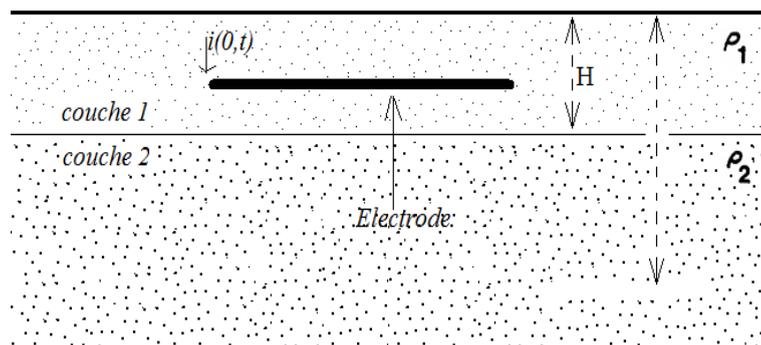


FIGURE 3.5: Représentation d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol à deux couches

Nous avons travaillé dans les mêmes conditions considérées par Sekki et al. mentionnées dans la table (3.1). Cela nous permet, entre autres, d'effectuer une comparaison de nos caractéristiques relative à la tension à celles déjà obtenues numériquement (en utilisant la méthode de Maxwell 3D et celle des lignes de transmission $[A][X] = [B]$) par ces chercheurs. Notons que pour l'onde de tension à injecter, l'expression bi-exponentielle a été adoptée.

Par ailleurs, trois types de sol ont été choisis. Outre des sols homogènes, moyennement ($\rho_g = 200 \Omega m$) et fortement ($\rho_g = 1000 \Omega m$) résistifs déjà considérés, un troisième

sol stratifié à deux couches a été envisagé. La première et la deuxième couches du sol stratifié sont constituées respectivement des sols moyennement et fortement résistifs.

TABLE 3.1: Conditions d'interaction électrode-impulsion de tension

| Tension | Électrode | Sol | Analyse |
|--|---|--|--|
| $V(t) = V_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ $V_0 = 30 \text{ kV}$ $\alpha = 45099 \text{ s}^{-1}$ $\beta = 9022879 \text{ s}^{-1}$ | $l = 20 \text{ m}$ $r = 3,5 \text{ mm}$ $h = 40 \text{ cm}$ $\rho_e = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega m$ | Couche 1 : $\rho_g = 200 \Omega m \quad \epsilon_r = 10$ Couche 2 : $\rho_g = 1000 \Omega m \quad \epsilon_r = 6$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV}$ | $T_{max} = 10 \mu s$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu s$ |

3.3.0.3 Réponse du système en ignorant les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel

En absence des phénomènes d'ionisation du sol et de couplage inter-segments, Sekki et al. [1] ont effectué leur étude relative à la détermination du courant au milieu de l'électrode de mise à la terre enterrée horizontalement à une profondeur $h = 40 \text{ cm}$ dans un sol moyennement résistif, fortement résistif et stratifié. Cette électrode possède une longueur $l = 20 \text{ m}$ et un rayon $r = 7 \text{ mm}$. Leurs résultats sont présentés sur la figure (3.6A).

Dans ces conditions, nous avons déterminé le courant. Par ailleurs, nos résultats illustrés sur la figure (3.6B) sont confrontés à ceux de Sekki et al. présentés sur la figure (3.6A).

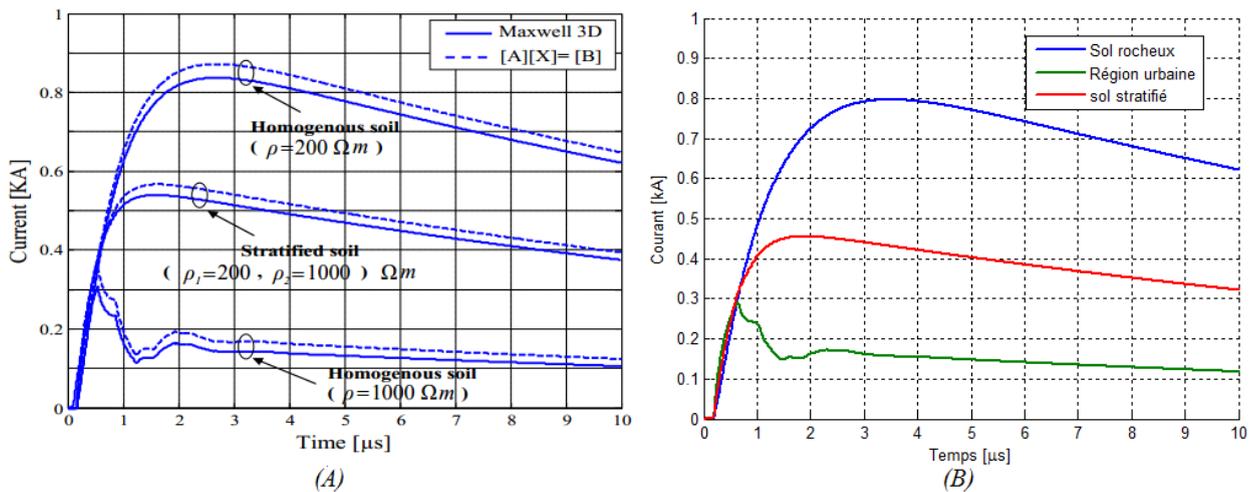


FIGURE 3.6: Évolution du courant au milieu de l'électrode dans le cas des sols moyennement résistif, fortement résistif et stratifié : (A) Résultats obtenus par Sekki et al. [1] et (B) nos résultats

La réponse transitoire en matière du courant dépend du type de sol. Le courant est plus important dans le cas d'un sol de faible résistivité, et il est faible dans le cas d'un sol fortement résistif. La caractéristique correspondante au sol stratifié se situe entre

celles obtenues respectivement pour un sol moyennement et fortement résistifs. Ceci est évident étant donné que la résistivité apparente du sol stratifié est comprise entre celles des sols moyennement et fortement résistifs.

La figure précédente montre une bonne concordance entre nos résultats et ceux de Sekki et al. Relativement aux réponses de Sekki et al., la différence réside dans le fait que nos caractéristiques, possédant un petit retard dans le temps de montée, présentent des courants légèrement inférieurs.

3.3.0.4 Réponse du système en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage inter-segments

La figure (3.7) présente l'évolution du courant au milieu de l'électrode en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel inter-segments. La simulation a été faite dans les conditions précédemment citées.

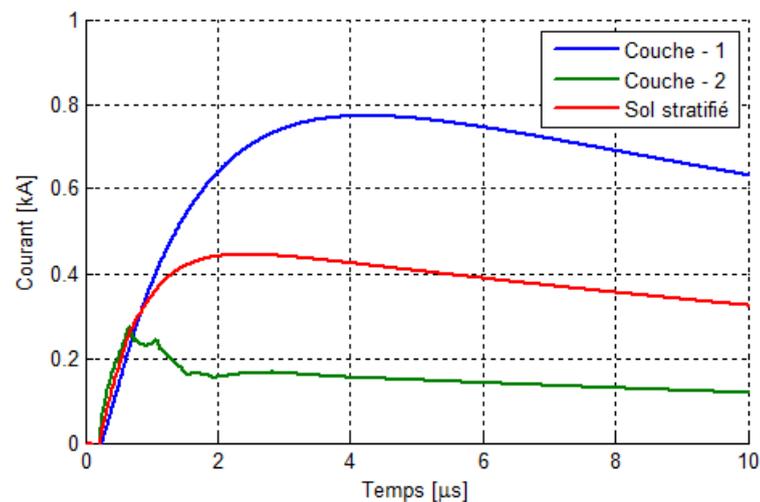


FIGURE 3.7: Évolution du courant au milieu de l'électrode en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel dans le cas des sols moyennement résistif, fortement résistif et stratifié

Les résultats que nous avons trouvés dans ce test sont confrontés à ceux présentés sur la figure (3.6B). En allant d'une segment à l'autre vers les x croissants, nous avons observé une légère diminution de l'amplitude du courant accompagné par un retard dans le temps de montée. En effet, les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel inter-segments engendrent non seulement une légère chute de toutes les caractéristiques, mais aussi un léger retard dans le temps de montée.

3.3.0.5 Temps d'exécution

Dans la partie précédente, nous avons comparé nos réponses transitoires d'une électrode de terre enterrée horizontalement dans un sol stratifié à deux couches à celles obtenues par Sekki et al. [1].

En utilisant une machine ayant les mêmes caractéristiques² que celle utilisée par ces chercheurs, nous nous sommes intéressés à comparer, dans cette section, le temps d'exécution de notre approche à ceux trouvés par ces chercheurs. Notons que ces derniers ont utilisé deux techniques numériques : (i) la méthode "Maxwell 3D" basée sur l'approche électromagnétique, et (ii) la méthode " $[A][X] = [B]$ " basée sur l'approche des lignes de transmission. Les résultats obtenus sont cités dans la table (3.2) :

TABLE 3.2: Comparaison entre les temps d'exécution

| Approche | Temps d'exécution |
|-----------------------------|-------------------|
| Maxwell 3D | 10 heures |
| TLM : FDTD | 40,44 s |
| TLM : représentation d'état | 4,46 s |

Nous pouvons conclure que nous avons obtenue pratiquement les mêmes caractéristiques de Sekki et al. avec un temps d'exécution beaucoup moins réduit.

3.4 Électrode Enterrée Verticalement

Dans cette section, nous allons refaire le même travail en utilisant cette fois-ci une électrode verticale, comme illustré sur la figure (3.8).

Les mêmes procédures, techniques et conditions ont été appliquées. L'unique différence est dans la longueur de l'électrode verticale, qui est de 10 m. En effet, les conditions choisies sont données dans la table (3.3).

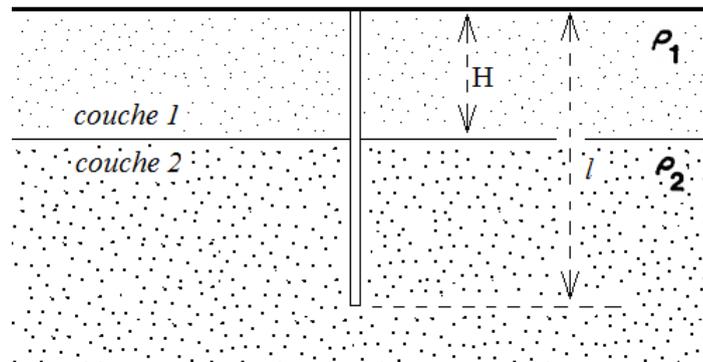


FIGURE 3.8: Représentation d'une électrode enterrée verticalement dans un sol à deux couches

2. Machine : Intel (R) Core (TM) 2, 1.86 GHz et 0.98 Go de RAM

TABLE 3.3: Conditions d'interaction électrode-impulsion de tension

| Tension | Électrode | Sol | Analyse |
|--|--|--|--|
| $V(t) = V_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ $V_0 = 30 \text{ kV}$ $\alpha = 45099 \text{ s}^{-1}$ $\beta = 9022879 \text{ s}^{-1}$ | $l = 10 \text{ m}$ $r = 7 \text{ mm}$ $\rho_e = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega m$ | Couche 1 : $\rho_g = 200 \Omega m \quad \epsilon_r = 10$ Couche 2 : $\rho_g = 1000 \Omega m \quad \epsilon_r = 6$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV}$ | $T_{max} = 10 \mu s$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu s$ |

3.4.0.6 Réponse du système en ignorant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel

Les caractéristiques (3.9A) et (3.9B) illustrent respectivement la variation du courant à l'entrée et au milieu de l'électrode verticale, pour les trois types de sol à savoir, moyennement résistif, fortement résistif et stratifié. De tels résultats ont été obtenus en ignorant les phénomènes physiques relatifs à l'ionisation du sol et au couplage mutuel inter-segments.

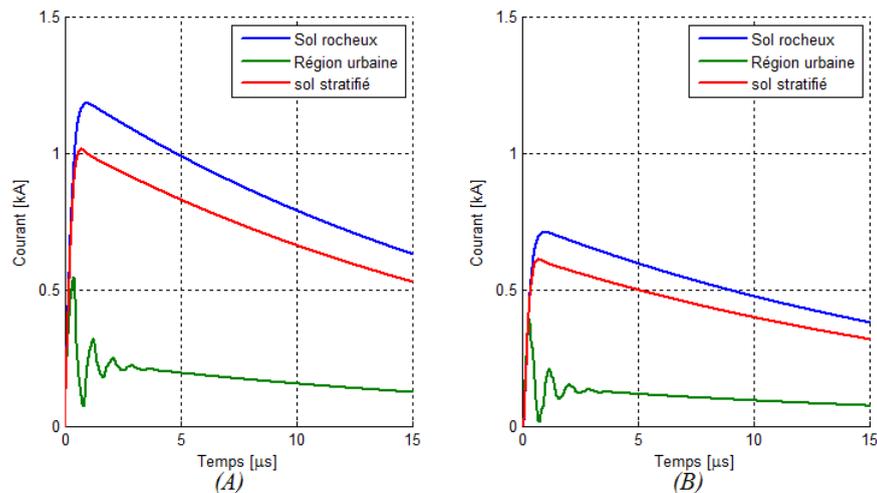


FIGURE 3.9: Variation du courant (A) courant d'entrée et (B) au milieu de l'électrode

La seule différence par rapport aux résultats obtenus lors de l'utilisation d'une électrode horizontale, est que la caractéristique correspondante au sol fortement résistif présente quelques oscillations. À l'exception de cette unique différence, les autres constatations déjà faites pour l'électrode horizontales, demeurent valables dans notre cas. En effet, le type de sol affecte le courant. Ce dernier est faible dans le cas d'un sol fortement résistif et vice-versa. La caractéristique obtenue dans le cas d'un sol stratifié se situe entre celles obtenues lors de l'utilisation des sols moyennement et fortement résistifs. C'est exactement la même remarque observée pour le cas d'une électrode horizontale. Ceci s'explique par le fait que la résistivité apparente du sol stratifié est comprise entre celles des sols moyennement et fortement résistifs.

3.4.0.7 Réponse transitoire du système en présence des phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel inter-segments

La figure (3.10) montre l'évolution du courant à l'entrée (Fig.3.10A) et au milieu (Fig.3.10B) de l'électrode pour les trois types de sol considérés, et ce en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel inter-segments (les caractéristiques de ce test sont les pointillées et en conteneur représentent le cas d'absence des deux phénomènes suscités).

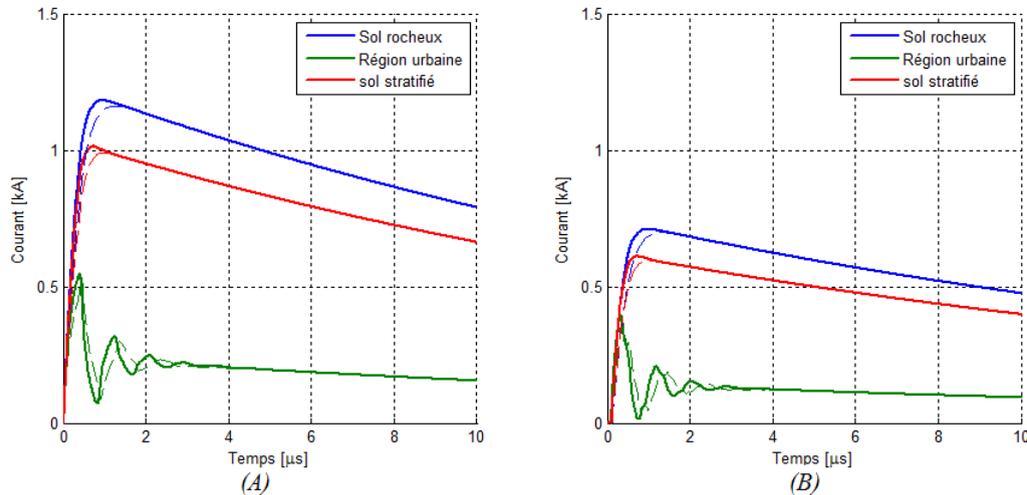


FIGURE 3.10: Variation du courant en considérant l'ionisation du sol et le couplage mutuel : (A) courant à l'entrée et (B) courant au milieu de l'électrode

Comme précédemment, ces deux phénomènes engendrent une légère diminution au niveau de la valeur de crête accompagnée par un léger retard dans le temps de montée.

Conclusion Générale

Lors de cette étude, nous avons analysé le comportement transitoire des systèmes de géométrie simple à savoir : électrode horizontale et une électrode verticale. Le sol concerné par cette étude est un sol stratifié à deux couches. Nous avons retenu les principales conclusions suivantes :

- Une bonne concordance a été trouvée en comparant nos résultats à ceux rapportés par Sekki et al. obtenus lors de l'injection d'une tension impulsive à une extrémité d'une électrode horizontale enterrée dans un sol stratifié. Ce qui valide les algorithmes que nous avons établis. Cependant, nos temps d'exécution sont beaucoup plus faibles que ceux trouvés par ces chercheurs.
- La résistivité du sol est un facteur très influençant sur la réponse transitoire des systèmes de mise à la terre. En effet, l'augmentation de la résistivité du sol engendre non seulement une augmentation des valeurs de crêtes des ondes de courant et de potentiel, mais également, des fluctuations au niveau notamment de l'onde de potentiel.
- L'ionisation de sol et le couplage mutuel inter-segments engendrent une chute des amplitudes des ondes de courant et de potentiel et une augmentation dans leurs temps de montée.

Bibliographie

- [1] D. Sekki and et al., "Transient behaviour of grounding system in a two-layer soil using the transmission line theory," *Original scientific paper*, 2014.
- [2] E. B. Joffe and K.-S. Lock, *Ground for grounding*. Wiley, 2010.
- [3] L. Venanzi, *Règlements générales sur les installations électriques*. Edi. pro, Belgique, 2014.
- [4] D. Brown and D. Harrold, *Control Engineering, Control system power and Grounding Better practice*. Elsevier, 2004.
- [5] I. S. T.-. (R2001), "Ieee guide for generating station grounding," *Energy Development and Power Committee of the IEEE Power Engineering Society*, 1996.
- [6] A. P. S. Meliopoulos, *Power system grounding and Transients*. MARCEL DEKKER, 1988.
- [7] G. Vijayaraghavan, M. Brown, and M. Barnes, *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*. IDC Technologies, 2004.
- [8] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Methodology and technology for power system grounding*. John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd, 2013.
- [9] L. des radiocommunications de l'UIT, "Caractéristiques Électriques du sol," *ITU : Union Internationale des Télécommunications*, 2002.
- [10] J. A. Saxton and J. A. Lane, *Electrical properties of sea water, 349*, vol. 29. *Wireless Eng*, Oct 1952.
- [11] W. Neudorf, "Mise à la terre : principe - mesures - techniques et applications," *LEM Instruments, Autriche*, vol. A 9941 5 F, 2006.
- [12] B. Claude, "Principes de conception et de réalisation des mises à la terre," *EDF-Centre des études et recherches*, Janvier 1984.
- [13] D. of Defense USA, *MILITARY HANDBOOK Gounding - Bonding - and Shielding*, vol. 2. Electronic equipments and facilities - D.D.USA, Dec 1987.
- [14] I. S. 80-2000, "Ieee guide for safety in ac substation grounding," *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2000.
- [15] A. C. Liew and M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths," *Proc, IEE.*, vol. 121, February 1974.

- [16] M. A. Laughton and D. J. Warne, *Electrical Engineer's Reference Book*, vol. 6. Elsevier Science, 2003.
- [17] E. D. Sunde, *Earth conduction effects in transmission systems*. Bell Telephone Laboratories incorporated, New York, 1968.
- [18] G. F. Tagg, *Earth resistances*. George Newnes, 1964.
- [19] N. D. Hatziargyriou and M. I. Lorentzou, "Investigation of the effect of mutual coupling of grounding conductors," *National Technical University of Athens Department of Electrical and Computer Engineering, Electric Power Division 42. Athens, Greece*, 1998.
- [20] G. Marquis, *Prospection électrique*. EOST Strasbourg, 19 Avril 2005.
- [21] H. Ghazi and et al., "Earth surface potential and grounding resistance for grounding grid in two layer model soil," *IEEE*, 2012.
- [22] C. J. Blattner, "Study of driven ground rods and four point soil resistivity tests," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1989.
- [23] L. V. Bewley, *Theory and tests of the counterpoise*. A.I.EE. committee, 1934.
- [24] C. S and et al., "Transient behaviour of grounding systems simulations : Remarks on the emtp's and special code's use," in : *Proceeding of the 21 st Users Group Meeting, Kolumpari Crete, Greece. 5-7, June 1992*.
- [25] L. Grcev and M. Popov, "On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 20, no. 2, 2005.
- [26] Y. Chow and M. Salama, "A simplified method for calculating the substation grounding grid resistance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, April 1994.
- [27] D. Grenier, "Electromagnétisme et transmission des ondes," *Université Laval Québec*, 2005.
- [28] S. Yu and et al., "Time domain analysis method of lightning transient characteristics of grounding electrode," *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, China*, 2003.
- [29] E. Oettle, "A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 3, no. 4, 1988.
- [30] V. Cooray, "Lightning protection," *The institution of engineering and technology*, 2009.