

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

École Nationale Polytechnique
Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études
En vue d'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Présenté par :

KHERIF Omar & MESSAOUDI Hossam Eddine

INTITULÉ

**Réponse transitoire de systèmes de mise à la
terre utilisant l'approche des lignes de
transmission**

Directeur du mémoire :

TEGUAR Madjid

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



Dédicace

“ To all my family, my friends and my teachers”

Omar KHERIF



*“To my parents and all my family”
“To all my dears”*

Hossam Eddine MESSAOUDI



Table des matières

Dédicace	ii
Table des Matières	iii
Liste des Figures	viii
Liste des Tableaux	xii
Liste des Abréviations	xiii
Liste des Symboles	xiv
Remerciement	xv
Résumé	xvi
Introduction Générale	1
1 Généralités sur la Foudre et les Systèmes de Mise à la Terre	4
1.1 Introduction	4
1.2 Surtensions Transitoires Foudre - Manœuvre	4
1.2.1 Surtensions transitoires de manœuvre	5
1.2.2 Surtensions transitoires de foudre	5
1.3 Notions générales sur la foudre	5
1.3.1 Classification des coups de foudre	6
1.3.2 Mécanismes de décharges	7
1.3.3 Caractéristiques principales de la foudre	8
1.3.3.1 Forme d'onde	8
1.3.3.2 Amplitude des Coups de Foudre.	8
1.3.3.3 Raideur de Front	9
1.3.4 Effets de la foudre	10
1.3.4.1 Effet électrique	10
1.3.4.2 Effet thermique	10
1.3.4.3 Effet électrodynamique	10
1.3.4.4 Effet électromagnétique	11
1.3.4.5 Effet électrochimique	11
1.3.4.6 Effet Acoustique	11
1.3.4.7 Effet visuel (éclair)	11

1.3.5	Modélisation de la foudre	11
1.4	Protection Contre la Foudre	12
1.4.1	Protection contre l'atteint directe de la foudre	12
1.4.1.1	Protection du réseau de transport d'énergie contre la foudre	12
1.4.1.2	Protection des bâtiments contre la foudre	13
1.4.1.3	Mise à la terre	13
1.4.2	Protection contre les effets indirects de la foudre	13
1.4.2.1	Éclateurs	14
1.4.2.2	Parafoudres	14
1.5	Systèmes de Mise à La Terre (SMLT)	15
1.5.1	Généralités sur les SMLT	15
1.5.1.1	Terre	15
1.5.1.2	Électrode de terre	15
1.5.1.3	Prise de terre	15
1.5.1.4	Mise à la terre	16
1.5.1.5	Conducteur de protection	16
1.5.1.6	Conducteur de terre	16
1.5.1.7	Tension de pas	16
1.5.1.8	Tension de contact	17
1.5.2	Rôle des SMLT	17
1.5.3	Réalisation d'un SMLT	18
1.5.3.1	Éléments d'un SMLT	18
1.5.3.2	Matériaux utilisés	18
1.5.4	Caractérisation du sol	19
1.5.4.1	Structure du sol	19
1.5.4.2	Caractéristiques électromagnétiques du sol	19
1.5.4.3	Facteurs influençant sur les caractéristiques du sol	20
1.5.5	Classification des SMLT	22
1.5.5.1	SMLT de fonctionnement	23
1.5.5.2	SMLT de protection	23
1.5.5.3	SMLT de protection contre la foudre	23
1.5.5.4	SMLT de référence	23
1.5.6	Schémas de liaison à la terre	23
1.6	Conclusion	25
2	Différent Modèles - Techniques dans le Domaine	26
2.1	Introduction	26
2.2	Propriétés Électriques des SMLT	26
2.2.1	Résistance d'une électrode	26
2.2.1.1	Électrode hémisphérique	27
2.2.1.2	Piquet de terre vertical de forme cylindrique	28
2.2.1.3	Électrodes en ligne droite (dans le même plan)	29
2.2.1.4	Électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral	30
2.2.1.5	Électrodes sur les côtés d'un carré	30
2.2.1.6	Électrode enterrée horizontalement	31

2.2.1.7	Plusieurs électrodes enfouies à la même profondeur	32
2.2.1.8	Réseau maillé (Grille)	32
2.2.1.9	Boucle enterrée	32
2.2.1.10	Grille combinée avec des piquets	33
2.2.1.11	Réduction de la résistivité entourant l'électrode	35
2.2.1.12	Résistance d'une électrode enfouie dans un sol à deux couches	35
2.2.2	Mesure de la résistivité du sol	36
2.2.2.1	Méthode de Wenner	36
2.2.2.2	Méthode de Schlumberger	38
2.2.2.3	Méthodes de mesure à trois pôles	38
2.2.2.4	Détermination de la résistivité apparente pour un sol stratifié	39
2.3	Différents Modèles d'Étude des SMLT Lors d'un Impact de Coup de Foudre	40
2.3.1	Méthodes analytiques et empiriques	40
2.3.2	Méthodes numériques	40
2.3.2.1	Approche des circuits	41
2.3.2.2	Approche du flux électromagnétique	44
2.3.2.3	Approche hybride	47
2.3.2.4	Approche des lignes de transmission	49
2.4	Conclusion	53
3	Simulation d'une Électrode Horizontale enfouie dans un Sol Homogène	54
3.1	Introduction	54
3.2	Méthode des Lignes de Transmission (TLM)	54
3.3	Équations d'État d'un Système Physique	56
3.3.1	Modélisation d'un système sous forme de représentation d'état . . .	57
3.3.2	Schéma-bloc d'une représentation d'état	58
3.3.3	Résolution des équations d'état	58
3.3.3.1	Méthode itérative de Picard	59
3.3.3.2	Méthodes basées sur la série de Taylor	59
3.3.3.3	Runge Kutta	60
3.4	Étude du Système de Mise à la Terre	60
3.4.1	Impulsion du courant	60
3.4.1.1	Représentation mathématique du Courant de foudre . . .	60
3.4.2	Système électrique équivalent	61
3.4.3	Phénomènes d'ionisation de sol et de couplage mutuel	63
3.4.3.1	Représentation du phénomène d'ionisation	63
3.4.3.2	Représentation du phénomène de couplage mutuel inter-segments	64
3.5	Application sur une Électrode Horizontale	66
3.6	Résultats et Discussion	70
3.6.1	Test 1- faible courant impulsionnel (low impulsive current)	70
3.6.1.1	Présence du couplage capacitif	70
3.6.1.2	Absence des couplages et de phénomène d'ionisation du sol	73

3.6.2	Test 2- courant impulsionnel élevé (high impulsive current)	73
3.6.2.1	Réponse du système sans tenir compte des phénomènes physiques (ionisation et couplage mutuel)	74
3.6.2.2	Réponse du système en considérant le phénomène d'ionisation du sol	75
3.6.2.3	Réponse transitoire du système en considérant le phénomène de couplage inter-segments	76
3.6.2.4	Réponse transitoire en considérant les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel	76
3.6.3	Test 3- courant impulsionnel très élevé (very high impulsive current)	77
3.6.3.1	Réponse transitoire du système en absence des phénomènes de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	77
3.6.3.2	Réponse transitoire du système en considérant le phénomène d'ionisation	79
3.6.3.3	Réponse transitoire du système en considérant le phénomène de couplage inter-segments	81
3.6.3.4	Réponse transitoire du système en considérant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel	82
3.6.3.5	Réponse transitoire du système en négligeant le couplage capacitif sol-électrode	83
3.7	Conclusion	84
4	Applications Particulières sur les SMLT	86
4.1	Introduction	86
4.2	Application sur une Électrode Verticale	86
4.2.1	Réponse transitoire de l'électrode enfouie dans un sol faiblement résistif	88
4.2.1.1	Réponse transitoire ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel	88
4.2.1.2	Réponse transitoire en considérant simultanément l'ionisation du sol et le couplage mutuel	89
4.2.2	Réponse transitoire de l'électrode enfouie dans un sol moyennement résistif	90
4.2.2.1	Réponse transitoire en absence de l'ionisation et du couplage mutuel	90
4.2.2.2	Réponse transitoire en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	91
4.3	Application sur une Gille	91
4.3.1	Étude et condition de simulation	91
4.3.2	Réponse transitoire des systèmes	92
4.4	Influence du point d'injection sur la réponse transitoire du système	93
4.4.1	Électrode Horizontale	93
4.4.1.1	Réponse transitoire du système suite à une injection du courant sur l'extrémité de l'électrode	94
4.4.1.2	Réponse transitoire du système suite à une injection du courant en différents points	95
4.4.2	Grille à quatre mailles identiques de côté l	95

4.5	Réponse Transitoire d'une Électrode Suite à une Impulsion de Tension . . .	96
4.5.1	Réponse transitoire d'une électrode de terre enfouie dans un sol moyennement résistif	98
4.5.1.1	Comportement transitoire en ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel	98
4.5.1.2	Comportement transitoire en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel	99
4.5.2	Réponse transitoire d'une électrode de terre enfouie dans un sol fortement résistif	100
4.5.2.1	Comportement transitoire en ignorant l'ionisation du sol et de couplage mutuel	100
4.5.2.2	Comportement transitoire en présence de l'ionisation du sol et le couplage mutuel inter-segments	101
4.6	Application sur une Électrode Enterrée dans un Sol Stratifié	102
4.6.1	Électrode Enterrée Horizontalement	102
4.6.1.1	Réponse du système en ignorant les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel	103
4.6.1.2	Réponse du système en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage inter-segments	104
4.6.1.3	Temps d'exécution	104
4.6.2	Électrode Enterrée Verticalement	105
4.6.2.1	Réponse du système en ignorant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel	105
4.6.2.2	Réponse transitoire du système en présence des phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel inter-segments	106
4.7	Conclusion	107
	Conclusion Générale	109
	Bibliographie	111

Liste des Figures

1.1	Représentation du système terre-nuage : L'électro-sphère, r_T rayon moyen de la terre (6367 km); r_H rayon moyen de la couche Heaviside (6467 km) [1]	6
1.2	Classification de différents types de coup de foudre.	6
1.3	Représentation du mécanisme de décharge ainsi que le courant des arcs [2]	7
1.4	Distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs, suivant IEEE [3]	9
1.5	Distribution statistique expérimentale, en raideur de front, des courants de foudre, positifs et négatifs, suivant IEEE [3].	10
1.6	Circuit électrique équivalent à une décharge de foudre [2]	12
1.7	Schéma équivalent pour l'estimation du courant à travers le corps humain pour une tension de pas [4]	16
1.8	Représentation pour la tension de contact	17
1.9	Structure du sol à l'échelle microscopique [5]	19
1.10	Représentation des liaison du neutre et la masse d'utilisation pour les différents régime de neutre	24
2.1	Schéma d'une électrode hémisphérique du rayon r	27
2.2	Schéma d'une électrode verticale de forme cylindrique du rayon r	28
2.3	Schéma des électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral	30
2.4	Schéma des électrodes sur les côtés d'un carré	31
2.5	Schéma d'une électrode enterrée horizontalement	31
2.6	Schéma de mesure de la méthode de Wenner	37
2.7	Schéma de principe de mesure par la méthode de "Schlumberger"	38
2.8	Schéma de principe de mesure par la méthode de trois pôles	39
2.9	Circuit équivalent de chaque segment de ligne de transmission	41
2.10	Autre modèle du circuit équivalent de chaque segment de ligne de transmission	41
2.11	Circuit équivalent de grille d'un réseau terre	42
2.12	Circuit équivalent d'une branche capacitance-conductance de système de mise à la terre dans le modèle de "Geri"[6]	43
2.13	Circuit équivalent d'une branche résistance-inductance de système de mise à la terre dans le modèle de "Geri" [6]	43
2.14	Circuit équivalent d'une branche du SMLT pour le modèle de "Geri" [6]	43
2.15	Circuit équivalent du SMLT pour le modèle de "Otero" [7]	44
2.16	Schéma d'une ligne de transmission mono-filaire [4]	50
2.17	Schéma d'une ligne de transmission composée de m conducteurs	52

3.1	Représentation d'une coupe de ligne de transmission de section quelconque [8]	55
3.2	Différentes représentations d'un segment de ligne de transmission	55
3.3	Schéma block d'une représentation d'état	58
3.4	Représentation de la couche ionisée pour un champ uniforme	63
3.5	Variation du champ électrique critique en fonction de la résistivité du sol selon les formules d'Oettle et de Manna	65
3.6	Couplage mutuel entre deux cellules [9]	66
3.7	Représentation d'une électrode enterrée horizontalement [10]	66
3.8	Algorithme de calcul sans tenir compte de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	68
3.9	Algorithme de calcul en tenant compte d'ionisation du sol	69
3.10	Évolution de potentiel en différents points, (A) nos résultats, (B) résultats de Cattaneo et (C) superposition de nos résultats et ceux Cattaneo et al. [11] (en noire)	71
3.11	Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps	72
3.12	Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement obtenus en considérant le phénomène de couplage	72
3.13	Évolution du potentiel en absence des couplages et de phénomène d'ionisation du sol	73
3.14	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)	74
3.15	Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps	75
3.16	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 noire pointillée)	75
3.17	Évolution du potentiel en différents 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)	76
3.18	Évolution du potentiel en différents 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)	77
3.19	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.	78
3.20	Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps	79
3.21	Évolution de potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement en fonction du temps	79
3.22	Répartition de potentiel le long de l'électrode en fonction du temps	80
3.23	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.	80

3.24	Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement dans un sol ionisé de résistivité $\rho_g = 10000 \Omega m$	81
3.25	Comparaison entre nos résultats et ceux de Cattaneo et al. trouvés à l'aide des codes EMTP et GSSP	81
3.26	Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement en considérant le couplage entre segments	82
3.27	Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement en considérant le couplage inter-segments	82
3.28	Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement considérant l'ionisation du sol et le couplage mutuel inter-segments	83
3.29	Évolution de potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol faiblement résistif en négligeant le couplage capacitif	83
3.30	Évolution de potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol fortement résistif en négligeant la capacité	84
4.1	Modèle d'une électrode verticale ; (A) situation physique, (B) modèle R en basses fréquences, (C) modèle R-L-C en hautes fréquences et (D) modèle à paramètres distribués en hautes fréquences [12]	87
4.2	Représentation d'une électrode enterrée verticalement [10]	88
4.3	Courant et potentiel en absence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel dans le cas d'un sol faiblement résistif ; (A) Évolution du potentiel en différents points et (B) variation du courant en différents segment	89
4.4	Courant et potentiel en présence d'ionisation du sol et de couplage mutuel dans le cas d'un sol faiblement résistif ; (A) variation du potentiel en différents points et (B) variation du courant dans différents segments	89
4.5	Courant et potentiel en absence de phénomènes dans le cas d'un sol moyennement résistif ; (A) variation du potentiel en différents points et (B) variation du courant dans différents segments	90
4.6	Courant et potentiel en présence de phénomènes dans le cas d'un sol moyennement résistif ; (A) variation du potentiel en différents points et (B) variation du courant dans différents segments	91
4.7	Représentation d'une grille enfouie dans un sol de profondeur h	92
4.8	Représentation des différentes grilles étudiées	92
4.9	Évolution du potentiel en différents points de la grille (A) constituée d'une seule maille de côté l , (B) composée de quatre mailles identiques de côté $l/2$, (C) contenant quatre mailles identiques de côté l	93
4.10	Représentation de l'électrode d'étude	94
4.11	Évolution du potentiel le long de l'électrode pour une injection de courant au point $x = 0 m$	94
4.12	Évolution du potentiel en fonction au point d'injection	95
4.13	Représentation des points d'injection d'une grille 2x2	96
4.14	Évolution du potentiel du système (Fig.4.8.C) ; (A) injection au point centre et (B) injection au point de corner	96

4.15	Représentation d'une électrode horizontale excitée par une impulsion de tension [10].	97
4.16	Variation du potentiel en différents points de l'électrode dans le cas d'un sol moyennement résistif (A) nos résultats (B) ceux de Sekki et al.[13] . . .	98
4.17	Évolution du courant au niveau de différents segments de l'électrode enterrée horizontalement dans le cas d'un sol moyennement résistif	99
4.18	Variation du courant en fonction du temps le long de l'électrode enterrée horizontalement dans le cas d'un sol moyennement résistif	99
4.19	Réponse transitoire du système dans le cas d'un sol moyennement résistif en considérant les phénomènes d'ionisation et couplage mutuel	100
4.20	Variation de l'onde de courant dans le cas d'un sol fortement résistif . . .	101
4.21	Variation du courant dans le cas d'un sol fortement résistif considérant les phénomènes suscités	101
4.22	Représentation d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol à deux couches	102
4.23	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. [13] et (B) nos résultats	103
4.24	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	104
4.25	Représentation d'une électrode enterrée verticalement dans un sol à deux couches	105
4.26	Variation du courant (A) courant d'entrée et (B) au milieu de l'électrode . .	106
4.27	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	107

Liste des Tableaux

1.1	Valeurs de la résistivité d'un type sol en fonction de la température [14] . . .	21
1.2	Différents schéma de liaison à la terre	24
1.3	Avantages et inconvénients de chaque schéma de liaison	25
2.1	Valeurs des coefficients F [14]	30
2.2	Valeurs des coefficients k pour des électrodes sur les côtés d'un carré	31
2.3	Les valeurs des coefficients $N(n)$ [15]	32
2.4	Valeurs numériques des coefficients k_1 et k_2 [16–19]	34
3.1	Conditions du test (1) [11]	70
3.2	Conditions du test (2) [11]	74
3.3	Conditions du test (3) [11]	78
4.1	Conditions d'interaction électrode-impulsion de courant	88
4.2	Conditions proposées pour la simulation des grilles	92
4.3	Conditions d'interaction électrode-impulsion de courant	94
4.4	Conditions d'interaction entre l'électrode et l'impact direct d'une tension impulsionnelle	97
4.5	Conditions d'interaction électrode-impulsion de tension	103
4.6	Comparaison entre les temps d'exécution	105
4.7	Conditions d'interaction électrode-impulsion de tension	106

Liste des Abréviations

SMLT	S ystème de M ise à L a T erre
ddp	d ifférence de P otentiel
NEC	N umerical E lectromagnetic C ode
EMTP	E lectro M agnetic T ransient P rogram
GSSP	G rounding S ystem S imulation P rogram
MATLAB	MAT rix LAB oratory
ODE	O rdinary D ifferential E quations
FDTD	F inite D ifference T ime D omain
FEM	F inite E lements M ethod
MoM	M oments M ethod
TLM	T ransmission L ines M ethod
CEI	C omission d'Électrotechnique I nternationale
CIGRE	C onseil I nternational des G rands R éseaux E lectriques
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers
CP	C onstants P arameters
FD	F requency D ependent

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

*“Nous tenons tout d’abord à remercier notre 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.”*

*“Nous remercions **Pr. S. Mekhtoub** qui nous a généreusement fait profiter de sa connaissance dans le domaine des régimes transitoires, pour l’intérêt qu’il a porté à notre modeste travail, pour avoir accepté de juger ce travail et nous avoir fait l’honneur de présider le jury de soutenance.”*

*“Nos remerciements vont également à **Pr. A. Mekhaldi** pour son aide, son appuis moral et ses qualités humaines. Qu’il soit convaincu de notre sincère reconnaissance pour avoir accepté d’examiner et critiquer ce mémoire.”*

*“Nous adressons nos sincères remerciements à l’ensemble des doctorants **M. S. Chiheb** qui nous a orienté durant notre travail et **M. A. Zouaghi** pour son aide et pour avoir accepté d’examiner ce mémoire.”*

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

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 فولتية أو تيارات اندفاعية. تتكون أنظمة التأريض في هذه الدراسة من قطب أفقي، قطب رأسي وشبكات على شكل مربع تختلف في حجمها وعدد الدارات. قد تم دفن هذه الأنظمة في تربة متجانسة أو تربة طبقية عموديا تشتمل على طبقتين. 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 de différentes configurations de mise à la terre dans le domaine temporel, suite à une injection d'un courant ou d'une tension impulsifs. Les systèmes de terre consistent en une électrode horizontale, une électrode verticale et des grilles de forme carrée et différentes dans leurs dimensions et nombre de mailles. De tels systèmes ont été enfouis dans un sol homogène ou stratifié verticalement à deux couches. 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 different grounding systems submitted to an impulsive current or voltage. The grounding systems consist of a horizontal electrode, a vertical electrode and square shaped grids different in their sizes and number of meshes. Such systems have been buried in a homogeneous or a two-layers vertically stratified 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 Générale

Depuis la découverte de la nature électrique de la foudre au 18^{ème} siècle, de nombreux scientifiques ont cherché à mieux connaître ce phénomène pour mieux s'en protéger. La connaissance du phénomène a beaucoup progressé avec les premiers travaux de Franklin¹, cependant de tels travaux restent incomplets [20].

Aujourd'hui, l'existence des groupes de travail internationaux, ainsi que la mise en œuvre de nouvelles technologies ont pour but de localiser et caractériser les coups de foudre. Ce phénomène peut être vu comme une impulsion de courant à front rapide (de quelques μs) et dont la valeur de crête peut prendre une valeur comprise entre quelques kA et $200 kA$ [2].

D'autre part, avec l'expansion rapide de la capacité des systèmes de puissance, le courant de défaut de court-circuit augmente énormément². En l'absence d'élément impédant entre le générateur et la terre, le courant devient alors infini et il met alors en péril le matériel et risque d'être propagé à l'ensemble du système électrique. Il peut ainsi conduire à un **black-out** très étendu. Compte tenu de la nature des composants en jeu, ce phénomène se produit avec une dynamique extrêmement rapide.

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 [20]. 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 impulsionsnels, 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 [21], Sunde [22] et Meliopoulos [4]. Leurs systèmes

1. Des premières expériences de Franklin aux mesures de courants de foudre déclenchée par des fusées paragrêles

2. Ce courant augmente avec le nombre de centrales électriques connectées au réseau

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 [15, 18, 19, 23]. 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 [24–26], (ii) l'approche électromagnétique développée par Grcev [27], (iii) l'approche hybride introduite par Dawalibi en 1986 [28, 29] et finalement (iv) l'approche des lignes de transmission créée par Verma et al. [30], Mazzetti et al. [31] et enfin par Velazquez et al. [32].

Ces approches ont été utilisées par d'autres chercheurs afin de déterminer le potentiel [11], le courant [33, 34], le flux électromagnétique [35, 36] ainsi que l'impédance transitoire [5, 37] suite à un impact de coup de foudre. Sekki et al. [13] 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 [26]. Cette même approche a été modifiée par Geri [6] et Otero [7] 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 [38].

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. [11] ainsi que par Celli et al. [9]. Le code de calcul GSSP (Grounding Systems Simulation Program), destiné pour la simulation des systèmes de terre, a été utilisé par Cattaneo et al. [11]. Le code de calcul NEC-4 (Numerical Electrmagnetic Code) a été employé par Harrat [10] et Sekki et al. [13].

Intitulé "Réponse transitoire des systèmes de mise à la terre 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 ou d'une tension impulsifs. Comme configurations de terre, nous avons choisi une électrode horizontale, une électrode verticale et des grilles de forme carrée et différentes dans leurs dimensions et nombre de mailles. De tels systèmes sont enterrés dans un sol homogène ou stratifié verticalement à deux couches. Pour le sol homogène, plusieurs résistivités ont été adoptées pour simuler un sol faiblement, moyennement ou fortement résistif. 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 quatre chapitres distincts. Le premier chapitre est consacrée à des généralités sur la foudre et les systèmes de mise à la terre. Nous y exposons les surtensions transitoires, la foudre, son origine, ses caractéristiques principales, sa modélisation, ses effets, et la protection contre ce phénomène. Des généralités sur les systèmes de terre, leur rôle, leur réalisation, leur classification, les caractéristiques géologique et électromagnétique des sols et les régimes de neutre y sont également présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous avons cité les différentes approches développées en vue d'étudier le comportement des systèmes de mise à la terre en haute fréquence. Par ailleurs, nous avons exposés les différentes formules analytiques permettant le calcul de résistance de terre ainsi que les principales techniques de mesure de la résistivité du sol.

Le troisième 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.

Trois systèmes de terre à savoir une électrode verticale, une deuxième électrode horizontale et des grilles de différents dimensions et nombre de mailles ont fait l'objet du quatrième et dernier chapitre. Les grilles ont été enterrées dans un sol homogène. Quant aux électrodes ont été enfouis dans deux types de sols : homogène et stratifié en deux couches verticales. Le comportement transitoire de tels systèmes de terre ont été analysés suite à une injection de courant (respectivement de tension) dans le cas d'un sol homogène (respectivement stratifié). L'influence du point d'injection sur la réponse transitoire est y également examiné.

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

Chapitre 1

Généralités sur la Foudre et les Systèmes de Mise à la Terre

1.1 Introduction

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 chapitre, nous commençons par présenter un rappel sur les surtensions transitoires de foudre et de manœuvre. Nous exposons par la suite, la foudre, sa classification, ses caractéristiques principales, son mécanisme de décharge et ses effets ainsi que sa modélisation. Nous exposons également les techniques de protection contre ce phénomène et en mettant l'accent sur les systèmes de mise à la terre.

A la fin, nous présentons les régimes de neutres utilisés en basse et haute tensions. Différents modes de protection sont y décrits, ainsi que les réglages à prévoir compte tenu des exigences souhaitées.

1.2 Surtensions Transitoires Foudre - Manœuvre

On qualifie de surtension toute tension en fonction du temps qui dépasse la tension du régime permanent. Par ailleurs, on désigne par phénomène transitoire, dans les systèmes électriques à haute tension, l'évolution des surtensions entre deux états de fonctionnement permanents où par le passage entre deux régimes permanents [1].

En haute tension, l'étude des régimes transitoires comporte une infinité de cas, impossible à traiter dans leur ensemble. Pour faciliter l'étude de ces phénomènes, une classification est proposée par la CEI-1000, telle que nous pouvons distinguer [1, 2] :

- Surtensions transitoires internes par rapport au système concerné. Nous citons par exemple les surtensions de manœuvre ;

- Surtensions transitoires externes par rapport au système concerné. Les plus célèbres sont celles d'origine électrostatique, la foudre et les surtensions dues à des exploitations nucléaires.

1.2.1 Surtensions transitoires de manœuvre

Les surtensions de manœuvre, dites aussi les surtensions à front lent, proviennent essentiellement de l'enclenchement ou de déclenchement des interrupteurs dans un système électrique [1].

Les phénomènes physiques qui créent des surtensions de manœuvre sont nombreux, dont les plus intervenants sont :

- La résonance et la ferorésonance,
- Les coupures de courant capacitif et inductif,
- L'arrachement du courant,
- Les enclenchements.

1.2.2 Surtensions transitoires de foudre

Les surtensions de foudre proviennent soit d'un impact direct de la foudre sur un système électrique ou bien par influence électrostatique ou électromagnétique de coup de foudre dans son environnement [1].

Les surtensions de foudre ayant des constantes de temps très rapides (de l'ordre de micro-secondes) c'est pourquoi elles sont appelées les surtensions à front rapide.

1.3 Notions générales sur la foudre

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrique apparaissant en temps orageux. La décharge électrique peut avoir lieu à l'intérieur du nuage, entre deux nuages ou encore entre le nuage et la terre. Ce dernier cas est le plus considéré en technique de la haute tension [39].

La terre et l'électrosphère constituent un condensateur naturel sensiblement sphérique (Fig.1.1) d'une épaisseur de 50 à 100 km. Ce condensateur se décharge par ionisation des molécules des gaz de l'air, d'où un champ électrique de l'ordre de quelques centaines de V/m apparait.

Ce champ permet le développement des arcs dont la longueur peut atteindre plusieurs kilo-mètres pour des tensions de l'ordre de quelques dizaines de Méga-Volts [1, 3].

L'air étant faiblement conducteur, il existe donc un courant de conduction permanent de l'ordre de 1500 A, pour tout le globe terrestre. L'équilibre électrique est assuré lors des décharges électriques [3].

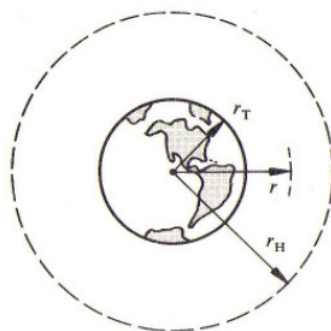


FIGURE 1.1: Représentation du système terre-nuage : L'électro-sphère, r_T rayon moyen de la terre (6367 km); r_H rayon moyen de la couche Heaviside (6467 km) [1]

Le nombre de coup de foudre moyen par seconde contre la terre est de 30. Ce dernier a été mesuré indirectement au moyen des perturbations radiophoniques engendrées [1].

1.3.1 Classification des coups de foudre

Les décharges de foudre sont classées en quatre types selon le sens de développement et la polarité de la décharge préliminaire appelée traceur¹ par bonds (**stepped leader**) [39]. Nous pouvons distinguer : (i) Coup descendant négatif, (ii) coup descendant positif, (iii) coup ascendant négatif et (iv) coup ascendant positif.

La figure (1.2) présente les différents types de coup de foudre :

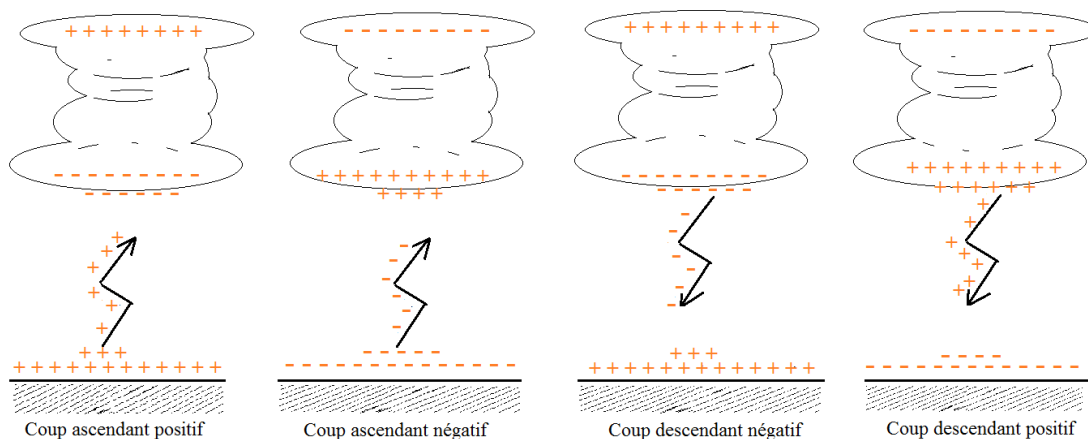


FIGURE 1.2: Classification de différents types de coup de foudre.

Dans 80 à 90% des cas, la décharge est du type "descendante négative". Cette décharge est constituée d'un traceur par bonds, d'une décharge principale (**return stroke**) et de plusieurs décharges secondaires [1, 39].

1. Le traceur (précurseur) est une décharge préliminaire peu lumineuse qui se produit entre la terre et le nuage, préparant le chemin au canal de la foudre [39].

1.3.2 Mécanismes de décharges

La foudre représente une très grande décharge électrique due au transfert des charges électriques portées par les nuages vers la terre.

Le processus de l'électrisation des nuages et la répartition des charges résultent des phénomènes complexes non parfaitement connus. Ils sont liés à la constitution des cristaux de glace² et gouttelettes d'eau³ sous l'effet du mouvement d'une masse d'air chaud. Ce phénomène et celui de séparation des charges restent comme un thème de recherche qui n'ont pas été introduits dans notre plan de travail.

Sachant que le type "descendante négative" est celui le plus fréquent. Pour cela, nous allons présenter le mécanisme de décharge correspond à ce dernier [1, 39].

La figure (1.3) représente les différentes étapes de développement du traceur (décharges préliminaires) en fonction du temps ainsi que le courant des arcs :

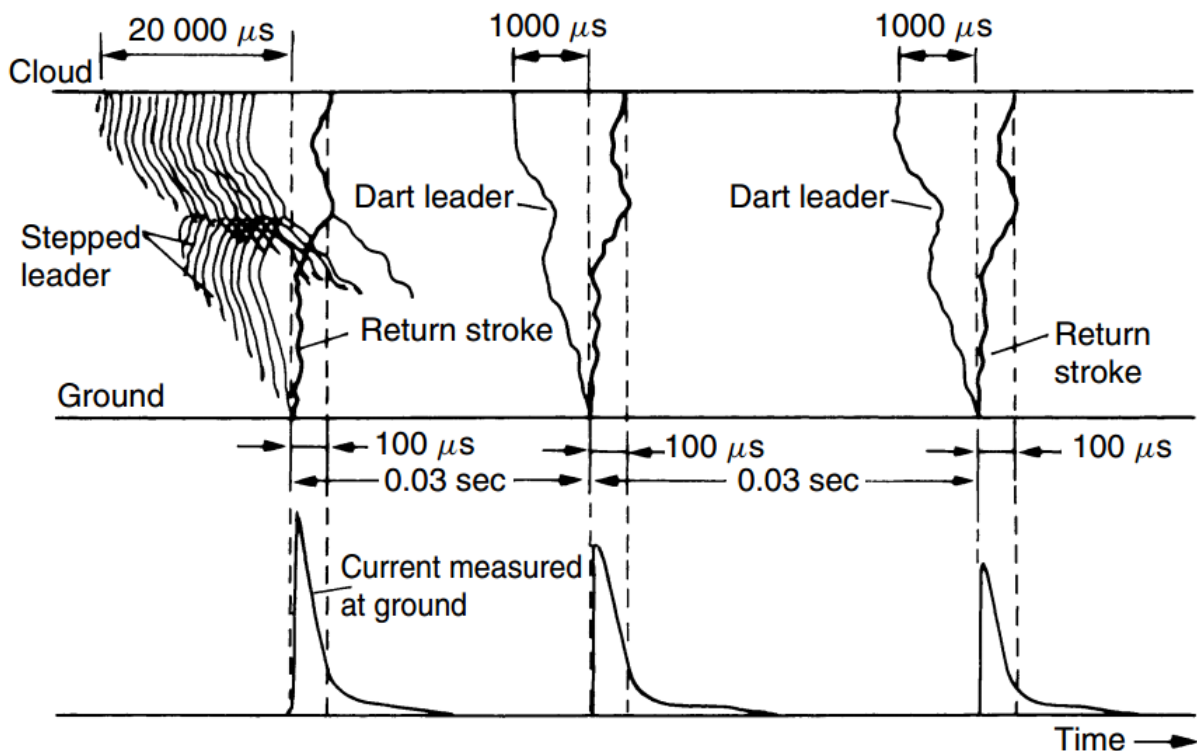


FIGURE 1.3: Représentation du mécanisme de décharge ainsi que le courant des arcs [2]

Lorsque le champ électrostatique, entre nuage-sol, dépasse la rigidité diélectrique de l'air⁴ (variable selon les conditions d'humidité et de pression), on obtient la décharge.

La décharge arrache des électrons aux molécules d'air, créant ainsi un canal ionisé appelé traceur (ou précurseur) qui transporte une faible charge électrique (canal moins lumineux), et progresse vers une zone de charge opposée à une vitesse de l'ordre de 100 km/s.

2. ils représentent les charges positives

3. elles représentent les charges négatives

4. la rigidité diélectrique de l'air $E \cong 30 \text{ kV/cm}$ et en présence des gouttelettes d'eau $E \cong 10 \text{ kV/cm}$

Une seconde décharge suit, prolongeant le traceur de quelques dizaines de mètres. Ce précurseur progresse par bonds (d'où le nom de traceur par bonds) de longueurs proportionnelles à l'amplitude de la décharge. Le traceur est le plus souvent à multiples branches. La progression vers le sol correspond au chemin le moins résistant.

Les charges positives accumulées sous l'orage ont tendance à se concentrer sur des objets élevés et pointus tels que les arbres, les poteaux et les bâtiments. Cela initie à un certain moment un traceur montant de l'objet vers le nuage. Au moment du dernier saut du traceur (saut-final / final-jump), la position de la tête du traceur est appelée point critique.

Quand les deux se rejoignent, de 50 à 100 m du sol (cette distance dépend surtout de la charge cumulée dans le nuage), un arc électrique en retour se déclenche utilisant le canal du précurseur ou le traceur en dard (**dart leader**). Le courant d'arc en retour⁵ (**return stroke**) du sol vers le nuage se propage à une vitesse plus rapide de 50 000 km/s.

Le courant de l'arc de retour est de l'ordre de quelques kA à 250 kA et la température du canal est de 15 000°C à 20000°C d'où il résulte l'effet lumineux de la foudre [2, 39].

Remarque : "Lorsque le traceur par bond progresse vers la terre, sa direction est purement aléatoire. Par contre au moment du saut final, le point d'impact au sol serait le point où le champ électrique aurait dépassé la valeur critique, à partir de laquelle des décharges ascendantes quitteraient la terre se dirigeant vers le traceur descendant" [39].

1.3.3 Caractéristiques principales de la foudre

1.3.3.1 Forme d'onde

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharges d'une quantité d'électricité dans un court intervalle de temps. En moyenne, cette charge est de quelques dizaines de coulombs mais elle peut dépasser 300 C [3].

La forme d'onde réelle est très variable (ondulée). Elle a un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale, de quelques microsecondes à 20 μs , suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes [39].

Le domaine spectral associé à la décharge atmosphérique s'étend dans une bande de fréquence de 10 kHz à plusieurs MHz [3, 40, 41].

1.3.3.2 Amplitude des Coups de Foudre.

La distribution statistique expérimentale des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale [3]. La figure (1.4) présente cette distribution statiques pour des coups de foudre positifs et négatifs suivant la norme IEEE [3].

5. L'arc principal

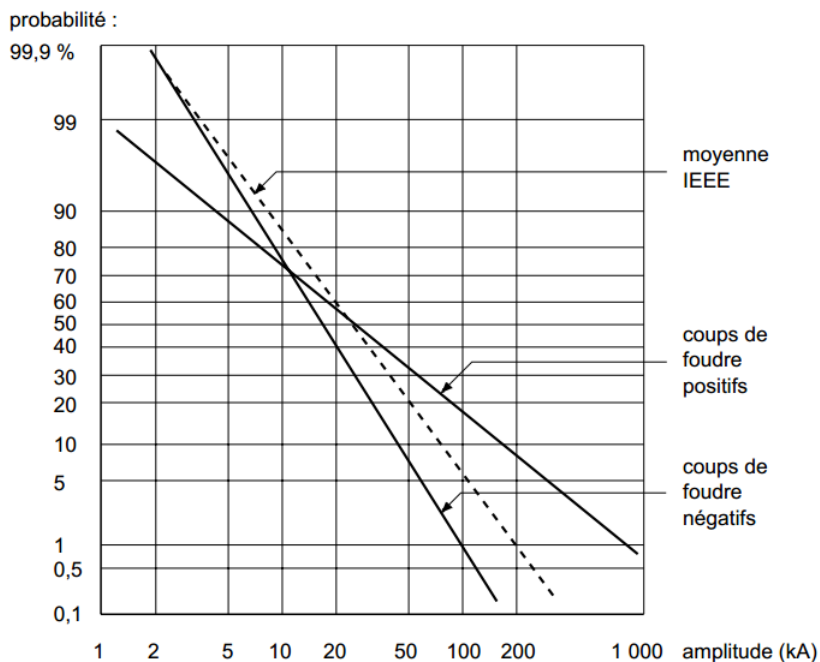


FIGURE 1.4: Distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs, suivant IEEE [3]

En effet, si nous portons en abscisse le logarithme de l'intensité (en kA) du courant de coup de foudre et en ordonnée la probabilité qu'un coup de foudre dépasse l'intensité de courant donnée, nous obtenons sensiblement des droites. La probabilité P qu'un coup de foudre dépasse l'intensité I est exprimée par [42] :

$$\log(P) = 2 - \frac{I}{60} \quad (1.1)$$

1.3.3.3 Raideur de Front

La figure (1.5) illustre la distribution en raideur de front des coups de foudre positifs et négatifs donnée suivant la norme IEEE [3].

Les coups de foudre négatifs sont caractérisés par des raideurs de front importantes. Elles sont supérieures en moyenne à $2 \text{ kA}/\mu\text{s}$ [42]. Les raideurs de front des décharges négatives secondaires peuvent être beaucoup plus grandes.

Pour les études de foudre, les valeurs suivantes sont en général choisies [3] :

- amplitudes 100 kA ou 200 kA (auxquelles sont associées respectivement une probabilité de dépassement de 5% et 1%).
- forme d'onde triangulaire : temps de montée $2 \mu\text{s}$ et temps de descente à mi-queue $50 \mu\text{s}$, d'où un front de 50 ou $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

Il est important de noter que ce temps de front est différent de celui de l'onde normalisée ($1,2 \mu\text{s}$) défini pour les essais au laboratoire suivant la norme CEI-60 [43].

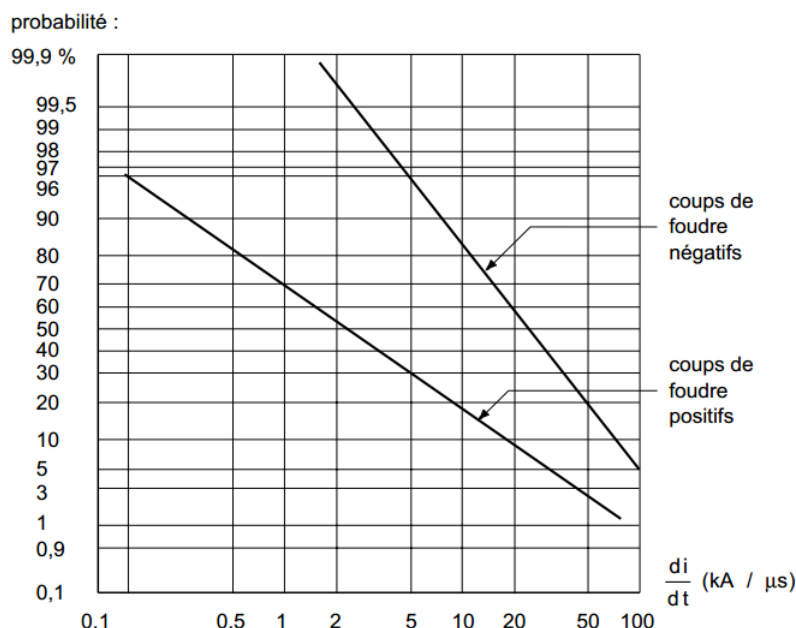


FIGURE 1.5: Distribution statistique expérimentale, en raideur de front, des courants de foudre, positifs et négatifs, suivant IEEE [3]

1.3.4 Effets de la foudre

1.3.4.1 Effet électrique

Lors d'un impact de coup de foudre sur le sol, des différences de potentiel importantes apparaissent sur des faibles distances (un pas). Ces derniers peuvent provoquer des claquages locaux qui mènent à l'endommagement des conducteurs présents dans ce sol.

Ces tensions sont très dangereuses pour les êtres vivants (tension de pas). Il est à noter que les effets indirects, liés au couplage galvanique ou couplage par conduction, peuvent engendrer des perturbations sur les différents systèmes électriques voisins [1, 44].

1.3.4.2 Effet thermique

La décharge atmosphérique produit une grande énergie. Elle est capable d'enflammer du bois sec, de provoquer des incendies et de produire la fusion des parties métalliques [1, 44, 45].

1.3.4.3 Effet électrodynamique

L'effet électrodynamique manifeste sous forme des forces d'attractions, s'exercent sur des conducteurs parallèles parcourus par des courants de même sens [1, 44, 45].

1.3.4.4 Effet électromagnétique

Ils se manifestent par différents processus de couplages sur une structure. Le phénomène d'induction électromagnétique, lié à la propagation d'onde de courant sur les conducteurs, provoque des dégâts en leurs extrémités ainsi que les signaux parasites détruisent les composants électroniques sensibles aux surtensions [1, 44].

1.3.4.5 Effet électrochimique

La corrosion, consécutive à des courants circulant dans le sol, est importante sur les conducteurs enterrés (décomposition électrolytique) [1, 44].

1.3.4.6 Effet Acoustique

Le tonnerre est une onde de choc violente qui génère des pressions importantes à courte distance. Elles peuvent provoquer des bris de vitre à quelque mètres du point d'impact [1, 44].

1.3.4.7 Effet visuel (éclair)

Dû au mécanisme de l'avalanche de Townsend, le courant de l'arc de retour est de l'ordre de quelques kA à $250 kA$ et la température du canal est de $15000^{\circ}C$ à $20000^{\circ}C$. Ces deux paramètres sont les responsables de l'effet lumineux [2, 39].

1.3.5 Modélisation de la foudre

Le modèle du courant de coup de foudre proposé est basé sur le fait qu'un courant de foudre résulte de la décharge d'un condensateur chargé représentant le système nuage-sol. Il existe divers circuits de base pour les générateurs d'impulsions. Un générateur à un seul étage est constitué de [2] :

- Un condensateur C_1 qui représente le système nuage-sol ;
- Une ligne de transmission à constantes réparties qui représente le canal de foudre formé d'air ionisé de conductance négligeable.
- Une résistance d'injection R_1 qui représente la résistance du sol ;
- Une résistance de décharge R_2 qui représente la résistance du nuage. Elle peut prendre des valeurs de $0,5$ à $5 k\Omega$ suivant les coups de foudre produits ;
- Un condensateur C_2 qui représente la charge ;

Le circuit électrique équivalent à une décharge de foudre est présenté sur la figure (1.6). Le condensateur C_1 se charge lentement, par un courant continu, jusqu'à l'éclateur G se décompose. R_1 est responsable d'amortir le courant et contrôler le temps de montée. R_2 a un rôle de contrôler l'amplitude de l'onde. Il est à noter que C_1 est très grand devant C_2 [2].

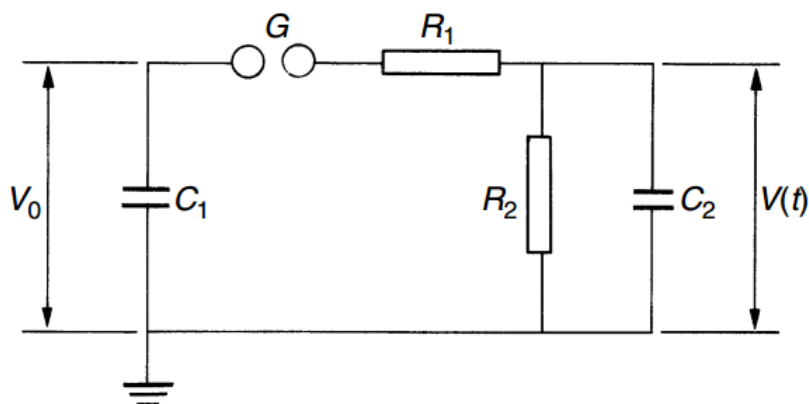


FIGURE 1.6: Circuit électrique équivalent à une décharge de foudre [2]

En utilisant la loi des mailles, nous pouvons déterminer les expressions de la tension et du courant. Nous allons obtenir une équation différentielle de second ordre de première degré, qui possède une solution de la forme bi-exponentielle :

1.4 Protection Contre la Foudre

Les dégâts causés par la foudre sont considérables. Ces dégâts sont dus aussi bien à des effets directs qu'à des effets indirects. Deux stratégies différentes de protection sont utilisées celle contre les effets directs et l'autre contre les effets indirects de la foudre.

1.4.1 Protection contre l'atteint directe de la foudre

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

L'efficacité de ces dispositifs est liée à leurs capacités de :

- Attirer la foudre
- Supporter les impacts (effets thermiques et mécaniques),
- Canaliser et diffuser la totalité d'énergie dans le sol.

1.4.1.1 Protection du réseau de transport d'énergie contre la foudre

La protection contre l'impact direct de la foudre dans ce cas est réalisée par un câble de garde pour les lignes aériennes et par un filet de garde aérien relié à une grille de mise à la terre pour les postes aériens.

1.4.1.2 Protection des bâtiments contre la foudre

Pour protéger les bâtiments et son environnement, des dispositifs de protection sont placés sur le toit afin de capter, canaliser et diffuser l'énergie que résulte un coup de foudre vers le sol.

a- Paratonnerres à tiges simples : Le système de protection est constitué outre l'organe de capture, d'une ou deux descentes associées chacune à une prise de terre. La pointe d'une tige est entourée d'un champ électrique dans les périodes orageuses. Si la foudre se dirige vers l'une des pointes, alors il finira sa course dans les câbles de descente (au lieu de passer par le bâtiment) [1, 45].

b- Paratonnerres à dispositif d'amorçage : Ces dispositifs à pointes actives reposent sur la théorie " de l'avance à l'amorçage ". Le dispositif d'amorçage permet d'accroître la distance d'amorçage en générant un traceur ascendant précoce⁶ et ainsi la zone de protection du paratonnerre. Cette technologie permet de bénéficier des zones de protection plus étendues assurant la protection de structures de grandes dimensions [1, 45].

c- Paratonnerres à fil tendu : Ce système est composé d'un ou plusieurs fils conducteurs tendus au-dessus des installations à protéger. Les conducteurs doivent être reliés à la terre à chacune de leur extrémité. L'installation de fils tendus nécessite une étude particulière tenant compte notamment de la tenue mécanique, la nature de l'installation et les distances d'isolement [1, 45].

d- Paratonnerres à cage maillée : Ce système de protection est constitué de plusieurs pointes couvrant toute la toiture et les arêtes du bâtiment à préserver. Les pointes sont reliées entre elles par des filins conducteurs interconnectés et reliés à la terre en formant une cage (dite cage de Faraday) [1, 45].

1.4.1.3 Mise à la terre

La mise à la terre a un rôle primordial et reste indispensable pour le bon fonctionnement de l'installation électrique [46].

1.4.2 Protection contre les effets indirects de la foudre

Lorsque la foudre touche les câbles ou les lignes de transmission, une surtension se propage le long des conducteurs et se transmet éventuellement jusqu'aux appareils situés en amont ou en aval. Cette surtension peut être générée également par l'induction due aux rayonnements électromagnétiques. Pour protéger les systèmes électriques contre les effets indirects de la foudre, on utilise les éclateurs et les parafoudres.

6. par rapport au traceur ascendant naturellement émis par une pointe simple

1.4.2.1 Éclateurs

Les éclateurs sont constitués de deux électrodes face à face dans un milieu qui peut être l'air ambiant (éclateur à air), l'air en-capsule ou du gaz (éclateurs à gaz). L'une des électrodes est reliée au conducteur à protéger et l'autre à la terre.

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

Les surtensions rapides comme celles provoquées par la foudre ont un temps de montée qui peut être inférieur au temps d'amorçage de l'éclateur, il laisse passer le pic de la surtension et dévie une grande partie de l'énergie. Cependant, il ne protège pas efficacement les équipements sensibles : les parafoudres à éclateur à gaz sur les lignes télécommunications sont d'une efficacité relative pour protéger les équipements de télécommunication. Ils sont parfois associés à des composants de protection secondaires type varistance ou diode d'écrêtement. Ainsi la facilité de son réglage entraîne en contrepartie des possibilités de mauvais réglages. Les éclateurs provoquent une mise hors tension du réseau après chaque fonctionnement, ce qui dégrade la qualité de service [44, 45, 47].

1.4.2.2 Parafoudres

Le parafoudre appareil destiné à protéger le matériel électrique contre les surtensions transitoires élevées et à limiter la durée et souvent l'amplitude du courant de suite. Il peut être de différents types.

a- Parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs : Constitués de varistances (résistances non linéaires) associées en série avec un ou plusieurs éclateurs. L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote). Ce dispositif est connecté en parallèle avec le circuit d'alimentation des récepteurs qu'il doit protéger. Les résistances variables sont constituées des grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disques dont les faces parallèles sont métallisées et le porteur recouvert d'un revêtement isolant destiné à éliminer les contournements. Ces composants sont rarement installés [45, 48, 49].

b- Parafoudres à Oxyde de Zinc : C'est au cours des années soixante que des varistances constituées d'une céramique à base d'oxyde de zinc sont apparues sur le marché pour la protection des circuits électroniques. Ces composants présentent deux avantages essentiels [47, 50] :

- Un coefficient de non-linéarité important qu'on peut en faire des parafoudres sans éclateurs.
- Leur capacité d'absorption d'énergie est élevée et la marge de tension varie de 225 V à 400 kV.

1.5 Systèmes de Mise à La Terre (SMLT)

La première application fonctionnelle du système de mise à la terre a été utilisée dans le télégraphe en 1820 pour les longues distances. Il a été trouvé, par la suite, par un scientifique qui s'appelle "*Carl August Steinheil*" en 1836-1837, que la terre pourrait représenter un retour pour fermer un circuit électrique. Les systèmes de mise à la terre ont été en suite développés, puisque les ingénieurs les ont utilisés comme un retour dans les systèmes de distribution électrique pour objectif de réduire le nombre des conducteurs [20].

Actuellement, l'idée est gardée. Cependant, les objectifs deviennent nombreux principalement pour la protection personnelle et des équipements électriques contre les problèmes de l'électrocution en général. Avec la connaissance du phénomène de la foudre, le système de mise à la terre devient nécessaire pour chaque installation électrique pour éviter les risques de la foudre [20].

1.5.1 Généralités sur les SMLT

1.5.1.1 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 [20, 51].

1.5.1.2 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 [51].

1.5.1.3 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 [51, 52].

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 [51].

1.5.1.4 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 [51, 52].

1.5.1.5 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 [46];

- 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 [46].

1.5.1.6 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 [46].

1.5.1.7 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 [51].

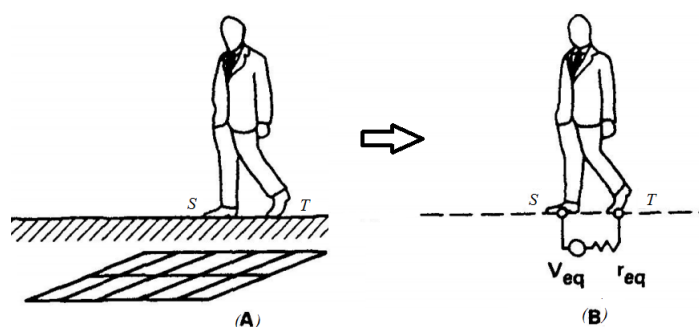


FIGURE 1.7: Schéma équivalent pour l'estimation du courant à travers le corps humain pour une tension de pas [4]

La tension de pas est la différence de potentiel (ddp) entre les points S et T présentés sur la figure (1.7A). Pour estimer le courant qui peut traverser le corps humain, la figure (1.7B) montre le circuit équivalent de "Thevenin" proposé.

1.5.1.8 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 (1.8). C'est la tension à laquelle nous sommes soumis lorsque nous touchons cette masse métallique [51].

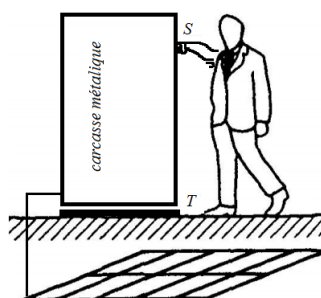


FIGURE 1.8: Représentation pour la tension de contact

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

1.5.2 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 [46].

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 [4].

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 [4].

1.5.3 Réalisation d'un SMLT

1.5.3.1 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 [14].

1.5.3.2 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 [5] :

- ❑ **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 [5].
- ❑ **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 [5]. 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 normal⁷. 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 [5].
- ❑ **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 [5].

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

1.5.4 Caractérisation du sol

1.5.4.1 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 [5]. La figure (1.9) présente la structure du sol à l'échelle microscopique.

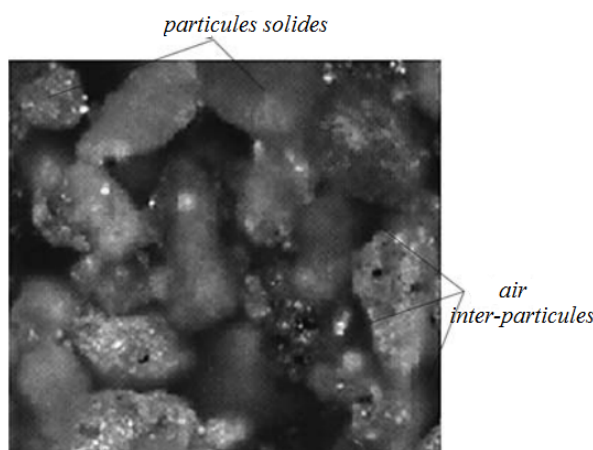


FIGURE 1.9: Structure du sol à l'échelle microscopique [5]

1.5.4.2 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 anisotropie⁸. Les couches peuvent avoir différents pendages. Les caractéristiques électromagnétiques d'un sol donné peuvent avoir des valeurs différentes selon le sens de la mesure [53].

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 (1.2), qui donne le coefficient de propagation γ [53] :

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = j\omega\sqrt{\mu(\varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega})} \quad (1.2)$$

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

8. 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 [53], 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 :

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r - j60\sigma\lambda} \quad (1.3)$$

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 : $\mu_r = 5$ [53].

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 [54].

1.5.4.3 Facteurs influençant sur les caractéristiques du sol

La valeur équivalente des constantes du sol dépend non seulement de la nature du sol, mais aussi de sa teneur en humidité et de sa température. Les autres facteurs qui interviennent sont la fréquence, la formation géologique générale du terrain, ainsi que la profondeur équivalente de pénétration et l'étalement latéral des ondes [53].

a- Nature du sol : De nombreuses mesures ont permis d'établir que la valeur des caractéristiques électriques varie avec la nature du sol; il semble probable cependant que cette variation est due, moins à la composition chimique du sol qu'à ses propriétés d'absorption et de rétention de l'humidité. La conductivité de l'argile est normalement de l'ordre de $10^{-2} S/m$. Par contre, pour l'argile sèche, la conductivité peut descendre jusqu'à $10^{-4} S/m$, c'est-à-dire à une valeur du même ordre que celle du granit [53].

Des fois on doit ajouter des matières additionnelles pour augmenter la conductivité du sol, notamment les Chlorides, les Nitrates, les Sulfates de Sodium, le Potassium, le Magnésium ou le Calcium [14].

b- Teneur en humidité : Le teneur en humidité du sol est probablement le facteur principal qui influe sur la valeur de ses paramètres électriques. Des mesures effectuées en laboratoire ont montré que, si l'on fait, croître la teneur en humidité à partir d'une valeur faible, les valeurs augmentent rapidement et deviennent maximales pour des

teneurs en humidité voisines de celles qu'on rencontre normalement dans les sols réels correspondants [53].

Toutefois, un même sol peut présenter des variations d'humidité considérables d'un lieu à un autre, ou d'une période à une autre pour le même lieu. Il semble que, en un lieu donné, l'humidité du sol reste très sensiblement constante toute l'année à des profondeurs égales ou supérieures à 1 m. Cependant, il peut y avoir une augmentation pendant les chutes de pluie, par suite de différence entre les formations géologiques générales, auxquelles correspond un écoulement plus ou moins rapide des eaux [53].

c- Température : La température possède également des effets sur la résistivité du sol. Des mesures de laboratoire portant sur les caractéristiques électriques du sol ont montré qu'aux basses fréquences, le coefficient de température de la conductivité est de l'ordre de 3% par degré Celsius, tandis qu'il est négligeable dans les cas de la permittivité [53].

Au point de congélation de l'eau, on observe généralement une substantielle diminution de la valeur de la permittivité ainsi que celle de la conductivité. Bien que les variations soient appréciables, il convient de se rappeler que la température varie annuellement entre des limites de plus en plus serrées lorsque la profondeur augmente, aussi est-il vraisemblable que la température n'a une influence notable qu'aux fréquences élevées, pour lesquelles la pénétration des ondes est faible, ou encore lorsque le sol est gelé sur une grande profondeur [14, 55, 56].

TABLE 1.1: Valeurs de la résistivité d'un type sol en fonction de la température [14]

La température en °C	Valeur de la résistivité du sol ρ en Ωm
-5	700
0	300
0	100
10	80
20	70
30	60
40	50
50	40

Pour la température 0°C est un point critique séparé entre deux états physiques de l'eau, c'est pourquoi on doit mettre 0⁻ et 0⁺.

d- Variations saisonnières : L'effet des variations saisonnières sur l'affaiblissement de propagation de l'onde de sol du rapport entre la profondeur du sol à laquelle se manifestent de telles variations et la profondeur de pénétration. Un tel effet dépend toujours de la fréquence [14, 53]. Les variations saisonnières observées lors de mesures de phase sur des émissions LORAN-C [57] faites à la fréquence 100 kHz ont été interprétées comme dues uniquement à des variations de l'indice de réfraction. Des mesures en onde hectométriques faites en Inde ont montré que le champ relevé pendant la mousson était

presque le même que pendant la saison sèche. Des mesures faites en ondes hectométrique dans la zone tempérée en Finlande [58] n'ont indiqué qu'une variation de champ de 1 à 2 *dB* entre l'été et l'hiver.

Des radioamateurs ont effectué aux États-Unis des mesures de la conductivité dans les premiers cinquante centimètres du sol [59], lesquelles font apparaître une variation saisonnière cyclique d'un facteur de deux pour la conductivité du voisinage de la surface du sol. Ces valeurs de conductivité semblent être fonction de la température moyenne du sol, de petites fluctuations étant liées aux précipitations mesurées.

e- Fréquence : Des mesures de laboratoire sur des échantillons du sol ont montré que la permittivité et la conductivité sont en fonction de la fréquence qui dépend sensiblement de la teneur en humidité du sol. Dans le cas de l'eau douce et de l'eau de mer, on peut se fonder sur les renseignements contenus dans l'ouvrage [54] pour calculer les valeurs correspondant à une fréquence quelconque.

f- Formation géologique générale : D'une manière générale, les terrains au-dessus desquels s'effectue la propagation, ne sont pas homogènes et les caractéristiques électriques équivalentes dépendant du contenu du milieu de propagation. C'est pourquoi il est important de connaître exactement la formation géologique de l'ensemble de la région qu'on étudie. Dans une zone donnée, ou le long d'un parcours donné, les caractéristiques électriques équivalentes dépendent non seulement de la nature des sols formant la couche superficielle, mais aussi des couches sous-jacentes. Ces dernières déterminent le niveau des eaux dans les couches supérieures.

g- Absorption de l'énergie par des objets à la surface de la terre : Les objets se trouvant à la surface de la terre n'influent pas directement sur la valeur des caractéristiques électriques du sol lui-même. Cependant, ces facteurs peuvent participer dans une mesure importante à l'affaiblissement des ondes de sol. On peut tenir compte de ces pertes d'énergie en utilisant, dans les calculs de propagation, des valeurs des caractéristiques électriques modifiées de façon appropriée [53].

Lorsque la transmission se fait au-dessus d'un terrain boisé à des fréquences supérieures à environ 30 *MHz* [60–62], on obtient des valeurs particulièrement élevées de l'affaiblissement linéique. Cet affaiblissement peut être encore plus grand lorsque les arbres sont couverts de neige mouillée ou que leurs feuilles sont mouillées par la pluie.

1.5.5 Classification des SMLT

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

1.5.5.1 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 [5].

1.5.5.2 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 [5].

1.5.5.3 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 [5].

1.5.5.4 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 [5].

1.5.6 Schémas de liaison à la terre

Il est important de rappeler ici les différents schémas de liaison à la terre (appelés aussi **régimes de neutre**) car les valeurs des résistances de mises à la terre dépendent fortement de ceux-ci, tant du point de vue du fonctionnement des réseaux électriques (sécurité du matériel) que de la sécurité des personnes [46].

Les réseaux de distribution sont caractérisés essentiellement par la nature du courant et le nombre de conducteurs actifs, ainsi que par la liaison à la terre. L'étude des

régimes des neutres permet de mettre en évidence les précautions à prendre en matière de sécurité devant les risques électriques encourus [46].

On distingue trois régimes de neutre. Ils sont caractérisés par 2 lettres (Régime TT, TN, IT) [63–66] :

- 1^{ère} lettre représente la position du neutre de l'alimentation par rapport à la terre ;
- 2^{ème} lettre représente la position de la masse du récepteur par rapport à la terre.

TABLE 1.2: Différents schéma de liaison à la terre

Letter	Symbole	Signification
1 ^{ère}	T	Neutre relié directement à la terre
	I	Neutre isolé de la terre ou relié par l'intermédiaire d'une impédance
2 ^{ème}	T	Masses d'utilisation reliées directement à la terre
	N	Masses d'utilisation reliées au neutre lui-même relié à la terre.

La figure (1.10A) montre les liaisons dans le cas du régime (TT) et les figures (1.10B) et (1.10C) illustrent respectivement celles du régime (IT) et (TN).

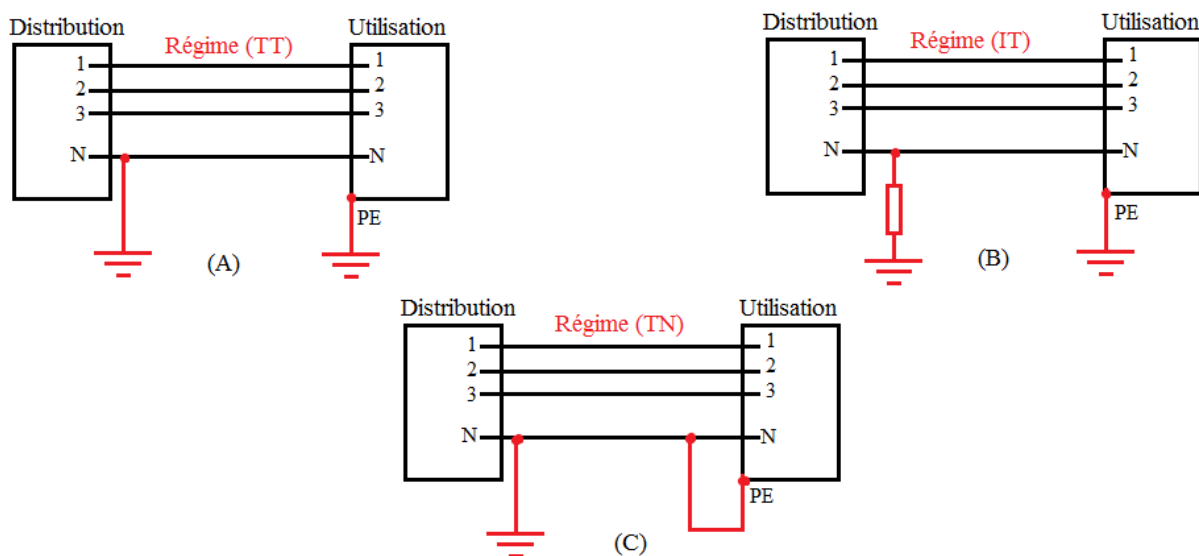


FIGURE 1.10: Représentation des liaisons du neutre et de la masse d'utilisation pour les différents régimes de neutre

avec ; N est le neutre, PE est la masse d'utilisation et Z_{imp} est une impédance de valeur élevée (Z_{imp} peut être une résistance ou une inductance).

Pour les systèmes TN, on peut distinguer deux types TN-S et TN-C. Le neutre et le conducteur de protection sont séparés dans le régime TN-S, et confondus dans celui TN-C.

TABLE 1.3: Avantages et inconvénients de chaque schéma de liaison

	Régime : (TT)	Régime : (IT)	Régime : (TN)
Avantages	<p>Coupure au premier défaut</p> <p>Ne nécessite aucune personne qualifiée</p> <p>Idéal pour les mauvaises valeurs de prises de terre</p> <p>Extension d'installation simple à réaliser</p>	<p>Coupure au premier défaut</p> <p>Employé avec succès dans les installations électriques dont les récepteurs ont naturellement des défauts d'isolement très élevés comme les radars</p>	<p>Pas de coupure au premier défaut</p> <p>La poursuite de l'exploitation d'énergie malgré un premier défaut d'isolement même important (ex : salles d'opération en hôpital)</p>
Inconvénients	<p>Pas de continuité de service lors d'un défaut d'isolement Dispositif différentiel parfois coûteux</p>	<p>Ces installations alimentent des récepteurs sans protection différentielle</p>	<p>Nécessité d'avoir un spécialiste en dépannage. Avant l'apparition d'un 2^{eme} défaut qui va déclencher les protections</p>

1.6 Conclusion

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 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons d'analyser 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. Finalement, nous présentons les approches numériques les plus célèbres permettant d'analyser le comportement transitoire des systèmes de terre telles que l'approche des circuits, l'approche électromagnétique (méthode des moments, méthode des différences finis et la méthode des éléments finis) et enfin l'approche des lignes de transmission.

2.2 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 [14, 67] :

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

2.2.1 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 [4, 15, 18].

2.2.1.1 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 :

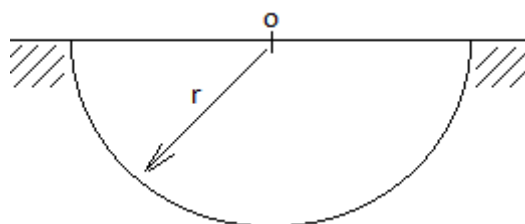


FIGURE 2.1: Schéma d'une électrode hémisphérique du rayon r

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

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

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

Alors l'expression de la résistance s'écrit [4, 15, 18] :

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

2.2.1.2 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 :

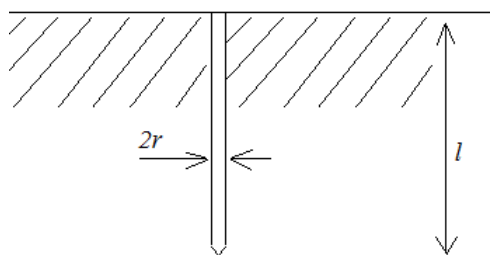


FIGURE 2.2: Schéma d'une électrode verticale de forme cylindrique du rayon r

Relation de Rudenberg : La résistance d'une électrode verticale de forme cylindrique enterrée dans un sol homogène peut être calculée par [18] :

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

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 [14, 19] :

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

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 [23] :

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

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 :

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

2.2.1.3 Électrodes en ligne droite (dans le même plan)

La résistance équivalente de deux électrodes identiques en ligne droite est donnée par l'expression suivante [15, 68] :

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

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 [15, 68] :

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

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 [15] :

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

Pour la même configuration (n -électrodes), *Brown et al.* [14] ont trouvé la formule suivante :

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

où :

- R_{piquet} est la résistance d'un seul piquet,
- $R_{n-piquet}$ 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 [14]

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

2.2.1.4 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 :

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

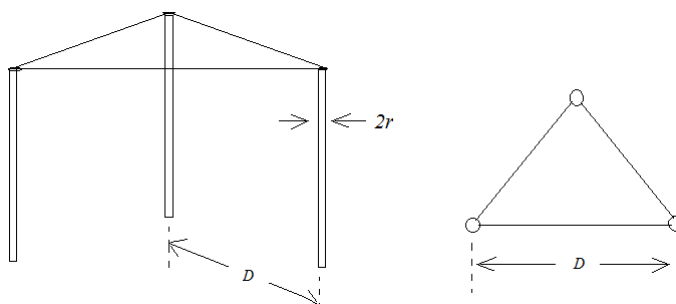


FIGURE 2.3: Schéma des électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

2.2.1.5 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

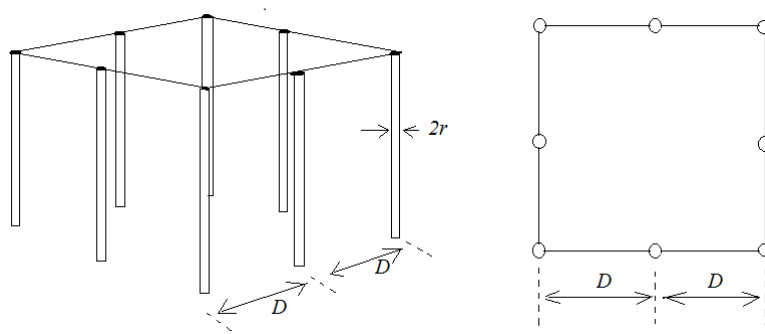


FIGURE 2.4: Schéma des électrodes sur les côtés d'un carré

2.2.1.6 Électrode enterrée horizontalement

La résistance d'une électrode de longueur l et de rayon r , enterré horizontalement à une profondeur h (Fig.2.5) est donnée par [15] :

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

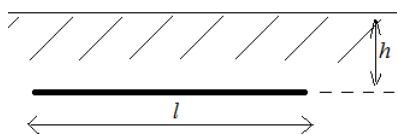


FIGURE 2.5: Schéma d'une électrode enterrée horizontalement

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 [15] :

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

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

2.2.1.7 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 [15] :

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

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 $N(n)$ [15]

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

2.2.1.8 Réseau maillé (Grille)

Grille en forme d'un disque La résistance d'une grille en forme de disque est donnée par les expressions suivantes [15] :

$$\text{Pour } h \ll d : \quad R = \frac{\rho}{\pi d} \left(1 - \frac{4h}{d} \right) \quad (2.22)$$

$$\text{Pour } h \gg d : \quad R = \frac{\rho}{8d} + \frac{\rho}{8\pi h} \quad (2.23)$$

h étant la profondeur d'enfouissement et d est le diamètre de chaque électrode de cette grille.

Réseau maillé de forme carrée Pour h faible devant les dimensions de la grille, la résistance est exprimée par [15] :

$$R \approx \frac{2\rho}{p} \quad (2.24)$$

avec p est le périmètre de la grille.

2.2.1.9 Boucle enterrée

La résistance de la boucle enterrée, à une profondeur h de la surface du sol, de rayon r et de périmètre d est donnée par la relation suivante [15] :

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 d} \ln\left(\frac{8d^2}{rh}\right) \quad (2.25)$$

2.2.1.10 Grille combinée avec des piquets

Les méthodes de calcul de la résistance, pour une grille combinée avec des piquets, sont données par IEEE 80-2000 [19].

Cette fiche technique inclut et définit les méthodes les plus utilisées. Nous pouvons citer, entre autre, la :

- Méthode de Laurent-Niemann,
- Méthode de Sverak,
- Méthode de Schwarz,
- Méthode De Thapar-Gerez,
- Méthode de Nahman-Skuletich.

Méthode de Laurent-Niemann : La résistance peut être estimée par la relation de "Laurent-Niemann", appelée aussi la relation IEEE Std 80 [19], suivante [17, 19] :

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (2.26)$$

avec :

- A est l'aire de la grille,
- L_T est la longueur totale des conducteurs donnée par la relation :

$$L_T = L_c + n_R l \quad (2.27)$$

- L_c est la longueur totale des conducteurs primaires,
- n_R est le nombre des piquets existants dans la grille,
- l est la longueur du piquet.

Méthode de Sverak : Des travaux sont effectués relatifs à l'effet significatif de la profondeur sur la variation de la résistance, d'où l'équation (2.28) réarrangée de l'équation de *Laurent-Niemann* est incluse ce paramètre dans la relation (2.26) [16, 19, 69] :

$$R = \rho \left\{ \frac{1}{l} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \frac{20}{A}} \right) \right\} \quad (2.28)$$

D'après la relation de *Sverak*, on peut facilement déduire que la résistance est directement proportionnelle à la résistivité et inversement proportionnelle à la longueur totale des conducteurs. La résistance est également inversement proportionnelle à la racine carrée de la section.

L'importance de cette relation est qu'en augmentant la longueur des conducteurs, la valeur de la résistance du sol diminue, ce qui permet d'avoir la valeur désirée de la résistance.

Méthode de Schwarz : *Schwarz* a développé un ensemble d'expressions afin de déterminer la résistance enfouie dans un sol uniforme. Ces expressions se composent de trois

équations. De ces équations, la relation principale est donnée par [16–19] :

$$R = \frac{(R_1 R_2 - R_m^2)}{(R_1 + R_2) - 2R_m} \quad (2.29)$$

– R_1 est la résistance de conducteurs de la grille.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left\{ \ln\left(\frac{2L_c}{a'}\right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right\} \quad (2.30)$$

– R_2 est la résistance des piquets de terre.

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n l} \left\{ \ln\left(\frac{4l}{b}\right) - 1 + \frac{2k_1}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right\} \quad (2.31)$$

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

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left\{ \ln\left(\frac{2L_c}{l}\right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right\} \quad (2.32)$$

avec :

$$a' = \sqrt{a2h} \text{ si la grille est enterre à une profondeur } h. \quad (2.33)$$

$$a' = a \text{ si la grille est sur la surface du sol.} \quad (2.34)$$

- ρ est la résistivité du sol.
- L_c est la longueur totale de tous les conducteurs de la grille.
- a est le rayon des conducteurs de la grille,
- A est l'aire occupée par les conducteurs,
- l est la longueur des piquets,
- b est le rayon des piquets,
- n est le nombre de piquets,
- k_1 et k_2 sont des coefficients donnés dans la table (2.4).

TABLE 2.4: Valeurs numériques des coefficients k_1 et k_2 [16–19]

h	k_1	k_2
0	$k_1 = -0,04x + 1,41$	$k_2 = 0,15x + 5,50$
$\frac{\sqrt{A}}{10}$	$k_1 = -0,05x + 1,20$	$k_2 = 0,10x + 4,68$
$\frac{\sqrt{A}}{6}$	$k_1 = -0,05x + 1,13$	$k_2 = -0,05x + 4,40$

avec : $x = \frac{\text{Longueur de la grille}}{\text{Largeur de la grille}}$

Méthode de Thapar-Gerez : *Thapar* et *Gerez* ont développé, à la base de la formule de *Sverak*, une équation empirique pour déterminer la résistance du système de mise à la terre. Ils ont validé leur équation par la détermination de la résistance du réseau de terre pour plus de 100 grilles de différentes dimensions, configurations et tailles. L'expression

de Thapar-Gerez est donnée par la relation suivante [70] :

$$R = \rho \left\{ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{(1 + h\sqrt{\frac{20}{A}})} \right) \right\} 1,52 \left\{ 2 \ln \left(p \sqrt{\frac{2}{A}} \right) - 1 \right\} \frac{\sqrt{A}}{p} \quad (2.35)$$

avec p est le périmètre de la grille.

Méthode de Nahman-Skuletich : Nahman et Skuletich ont déterminé la relation suivante pour calculer la résistance de mise à la terre [17] :

$$R = \rho \left\{ \frac{0,53}{\sqrt{A}} + \frac{1,75}{l\sqrt[3]{n}} \right\} \sqrt[4]{\left\{ 1 - 0,8 \frac{100hd}{n\sqrt{A}} \right\}} \quad (2.36)$$

avec :

- ρ est la résistivité du sol,
- n est le nombre de piquets,
- A est l'aire occupée par les conducteurs,
- l est la longueur des piquets,
- d est le diamètre de l'électrode.

2.2.1.11 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 [22].

$$R_m = \frac{1}{2\pi l} \left\{ \rho_m \left(\ln \left(\frac{r_m}{r} \right) \right) + \rho \left(\ln \left(\frac{4l}{r_m} \right) - 1 \right) \right\} \quad (2.37)$$

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.

2.2.1.12 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 [21] :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left\{ \ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \ln\left(\frac{\frac{nH}{l} + 1}{\frac{nH}{l} - 1}\right) \right\} \quad (2.38)$$

avec :

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

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.39)$$

- H : profondeur de la couche de résistivité ρ_1 .

Pour une électrode qui traverse deux couches de résistivités différentes, la résistance est calculée par [21] :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+K)}{((1-K) + 2K\frac{H}{l})} \left\{ \ln\left(\frac{2l}{r}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln\left(\frac{(2nH+l)}{(2H(n-1)+l)}\right) \right\} \quad (2.40)$$

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 :

$$R = R_1 + R_a \quad (2.41)$$

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 [21] :

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ 4 \ln\left(\frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2nH}{l}\right)^2 + 1}}{2n\frac{H}{l}}\right) + 8n\frac{H}{l} - 4\sqrt{\left(\frac{2nH}{l}\right)^2 + 1} \right\} \quad (2.42)$$

2.2.2 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.

2.2.2.1 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 [4, 19, 21, 67]. 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 [19] :

$$\rho = 2\pi DR \quad (2.43)$$

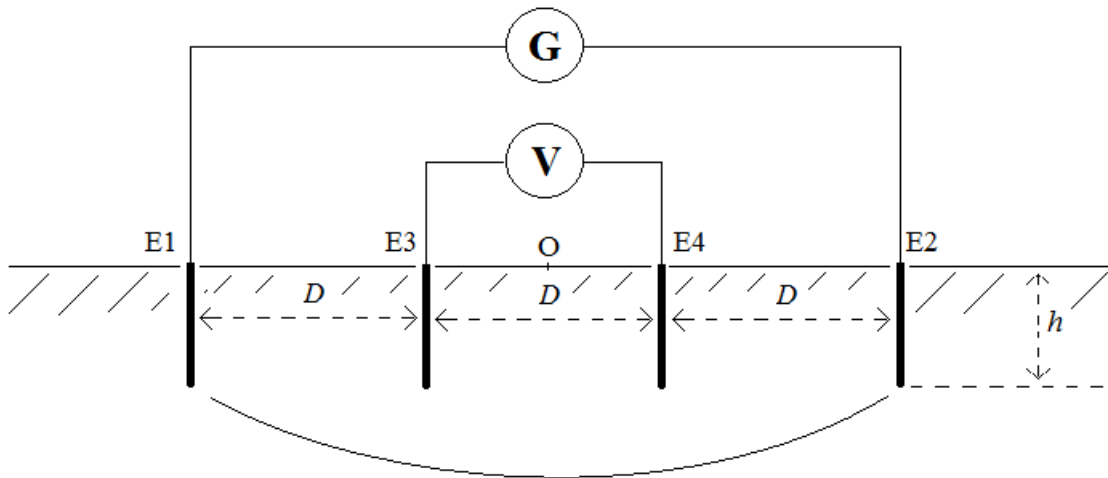


FIGURE 2.6: Schéma de mesure de la méthode de Wenner

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 grandeurs et la valeur de la résistance R mesurée aux bornes des électrode de l'extrémité, par [71] :

$$\rho_a = \frac{4\pi DR}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4H_e^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + H_e^2}}} \quad (2.44)$$

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 (2.45) suivante [71] :

$$\rho_a = \rho_1 \left(1 + 4 \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{H}{D})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{H}{D})^2}} \right) \right) \quad (2.45)$$

avec ; K est le coefficient de réflexion donné par :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.46)$$

2.2.2.2 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 :

$$\rho = \frac{\pi R}{4} \left\{ (D')^2 - \frac{D^2}{2} \right\} \quad (2.47)$$

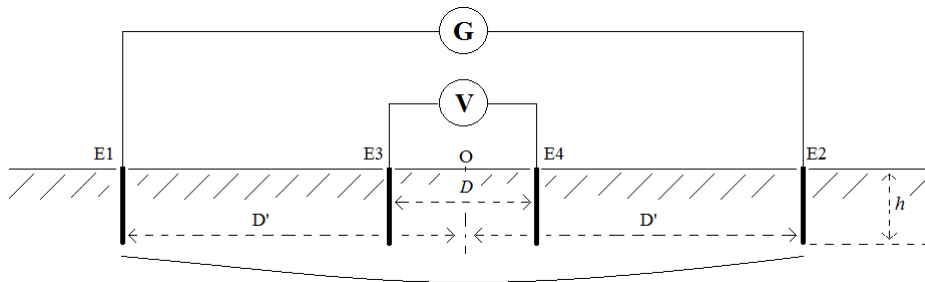


FIGURE 2.7: Schéma de principe de mesure par la méthode de "Schlumberger"

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.

2.2.2.3 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 ($D \gtrsim D'$)[67].

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

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.48)$$

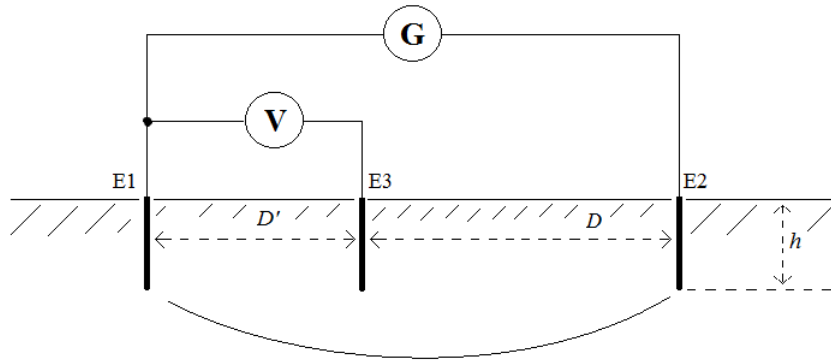


FIGURE 2.8: Schéma de principe de mesure par la méthode de trois pôles

La résistivité est donnée par la formule suivante [72] :

$$\rho = R.2\pi D\left(\frac{D + D'}{D'}\right) \quad (2.49)$$

2.2.2.4 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 [73] :

Si $\rho_1 > \rho_2$ alors :

$$\rho_a = \frac{\rho_1}{-1 + \left(1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+2h)}{}}\right)\right)} \quad (2.50)$$

Sinon :

$$\rho_a = \rho_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+2h)}{}}\right)\right) \quad (2.51)$$

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 $\rho_2 > \rho_1$,

$$\rho_a = \rho_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+2h)}{}}\right)\right) \quad (2.52)$$

sinon :

$$\rho_a = \rho_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{K(H+15h)}{}}\right)\right) \quad (2.53)$$

Dans le cas d'une électrode verticale enfouie dans un tel sol stratifié, la résistivité apparente peut être donnée par l'expression suivante [74] :

$$\rho_a = \frac{l\rho_1\rho_2}{\rho_2H + \rho_1(l - H)} \quad (2.54)$$

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,

2.3 Différents Modèles d'Étude des SMLT Lors d'un Impact de Coup de Foudre

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 [75]. Après les travaux de Bewley, plusieurs chercheurs [11–13, 71] sont intéressés par ce domaine.

Le calcul des différents paramètres des systèmes de mise à la terre peut être classé en deux catégories [5] : (i) Estimation des paramètres en utilisant des formules empiriques et (ii) Calcul précise en utilisant des méthodes d'analyse numérique.

2.3.1 Méthodes analytiques et empiriques

Différentes normes telle que IEEE Standard 80-2000 [17] et IEEE Standard 665-1995 [46] 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.

2.3.2 Méthodes numériques

Plusieurs méthodes numériques ont été développées pour l'étude des comportements transitoires des systèmes de mise à la terre. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories : l'approche des longs conducteurs et l'approche des courts conducteurs [76].

2.3.2.1 Approche des circuits

Cette approche est l'une des méthodes numérique souvent utilisée dans la modélisation des comportements transitoires des systèmes de mise à la terre de géométrie complexe (appelée aussi l'approche des longs conducteurs [76]). Les étapes principales de cette méthode sont :

- Diviser le système de mise à la terre en plusieurs segments finis ;
- Modéliser chaque segment par un circuit équivalent puis calculer ses paramètres, notamment l'inductance ∇L , la capacitance ∇C , la conductance ∇G et la résistance interne r_i ;
- Résoudre l'équation nodale du circuit équivalent qui représente le système de mise à la terre en utilisant les lois de *Kirchoff*. L'équation nodale peut être représentée par différentes formes suivant le circuit équivalent du système de mise à la terre adopté.

L'approche du circuit pour l'étude des comportements transitoires des systèmes de mise à la terre a été développée pour la première fois par *Meliopoulos* en 1983 [24].

Dans cette approche chaque segment du système de mise à la terre a été remplacé par une ligne de transmission sans dissipation et deux conductances de fuite shuntées à la terre (Fig.2.9).

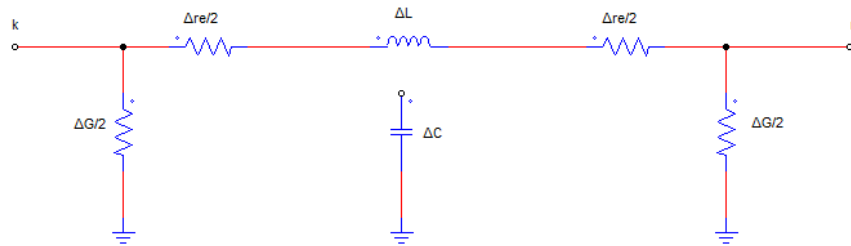


FIGURE 2.9: Circuit équivalent de chaque segment de ligne de transmission

On peut transformer le circuit montré sur la figure (2.9) en nouveau modèle. Ce dernier est illustré sur la figure (2.10).

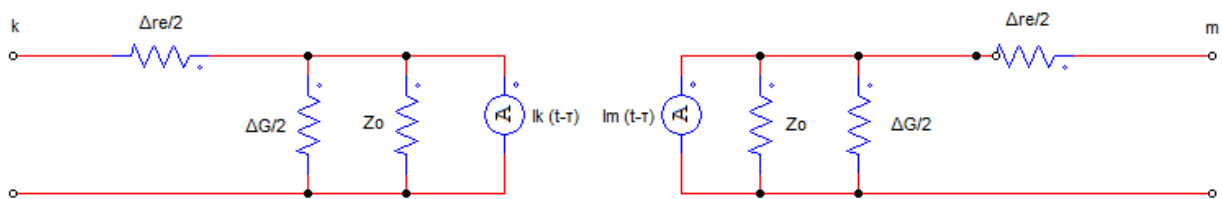


FIGURE 2.10: Autre modèle du circuit équivalent de chaque segment de ligne de transmission

L'équation nodale du circuit équivalent de la figure (2.10) est donnée par :

$$[Y][V(t)] = [I(t)] + [b(t - \Delta t), \dots] \tag{2.55}$$

où :

- Y est la matrice admittance des circuits équivalents,

- V est le vecteur des tensions dans tous les nœuds,
- I est le vecteur des courants sortants de tous les nœuds,
- b est le vecteur des courants initiales.

Plus tard, Meliopoulos et al. [25] ont amélioré leur approche de circuit pour examiner l'impact de la foudre en calculant la réponse de chaque segment sur la base des équations de *Maxwell* de sorte que ses paramètres et le courant dépendent de la fréquence. Une technique de convolution récursive a été utilisée à cet effet.

En 1989, Ramamoory et al. [26] ont développé un circuit simplifié pour les réseaux de terre. Dans leur approche, après avoir divisé le système de mise à la terre entier en n segments, chaque segment a été seulement représenté par un circuit regroupant les inductances propres (ΔL), les mutuelles (ΔM) et la conductance de fuite à la terre (ΔG) (Fig.2.11). Par conséquent, l'équation nodale de leur circuit équivalent du système de mise à la terre est donnée par :

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1} \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1}[V] \right\} \quad (2.56)$$

avec :

- $[V]$ est le vecteur nodal de tension,
- $[I_s]$ est le vecteur nodal du courant d'injection,
- $[G]$ est la matrice de conductance nodale,
- $[L]$ est la matrice d'inductance nodale.

Il est à noter que le modèle de la figure (2.11) néglige le couplage capacitif. Parallèlement il reste immobile pour l'analyse des comportements transitoires des systèmes de mise à la terre pour le cas d'un sol de faible résistivité.

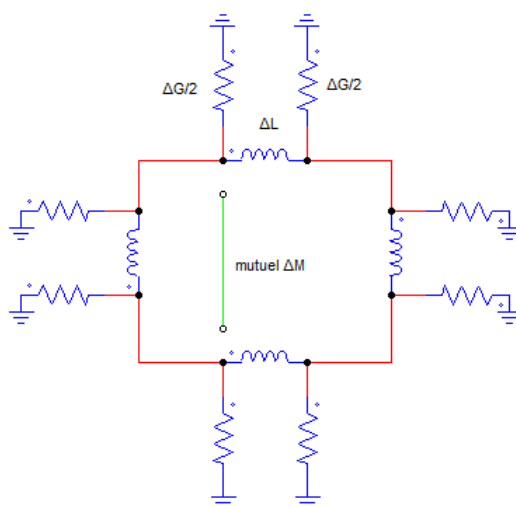


FIGURE 2.11: Circuit équivalent de grille d'un réseau terre

En 1999, deux modifications sur le circuit basé sur les travaux de *Meliopoulos* [24][25] ont été publiées par *Geri* [6] et *Otero* [7]. Ces deux chercheurs ont inclus les phénomènes d'ionisation de sol dans leurs modèles pour étudier le comportement transitoire du système de mise à la terre.

Ger a utilisé un autre circuit équivalent pour représenter chaque segment du système de mise à la terre. *Ger* a utilisé une conductance équivalente parallèle à une source de courant pour représenter chaque branche capacitance-conductance (Fig.2.12) et résistance-inductance (Fig.2.13).

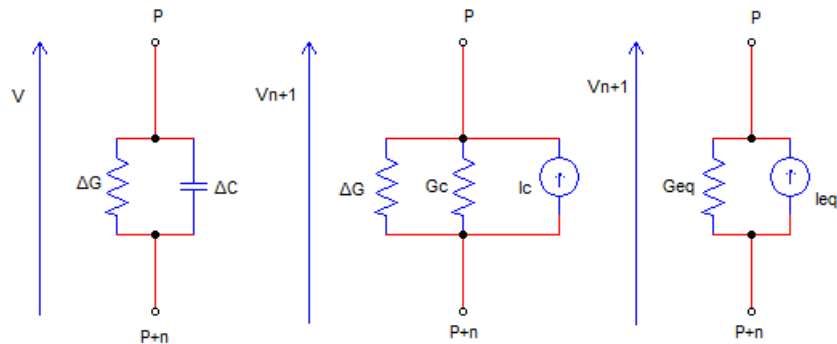


FIGURE 2.12: Circuit équivalent d'une branche capacitance-conductance de système de mise à la terre dans le modèle de "*Ger*"[6]

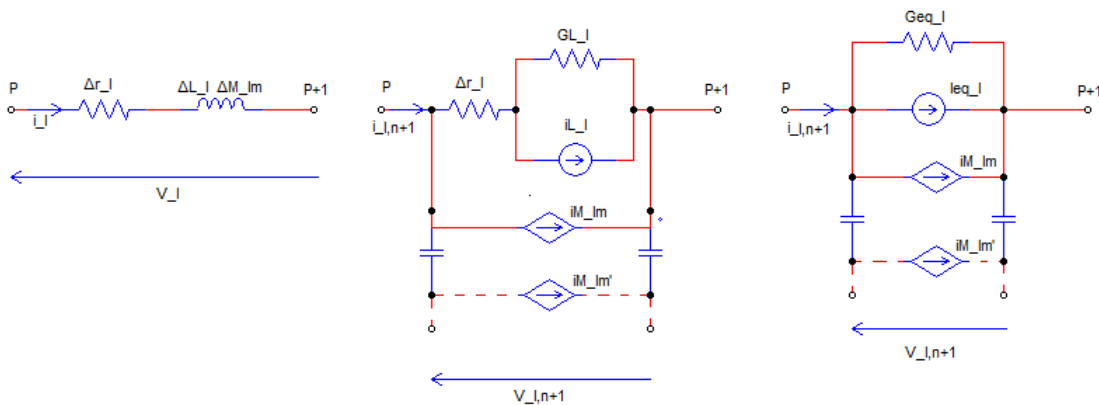


FIGURE 2.13: Circuit équivalent d'une branche résistance-inductance de système de mise à la terre dans le modèle de "*Ger*" [6]

Le circuit équivalent du système de mise à la terre de "*Otero*" [7] est montré sur la figure (2.14).

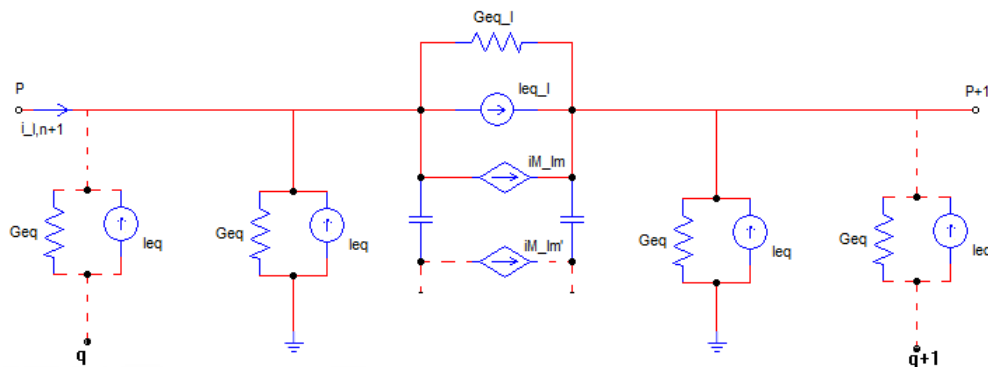


FIGURE 2.14: Circuit équivalent d'une branche du SMLT pour le modèle de "*Ger*" [6]

L'équation (2.57) représente l'équation nodale de ce circuit. Elle a été résolue dans le domaine fréquentiel, ce qui fut probablement la première tentative pour l'analyse

transitoire du système de terre.

$$[I_s] = [K]^t [G] [K] [V] + [Y] [V] \quad (2.57)$$

où : $[V_{-ave}] = [K] [V]$.

avec :

- $[I_s]$ est le vecteur des courants de sortie ;
- $[Y]$ est la matrice admittance des circuits équivalents qui inclue les effets résistifs et inductifs ;
- $[G]$ est la matrice conductance nodale qui inclue les effets capacitifs et conductifs ;
- $[K]$ est une matrice constante qui reliant le vecteur de tension des branches $[V_{-ave}]$ et le vecteur des tensions des nœuds $[V]$.

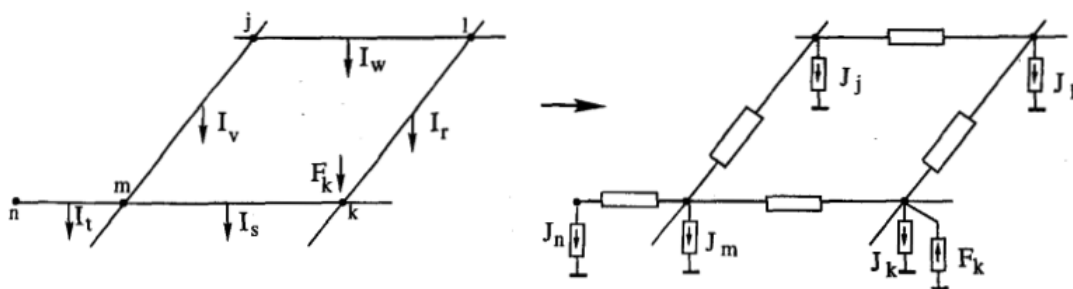


FIGURE 2.15: Circuit équivalent du SMLT pour le modèle de "Otero" [7]

2.3.2.2 Approche du flux électromagnétique

En cas d'un défaut de court-circuit ou d'un coup de foudre, un système de mise à la terre est relié à un dispositif électrique pour évacuer le courant de défaut vers la terre. Les courants de fuite souterrains peuvent être élevés (100 kA). Leur émission électromagnétique peut causer des perturbations dans les équipements électriques et d'intensifier la tension de pas qui peut être dangereuse pour les personnes à proximité [35].

L'approche du flux électromagnétique permet d'obtenir la réponse du système de mise à la terre dans une plage de fréquence très étroite. Les méthodes les plus souvent appliquées sont [77, 78] :

- Méthode des différences finis dans le domaine temporel (FDTD),
- Méthode des moments (MoM),
- Méthode des éléments finis (FEM).

Méthode des différences finis dans le domaine temporel (FDTD) C'est la méthode la plus couramment utilisée pour résoudre les équations différentielles. En effet, cette méthode est plus utilisée que celle des éléments finis. Une grande simplicité est fournie par cette approche pour effectuer des algorithmes d'intégration numérique. Cette méthode représente un bon choix pour analyser les systèmes de simple géométrie ou encore moins

compliquer. Elle assure la résolution des équations différentielles de Maxwell sous une forme discrétisée, directe et dans le domaine espace-temps. Son avantage majeur est le traitement des phénomènes non-linéaires dans des milieux hétérogènes [79].

Cette méthode apparaît comme étant la plus simple à mettre en œuvre car elle procède en deux étapes : d'une part la discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation/différentiation, d'autre part la convergence du schéma numérique ainsi obtenu lorsque la distance entre les points diminue.

La méthode nécessite que le domaine de calcul soit discrétisé en éléments de volume (cellules) pour lesquels les équations de Maxwell doivent être résolues. La taille de chaque cellule ne doit pas dépasser $\frac{\lambda}{10}$ où λ est la longueur d'onde [40, 41].

Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont utilisé la méthode FDTD pour analyser un système de mise à la terre soumis à un coup de foudre citant par exemple : Run Xiong et al. [80] ainsi que Phan Tu Vu et al [81].

Méthode des moments (MoM) C'est une méthode numérique basée sur les équations intégrales. Elle est largement utilisée pour analyser la réponse des structures conductrices soumises à des champs électrodynamiques externes. Pour les coups de foudre, les conducteurs minces de terre sont souvent modélisés comme des lignes de transmission en vérifiant que la longueur des conducteurs soit beaucoup plus petite que la longueur d'onde. Pour cela, une segmentation des conducteurs doit être faite pour assurer l'hypothèse précédente [40]. Elle est développée par Roger F. Harrington [82].

La méthode des moments a été utilisée pour la première fois par Grcev [27] pour analyser le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre.

Cette méthode est une technique générale pour résoudre des équations caractérisées par un opérateur intéro-différentiel F , une fonction d'excitation h et une fonction inconnue g [82] :

$$F(g) = h \quad (2.58)$$

Le but est de trouver g lorsque F et h sont connues. Notons que la fonction inconnue g s'écrit comme suite :

$$g = \sum_{n=1}^N a_n g_n = a_1 g_1 + a_2 g_2 + \dots + a_N g_N \quad (2.59)$$

où :

- $(a_n)_{n=1,2,\dots,N}$: sont des constantes inconnues.
- $(g_n)_{n=1,2,\dots,N}$: sont des fonctions de base.

En utilisant la propriété de linéarité de l'opérateur F , on aboutit à :

$$\sum_{n=1}^N a_n F(g_n) = h \quad (2.60)$$

Pour résoudre ce systèmes d'équations, on utilise la méthode de *Galerkine* [83] où on introduit la notion des fonctions de pondérations (poids) w_m .

$$\sum_{n=1}^N \langle w_m, F(g_n) \rangle = \langle w_m, h \rangle \quad (2.61)$$

où : $m = 1, 2, \dots, M$

On peut écrire cette série d'équation sous la forme matricielle suivante :

$$[L_{mn}] \cdot [a_n] = [h_m] \quad (2.62)$$

où :

$$[L_{mn}] = \begin{pmatrix} \langle w_1, F(g_1) \rangle & \langle w_1, F(g_2) \rangle & \dots \\ \langle w_2, F(g_1) \rangle & \langle w_2, F(g_2) \rangle & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$[a_n] = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

et

$$[h_m] = \begin{pmatrix} \langle w_1, h \rangle \\ \langle w_2, h \rangle \\ \vdots \end{pmatrix}$$

les $\{a_n\}$ sont données par : $[a_n] = [L_m]^{-1} \cdot [h_m]$ avec $[L_m]$ est une matrice inversible.

Méthode des éléments finis Parmi les approches utilisées pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques, la méthode des éléments finis est considérée comme la plus adaptée dans le cas d'absence du phénomène de propagation de l'onde électromagnétique dans le dispositif simulé [40]. Cette méthode est utilisée pour analyser la dépendance à la fréquence des caractéristiques du SMLT [84].

Le calcul des émissions électromagnétiques des systèmes de mise à la terre a été approché par *Dawalibi* et al. [29]. La solution proposée consiste à résoudre numériquement les équations de *Maxwell*" sous leurs formes intégrales.

Le calcul se fait généralement en deux étapes : calcul de courant et puis de champ électromagnétique. En considérant les deux demi-environnements infinis (air et terre), les auteurs introduisent l'intégrale aux limites et l'intégrale de *Sommerfeld* qui leurs permettent de traiter le changement de l'environnement [85]. Ce formalisme ne permet que le calcul des champs générés par les courants qui traversent des conducteurs horizontaux ou verticaux, aériens ou souterrains.

L'avantage de la modélisation avec la méthode des éléments finis est que le calcul en plusieurs étapes peut être évité; un seul ensemble d'équations est résolu en une seule étape et encore elle est plus facile à mettre en œuvre parce que les deux

demi-environnements infinis sont comptabilisés avec les transformations spatiales plutôt qu'avec intégrales limites et le déplacement d'un environnement à un autre est assuré en reliant les différentes formulations utilisées. En outre, le problème peut être traité indépendamment de la position du conducteur ou sa géométrie, ce qui signifie qu'elle est valable pour différents dispositifs de SMLT [35].

D'après [35], l'analyse physique du problème du champ électromagnétique généré par le système de mise à la terre peut être résolu par une formulation $A - V$ dans le milieu de conduction d'où A est le vecteur de potentiel magnétique et V scalaire de potentiel électrique.

Cette formulation est traduite, pour un environnement isotrope, homogène et linéaire par les deux équations suivantes [35] :

Pour le champ dans le sol :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} (\text{rot}(\vec{W})) (\text{rot}(\vec{A})) + \frac{1}{\mu} (\text{div}(\vec{W})) (\text{div}(\vec{A})) + \sigma j\omega \vec{W} \vec{A} \text{grad}(V) \right) d\Omega = 0 \\ \int_{\Omega} (\sigma \text{grad}(w) (j\omega \vec{A} + \text{grad}(V))) d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (2.63)$$

Pour le champ dans l'air :

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\mu} ((\text{rot}(\vec{W})) (\text{rot}(\vec{A})) + (\text{div}(\vec{W})) (\text{div}(\vec{A}))) d\Omega = 0 \quad (2.64)$$

avec :

- w : une fonction de pondération d'un potentiel scalaire pour un élément de volume.
- W : une fonction de pondération de potentiel vectoriel pour un élément de volume.

Afin de résoudre le problème numériquement, on transforme les équations précédentes en des équations linéaires en partitionnant l'ensemble du système en n petits éléments.

2.3.2.3 Approche hybride

L'approche hybride dans l'analyse transitoire d'un système de mise à la terre a été utilisée pour la première fois par *Dawalibi* en 1986 [28, 29]. En 2000, cette approche a été modifiée par *Andolfato et al* [38]. L'approche hybride est une combinaison de : l'approche électromagnétique et l'approche des circuits. La méthodologie de cette approche est la suivante :

La totalité du système de mise à la terre doit être partitionnée en (n) sous partition. Le champ électrique de chaque point est donné par la relation suivante tirée à partir des équations de *Maxwell* :

$$\vec{E} = -\text{grad}(V) - j\omega \vec{A} \quad (2.65)$$

avec : \vec{A} est le vecteur potentiel.

Pour chaque segment (k) l'équation (2.66) peut être transformée et écrit comme suit [38] :

$$Z_{sk}I_k + \sum_{i=1}^n (V_{-ave_k} - V_{-ave_i}) + j\omega \sum_{i=1}^n \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl = 0 \quad (2.66)$$

où :

- Z_{sk} : Impédance interne de segment (k) du conducteur qui inclue l'effet de peau.
- V_{-ave_k} et V_{-ave_i} sont les potentiel des segments k et i .

On pose : $V_{ik} = (V_{-ave_k} - V_{-ave_i})$ est due au couplage capacitif et $j\omega \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl$ est due au couplage inductif [38].

Donc, on peut écrire :

$$Z_{ik}I_k + \sum_{i=1}^n (C - G)_{ik}I_{\perp ik} + j\omega \sum_{i=1}^n L_{ik}I_i = 0 \quad (2.67)$$

Cette relation est sous la forme d'une équation de circuit. Cependant, les composants de couplage inductif et capacitif de l'équation (2.67) ont été évalués à l'aide d'une analyse rigoureuse de champ électromagnétique comme suit :

$$\begin{aligned} j\omega L_{ik} &= \frac{j\omega}{I_i} \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl \\ (C - G)_{ik} &= \frac{V_{ik}}{I_{botik}} = \frac{1}{4\pi\sigma} \left\{ \int_{l_i} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl + \xi \int_{l'_i} \frac{e^{-\gamma r'}}{r'} dl' \right\} \end{aligned} \quad (2.68)$$

où :

- \vec{A}_{ik} est le vecteur potentiel de segment (k) due au courant de source de segment (i),
- l_k et l'_k sont les longueurs de segment k et son image k' ,
- I_i est le courant qui circule le long du segment (i).
- $I_{\perp ik}$ est le courant de dissipation de segment (i) vers le segment (k) à travers la terre,
- r est la distance entre la source de courant et le point ou le champ est calculé,
- r' est la distance entre l'image de source de courant et le point ou le champ est calculé,
- σ est la conductivité complexe de terre.

$$\sigma_{sol} = \sigma_{sol} + j\omega\epsilon_{sol} \quad (2.69)$$

- γ est le constant de propagation,
- ξ est le coefficient de réflexion capacitif-conductif.

Relativement à l'approche des circuits conventionnelle spécialement pour une grande fréquence de la source injectée, l'avantage de l'approche hybride est qu'elle prend en considération l'influence de la fréquence sur l'impédance interne en série, les composants inductives et capacitive-conductive.

2.3.2.4 Approche des lignes de transmission

Théoriquement, chaque phénomène électromagnétique est décrit par les équations de " Maxwell " et par des contraintes (conditions aux limites) qui dépendent du problème à étudier. Souvent, il est ardu de résoudre ces équations en raison de leur complexité, mais on peut simplifier considérablement l'étude des lignes à partir de l'approche des lignes de transmission. Pour cette dernière, l'électrode est divisée en éléments uniformes donc de même longueur dx . Pour pouvoir appliquer l'approche des lignes de transmission, dx doit être inférieur ou égal à $\frac{\lambda}{10}$; λ étant la longueur d'onde [40, 41].

❖ **Modèle d'une ligne mono-filaire avec le sol** 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] :

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = R'I(x,t) + L'\frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \quad (2.70)$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = G'V(x,t) + C'\frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \quad (2.71)$$

avec :

- I est le courant dans les conducteurs (matrice colonne).
- V est le potentiel des conducteurs (la référence est la terre éloignée).
- L' est l'inductance linéique (H/m),
- R' est la résistance linéique (Ω/m),
- C' est la capacitance linéique (F/m),
- G' est le conductance linéique (S/m).

Les équations reviennent à modéliser une portion longitudinale de longueur très petite dx par un circuit équivalent, comme le présente la figure suivante :

Les expressions des paramètres linéiques R' , L' , G' et C' , qui dépendent de la fréquence, sont développées à partir des considérations sur le champ électromagnétique. Elles sont données par [86] :

$$\left\{ \begin{array}{l} R' = \frac{\rho l}{\pi r^2} \\ G' = \frac{\pi I}{\rho_g [\ln(\frac{2l}{\sqrt{2rh}}) - 1]} \\ L' = \frac{\sigma l^2}{\varepsilon_0 c_0^2 G} \\ C' = \frac{\varepsilon G}{\sigma} \end{array} \right. \quad (2.72)$$

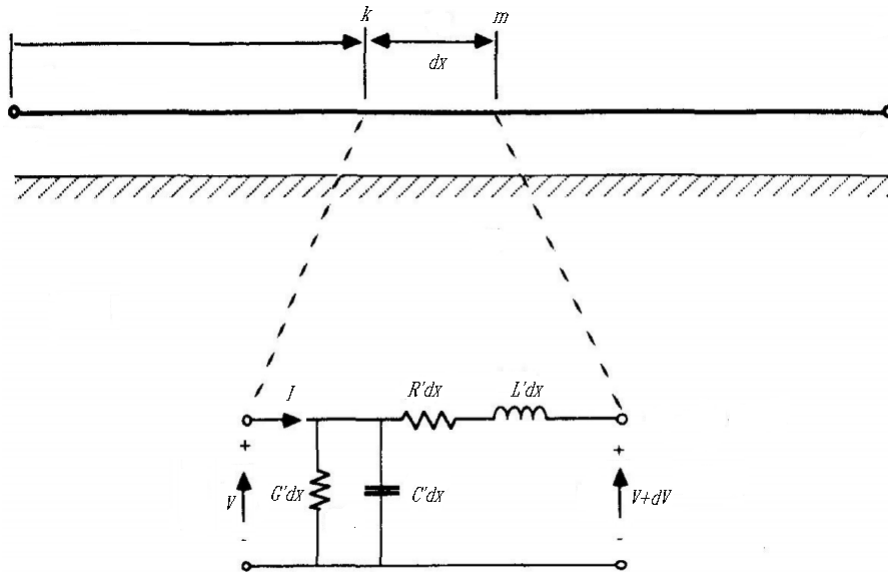


FIGURE 2.16: Schéma d'une ligne de transmission mono-filaire [4]

où : h est le profondeur, r est le rayon, ρ est la résistivité de l'électrode, ρ_g est la résistivité du sol, ε est la permittivité du sol, ε_0 est la permittivité du vide et c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide.

Nous utilisons la transformée de Laplace pour développer les équations (2.70) et (2.71). En notant s l'opérateur de "Laplace", on peut écrire :

$$\frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = Z' I(x, s) \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = Y' V(x, s) \quad (2.74)$$

avec :

$$Z' = R' + sL' \quad (2.75)$$

$$Y' = G' + sC' \quad (2.76)$$

En dérivant les relations (2.73) et (2.74) par rapport à x , et en utilisant les expressions des dérivées partielles de V et I par rapport à x dans les nouvelles relations, on aura :

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial^2 x} = Z' \frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = Z' Y' V(x, s) \quad (2.77)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial^2 x} = Y' \frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = Y' Z' I(x, s) \quad (2.78)$$

ou encore :

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial^2 x} = \gamma^2 V(x, s) \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial^2 x} = \gamma^2 I(x, s) \quad (2.80)$$

avec γ est la constante de propagation donné par :

$$\gamma = \sqrt{(R' + sL')(G' + sC')} \quad (2.81)$$

La solution générale des deux équations est donnée par :

$$V(x, s) = V^+ e^{-\gamma x} + V^- e^{\gamma x} \quad (2.82)$$

$$I(x, s) = \sqrt{\frac{Y'}{Z'}} [V^+ e^{-\gamma x} + V^- e^{\gamma x}] \quad (2.83)$$

En appliquant les conditions aux limites suivantes :

Pour les tensions, on a : $V(x = 0) = V_k$ et $V(x = L_g) = V_m$.
 Pour les courants, on a : $I(x = 0) = I_k$ et $I(x = L_g) = I_m$
 on obtient :

$$V_k - \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} I_k = [V_m - \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} I_m] e^{-\gamma L_g} \quad (2.84)$$

$$V_k + \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} I_k = [V_m - \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} I_m] e^{\gamma L_g} \quad (2.85)$$

L'impédance de propagation est donnée par la relation suivante :

$$Z_o = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \quad (2.86)$$

L'impédance de l'électrode de terre, dans ce cas, est égale à l'impédance d'entrée où elle est donnée par la relation suivante :

$$Z_{in} = Z_o \frac{(Z_R + Z_o \tanh(\gamma l))}{(Z_o + Z_R \tanh(\gamma l))} \quad (2.87)$$

L'électrode est alors modélisée comme une ligne de transmission ouverte à l'extrémité. L'impédance de charge tend alors vers l'infini ($Z_R \rightarrow \infty$). Dans ce cas, la relation (2.87) devient :

$$Z_{in} = Z_o \cotan(\gamma l) \quad (2.88)$$

Cas particulier d'une ligne sans pertes :

Si on considère que Z' et Y' ne varient pas avec la fréquence et que les pertes sont nulles

($R' = G' = 0$), les équations deviennent alors :

$$V_k - \sqrt{\frac{L'}{C'}} I_k = [V_m(t - \tau) + \sqrt{\frac{L'}{C'}} I_m(t - \tau)] \quad (2.89)$$

$$V_m + \sqrt{\frac{L'}{C'}} I_m = [V_k(t - \tau) + \sqrt{\frac{L'}{C'}} I_k(t - \tau)] \quad (2.90)$$

où :

$$\gamma = j\omega\sqrt{L'C'}$$

$$\tau = L_g\sqrt{L'C'}$$

❖ **Modèle d'une ligne quelconque à m conducteurs :** Une ligne de transmission multifilaire composée de m conducteurs (Fig.2.17) peut également être représentée en considérant les chutes de tensions transverses dV_k et les courants longitudinaux dI_k dans chaque conducteur k et à chaque segment de longueur dx . Dans ce stage, l'influence du couplage capacitif et mutuel inter-segments sont inclus lors de la détermination des paramètres linéiques.

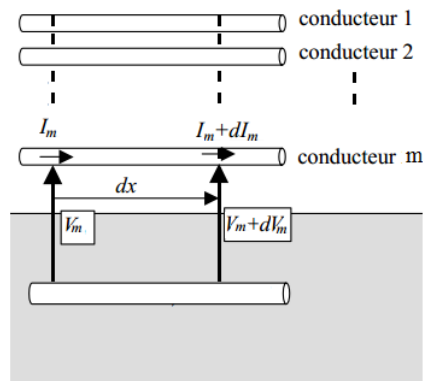


FIGURE 2.17: Schéma d'une ligne de transmission composée de m conducteurs

On peut exprimer les équations nodales par :

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = Z' Y' V \quad (2.91)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = Z' Y' I \quad (2.92)$$

avec :

- V la matrice colonne portant les m tensions conducteur / terre éloignée,
- I la matrice colonne portant les m courants dans les conducteurs,
- Z' la matrice impédance par unité de longueur de taille $m \times m$,
- Y' la matrice admittance par unité de longueur de taille $m \times m$.

En utilisant la théorie des valeurs propres, il est possible de transformer ces équations couplées des quantités en phase aux quantités modales de manière à les découpler. Cela

signifie que le produit $Z'Y'$ donne une matrice diagonale. Les équations modales sont résolues similairement que dans le cas d'une ligne monophasée. La transformation inverse est finalement utilisée pour passer des quantités modales aux équations en phase.

2.4 Conclusion

L'analyse des propriétés électriques des systèmes de mise à la terre se fait principalement à travers la résistance du système de terre et de la résistivité du sol où le système est enfoui. En fait, la résistance de terre dépend non seulement de la configuration du système de terre (électrode verticale, électrode horizontale, grille, réseau maillé, etc.), mais également du type de sol (homogène ou hétérogène autrement dit constitué d'une seule couche ou stratifié). Cette résistance peut être calculée ou mesurée. En effet, plusieurs modèles de calcul de la résistance de terre aussi bien empiriques qu'analytiques ont été rapportés dans la littérature. Certains d'entre eux se sont penchés sur la modélisation d'un sol multicouche par sol homogène. Une telle modélisation est conditionnée par une approximation valide de résistivité équivalente pour un sol stratifié. Par ailleurs, diverses méthodes de mesure existent dont les plus célèbres sont : la méthode de Wenner, la méthode de Schlumberger et la méthode à trois piquets (ou de 62%).

Le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre est incontournable. Ce comportement est modélisé par une impédance contenant des résistances, inductances et capacités. Pour cela, plusieurs approches numériques ont été fondées. Les plus populaires sont l'approche des circuits, l'approche électromagnétique (méthode des moments, méthode des différences finies et la méthode des éléments finis) et enfin l'approche des lignes de transmission.

Chapitre 3

Simulation d'une Électrode Horizontale enfouie dans un Sol Homogène

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation du comportement transitoire d'un système de mise à la terre d'une topologie simple ; il s'agit d'une tige horizontale. Pour cela, nous avons utilisé l'approche des lignes de transmission.

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, celui capacitif entre l'électrode et le sol, ainsi que l'ionisation du sol. Afin de valider nos programmes, élaborés sous environnement MATLAB, nous comparons les résultats que nous avons obtenus à ceux trouvés par d'autres chercheurs [11].

3.2 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 [8].

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 [8] :

- La distance de séparation entre les deux conducteurs et le rayon des fils doivent être petits devant la longueur d'onde ;

1. par rapport à la longueur d'onde

- Les paramètres distribués de la ligne de transmission demeurent constants ;
- Un segment de longueur Δz tend vers dz .

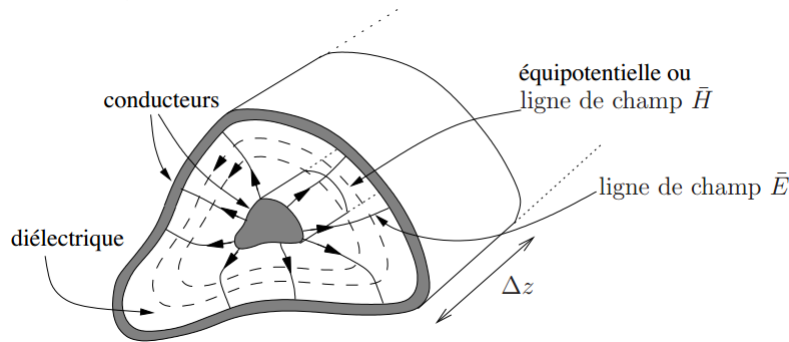


FIGURE 3.1: Représentation d'une coupe de ligne de transmission de section quelconque [8]

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 [8].

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 [8] :

- 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 .

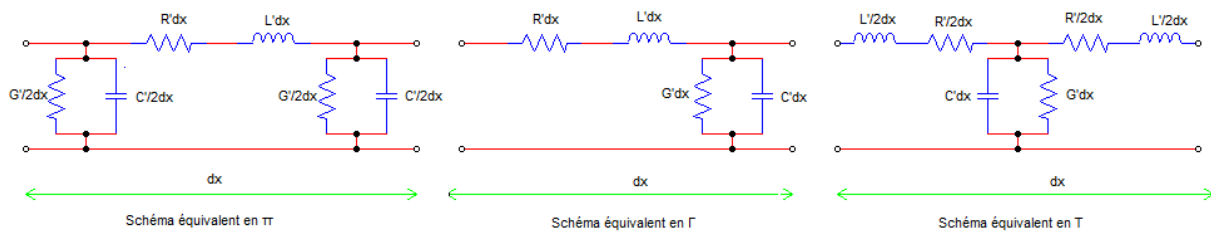


FIGURE 3.2: Différentes représentations d'un segment de ligne de transmission

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.

3.3 Équations d'État d'un Système Physique

La plupart des systèmes physiques peuvent être décrits comme étant des opérateurs faisant correspondre des réponses à des sollicitations. Ainsi, un système électrique peut être étudié et caractérisé en exprimant une grandeur de sortie (réponse) en fonction d'une grandeur d'entrée (sollicitation).

Les différentes approches pour l'analyse des systèmes physiques sont la représentation par la fonction de transfert ou par la représentation d'état [87]. Pour simplifier le modèle adapté, une tendance habituelle consiste à regrouper toutes les équations en une seule. Il s'agit d'éliminer toutes les grandeurs internes du système qui ne sont ni des entrées, ni des sorties. On obtient alors une équation différentielle ne faisant apparaître que l'entrée u , la sortie y et, éventuellement, leurs dérivées. Une telle équation a la forme suivante :

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \dot{u}(t) + b_0 u(t) \quad (3.1)$$

Physiquement, il est inconcevable que m soit strictement supérieur à n . On peut toujours imaginer un modèle mathématique correspondant à ce cas mais en pratique, cela signifie que la sortie du système, à un instant donné, dépend de la valeur de l'entrée à un instant ultérieur d'où on suppose que $m \leq n$. Un tel système est dit causal [87].

En outre, il est clair que des valeurs élevées de m et n rendent la détermination analytique de l'expression du signal de sortie $y(t)$ plus compliqué. De plus, il est fastidieux, sinon impossible, de résoudre une équation différentielle d'ordre élevé. D'une autre part, un nouveau outil de modélisation, plus aisée à manipuler, est introduit. Il s'agit de la fonction de transfert.

La fonction de transfert est un modèle de comportement entrée-sortie qui s'obtient à partir de l'équation différentielle linéaire à coefficients constants. Au lieu de chercher à obtenir $y(t)$ en fonction de $u(t)$, on cherche à obtenir $Y(p) = \mathcal{L}(y(t))$ en fonction de $U(p) = \mathcal{L}(u(t))$. Comme il s'agit de déterminer un modèle qui soit indépendant des conditions initiales, ces dernières sont considérées nulles. On applique tout simplement la transformée de Laplace à l'équation différentielle (3.1), ce qui conduit à l'expression suivante :

$$\frac{Y(p)}{U(p)} = G(p) = \frac{N(p)}{D(p)} \quad (3.2)$$

$$\frac{N(p)}{D(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \quad (3.3)$$

où $G(p)$ est une fraction rationnelle dépend de l'opérateur de Laplace (p), de numérateur $N(p)$ et de dénominateur $D(p)$. Elle est appelée fonction de transfert et se révèle très utile pour l'étude des systèmes linéaires mono-variables.

Devant la complexité des systèmes physiques, la fonction de transfert ne peut pas être le modèle le plus approprié pour décrire les comportements considérés. La recherche de performances plus fines peut conduire à la même conclusion. D'autres modèles sont utilisés et apparaissent comme une alternative à la fonction de transfert. Le plus célèbre d'entre eux est la représentation d'état ou encore modèle d'état.

3.3.1 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 (3.4)

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + \cdots + a_{1n}x_n(t) + b_{11}u_1(t) + \cdots + b_{1m}u_m(t) \\ \dot{x}_2(t) = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + \cdots + a_{2n}x_n(t) + b_{21}u_1(t) + \cdots + b_{2m}u_m(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) = a_{n1}x_1(t) + a_{n2}x_2(t) + \cdots + a_{nn}x_n(t) + b_{n1}u_1(t) + \cdots + b_{nm}u_m(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

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

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) + DU(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

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

3.3.2 Schéma-bloc d'une représentation d'état

Ce schéma n'est qu'une autre représentation graphique des équations d'état. Une telle représentation nous permet de tirer la fonction de transfert du système. Le schéma de la figure (3.3) représente le schéma-bloc d'un système quelconque défini par les équations (3.5).

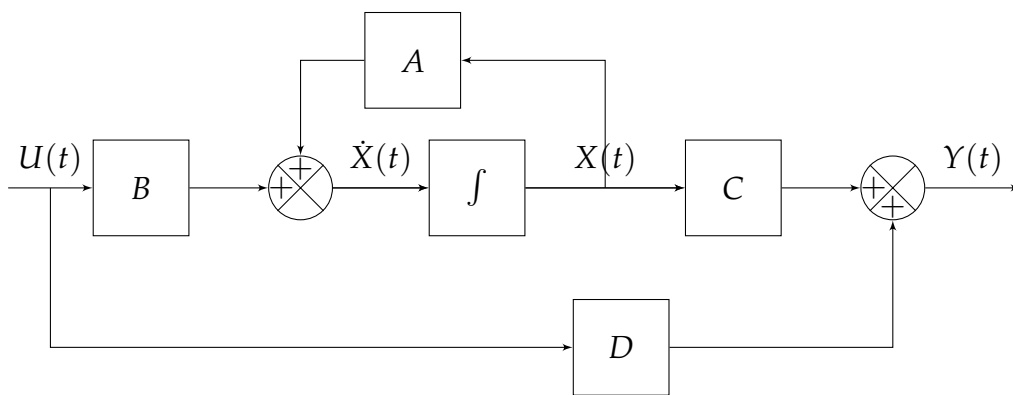


FIGURE 3.3: Schéma block d'une représentation d'état

3.3.3 Résolution des équations d'état

La solution des équations d'état permet de calculer la valeur de chaque état à tout moment, c'est donc la réponse du système dans le domaine temporelle. Il est clair que nous aurons également à calculer $X(t)$. Cette solution obéit à la solution classique des équations différentielles, dans un contexte multi-variable.

A partir de la matrice de transition $[A]$, il est possible de déterminer la solution de l'équation dynamique d'état qui correspond à la réponse complète du système par application du principe de superposition ; c'est-à-dire la somme de la réponse libre et la réponse forcée.

Il existe des nombreuses manières pour résoudre une équation différentielle. Actuellement, la technique de Runge Kutta d'ordre 4 et à pas adaptatif est souvent utilisée. Nous verrons les raisons de ce choix. Néanmoins, les recherches dans ce domaine ne sont pas encore arrêtées et le développement des techniques numériques continues, surtout pour les situations où une très grande précision est demandée.

Remarquons qu'une solution formelle de l'équation d'état est donnée par [87] :

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, x(s)) ds \quad (3.6)$$

où $x_0 = x(t_0)$.

Le problème avec cette solution formelle est que l'inconnue $x(t)$ donnée sous forme d'intégrale.

3.3.3.1 Méthode itérative de Picard

Dans la méthode de Picard [87], on peut itérer l'équation (3.6) afin de générer une série d'approximations à $x(t)$, dénotées $x_1(s)$, $x_2(s)$, \dots , $x_k(s)$. On initialise l'itération en prenant $x(t) \simeq x_0$ sous la forme intégrale :

$$\begin{cases} x_1(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, x_0) ds \\ x_2(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, x_1(s)) ds \\ \vdots \\ x_k(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, x_{k-1}(s)) ds \end{cases} \quad (3.7)$$

La méthode de Picard est surtout utilisée dans les études mathématiques des équations différentielles. Néanmoins, cette méthode peut s'avérer intéressante quand il est possible de faire l'intégration analytique de la suite $\int_{t_0}^t f(s, x_k(s)) ds$. Les logiciels de calcul symbolique comme Mathematica et Maple sont capables de calculer ce type d'intégrale.

3.3.3.2 Méthodes basées sur la série de Taylor

Les méthodes basées sur la série de Taylor [87] se prêtent bien à des traitements numériques. Commençons par subdiviser l'intervalle $[t_0, t_0 + T]$ en N sous intervalles de même longueur h et appelons t_n les points de subdivisions. Nous avons donc :

$$\Delta t = \frac{T}{N} \quad \text{et} \quad t_i = t_0 + i \cdot \Delta t \quad \text{pour } i = 0 : N$$

Le développement de la série de Taylor de $x(t_{i+1})$ jusqu'à l'ordre m autour du point t_i s'écrit :

$$x(t_{i+1}) = x(t_i) + \sum_{j=1}^m \frac{(\Delta t)^j}{j!} x^{(j)}(t_i) + O((\Delta t)^{m+1}) \quad (3.8)$$

Il est à noter que si on arrête la série de Taylor à l'ordre 1 on tombe sur la méthode d'Euler.

3.3.3.3 Runge Kutta

La méthode Runge Kutta tire les avantages des méthodes de Taylor tout en gardant une simplicité d'exécution de la méthode d'Euler. En pratique, Runge Kutta remplace l'évaluation analytique des ordres $x(m)$, $m > 1$ par des dérivées numériques obtenues en évaluant la fonction $f(t, x(t))$ à différents endroits afin d'obtenir presque les mêmes résultats que ceux obtenu avec la méthode de Taylor [87].

Il existe cette méthode pour différents ordre :(i) Runge Kutta d'ordre 2 (ii) Runge Kutta d'ordre 3 et 4 et (iii) Runge Kutta à pas adaptatif [87].

3.4 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) [10].

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 [10].

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.

3.4.1 Impulsion du courant

L'étude du comportement transitoire du système de mise à la terre correspond, en général, aux phénomènes électromagnétiques transitoires (tels que la foudre). De tels phénomènes impliquent une gamme de fréquence de quelques kHz à quelques MHz [41].

Le phénomène de la foudre correspond à une source de courant impulsionnelle comme nous l'avons signalé dans le chapitre 1. Les modèles de signaux sont des représentations mathématiques qui reposent fréquemment sur des hypothèses simplificatrices. Ces dernières, de nature forcément idéalisée, sont à corriger lorsqu'il s'agit d'une forme d'onde réelle déformée. Néanmoins, de telles hypothèses permettent de faciliter les calculs analytiques.

3.4.1.1 Représentation mathématique du Courant de foudre

Pour représenter le courant à la base du canal de foudre, plusieurs modèles analytiques ont été développés. Nous citons entre autres :

- La représentation recommandée par le CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques)[88];
- La représentation analytique de Cooray et al.[88];
- La représentation analytique de Delfino et al. [36];
- La représentation analytique de Diendorfer et Uman [34];

Les plus souvent utilisées sont : la fonction bi-exponentielle et la fonction de Heidler [22, 88].

L'expression bi-exponentielle représente une meilleure approximation du courant de foudre. Elle est donnée par la formule suivante [22] :

$$i(t) = I_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \quad (3.9)$$

où I_0 représente la valeur crête du courant, α est l'inverse de la constante de temps de descente et β est l'inverse de la constante de temps de montée.

La forme analytique du courant de Heidler [33] est donnée par l'expression suivante :

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{K_s^n}{1 + K_s^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.10)$$

$$K_s = \frac{t}{\tau_1} \quad (3.11)$$

avec :

- I_p est la valeur crête du courant,
- η est le facteur de corrélation de la valeur crête du courant,
- n est le facteur de raideur du courant (généralement ~ 10),
- τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps qui définissent le temps du front et le temps de la queue de l'onde du courant.

Il est à noter que cette expression de courant est très utilisée par la Commission Internationale d'Électrotechnique (CEI).

3.4.2 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 [40, 41]. 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 :

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \quad (3.12)$$

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 [41]. L'équation (3.12) 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 [22].

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 [22], 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. [11], 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. :

$$\left\{ \begin{array}{l} R' = \rho_e \frac{4\Delta l}{\pi d^2} \\ L' = \frac{\mu \Delta l}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \ln\left(\frac{l}{2h}\right) \right\} \\ G' = \frac{\Delta l}{\rho_g \left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \ln\left(\frac{l}{2h}\right) \right]} \\ C' = 2\pi\epsilon \frac{\Delta l}{\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \ln\left(\frac{l}{2h}\right)} \end{array} \right. \quad (3.13)$$

La validité de ces expressions est conditionnée par la vérification des hypothèses suivantes : $2r \ll 4l$ et $4h \ll l$ [11].

3.4.3 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.

3.4.3.1 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.3.4).

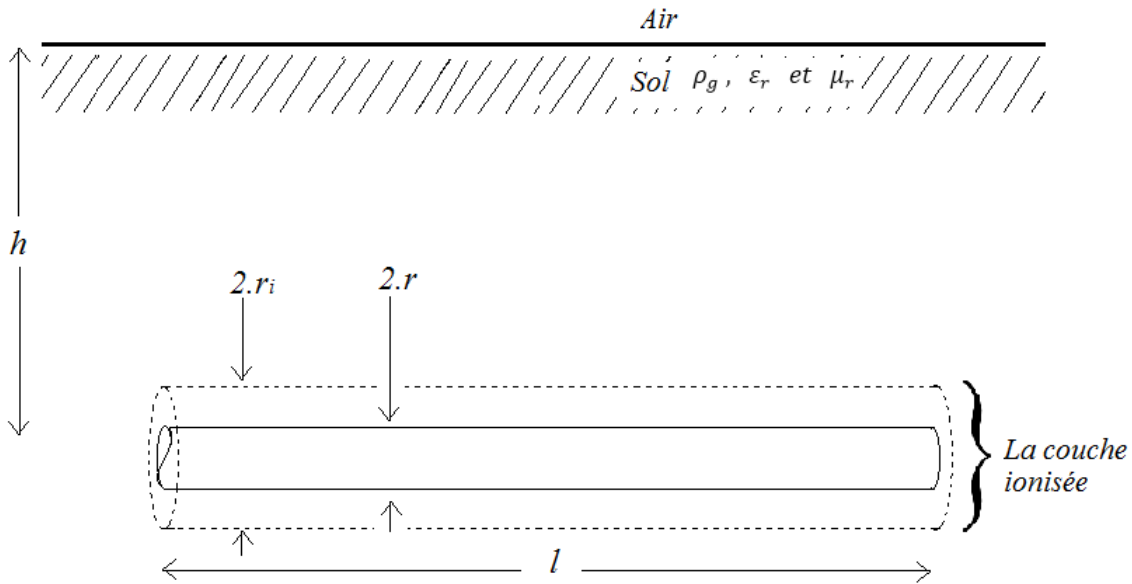


FIGURE 3.4: Représentation de la couche ionisée pour un champ uniforme

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 [89] :

$$\begin{cases} J = \frac{E}{\rho_g} = \frac{\Delta I}{2\pi r \Delta l} \\ r_i = r \frac{E}{E_{CR}} \end{cases} \quad (3.14)$$

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 [37] a proposé la formule suivante :

$$E_{CR} = 241.\rho^{0,215} \text{ kV/cm} \quad (3.15)$$

□ 2^{ème} **expression** : Une deuxième formulation a été donnée par Manna [88] :

$$E_{CR} = 843.\rho^{0,124} \text{ kV/cm} \quad (3.16)$$

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 [88] :

$$E_{CR} = \frac{V_{th}}{r_{ion} \cdot \ln\left(\frac{r_{out}}{r_{ion}}\right)} \text{ kV/cm} \quad (3.17)$$

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 (3.5) 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.

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.

3.4.3.2 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

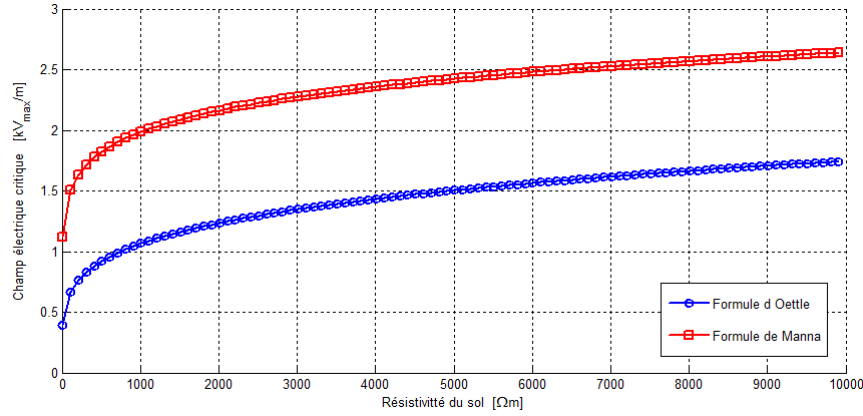


FIGURE 3.5: Variation du champ électrique critique en fonction de la résistivité du sol selon les formules d'Oettle et de Manna

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 [9] :

$$M = \int_{c1} \int_{c2} \frac{ds_1 \cdot ds_2}{r_{12}} \quad (3.18)$$

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 [71, 90] :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \alpha \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\alpha}{D}\right) - \beta \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\beta}{D}\right) - \gamma \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\gamma}{D}\right) + \delta \cdot \operatorname{asinh}\left(\frac{\delta}{D}\right) - \sqrt{\alpha^2 + D^2} + \sqrt{\beta^2 + D^2} + \sqrt{\gamma^2 + D^2} - \sqrt{\delta^2 + D^2} \right\} \quad (3.19)$$

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 (3.6).

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

$$M = 0.23 \{ \alpha \log(\alpha) - \beta \log(\beta) - \gamma \log(\gamma) + \delta \log(\delta) \} \quad (3.20)$$

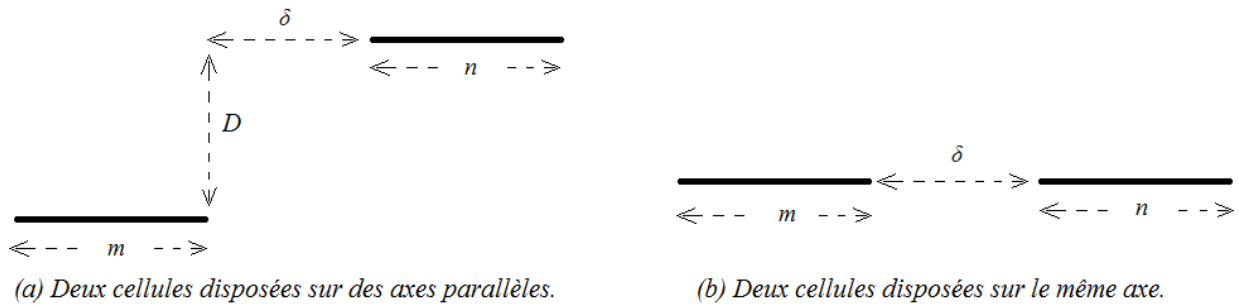


FIGURE 3.6: Couplage mutuel entre deux cellules [9]

3.5 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. [11] utilisant le code de calcul EMTP (Electromagnetic Transient Program) et GSSP (Grounding System Simulation Program).

L'électrode d'étude est représentée sur la figure (3.7). 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.

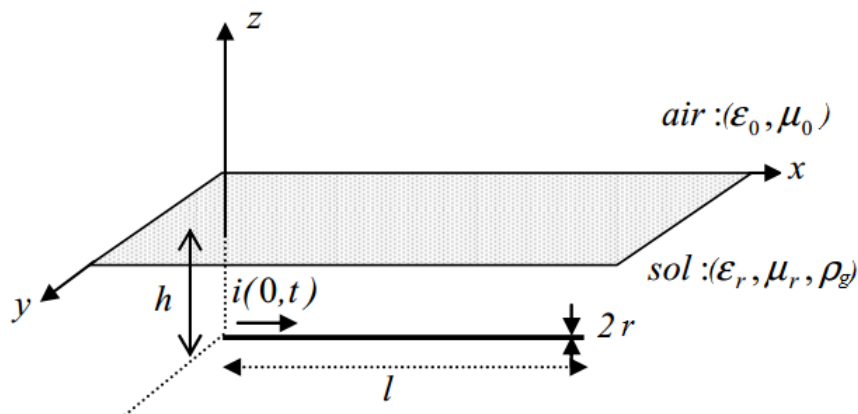


FIGURE 3.7: Représentation d'une électrode enterrée horizontalement [10]

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.3.13) 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 (3.8) illustre les étapes de calcul en absence 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 (3.14). 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 (3.14) et (3.13) 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.

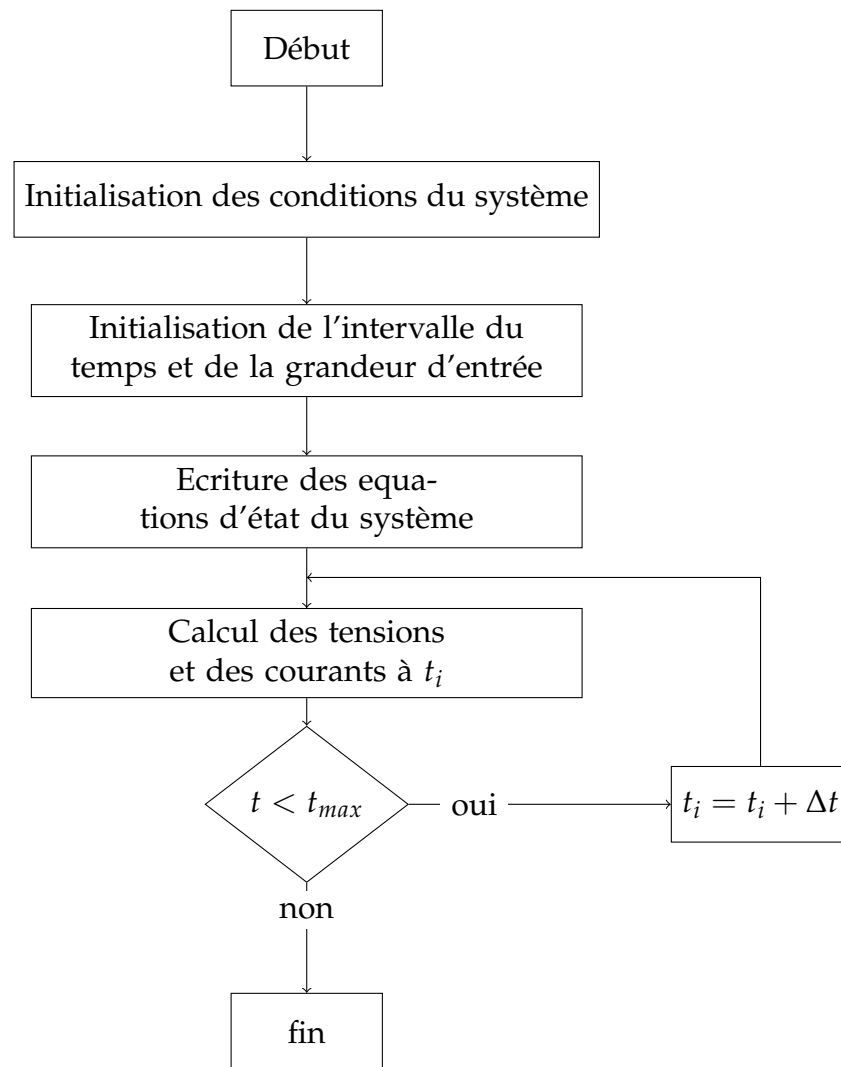


FIGURE 3.8: Algorithme de calcul sans tenir compte de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

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. 3.19 et 3.20) dans les équations différentielles décrivant le système en entier.

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 ;

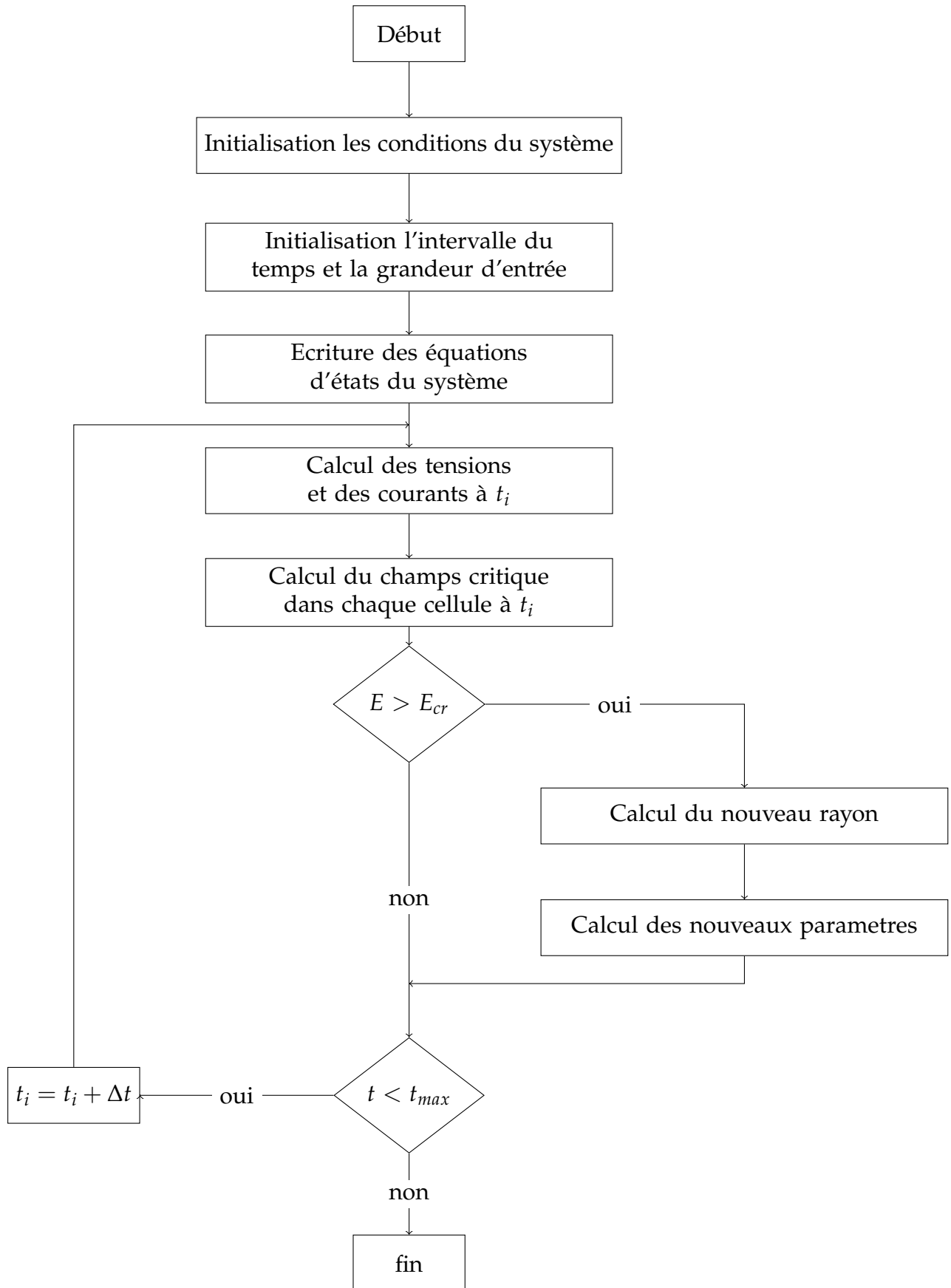


FIGURE 3.9: Algorithme de calcul en tenant compte d'ionisation du sol

- 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.

3.6 Résultats et Discussion

3.6.1 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 (4.2), nos résultats à ceux trouvés (expérimentalement et par simulation) par Cattaneo et al.[11].

TABLE 3.1: Conditions du test (1) [11]

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

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 $\rho_g = 20 \Omega\text{m}$, de permittivité relative $\epsilon_r = 80$ et perméabilité relative unitaire.

3.6.1.1 Présence du couplage capacitif

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

La figure (3.10) 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.

[11]. 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 (3.11) présentant la répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps.

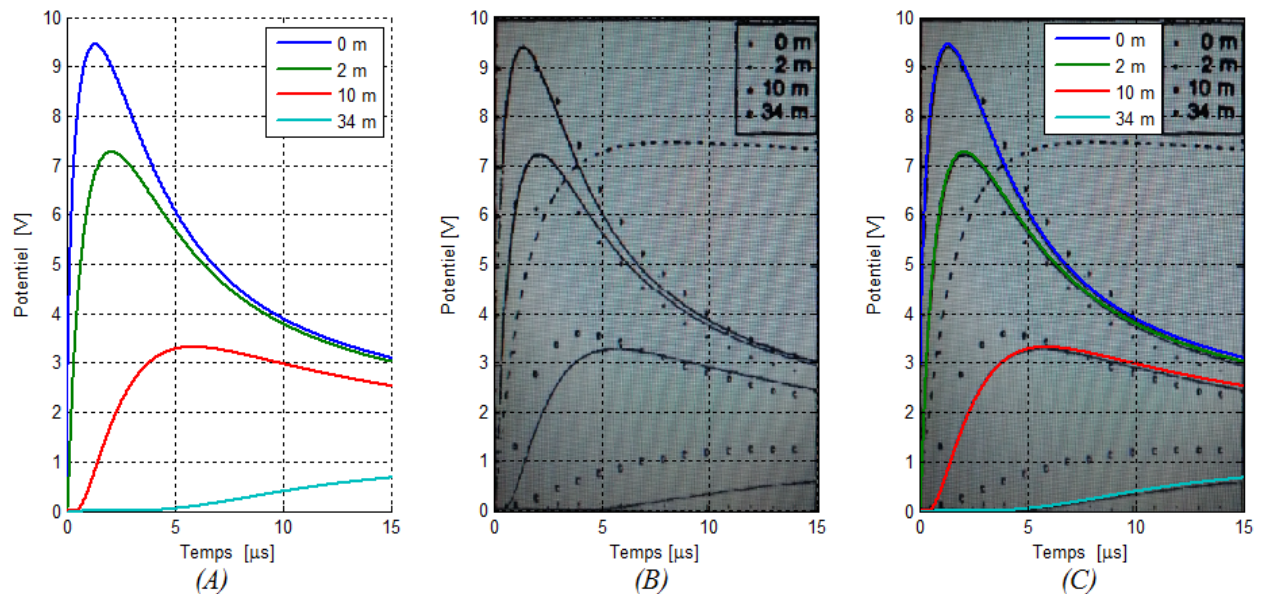


FIGURE 3.10: Évolution de potentiel en différents points, (A) nos résultats, (B) résultats de Cattaneo et (C) superposition de nos résultats et ceux Cattaneo et al. [11] (en noire)

D'après la figure (3.10), nous constatons que nos résultats coïncident parfaitement avec ceux numériques de Cattaneo et al. [11], 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 (3.11) 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 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.

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 cités précédemment. Dans ce cas, nous avons obtenus exactement les mêmes résultats présentés précédemment (Fig.3.10A), ceci est au fait que le courant de faible amplitude n'engendre pas le phénomène de l'ionisation du sol. Algorithmiquement parlons, la

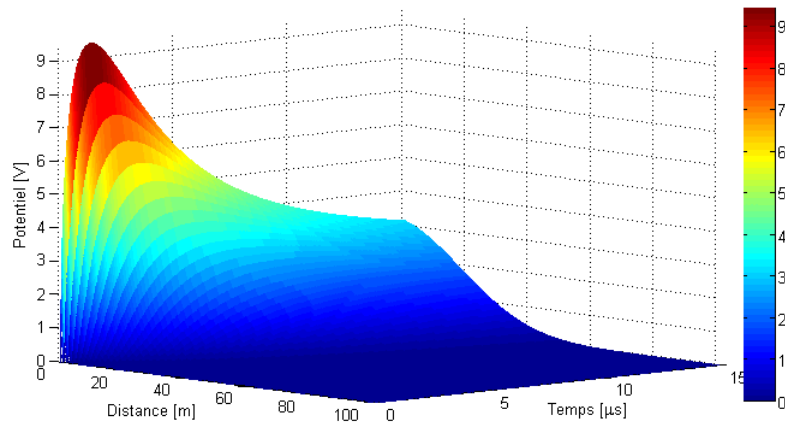


FIGURE 3.11: Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

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 (3.20) de Grover. Nous introduisons, dans les équations d'état du système, les paramètres régissant les effets mutuels entre tous les segments. La figure (3.12) illustre l'évolution du potentiel en différents points de l'électrode, en présence des couplages mutuel et capacitif.

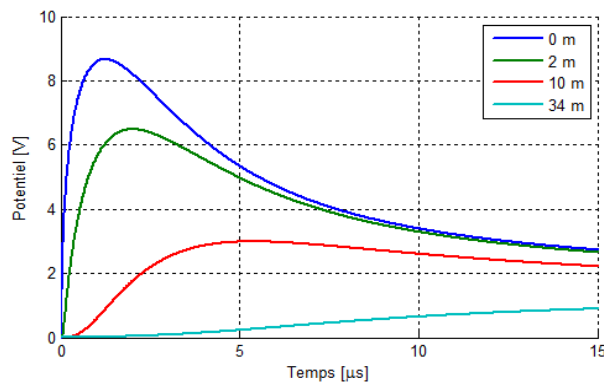


FIGURE 3.12: Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement obtenus en considérant le phénomène de couplage

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 (3.10A), nous avons enregistré une diminution de l'amplitude de l'ordre de 5%.

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

La figure (3.13) 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.

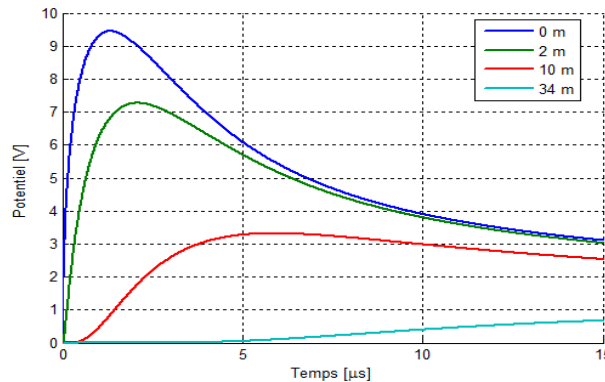


FIGURE 3.13: Évolution du potentiel en absence des couplages et de phénomène d'ionisation du sol

En comparant cette figure à celle (3.10A), 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.

3.6.2 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 $2,5 \text{ kA}$. Afin de valider nos algorithmes, nous comparons nos résultats à ceux déjà trouvés (expérimentaux et par simulation) par Cattaneo et al. [11]. Pour cela, nous nous mettons dans les mêmes conditions du test récapitulées dans la table (3.2) et considérées par ces mêmes auteurs.

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 $\rho_g = 100 \text{ } \Omega\text{m}$, une permittivité relative $\epsilon_r = 10$ et une perméabilité relative choisie égale à l'unité.

TABLE 3.2: Conditions du test (2) [11]

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

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

La figure (3.14) présente la variation du potentiel en différents points de l'électrode ; la figure (3.14A) illustre nos résultats et celle (3.14B) concerne les résultats de Cattaneo et al. [11] 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 (3.14C), nos caractéristiques et celles de Cattaneo et al. (placées en arrière-plan).

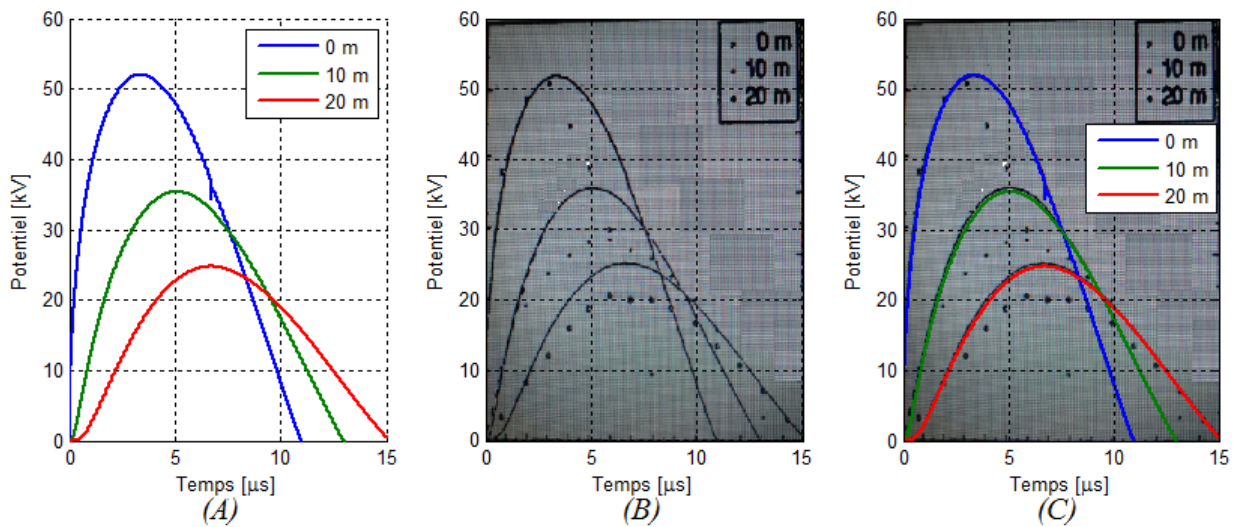


FIGURE 3.14: Évolution du potentiel en différents points, (A) nos résultats, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats et ceux de Cattaneo (en noire continu)

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. [11]. Pour les différents points ainsi adoptés ($x=0, 10, 20 \text{ m}$), 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 (3.15) 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.

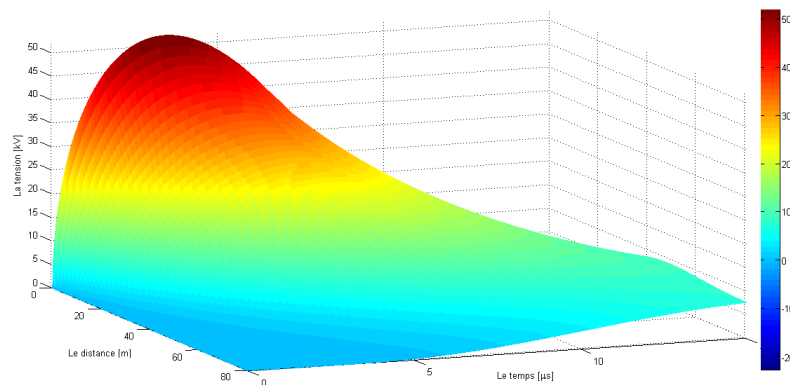


FIGURE 3.15: Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

3.6.2.2 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 (3.16A) et (3.16B) respectivement. Les résultats précédents ont été reproduits sur la figure (3.16C) ; ceci nous permet de faire une étude comparative.

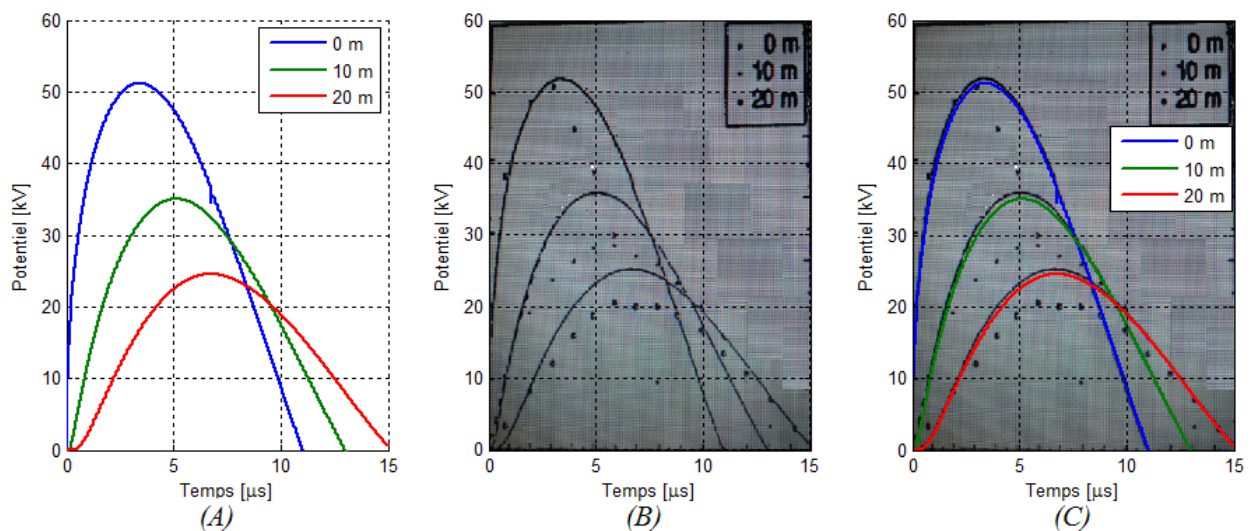


FIGURE 3.16: Évolution du potentiel en différents points, (A) nos résultats en considérant le phénomène d'ionisation du sol, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats (en couleur) et ceux de Cattaneo (en noir pointillé)

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.

3.6.2.3 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 (3.17A). L'objectif principal de cette simulation est de comparer nos résultats à ceux trouvés expérimentalement et numériquement par Cattaneo et al. (Fig.3.17B). La figure (3.17C) représente une superposition (combinaison) des deux figures précédentes.

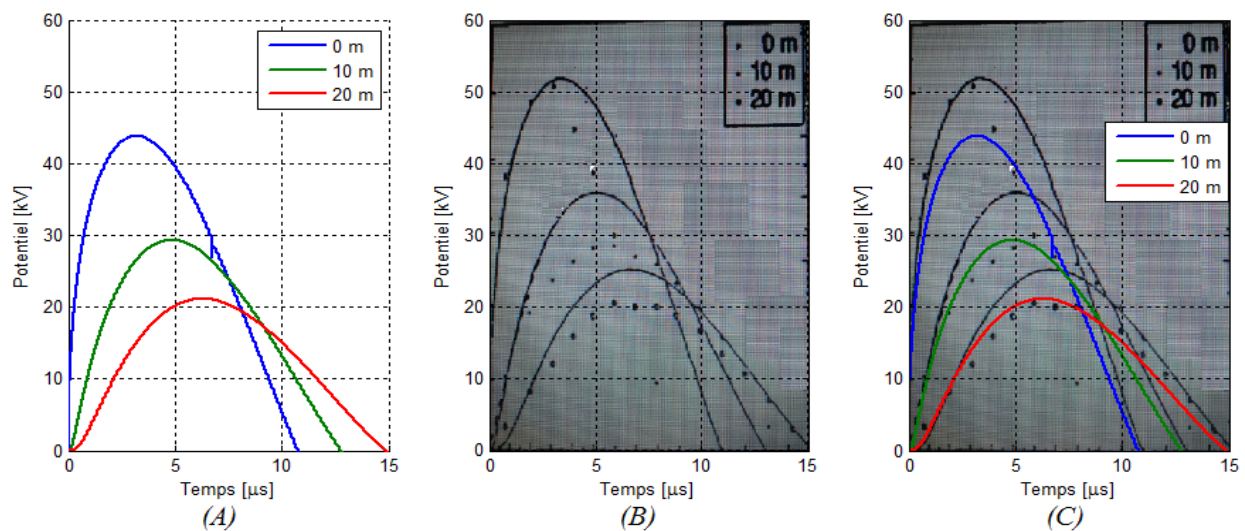


FIGURE 3.17: Évolution du potentiel en différents points, (A) nos résultats en considérant le phénomène du couplage mutuel, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats (en couleur) et ceux de Cattaneo et al. (en noir pointillé)

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

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

La figure (3.18A) 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 (3.18B) 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.

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

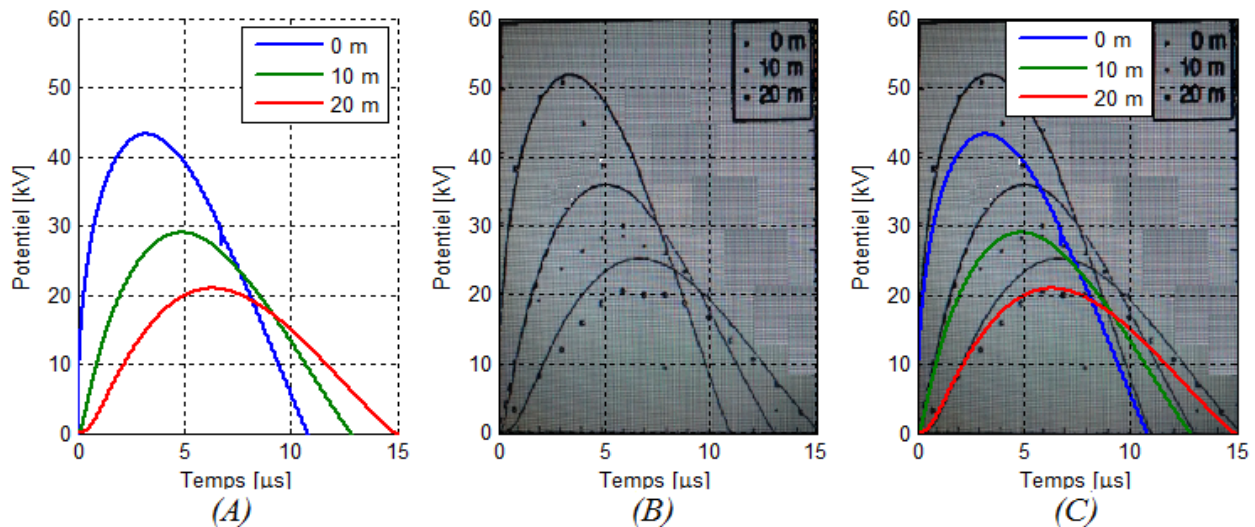


FIGURE 3.18: Évolution du potentiel en différents points, (A) nos résultats en considérant les deux phénomènes à la fois ; du couplage mutuel et l'ionisation du sol, (B) résultats de Cattaneo et al. et (C) superposition de nos résultats (en couleur) et ceux de Cattaneo et al. (en noire pointillé)

3.6.3 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 [18]. Il est caractérisé par une faible résistivité $\rho_g = 10 \Omega m$. Le deuxième, de type rocheux [18], 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 (3.3).

3.6.3.1 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

TABLE 3.3: Conditions du test (3) [11]

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

courant similaire à la décharge atmosphérique. Cette décharge est caractérisée par une amplitude comprise entre 50 et 100 kA.

La figure (3.19A) 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 (3.19B). 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. [11]. Il est important de noter que pour ce type de sol, la forme impulsionnelle de l'onde de potentiel a été conservée.

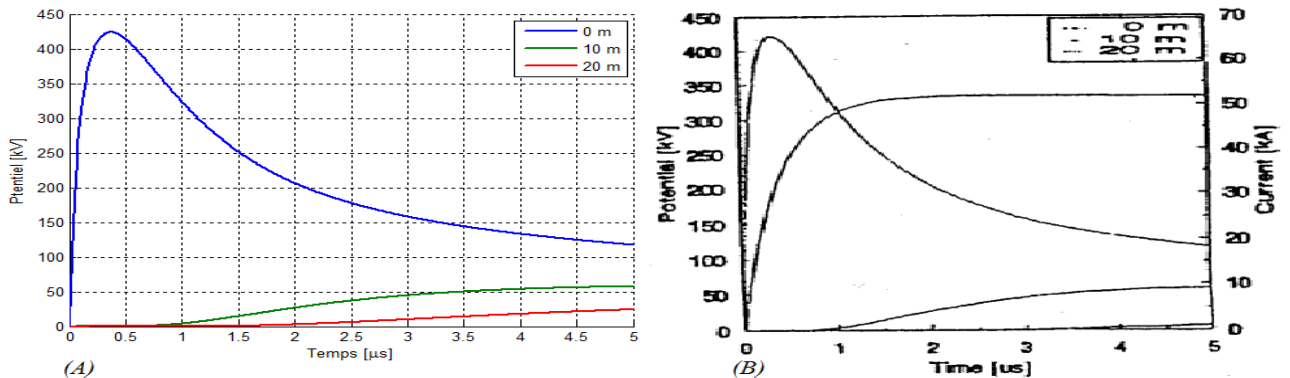


FIGURE 3.19: Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol de $\rho_g = 10\Omega\text{m}$ (A) nos résultats et (B) résultats de Cattaneo et al.

La figure (3.20) 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.

De même que précédemment, nous nous sommes intéressés à l'évolution du potentiel le long de l'électrode sur un intervalle de temps de $5 \text{ } \mu\text{s}$, pour une résistivité du sol $\rho_g = 10000 \text{ } \Omega\text{m}$, 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 (3.21A). En outre, la figure (3.21B) illustre la réponse transitoire obtenue numériquement par Cattaneo et al. [11]. Les différents points choisis pour la détermination du potentiel sont : $x=0, 10$ et 20 m . Une parfaite

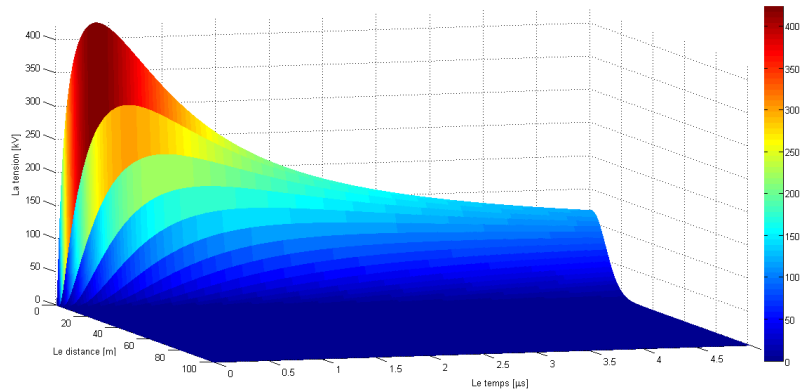


FIGURE 3.20: Répartition du potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

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 (3.21) 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.

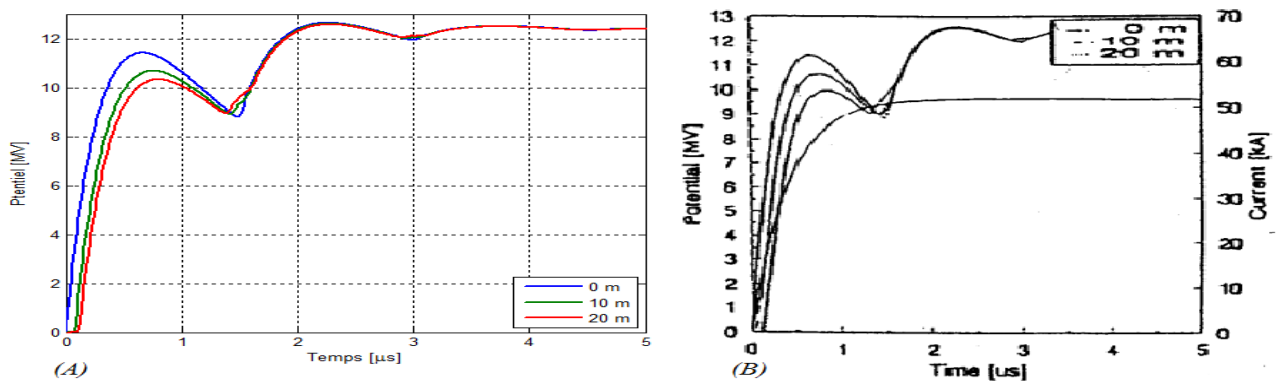


FIGURE 3.21: Évolution de potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement en fonction du temps

La figure (3.22), 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.3.20).

3.6.3.2 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 (3.23A) 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 (3.19A). 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

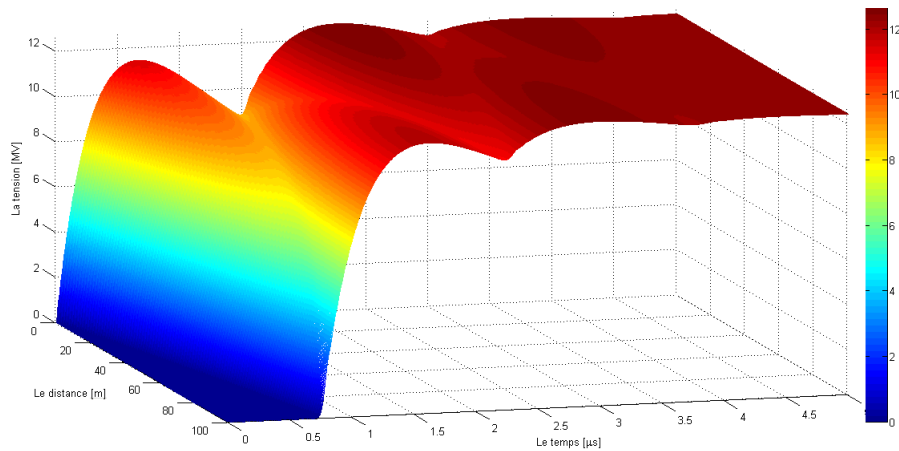


FIGURE 3.22: Répartition de potentiel le long de l'électrode en fonction du temps

coïncident parfaitement avec ceux obtenus par Cattaneo et al. (Fig.3.19B) en utilisant les codes de calcul EMTP et GSSP. Ainsi, notre algorithme élaboré selon l'organigramme (3.9) est valide.

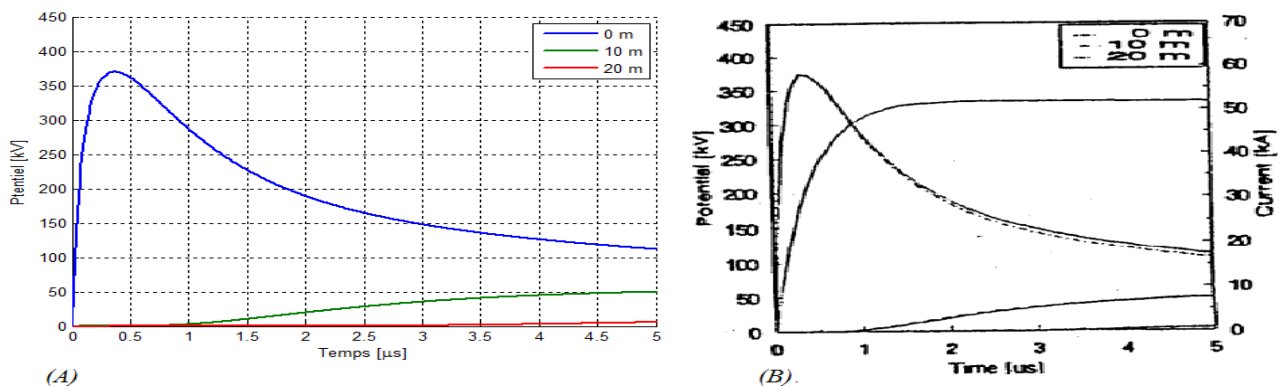


FIGURE 3.23: Évolution du potentiel en différents points (résistivité $\rho_g = 10 \Omega m$) considérant l'ionisation du sol (A) nos résultats et (B) résultats obtenus par Cattaneo et al.

Pour un sol fortement résistif, la figure (3.24) 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.

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 (3.25), 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%.

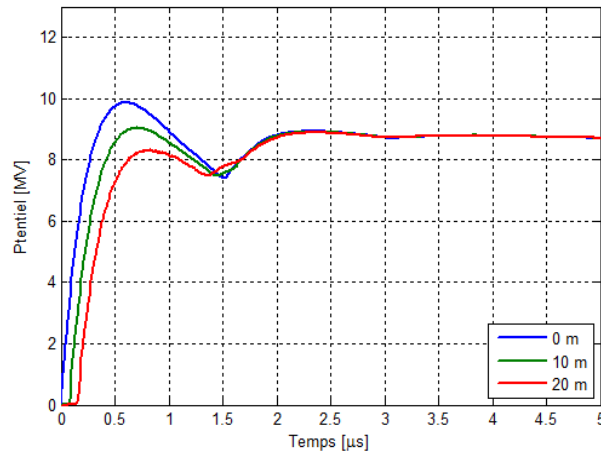


FIGURE 3.24: Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement dans un sol ionisé de résistivité $\rho_g = 10000 \Omega m$

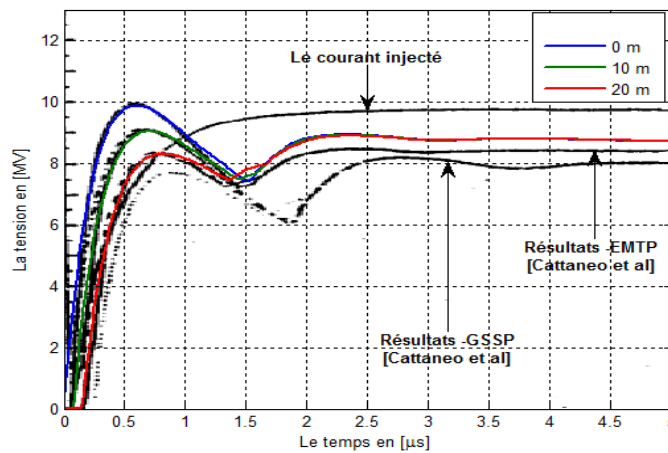


FIGURE 3.25: Comparaison entre nos résultats et ceux de Cattaneo et al. trouvés à l'aide des codes EMTP et GSSP

3.6.3.3 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 (3.26), 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 (3.19). À l'exception de cette diminution, l'allure du potentiel est conservée ; la forme étant impulsive.

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.3.27) 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.

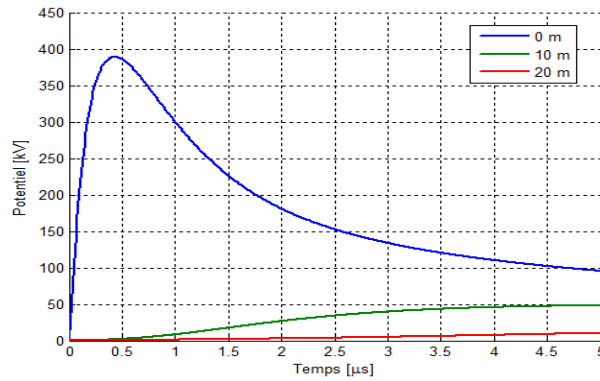


FIGURE 3.26: Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement en considérant le couplage entre segments

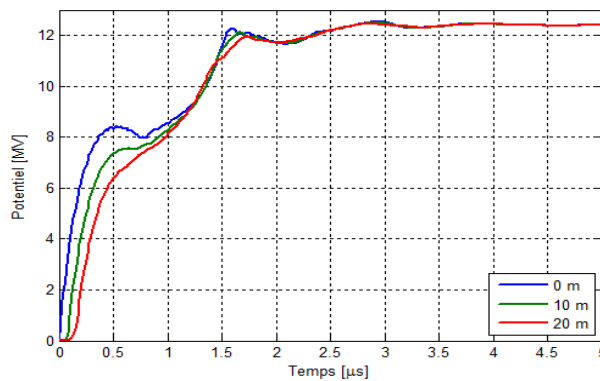


FIGURE 3.27: Évolution du potentiel en différents points de l'électrode enterrée horizontalement en considérant le couplage inter-segments

3.6.3.4 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 (3.28A) et (3.28B). 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.

En comparant ces deux figures à celles respectives (Fig.3.19 et Fig.3.21) 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 $1,25 \mu s$.

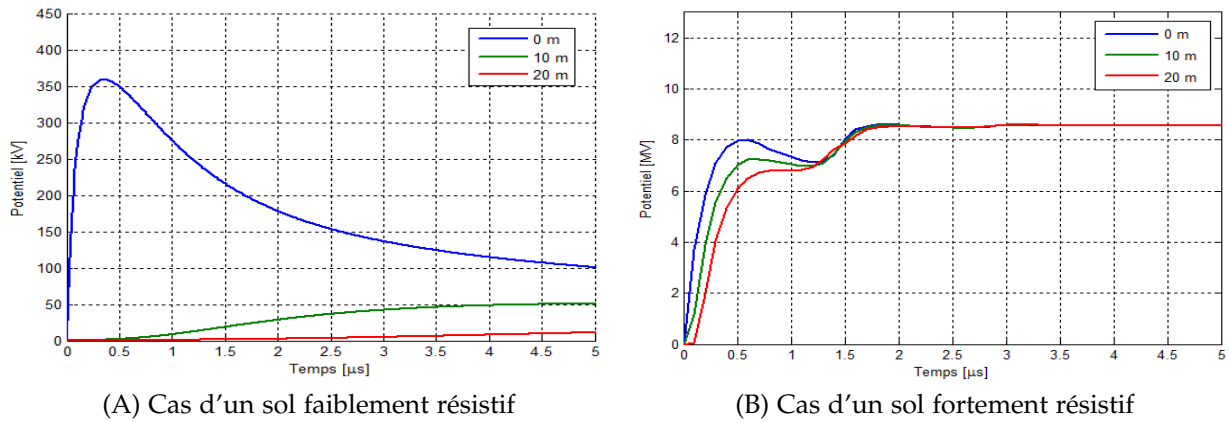


FIGURE 3.28: Évolution du potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement considérant l'ionisation du sol et le couplage mutuel inter-segments

3.6.3.5 Réponse transitoire du système en négligeant le couplage capacitif sol-électrode

En ignorant le couplage capacitif entre électrode-sol, l'ionisation du sol et le couplage mutuel, nous avons enregistré la variation du potentiel le long de l'électrode en question durant $5 \mu s$, et ce pour les deux types de sol argileux (de $\rho_g = 10 \Omega m$) et rocheux (de $\rho_g = 10000 \Omega m$).

La réponse transitoire obtenue dans le cas d'un sol argileux caractérisé par une faible résistivité, est montrée sur la figure (3.29). Ces résultats sont identiques à ceux trouvés en considérant le couplage capacitif et en ignorant les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel (Fig.3.19). Ainsi le couplage capacitif n'a pas d'effet sur la réponse transitoire de l'électrode, lorsque celle-ci est enterrée dans un sol faiblement résistif.

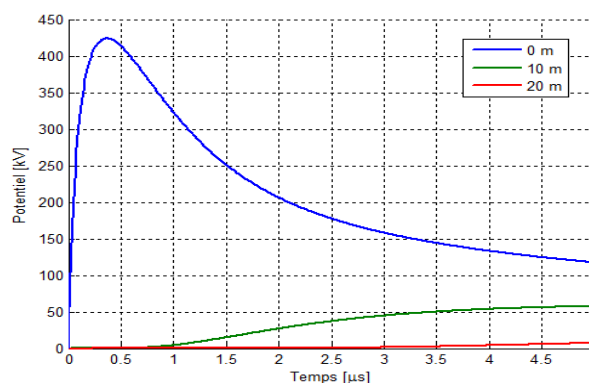


FIGURE 3.29: Évolution de potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol faiblement résistif en négligeant le couplage capacitif

Pour ce qui est du sol fortement résistif, la figure (3.30) montre que la réponse transitoire est faiblement oscillatoire pour le potentiel d'entrée (donc en $x=0$), car elle met en évidence un seul et unique dépassement. La réponse correspondante est similaire de la réponse indicielle du 2^{ème} ordre avec un coefficient d'amortissement ζ de 0,8. Les réponses en $x=10$ et 20 m, sont amorties (pas de dépassements) avec un coefficient d'amortissement supérieurs à 1.

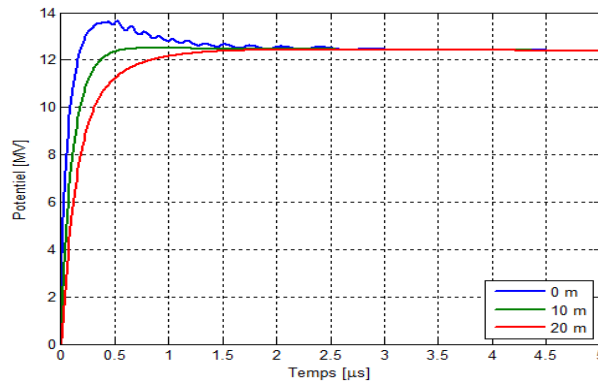


FIGURE 3.30: Évolution de potentiel en différents points d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol fortement résistif en négligeant la capacité

3.7 Conclusion

Il ressort de ce chapitre les principales conclusions suivantes :

1. Pour le test 1 - impulsion du courant d'expression bi-exponentielle et de faible amplitude :
 - (a) La réponse transitoire n'est pas affectée par le couplage capacif.
 - (b) Le phénomène d'ionisation n'a pas été généré.
 - (c) L'onde de potentiel est impulsionnelle fortement amortie.
 - (d) Le couplage inter-segments diminue légèrement l'amplitude de l'onde de potentiel.
 - (e) Nos résultats coïncident parfaitement avec ceux numériques de Cattaneo et al.
2. Pour le test 2 - impulsion du courant d'expression bi-exponentielle ou sinusoïdale de forte amplitude :
 - (a) Le potentiel possède une allure impulsionnelle amortie.
 - (b) En considérant l'ionisation du sol, une très légère diminution de l'amplitude a été obtenue. Nos résultats concordent parfaitement avec ceux numériques de Cattaneo et al.
 - (c) En présence du couplage mutuel inter segments, une diminution de l'amplitude a été enregistrée. Dans ces conditions, nos résultats concordent parfaitement avec ceux expérimentaux de Cattaneo et al.
3. Pour le test 3 - impulsion du courant d'expression bi-exponentielle de très forte amplitude :
 - (a) Sol faiblement résistif :
 - i. L'impulsion de l'onde de potentiel est conservée. Cependant, elle est fortement amortie.
 - ii. Le couplage capacif n'a pas d'impact sur le potentiel.
 - iii. L'ionisation et le couplage mutuel engendrent une diminution de l'amplitude de cette onde.
 - iv. Nos résultats sont très similaires à ceux numériques de Cattaneo et al.

- (b) Sol fortement résistif :
- i. Nous avons constaté l'apparition des ondulations sur l'onde impulsionnelle de potentiel.
 - ii. L'ionisation diminue l'amplitude des ces ondulations.
 - iii. Le couplage réduit ces ondulations.
 - iv. Nos résultats sont confondus avec ceux obtenus numériquement par Cattaneo et al.

Chapitre 4

Applications Particulières sur les SMLT

4.1 Introduction

Après la validation de nos programmes de calcul sur une électrode horizontale, nous étudions, le long de ce présent chapitre, le comportement transitoire d'une électrode verticale, d'une autre électrode horizontale et des grilles carrées (de différentes dimension et nombre de mailles) de mise à la terre lors d'un impact direct d'un courant ou une tension impulsifs. Nous étudions, par la suite, l'influence du point d'injection sur les réponses transitoires de l'électrode horizontale et une des grilles.

Pour les électrodes, deux types de sols sont considérés : sol homogène et sol stratifié à deux couches. Par ailleurs, seul le sol homogène qui considéré pour les grilles.

Certains de nos résultats sont confrontés avec ceux trouvés dans la littérature.

4.2 Application sur une Électrode Verticale

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à l'étude de la réponse transitoire d'une électrode enterrée verticalement dans un sol homogène, linéaire, et isotrope. Le sol considéré est de résistivité ρ_g , de permittivité relative ϵ_r et de perméabilité relative unitaire ($\mu_r = 1$).

En termes de compatibilité électromagnétique, chaque segment de la tige (dont la situation physique est décrite sur la figure (4.1A)) peut être modélisée en basses fréquences par une résistance (4.1B), et en hautes fréquences par un circuit R-L-C (4.1C) ou par une ligne de transmission à paramètres distribuées (4.1D).

En ce qui concerne les paramètres localisés (distribués), nous avons utilisés les expressions empiriques proposées par *Grcev* et *Popov* [12]. Elles sont données par :

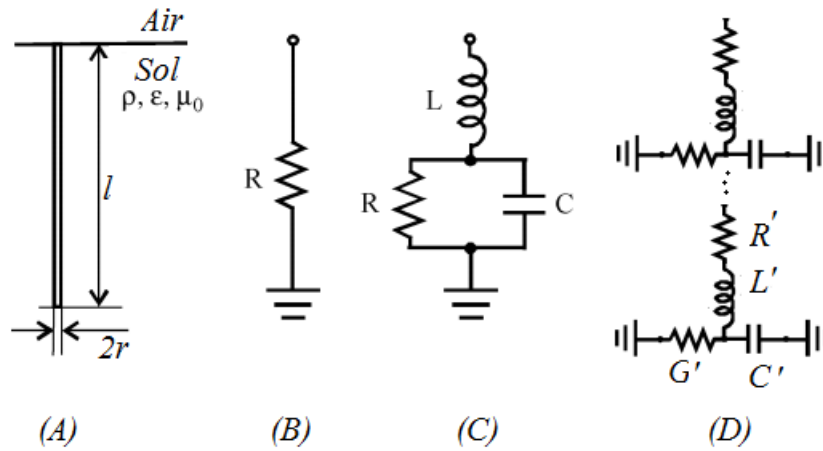


FIGURE 4.1: Modèle d'une électrode verticale; (A) situation physique, (B) modèle R en basses fréquences, (C) modèle R-L-C en hautes fréquences et (D) modèle à paramètres distribués en hautes fréquences [12]

$$\left\{ \begin{array}{l} R' = \frac{\rho_e}{2\pi\Delta l} \left\{ \ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 \right\} \\ L' = \frac{\mu\Delta l}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 \right\} \\ C' = 2\pi\epsilon\Delta l \frac{1}{\left\{ \ln\left(\frac{2l}{r}\right) - 1 \right\}} \\ G' = \frac{2\pi\Delta l}{\rho_g} \frac{1}{\left\{ \ln\left(\frac{2l}{r}\right) - 1 \right\}} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

où ;

- ρ_g est la résistivité du sol ;
- ρ_e est la résistivité de l'électrode ;
- ϵ est la permittivité du sol ;
- μ est la perméabilité du sol ;
- l, r sont respectivement la longueur et le rayon de l'électrode ;
- Δl est la longueur d'un segment de l'électrode.

La validité de ces expressions est conditionné par l'hypothèse suivante ($l \gg r$).

Il s'agit d'une électrode rectiligne de rayon r et de longueur l (Fig. 4.2), enfouie verticalement dans le sol. Nous adoptons deux types de sol de résistivité différentes. La perméabilité relative est toujours considérée égale à 1 ($\mu_r = 1$).

Pour cette analyse, nous nous mettons dans les conditions données dans la table (4.1). Pour la même électrode, nous simulons son comportement transitoire dans un sol : dans un premier cas de faible résistivité ($\rho_g = 10 \Omega m$) et dans un autre cas de moyenne résistivité ($\rho_g = 100 \Omega m$), lors d'un impact direct d'une impulsion de courant.

Il est important de noter que le phénomène d'ionisation est similaire à l'effet de couronne. il est traduit par une augmentation du rayon de l'électrode. Sachant que les

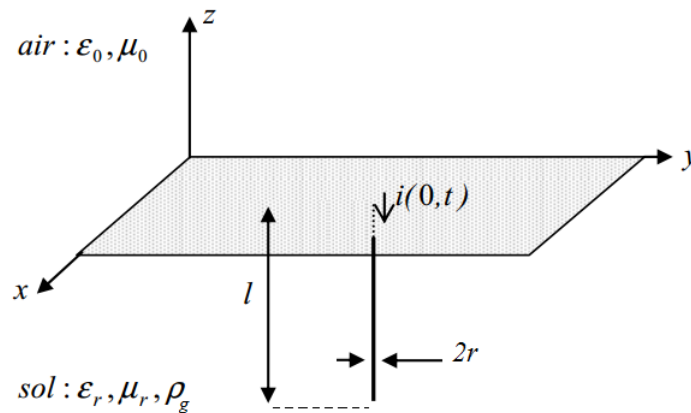


FIGURE 4.2: Représentation d'une électrode enterrée verticalement [10]

TABLE 4.1: Conditions d'interaction électrode-impulsion de courant

Courant	Électrode	Sol	Analyse
$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ $I_0 = 52,2689 \text{ kA}$ $\alpha = 14200 \text{ s}^{-1}$ $\beta = 5073000 \text{ s}^{-1}$	$l = 7 \text{ m}$ $r = 5 \text{ mm}$ $\rho_e = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$	$\rho_g = 10 \Omega \text{ m}$ $\varepsilon_r = 80$ $\rho_g = 100 \Omega \text{ m}$ $\varepsilon_r = 55$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV}$	$T_{max} = 5 \mu \text{ s}$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu \text{ s}$

paramètres distribués dépendent de cette valeur du rayon, alors ils varient en fonction du rayon. Si l'on considère le présence des phénomènes d'ionisation et du couplage, nous allons varier tous les paramètres distribués (R' , L' , G' et C') utilisés dans la méthode des lignes de transmission.

4.2.1 Réponse transitoire de l'électrode enfouie dans un sol faiblement résistif

4.2.1.1 Réponse transitoire ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel

La figure (4.3A) présente l'évolution du potentiel en différents points de l'électrode, et ce en ignorant l'ionisation du sol et du couplage mutuel inter-segments. La tige est de longueur $l = 7 \text{ m}$ et du rayon $r = 5 \text{ mm}$ enterrée verticalement dans un sol de faible résistivité $\rho_g = 10 \Omega \text{ m}$ de permittivité relative $\varepsilon_r = 80$. La figure (4.3B) montre la variation des courants dans différents segments.

En allant d'un point à l'autre vers le bas (vers l'autre extrémité de l'électrode), nous avons enregistré une diminution de l'amplitude de l'onde de potentiel accompagnée par un retard dans le temps de montée. Après un certain temps ($2,7 \mu \text{ s}$) les ondes de potentiel se coïncident (Fig.4.3A). Nous avons observés un pic de forte amplitude seulement au niveau du potentiel d'entrée (point d'injection).

Les courbes des courants sont des impulsions dont les amplitudes et les constantes de temps varient d'un élément à un autre. En effet, en allant d'un point à un autre ou alors d'un segment à l'autre, les amplitudes diminuent et les constantes de temps augmentent.

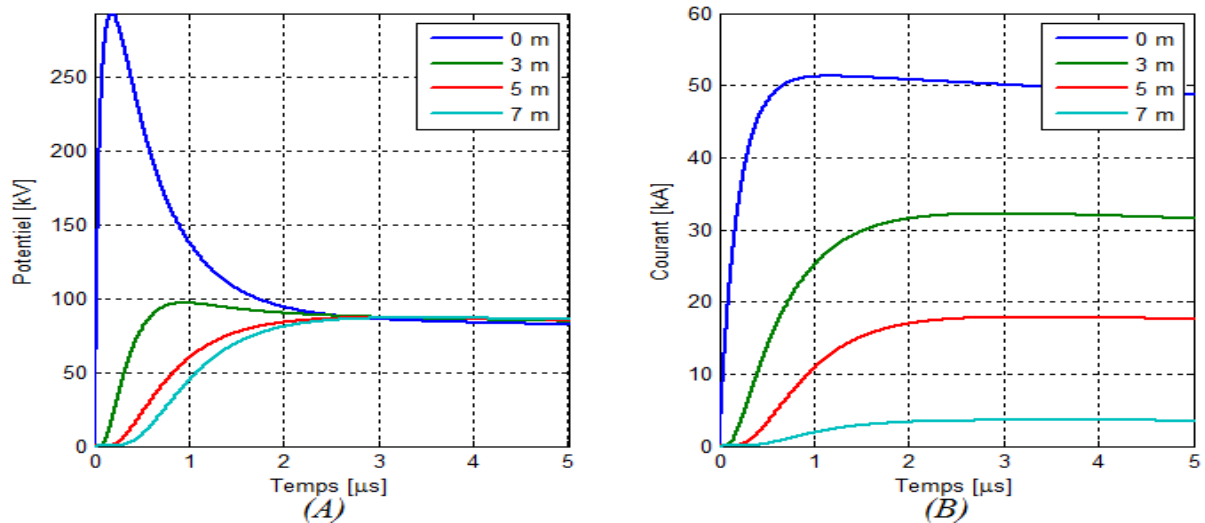


FIGURE 4.3: Courant et potentiel en absence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel dans le cas d'un sol faiblement résistif ; (A) Évolution du potentiel en différents points et (B) variation du courant en différents segment

4.2.1.2 Réponse transitoire en considérant simultanément l'ionisation du sol et le couplage mutuel

Dans cette section, les deux phénomènes à savoir l'ionisation du sol et le couplage mutuel ont été pris en considération. La figure (4.4A) présente l'évolution du potentiel en différents points de l'électrode d'étude. Par ailleurs, la figure (4.4B) montre les courants dans différents segments.

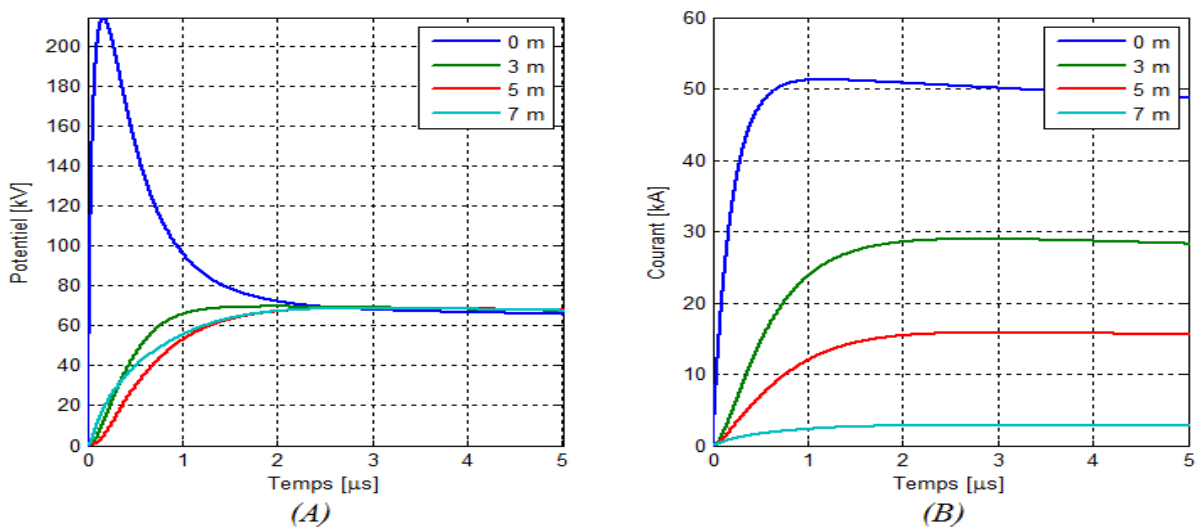


FIGURE 4.4: Courant et potentiel en présence d'ionisation du sol et de couplage mutuel dans le cas d'un sol faiblement résistif ;(A) variation du potentiel en différents points et (B) variation du courant dans différents segments

Le potentiel au point d'injection est impulsif. Sa valeur de crête est de 215 kV (environ). Pour les autres points considérés, les caractéristiques relatives au potentiel ainsi obtenues présentent des valeurs de crête avoisinant les 70 kV. En effet, la valeur de crête

diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du point d'injection. Cette diminution est accompagnée par une légère retard dans le temps de montée.

Concernant le courant, la forme impulsionnelle a été conservée au niveau de chaque segment. Par ailleurs, une atténuation de cette onde a été observée et ce en éloignant du point d'injection (Fig.4.4).

4.2.2 Réponse transitoire de l'électrode enfouie dans un sol moyennement résistif

4.2.2.1 Réponse transitoire en absence de l'ionisation et du couplage mutuel

La figure (4.5A) présente la variation du potentiel en différents points (dont la variable est z) de l'électrode d'étude en absence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel. La dite-tige est caractérisée par une longueur $l = 7 \text{ m}$ et un rayon $r = 5 \text{ mm}$. Elle est enterrée verticalement dans un sol moyennement résistif (de résistivité $\rho_g = 500 \Omega\text{m}$) et de permittivité relative $\epsilon_r = 50$. La figure (4.5B) illustre les courbes des courants dans différents segments.

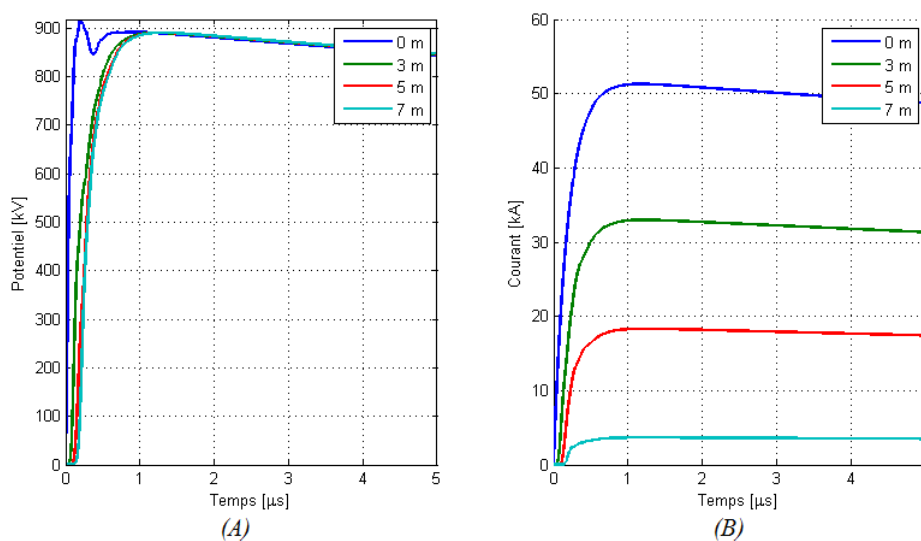


FIGURE 4.5: Courant et potentiel en absence de phénomènes dans le cas d'un sol moyennement résistif ;(A) variation du potentiel en différents points et (B) variation du courant dans différents segments

D'après les résultats trouvés et présentés sur les figures (4.5A et 4.5B), la forme impulsionnelle du potentiel a été conservée. Cependant, nous avons enregistré des légères oscillations sur la réponse d'entrée.

En ce qui concerne les courants impulsifs, nous avons remarqué une diminution de l'amplitude tout en allant d'un segment à l'autre.

4.2.2 Réponse transitoire en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

La figure (4.6A) présente la variation du potentiel en différents points (dont la variable z) de l'électrode étudiée en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel. Cette tige possède une longueur $l = 7 \text{ m}$ et un rayon $r = 5 \text{ mm}$ enterrée verticalement dans un sol moyennement résistif. Ce sol est caractérisé par une résistivité $\rho_g = 500 \Omega\text{m}$ et une permittivité relative $\epsilon_r = 50$. La figure (4.6B) représente les courants dans différents segments adoptés.

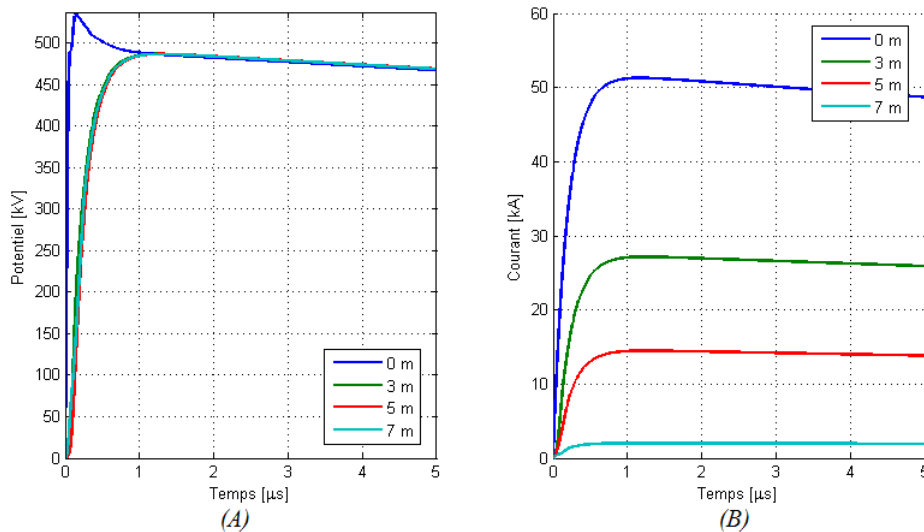


FIGURE 4.6: Courant et potentiel en présence de phénomènes dans le cas d'un sol moyennement résistif ; (A) variation du potentiel en différents points et (B) variation du courant dans différents segments

En comparant cette figure (Fig.4.6) à celle (Fig.4.3) obtenue en ignorant les deux phénomènes suscités d'ionisation et de couplage, les mêmes constatations ont été enregistrées. Aussi, la forme de l'onde n'a pas été affectée. Cependant, nous avons observé une diminution considérable (de l'ordre de 44% environ) de l'amplitude du potentiel.

Quant aux courants, leur forme est impulsive. L'amplitude diminue d'un segment à l'autre.

4.3 Application sur une Gille

4.3.1 Étude et condition de simulation

Dans cette section, nous étudions le comportement transitoire des grilles en forme carrée lors d'un impact direct d'un courant impulsif de forme bi-exponentielle. Ces grilles sont enfouies horizontalement dans un sol homogène de profondeur h , comme illustré sur la figure (4.8). Nous nous sommes intéressés à trois configurations présentées sur la figure (4.8). Il s'agit d'une grille constituée d'une seule maille de côté l (Fig.4.8A), d'une grille composée de quatre mailles identiques dont le côté est $l/2$ (Fig.4.8B) et

d'une grille contenant également quatre mailles identiques, le côté de chaque maille est l (Fig.4.8C). Les conditions que nous avons adoptées sont celles récapitulées dans la table (4.2).

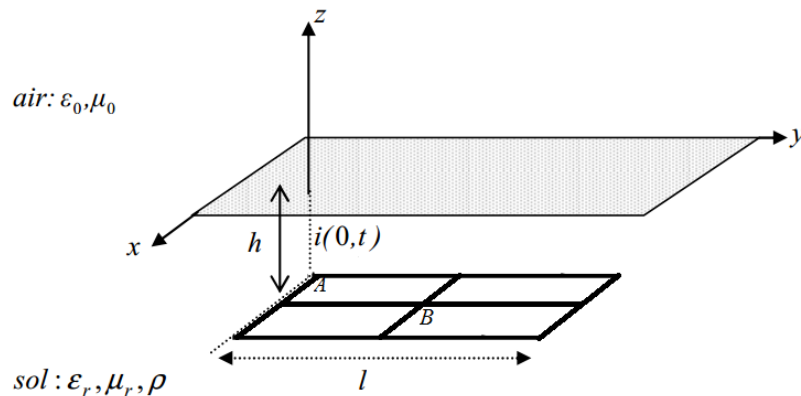


FIGURE 4.7: Représentation d'une grille enfouie dans un sol de profondeur h

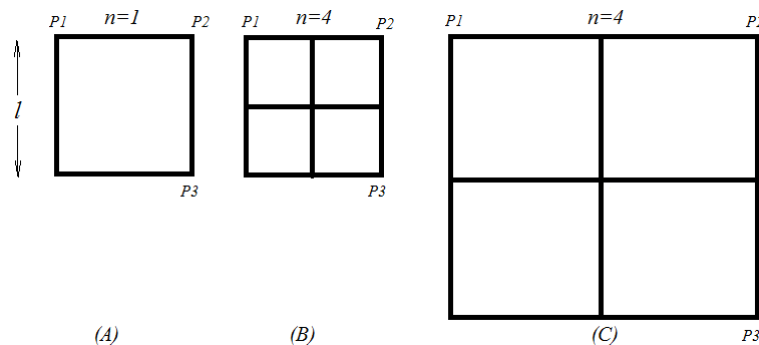


FIGURE 4.8: Représentation des différentes grilles étudiées

TABLE 4.2: Conditions proposées pour la simulation des grilles

Courant	Grille	Sol	Analyse
$i(t) = i_o(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ $i_o = 1,0167 \text{ kA}$ $\alpha = 0,0142 \mu\text{s}^{-1}$ $\beta = 5,073 \mu\text{s}^{-1}$	$l = 30 \text{ m}$ $r = 7 \text{ mm}$ $h = 50 \text{ cm}$ $\rho_e = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$	$\rho_g = 1000 \Omega\text{m}$ $\epsilon_r = 9$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV/m}$	$T_{max} = 5 \mu\text{s}$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu\text{s}$

4.3.2 Réponse transitoire des systèmes

La simulation a été faite en ignorant les phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel inter-segments. Les résultats que nous avons obtenus sont présentés sur la figure (4.9). Cette dernière montre l'évolution du potentiel en différents points de la grille ; aux points P_1 , P_2 et P_3 . Les caractéristiques (4.9A), (4.9B) et (4.9C) présentent les réponses transitoires des grilles carrées schématisées sur la figure (4.8A), (4.8B) et (4.8C) respectivement.

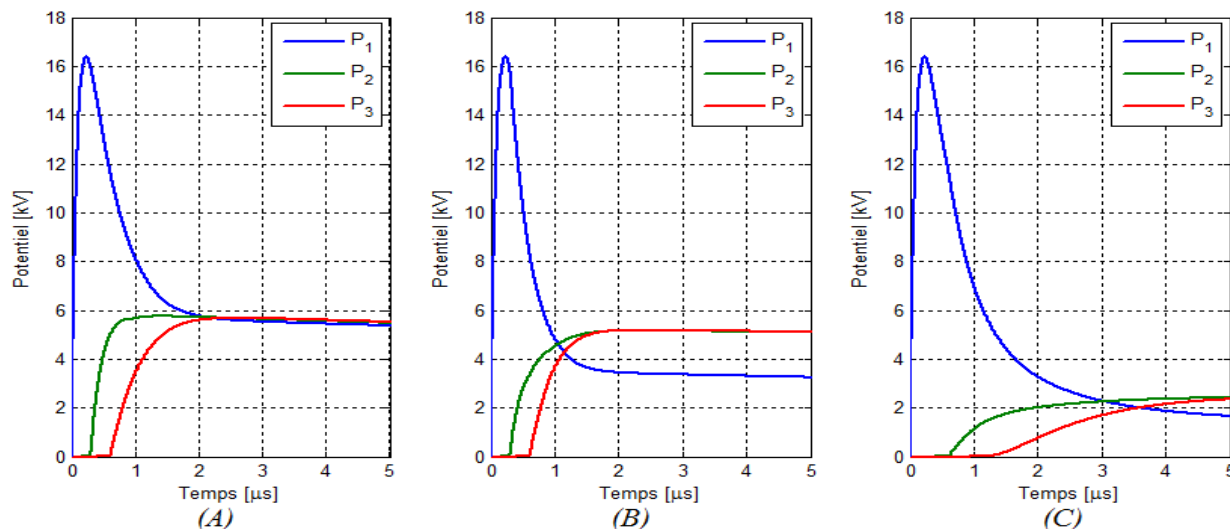


FIGURE 4.9: Évolution du potentiel en différents points de la grille (A) constituée d'une seule maille de côté l , (B) composée de quatre mailles identiques de côté $l/2$, (C) contenant quatre mailles identiques de côté l

Nous avons remarqué un pic de forte amplitude pour le potentiel au point P_1 , c'est-à-dire au niveau du point d'injection (la même valeur de crête de 16,2 kV pour les trois grilles). Un retard dans le temps de montée a été enregistré au niveau du potentiel des autres points adoptés (P_2 et P_3).

Après un certain temps ($t = 2\mu s$), les ondes de potentiel en différents points obtenus pour une grille à une seule maille (Fig.4.8A) se superposent. Par ailleurs, nous avons remarqué une diminution de cette onde de potentiel avec l'augmentation du nombre de mailles ainsi que la dimension de la grille. En effet, les ondes de potentiel correspondant aux points (P_2 et P_3) conservent la forme impulsionnelle. Cependant, ces ondes sont amorties, ce qui est traduit par la dissipation des courants de défaut. Cette dissipation s'accroît en offrant plus de chemins conducteurs ou en augmentant les dimensions des systèmes de terre.

4.4 Influence du point d'injection sur la réponse transitoire du système

4.4.1 Électrode Horizontale

Dans cette section, nous étudions l'influence du point d'injection d'un courant impulsif sur le comportement transitoire d'une électrode horizontale. La réponse transitoire concerne le potentiel en différents points y compris celui d'injection.

Les conditions d'une telle simulation sont présentées dans la table (4.3). Les données concernent la forme de l'impulsion de courant, les caractéristiques de l'électrode, le type de sol et ses propriétés électromagnétiques, le temps de simulation, la longueur de chaque segment de l'électrode, ainsi que les points d'injection. Étant donné la symétrie

que présente la tige, les points d'injection que nous les avons choisis se situent sur une moitié de l'électrode.

Il est à noter que lors de cette étude, les phénomènes d'ionisation du sol ainsi que le couplage mutuel inter-segments n'ont pas été pris en considération.

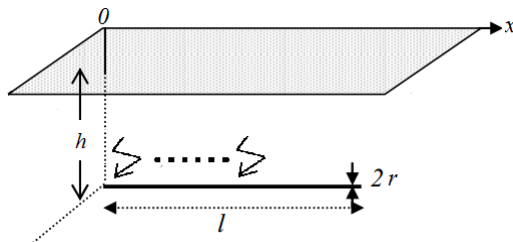


FIGURE 4.10: Représentation de l'électrode d'étude

TABLE 4.3: Conditions d'interaction électrode-impulsion de courant

Courant	Électrode	Sol	Analyse
$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ $I_0 = 52,2689 \text{ kA}$ $\alpha = 14200 \text{ s}^{-1}$ $\beta = 5073000 \text{ s}^{-1}$	$l = 100 \text{ m}$ $r = 5 \text{ mm}$ $h = 50 \text{ cm}$ $\rho_e = 0.25 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$	$\rho_g = 1000 \Omega \text{ m}$ $\epsilon_r = 36$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV}$	$T_{max} = 5 \mu \text{s}$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu \text{s}$ $x = 0, 10, 20, 30, 40, 50$

4.4.1.1 Réponse transitoire du système suite à une injection du courant sur l'extrémité de l'électrode

Dans cette section, nous avons injecté l'impulsion de courant au niveau d'une des deux extrémités noté $x = 0 \text{ m}$ de la tige de mise à la terre, et nous avons récupéré le potentiel en différents points à savoir : $x = 0, 10, 20, 30, 40$ et 50 m . Les résultats ainsi obtenus sont présentés sur la figure (4.11).

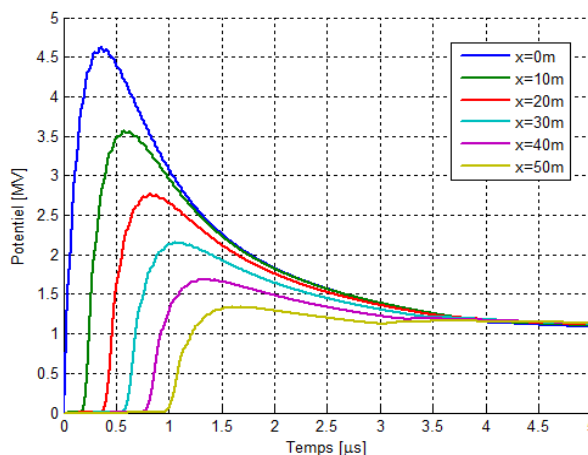


FIGURE 4.11: Évolution du potentiel le long de l'électrode pour une injection de courant au point $x = 0 \text{ m}$

Le potentiel conserve bel et bien la forme impulsive. Cependant, en allant vers les x croissants, nous avons enregistré une diminution de l'amplitude de l'onde de potentiel accompagnée par un retard dans le temps de montée. Cependant, toutes les caractéristiques se coïncident à partir de $3.5 \mu s$.

4.4.1.2 Réponse transitoire du système suite à une injection du courant en différents points

En ce qui concerne cette partie, nous injectons l'impulsion du courant en différents points de l'électrode à savoir $x = 0, 10, 20, 30, 40$ et $50 m$ de l'électrode horizontale. Pour chaque point d'injection, nous récupérons l'onde de potentiel. Ainsi, les caractéristiques obtenues sont illustrées sur la figure (4.12).

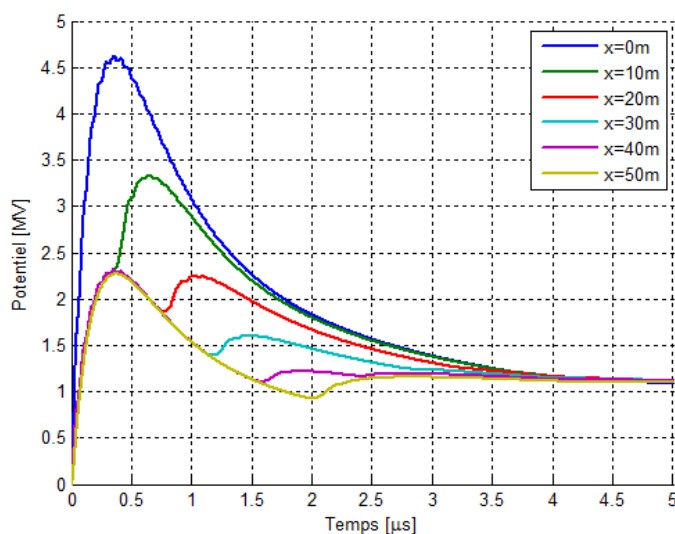


FIGURE 4.12: Évolution du potentiel en fonction au point d'injection

D'après les courbes présentées ci-dessus (Fig.4.12), une diminution de la valeur de crête a été observée avec le déplacement du point d'injection de l'extrémité vers le milieu de l'électrode. Cependant, les réponses relatives aux points $x=20, 30$ et $40 m$, présentent deux pics. Le premier appelé "pic principal" est commun pour les trois caractéristiques. Le deuxième, plus petit que le pic principal, diminue en déplaçant le point d'injection vers le milieu de l'électrode. Il est important de noter que la réponse transitoire obtenue pour une injection au milieu de l'électrode ($x=50m$) possède uniquement le pic principal ; la réponse correspondante est la moins ondulée. Ainsi, nous suggérons de choisir le point d'injection au milieu de l'électrode de terre enterrée horizontalement.

4.4.2 Grille à quatre mailles identiques de côté l

Pour ce test, nous nous sommes intéressés à une grille carrée composée de quatre mailles identiques, de côté l . Il s'agit en fait de la grille présentée sur la figure (4.13). L'objectif est d'étudier l'influence du point d'injection sur la réponse transitoire d'une telle grille.

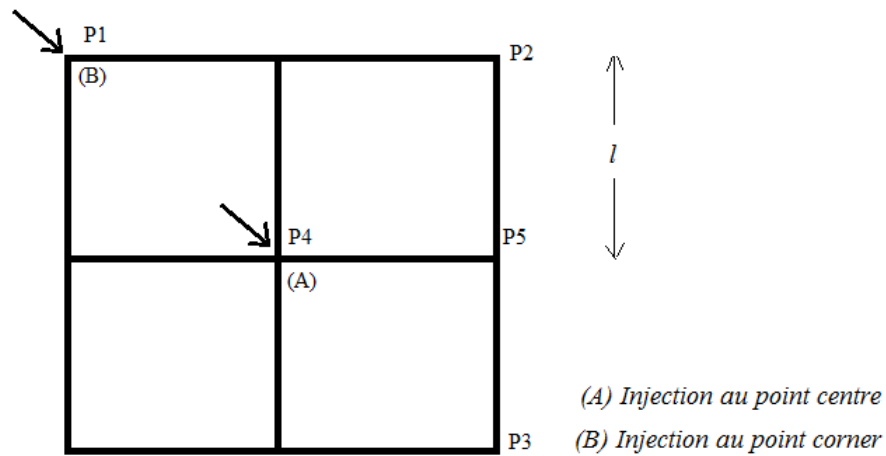


FIGURE 4.13: Représentation des points d'injection d'une grille 2x2

Cette réponse, consistant en l'évolution du potentiel en différents points de la grille 2x2 (Fig.4.13), a été présentée sur la figure (4.14) où la figure (4.14A) correspond à l'injection au point centre de la grille et la figure (4.14B) à celle au point de corner.

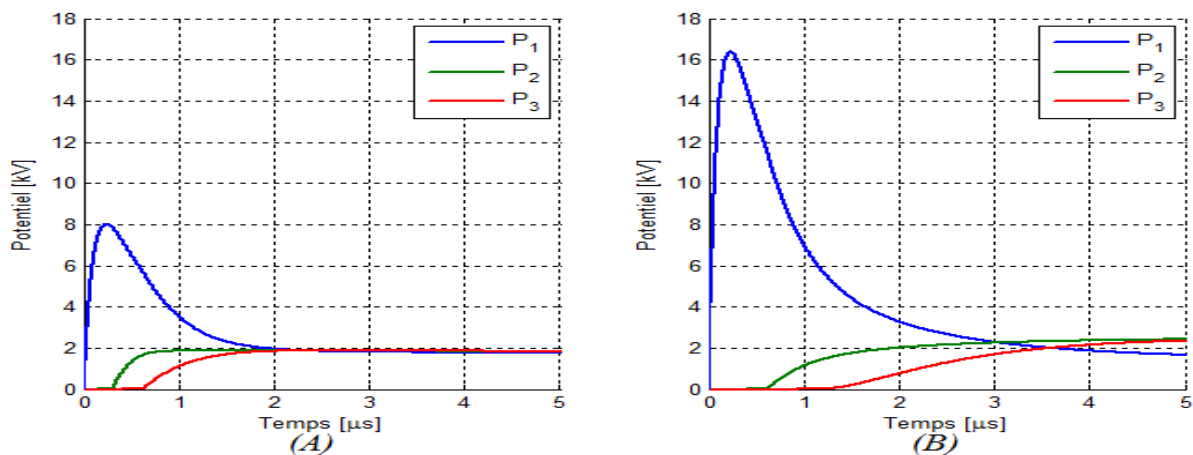


FIGURE 4.14: Évolution du potentiel du système (Fig.4.8.C); (A) injection au point centre et (B) injection au point de corner

D'après ces résultats présentés sur la figure (4.14), nous avons bien remarqué l'effet du point d'injection; l'atténuation des ondes de potentiel est plus rapide lorsque le point d'injection au point centre de la grille. Cette configuration offre plus de chemins conducteurs au courant pour qu'il se dissipe.

4.5 Réponse Transitoire d'une Électrode Suite à une Impulsion de Tension

Dans cette section, nous avons analysé le comportement transitoire d'une électrode horizontale (Fig.4.15) lors d'un impact direct d'une tension impulsive de forme bi-exponentielle.

Étant donné que nous avons utilisé l'approche des lignes de transmission, l'électrode est représentée par une cascade des circuits électriques en Γ à constantes localisées.

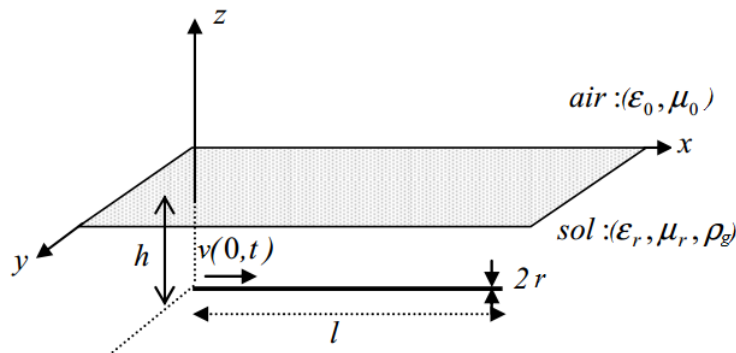


FIGURE 4.15: Représentation d'une électrode horizontale excitée par une impulsion de tension [10]

Les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel inter-segments ont été pris en considération lors de cette partie. En effet, l'électrode de terre en question a été modélisée par un système d'équations différentielles d'ordre 1. Ce système a été résolu en utilisant la méthode de Runge Kutta. Les courants et les tensions initiaux dans chaque segment et en chaque point sont supposés nuls.

Le processus de calcul est le même que celui utilisé dans le chapitre 3. En effet, l'électrode est caractérisée par une longueur l et un rayon r . Cette électrode est enterrée horizontalement à une profondeur h dans un sol linéaire, homogène et isotrope. Ce dernier est caractérisé par une résistivité ρ_g , une permittivité relative ϵ_r , et une perméabilité relative unitaire. Deux résistivités de sol ont été adoptées : ($\rho_g = 200 \Omega m$) correspondant à un sol moyennement résistif et ($\rho_g = 1000 \Omega m$) représentant un sol fortement résistif.

Afin de valider nos algorithmes, les tensions que nous avons obtenues seront confrontées à celles trouvées numériquement par Sekki et al.[13]. Notons que ces derniers ont utilisé, lors de leur simulation, la méthode de Maxwell 3D et la technique des lignes de transmission basé sur la méthode FDTD. Pour cela, nous nous mettons dans les mêmes conditions considérées par ces chercheurs et mentionnées dans la table (4.4). Par ailleurs, nous avons utilisé les paramètres de Sunde [22], car ceux de Sekki et al. n'ont pas été mentionnés dans leur rapport.

TABLE 4.4: Conditions d'interaction entre l'électrode et l'impact direct d'une tension impulsionnelle

Tension	Électrode	Sol	Analyse
$V(t) = V_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ $V_0 = 30 \text{ kV}$ $\alpha = 45099 \text{ s}^{-1}$ $\beta = 9022879 \text{ s}^{-1}$	$l = 20 \text{ m}$ $r = 7 \text{ mm}$ $h = 40 \text{ cm}$ $\rho_e = 0.25 \cdot 10^{-6} \Omega m$	Sol rocheux : $\rho_g = 200 \Omega m$ $\epsilon_r = 10$ Zone urbaine : $\rho_g = 1000 \Omega m$ $\epsilon_r = 6$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0.215} \text{ kV}$	$T_{max} = 10 \mu s$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0.001 \mu s$

Les réponses transitoires consistent en la détermination du courant et de la tension en différents segments de l'électrode. Les paramètres d'influence adoptés sont :

- Les caractéristiques électromagnétiques du sol à savoir sa résistivité et sa permittivité relative (sa perméabilité relative étant égale à l'unité);
- La présence ou l'absence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel inter-segments.

4.5.1 Réponse transitoire d'une électrode de terre enfouie dans un sol moyennement résistif

Le système de terre étudié est une électrode de longueur $l = 20 \text{ m}$ et de rayon $r = 7 \text{ mm}$. Ce système est enterré horizontalement à une profondeur $h = 40 \text{ cm}$, dans un sol. Ce dernier possède une résistivité $\rho_g = 200 \Omega\text{m}$, une permittivité relative $\epsilon_r = 36$ et une perméabilité relative unitaire.

4.5.1.1 Comportement transitoire en ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel

Pour un sol moyennement résistif, les figures (4.16A) et (4.16B) montrent respectivement nos caractéristiques relatives au potentiel en différents points de l'électrode ainsi que celles trouvées par Sekki et al. [13], et ce en ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel.

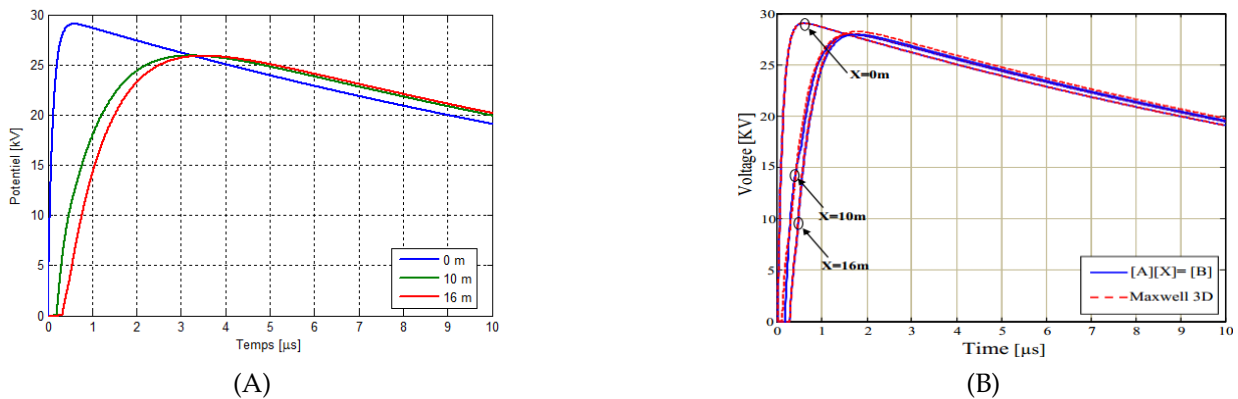


FIGURE 4.16: Variation du potentiel en différents points de l'électrode dans le cas d'un sol moyennement résistif (A) nos résultats (B) ceux de Sekki et al.[13]

En $x = 0 \text{ m}$, l'allure de potentiel est identique à celle de Sekki et al. Ceci est évident du fait que nous avons injecté leur tension impulsive, pour en récupérer celles en $x=10$ et 16 m . Les réponses que nous avons obtenues pour $x=10$ et 16 m possèdent en général les mêmes allures que celles trouvées par de Sekki et al. Cependant, nous avons enregistré une légère chute au niveau de notre valeur de crête ne dépassant pas 5,5% et un retard dans le temps de montée de $1,5 \mu\text{s}$ ont été enregistré.

Étant donné la bonne concordance entre nos résultats et ceux de Sekki et al., notre algorithme est valide pour qu'il soit utilisé pour d'autres conditions.

Nous nous sommes intéressés également à la réponse transitoire relative au courant en différents segments de l'électrode en fonction du temps. Une telle réponse transitoire est illustrée sur la figure (4.17). L'allure générale de courant préserve sa forme impulsive. Cependant, le temps de montée augmente d'un segment à l'autre en allant vers les x croissants.

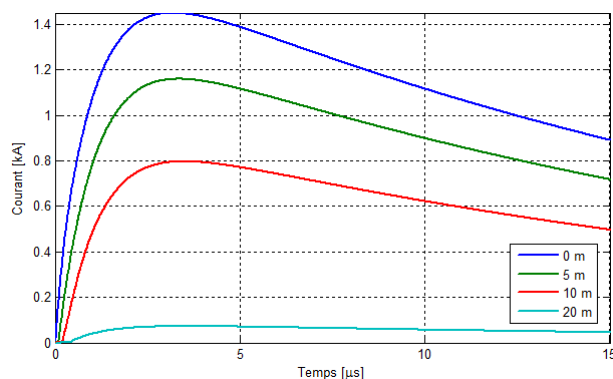


FIGURE 4.17: Évolution du courant au niveau de différents segments de l'électrode enterrée horizontalement dans le cas d'un sol moyennement résistif

La représentation relative à la variation du courant le long de l'électrode en fonction du temps $I = I(x, t)$ est donnée par la figure (4.18). Cette dernière confirme du fait que le courant conserve la même forme impulsionnelle de la tension injectée. Cependant, l'onde de courant est atténuée de manière considérable le long de l'électrode, étant donné la dissipation du courant dans le sol.

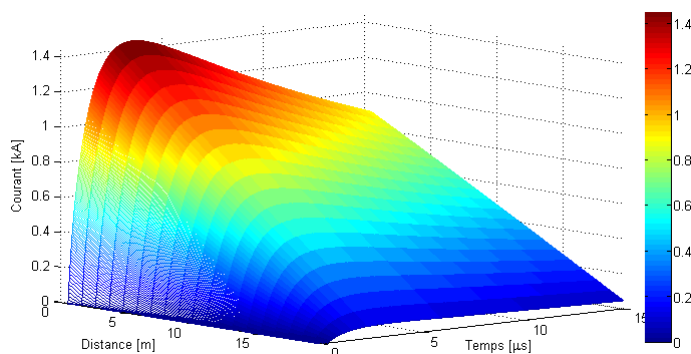


FIGURE 4.18: Variation du courant en fonction du temps le long de l'électrode enterrée horizontalement dans le cas d'un sol moyennement résistif

4.5.1.2 Comportement transitoire en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel

En réalité, l'impulsion de tension (d'amplitude de 30 kV) génère les phénomènes d'ionisation du sol et le couplage mutuel inter-segments. La figure suivante (4.19A) représente le courant comme réponse transitoire en présence simultanée des deux phénomènes suscités. En comparant cette figure à celle (Fig.4.17), nous constatons que la présence de ces deux phénomènes, engendre une légère diminution de toute l'onde de courant sans pour autant affecter la forme qui reste quant à elle impulsionnelle.

Les propos que nous avançons sont confirmés par la figure (4.19B) illustrant la variation du courant le long de l'électrode en fonction du temps.

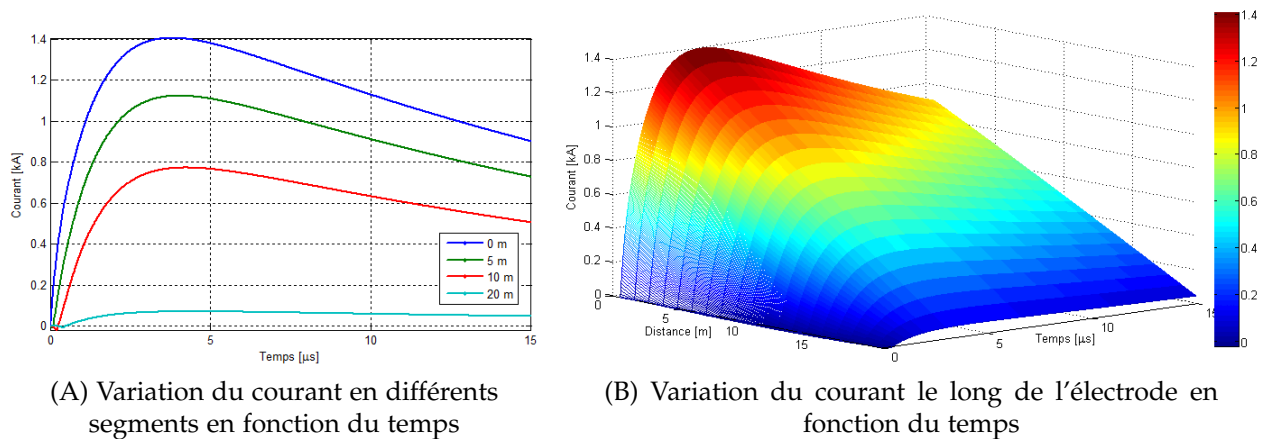


FIGURE 4.19: Réponse transitoire du système dans le cas d'un sol moyennement résistif en considérant les phénomènes d'ionisation et couplage mutuel

Comme récapitulatif, d'après les résultats de simulation obtenus pour ce type de sol moyennement résistif, nous remarquons que l'influence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel inter-segments réside en une diminution de l'amplitude de courant accompagnée par un léger retard dans le temps de montée.

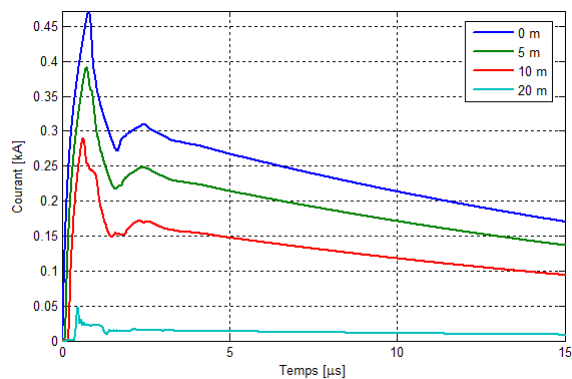
4.5.2 Réponse transitoire d'une électrode de terre enfouie dans un sol fortement résistif

Le sol considéré pour cette section, est caractérisé par une forte résistivité $\rho_g = 1000 \Omega m$, une perméabilité relative $\mu_r = 1$ et une permittivité relative $\epsilon_r = 6$.

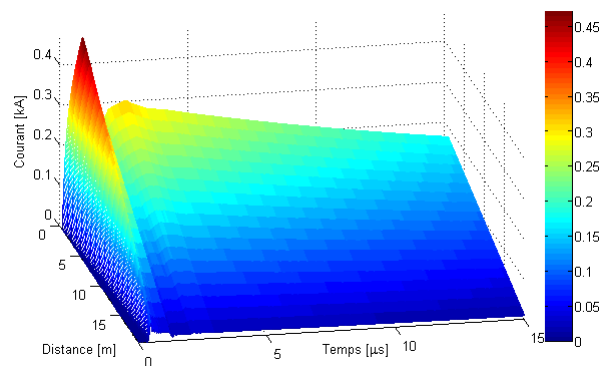
4.5.2.1 Comportement transitoire en ignorant l'ionisation du sol et de couplage mutuel

La figure (4.20A) illustre la variation temporelle du courant en différents segments de l'électrode à savoir : $x = 0, 5, 10, \text{ et } 20 m$. Cette figure montre que le courant ne conserve pas la forme impulsionnelle de la tension injectée. Nous avons observé, en effet, une déformation sous forme d'oscillations amorties, pour les temps allant de $0s$ à $2.5 \mu s$. Ces mêmes oscillations sont apparues sur la figure (4.20B) donnant la variation du courant le long de l'électrode en fonction du temps.

D'après les différentes caractéristiques ainsi obtenues (Fig.4.20), nous constatons l'influence de la résistivité du sol sur la réponse transitoire du système de mise à la terre. Nous avons observé, de $0 \mu s$ à $2,5 \mu s$, que l'onde de courant présente quelques petites oscillations.



(A) Évolution du courant en différents segments de l'électrode en fonction du temps

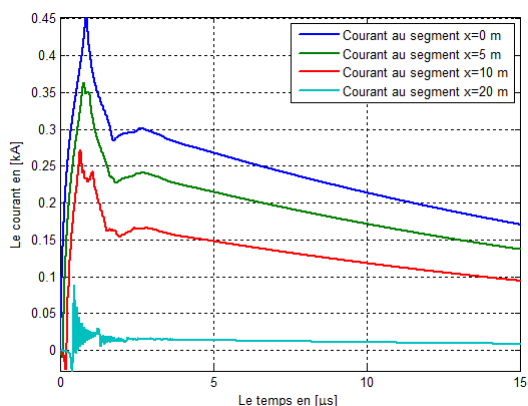


(B) Évolution du courant le long de l'électrode en fonction du temps

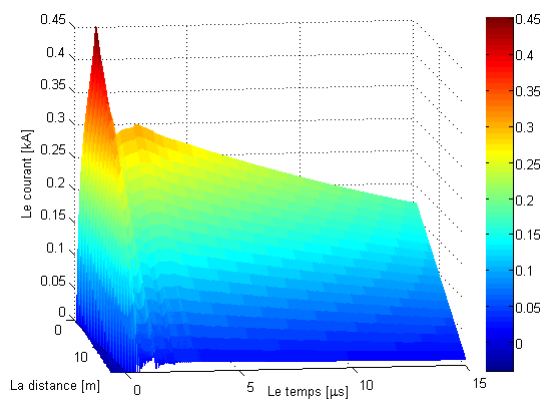
FIGURE 4.20: Variation de l'onde de courant dans le cas d'un sol fortement résistif

4.5.2.2 Comportement transitoire en présence de l'ionisation du sol et le couplage mutuel inter-segments

La figure suivante (Fig.4.21A) représente la réponse transitoire relative au courant en considérant conjointement les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel. Par ailleurs, la figure (4.21B) représente l'évolution de la même grandeur électrique, le courant, le long de l'électrode en fonction du temps. Les constatations qui ont été faites pour le sol moyennement résistif, sont valables pour l'actuel type de sol, à savoir un sol fortement résistif. En effet, les phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel, n'affectant pas la forme de l'onde de courant, engendrent une légère diminution de toutes les valeurs de l'onde en question. En outre, nous avons enregistré des oscillations sur l'onde de courant dans le dernier segment de l'électrode.



(A) Évolution du courant en différents segments de l'électrode en fonction du temps



(B) Évolution du courant le long de l'électrode en fonction du temps

FIGURE 4.21: Variation du courant dans le cas d'un sol fortement résistif considérant les phénomènes suscités

4.6 Application sur une Électrode Enterrée dans un Sol Stratifié

4.6.1 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 (4.22).

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 (2.52) exposée au chapitre (2). Lors de cette étude, l'influence des phénomènes d'ionisation et de couplage est examinée.

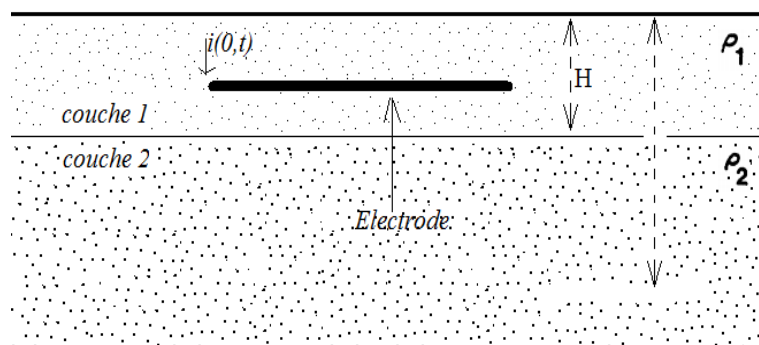


FIGURE 4.22: Représentation d'une électrode enterrée horizontalement dans un sol à deux couches

Nous avons travaillé dans les mêmes conditions considérées par Sekki et al. mentionnées dans la table (4.5). 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 4.5: 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 : $\rho_g = 200 \Omega m \quad \varepsilon_r = 10$ Couche 2 : $\rho_g = 1000 \Omega m \quad \varepsilon_r = 6$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV}$	$T_{max} = 10 \mu s$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu s$

4.6.1.1 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. [13] 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 (4.23A).

Dans ces conditions, nous avons déterminé le courant. Par ailleurs, nos résultats illustrés sur la figure (4.23B) sont confrontés à ceux de Sekki et al. présentés sur la figure (4.23A).

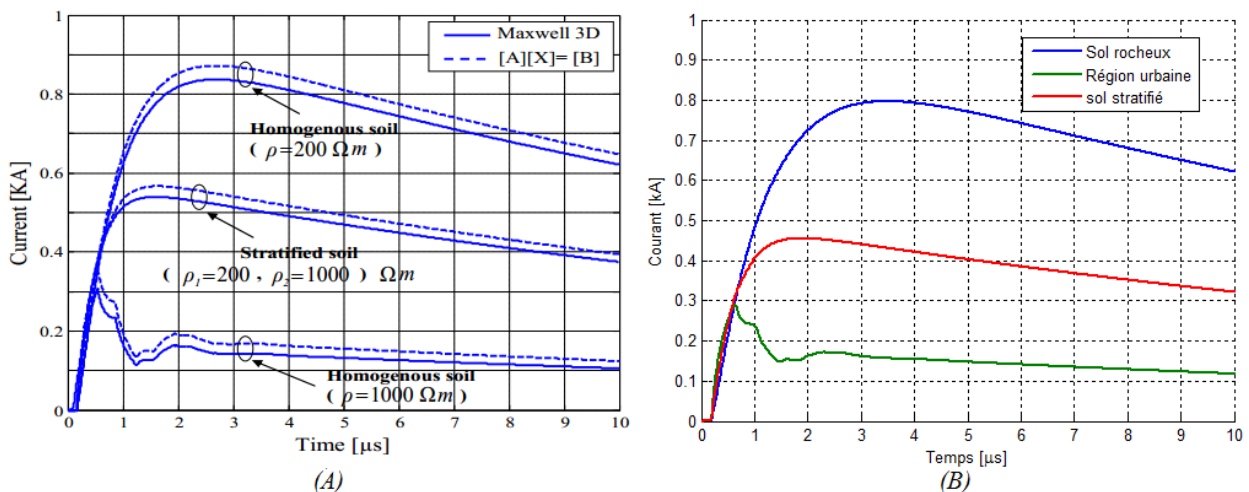


FIGURE 4.23: Évolution du courant au milieu de l'électrode dans le cas des sols moyennement résistif, fortement résistif et stratifié : (A) Résultats obtenus par Sekki et al. [13] et (B) nos résultats

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.

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

La figure (4.24) 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.

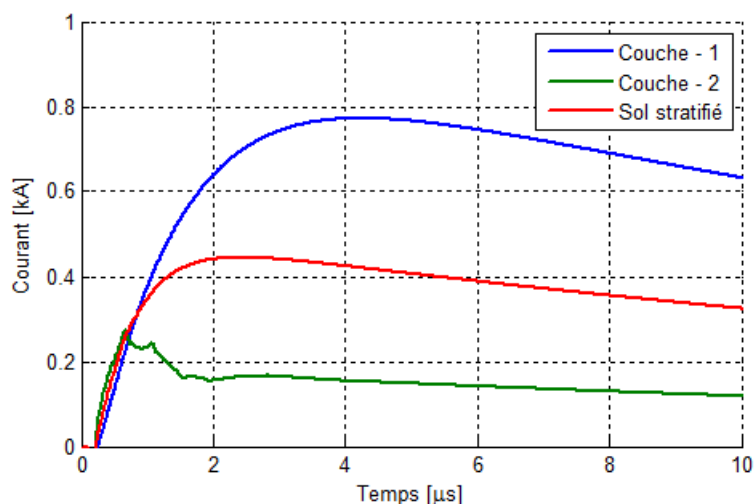


FIGURE 4.24: Évolution du courant au milieu de l'électrode en présence des phénomènes d'ionisation et de couplage mutuel dans le cas des sols moyennement résistif, fortement résistif et stratifié

Les résultats que nous avons trouvés dans ce test sont confrontés à ceux présentés sur la figure (4.23B). En allant d'un 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.

4.6.1.3 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. [13].

En utilisant une machine ayant les mêmes caractéristiques¹ 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 (4.6) :

TABLE 4.6: 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.

4.6.2 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 (4.25).

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 (4.7).

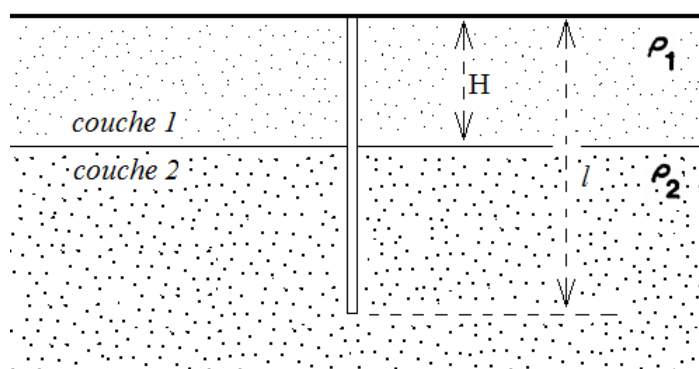


FIGURE 4.25: Représentation d'une électrode enterrée verticalement dans un sol à deux couches

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

Les caractéristiques (4.26A) et (4.26B) illustrent respectivement la variation du courant à l'entrée et au milieu de l'électrode verticale, pour les trois types de sol à savoir,

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

TABLE 4.7: 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 : $\rho_g = 1000 \Omega m \quad \epsilon_r = 6$ $E_{CR} = 241 \rho_g^{0,215} \text{ kV}$	$T_{max} = 10 \mu s$ $\Delta l = 1 \text{ m}$ $\Delta t = 0,001 \mu s$

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.

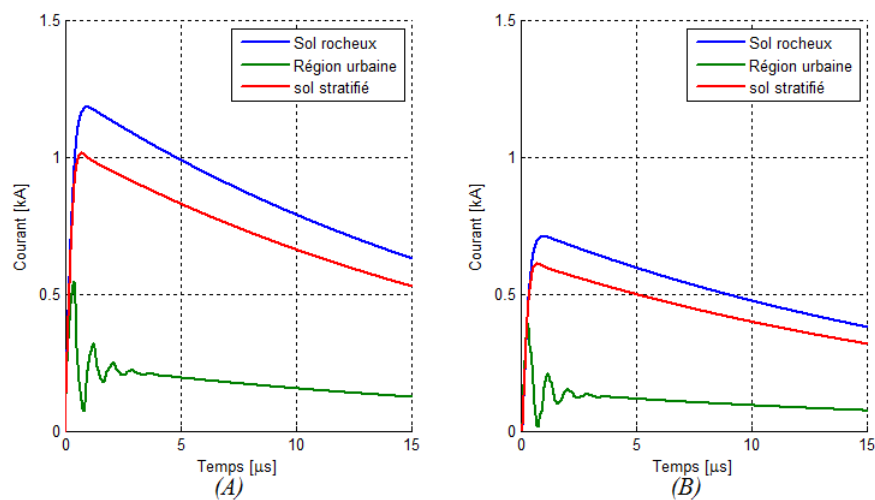


FIGURE 4.26: Variation du courant (A) courant d'entrée et (B) au milieu de l'électrode

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.

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

La figure (4.27) montre l'évolution du courant à l'entrée (Fig.4.27A) et au milieu (Fig.4.27B) 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 continue représentent le cas d'absence des deux phénomènes suscités).

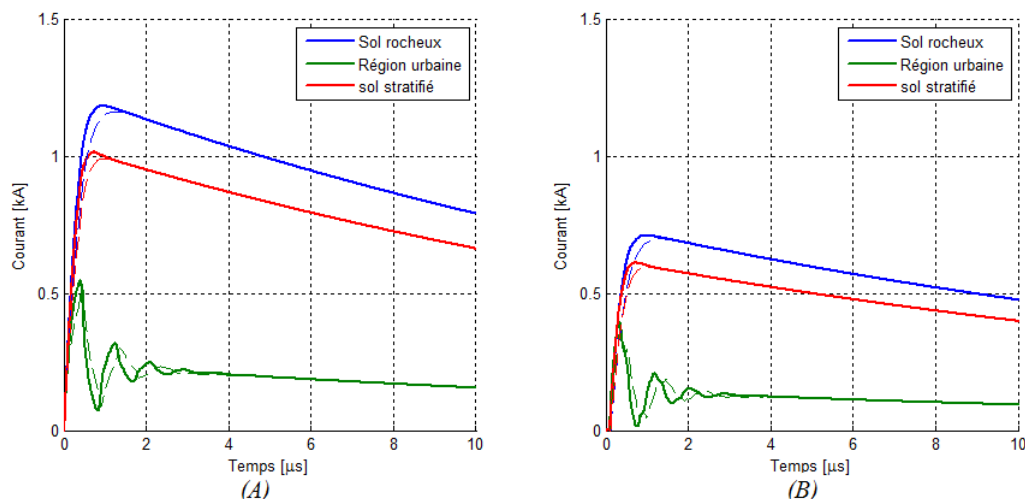


FIGURE 4.27: Variation du courant en considérant l'ionisation du sol et le couplage mutuel : (A) courant à l'entrée et (B) courant au milieu de l'électrode

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.

4.7 Conclusion

Lors de cette étude, nous avons retenu les principales conclusions suivantes :

- L'injection d'un courant impulsif à l'extrémité d'une électrode verticale enfouie dans un sol faiblement résistif engendre une diminution de l'amplitude de l'onde impulsive de potentiel accompagnée par un retard dans le temps de montée pour les différents points choisis le long de l'électrode. L'onde de potentiel présente des oscillations lorsque la résistivité du sol augmente ; c'est le cas du sol moyennement résistif.
- Lors de l'utilisation d'une grille de terre, la dissipation du courant s'accroît avec l'augmentation du nombre des mailles (et donc des chemins conducteurs) ainsi que la dimension de grille en question. La dissipation du courant se traduit par l'amortissement de l'onde de potentiel.
- Pour une électrode horizontale (respectivement pour une grille comportant plusieurs mailles), il est conseillé d'injecter le courant au milieu qu'en extrémité de la tige (respectivement au centre qu'en coin de la grille).
- 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 homogène ou 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.

Conclusion Générale

Cette investigation est une contribution à la modélisation du comportement des systèmes de mise à la terre suite à une injection d'un courant ou d'une tension impulsifs, dont certaines forme simulent la foudre. Plusieurs configurations de mise à la terre ont été choisies : électrode horizontale, électrode verticale et grilles de forme carrée. Divers types de sol ont été considérés à savoir sol homogène ou sol stratifié à deux couches. 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.

Le premier travail que nous avons effectué concerne une électrode horizontale enterrée dans un 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.

Dans un deuxième travail, le troisième test a été repris pour étudier le comportement transitoire d'une électrode verticale, dans le cas d'un sol homogène faiblement ou moyennement résistif. Pour le premier type de sol, une diminution de l'amplitude de l'onde impulsive de potentiel accompagnée par un retard dans le temps de montée le long de l'électrode. Cette onde présente des oscillations lorsque l'électrode est enfouie dans le sol moyennement résistif.

En outre, nous nous sommes intéressés à examiner l'onde de potentiel comme réponse transitoire de trois grilles carrées de mise à la terre suite à une impulsion de courant bi-exponentielle de forte amplitude. Nous concluons que la taille de la grille utilisée et le nombre de mailles ont une grande influence sur la réponse transitoire d'un tel système. En effet, plus la taille et/ou plus le nombre de mailles sont grands, plus la dissipation du courant se traduisant par l'amortissement de l'onde de potentiel, est rapide. Autrement dit, la dissipation de courant est favorisée par l'existence de chemins conducteurs vers la terre. Cette dernière constatation a été confirmée lorsque nous avons traité l'influence du point d'injection sur la réponse transitoire non seulement sur une grille mais également sur une électrode horizontale. En effet, il est conseillé d'injecter le courant au centre lorsqu'il s'agit de configurations symétriques, c'est le cas d'une grille contenant plusieurs mailles et d'une électrode horizontale.

Le dernier travail concerne l'injection d'une impulsion bi-exponentielle d'une tension de forte amplitude. Le système de terre consiste en une électrode horizontale. Deux types de sols ont été considérés. Le premier est homogène ; moyennement ou fortement résistif. Le second comporte deux couches ; la couche supérieure (respectivement inférieure) est moyennement (respectivement fortement) résistive. Pour le sol homogène, nous avons choisi deux résistivités (moyenne et forte). Nous avons présenté les ondes de courant et de potentiel comme réponses transitoires. Les allures de telles ondes sont conservées impulsives. Pour le sol fortement résistif, des oscillations prennent naissance. Les phénomènes d'ionisation du sol et du couplage mutuel diminuent les amplitudes de ces ondes. Cette diminution est accompagnée par un léger retard dans le temps de montée. Pour le sol stratifié, les mêmes constatations ont été enregistrées sauf que les caractéristiques se situent entre celles obtenues respectivement pour un sol moyennement et fortement résistifs. Nous avons comparé, dans les mêmes conditions, nos résultats de simulation avec ceux trouvés par Sekki et al., une très bonne concordance a été obtenue. Toutefois, nos temps d'exécution sont beaucoup plus réduits que ceux annoncés par Sekki et al. Par ailleurs, les conclusions susmentionnées restent valides lors de l'utilisation d'une électrode verticale.

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] M. Aguet and M. Lanoz, *Haute tension*, vol. 22 of 22. Traité d'électricité, 2 ed., 1991.
- [2] E. Kuffel, W. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering*, vol. 2. Great Britain, 2000.
- [3] Benoît. de Metz-Noblat, *La foudre et les installations électriques HT*, vol. 168. Cahier Technique Merlin Gerin, juillet 1993.
- [4] A. P. S. Meliopoulos, *Power system grounding and Transients*. MARCEL DEKKER, 1988.
- [5] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Methodology and technology for power system grounding*. John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd, 2013.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] D. Grenier, "Electromagnétisme et transmission des ondes," *Université Laval Québec*, 2005.
- [9] 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.
- [10] B. HARRAT, *Caractérisation et Optimisation Numérique d'une Mise à la Terre*. Thèse de doctorat en sciences, Université de Jijel, Avril 2008.
- [11] 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*.
- [12] 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.
- [13] D. Sekki et al., "Transient behaviour of grounding system in a two-layer soil using the transmission line theory," *Original scientific paper*, 2014.

- [14] G. Vijayaraghavan, M. Brown, and M. Barnes, *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*. IDC Technologies, 2004.
- [15] B. Claude, "Principes de conception et de réalisation des mises à la terre," *EDF-Centre des études et recherches*, Janvier 1984.
- [16] C. Esobinenwu, B. Akinwole, and C. Omeje, "Earth mat design for 132/33kv substation in rivers state using etap," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 15, Sep 2014.
- [17] Y. Chow and M. Salama, "A simplified method for calculating the substation grounding grid resistance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, April 1994.
- [18] Department of Defense USA, *MILITARY HANDBOOK Gounding - Bonding - and Shielding*, vol. 2. Electronic equipments and facilities - D.D.USA, Dec 1987.
- [19] IEEE. Standard. 80-2000, "Ieee guide for safety in ac substation grounding," *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2000.
- [20] E. B. Joffe and K.-S. Lock, *Ground for grounding*. Wiley, 2010.
- [21] G. F. Tagg, *Earth resistances*. George Newnes, 1964.
- [22] E. D. Sunde, *Earth conduction effets in transmission systems*. Bell Telephone Laboratories incorporated, New York, 1968.
- [23] A. C. Liew and M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths," *Proc, IEE.*, vol. 121, February 1974.
- [24] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, "Transient analysis of grounding systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, Feb 1983.
- [25] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency dependent characteristics of grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PWRD-2, Oct 1987.
- [26] M.Ramamoorthy, M. Narayanan, S.Parameswaran, and D.Mukhedkar, "Transient performhance of grounding grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, Oct 1989.
- [27] L. Grcev and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems," *IEEE Transactionson Power Delivery*, vol. 5, November 1990.
- [28] F. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors : part i - signale conductor," *IEEE PWRD*, vol. 4, 1986.
- [29] F. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors : part ii-ground networks," *IEEE PWRD*, vol. 4, 1986.
- [30] 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.
- [31] C. Mazzetti and G. M. Veca, "impulse behavior of grounding electrodes," *IEEE Transactions on power apparatus*, vol. PAS-102, no. 9, 1983.

- [32] 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.
- [33] F. Heidler, J.M. Svetic., and B. V. Stanic, "Calculation of lightning current parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, 1997.
- [34] G. Diendorfer and M. A. Uman, *An improved return stroke model with specified channel base current*, vol. 95. *Journal of Geophysical Research*, 1990.
- [35] 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.
- [36] F. Delfino et al., "An algorithm for the exact evaluation of the underground lightning electromagnetic fields," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, 2007.
- [37] 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.
- [38] R. Andolfato, L. Bernadi, and L. Fellin, "Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method," *IEEE*, vol. 15, July 2000.
- [39] A. Boubakeur, "Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical," *École Nationale Polytechnique d'Alger*, 2014.
- [40] W. Group, "Guideline for numerical electromagnetic analysis method and its application to surge phenomena," *Cigré WG C4.501*, June 2013.
- [41] G. Celli and F. Pilo, "A distributed parameter model for grounding systems in the pscad/emtdc environment," *IEEE*, 2003.
- [42] K. Nacereddine magister en electrotechnique, *Ecole nationale polytechnique d'Alger*, Décembre 1992.
- [43] G. technique Merlin Gerin, "guide de conception mt," *Schneider Electric Industrie SA*, Mars 2000.
- [44] P. Dunand, *Protection des installations électriques contre la foudre*. Dunod, Paris 2003.
- [45] A. Rousseau, C. Gary, and G. Berger, "Foudre et protection des bâtiments," *Technique de l'Ingénieur*, vol. c 3 307, 2000.
- [46] IEEE. Std. 665-2000. (R2001), "Ieee guide for generating station grounding," *Energy Development and Power Committee of the IEEE Power Engineering Society*, 1996.
- [47] A. SABOT and J. Michaud, "Lignes et postes : Choix et coordination des isollements," *Techniques de l'ingénieur*, vol. D 4 750, 2003.
- [48] F. Maciela, "Parafoudre," *Techniques de l'ingénieur*, vol. D 4 755, 2003.
- [49] Guide technique, "La protection contre les surtensions," *Schneider Electric*, 2010.

- [50] M. Graciet and J. Pinel, *Protection contre les perturbations : Origines des perturbations*, vol. D 5 172. Techniques de l'ingénieur : Traité génie électrique, 1998.
- [51] L. Venanzi, *Règlements générales sur les installations électriques*. Edi. pro, Belgique, 2014.
- [52] D. Brown and D. Harrold, *Control Engineering, Control system power and Grounding Better practice*. Elsevier, 2004.
- [53] L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT, "Caractéristiques Électriques du sol," *ITU : Union Internationale des Télécommunications*, 2002.
- [54] J. A. Saxton and J. A. Lane, *Electrical properties of sea water, 349*, vol. 29. Wireless Eng, Oct 1952.
- [55] H. J. Albrecht, "Über den einfluss von elektrischen erdbodeneigenschaften und meteorologischen parametern auf praktische feldstärkeberechnungen bei kurzwellenausbreitung (influence des caractéristiques électriques du sol et des paramètres météorologiques sur les calculs pratiques du champ dans la propagation des ondes décimétriques)," *Arch. Met. Geophys. Bioklim. ser A*, vol. 13, 1963.
- [56] A. Blomquist, "Propagation of radio waves, the influence of the earth's surface," *Education course of the national defense research institue*, Stockholm, Suède 1968.
- [57] R. H. Doherty and J. R. Johler, *Meteorology influence on LORAN-C ground-wave propagation*, vol. 37. J. Atmos, 1973.
- [58] O. Koskenniemi and J. Laiho, *Mesure de la conductivité effective du sol finlandais : en ondes kilométrique et hectométriques*, vol. 153. Rev. l'UER (Technique), 1975.
- [59] J. Sevick, "Short ground-radial systems for short verticals," *QST LXII*, 1978.
- [60] A. Blomquist, "Local ground-wave field strength variation in the frequency range 30-1000 mhz," *Conference on electromagnetic wave propagation*, vol. 127, Bruxelles 1958.
- [61] P. L. Rice, "Some effects of buildings and vegetation on vhf/uhf propagation," *IEEE, Mountain-west conference on electromagnetic compatibility*, Tucson, Arizona : USA 1971.
- [62] T. Tamir, "Radio-wave propagation in forest environments," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. AP-15, no. 6, 1967.
- [63] B. Lacroix and R. Calvas, "Les schémas des liaisons à la terre en bt (régimes du neutre)," *Cahier technique - Schneider Electric*, vol. 172, Mars 2002.
- [64] F. Sautriau, "mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension)," *Cahier Technique Merlin Gerin*, vol. 62, Sep 1991.
- [65] J.-N. FIORINA, "Protection des personnes et alimentations statiques," *Cahier Technique Schneider Electric*, vol. 192, Sep 2004.
- [66] B. Lacroix and R. Calvas, "Les schémas des liaisons à la terre dans le monde et évolutions," *Cahier Technique - Schneider Electric*, vol. 173, Sep 1998.

- [67] W. Neudorf, "Mise à la terre : principe - mesures - techniques et applications," *LEM Instruments, Autriche*, vol. A 9941 5 F, 2006.
- [68] M. A. Laughton and D. J. Warne, *Electrical Engineer's Reference Book*, vol. 6. Elsevier Science, 2003.
- [69] K.O. Abledu and D. N. Laird, "Measurement of substation rock resistivity," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 7, Jan 1992.
- [70] B. Thapar, V. Gerez, A. Dalakrislman, and D. A. Blank, "Evaluation of ground resistance of a grounding grid of any shape," *IEEE Transactionson Power Delivery*, vol. 6, April 1991.
- [71] 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.
- [72] G. Marquis, *Prospection électrique*. EOST Strasbourg, 19 Avril 2005.
- [73] H. Ghazi et al., "Earth surface potential and grounding resistance for grounding grid in two layer model soil," *IEEE*, 2012.
- [74] C. J. Blattner, "Study of driven ground rods and four point soil resistivity tests," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1989.
- [75] L. V. Bewley, *Theory and tests of the counterpoise*. A.I.EE. committee, 1934.
- [76] F. Lattarulo, *Electromagnetic Compatibility in Power Systems*. Elsevier Ltd, 2007.
- [77] Harrington and F. Roger, *Field Computation by Moment Methods*. Macmillan, New York, 1968.
- [78] J. Guo et al., "An interpolation model to accelerate the frequency-domain response calculation of grounding systems using the method of moments," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, 2006.
- [79] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, 1966.
- [80] R. Xiong, B. Chen, C. Gao, Y. Yi, and W. Yang, "FDTD calculation model for the transient analyses of grounding systems," *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, vol. 56, October 2014.
- [81] P. T. Vu, N. B. Huynh, and D. K. Nguyen, "Simulation of lightning-transient responses of grounding systems using the rbf-fdtd method," *IEEE*, 2012.
- [82] R. Harrington, "Origine and development of the method of moment for field computation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, June 1990.
- [83] T. K. Sakar, "A note on the choice weighing functions in the method of moments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 33, April 1985.

- [84] L. Qi et al., "Grounding performance analysis of the substation grounding grids by finite element method in frequency domain," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 4, 2007.
- [85] W. Xiong, F. P. Dawalibi, and A. Selby, "Frequency response of substation ground systems subject to lightning strikes," *GIGRE International Symposium, Power System Electromagnetic Compatibility*, Switzerland, Lausanne 1993.
- [86] G. Celli and F. Pilo, "A distributed parameter model for grounding systems in the pscad/emtdc environment," *IEEE*, 2003.
- [87] B. Stout, "Méthodes numériques de résolution d'équations différentielles," *Université de Provence*, 2007.
- [88] V. Cooray, "Lightning protection," *The institution of engineering and technology*, 2009.
- [89] S. Yu et al., "Time domain analysis method of lightning transient characteristics of grounding electrode," *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, China*, 2003.
- [90] F. Terman, *Radio Engineer's Handbook*. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1943.