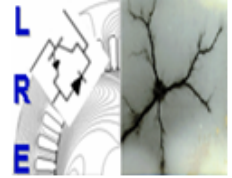


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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



Mémoire de Master en Électrotechnique

Présenté par :

KHERIF Omar

INTITULÉ

Réponse transitoire d'une électrode de terre enterrée dans un sol homogène utilisant l'approche des lignes de transmission

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

Membres du Jury d'examen

Président
Rapporteur
Examineurs

L. NEZLI
M. TEGUAR
H. SAHRAOUI
D. NAMANE

Professeur ENP – Alger
Professeur ENP – Alger
Docteur ENP – Alger
Docteur 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
Liste des Symboles	iii
Remerciement	iv
Résumé	v
Introduction	1
1 Modèle et Algorithmes de Calcul	3
1.1 Modélisation du Système d'Étude	3
1.1.1 Approche des lignes de transmission (TLM)	3
1.1.2 Modélisation d'un système sous forme de représentation d'état	5
1.2 Étude du Système de Mise à la Terre	6
1.2.1 Système électrique équivalent	6
1.2.2 Phénomènes d'ionisation de sol et de couplage mutuel	7
1.2.2.1 Représentation du phénomène d'ionisation	7
1.2.2.2 Représentation du phénomène de couplage mutuel inter-segments	9
1.3 Application sur une Électrode Horizontale	10
2 Simulation d'une Électrode Horizontale enfouie dans un Sol Homogène	14
2.1 Simulation d'une Électrode Horizontale	14
2.2 Résultats et Discussion	14
2.2.1 Test 1- faible courant impulsionnel (low impulsive current)	14
2.2.1.1 Présence du couplage capacitif	15
2.2.1.2 Absence des couplages et de phénomène d'ionisation du sol	17
2.2.2 Test 2- courant impulsionnel élevé (high impulsive current)	18
2.2.2.1 Réponse du système sans tenir compte des phénomènes physiques (ionisation et couplage mutuel)	18
2.2.2.2 Réponse du système en considérant le phénomène d'ionisation du sol	20
2.2.2.3 Réponse transitoire du système en considérant le phénomène de couplage inter-segments	20
2.2.2.4 Réponse transitoire en considérant les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel	21

2.2.3	Test 3- courant impulsionnel très élevé (very high impulsive current)	22
2.2.3.1	Réponse transitoire du système en absence des phénomènes de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	22
2.2.3.2	Réponse transitoire du système en considérant le phénomène d'ionisation	24
2.2.3.3	Réponse transitoire du système en considérant le phénomène de couplage inter-segments	26
2.2.3.4	Réponse transitoire du système en considérant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel	27
Conclusion		28
Bibliographie		30

Liste des Symboles

D	distance	m
l	longueur	m
h	profondeur	m
λ	longueur d'onde	m
r	rayon	m
d	diamètre	m
p	périmètre	m
S	surface	m^2
A	aire	m^2
ρ	résistivité	$\Omega.m$
ρ_a	résistivité apparente	$\Omega.m$
σ	conductivité	$S.m^{-1}$
μ_0	perméabilité du vide	$H.m^{-1}$
μ_r	perméabilité relative	1
ϵ_0	permittivité du vide	$F.m^{-1}$
ϵ_r	permittivité relative	1
γ	coefficient de propagation	.
K	coefficient de réflexion	.
R	résistance	Ω
L	inductance	H
C	capacité	F
G	conductance	Ω
Z	impédance	Ω
Y	admittance	Ω^{-1}
I	courant	A
V	potentiel	V
f	fréquence	Hz
ω	pulsation	$rad.s^{-1}$
c	célérité de lumière	$m.s^{-1}$
\vec{E}	champ électrique	$V.m^{-1}$
\vec{J}	densité du courant	$A.m^{-1}$
\vec{A}	vecteur potentiel	$V.m^{-1}$
t	temps	s
τ, T	constantes du temps	s
P	probabilité	.

Remerciement

*“Je tient 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 **Pr. L. NEZLI** qui m’a généreusement fait profiter de sa connaissance dans le domaine des réseaux électriques, pour l’intérêt qu’il 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 mes enseignantes **Dr. H. SAHRAOUI** et **Dr. D. NAMANE** pour leur aide, leur appuis moral et leurs qualités humaines. Qu’elles soit convaincu de ma sincère reconnaissance pour avoir accepté d’examiner et critiquer ce mémoire.”*

*“J’adresse mes sincères remerciements à **M. S. Chiheb** qui m’a orienté durant mon travail et pour son aide.”*

ملخص - اعتمدنا خلال هذه الدراسة على نهج خطوط النقل وذلك من خلال حل معادلات التلغراف الموضحة في صيغة معادلات حالة في المجال الزمني. كما يهدف هذا العمل إلى تحسين فهم السلوك العابر لأنظمة التأريض نتيجة لعيوب تيارات اندفاعية. يتكون نظام التأريض في هذه الدراسة من قطب أفقي. قد تم دفن هذا الأخير في تربة متجانسة. تم فحص البعض من هذه السلوكيات في وجود أو غياب بعض الظواهر الفيزيائية المتمثلة في تأين التربة، الاقتران بالسعة بين النظام والأرض، وأخيرا الاقتران المتبادل بين مختلف تجزئات النظام الأرضي. قد تم وضع العديد من الخوارزميات تحت بيئة *MATLAB*. تم التحقق من النتائج المتحصل عليها من خلال مقارنتها مع أخرى تحصل عليها باحثون آخرون في المجال.

كلمات مفتاحية - نظام تأريض، استجابة عابرة، نهج خطوط النقل (TLM)، البرق، تأين التربة، الاقتران المتبادل، نقطة الحقن، وتيرة عالية.

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 d'un système de mise à la terre de configuration simple dans le domaine temporel, suite à une injection d'un courant impulsif. Il s'agit d'une électrode rectiligne de forme cylindrique. De tel système a été enfouie horizontalement dans un sol homogène. Un tel comportement a été examiné en présence ou en absence de certains phénomènes physiques à savoir l'ionisation du sol, le couplage capacitif entre le système de terre et le sol et finalement, 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, foudre, ionisation, couplage, point d'injection, haute fréquence.

Abstract - The transmission lines approach (TLM), whose the resolution of telegrapher equations is presented as state space equations, has been adopted in this work. The main objective is to modelize the transient behavior, in the temporal domain, of grounding system submitted to an impulsive current. The grounding system consist of a horizontal electrode. This system have been buried in a homogeneous soil. Such behavior has been examined in presence or not of certain physical phenomena namely the soil ionization, the capacitive coupling between the earth system and the ground, and finally the mutual coupling between segments of the earth system. Many algorithms have been developed under MATLAB environment. The obtained results have been confronted to those found by other researchers in ths field.

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

Introduction

Garantir l'exploitation et la stabilité des systèmes, assurer la sécurité de l'être humain dans la situation d'un défaut ou protéger les équipements électriques est réalisé par la biais de l'utilisation d'un dispositif adapté, capable de répondre à toutes ces exigences et également présente une méthode clé pour réduire les interférences électromagnétiques.

Le système de mise à la terre devient nécessaire pour chaque installation électrique [1]. Étant donné l'importance de ce dernier, des nombreuses recherches sont intensifiées dans le domaine des mises à la terre. Ces recherches visaient, dans leur grande majorité, les comportements, transitoire et en régime établi, de ces systèmes de terre à basse et/ou haute fréquences.

La réponse des systèmes de mise à la terre soumis à des courants de foudre est différente de celles obtenues suite à l'injection des courants à basse fréquence (BF), tels que des courts-circuits. La réponse à des courants impulsionnels, la dépendance en fréquence des paramètres du sol et le processus d'ionisation sont les plus pertinentes.

Des nombreux travaux de recherche ont été effectués en vue d'étudier les performances des systèmes de mise à la terre en basse et haute fréquences. Les premiers travaux ont été entrepris par Tagg [2], Sunde [3] et Meliopoulos [4]. Leurs systèmes ont été modélisés en basse fréquence par une résistance. En fait, diverses formules analytiques et empiriques ont été développées pour le calcul de la résistance de terre [5, 6]. En hautes fréquences, suite à l'injection d'une onde de foudre par exemple, le modèle de résistance n'est plus valable. De ce fait, plusieurs méthodes numériques ont été élaborées pour simuler les systèmes de terre. Nous citons, entre autres, (i) l'approche des circuits qui a été mise en œuvre par Meliopoulos et al. en 1983 [7, 8], (ii) l'approche électromagnétique développée par Grcev [9, 10], (iii) l'approche hybride introduite par Dawalibi en 1986 [11, 12] et finalement (iv) l'approche des lignes de transmission créée par Verma et al. [13], Mazzetti et al. [14] et enfin par Velazquez et al. [15].

Ces approches ont été utilisées par d'autres chercheurs afin de déterminer le potentiel [16], le courant [17, 18], le flux électromagnétique [19, 20] ainsi que l'impédance transitoire [21, 22] suite à un impact de coup de foudre. Sekki et al. [23] ont examiné le potentiel d'une électrode et d'une grille suite à l'injection d'une impulsion de tension. En outre, l'approche des circuits a été développée pour les systèmes complexes par Ramamootry et al. en 1989 [24]. Cette même approche a été modifiée par Geri [25] et Otero [26] ont modifié finalement cette approche, en 1999, en intégrant le phénomène d'ionisation du sol. Par ailleurs, l'approche hybride a été également modifiée par Andolfato en 2000 en introduisant la méthode des images permettant de traiter le cas de très hautes fréquences [27].

Certains chercheurs ont utilisé des codes de calcul afin d'examiner le comportement transitoire des systèmes de terre. Le code de calcul EMTP (Electromagnetic Transient Program) a été utilisé par Cattaneo et al. [16] ainsi que par Celli et al. [28]. Le code de calcul GSSP (Grounding Systems Simulation Program), destiné pour la simulation des systèmes de terre, a été utilisé par Cattaneo et al. [16]. Le code de calcul NEC-4 (Numerical Electrmagnetic Code) a été employé par Harrat [29] et Sekki et al. [23].

Intitulé "Réponse transitoire d'une électrode de terre enterrée dans un sol homogène utilisant l'approche des lignes de transmission", ce mémoire tend ainsi à démontrer que la configuration du système, les caractéristiques électromagnétiques du sol ainsi que la considération de quelques phénomènes physiques sont des facteurs de première importance affectant la réponse transitoire des systèmes de mise à la terre. C'est dans cette optique que nous nous sommes intéressés à étudier le comportement des systèmes de mise à la terre suite à l'injection d'un courant impulsif. Comme configurations de terre, nous avons choisi une électrode horizontale. De tel système est enterré dans un sol homogène. Les phénomènes physiques considérés dans cette étude sont l'ionisation du sol, le couplage capacitif entre le système de terre et le sol et finalement, le couplage mutuel entre les différents segments du système de terre. De nombreux algorithmes ont été établis sous environnement MATLAB. L'approche adoptée pour une telle étude est celle des lignes de transmission. Comme nouveauté dans ce domaine, la représentation d'état a été sélectionnée. Les résultats que nous avons obtenus ont été confrontés à ceux trouvés par d'autres chercheurs dans le domaine.

Ainsi, ce manuscrit est structuré en deux chapitres distincts. Dans le premier chapitre, nous avons cité l'approches des lignes de transmission développée en vue d'étudier le comportement des systèmes de mise à la terre en haute fréquence. Nous avons présenté également les algorithmes de calcul pour deux cas de figures ; absence ou présence des phénomène d'ionisation du sol et de couplage mutuel inter-segments.

Le deuxième chapitre concerne l'étude du comportement transitoire d'une électrode horizontale enterrée dans un sol homogène suite à une injection de courant impulsif. Trois tests ont été effectués, (i) impulsion de courant bi-exponentielle de faible amplitude, (ii) impulsion de courant en polynomiale ou sinusoïdale de forte amplitude, et (iii) impulsion de courant bi-exponentielle de très forte amplitude simulant une onde de foudre.

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

Chapitre 1

Modèle et Algorithmes de Calcul

1.1 Modélisation du Système d'Étude

1.1.1 Approche 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 [30].

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 (1.1). Le champ électromagnétique est complètement contenu dans le sol. Cette ligne doit aussi confirmer les hypothèses de validité suivantes [30] :

- 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 .

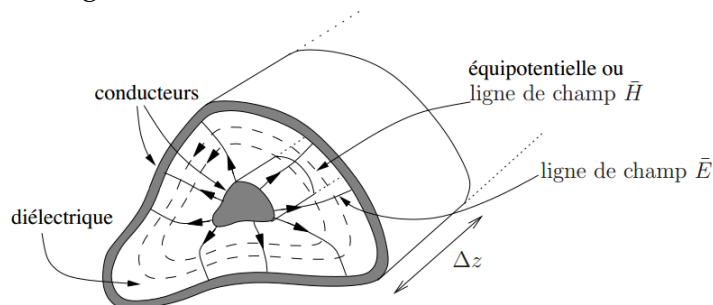


FIGURE 1.1: Représentation d'une coupe de ligne de transmission de section quelconque [30]

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 [30].

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 [30] :

- 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 (1.2) représente les différents schémas équivalents possibles d'une portion de ligne de longueur dx .

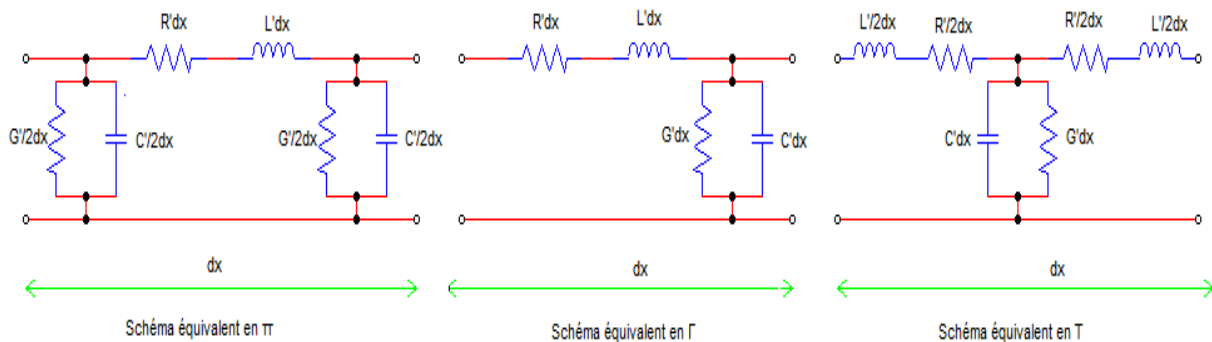


FIGURE 1.2: Différentes représentations d'un segment de ligne de transmission

Une ligne de transmission mono-filaire de longueur L_g est représentée en considérant la chute de tension transverse dV et le courant longitudinal dI à chaque unité de longueur dx , par les équations des télégraphistes où le sol constitue le conducteur de retour. On obtient par l'application de la loi des mailles les équations suivantes [4] :

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = R'I(x,t) + L'\frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = G'V(x,t) + C'\frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \quad (1.2)$$

avec :

- I est le courant dans les conducteurs (matrice colonne).
- V est le potentiel des conducteurs (la référence est la terre éloignée).

Les équations de la dérivée de tension par rapport au courant (Eq.1.1) et la dérivée de courant par rapport à la tension (Eq.1.2) 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.

1.1.2 Modélisation d'un système sous forme de représentation d'état

La modélisation d'un système est une série d'équations mathématiques obtenue grâce à l'étude du comportement physique d'un système quelconque. Elle permet d'estimer le comportement de ce système en fonction d'une certaine consigne ou de déterminer la consigne permettant d'obtenir un comportement précis. L'écart entre le comportement attendu du système et son comportement réel dépend de la fidélité du modèle choisi.

Les équations mathématiques des modèles seront toujours des équations différentielles linéaires à coefficients constants, mais il faut savoir que pour tout système non linéaire, il est possible de le linéariser autour d'un point de fonctionnement.

La représentation d'état n'est qu'un outil pour l'étude des systèmes. Cet outil utilise l'algèbre linéaire (calcul matriciel) dont les avantages principaux sont :

- Même formalisme pour les systèmes analogiques ou échantillonnés.
- Même formalisme pour les systèmes mono-variable ou multi-variable.
- Une analyse interne des systèmes.
- L'utilisation généralisée de l'ordinateur.

Prenons par exemple, une équation différentielle d'ordre n . Le principe de cet outil consiste à transformer cette équation différentielle sous n sous-équation différentielle d'ordre 1. Soit un système multi-entrées (m entrées), multi-sorties (p sorties), dont le modèle est décrit par une ou plusieurs équations différentielles linéaires à coefficients constants. Le système d'équations différentielles est présenté par (1.3)

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + \dots + a_{1n}x_n(t) + b_{11}u_1(t) + \dots + b_{1m}u_m(t) \\ \dot{x}_2(t) = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + \dots + a_{2n}x_n(t) + b_{21}u_1(t) + \dots + b_{2m}u_m(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) = a_{n1}x_1(t) + a_{n2}x_2(t) + \dots + a_{nn}x_n(t) + b_{n1}u_1(t) + \dots + b_{nm}u_m(t) \end{cases} \quad (1.3)$$

Ce modèle peut s'écrire sous la forme matricielles d'un système d'équations différentielles de premier ordre :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) + DU(t) \end{cases} \quad (1.4)$$

où $X(t)$ est le vecteur d'état dont le nombre d'éléments n dépend de la complexité du système (l'ordre de l'équation différentielle), $U(t)$ est le vecteur de consigne, $Y(t)$ est le vecteur de sortie, et $A(n \times n)$, $B(n \times m)$, $C(p \times n)$ et $D(p \times m)$ sont des matrices à coefficients constants.

Le modèle sous cette forme est appelé représentation d'état du système. Cette représentation d'état n'est pas unique, elle dépend du vecteur d'état choisi. La première

équation du système (1.4) s'appelle l'équation de commande et la seconde c'est l'équation d'observation.

1.2 Étude du Système de Mise à la Terre

Généralement, au moment du défaut ou d'impact de foudre, les courants de défauts s'écoulent vers la terre. La caractéristique électrique principale d'un système de mise à la terre est son impédance transitoire (dans le domaine du temps) ou impédance harmonique (dans le domaine de fréquence) [29].

La connaissance de cette grandeur permet de juger la fiabilité et l'adaptation du système de mise à la terre pour la protection des équipements électriques et d'assurer la sécurité personnelle, mais aussi il faut réduire son rayonnement électromagnétique qui affecte l'environnement [29].

C'est pourquoi, il faut examiner en détail les caractéristiques physiques d'un système qui ont un effet décisif sur le comportement transitoire présentant un intérêt.

1.2.1 Système électrique équivalent

Lorsqu'un courant impulsif est injecté dans un système de mise à la terre, il y a une force électromotrice générée par la variation du champ magnétique et une dissipation du courant vers le sol engendre une variation du champ électrique. Le conducteur est représenté par une ligne de transmission caractérisée par une distorsion d'onde et des pertes.

Notre électrode est divisée en éléments uniformes donc de même longueur Δl . Pour pouvoir appliquer l'approche des lignes de transmission, Δl doit être inférieur ou égal à $\frac{\lambda}{10}$; λ étant la longueur d'onde [31, 32]. Il est à noter que la longueur d'onde est une grandeur physique, définie comme la distance séparant deux maxima consécutifs de l'amplitude. Si on appelle c la célérité de l'onde et T sa période temporelle, on a :

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \quad (1.5)$$

Dans cette présente étude, nous avons choisi une fréquence f excessive de 10 MHz. Ce choix a été fait conformément à la littérature qui stipule que la fréquence d'une onde de foudre peut varier de quelques kHz à quelques MHz [32]. L'équation (1.5) nous permet d'avoir : $\Delta l \leq 3 \text{ m}$. En effet, pour masquer la propagation, il faut cette conditions soit vérifiée. Dans notre cas, nous avons choisi $\Delta l = 1 \text{ m}$.

C'est pourquoi, nous modélisons notre système par une cascade de cellules à des paramètres distribués R' , L' , G' et C' dont les expressions ont été déjà données par Sunde [3].

La modélisation avec prise en compte de tous les phénomènes physiques (ionisation du sol, couplage mutuel, température, etc.) n'est généralement pas une tâche aisée. La complexité augmente encore lorsque la dépendance fréquentielle de ces paramètres est prise en considération. Une autre approche est donc nécessaire pour analyser les lignes dans le domaine temporel.

Les autres paramètres localisés qui tiennent compte de l'effet de couplage entre les segments du système (les mutuelles par exemple), peuvent être évalués en utilisant les formules de Sunde [3], qui sont acceptables en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Sol homogène, linéaire et isotrope,
- Courant distribuée uniformément dans le conducteur,
- Effet de peau négligé,
- Profondeur d'enfouissement h , le rayon de l'électrode r significativement plus faibles à la longueur l de l'électrode.

Selon Cattaneo et al. [16], le schéma équivalent en Π donne une meilleure réponse relativement à celles des autres schémas. En ce qui concerne les paramètres localisés (distribués), nous avons utilisé les mêmes expressions déjà proposées par Cattaneo et al. :

$$\left\{ \begin{array}{l} R' = \rho_e \frac{4\Delta l}{\pi d^2} \\ L' = \frac{\mu \Delta l}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \ln\left(\frac{l}{2h}\right) \right\} \\ G' = \frac{\Delta l}{\rho_g \left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \ln\left(\frac{l}{2h}\right) \right]} \\ C' = 2\pi\epsilon \frac{\Delta l}{\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \ln\left(\frac{l}{2h}\right)} \end{array} \right. \quad (1.6)$$

La validité de ces expressions est conditionnée par la vérification des hypothèses suivantes : $2r \ll 4l$ et $4h \ll l$ [16].

1.2.2 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.

1.2.2.1 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 ($E > E_{CR} = 0.2$ à 1.7 MV/m). Au-delà de ces limites critiques, un processus d'ionisation apparait 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.1.3).

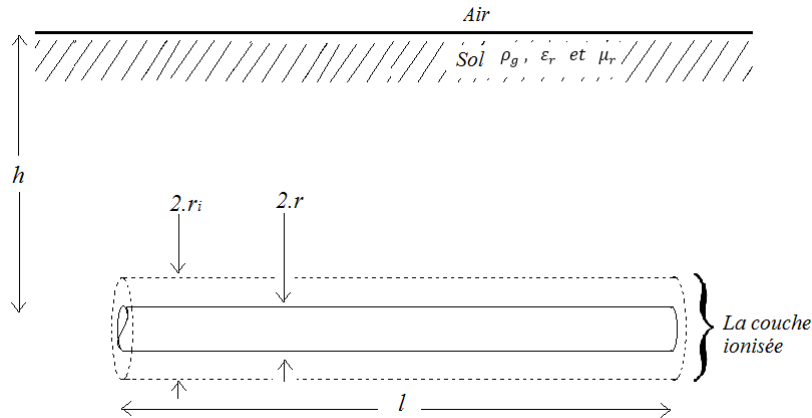


FIGURE 1.3: Représentation de la couche ionisée pour un champ uniforme

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 [33] :

$$\begin{cases} J = \frac{E}{\rho_g} = \frac{\Delta I}{2\pi r \Delta l} \\ r_i = r \frac{E}{E_{CR}} \end{cases} \quad (1.7)$$

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 [21] a proposé la formule suivante :

$$E_{CR} = 241.\rho^{0,215} \text{ kV/cm} \quad (1.8)$$

□ 2^{ème} **expression** : Une deuxième formulation a été donnée par Manna [34] :

$$E_{CR} = 843.\rho^{0,124} \text{ kV/cm} \quad (1.9)$$

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 [34] :

$$E_{CR} = \frac{V_{th}}{r_{ion} \cdot \ln\left(\frac{r_{out}}{r_{ion}}\right)} \text{ kV/cm} \quad (1.10)$$

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 (1.4) 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.

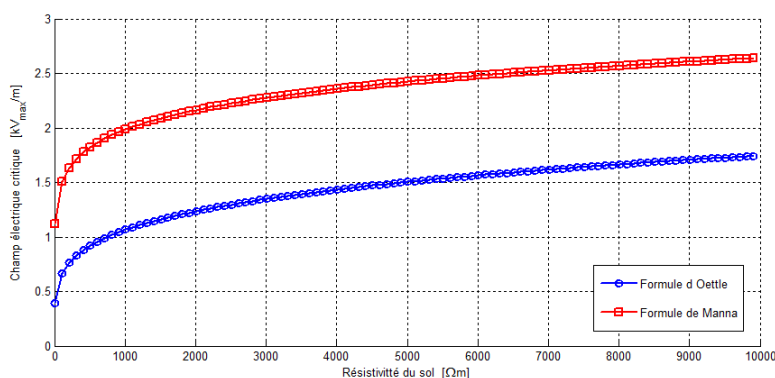


FIGURE 1.4: Variation du champ électrique critique en fonction de la résistivité du sol selon les formules d'Oettle et de Manna

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.

1.2.2.2 Représentation du phénomène de couplage mutuel inter-segments

En terme de la compatibilité électromagnétique, les moyens de propagation sont multiples, suivant la distance séparant la victime de la source et la présence ou l'absence d'une liaison galvanique entre les deux modes (conduit ou rayonné). Parfois, les conducteurs parcourus par un courant perturbateur se comportent comme des antennes pouvant rayonner un champ électrique (respectivement un champ magnétique) variable dans leur environnement. Un courant est donc induit sur ce conducteur (respectivement une force électromotrice dans une boucle).

L'inductance mutuelle prend en compte l'effet du couplage mutuel entre deux cellules. Elle peut être évaluée par l'équation générale suivante [28] :

$$M = \int_{c1} \int_{c2} \frac{ds_1 \cdot ds_2}{r_{12}} \quad (1.11)$$

Lorsque les électrodes sont disposées suivant deux axes parallèles, l'inductance mutuelle M (en H) peut être évaluée par la formule de Grover, donnée comme suit [35, 36] :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \alpha \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\alpha}{D}\right) - \beta \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\beta}{D}\right) - \gamma \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\gamma}{D}\right) + \delta \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\delta}{D}\right) \right. \\ \left. - \sqrt{\alpha^2 + D^2} + \sqrt{\beta^2 + D^2} + \sqrt{\gamma^2 + D^2} - \sqrt{\delta^2 + D^2} \right\} \quad (1.12)$$

avec :

$$\begin{aligned} \alpha &= n + m + \delta \\ \beta &= n + \delta \\ \gamma &= m + \delta \end{aligned}$$

où :

m , n , D et δ sont des grandeurs (en m) définis sur la figure (1.5).

En cas des cellules disposées sur le même axe ($D = 0$), l'inductance mutuelle M (en μH) peut être évaluée par :

$$M = 0.23 \{ \alpha \log(\alpha) - \beta \log(\beta) - \gamma \log(\gamma) + \delta \log(\delta) \} \quad (1.13)$$

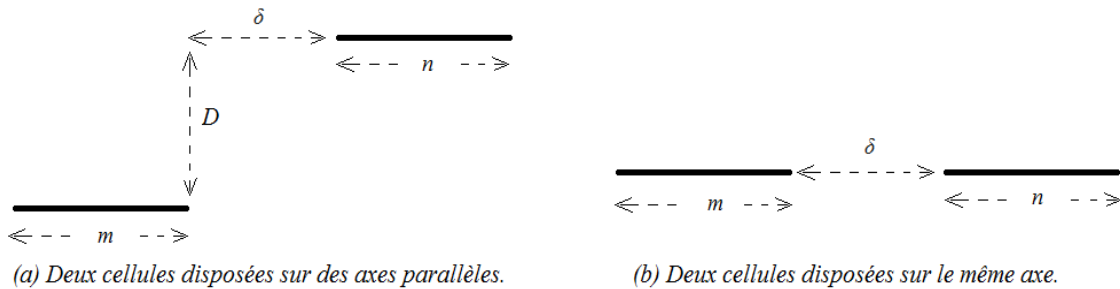


FIGURE 1.5: Couplage mutuel entre deux cellules [28]

1.3 Application sur une Électrode Horizontale

Dans cette section, nous proposons d'analyser le comportement de l'électrode de terre lors d'un impact direct d'une impulsion de courant. Pour cela, nous utilisons l'approche des lignes de transmission dans laquelle la représentation de l'électrode se fait par une série de circuits en Π à constantes localisées. Les phénomènes d'ionisation et de couplage sont pris en considération lors de cette présente étude.

En effet, l'électrode de terre en question a été modélisée par une série d'équations différentielles d'ordre 1. La résolution de telles équations a été faite en utilisant la méthode de Runge Kutta. Les conditions initiales concernant les courants et les tensions ont été considérées nulles.

Nous confronterons nos résultats à la fois à ceux expérimentaux et simulés par Cataneo et al. [16] utilisant le code de calcul EMTP (Electromagnetic Transient Program) et GSSP (Grounding System Simulation Program).

L'électrode d'étude est représentée sur la figure (1.6). Elle est caractérisée par une longueur l et un rayon r . Elle est enterrée horizontalement à une profondeur h dans un sol de résistivité supposée constante ρ_g , dont les propriétés électromagnétiques (μ et ϵ) sont identiques quelle que soit la direction d'observation ; le sol étant homogène, isotrope et linéaire.

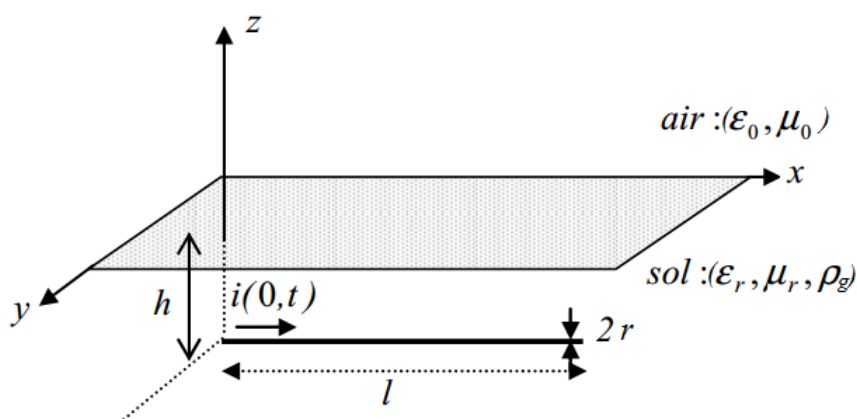


FIGURE 1.6: Représentation d'une électrode enterrée horizontalement [29]

En absence de l'ionisation du sol, nous commençons le processus de calcul par définir les dimensions du système (l'électrode), sa résistivité ainsi que les caractéristiques de son environnement (la profondeur d'enfouissement de l'électrode, la résistivité, la permittivité et la perméabilité du sol). Nous calculons, ensuite, les différents paramètres distribués de l'électrode en question à partir des expressions (Eq.1.6) présentées précédemment.

Sachant que nous avons modélisé notre système en utilisant la technique des lignes de transmission en se basant sur la représentation d'état. Comme troisième étape, nous initialisons l'intervalle du temps, la grandeur physique d'entrée (en introduisant la forme de l'impulsion de courant ainsi que les valeurs des différents paramètres qui interviennent) et les conditions initiales relatives aux variables d'état. La quatrième étape consiste en la résolution des équations d'état, s'agissant d'un système d'équations différentielles d'ordre 1. Cette résolution est faite pour chaque itération pendant l'intervalle du temps choisi,

Pour cela, nous avons utilisé la commande (la fonction) *ODE* du code de calcul "MATLAB". Cette commande utilise la méthode de Runge Kutta. Les résultats de simulation concernent le courant en chaque segment et la tension en chaque point de l'électrode.

L'organigramme de la figure (1.7) illustre les étapes de calcul en absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel.

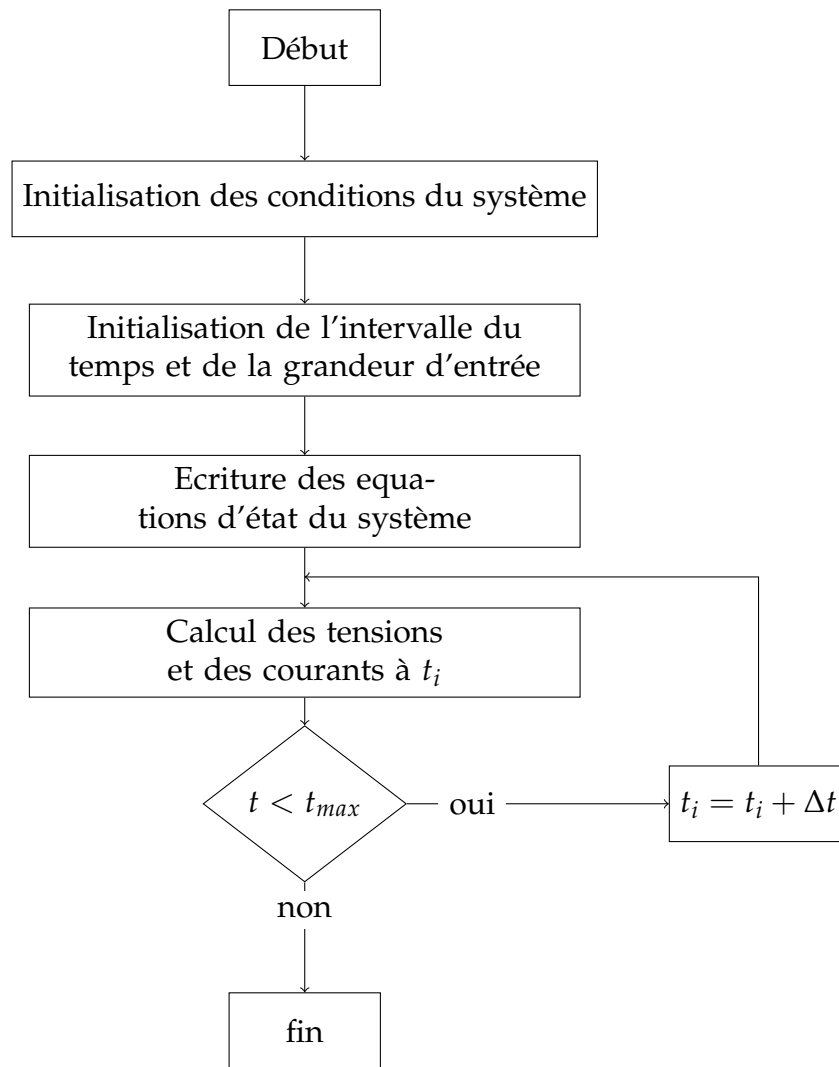


FIGURE 1.7: Algorithme de calcul sans tenir compte de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

Le phénomène d'ionisation aura lieu lorsque le champ électrique atteint ou dépasse la valeur du champ critique. Cette dernière valeur du champ a été calculée en utilisant l'expression empirique d'Oettle. Par ailleurs, le champ électrique en chaque segment est déduit à partir de la densité de courant suivant la formule (1.7). Si le critère d'ionisation est vérifié (champ électrique est supérieur ou égal au champ critique), le rayon et donc les paramètres distribués de chaque segment de l'électrode changent. Les nouvelles valeurs sont calculées en utilisant les équations (1.7) et (1.6) respectivement.

La prise en compte de l'ionisation du sol est conditionnée par l'insertion des présentes étapes (instructions) de calcul juste avant la quatrième étape de l'organigramme précédent. En effet, nous nous permettons de considérer les présentes instructions comme étape 3 bis.

Dans les deux cas de figures (absence et présence de l'ionisation du sol), le phénomène du couplage est quantifié par l'ajout des éléments représentant les effets mutuels (Eq. 1.12 et 1.13) dans les équations différentielles décrivant le système en entier.

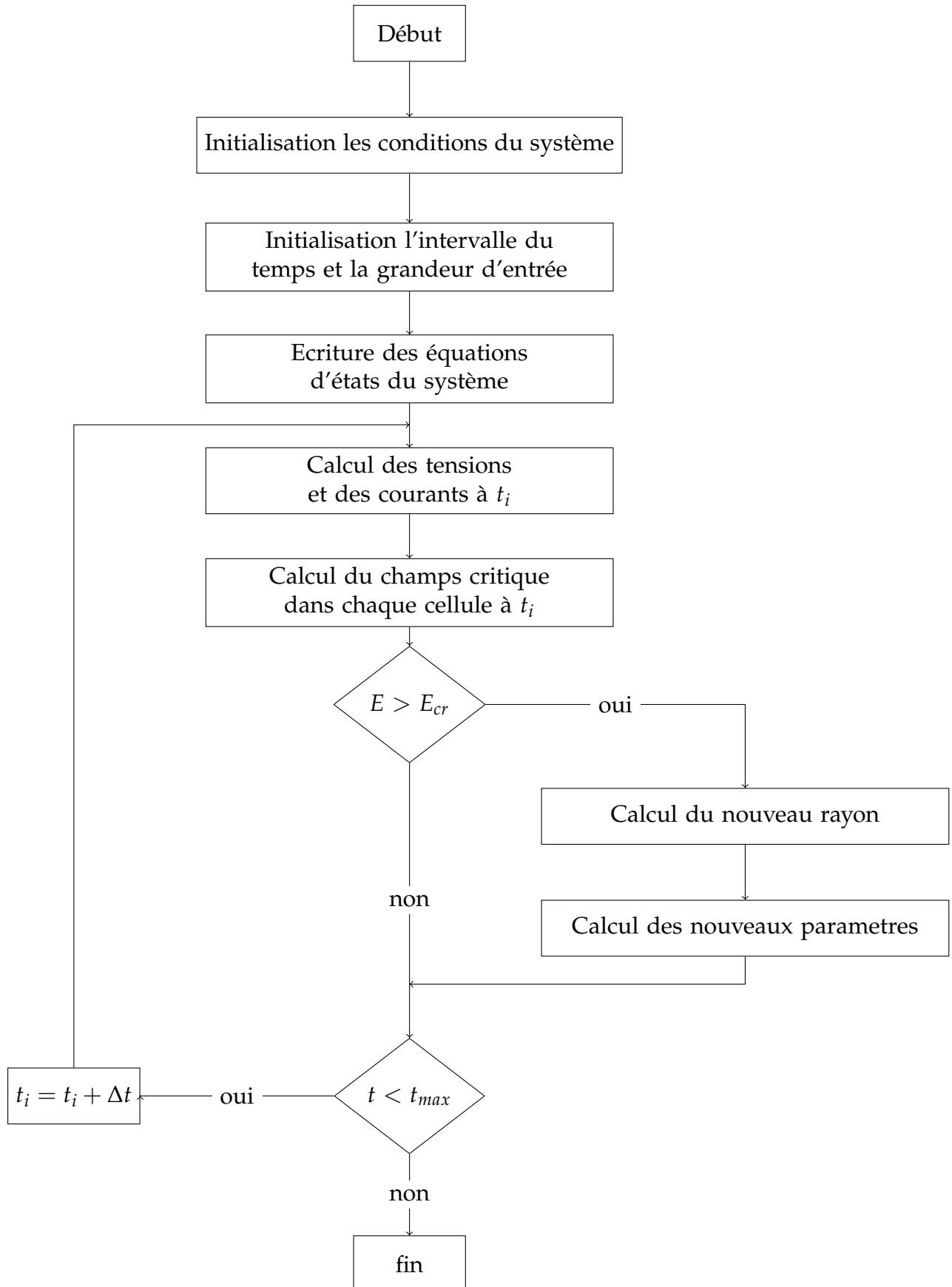


FIGURE 1.8: Algorithme de calcul en tenant compte d'ionisation du sol

Chapitre 2

Simulation d'une Électrode Horizontale enfouie dans un Sol Homogène

2.1 Simulation d'une Électrode Horizontale

Trois types (1, 2 et 3) de tests ont été considérés lors de cette investigation. L'objectif principal, de ce chapitre, est de simuler la réponse transitoire d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol homogène, soumise à une impulsion de courant. Cette réponse transitoire consiste en la détermination du potentiel en différents points de l'électrode en question. Divers paramètres d'influence ont été adoptés à savoir :

- La forme de l'impulsion du courant ainsi que l'amplitude et les constantes de temps ;
- Les caractéristiques électromagnétiques du sol (permittivité, résistivité et perméabilité) ;
- La prise en compte ou non du couplage (purement capacitif) entre l'électrode et le sol ;
- La considération ou non du phénomène de l'ionisation du sol et/ou de celui du couplage mutuel entre les différents segments de l'électrode.

2.2 Résultats et Discussion

2.2.1 Test 1- faible courant impulsionnel (low impulsive current)

Le test (1) est caractérisé par un courant impulsionnel de faible amplitude. L'expression bi-exponentielle est utilisée pour simuler ce courant. La réponse transitoire consistant en le potentiel en différents points de l'électrode a été calculée pour divers cas à savoir :

1. Le couplage purement capacitif électrode - sol est pris en considération :

- En absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel entre les différents segments de l'électrode,
 - En présence de l'ionisation du sol,
 - En présence du couplage mutuel.
2. En absence de l'ionisation du sol et des couplages mutuel et capacitif.

Afin de valider nos algorithmes, nous avons comparés, dans les mêmes conditions récapitulées dans la table (2.1), nos résultats à ceux trouvés (expérimentalement et par simulation) par Cattaneo et al.[16].

TABLE 2.1: Conditions du test (1) [16]

Courant	Électrode	Sol	Analyse
$i(t) = i_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$	$l = 100 \text{ m}$	$\rho_g = 20 \text{ } \Omega\text{m}$ $\epsilon_r = 80$	$T_{max} = 15 \text{ } \mu\text{s}$
$i_0 = 1.55227 \text{ A}$	$r = 1,5 \text{ mm}$	$E_{CR} = 241\rho_g^{0,215} \text{ kV/m}$	$\Delta l = 1 \text{ m}$
$\alpha = 0,00364 \text{ } \mu\text{s}^{-1}$	$h = 60 \text{ cm}$		$\Delta t = 0,001\mu\text{s}$
$\beta = 0,65221 \text{ } \mu\text{s}^{-1}$	$\rho_e = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega\text{m}$		

L'électrode considérée est de longueur $l = 100 \text{ m}$ et de rayon $r = 1,5 \text{ mm}$. Elle est enterrée, à une profondeur $h = 60 \text{ cm}$, horizontalement suivant l'axe des x (entre $x=0$ et $x=l$) dans un sol, de résistivité $\rho_g = 20 \text{ } \Omega\text{m}$, de permittivité relative $\epsilon_r = 80$ et perméabilité relative unitaire.

2.2.1.1 Présence du couplage capacitif

a- Réponse transitoire en absence des phénomènes d'ionisation et de couplage

La figure (2.1) présente l'évolution de l'onde du potentiel en différents points de l'électrode d'étude à savoir $x=0, 2, 10$ et 34 m . Les résultats que nous avons obtenus sont confrontés à ceux trouvés expérimentalement et par simulation par Cattaneo et al. [16]. Dans leur simulation, ces auteurs ont utilisé le code de calcul GSSP et ont ignoré les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel inter-segments. En allant vers les x croissants, nous avons enregistré une diminution de l'amplitude de l'onde impulsionnelle du potentiel accompagnée par un retard dans le temps de montée (et donc dans le temps de réponse). De telles évolutions sont clairement illustrées sur la figure (2.2) présentant la répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps.

D'après la figure (2.1), nous constatons que nos résultats coïncident parfaitement avec ceux numériques de Cattaneo et al. [16], ce qui valide notre algorithme.

Il est à noter que les résultats obtenus numériquement par Cattaneo et al., à l'aide du code GSSP, donnent une meilleure approche à leurs résultats expérimentaux, puisque une légère différence entre les deux résultats a été constatée.

La figure (2.2) présente l'évolution du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps. Cette figure montre que le potentiel, au point d'injection, conserve la même

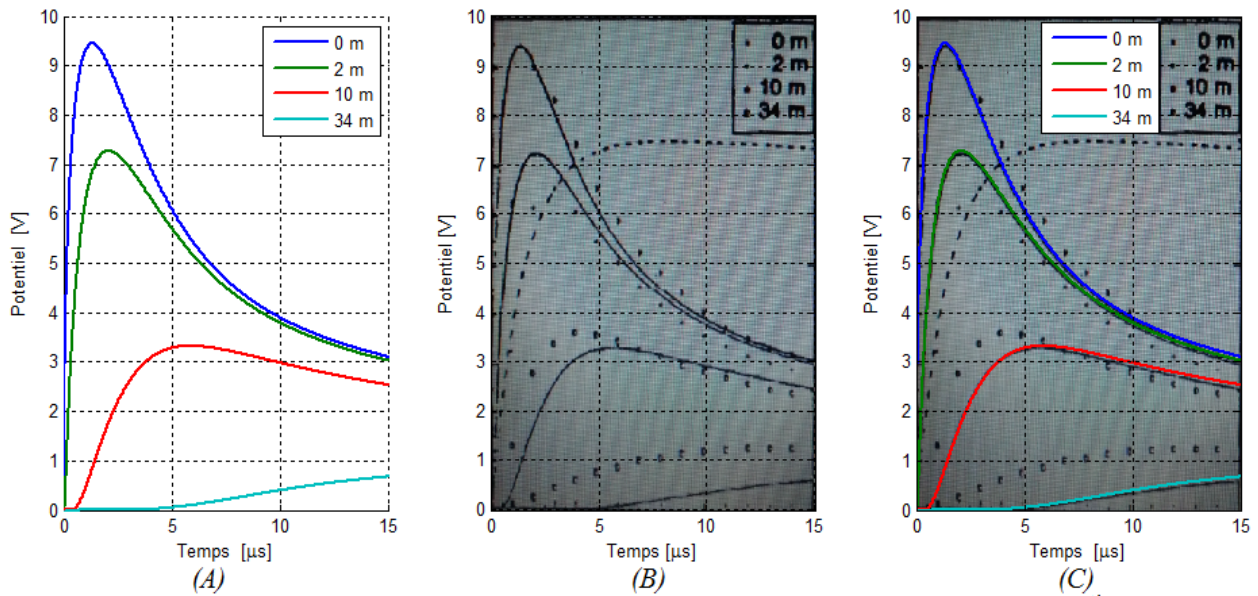


FIGURE 2.1: Évolution de potentiel en différents points, (A) nos résultats, (B) résultats de Cattaneo et (C) superposition de nos résultats et ceux Cattaneo et al. [16] (en noire)

forme impulsionnelle du courant. Mais, cette onde de potentiel est amortie de manière à ce qu'elle disparaisse avant de traverser toute l'électrode. Ce qui est traduit par la dissipation du courant dans le sol étant donné la forte conductivité celui-ci.

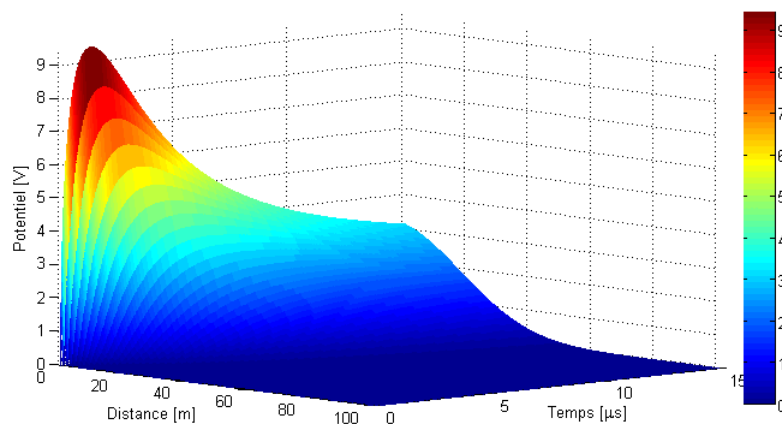


FIGURE 2.2: Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

b- Réponse du système en considérant le phénomène d'ionisation

Le phénomène d'ionisation du sol aura lieu lorsque le champ électrique sur la surface de chaque segment dépasse la valeur critique. En tenant compte cette fois-ci du phénomène d'ionisation du sol, nous avons refait le test dans les mêmes conditions citées précédemment. Dans ce cas, nous avons obtenus exactement les mêmes résultats présentés précédemment (Fig.2.1A), ceci est au fait que le courant de faible amplitude n'engendre pas le phénomène de l'ionisation du sol. Algorithmiquement parlons, la condition d'ionisation n'a pas été vérifiée, l'algorithme a ignoré la boucle correspondant à ce phénomène.

c- Réponse du système en considérant le phénomène de couplage inter-segments

Pour simuler le couplage mutuel inter-segments, nous avons adopté les équations (1.13) de Grover. Nous introduisons, dans les équations d'état du système, les paramètres régissant les effets mutuels entre tous les segments. La figure (2.3) illustre l'évolution du potentiel en différents points de l'électrode, en présence des couplages mutuel et capacitif.

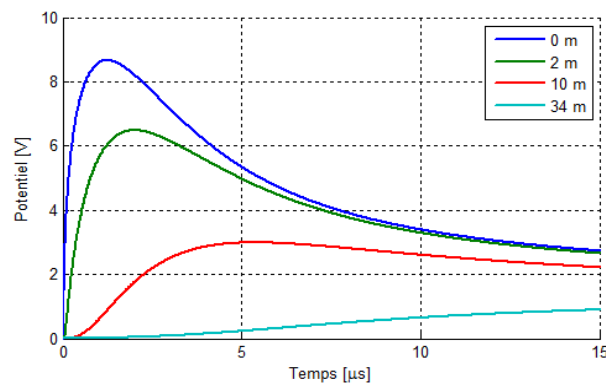


FIGURE 2.3: Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement obtenus en considérant le phénomène de couplage

Nous remarquons que la forme impulsionnelle du potentiel est conservée. Relativement aux résultats obtenus en ignorant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel représentés sur la figure (2.1A), nous avons enregistré une diminution de l'amplitude de l'ordre de 5%.

2.2.1.2 Absence des couplages et de phénomène d'ionisation du sol

La figure (2.4) montre la variation du potentiel en différents points de l'électrode en fonction du temps, en négligeant l'effet du couplage purement capacitif entre l'électrode et le sol, du couplage inter-segments, et du phénomène d'ionisation du sol.

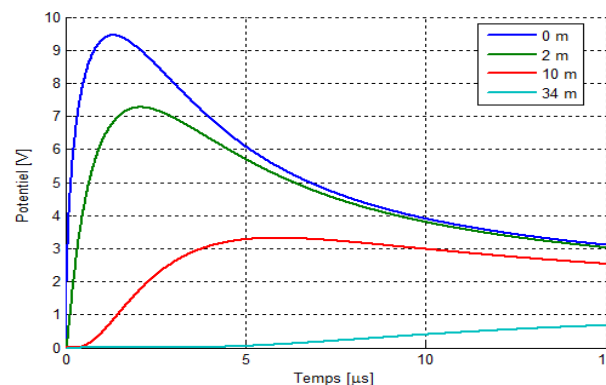


FIGURE 2.4: Évolution du potentiel en absence des couplages et de phénomène d'ionisation du sol

En comparant cette figure à celle (2.1A), aucune différence n'est observée. En effet, dans le cas d'une impulsion de courant de petite amplitude et un sol de faible résistivité,

le couplage purement capacitif n'a pas d'influence sur le comportement transitoire de l'électrode.

2.2.2 Test 2- courant impulsionnel élevé (high impulsive current)

Pour le test (2), l'onde du courant d'une forte amplitude est constituée d'une fonction polynomiale ou sinusoïdale selon l'intervalle du temps. Outre le couplage capacitif entre l'électrode et le sol, les différents cas considérés pour le calcul du potentiel en différents points de l'électrode sont :

1. En absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel inter-segments,
2. En présence de l'ionisation du sol,
3. En présence du couplage mutuel,
4. En présence des deux phénomènes (ionisation du sol et couplage mutuel) simultanément.

L'une des deux extrémités de l'électrode est soumise à un courant d'amplitude de l'ordre de 2,5 kA. Afin de valider nos algorithmes, nous comparons nos résultats à ceux déjà trouvés (expérimentaux et par simulation) par Cattaneo et al. [16]. Pour cela, nous nous mettons dans les mêmes conditions du test récapitulées dans la table (2.2) et considérées par ces mêmes auteurs.

TABLE 2.2: Conditions du test (2) [16]

Courant	Électrode	Sol	Analyse
$t < t_0 (= 6,725 \mu s)$ $i(t) = at + bt^2$ $t > t_0$ $i(t) = I_m(1 + \cos(2\alpha(t - t_0)))$ $a = 1,52 \cdot 10^9 \text{ A.s}^{-1}$ $b = 1,13 \cdot 10^{14} \text{ A.s}^{-2}$ $I_m = 2550 \text{ A}$ $\alpha = 130897,5995 \text{ rad.s}^{-1}$	$l = 80 \text{ m}$ $r = 0,005 \text{ m}$ $h = 0,6 \text{ m}$ $\rho_e = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega m$	$\rho_g = 100 \Omega m$ $\varepsilon_r = 10$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV/m}$	$T_{max} = 15 \mu s$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu s$

L'électrode d'étude est de longueur $l = 80 \text{ m}$ et de rayon $r = 5 \text{ mm}$. Elle est enterrée horizontalement à une profondeur $h = 60 \text{ cm}$, dans un sol homogène. Ce dernier est caractérisé par une résistivité $\rho_g = 100 \Omega m$, une permittivité relative $\varepsilon_r = 10$ et une perméabilité relative choisie égale à l'unité.

2.2.2.1 Réponse du système sans tenir compte des phénomènes physiques (ionisation et couplage mutuel)

La figure (2.5) présente la variation du potentiel en différents points de l'électrode ; la figure (2.5A) illustre nos résultats et celle (2.5B) concerne les résultats de Cattaneo et

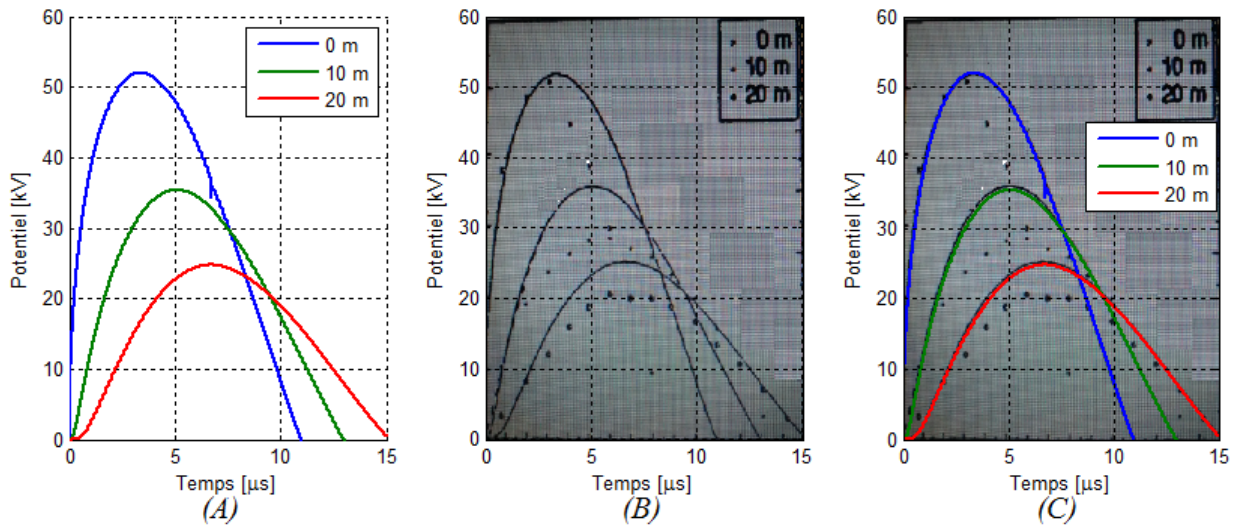


FIGURE 2.5: Évolution du potentiel en différents points, (A) nos résultats, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats et ceux de Cattaneo (en noire continu)

al. [16] obtenus à l'aide du code de calcul GSSP et expérimentalement. Afin de comparer nos résultats à ceux de Cattaneo et al., nous superposons, sur la figure (2.5C), nos caractéristiques et celles de Cattaneo et al. (placées en arrière-plan).

Les caractéristiques du potentiel que nous avons obtenues sont parfaitement identiques à celles trouvées numériquement par Cattaneo et al. Cependant, une différence acceptable est observée par rapport aux résultats expérimentaux de Cattaneo et al. [16]. Pour les différents points ainsi adoptés ($x=0, 10, 20$ m), la forme de l'allure du potentiel est conservée. Cependant, avec l'augmentation des x , nous avons remarqué une diminution de l'amplitude du potentiel accompagnée par un retard dans le temps.

La figure (2.6) présente l'évolution du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps. Cette figure nous permet d'obtenir, à tout moment, l'onde du potentiel en chaque point de l'électrode. Par ailleurs, il est clair que cette présentation permet de confirmer non seulement les propos susmentionnés, mais également, elle montre que l'onde de potentiel est amortie.

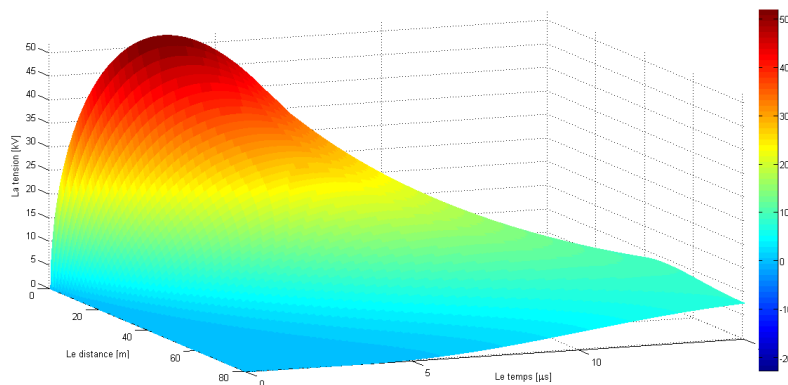


FIGURE 2.6: Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

2.2.2.2 Réponse du système en considérant le phénomène d'ionisation du sol

Cette partie concerne l'étude de l'influence du phénomène d'ionisation du sol sur la réponse transitoire du système en différents points. Nos résultats ainsi que ceux (expérimentaux et numériques) de Cattaneo et al. sont illustrés sur la figure (2.7A) et (2.7B) respectivement. Les résultats précédents ont été reproduits sur la figure (2.7C) ; ceci nous permet de faire une étude comparative.

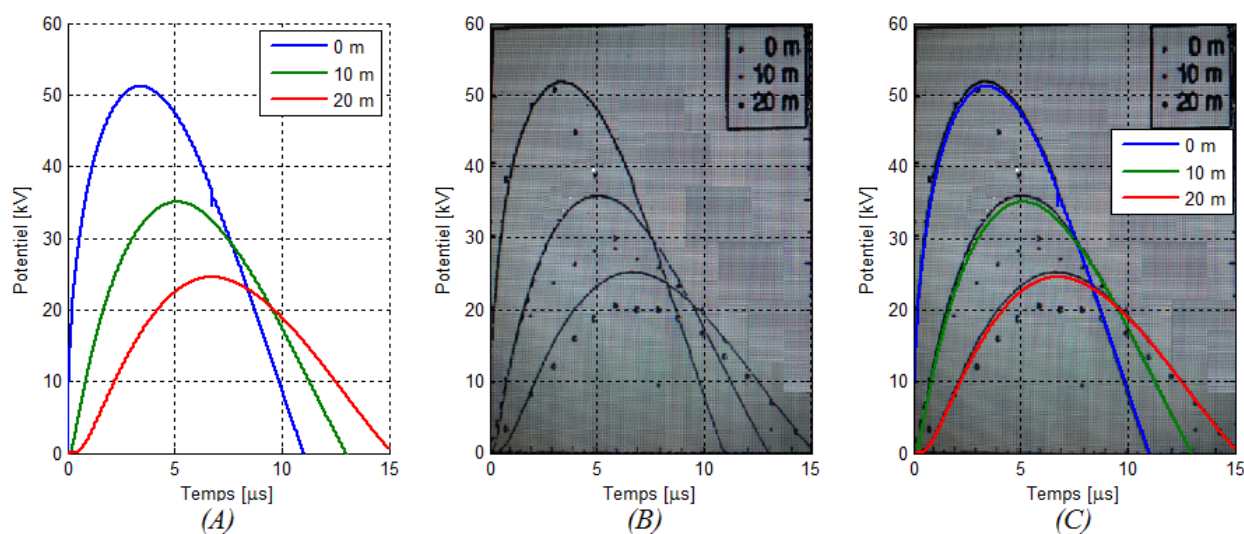


FIGURE 2.7: Évolution du potentiel en différents points, (A) nos résultats en considérant le phénomène d'ionisation du sol, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats (en couleur) et ceux de Cattaneo (en noir pointillé)

D'après toutes ces figures, nos résultats sont pratiquement les mêmes relativement à ceux numériques de Cattaneo et al. En réalité, nous avons enregistré une très légère chute au niveau de l'amplitude du potentiel inférieure à 2%. Relativement aux résultats expérimentaux de Cattaneo et al., nous pensons que nos résultats sont admissibles ; la différence étant acceptable. Il est à noter que dans tous les cas de figures, l'allure du potentiel garde son aspect impulsionnel.

2.2.2.3 Réponse transitoire du système en considérant le phénomène de couplage inter-segments

En tenant compte du couplage inter-segments, nous présentons nos résultats sur la figure (2.8A). L'objectif principal de cette simulation est de comparer nos résultats à ceux trouvés expérimentalement et numériquement par Cattaneo et al. (Fig.2.8B). La figure (2.8C) représente une superposition (combinaison) des deux figures précédentes.

Ces figures montrent que nos résultats, légèrement différents de ceux numériques de Cattaneo et al., sont très proches aux résultats expérimentaux de ces chercheurs.

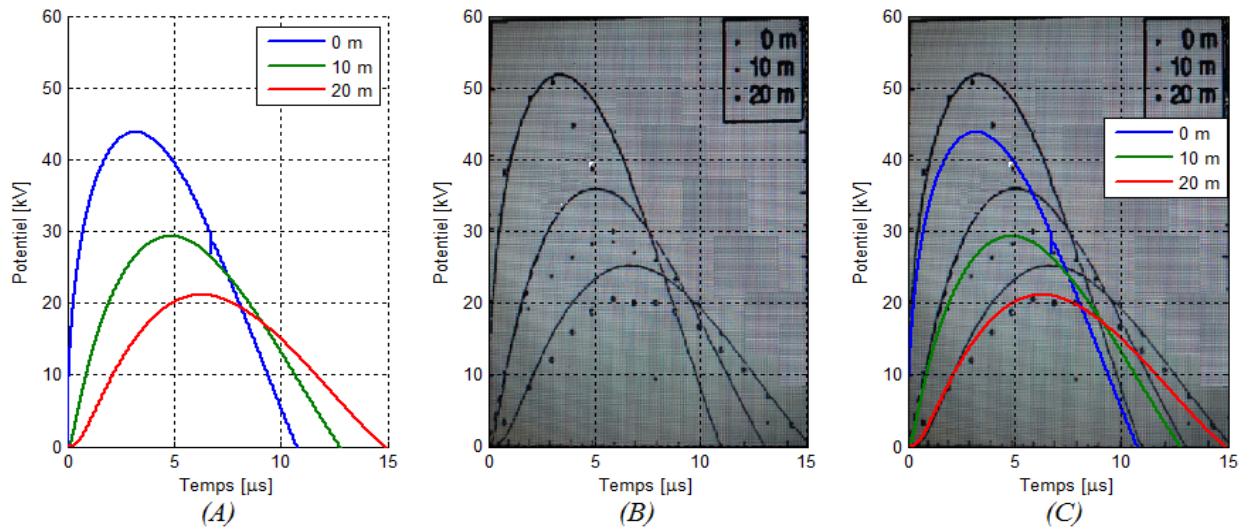


FIGURE 2.8: Évolution du potentiel en différent points, (A) nos résultats en considérant le phénomène du couplage mutuel, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats (en couleur) et ceux de Cattaneo et al.(en noire pointillée)

2.2.2.4 Réponse transitoire en considérant les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel

La figure (2.9A) présente l'évolution du potentiel en fonction du temps en différents points de l'électrode, en considérant cette fois-ci le phénomène d'ionisation du sol et celui du couplage mutuel inter-segments de la dite-électrode. Par ailleurs, la figure (2.9B) montre les résultats expérimentaux et de simulation de Cattaneo et al. En présence des phénomènes susmentionnés, nos résultats coïncident parfaitement avec ceux expérimentaux de Cattaneo et al., au moment où une différence acceptable a été enregistrée relativement aux résultats de simulation des mêmes auteurs.

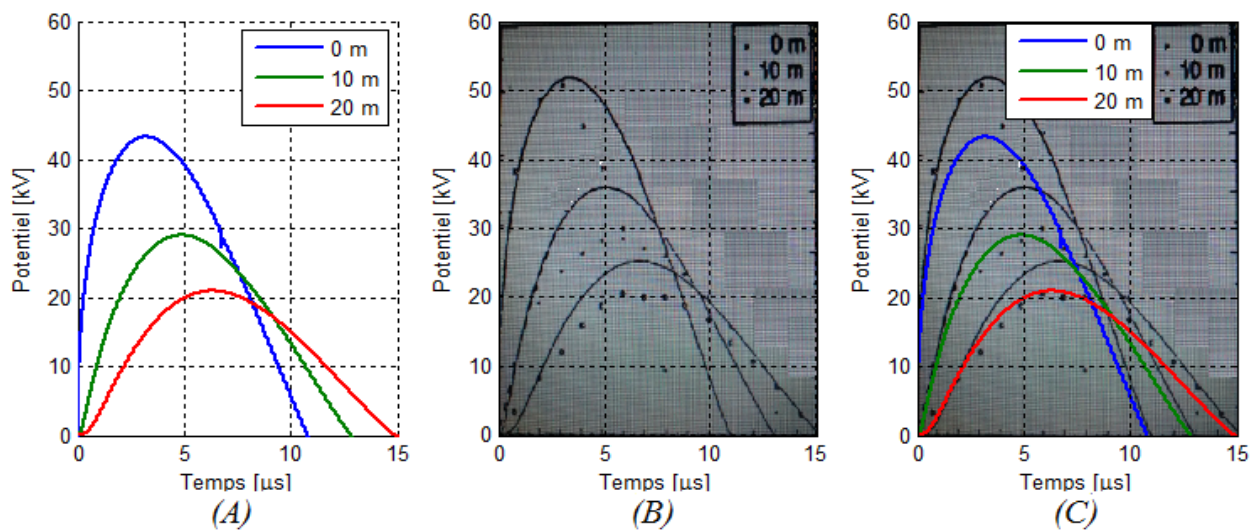


FIGURE 2.9: Évolution du potentiel en différent points, (A) nos résultats en considérant les deux phénomènes à la fois ; du couplage mutuel et l'ionisation du sol, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats (en couleur) et ceux de Cattaneo et al.(en noire pointillé)

D'autre part, entre ces deux phénomènes, le couplage mutuel est le plus dominant et a un effet major sur la réponse du système.

2.2.3 Test 3- courant impulsionnel très élevé (very high impulsive current)

Dans le test (3), une très forte impulsion du courant d'une amplitude d'environ de 52 kA et de forme bi-exponentielle a été adoptée. Nous avons considéré deux types de sol homogène. Le premier est de type argileux [6]. Il est caractérisé par une faible résistivité $\rho_g = 10 \Omega m$. Le deuxième, de type rocheux [6], est fortement résistif $\rho_g = 10000 \Omega m$. Pour ce test, nous nous sommes intéressés aux cas suivants :

1. Le couplage purement capacitif (électrode-sol) est pris en considération :
 - En absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel entre cellules,
 - En présence de l'ionisation du sol,
 - En présence du couplage mutuel,
 - En présence des deux phénomènes à la fois.
2. En absence des phénomènes d'ionisation du sol et des couplages mutuel et capacitif.

Pour ce cas de figure, Cattaneo et al. se sont limités à effectuer la simulation uniquement en utilisant les codes de calcul EMTP et GSSP à qui nous avons comparé nos résultats (ces chercheurs n'ont pas d'expérimentation pour ce test. Les conditions considérées dans ce cas sont présentées dans la table (2.3).

TABLE 2.3: Conditions du test (3) [16]

Courant	Électrode	Sol	Analyse
$i(t) = i_o(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ $i_o = 52,2689 \text{ kA}$ $\alpha = 0,00184 \mu s^{-1}$ $\beta = 2,46650 \mu s^{-1}$	$l = 100 \text{ m}$ $r = 2,5 \text{ mm}$ $h = 60 \text{ cm}$ $\rho_e = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega m$	$\rho_g = 10 \Omega m \quad \epsilon_r = 80$ $\rho_g = 10000 \Omega m \quad \epsilon_r = 5$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV/m}$	$T_{max} = 5 \mu s$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu s$

2.2.3.1 Réponse transitoire du système en absence des phénomènes de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

Pour un sol argileux d'une faible résistivité électrique ($\rho_g = 10 \Omega m$), nous simulons la réponse transitoire de l'électrode en question lors de l'injection d'une impulsion de courant similaire à la décharge atmosphérique. Cette décharge est caractérisée par une amplitude comprise entre 50 et 100 kA.

La figure (2.10A) présente l'évolution du potentiel en fonction du temps, pour différents points de l'électrode à savoir $x=0, 10$ et 20 m . La variation du potentiel est bel et bien impulsive. Les résultats numériques obtenus par Cattaneo et al. sont donnés sur la

figure (2.10B). Cette figure montre que les résultats obtenus en utilisant les codes EMTP et GSSP sont confondus.

En faisant une comparaison, nous constatons que nos résultats sont identiques à ceux de Cattaneo et al. [16]. Il est important de noter que pour ce type de sol, la forme impulsionnelle de l'onde de potentiel a été conservée.

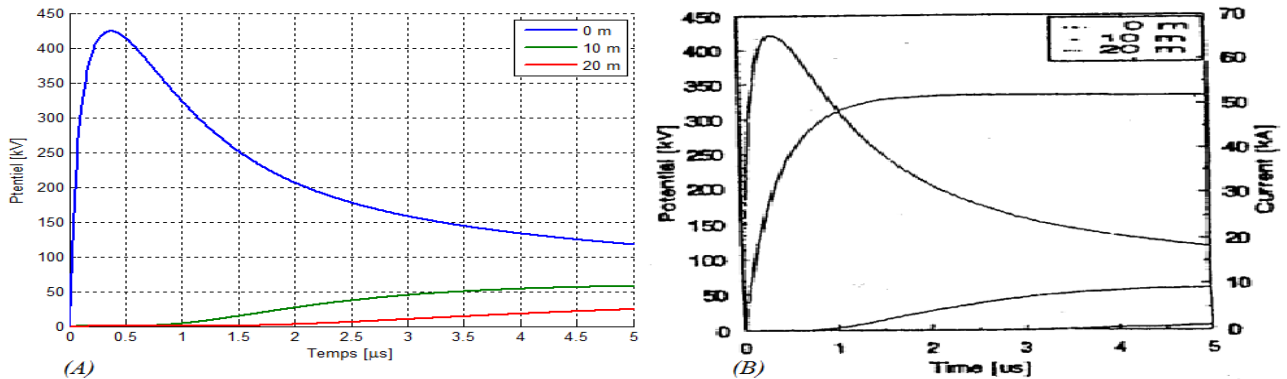


FIGURE 2.10: Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol de $\rho_g = 10 \Omega m$ (A) nos résultats et (B) résultats de Cattaneo et al.

La figure (2.11) présente l'évolution du potentiel le long de l'électrode en fonction de temps. Cette figure montre qu'au point d'injection, le potentiel conserve la même forme impulsionnelle que celle du courant. Cependant, l'onde de potentiel est non seulement amortie, elle disparaît avant de traverser toute l'électrode. Cette disparition du potentiel correspond à la dissipation du courant dans le sol faiblement résistif.

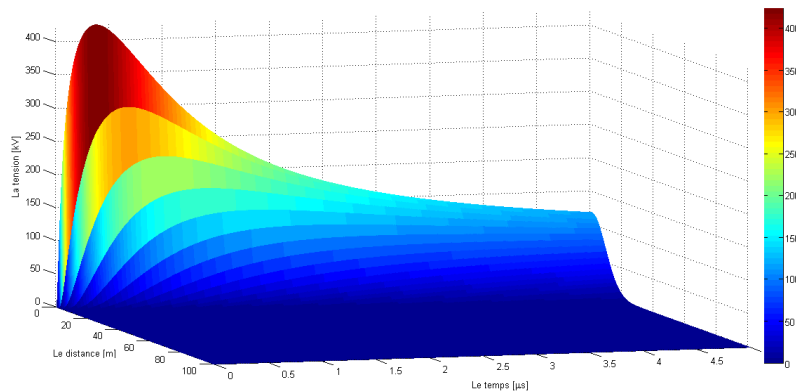


FIGURE 2.11: Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

De même que précédemment, nous nous sommes intéressés à l'évolution du potentiel le long de l'électrode sur un intervalle de temps de $5 \mu s$, pour une résistivité du sol $\rho_g = 10000 \Omega m$, suite à l'injection d'une impulsion de courant de très forte amplitude. Cette résistivité caractérise, en fait, une terre rocheuse. Les résultats obtenus dans ces conditions sont présentés sur la figure (2.12A). En outre, la figure (2.12B) illustre la réponse transitoire obtenue numériquement par Cattaneo et al. [16]. Les différents points choisis pour la détermination du potentiel sont : $x=0, 10$ et 20 m. Une parfaite concordance entre nos résultats et ceux de Cattaneo et al. a été obtenue, ce qui valide l'algorithme que nous avons élaboré, pour ce type de sol.

Au lieu que le potentiel augmente d'une manière monotone comme dans les cas précédents, la figure (2.12) montre que l'évolution du potentiel dans le laps du temps de $5\mu s$ choisi, met en évidence des ondulations correspondant au régime sub-transitoire.

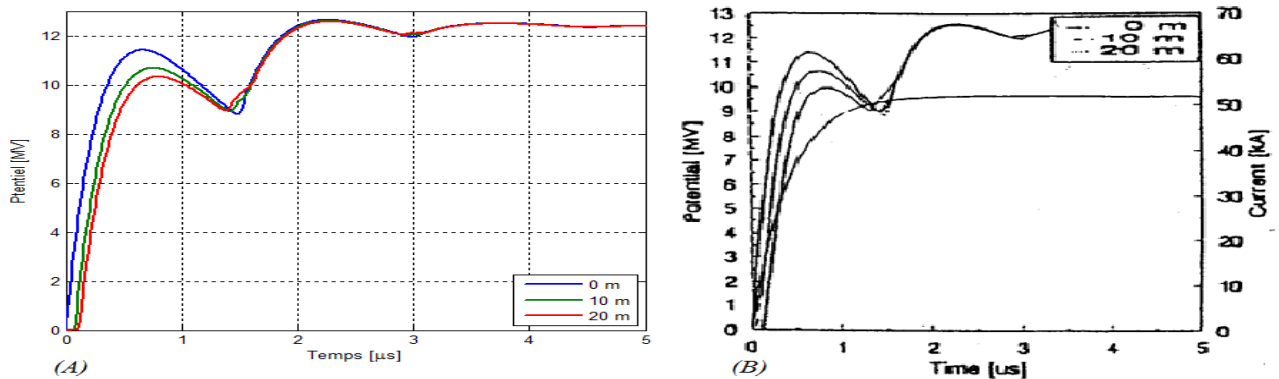


FIGURE 2.12: Évolution de potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement en fonction du temps

La figure (2.13), donnant la répartition du potentiel le long de l'électrode pour $5\mu s$, confirme les propos susmentionnés. En effet, le potentiel présente une allure déformée relativement à celle de courant. En effet, la répartition du potentiel est totalement différente par rapport à celle trouvée pour un sol argileux de résistivité $\rho_g = 10 \Omega m$ (Fig.2.11).

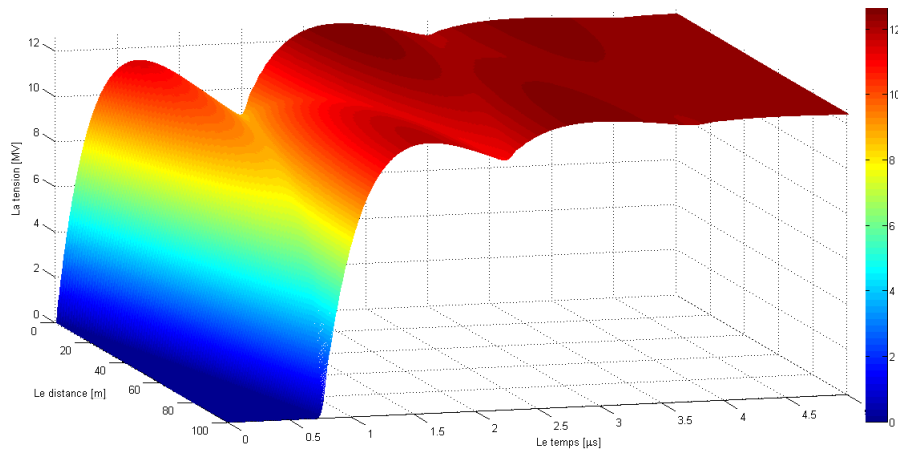


FIGURE 2.13: Répartition de potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

2.2.3.2 Réponse transitoire du système en considérant le phénomène d'ionisation

En tenant compte de l'effet du phénomène d'ionisation du sol, nous effectuons la même simulation pour les deux types de sol de faible et forte résistivités. S'agissant du sol faiblement résistif, la figure (2.14A) présente l'évolution du potentiel en différents points correspondant à $x = 0 m$, $x = 10 m$ et $x = 20 m$ durant un intervalle du temps de $5 \mu s$. La forme des courbes est similaire à celle donnée sur la figure (2.10A). Cependant, une légère diminution au niveau des amplitudes a été observée. Cette diminution due au phénomène d'ionisation du sol, ne dépasse en aucun cas 13%. Par ailleurs, nos résultats coïncident parfaitement avec ceux obtenus par Cattaneo et al. (Fig.2.10B) en utilisant les

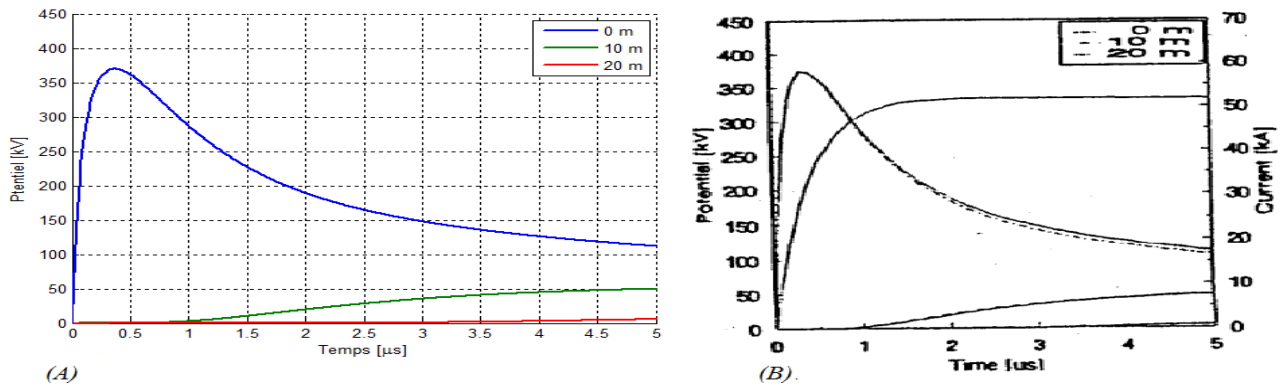


FIGURE 2.14: Évolution du potentiel en différents points (résistivité $\rho_g = 10 \Omega m$) considérant l'ionisation du sol (A) nos résultats et (B) résultats obtenus par Cattaneo et al.

codes de calcul EMTP et GSSP. Ainsi, notre algorithme élaboré selon l'organigramme (1.8) est valide.

Pour un sol fortement résistif, la figure (2.15) montre l'évolution du potentiel. Cette dernière présente des ondulations. En outre, nous avons constaté que le phénomène d'ionisation du sol engendre une diminution de l'amplitude pouvant atteindre 29% dans ce cas.

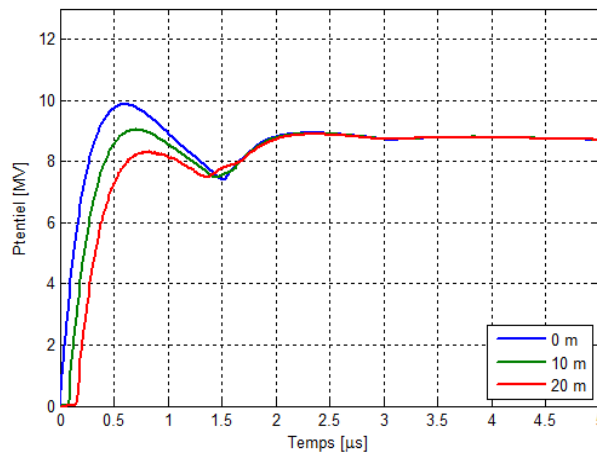


FIGURE 2.15: Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement dans un sol ionisé de résistivité $\rho_g = 10000 \Omega m$

Afin d'effectuer une comparaison avec les résultats trouvés numériquement par Cattaneo et al. en tenant compte du phénomène d'ionisation de sol, nous avons tracé sur la figure (2.16), nos réponses transitoires et celles des chercheurs suscités. Une très bonne concordance a été obtenue entre nos résultats et ceux numériques de Cattaneo et al. trouvés en utilisant le code de calcul EMTP ; la différence maximale est de 2,3%.

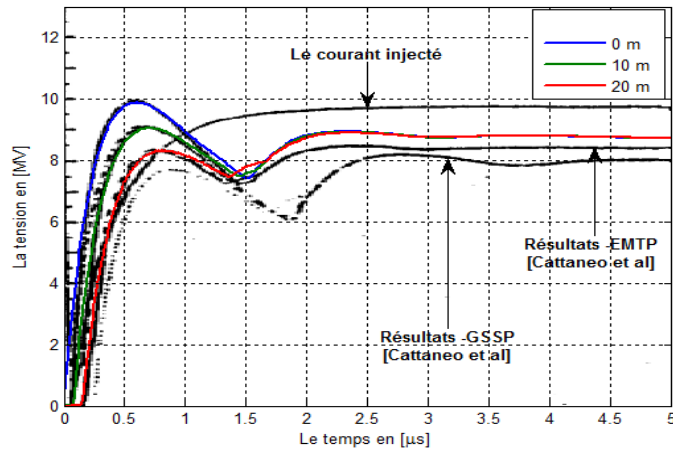


FIGURE 2.16: Comparaison entre nos résultats et ceux de Cattaneo et al. trouvés à l'aide des codes EMTP et GSSP

2.2.3.3 Réponse transitoire du système en considérant le phénomène de couplage inter-segments

En considérant le phénomène de couplage mutuel inter-segments, nous traçons sur la figure (2.17), la variation du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement dans un sol faiblement résistif ($\rho_g = 10 \Omega m$). Nous observons que le phénomène de couplage inter-segments conduit à une diminution ne dépassant pas 10% par rapport aux résultats obtenus en absence des phénomènes de couplage mutuel et d'ionisation du sol et présentés sur la figure (2.10). À l'exception de cette diminution, l'allure du potentiel est conservée ; la forme étant impulsive.

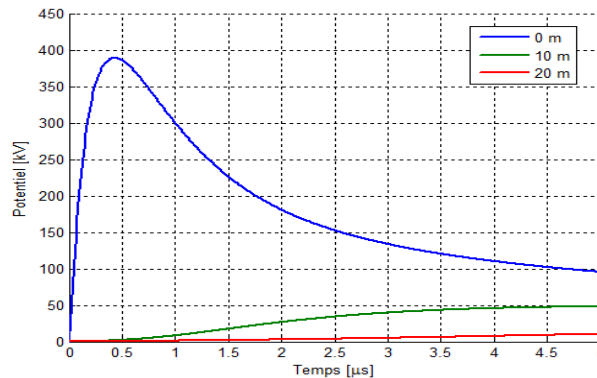


FIGURE 2.17: Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement en considérant le couplage entre segments

Pour le sol fortement résistif ($\rho_g = 10000 \Omega m$), l'influence du couplage mutuel inter-segments est peu remarquable sur l'allure de potentiel en différents points de l'électrode (Fig.2.18) relativement à celle obtenue dans le cas d'un sol faiblement résistif. En effet, le couplage mutuel inter-segments de l'électrode enterrée dans un sol fortement résistif réduit les ondulations et donc les déformations, notamment en allant vers les x croissants.

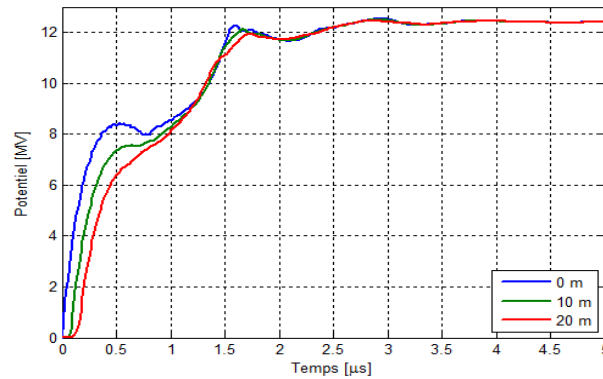
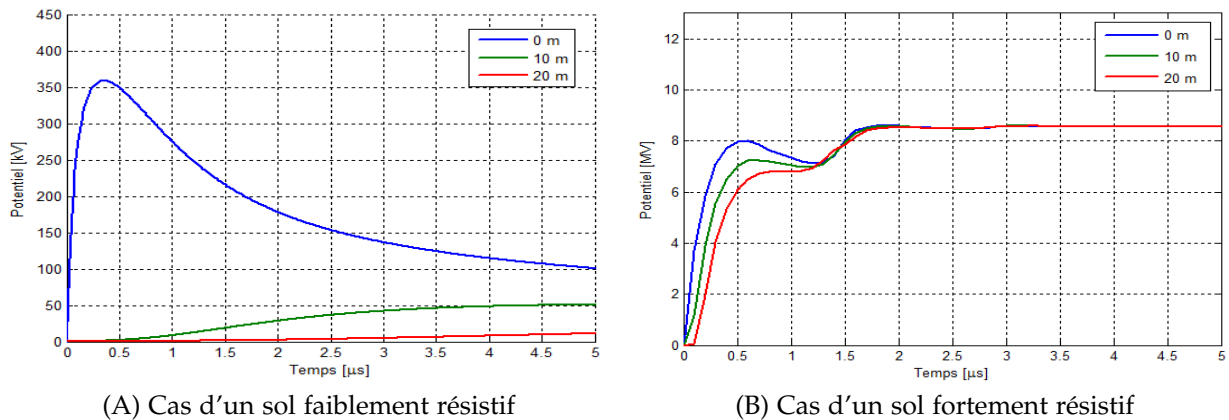


FIGURE 2.18: Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement en considérant le couplage inter-segments

2.2.3.4 Réponse transitoire du système en considérant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel

L'effet simultané de l'ionisation du sol et du couplage mutuel inter-segments de l'électrode est considéré dans cette partie. Les réponses transitoires trouvées dans ces conditions sont présentées sur les figures (2.19A) et (2.19B). Celles-ci ont été obtenues respectivement lorsque l'électrode de terre est enterrée dans un sol faiblement ($\rho_g = 10 \Omega m$) et fortement ($\rho_g = 10000 \Omega m$) résistifs.



(A) Cas d'un sol faiblement résistif

(B) Cas d'un sol fortement résistif

FIGURE 2.19: Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement considérant l'ionisation du sol et le couplage mutuel inter-segments

En comparant ces deux figures à celles respectives (Fig.2.10 et Fig.2.12) obtenues en ignorant les deux phénomènes suscités, nous pouvons dire que pour les faibles résistivités du sol, ces deux phénomènes engendrent une diminution à la fois de l'amplitude et du temps de réponse. Pour les sols fortement résistifs, outre de la diminution de l'amplitude, la réponse trouvée est moins ondulée. Pour ce type de sol considéré, les réponses transitoires obtenues en différents points se superposent pour les temps supérieurs à $1,25 \mu s$.

Conclusion

Cette étude présente une contribution à la modélisation du comportement des systèmes de mise à la terre suite à l'injection d'un courant impulsif, dont certaines formes simulent la foudre. Divers types de sol ont été considérés à savoir sol homogène faiblement, moyennement et fortement résistifs. Pour cela, plusieurs algorithmes, sous environnement MATLAB, reposant sur l'approche des lignes de transmission basée sur la représentation d'état, ont été élaborés. La présence ou non des trois phénomènes physiques à savoir l'ionisation du sol, le couplage capacitif entre le système de terre et le sol et finalement, le couplage mutuel entre les différents segments du système de terre a été examinée. Afin de valider nos algorithmes, nos résultats ont été confrontés à ceux rapportés dans la littérature.

Dans notre travail, nous avons effectué une étude qui concerne une électrode horizontale enterrée dans sol homogène. Trois types de sol ont été adoptés : faiblement, moyennement et fortement résistifs. Nos résultats relatifs au potentiel le long de l'électrode ont été comparés à ceux trouvés numériquement et expérimentalement par Cattaneo et al. Pour cela, trois tests ont été réalisés : injection d'une impulsion de courant bi-exponentielle de faible amplitude, injection d'une impulsion de courant en polynomiale ou sinusoïdale de forte amplitude, injection d'une impulsion de courant bi-exponentielle de très forte amplitude.

Pour le premier test, le couplage capacitif entre l'électrode de terre et le sol n'a pas d'influence sur la réponse transitoire. L'impulsion de courant adoptée n'a pas généré le phénomène d'ionisation du sol. L'allure du potentiel est une onde impulsionnelle amortie. Celle-ci disparaît avant de traverser toute l'électrode. Le couplage inter-segments n'a fait que diminuer légèrement l'amplitude.

Quant au deuxième test, le potentiel conserve toujours son allure impulsionnelle mais amortie. L'ionisation du sol engendre une très légère diminution de l'amplitude de l'onde de potentiel. Quant au couplage mutuel inter segments, une diminution de l'amplitude a été obtenue.

Pour le troisième et dernier test, le couplage capacitif n'a pas d'impact sur le potentiel. L'impulsion de l'onde de potentiel est conservée. Cependant, elle est atténuée jusqu'à ce qu'elle disparaît. L'ionisation et le couplage mutuel engendrent une diminution de l'amplitude de cette onde. Dans le cas d'un sol fortement résistif, des ondulations apparaissent sur l'onde impulsionnelle de potentiel. L'ionisation diminue l'amplitude de ces ondulations sans pour autant affecter la forme de l'allure, au moment où le couplage mutuel réduit ces ondulations.

En confrontant nos résultats à ceux expérimentales et numériques trouvés par Cattaneo et al., une bonne concordance a été obtenue, validant ainsi les programmes que nous avons développés.

Il est important de noter que la résistivité du sol représente un facteur très important affectant la réponse transitoire du système de mise à la terre adoptée. Cette réponse à l'entrée (au point d'injection) pourrait contenir quelques dépassement dans le cas d'un sol faiblement résistif. Cependant, une rapide dissipation de courant vers le sol est obtenue. Par ailleurs, des oscillations peuvent apparaître lorsque le sol est fortement résistif accompagnées par une lente dissipation du courant.

Bibliographie

- [1] B. B. Joffe and K.-S. Lock, *Ground for grounding*. Wiley, 2010.
- [2] G. F. Tagg, *Earth resistances*. George Newnes, 1964.
- [3] E. D. Sunde, *Earth conduction effects in transmission systems*. Bell Telephone Laboratories incorporated, New York, 1968.
- [4] A. P. S. Meliopoulos, *Power system grounding and Transients*. MARCEL DEKKER, 1988.
- [5] B. Claude, "Principes de conception et de réalisation des mises à la terre," *EDF-Centre des études et recherches*, Janvier 1984.
- [6] Department of Defense USA, *MILITARY HANDBOOK Grounding - Bonding - and Shielding*, vol. 2. Electronic equipments and facilities - D.D.USA, Dec 1987.
- [7] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, "Transient analysis of grounding systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, Feb 1983.
- [8] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency dependent characteristics of grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PWRD-2, Oct 1987.
- [9] Guide technique, "La protection contre les surtensions," *Schneider Electric*, 2010.
- [10] J.-N. FIORINA, "Protection des personnes et alimentations statiques," *Cahier Technique Schneider Electric*, vol. 192, Sep 2004.
- [11] L. V. Bewley, *Theory and tests of the counterpoise*. A.I.EE. committee, 1934.
- [12] F. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors : part i - signale conductor," *IEEE PWRD*, vol. 4, 1986.
- [13] R. Verma and D. Mukhedkar, "impulse to impedance of buried ground wires," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, vol. PAS-99, Sept/Oct 1980.
- [14] C. Mazzetti and G. M. Veca, "impulse behavior of grounding electrodes," *IEEE Transactions on power apparatus*, vol. PAS-102, no. 9, 1983.
- [15] R. Velazquez and D. Mukhedkar, "Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, vol. PAS-103, no. 9, 1984.

- [16] S. Cattaneo 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.*
- [17] F. Heidler, J. M. Svetic., and B.V. Stanic, "Calculation of lightning current parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, 1997.
- [18] G. Diendorfer and M. A. Uman, *An improved return stroke model with specified channel base current*, vol. 95. *Journal of Geophysical Research*, 1990.
- [19] B. Nekhoul et al., "A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 31, May 1995.
- [20] F. Delfino et al., "An algorithm for the exact evaluation of the underground lightning electromagnetic fields," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, 2007.
- [21] 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.
- [22] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Methodology and technology for power system grounding*. John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd, 2013.
- [23] D. Sekki et al., "Transient behaviour of grounding system in a two-layer soil using the transmission line theory," *Original scientific paper*, 2014.
- [24] M. Ramamoorthy, M. Narayanan, S. Parameswaran, and D. Mukhedkar, "Transient performance of grounding grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, Oct 1989.
- [25] A. Geri, "Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents : the model and its validation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, July 1999.
- [26] A. F. Otero, J. Cidrh, and J. L. del Alarno, "Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, July 1999.
- [27] R. Andolfato, L. Bernadi, and L. Fellin, "Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method," *IEEE*, vol. 15, July 2000.
- [28] G. Celli, E. Ghiani, and F. Pilo, "Behaviour of grounding systems : A quasi-static emtp model and its validation," *Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Cagliari, Piazza d'Armi, 09123, Cagliari, Italy. Electric Power Systems Research 85*, 2012.
- [29] B. HARRAT, *Caractérisation et Optimisation Numérique d'une Mise à la Terre*. Thèse de doctorat en sciences, Université de Jijel, Avril 2008.
- [30] D. Grenier, "Electromagnétisme et transmission des ondes," *Université Laval Québec*, 2005.
- [31] W. Group, "Guideline for numerical electromagnetic analysis method and its application to surge phenomena," *Cigré WG C4.501*, June 2013.

-
- [32] G. Celli and F. Pilo, "A distributed parameter model for grounding systems in the pscad/emt dc environment," *IEEE*, 2003.
- [33] S. Yu et al., "Time domain analysis method of lightning transient characteristics of grounding electrode," *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, China*, 2003.
- [34] V. Cooray, "Lightning protection," *The institution of engineering and technology*, 2009.
- [35] F. Terman, *Radio Engineer's Handbook*. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1943.
- [36] N. D. Hatzargyriou 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.