

**CONTRIBUTION A LA DETERMINATION DE LA
DISTANCE MINIMALE D'APPROCHIE
ENTRE PRISES DE TERRE DE TYPE PIQUET EN MILIEU
HETEROGENE**

THESE DE DOCTORAT

Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité: Electrotechnique

présentée et soutenue publiquement par :

Karimou CHABI-SIKA

le 08 Decembre 1997, à l'Université Nationale du Bénin

devant le jury composé de:

Président : Dr. Côme GOUDJO, Maître de Conférences, Université Nationale du Bénin.

Rapporteurs : Dr. Jean BARRAL, Maître de Conférences, Université Nationale du Bénin

Dr. Emmanuel TONYE, Maître de Conférences, Université de Yaoundé
(Cameroun)

Examineurs : Dr. Norbert M. HOUNKONNOU, Maître de Conférences, Université Nationale du Bénin.

Dr. Antoine VIANOU, Maître de Conférences, Université Nationale du Bénin.

Dr. Kassien HOUNKONNOU, Enseignant à l'Ecole Supérieure Inter africaine de Bingerville
(Cote-d'Ivoire)

Directeur : Professeur Jean-Marie KAUFFMANN, Université de Franche-Comté (France)

RESUME

Le passage des courants de foudre de fortes amplitudes dans les prises de terre des matériels MT ou des neutres BT entraîne des problèmes d'interférence entre ces dernières et les prises de terre des installations de télécommunication ou autres systèmes comportant de l'électronique. L'apparition de surtensions peut devenir extrêmement dangereuse pour les installations électroniques. L'élaboration de méthode d'analyse et de quantification de ces surtensions transitoires dues au coup de foudre est d'une grande importance dans la protection d'ensemble de ces systèmes.

Dans ce mémoire, les phénomènes physiques qui se déroulent lors du passage d'un courant de foudre dans le sol à travers une prise de terre en forme de piquet sont traduits en terme de rayonnement et de diffusion. Sur la base de certaines simplifications dont les limites de validité sont données, la propagation de l'onde de courant est décrite par l'équation de la diffusion du courant dans le sol. Cette équation est résolue par la méthode des éléments finis par utilisation du logiciel FLUX2D. Les conditions aux limites sont définies grâce à la résolution de l'équation des télégraphistes en utilisant la transformée inverse de Laplace.

Grâce à l'interfaçage de FLUX2D avec le code LAPIN, on détermine la distribution de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol. De cette connaissance de la répartition de la montée en potentiel transitoire est déduite la Distance Minimale d'Approche (DMA).

Pour prendre en compte l'ionisation du sol, une modélisation originale par un "rayon fictif modifié" a été introduite. La méthode a été mise au point pour un sol homogène puis étendue à un milieu hétérogène modélisé par un sol à deux couches. Des résultats de simulation, quelques recommandations pratiques pour une amélioration de la protection des installations contre les effets indirects de la foudre sont faites.

AVANT PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre d'une convention de recherche entre la Société Béninoise d'Electricité et d'Eau (SBEE), l'Office des Postes et Télécommunication (OPT) et le Collège Polytechnique Universitaire (CPU). Je souhaite que ce mémoire réponde, au moins en partie, aux attentes de chacune des parties contractantes.

Ces trois années de thèse n'auraient pas abouti sans la participation directe de nombreuses personnes. Je tiens à leur adresser ici mes sincères remerciements et tout particulièrement à :

Monsieur J. M. KAUFFMANN, Professeur à l'Université de Franche Comté, Directeur de l'Institut de Génie Energétique (IGE), pour la confiance et l'encadrement tout au long de cette thèse, et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être mon directeur de thèse ;

Monsieur E. TONYE, Maître de Conférences à l'Université de Yaoundé, pour m'avoir aiguillonné vers cet axe de recherche et pour sa participation au Jury ;

Monsieur J. BARRAL, Directeur du Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Techniques Industrielles (LERTI) pour la confiance et la latitude d'action qu'il m'a accordé dans l'encadrement de ces travaux ;

Monsieur S. ADEDJOURA pour les soutiens académiques et scientifiques ;

Messieurs D. ADADJA et B. AGNAN respectivement ex-Directeur Général et Directeur Général de l'OPT, qui ont été les initiateurs de ce projet de recherche dans lequel s'inscrivent ces travaux ;

Messieurs P. HOUNKPATIN, G. CHEKETE, A. R. TAMAMA et C. KOHOUE, respectivement ex-Directeurs Généraux et Directeur Général de la SBEE, qui également ont été les initiateurs de ce projet de recherche dont ce mémoire en est partie intégrante ;

Messieur A. S. AKINDES et A. TCHABI, respectivement ex-Directeur et Directeur du CPU, pour avoir consacré une importante partie de leur précieux temps à la mise en place du projet de recherche OPT-CPU-SBEE ;

Fonds FICU de l'AUPELF-UREF pour son soutien financier ;

Groupe d'Amnesty International de Belfort, qui m'a comblé d'un confort humanitaire inestimable durant tout mon séjour à Belfort ;

L'ensemble des docteurs, futurs docteurs et DEA de l'IGE pour l'ambiance chaleureuse de travail et de soutien mutuel ;

Enfin, mes parents pour leur soutien constant, mon épouse Abiba et mes enfants Nadiathe et Wassiyi pour avoir accepté de si longues absences.

NOTATIONS

j	densité de courant
C	capacité en F/m
G	perditance en S/m
ρ	résistivité du sol
a	diamètre de piquet de terre
D	diamètre d'action
ϵ_r	permittivité relative du sol
ϵ_0	permittivité du vide
R_s	résistance de prise de terre
ℓ	longueur de piquet de terre
μ_0	perméabilité du vide
ρ_{Cu}	résistivité du cuivre
E	champ électrique
E_c	champ critique d'ionisation du sol
J	densité de courant
R_i	valeur de résistance de terre pour une même valeur du rayon de piquet.
z	coordonnées à la surface du sol
R_c	rayon instantané fictif du piquet de terre (m)
k_{ab}	coefficient de couplage
\vec{B}	induction magnétique (T)
\vec{D}	induction électrique
ρ_c	capacité thermique (J / m ³ / K)
k	conductivité thermique (W/m/K)
P	puissance thermique
T	température en degré Kelvin
G_r	rapport de la constante de longueur d'onde du sol sur celle du vide
ρ_1	résistivité de la première couche du modèle de sol à deux couches
ρ_2	résistivité de la seconde couche du modèle de sol à deux couches
h	hauteur de la première couche du modèle de sol à deux couches (m)
ϵ_{11}	permittivité relative de la première couche du modèle de sol à deux couches
ϵ_{12}	permittivité relative de la seconde couche du modèle de sol à deux couches
Z_1	impédance linéique de la première couche du modèle de sol à deux couches
Z_2	impédance linéique de la seconde couche du modèle de sol à deux couches

NOTATIONS

E_{rad}	est le champ électrique vertical
V_0	vitesse du canal de foudre;
I	le courant à la base du canal
c	vitesse de la lumière
D_0	distance horizontale du canal de foudre
t	temps
N_1	niveau kéraunique
N_s	densité de coups de foudre au sol par km^2 et par an
I_0	facteur d'amplitude,
τ_q	constante de temps de queue
τ_f	constante de temps de front
T_c	durée jusqu'à la crête
I_c	valeur de crête
T_b	durée jusqu'à la mi-amplitude
Φ_1	probabilité qu'a un coup de foudre de dépasser l'intensité I
D_1	distance d'amorçage
i	courant de foudre injecté l'entrée du piquet de terre
v	montée en potentiel due au courant de foudre injecté
S	-section de conducteur
dl	longueur de conducteur;
Ω	volume de conducteur
φ	potentiel scalaire magnétique total
w	fonction de poids du potentiel scalaire pour l'élément de volume
\dot{w}	fonction de poids du potentiel vecteur pour l'élément de volume
\vec{A}	potentiel vecteur magnétique
w_l	fonction poids du potentiel scalaire pour l'élément de ligne;
\vec{W}_l	fonction poids du potentiel vecteur pour l'élément de ligne.
λ	constante de longueur d'onde ;
Z_c	l'impédance caractéristique de la ligne
Z	impédance en $\Omega.m$
R	résistance en Ω/m
L	inductance en H/m
ω	pulsation

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	I
NOTATIONS	VI
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : LA Foudre ET LES PROTECTIONS DES INSTALLATIONS	7
INTRODUCTION	9
I.1. LA Foudre ET LES PHENOMENES ORAGEUX	10
I.1.1. La distribution statistique des orages - Sévérités orageuses	10
I.1.1.1. Le niveau céramique	10
I.1.1.2. Définition du foudroiement	12
I.1.1.3. Facteurs locaux influençant le foudroiement	14
I.1.2. Les phénomènes précurseurs : le nuage orageux	15
I.1.3. Classification et description de la foudre	16
I.1.3.1. Classification de la foudre	16
I.1.3.2. Description d'un coup de foudre	18
I.1.4. Paramètres électriques des coups de foudre	19
I.1.4.1. Formes des composantes impulsionnelles de la foudre	19
I.1.4.2. Choc de foudre	20
I.1.4.3. Distribution des amplitudes	21
I.1.4.4. Distribution des raideurs de front	22
I.1.4.5. Les autres grandeurs électriques caractérisant la foudre	23
I.1.5. Le mécanisme d'impact et le modèle électromagnétique	23
I.1.5.1. Le mécanisme d'impact	23
I.1.5.2. Le modèle électromagnétique	24
I.2. FONCTIONS DES RESEAUX DE TERRE	25
I.2.1 Définition d'un réseau de terre	25
I.2.2. Fonctions des réseaux ou des prises de terre	25

NOTATIONS

G_1	perditance de la première couche du modèle de sol à deux couches
G_2	perditance de la seconde couche du modèle de sol à deux couches
C_1	capacité linéique de la première couche du modèle de sol à deux couches
C_2	capacité linéique de la seconde couche du modèle de sol à deux couches
γ_1	constante de longueur d'onde de la première couche du modèle de sol à deux couches
γ_2	constante de longueur d'onde de la seconde couche du modèle de sol à deux couches
Z_{c1}	impédance caractéristique de la première couche du modèle de sol à deux couches
Z_{c2}	impédance caractéristique de la seconde couche du modèle de sol à deux couches

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA PROPAGATION DE L'ONDE DE Foudre

SUR UN PIQUET DE TERRE47

II.1. INTRODUCTION 49

II.2. DIFFERENTES APPROCHES DE MODELISATION DES SYSTEMES DE
PRISE DE TERRE 50

 II.2.1. Méthode de la théorie des circuits 50

 II.2.2. Méthode de la théorie des lignes 51

 II.2.3. Méthode de la théorie du champ électromagnétique 53

 II.2.4. Méthode des éléments finis 55

II.3. ETUDE DE LA PROPAGATION DU COURANT DE Foudre SUR UN
PIQUET DE TERRE DANS UN MILIEU HOMOGENE 58

 II.3.1. Calcul de l'impédance impulsionnelle Z_t de la prise de terre 58

 II.3.2. Constantes linéiques d'une prise de terre59

 II.3.2.1. Calcul de la perdittance G linéique 59

 II.3.2.2. Calcul de la capacité linéique C 60

 II.3.2.3. Calcul de l'impédance linéique Z 60

 II.3.3. Equation de la propagation dans le cas d'une injection de courant61

II.4. APPLICATION DU CODE LAPIN 63

 II.4.1. Influence de la longueur du piquet sur la montée en potentiel au point
d'injection du courant64

 II.4.2. Evolution de la montée en potentiel $v(x,t)$ sur différents points du piquet
de terre 66

 II.4.3. Influence de la forme de l'onde de courant 75

 II.4.4. Influence de la permittivité du sol 78

 II.4.5. Calcul de la répartition du courant80

II.5. MODELISATION DE L'IONISATION DU SOL 82

 II.5.1. Notions fondamentales 82

 II.5.2. Modélisation par rayon fictif et simulation 85

 II.5.3. Modélisation par rayon fictif modifiée et simulation 87

 II.5.4. Résultats 94

I.2.2.1. Protections des personnes et des animaux	26
I.2.2.2. Protection des installations de puissance	26
I.2.2.3. Protection des installations fonctionnant à bas niveaux	26
I.2.2.4. Potentiel de référence	27
I.3. ETUDE GEOLOGIQUE DU SOL	27
I.4. PROTECTION DES INSTALLATIONS CONTRE LA Foudre PAR LES MISES A LA TERRE A L'OPT ET A LA SBEE	28
I.4.1. Protection des installations de télécommunications contre la foudre par les mises à la terre	28
I.4.1.1. Les sources de perturbations	28
I.4.1.2. Les modes de couplage	29
I.4.1.2.1. Couplage résistif	30
I.4.1.2.2. Couplage capacitif	31
I.4.1.2.3. Couplage inductif	31
I.4.1.2.4. Couplage radioélectrique	32
I.4.1.3. Protection	32
I.4.1.3.1. Dispositif de parasurtension	32
I.4.1.3.2. Prise de terre	34
I.4.2. Protection contre la foudre par les mises à la terre à la SBEE et à la CEB	35
I.4.2.1. Circuits et prises de terre des postes HT/MT	35
I.4.2.2. Terre des postes MT/BT	36
I.4.2.3. Terre du neutre BT	36
I.4.3. Problèmes d'influence entre les prises de terre : notion de Distance Minimale d'Approche (DMA)	39
I.4.3.1. Problème de DMA au niveau des transformateurs M ^T /BT	40
I.4.3.2. Problème de DMA au niveau de l'OPT	42
I.4.4. Conclusion	45

II.5.4.1. Variation de la montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant	94
II.5.4.2. Variation de la résistivité du sol dans le cas de la modélisation par rayon fictif modifiée	97
II.6. CONCLUSION	98
CHAPITRE III : ETUDE DE LA MONTEE EN POTENTIEL TRANSITOIRE	101
III.1. INTRODUCTION	103
III.2. REPARTITION DES POTENTIELS AUTOUR DES PRISES DE TERRE EN REGIME STATIQUE	104
III.3. PROPAGATION DU COURANT DANS LE SOL	107
III.3.1. Equation de diffusion du courant dans le sol	107
III.3.2. Erreur liée à l'équation de diffusion du courant	109
III.4. RESOLUTION DE L'EQUATION DE DIFFUSION DU COURANT : DETERMINATION DE LA REPARTITION DE LA MONTEE EN POTENTIEL TRANSITOIRE A LA SURFACE DU SOL	111
III.4.1. Représentation du piquet de terre	112
III.4.2. Interface FLUX2D - CODE LAPIN	114
III.4.3. Maillage et pas de calcul	115
III.4.4. Influence de la longueur du piquet sur la répartition de la montée en potentiel à la surface du sol (sans prise en compte de l'ionisation)	116
III.4.5. Influence de la profondeur d'enfouissement sur la répartition (sans prise en compte du phénomène d'ionisation)	120
III.4.6. Détermination de la DMA.....	122
III.5. CONCLUSION	130
CHAPITRE IV : ETUDE DE LA PRISE DE TERRE DANS UN MODELE DE SOL A DEUX COUCHES	131
IV.1. INTRODUCTION	133
IV.2. MODELE DE SOL A DEUX COUCHES	134

IV.2.1. Définition du modèle de sol à deux couches en régime transitoire ..	134
IV.2.2. Modélisation du piquet de terre dans le modèle à deux couches	136
IV.3. ETABLISSEMENT DES EXPRESSIONS ANALYTIQUES DES ONDES DE TENSION ET DE COURANT	136
IV.4. RESULTATS DE SIMULATION	139
IV.4.1. Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant	139
IV.4.2. Influence de la longueur du piquet sur la montée en potentiel transitoire $v(x,t)$ le long du piquet	144
IV.4.3. Etude de l'évolution du courant	151
IV.4.4. Influence de la permittivité du sol sur la montée en potentiel au point d'injection du courant	155
IV.4. ETUDE DE LA DISTANCE MINIMALE D'APPROCHE	157
IV.4.1. Influence de la longueur du piquet	157
IV.4.2. Influence de la profondeur d'enfouissement du piquet dans le sol ..	161
IV.5. ETUDE DU PHENOMENE D'IONISATION	164
IV.5.1. Modélisation	164
IV.5.2. Simulation de la diffusion du courant de foudre	164
IV.5.2.1. Modélisation de l'ionisation du sol hétérogène	164
IV.5.2.2. Simulation de la répartition de la montée en potentiel transitoire : courbes d'atténuation	165
IV.5.2.3. Calcul de la DMA	166
IV.6. CONCLUSION	169
CONCLUSION GENERALE	171
BIBLIOGRAPHIE	177
ANNEXES	189

INTRODUCTION

Le thème de ce travail de recherche nous a été proposé dans le cadre d'un contrat de recherche entre La Société Béninoise d'Electricité et d'Eau (SBEE) et l'Office des Postes et Télécommunications (OPT) et notre Institution. Le Bénin comme une partie importante de l'Afrique tropicale a un taux élevé d'activité kéraunique et certaines régions sont plus touchées que d'autres. Il s'en suit de nombreuses perturbations et dans le réseau de distribution d'énergie que dans celui des télécommunications.

Nous nous plaçons, dans le cadre de ce mémoire, dans les conditions particulières du Bénin où la grande majorité des prises de terre sont réalisées avec des piquets. Nous nous intéressons plus précisément à l'interaction entre les deux systèmes de prises de terre et à l'incidence de cette dernière lors d'un passage de coup de foudre. L'optique est de définir à partir d'études sur la propagation des coups de foudre, des règles pratiques d'installation des prises de terre.

De nombreux travaux ont été menés dans le domaine des coups de foudre et des prises de terre dont les plus marquants sont cités dans la bibliographie. Nous proposons une méthode combinée de détermination de la montée en potentiel à la surface du sol, associant la théorie des lignes et la méthode des éléments finis et prenant en compte l'ionisation du sol dans le cas d'un milieu homogène et d'un modèle de sol à deux couches.

Ces travaux sont indispensables car les règles en usage dans les communautés de transport et de distribution d'énergie d'une part, et des télécommunications d'autre part relèvent de l'empirisme. L'inexistence de coordination systématique entre les deux entités entraîne des malentendus.

Longtemps laissées à l'empirisme, les mises à la terre ont fini par bénéficier d'une attention soutenue de la communauté scientifique internationale. Cet intérêt peut en partie s'expliquer par le fait que l'introduction massive de l'électronique dans les télécommunications en remplacement des robustes systèmes électromécaniques, et la miniaturisation de plus en plus poussée de ces systèmes électroniques s'accompagnent d'une sensibilité plus accrue aux perturbations. Aussi, la notion même de risque lié à une contrainte d'environnement comme la foudre est de plus en plus mal tolérée par l'utilisateur

puisque les nouvelles technologies sont en principe porteuses d'un fort espoir de meilleur confort.

Les enquêtes techniques menées sur le terrain ont clairement établi qu'à l'OPT, la principale source de perturbations électromagnétiques est la foudre, les installations de la SBEE constituant les vecteurs privilégiés. On ne s'aurait mieux combattre ces perturbations si le manque de méthodes rationnelles d'étude et d'analyse persiste. Ce mémoire est donc une contribution dans la prise en compte des contraintes de compatibilité électromagnétique dans la conception et de l'utilisation des prises de terre comme éléments de protection contre les perturbations dans les systèmes électriques et de télécommunications.

Le réseau de terre d'une installation électrique ou de télécommunication doit assurer simultanément plusieurs fonctions : écouler dans le sol des courants de défauts et de foudre, assurer à tout moment la sécurité des personnes et des biens et maintenir un potentiel de référence ; la notion d'équipotentialité est la première caractéristique recherchée de l'ensemble du réseau et du circuit de terre. Si cette équipotentialité s'obtient plus simplement en régime statique ou fréquence industrielle, c'est loin d'être le cas en régime transitoire.

L'écoulement d'un courant transitoire intense par une prise de terre fait apparaître deux types de phénomènes :

- une rupture de l'équipotentialité par un accroissement de la montée en potentiel transitoire de la prise de terre au-delà du produit du courant écoulé par la résistance de terre. Cet effet, dû à la self inductance des conducteurs de terre et à la capacité du sol, joue d'autant plus que les variations du courant sont rapides, que la prise de terre est étendue et que la résistivité de la prise de terre est élevée.
- une réduction de la valeur maximale de la montée en potentiel transitoire de la prise de terre, due à des claquages dans le sol et au voisinage des conducteurs de terre. Cet effet joue d'autant plus que l'amplitude du courant est grande, que l'étendue de la prise de terre vue du point d'injection du courant est petite et que la résistivité du sol est grande.

De façon spécifique, deux types de problèmes sont à résoudre :

1. La base de toute protection contre les surtensions est le réseau de terre équipotentiel, l'équipotentialité étant entendue comme l'impossibilité d'apparition d'une différence de potentiel gênante entre deux éléments voisins de l'installation. Pour atteindre une telle équipotentialité, l'OPT suggère que ces prises de terre voisines de celles de la SBEE soit interconnectées en réseaux de terre locaux. La SBEE reste réticente pour la simple raison qu'elle ne sait pas à l'avance les conséquences d'une telle mesure en cas de passage de courant de foudre et ne voudrait pas porter la responsabilité des conséquences évidemment inconnues en cas de circulation de courant de foudre. Est-il judicieux d'interconnecter les prises de terre de télécommunication et celles des réseaux d'énergie ?
2. Veiller à ce qu'un système donné (ici en occurrence les installations de la SBEE) ne soit pas une source de perturbations pour les installations de télécommunications. En terme plus moderne, il s'agit donc d'un problème de compatibilité électromagnétique qui, selon la définition du Comité 77 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est << l'aptitude d'un appareil, équipement ou système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement>>. Assurer la compatibilité électromagnétique entre équipements reviendrait en fait à limiter les phénomènes perturbateurs à une valeur raisonnable, et à doter les appareils, les équipements et les systèmes d'un degré d'immunité raisonnable soit par construction ou en prenant pour leur installation des précautions convenables. Pour des raisons économiques, il n'est pas possible d'installer systématiquement des systèmes de protection sur toutes les installations de protection. De même, il est techniquement inadmissible de ne pas installer de protection lorsque le degré de risque est élevé. Mais faudra-t-il avoir les moyens d'appréciation de ce degré de risque! C'est bien le second ordre de problème que nous abordons dans nos travaux.

L'approche d'étude électromagnétique de la foudre s'applique aussi bien aux perturbations par conduction que par rayonnement, et l'équation de propagation de l'onde de foudre dans

le sol utilisée décrit clairement ces deux phénomènes. Notre étude est guidée par la démarche théorique suivante :

- définition et caractérisation des sources de perturbations sous forme d'une onde de courant de type bi-exponentiel ;
- prise en compte de la nature hétérogène des milieux abritant les prises de terre ;
- appréhension du type d'interaction électromagnétique pour découpler le problème et simplification au seul phénomène de diffusion avec recherche des limites de validité ;
- choix du logiciel FLUX2D et du code LAPIN comme outils d'analyses.

C'est suivant cette démarche théorique que ce mémoire va s'attacher à développer une méthodologie d'étude et à l'appliquer dans la définition des Distances Minimales d'Approche (DMA) entre les réseaux électriques de la SBEE et ceux de l'OPT. Les résultats attendus feront partie intégrante de la Convention de recherche appliquée sur les prises de terre qui lie depuis 1995, l'Office des Postes et Télécommunications (OPT), la Société Béninoise d'Electricité et d'Eau (SBEE) et le Collège Polytechnique Universitaire (CPU).

Le mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente dans leurs généralités l'onde de foudre, sa caractérisation, les techniques actuelles de protection contre ses effets directs et indirects, et se termine par une exposition de la problématique de la DMA entre prises de terre de systèmes d'énergie électrique par rapport à ceux de télécommunications.

Dans le deuxième chapitre, les différentes méthodes d'étude de la propagation des surtensions sont évoquées et commentées, notamment celle utilisées dans le code LAPIN. Sont introduites, les trois principales méthodes de calcul des prises de terre en régime impulsionnel : la méthode de la théorie des antennes, la méthode des éléments finis et la méthode de combinaison de la théorie des lignes et des éléments finis.

Le chapitre 3 présente l'établissement de l'équation de la diffusion du courant dans le sol et son utilisation par le logiciel FLUX2D dans la détermination de la répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol.

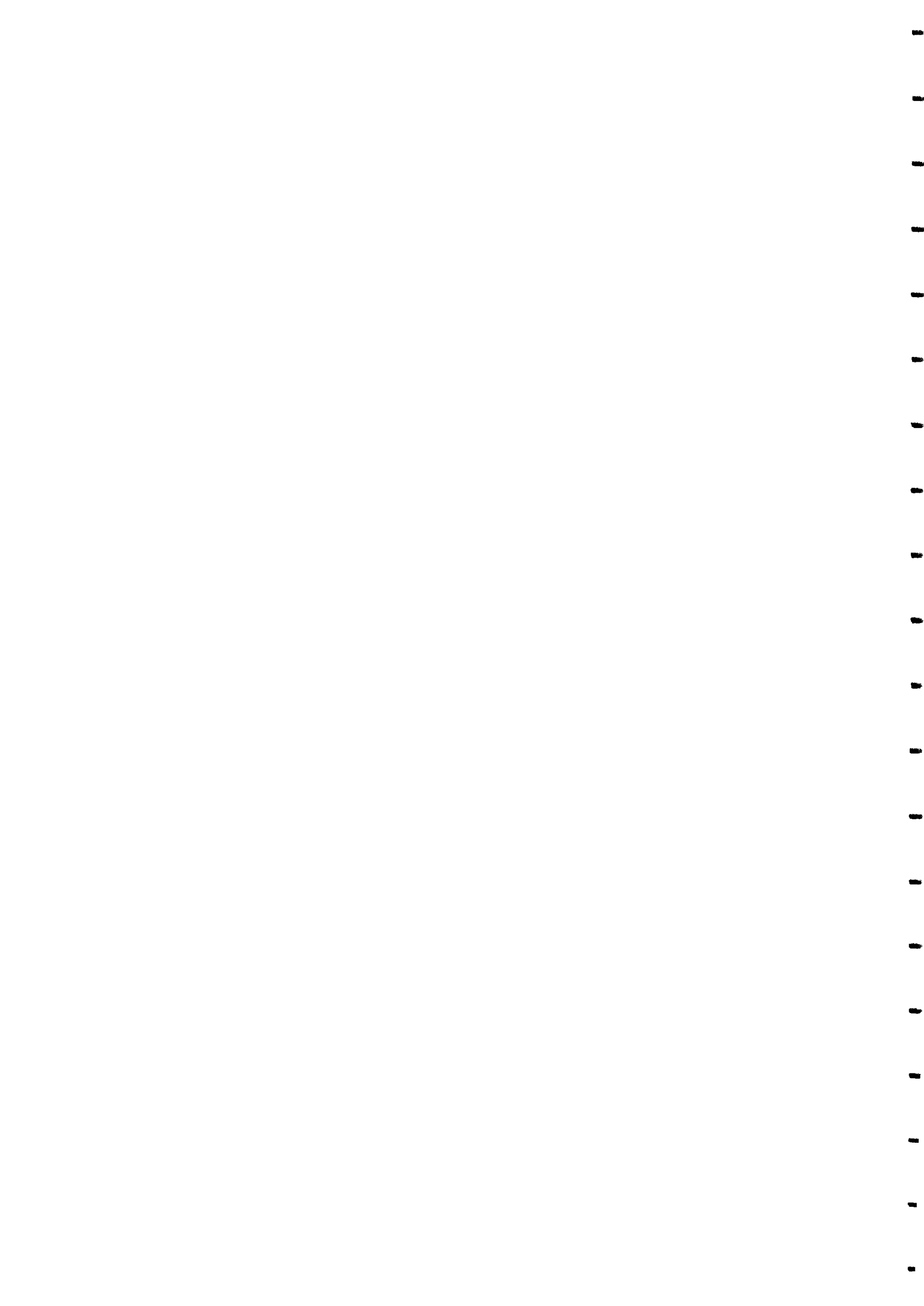
Le chapitre 4 est consacré à la prise en compte de l'hétérogénéité du sol par l'utilisation du modèle de sol à deux couches dans le calcul de la répartition de la montée en potentiel transitoire et la détermination de la DMA.

Enfin, la conclusion résume les principaux apports de ces travaux et donne quelques perspectives sur les développements à poursuivre afin de rapprocher au mieux la méthodologie de calcul de DMA introduite aux risques réels qui accompagnent la cohabitation souvent inévitable entre les prises de terre de la SBEE et celles de l'OPT.



CHAPITRE I

LA Foudre ET LES PROTECTIONS DES INSTALLATIONS



INTRODUCTION

En physique de l'atmosphère, l'important dans l'étude de la foudre est de saisir les phénomènes physiques fondamentaux qui se développent au cours de la formation d'un orage, puis du déclenchement d'un éclair ou d'un coup de foudre. En sciences de l'ingénieur, ce qui préoccupe dans l'étude de la foudre, c'est finalement l'établissement des moyens de protection efficace contre ce phénomène.

C'est dans l'esprit des sciences de l'ingénieur que s'articule ce mémoire. Il nous semble utile de rappeler ici quelques notions sur la foudre et de définir quelques concepts utilisés par les ingénieurs dans la conception des systèmes de lutte contre ses effets. Nous aborderons donc les aspects suivants de la décharge atmosphériques : la distribution statistique des orages, le nuage orageux et les phénomènes précurseurs, les différents types de coups de foudre et leur déroulement, les paramètres électriques de la foudre, le mécanisme d'impact et le modèle électromagnétique.

Nous parlerons ensuite des pratiques industrielles de protection contre la foudre en partant des exemples de l'Office des Postes et Télécommunications du Bénin (OPT), de la Société Béninoise d'Electricité et d'Eau (SBEE) et partiellement de la Communauté Electrique du Bénin (CEB). Nous terminerons ce chapitre par l'évocation d'un problème théorique et pratique : la définition de la Distance Minimale d'Approche (DMA) dans une situation d'écoulement de courant impulsionnel à travers la prise de terre du type "piquet de terre" du côté de la puissance MT ou BT.

1.1. La foudre et les phénomènes orageux.

1.1.1. La distribution statistique des orages - Sévérités orageuses

1.1.1.1. Le niveau kéraunique

Il est d'usage de caractériser la sévérité orageuse d'une région par son niveau kéraunique. Le niveau kéraunique est par définition « le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu ». Bien que très simpliste par sa définition et équivoque par les méthodes de mesure, cette notion a permis l'établissement de statistiques, à partir des renseignements fournis par les services météorologiques. Dans le cas du Bénin, les données collectées de 1960 à 1996 ont permis de tracer la Figure 1.1.

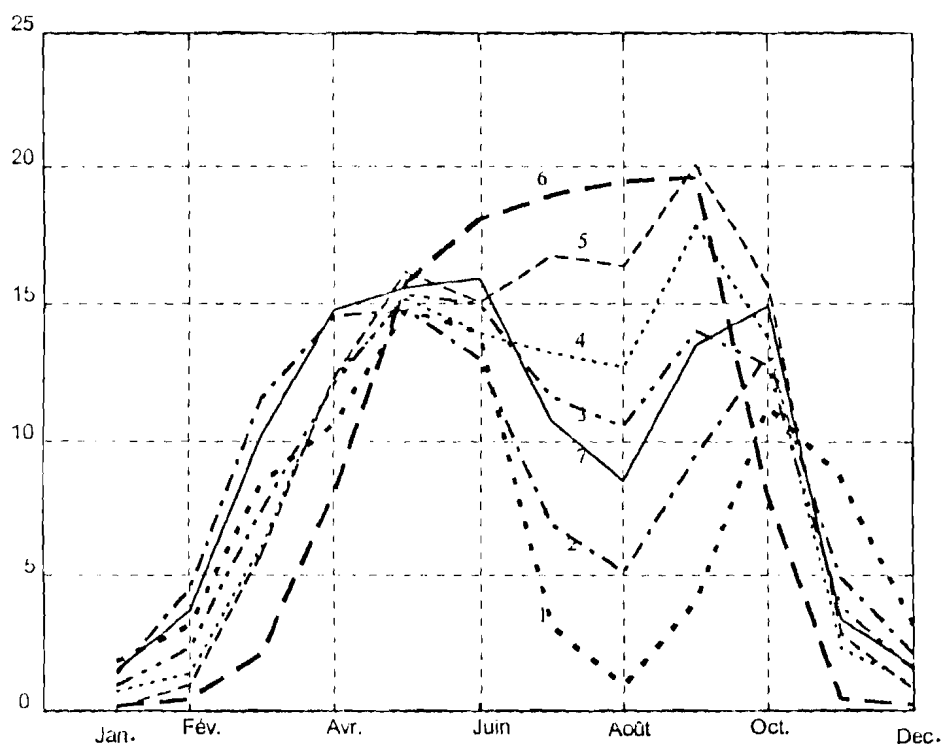


Figure 1.1. Moyenne du niveau kéraunique mensuel des différentes régions géographiques du Bénin.

La figure I.1. donne l'évolution de la moyenne du niveau kéraunique mensuel pour différentes régions (1 à 6). La courbe 7 traduit la moyenne nationale. Dans les courbes 1, 2 et 3, on voit apparaître deux zones bien distinctes : une première qui atteint son maximum vers le mois de Mai (première saison pluvieuse) et une seconde avec un maximum se situant aux alentours du mois d'Octobre.

La courbe 4 montre qu'au niveau de Parakou, l'activité orageuse s'étale du mois de Mars au mois d'Octobre avec un pic aux environs du mois de Septembre. La courbe 5 présente presque la même allure d'évolution, avec un pic vers le mois de Septembre et un niveau d'activité kéraunique mensuelle presque constant du mois de Mai au mois d'Août alors qu'à Parakou le niveau kéraunique mensuel chute légèrement du mois de Mai jusqu'au mois d'Août avant de retrouver son deuxième maximum vers le mois de Septembre.

Enfin, la courbe 6 montre que les activités orageuses commencent plus tardivement à Kandi, pour retrouver presque le même niveau au mois de Mai. Dans cette région du Bénin, le niveau kéraunique mensuel évolue, du mois de Mai au mois de Septembre, de façon presque exponentielle. Au delà de Septembre, la courbe 6 prend l'allure de celle de Parakou.

Les moyennes de niveau kéraunique mensuel des différentes zones climatiques du Bénin sont résumées sur le tableau I.1.

Région	n° courbe dans la figure I.1.	Moyenne du niveau kéraunique mensuel	Moyenne du niveau kéraunique annuel
Cotonou	1	7	84
Bohicon	2	9	102
Save	3	10	115
Parakou	4	9	111
Natitingou	5	10	123
Kandi	6	9	112
Nationale	7	9	108

Tableau I.1. Moyennes des niveaux kérauniques au Bénin

Il n'existe pas de données sur les phases énergétiques des coups de foudre tombant au Bénin, car ce sont elles qui permettent d'évaluer les effets destructeurs que contiennent potentiellement les décharges atmosphériques. On ne connaît pas non plus, la proportion entre coups de foudre ascendant et descendant, positif et négatif. De même, pour ce qui nous intéresse dans ce mémoire, on ne connaît pas la proportion entre coup de foudre nuage-sol et nuage-nuage.

Enfin, à titre de comparaison, on peut noter qu'aux Etats Unis d'Amérique le niveau kéraunique annuel maximum est de 90 et se situe dans la région tropicale de la Floride, alors qu'en Afrique Centrale, à Campala par exemple, le niveau kéraunique annuel moyen est de 240 [1].

I.1.1.2. Définition du foudroiement

Il est évident que la notion de niveau kéraunique est trop rudimentaire pour pouvoir fournir une mesure utilisable de la sévérité orageuse, car elle ne donne aucune indication, ni sur la fréquence des foudroiements, ni sur l'existence de zones localisées particulièrement foudroyées. Une définition bien plus rigoureuse de l'activité orageuse peut être donnée par la sévérité du foudroiement, par exemple la densité de coups de foudre au sol exprimée en nombre de coups par kilomètre carré et par an. De là, il était devenu indispensable de mesurer le nombre de coups de foudre qui tombent sur un terrain donné.

C'est depuis quelques années seulement, qu'il est devenu clair que les champs électrique et magnétique qui sont émis lors des différents processus des coups de foudre sont différents mais ont des formes qui les caractérisent [2]. Ensuite, sur la base de ces connaissances, différents appareils ont été développés pour mesurer des coups de foudre. On distingue cinq groupes de méthodes de mesure :

- la méthode vidéo [3] ;
- la méthode d'antenne à large bande [4,5] ;
- la méthode de détection magnétique de direction à large bande fréquentielle utilisée par la société Lightning Location & Protection Inc. de la Compagnie DYNATEC [2] ;

- la méthode à temps d'arrivée, utilisée par la société Atmospheric Research Systems Inc. [2] ;
- la méthode d'interférométrie VHF utilisée par la société française Dimensions [2].

La méthode vidéo consiste à enregistrer les éclairs sur des bandes vidéos en utilisant une caméra équipée d'une horloge interne et d'un système d'affichage. Lorsque l'orage est actif dans les voisinages, le système d'observation dirige l'objectif de la caméra vers la direction la plus favorable aux meilleurs enregistrements. Ainsi, il enregistre les éclairs et les grondements qui les accompagnent. Au cours de l'enregistrement, l'heure interne de la caméra est associée à l'image, ce qui permet plus tard de se rapporter à la référence du système de navigation par satellites GPS. La position de la caméra et son angle d'inclinaison sont aussi enregistrées.

La méthode d'antenne à large bande (de 1 kHz à 2 MHz) consiste en un enregistrement des ondes radios émises par la foudre. Ce signal est traité par un système électronique et converti en une impulsion destinée au comptage. On s'arrange pour que le temps de réponse du système électronique soit d'environ 1 s pour éviter des comptages très élevés en cas d'activités orageuses denses. On peut aussi utiliser des enregistreurs à mémoires pour enregistrer ces signaux. Dans ce cas, la finalité est tout à fait autre, dans la mesure où l'on obtient ainsi toute l'image de l'onde de foudre.

Dans la méthode de détection magnétique de direction à large bande [6,7], le système mesure les composantes Nord-Sud et Est-Ouest du champ magnétique aux instants correspondant au pic du signal détecté. Le champ électrique est mesuré au même moment.

Les composantes du champ magnétique servent à déterminer la position du point d'impact au sol de la foudre tandis que le champ électrique permet de définir la polarité et de résoudre l'ambiguïté de phase de 180° liée à la direction du champ magnétique.

La localisation du point d'impact est finalement déterminée par triangulation, ou s'il existe plus de deux stations, par un algorithme des moindres carrés qui minimise les différences entre les mesures et les vecteurs de direction optimale [8].

Dans la méthode à temps d'arrivée [9,10], on utilise un capteur de champ électrique à large bande associé à une horloge de grande précision. Puisque le signal radio se propage à la vitesse de la lumière (voir équation 1.1 [2]), une différence constante dans le temps d'arrivée de deux stations définit une hyperbole, et plusieurs stations donnent plusieurs hyperboles. L'intersection de ses hyperboles donne la localisation de la source.

$$E_{rad}(t) = -\frac{\mu_0 V_0}{2\pi D_0} I\left(t - \frac{D_0}{c}\right) \quad (1.1)$$

Enfin, la dernière méthode [11,12] est basée sur les mesures de trois stations équipées d'interféromètres qui ensemble, mesurent la direction de l'onde radio VHF sans ambiguïté. Ces mesures sont transmises à un centre de calcul qui détermine la position (en 3D) de la source par triangulation.

A partir de résultats fournis principalement par les compteurs de foudre, plusieurs chercheurs ont tenté d'élaborer des formules reliant le niveau kéraunique N_k et la densité N_s de coups de foudre au sol par km^2 et par an. Une formule simple qui semble donner satisfaction pour les conditions orageuses est [13] :

$$N_s = \frac{N_k}{7} \quad (1.2)$$

1.1.1.3. Facteurs locaux influençant le foudroiement.

Il existe certainement des zones localisées particulièrement foudroyées ; on les appelle communément des << nids à orage >>. L'existence de ces zones est souvent rapportée par les populations locales sans toutefois faire l'objet d'études spécifiques. Ainsi, on rapporte qu'au Bénin, le Département de l'Atacora en est un. Nous savons, de par nos activités de recherche sur le terrain que la ville de Tanguiéta est un cas particulier, à cause certainement de la chaîne de l'Atacora ; ceci est confirmé par les relevés des services météorologiques.

On pense que des zones préférentielles peuvent exister du simple fait de conditions privilégiées de formation de nuages orageux, sous l'effet combiné de l'humidité du sol et d'un réchauffement local, il y a alors formation puis ascension d'une masse d'air chaud

et humide. Comme l'air transmet très mal la chaleur, cette << bulle >> chaude s'élève, pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant, et forme un nuage orageux aux altitudes où la condensation commence. C'est l'orage de chaleur, souvent très localisé [13].

Des études ont montré par ailleurs, que des mouvements d'air, canalisés par des vallées, ou des fleuves, entraînent les nuages orageux et favorisent l'existence de couloirs orageux. Ainsi, ce ne sont pas toujours les points les plus élevés qui sont les plus frappés par la foudre. Un cas semblable au Bénin est la zone Abomey - Bohicon. Dans cette zone géographique, on pourrait avancer l'hypothèse selon laquelle, la position de zone de transition qu'elle constitue entre le climat subtropical au sud et soudano-sahélien au nord induit son niveau d'activité kéraunique relativement élevé. Des études rapportent aussi qu'en montagne, il arrive que les versants soient plus foudroyés que les sommets [13].

Le point d'impact exact d'un coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie la plus inférieure de sa trajectoire ; la partie supérieure, une centaine de mètres environ au dessus du sol, se développe depuis le nuage de façon totalement indépendante de la structure géométrique ou de la nature géologique du sol. Ce ne sont donc que des facteurs tout à fait locaux qui peuvent avoir une action sur la localisation de l'impact. La présence de saillies, arbres, bâtiments est l'un de ces facteurs. Mais la conductivité du sol pourrait être un autre facteur important. Cette hypothèse repose sur un certain nombre d'observations concernant le foudroiement des lignes à haute tension ainsi que sur des résultats de recherches de laboratoire. Ces résultats permettraient d'allouer aux failles humides, aux nappes d'eau, à des terrains marécageux, une certaine attirance préférentielle pour la foudre ; leur zone d'action ne saurait toutefois excéder la centaine de mètres au-delà de leur contour [13].

1.1.2. Les phénomènes précurseurs : le nuage orageux.

Un nuage orageux est généralement un cumulo-nimbus. Un tel nuage peut s'étendre sur plusieurs kilomètres carrés ; sa base se trouve à environ 2 à 3 kilomètres au-dessus du sol et il se développe en hauteur jusqu'à des altitudes de 10 à 15 kilomètres. Dans un nuage orageux typique, la partie supérieure, constituée de cristaux de glace, est chargée

positivement, tandis que la partie inférieure constituée de gouttes d'eau est chargée négativement. Souvent, un îlot de charges positives est enserré dans cette masse négative. Le nuage constitue donc un véritable dipôle. Cette séparation des charges, due à des phénomènes mécaniques de mouvements d'air, crée des contraintes électriques entre les différentes couches intérieures ; lorsque le gradient limite de claquage dans l'air est atteint, il y a décharge électrique, soit entre deux zones du nuage (éclair), soit entre le nuage et l'atmosphère.

A l'approche d'un nuage orageux, le champ électrique atmosphérique au sol qui est de l'ordre de la centaine de volt par mètre par beau temps commence à s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsqu'il atteint -15 à -20 kV/m, on peut dire qu'une décharge au sol est imminente. Le signe négatif résulte de la convention de sens choisi, pour le champ au sol : le champ est négatif lorsque les charges électriques atmosphériques sont négatives.

I.1.3. Classification et description de la foudre

I.1.3.1. Classification de la foudre

La première phase d'un coup de foudre est toujours une prédécharge peu lumineuse, ou traceur, qui progresse à travers l'air neutre avec une vitesse relativement faible. Cette prédécharge a son origine, soit dans le nuage et elle progresse alors en direction du sol, soit au niveau du sol, et progresse vers le nuage. Dans les deux cas, tout se passe comme si le canal ainsi formé, quoique faiblement ionisé, formait entre le sol et le nuage un pont suffisamment conducteur pour préparer la voie à un courant intense, qui sera le coup de foudre proprement dit.

On classe donc les coups de foudre selon le sens de développement du traceur (leader, selon la terminologie anglaise) :

- les coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage) ;
- les coups de foudre ascendants (développement du traceur à partir du sol) ;

Conventionnellement, on définit :

- les coups de foudre négatifs, lorsque la partie négative d'un nuage se décharge ;
- les coups de foudre positifs, lorsque la partie positive (généralement îlot à la base du nuage) se décharge. Ces coups peuvent également provenir de la partie supérieure du nuage.

La figure 1 résume cette classification, selon K. BERGER [14]. Dans les régions à climat tempéré, 80 à 90 % des coups de foudre sont négatifs.

Les configurations 1 (a, b) et 2 (a, b) qui représentent respectivement le coup négatif descendant et le coup négatif ascendant, sont les plus fréquentes. La configuration 3 (a et b) correspond au coup de foudre positif, et se présente dans 10 à 20% des cas, comme indiqué ci-dessous ; enfin, la configuration 4 (a et b), à traceur négatif ascendant, est extrêmement rare.

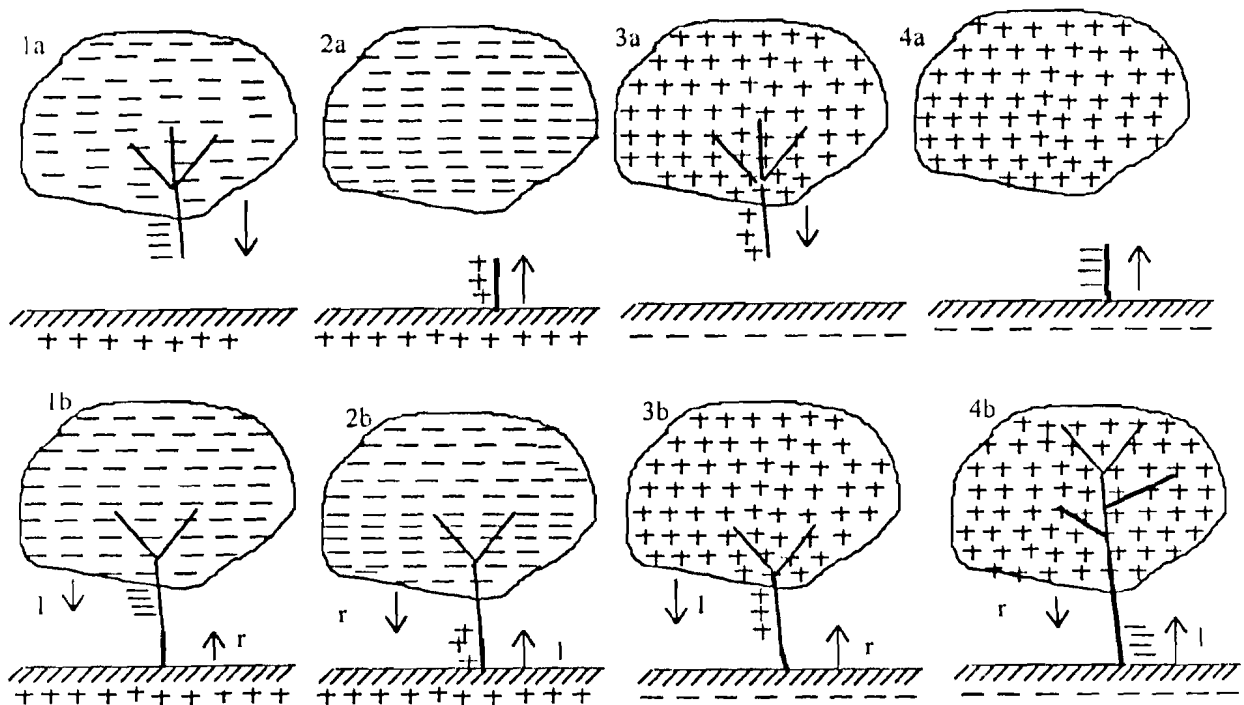


Figure 1.2. Différents types de coups de foudre, selon la classification due à K. Berger [14].

1.1.3.2. Description d'un coup de foudre [13].

Dans le cas d'un coup de foudre ascendant, les effluves d'effet couronne positives qui apparaissent aux sommets des aspérités, se développent d'autant plus loin, et avec plus d'intensité, que les dimensions de la proéminence sont importantes. A partir d'une certaine intensité d'effluves, le phénomène se modifie brusquement et peut se développer suffisamment loin pour atteindre les nuages : c'est le coup de foudre ascendant. De tels coups ascendants sont fréquemment observés à partir de tours de télévision modernes dont la hauteur dépasse 300 mètres, et à partir de gratte-ciel. Il va sans dire que les reliefs du sol, notamment des montagnes isolées, favorisent la formation de coups ascendants, lorsqu'un pylône ou une tour sont placés à leur sommet.

La chronologie des événements est généralement la suivante : l'observation visuelle des filaments couronnes montre que ceux-ci ne sont pas indépendants, mais qu'ils sont tous issus d'un tronc ionisé commun, tronc qui n'est autre que l'amorce d'un traceur positif. A partir d'une certaine valeur du champ électrique ambiant, ce traceur se développe brusquement, et progresse en direction du nuage ; la vitesse de progression a pu être mesurée et est estimée varier entre 0.2 à 1 m/ μ s. Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'une arborescence, dont la croissance jusqu'au nuage peut durer quelques dizaines de millisecondes. Au moment où ces ramifications lèchent la base du nuage, il s'établit une décharge dont la durée peut atteindre la seconde, et qui écoule des courants dont l'intensité est de l'ordre d'un millier d'ampères.

Dans certains cas, on observe des illuminations brèves et intenses des branches de l'arborescence. A ces réilluminations correspondent des impulsions de courant, se superposant au courant persistant, d'amplitudes comprises entre 10 et 40 kA, et dont les temps de montée sont très courts, inférieurs à la microseconde.

Dans le cas du coup de foudre descendant, il faut considérer le traceur négatif, qui prend naissance dans une zone négative du nuage, selon un mécanisme qui n'est d'ailleurs pas encore élucidé. Ce traceur se développe en progressant par bonds successifs de quelques dizaines de mètres (c'est le stepped leader, suivant la terminologie anglaise). Entre les bonds, on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 μ S.

Des vitesses de propagation moyennes comprises entre 0.15 et 1.5 m/ μ S ont été mesurées, vitesses semblables à celles signalées pour les traceurs positifs. Au fur et à mesure de la progression du traceur, on assiste à des ramifications, et la luminosité du traceur s'accroît.

Dès que la pointe d'un traceur s'approche du sol, des prédécharges ascendantes se développent à partir de celui-ci, généralement depuis un arbre, une saillie, dans la direction du traceur. Lorsque l'une des décharges ascendantes et le <<traceur par bonds>> se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant à forte intensité. Ce courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui, en remontant le canal ionisé formé par le traceur, neutralisent les charges de ce dernier ; on observe alors un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage, avec une vitesse estimée au tiers de la vitesse de la lumière : c'est l'arc en retour ou return stroke. Plusieurs décharges peuvent avoir lieu selon ce type de mécanisme.

Finalement, la principale différence entre un coup de foudre ascendant et un coup de foudre descendant, outre bien entendu leur mode d'initiation, réside dans le fait que le coup descendant commence toujours, vu du sol, par une impulsion de courant de forte amplitude, alors que le coup ascendant commence par un long courant persistant de faible valeur. Les décharges impulsionnelles subséquentes des coups descendants ont ensuite tout à fait les mêmes caractéristiques que celles des impulsions des coups ascendants (lorsque celles-ci existent), puisque leur formation obéit dans les deux cas au même processus (dard-leader + arc en retour).

1.1.4. Paramètres électriques des coups de foudre.

1.1.4.1. Formes des composantes impulsionnelles de la foudre [13,15].

Les coups de foudre négatifs offrent une très grande variété de combinaison de courants impulsionnels et de courants <<continus>>, chacun d'entre eux ayant une amplitude et une durée diverses. La durée de front de la première décharge est de l'ordre de 5 à 15 μ S ; la durée de la queue est de l'ordre de centaine de microseconde. Pour des décharges subséquentes, la durée de front est très courte, inférieure à la microseconde, mais la queue d'onde est bien plus régulière que dans la première décharge. Les valeurs

de crête des décharges subséquentes sont inférieures à celles de la première décharge partielle.

Le coup de foudre positif est constitué d'une seule décharge durant de 0.1 à 0.2 seconde. La durée du front de l'onde est relativement longue, elle varie entre 20 et 50 μS , mais l'amplitude du courant peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 100 kA

1.1.4.2. Choc de foudre [16].

Afin de simuler en laboratoire les effets d'un coup de foudre sur une installation électrique ou de télécommunication, on a souvent recours à des générateurs de courant de choc.

Par définition, le choc de foudre est défini principalement par :

- la valeur crête du courant ;
- le temps de montée exprimée en μS ;
- le temps de descente exprimée en μS .

Dans ce mémoire, nous utilisons pour nos simulations, le choc normal. Par définition, le choc normal est un courant résultant de la différence de deux exponentielles :

$$i(t) = I_0 \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_q}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) \right] = I_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1.3)$$

Les principaux paramètres du choc normal sont données ci-dessous.

La durée jusqu'à la crête, T_{cr} est égale à :

$$T_{cr} = \frac{\tau_q}{\delta - 1} \ln \delta \quad (\text{s}) \quad (1.4)$$

où $\delta = \frac{\tau_q}{\tau_f}$

La valeur de crête, atteinte par le choc, est calculée à partir de :

$$I_{cr} = I_0 \left[\delta^{1/(1-\delta)} - \delta^{\delta/(1-\delta)} \right] \quad (A) \quad (1.5)$$

La durée T_h jusqu'à la mi-amplitude vaut :

$$T_h = \tau_q \operatorname{Ln} \left(\frac{2I_0}{I_{cr}} \right) \quad (s) \quad (1.6)$$

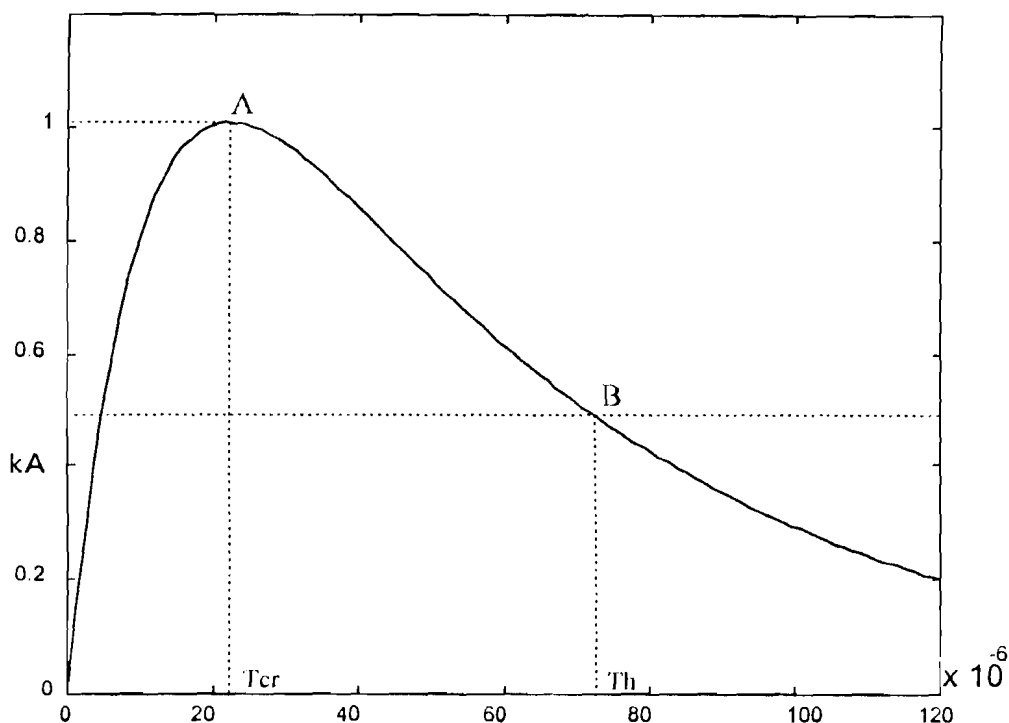


Figure I.3. Définition des paramètres de l'onde de foudre conventionnel.

I.1.4.3. Distribution des amplitudes

Dans leur grande majorité, les mesures sur la foudre ont été effectuées en enregistrant les courants de coup de foudre frappant les cheminées ou les tours de grande hauteur, entre 100 et 200 mètres.

s

Pour exprimer la probabilité φ_1 qu'a un coup de foudre de dépasser l'intensité I , la formule simple suivante a été proposée :

$$\log \varphi_1 = 2 - \frac{I}{60} \quad (1.7)$$

En rassemblant les données mondiales obtenues, on a pu tirer les conséquences les plus importantes suivantes :

- l'amplitude des courants de foudre positifs peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 150 kA dans 10% des cas ;
- l'amplitude des courants de foudre négatifs est, en général, plus faible, la valeur à 10% étant de l'ordre de 50 kA ;
- les valeurs médianes de l'intensité des coups positifs et négatifs (valeur à 50% de la distribution globale) se situent respectivement autour de 25 kA et 18 kA.

1.1.4.4. Distribution des raideurs de front.

Les courants de foudre négatifs, bien qu'ayant une amplitude en général plus faible que les courants de foudre positifs, présentent une raideur de front beaucoup plus grande. Pour 50% des coups de foudre, la raideur de front est supérieure à 20 kA/μS, alors que pour les coups de foudre positifs, la moyenne est autour de 2 kA/μS.

Les raideurs de front les plus importantes, lors des coups de foudre négatifs, sont obtenues pour les décharges secondaires de plus faible amplitude : on a mesuré jusqu'à 100 kA/μS.

Quelle que soit la famille de décharge considérée (coups de foudre positifs, première impulsion d'un coup négatif, impulsions secondaires), il n'y a pas de corrélation nette entre la valeur de crête du courant et la raideur de front de l'onde. On peut simplement signaler que, plus l'amplitude du courant est grande, plus la probabilité pour avoir des pentes de front élevées est grande.

I.1.4.5. Les autres grandeurs électriques caractérisant la foudre.

Outre les grandeurs exprimées ci-dessus, il existe deux autres caractéristiques utiles pour l'ingénieur :

- la charge totale Q neutralisée au cours d'un coup de foudre est en moyenne de l'ordre de la dizaine de coulombs et peut dépasser pour une très longue et violente décharge 300 Coulombs.
- l'intégrale $\int i^2 dt$ est la caractéristique qui doit être prise en compte pour l'estimation des effets thermiques de la foudre, par exemple pour le calcul de la section d'un câble de paratonnerre.

I.1.5. Le mécanisme d'impact et le modèle électrogéométrique.

I.1.5.1. Le mécanisme d'impact.

Le traceur par bond est un canal ionisé comportant un excédent de charges négatives s'il est issu de la partie négative d'un nuage, positives s'il est issu de la partie positive d'un nuage. Lorsque le traceur se rapproche du sol, le champ électrique dans une zone située à la verticale de ces charges va donc s'accroître jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de la centaine de kilovolts par mètre.

A ce moment, et dans le cas d'un traceur négatif, des décharges ascendantes positives se développent brusquement, alors qu'elles n'existaient auparavant que sous forme d'effluves d'effet couronne tout à fait localisés. L'une des décharges, la plus proche ou celle qui a progressé le plus rapidement, entre en contact avec le traceur : le canal ionisé est dès lors continu depuis le sol jusqu'au nuage et la décharge principale peut avoir lieu. Il arrive parfois que deux ou plusieurs décharges ascendantes rejoignent le traceur : on assiste alors à un coup de foudre ramifié ; il en est de même lorsque plusieurs ramifications du traceur donnent lieu chacune à une décharge ascendante.

Dans le cas de traceurs positifs, il n'y a pas de décharges ascendantes, ou du moins celles-ci, qui sont de polarité négative, se développent très peu. Le processus d'impact est alors le suivant : les études en laboratoire montrent que la pointe du traceur, où se trouve une forte concentration de charges positives, est l'origine de <<filaments couronnés>> ou streamers en anglais, sorte de chemins ionisés qui s'en échappent en direction du sol. Lorsque l'un de ces filaments entre en contact avec ce dernier, ou avec une structure reliée à ce dernier, le pont conducteur entre nuage et sol est établi.

1.1.5.2. Le modèle électrogéométrique

Ce modèle a pour objet la prédétermination des points d'impacts les plus probables de la foudre, afin de pouvoir apprécier l'ampleur de dégâts éventuels et de prévoir, si nécessaire des dispositifs de protection appropriés : paratonnerres, cage de Faraday, câbles de garde dans le cas de lignes électriques.

Le problème à résoudre pour élaborer un modèle de foudroiement consiste à analyser les conditions de développement de la charge ascendante, puis de sa jonction avec le traceur descendant, et à introduire à cet effet des valeurs numériques. Sous sa forme actuelle, le modèle électrogéométrique reste encore assez rudimentaire. Tel qu'il existe, il a cependant rendu d'appréciables services. Il n'est valable que pour des coups descendants négatifs, mais ceux-ci sont, comme on l'a vu, de loin les plus fréquents. Ce modèle a été élaboré pour améliorer la protection des lignes électriques aériennes à haute tension, et est de ce fait mieux adapté à ce problème. On peut toutefois l'utiliser pour d'autres fins à condition d'avoir présent à l'esprit les limitations.

Le modèle électrogéométrique définit essentiellement une distance D_1 , dite <<distance d'amorçage>> qui s'exprime par :

$$D_1 = 101 I_c^{2/3} \quad (1.8)$$

où D_1 est exprimé en mètres, et I_c le courant de crête en kiloampères.

La distance d'amorçage représente la distance entre l'extrémité de la structure, d'où est issue la décharge ascendante, et le point de jonction entre celle-ci et le traceur descendant.

I.2. FONCTIONS DES RESEAUX DE TERRE

I.2.1. Définition d'un réseau de terre

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux.

Pour une installation ou une structure de faible étendue, on emploie souvent l'expression <<prise de terre>>, en réservant le terme <<réseau de terre>> aux installations importantes telles celles des postes, des centrales électriques ou de télécommunication. Il convient de distinguer le circuit de mise à la terre qui comprend l'ensemble des conducteurs non enterrés ou isolés du sol et raccordés au réseau de terre, généralement reliés à la masse mécanique ou à la masse électrotechnique des appareils et les conducteurs enterrés, directement en contact avec le sol.

I.2.2. Fonctions des réseaux ou des prises de terre.

Le rôle du réseau ou de la prise de terre d'une installation électrique ou de télécommunication est de permettre l'écoulement dans le sol de courants de toutes origines, qu'il s'agisse, par exemple, de courants de choc dus à des coups de foudre ou bien de courants de défaut à la fréquence industrielle.

Lors de l'écoulement de tels courants par une prise de terre, des différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points, par exemple entre la prise de terre et une autre prise de terre située dans son voisinage. La conception des prises de terre doit permettre, même dans ces conditions, d'assurer le maintien de :

- la sécurité des personnes ;
- la protection des installations de puissance ;

- la protection des équipements sensibles ;
- un potentiel de référence.

1.2.2.1. Protection des personnes et des animaux

Lors de l'écoulement dans le sol de courants élevés, la sécurité doit être assurée à l'intérieur de l'installation électrique et de ses abords immédiats par une limitation de la tension de pas et de la tension de contact à des valeurs non dangereuses pour le corps humain ou les animaux. Cette limitation est obtenue grâce à la connaissance et au contrôle de la répartition du potentiel à la surface du sol. Dans le cas d'une installation, la situation idéale dont on doit chercher à se rapprocher est l'équipotentialité de l'ensemble du réseau du circuit de terre.

1.2.2.2. Protection des installations de puissance.

Le réseau de terre des installations électriques et la prise de terre des supports de ligne, limitent la création et la propagation des surtensions provoquées par les défauts de fréquence industrielle, les manoeuvres d'appareils dans les postes et centrales et la foudre.

Cette limitation est d'autant plus efficace que ces réseaux et prises de terre facilitent l'écoulement du courant dans le sol, c'est-à-dire qu'ils présentent une impédance de terre faible, aussi bien pour les phénomènes lents (défaut 50 Hz) que pour les phénomènes rapides tels que ceux engendrés par la foudre.

1.2.2.3. Protection des équipements fonctionnant à bas niveaux

A côté des installations de puissance, on trouve souvent des équipements fonctionnant à des niveaux comparativement beaucoup plus bas : équipements de relayage dans les postes par exemple, câble P.T.T. installés à proximité des lignes, des postes ou des centrales. Ces équipements sont également exposés aux effets des surtensions subies par les installations de puissance, avec lesquelles ils peuvent être liés par couplage conducteur ou radiatif, plus généralement électromagnétique. On n'arrive pas à caractériser ces couplages par une grandeur, telle la résistance du réseau de terre, mais plutôt on les relie à un ensemble complexe de paramètres qui dépendent notamment de

la disposition de la prise de terre, de celle des prises de terre des équipements sensibles. Ce mémoire traite des questions d'interférence et contribue à la définition de méthodologie de leur caractérisation.

1.2.2.4. Potentiel de référence

Différents appareils placés dans une même installation doivent, lorsqu'ils sont reliés électriquement, rester à un potentiel identique fixe même pendant la durée des perturbations mentionnés plus haut.

Dans les réseaux électriques à neutre directement à la terre, le réseau de terre des postes contribue à fixer le potentiel des phases saines pendant un défaut, mais les courants de défaut peuvent alors atteindre des valeurs importantes. De même, la proximité des prises de terre des réseaux à neutre directement à la terre qui est souvent relié à la masse du transformateur ou par exemple avec la prise de terre d'un système de télécommunications peut entraîner des transferts de surtension prohibitive, et du coup bouleverser le maintien de l'équipotentialité. Ces deux exemples montrent l'importance de la résistance de la prise de terre et de la qualité de l'équipotentialité des réseaux de prise de terre.

1.3. ETUDE GEOLOGIQUE DU SOL [19].

L'impédance d'un réseau de terre et la répartition du potentiel dans le sol dépendent des caractéristiques électriques du terrain : la résistivité, la permittivité et la perméabilité du sol. Dans le cas d'un régime statique ou quasi-statique, la valeur de la résistivité du sol est suffisante pour le caractériser électriquement. En général, toute conception rationnelle de prise de terre doit donc débiter par une étude de la nature du sol appelé à abriter cette prise de terre

La résistance d'une prise ou d'un réseau de terre augmente avec la résistivité du sol et du sous-sol dans lequel il est enterré. La résistivité des terrains naturels présente des particularités suivantes :

- elle est extrêmement variable d'un endroit à un autre selon la nature du sol et le taux d'humidité. Les valeurs extrêmes que l'on rencontre dans la pratique peuvent aller de

quelques dizaines d'ohms·mètres pour des terrains gras et humides à une dizaine de milliers d'ohms·mètres pour des granits très sains et très secs ;

- le sol, à un endroit donné, est souvent hétérogène, aussi bien horizontalement que verticalement
- la résistivité des couches superficielles d'un terrain présente des variations saisonnières sous l'effet de la sécheresse (qui l'augmente) ou de l'humidité (qui la diminue). Cette action peut se faire sentir jusqu'à une profondeur de plusieurs mètres dans des conditions climatiques extrêmes et prolongées.

On recommande de tenir compte de ces variations de résistivité dans l'établissement d'un réseau de terre enfoui à une profondeur de l'ordre du mètre.

La conductibilité du sol est de nature essentiellement électrolytique : elle est donc très faible à l'état sec et augmente avec la température et le taux d'humidité. La granulation du terrain est un élément important qui influe à la fois sur la porosité et le pouvoir rétenteur d'humidité et aussi sur la qualité du contact avec les électrodes. Les sols à gros grains (graviers, cailloux etc...), se prêtent mal à l'établissement de bonnes prises ou réseaux de terre, et on doit y remédier en entourant la surface des électrodes d'une certaine épaisseur de terre fine et grasse ou d'un autre matériau relativement conducteur.

I.4. PROTECTION DES INSTALLATIONS CONTRE LA Foudre PAR LES MISES A LA TERRE A L'OPT ET DE LA SBEE.

I.4.1. PROTECTION DES INSTALLATIONS DE TELECOMMUNICATION CONTRE LA Foudre PAR LES MISES A LA TERRE A L'OPT[17]

I.4.1.1. Les sources de perturbations

Les systèmes de télécommunication de l'Office des Postes et Télécommunications du Bénin se caractérisent comme un réseau interconnectant des abonnés entre eux à travers tout le pays. Aux noeuds de ces réseaux sont positionnés les centraux

téléphoniques contrôlant et gérant les flux d'échange. Depuis leur installation, ces centraux ont été exposés, pendant les orages, à des perturbations dont les plus importantes peuvent être rangées en deux types :

- perturbations collectées par les lignes des télécommunications elles-mêmes ;
- perturbations d'origines industrielles, notamment des réinjections à 50 Hz des lignes de puissance.

Les niveaux des surtensions peuvent aller de quelques volts à plusieurs kilovolts. Le CCITT dans ces directives les classe dans deux catégories :

- les tensions de danger ;
- les tensions de trouble.

Ces surtensions peuvent être à l'origine d'accidents de personnes, de destruction de matériel, de dysfonctionnement d'équipements ou de dégradation grave de la qualité de la communication.

Afin d'éviter les accidents et de minimiser les effets de surtension, diverses règles ont été édictées. Elles tiennent compte de l'exposition au risque et sont adaptées au type de perturbateur. L'OPT, prenant en compte le caractère aléatoire de la foudre, a adopté une politique quasi systématique de protection de ses centraux, des lignes de télécommunication et des abonnés. Par contre, la protection des lignes au voisinage des ouvrages de la SBEE ne manque pas de poser des problèmes liés d'une part à la faiblesse des connaissances des problèmes de compatibilité électromagnétique qui en résultent, mais aussi de la faiblesse de la collaboration de ces deux entreprises dans la recherche de solutions concertées et adaptées.

1.4.1.2. Les modes de couplages

Les perturbations qui sont susceptibles d'atteindre les équipements de télécommunication peuvent provenir de la foudre, des défauts des lignes de transport ou de distribution d'énergie électrique (SBEE ou CEB dans le cas du Bénin), les sources industrielles ou électrodomestiques et les ondes radioélectriques. Ces perturbations se

produisent par des couplages qu'on range habituellement en quatre groupes (dans la pratique, ces modes de couplage peuvent se combiner) : résistif, capacitif, inductif et radioélectrique. Les conséquences peuvent être :

- en régime permanent
 - dégradation de la communication ;
 - erreur de transmission ;
 - dysfonctionnement d'équipements ;
 - bruit psophométrique (cas du couplage inductif).
- en régime de défaut
 - danger pour les personnes
 - destruction de matériels

1.4.1.2.1. Couplage résistif

C'est une conduction par le sol, à travers les prises de terre des installations de la société de distribution d'énergie électrique. Ce couplage se produit suite à un défaut dans la ligne de distribution d'énergie : foudre, court circuit ou remontée de potentiel par le sol (figure 1.4).

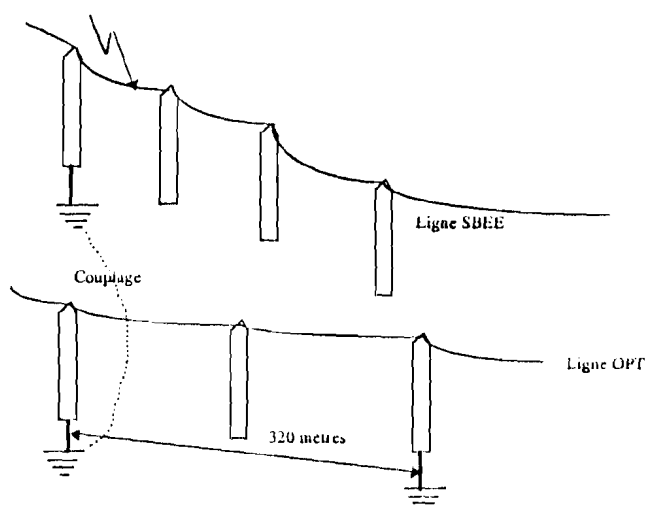


Figure 1.4 : Couplage résistif entre prises de terre.

1.4.1.2.2. Couplage capacitif

La perturbation de couplage capacitif provient souvent du parallélisme entre les lignes de l'OPT et de la SBEE ou de la CEB, ou de la foudre (figure 1.5).

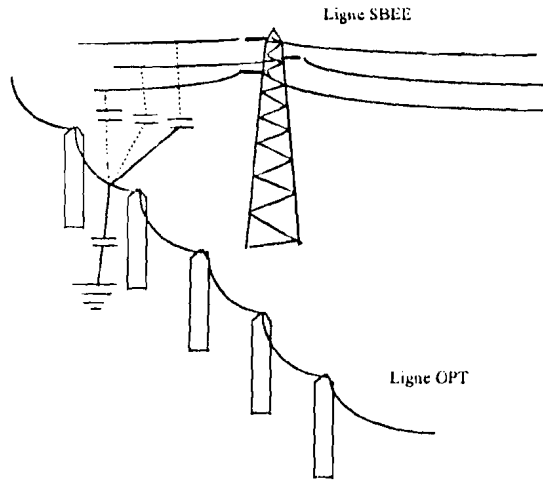


Figure 1.5 : Couplage capacitif entre ligne OPT et ligne SBEE.

1.4.1.2.3. Couplage inductif

Ce mode de couplage se produit grâce à des boucles de courant avec retour par le sol. L'émetteur de la perturbation pourrait être, une ligne d'énergie aérienne ou souterraine, ou la foudre (figure 1.6).

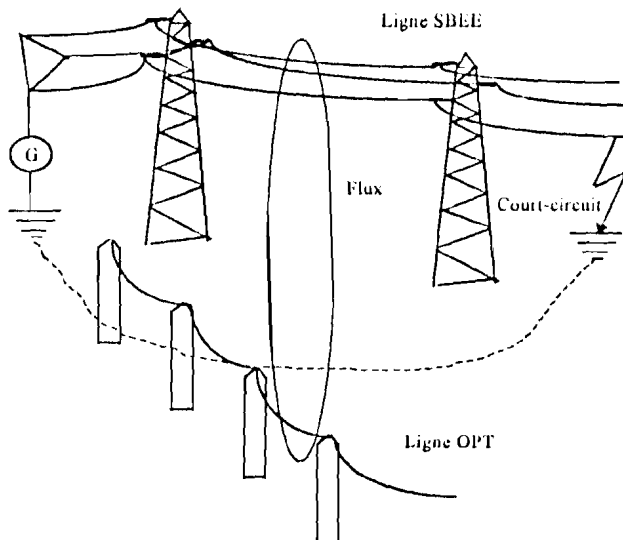


Figure 1.7 : Couplage inductif entre ligne SBEE et ligne OPT.

1.4.1.2.4. Couplage radioélectrique

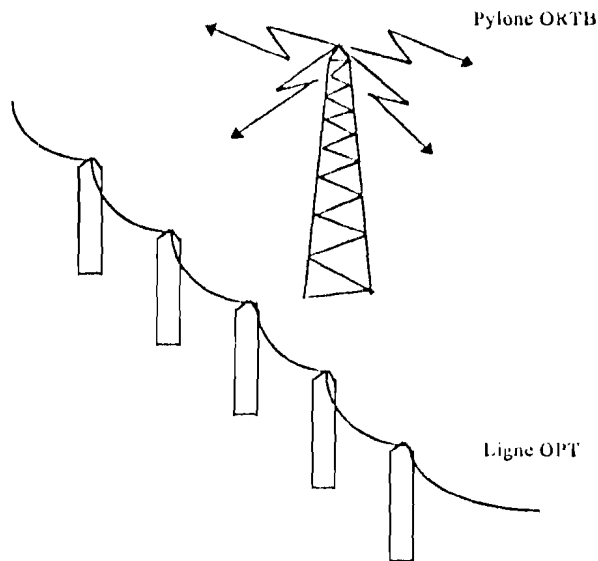


Figure 1.8 : Couplage radioélectrique entre pylône de radiocommunication et ligne de télécommunication.

Ce couplage peut provenir du rayonnement direct qui serait causé par une propagation électromagnétique. L'émetteur de la perturbation est une ligne d'énergie, de télécommunication ou tout autre câblage qui est soumis à une propagation d'onde d'énergie plus ou moins importante.

1.4.1.3. Protection

Les systèmes de protection comportent deux parties : l'écrêteur de surtension et la prise de terre. Nous passons rapidement en revue ces deux systèmes.

1.4.1.3.1. Dispositifs de parasurtension [20].

La première génération fut assurée par des blocs de carbone puis elle a été remplacée graduellement par des parasurtenseurs à gaz. La fonction de protection est positionnée entre les deux fils de la ligne ou entre ces fils et la terre ; leur action consiste donc à court-circuiter les lignes (Crowbar) de manière à envoyer l'énergie parasite dans la terre à travers la prise de terre.

Comme l'efficacité des tubes restait insuffisante, on a pensé à une fonction semi-conducteur. Mais, pour cette technologie, il se pose un problème de pouvoir d'écoulement puisque les systèmes à semi-conducteur ont des pouvoirs d'écoulement excessivement bas. Pour apprécier les formes de courant et les niveaux d'énergie mis en jeu par la foudre dans les réseaux de télécommunication, la Société Bell South en association avec d'autres opérateurs américains des télécommunications a réalisé des tests en grandeur nature. Des résultats de ces investigations (voir tableau I.1), il est apparu que les contraintes de foudre subies par les lignes de télécommunications étaient largement inférieures à ceux qu'on croyait jusque là. Plus récemment, France Télécom en France, en collaboration avec le CNET (Centre National des Etudes de Télécommunications) fit la même démonstration. Les études ont montré que la probabilité d'avoir une onde supérieure à 100 A est au dessous de 0.001 %.

Ces études ont servi de base pour la conception de nouveaux modules de protection. Les dernières versions développées et qui sont de plus en plus disponibles sur le marché intègrent les fonctions suivantes :

- protection contre les surtensions bipolaire ou tripolaire (comme les protections conventionnelles) ;
- protection contre les sur-courants ;
- capacité de fournir une indication sur son statut (protection activée, destruction ...).

Energie absorbée (I^2t en Joule)	Résultats
Minimum	0.0002
Moyenne	0.0024
Maximum	0.55
I_{max} et forme d'onde	
Moyenne	8 A (10/100 μ S)
Maximum	27 A (10/1000 μ S)

Tableau I.2 : Test des perturbations des lignes de télécommunication réalisé par la Société Bell South [21].

Il est donc établi que la protection des lignes de télécommunication est pratiquement sur le point d'être maîtrisée avec un intérêt économique évident puisque les nouvelles solutions sont moins chères et plus performantes que les précédentes.

1.4.1.3.2. Prise de terre

A l'OPT, les prises de terre sont installées pour la mise à la terre des cages de Faraday, des paratonnerres, des parafoudres, des boîtes RP (Raccordement de Point de coupure) et PC (Point de Coupure) des lignes, les écrans des câbles etc... L'étude, la conception et la réalisation des prises de terre des centrales est confiée à des sociétés privées qui pour la plupart procèdent de façon empirique. Pour la vérification des réalisations de ces prises de terre, l'OPT s'inspire des normes d'ingénierie mises au point par France Télécom (France).

Les valeurs des résistances des prises de terre sont données dans le tableau I.3 :

Les valeurs des prises de terre des autres installations telles que les paratonnerres, les parafoudres, les cages de Faraday, les centrales téléphoniques et les systèmes de transmission hertziens etc.. sont fixées par des normes de l'Union Internationale des Télécommunications et Télégraphes (UIT-T) ou par les fabricants de matériels installés.

Matériel raccordé à la prise de terre ou par l'intermédiaire d'un dispositif parasurtension	Utilisation de la prise de terre	Valeur maxi. en toute saison (en Ohm)
Installation dans un bâtiment de plus de 5000 équipements	Fonctionnement et protection	1
Installation dans un bâtiment de moins de 5000 équipements	Protection	5
Concentrateur de ligne	TELIC	Fonct. et Protection
	CTR 160	Protection
Conducteurs (boîtes RP dont RP1 en ligne)	Protection	20
Filtres d'aiguillage (PTT, SPAX, SPAY, SPAS, ..)	Protection	50
Porteur des câbles	Protection	50
Poste simple d'abonné	Protection	50
Poste d'abonné avec fax, télex, taxe, etc..	Fonct., Protection	50
Cabine	Fonct., Protection	50
Sous répartiteur	Protection	10
Enveloppe des câbles à facteur réducteur	Protection	La plus faible possible
Boîte de protection d'adduction téléphonique des sites électriques	Protection	10

Tableau I.3 : Valeurs de résistance des prises de terre à l'OPT [18].

I.4.2. PROTECTION CONTRE LA Foudre PAR LES MISES A LA TERRE A LA SBEE ET A LA CEB [18].

En République du Bénin, le transport et la distribution de l'énergie électrique sont assurés exclusivement et respectivement par la Communauté Electrique du Bénin (CEB) et la Société Béninoise d'Electricité et d'Eau (SBEE). Compte tenu des similitudes et de la complémentarité des pratiques de protection par les prises de terre qui existent entre ces deux sociétés, il nous a paru normal de traiter indifféremment de la protection contre la foudre par la mise à la terre au sein de ces dernières. Nous évoquerons essentiellement les différents niveaux d'installation des prises de terre, avec au besoin quelques commentaires sous forme de critiques techniques.

I.4.2.1. Circuits et prises de terre des postes HT/MT

Du point de vue de l'écoulement du courant de foudre à la terre, les postes HT/MT de la CEB comportent deux circuits, tous reliés à la terre : le circuit de "terre de sécurité" et le circuit de "terre de service".

Le circuit de "terre de service" permet de relier à la terre les différentes cuvettes des transformateurs de puissance, les bâtis et enveloppes métalliques de tous les équipements, les secondaires (S2) des réducteurs de courant ou de tension, les écrans des câbles de mesure et les références de potentiel de circuits électroniques.

Au circuit de "terre de sécurité" sont reliés les neutres des transformateurs de puissance (transformateur principal et transformateur de services auxiliaires), les parafoudres et éclateurs, les sectionneurs et disjoncteurs shunts etc...

Ces deux circuits sont finalement reliés à une prise de terre générale constituée par un maillage de câbles en cuivre nus enterrés à une profondeur de 0.8 mètre au moins. Les sections des conducteurs de terre sont déterminées en fonction de la puissance de court-circuit calculée aux divers endroits du poste selon le tableau I.4 :

Courant I _{cc} (en kA)	Section en mm ²
Inférieur à 20	75
De 20 à 30	116
De 30 à 40	147
De 40 à 63	182

Tableau I.4 : Section des conducteurs de terre en fonction de l'intensité de courant de court-circuit.

Les conditions de maillage des circuits de terre sont :

- polygone circonscrit à la maille supérieure à 2500 m² soit par exemple un poste carré d'au moins 50 m de coté) ;
- les courants de défauts sont automatiquement éliminés (des protections de défauts de terre sont prévues) ;
- la résistance globale de terre reste inférieure ou égale à 1 Ohm pour des conditions saisonnières moyennes.

1.4.2.2. Terre des postes MT/BT

Au niveau des postes MT/BT, les masses des divers équipements (cuve des transformateurs, tableau départ BT, châssis des interrupteurs et des disjoncteurs, les écrans des boîtes d'extrémité des câbles ...), les parafoudres, les éclateurs, les secondaires (S2) des Transformateurs de courant (TC) et des transformateurs de tension (TT) sont reliés à un circuit commun appelé terre des masses du poste.

La terre du neutre BT du transformateur est systématiquement reportée sur les premiers supports de chaque départ BT.

1.4.2.3. Terre du neutre BT

Le neutre de chaque départ est réalisé selon les règles suivantes :

- mise à la terre au premier poteau ;
- le neutre est mis à la terre chaque 300 mètres en zone foudroyée, et chaque 1000 mètres en zone normale ;
- deux mises à la terre au minimum sur chaque départ BT quelle que soit la longueur (une au premier support, l'autre au dernier) ;
- mise à la terre à l'extrémité des dérivations de longueur significative.

Ce dernier point soulève un commentaire dans la mesure où la notion de longueur significative paraît être floue et peu recommandable dans une pratique d'ingénierie.

Les prises de terre du neutre sont constituées :

- soit de conducteurs en cuivre nu de section minimale égale à 29 mm^2 et de longueur variant entre 2 et 3 mètres, enfouis dans le sol dans une tranchée de profondeur variant entre 0.5 et 0.8 mètres en cuivre massif ;
- soit des piquets verticaux en cuivre de diamètre variant entre 16 et 20 mm et de longueur variant de 2 à 3 mètres, enfouis dans le sol à une profondeur de 0.5 à 1.2 mètre.

L'usage, à la SBEE, est qu'aucune étude du sol ne se fait avant l'installation des éléments de prise de terre. Lorsque la prise de terre a une valeur de résistance supérieure aux valeurs indiquées dans le tableau 4, les techniciens ajoutent d'autres piquets supplémentaires pour abaisser cette résistance élevée. De même il n'est pas constaté sur le terrain que des dispositions particulières soient prises pour les prises de terre des parafoudres ou des éclateurs.

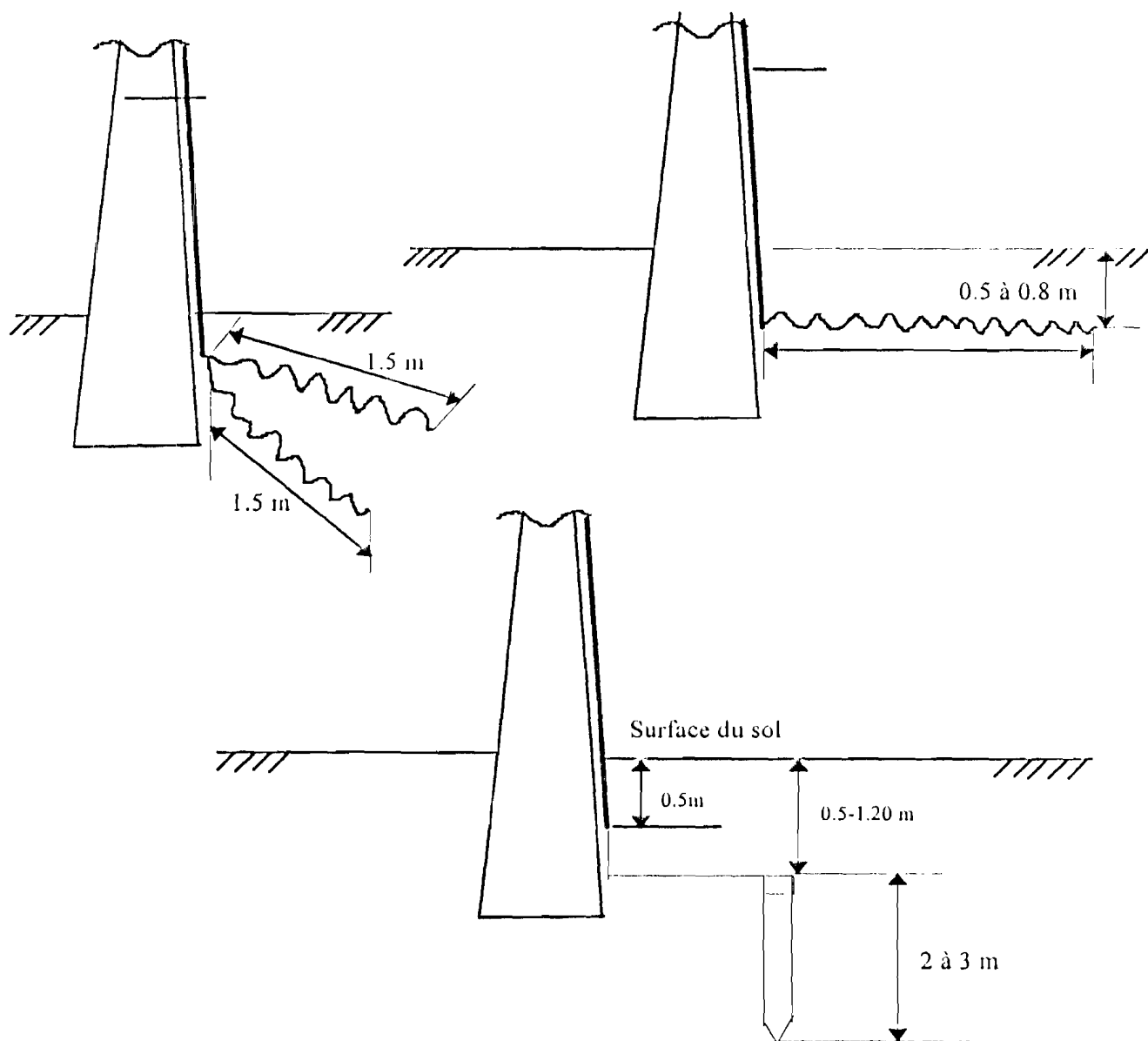


Figure I.9 : Types de prises de terre dans les réseaux électriques de la SBEE.

	Résistance (Ω)	Périodicité vérification des prises de terre
Poste THT/MT ou HT urbain	1	Tous les ans
Poste HT/MT rural		
• terrain normal	1	Tous les ans
• terrain difficile	3	Tous les ans
Poste MT/BT DP		
Terre de masse		
Poste alimenté par un réseau aérien (Id limité à 300 A)		
• terrain normal	30	5 ans
• terrain difficile	30 à 60	5 ans
Poste alimenté par un réseau souterrain (Id limité à 100 A)		
• terrain normal	3	10 ans
• terrain difficile	5	10 ans
Lignes MT		
• Supports métalliques	-	10 ans (vérifier la continuité circuit)
• Ferrures supports non conducteurs	150	10 ans (idem)
• Interrupteur aériens		
• terrain normal	60	10 ans
• terrain difficile	120	10 ans
• Interrupteurs aériens télécommandés	30	10 ans
Neutre BT		
• Réseau MT aérien (Id limité à 300 A)		
• terrain normal	5	5 ans
• terrain difficile	20	5 ans
• Réseau MT souterrain (Id limité à 1000 A)		
• terrain normal	2	5 ans
• terrain difficile	5	5 ans

Tableau I.5 : Valeurs des résistances des prises de terre des neutres BT.

I.4.3. PROBLEMES D'INFLUENCE ENTRE LES PRISES DE TERRE :

NOTION DE DISTANCE MINIMALE D'APPROCHE (DMA)

La base de toute protection contre les surtensions est le réseau de terre équipotentiel. Ce terme est à prendre au sens large, le réseau de terre idéal étant une surface très conductrice en tous points dont la tension serait nulle par rapport au sol de référence lointain. Ce modèle n'étant que théorique, il faut essayer de créer, sur les sites à protéger, un réseau de terre qui soit équipotentiel tout en restant dans des conditions économiques acceptables.

Le passage du courant de foudre dans la prise de terre s'accompagne d'une montée en potentiel transitoire qui dépend de l'amplitude de l'onde, de sa forme, des propriétés électriques du sol, des dimensions et de la forme géométrique des prises de terre.

Cette montée de potentiel transitoire peut créer des problèmes de coordination d'isolement ou de compatibilité électromagnétique aussi bien au niveau des circuits de puissance que du côté courant faible (réseau de télécommunications ou informatiques par exemple). Dans le cas de la cohabitation des installations de la SBEE et ceux de l'OPT, ces problèmes se posent et l'état des connaissances ne permettaient jusqu'alors que d'avancer des approches de solutions vaguement définies parce que basées sur des considérations empiriques. Les points suivants donnent des cas typiques qui illustrent bien la question.

1.4.3.1. Problème de DMA au niveau des transformateurs MT/BT

La protection des postes MT/BT contre les surtensions doit être réalisée de manière à éviter les avaries de transformateurs et à empêcher l'apparition d'un défaut entre MT et BT, c'est-à-dire le passage du courant de défaut à la terre du réseau MT sur le réseau BT où il peut aggraver dangereusement les dégâts occasionnés par les surtensions dues à la foudre.

Le réseau MT n'étant réuni à la terre que par la résistance ou l'impédance de mise à la terre du neutre au poste source, la montée de potentiel transitoire (MPT) par rapport à la terre du neutre MT est la même sur toute l'étendue du réseau. Ainsi, tout défaut à la terre simple ou double se produisant en un ou plusieurs des points quelconque d'un réseau a pour conséquence de faire monter le potentiel par rapport à la terre des enroulements MT de tous les transformateurs MT/BT du réseau [19]. Il n'y a aucune contrainte appliquée entre les enroulements BT et la masse, sauf dans le cas où le disjoncteur BT est ouvert (cf. figure I.10). En effet, si le disjoncteur BT est ouvert, les enroulements BT se retrouvent séparés de la mise à la terre du neutre BT ce qui entraîne une certaine élévation de tension de ces enroulements par capacité entre enroulement MT et BT. **La séparation ou l'interconnexion des masses MT (cuve du transformateur, terre des éclateurs) et du neutre BT sont deux solutions qui présentent chacune leurs avantages et leurs inconvénients [19] :**

- l'interconnexion supprime toute contrainte électrique entre les enroulements BT et la cuve des transformateurs, mais, en cas d'arrivée d'une onde de foudre du réseau MT, elle conduit à transmettre sur le neutre BT l'intégralité de la montée de potentiel transitoire des prises de terre des éclateurs ou parafoudres du côté MT, ce qui augmente le risque de dégâts sur les installations intérieures des clients (appareils électroménagers mis à la terre, téléphone, conduites d'eau etc...) ;
- la séparation permet théoriquement de découpler totalement les prises de terre MT du neutre BT et donc d'éviter de transmettre par diffusion ou par radiation électromagnétique les montées de potentiel transitoire de la MT vers les clients. Lorsque la foudre atteint une ligne MT à proximité d'un poste de transformation MT/BT protégé par des éclateurs ou des parafoudres, le courant de décharge de ces derniers s'écoule par la prise de terre. Le potentiel de la prise de terre et des masses qui y sont reliées s'élève par rapport au circuit BT. Dans certaines conditions critiques, les enroulements BT des transformateurs sont soumis à des contraintes diélectriques qui peuvent être très élevées au point de dépasser la tenue du matériel. Un amorçage peut alors se produire entre les masses et les circuits BT. S'il y a un courant de suite comme c'est le cas avec les éclateurs, celui-ci passe aussi par le chemin ouvert par le claquage aggravant la situation du côté BT. La SBEE ayant choisi cette solution, il arrive très fréquemment que des orages violents s'accompagnent de destruction des transformateurs MT/BT. De surcroît, un découplage parfait n'est obtenu que dans la mesure où la mise à la terre du neutre BT est complètement découplée de la mise à la terre des protections MT, ce qui demande un éloignement important, pas toujours réalisable en pratique.

La règle d'ingénierie utilisée à la SBEE consiste simplement à dire que la mise à la terre de l'enroulement BT doit se faire au premier poteau qui doit se situer à une distance minimale de 8 mètres par rapport à la prise de terre de l'éclateur ou du parafoudre installé du côté MT. Cette DMA égale à 8 mètres semble provenir des pratiques au niveau de l'EDF en France. Il importe ici de souligner que c'est une règle qui ne tient compte, ni de la qualité impulsionnelle de la prise de terre MT, ni de la nature du sol du milieu encore moins du niveau de foudroiement de la région. Le moins que l'on puisse dire est qu'elle est bonne tant qu'elle marche. Voyons du côté de l'OPT comment se pose le problème.

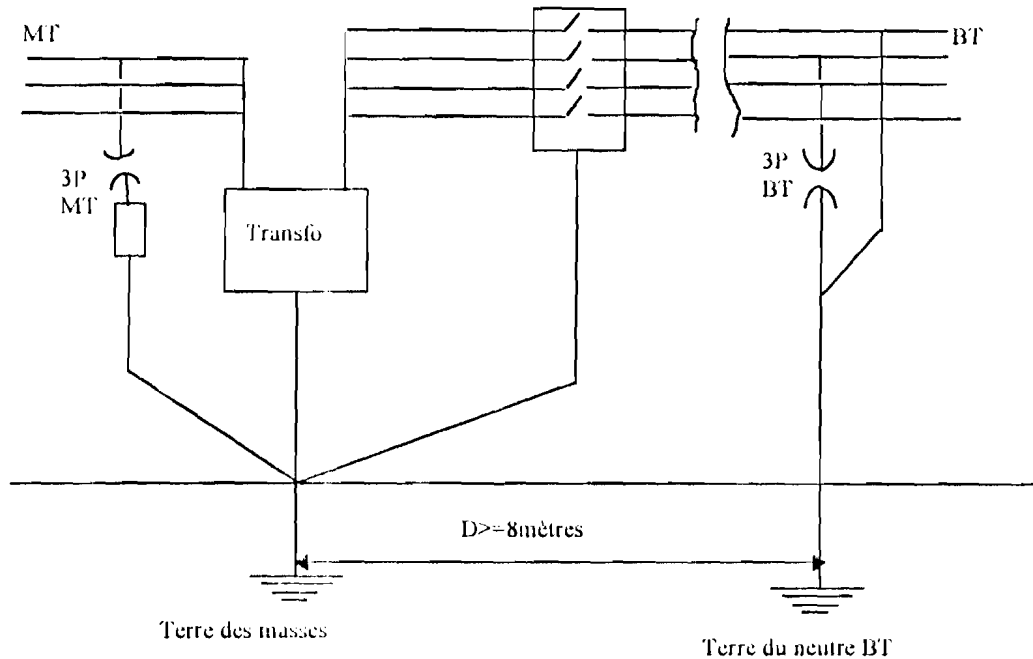


Figure I.10 : Protection complète d'un poste MT/BT avec suppression des risques d'amorçage MT/BT [19].

I.4.3.2. Problème de DMA au niveau de l'OPT

La disproportion des tensions de tenue au choc des différents matériels installés sur un site fait qu'une surtension résiduelle, qui peut être supportée sans risque par une installation à courant fort, devient extrêmement dangereuse pour les installations électroniques. Il est donc nécessaire d'éviter, dans toute la mesure du possible, les interactions d'une installations sur une autre.

Les installations électriques de toute nature sont classées en fonction de la plus grande des tensions nominales existant aussi bien entre deux quelconques de leurs conducteurs qu'entre l'un d'eux et la terre. Selon la valeur de la tension nominale, les installations sont classées comme indiqué sur le tableau 5 :

Domaines de tension		Valeur de la tension nominale U (Volt)	
		Courant alternatif	Courant continu
Très basse tension (TBT)		$U \leq 50$	$U \leq 120$
Basse tension (BT)	Domaine BTA	$50 < U \leq 500$	$120 < U \leq 750$
	Domaine BTB	$500 < U \leq 1000$	$750 < U \leq 1500$
Haute Tension (HT)	Domaine HTA	$1000 < U \leq 50000$	$1500 < U \leq 75000$
	Domaine HTB	$U > 50000$	$U > 75000$

Tableau I.6 : Classement des domaines de tension.

Pour prémunir ses installations de l'éventualité d'apparition d'une montée de potentiel transitoire nuisible due à la diffusion ou à la radiation du courant de foudre à travers les prises de terre des systèmes d'énergie, l'OPT applique les règles d'ingénierie suivantes [17] :

Les prises de terre de fonctionnement (Télex, concentrateurs, ...) et de protection (RP, Porteurs, Câbles enterrés, ...) TELECOM situés à proximité des réseaux de distribution ou de transport d'énergie doivent respecter des distances variant en fonction de la résistivité des sols, du type d'installation et du type de protection énergie. Ces distances s'entendent entre extrémités conductrices des systèmes de prise de terre. La résistivité du sol est mesurée avec un écartement d'électrode de $a = 5$ mètres lorsqu'on utilise la méthode de WENNER décrite dans l'annexe B (ceci revient à considérer la résistivité apparente du sol comme étant la résistivité équivalente d'un sol non homogène).

Les distances minimales à respecter entre ouvrages sont indiquées dans le tableau 6. Ces valeurs concernent les sols dont la résistivité moyenne est inférieure ou égale à 500 Ohm.

Comme on peut le constater, il est donné plus de détails sur la détermination de la DMA en comparaison avec la SBEE. Cela peut s'expliquer par le fait que les appareils de

télécommunications sont plus sensibles aux surtensions. Mais, il subsiste des ambiguïtés dans la détermination de la DMA comme cela fut le cas au niveau de la SBEE .

En effet, lorsque la résistivité du sol est supérieure à 3000 $\Omega.m$, la DMA est multipliée par 3. Quand la résistivité du sol est située entre 500 et 3000 $\Omega.m$, la DMA est multipliée par 2. Il évident que ces règles sont basées sur des méthodes empiriques.

On conçoit aisément que la notion de distance minimale d'approche soit liée au type de réseau et que la SBEE et l'OPT n'aient pas les mêmes critères pour les distances D_{te} et D_{to} de la figure I.11.

Ouvrages d'énergie	Ouvrages de l'OPT	
	Terres de protection ou de fonctionnement (DMA en mètre)	Cables posés en pleine terre, chambres souterraines et poteaux métallique (DMA en mètre)
Prise de terre HTA raccordée à des éclateurs	25 ⁽¹⁾	25 ⁽¹⁾
Prise de terre HTA raccordée à des parafoudres	8 ⁽¹⁾	8 ⁽¹⁾
Autres prises de terre HTA (organes de coupure ...)	8 ⁽¹⁾	8 ⁽¹⁾
Câble HTA souterrain avec câblette non isolée	2 ⁽¹⁾	2 ⁽¹⁾
Cable HTA souterrain avec câblette isolée (3)	2	2
Mise à la terre du neutre BT (1ère terre découplée ou interconnexion du neutre BT et des masses HTA)	2 ⁽¹⁾	2 ⁽¹⁾
Mise à la terre du neutre BT (1ère terre non découplée)	8 ⁽¹⁾	8 ⁽¹⁾
(1) Sauf cas exceptionnel nécessitant une étude particulière, ces distances seront multipliées : <ul style="list-style-type: none"> • par 2 pour des résistivités moyennes comprises entre 500 et 3000 Ohm-m • par trois pour des résistivités moyennes supérieures ou égales à 3000 Ohm-m 		
(3) Le cas d'un câble HTA sans câblette est équivalent à celui d'un câble HTA avec câblette isolée		
(4) On considère que la première mise à la terre du neutre est découplée de la terre des masses HTA lorsque la distance qui les sépare est supérieure ou égale à 8 mètres (pour des résistivités moyennes inférieures ou égales 500 Ohm-m.		

Tableau I.7 : Distances minimales d'approche appliquées à l'OPT [17].

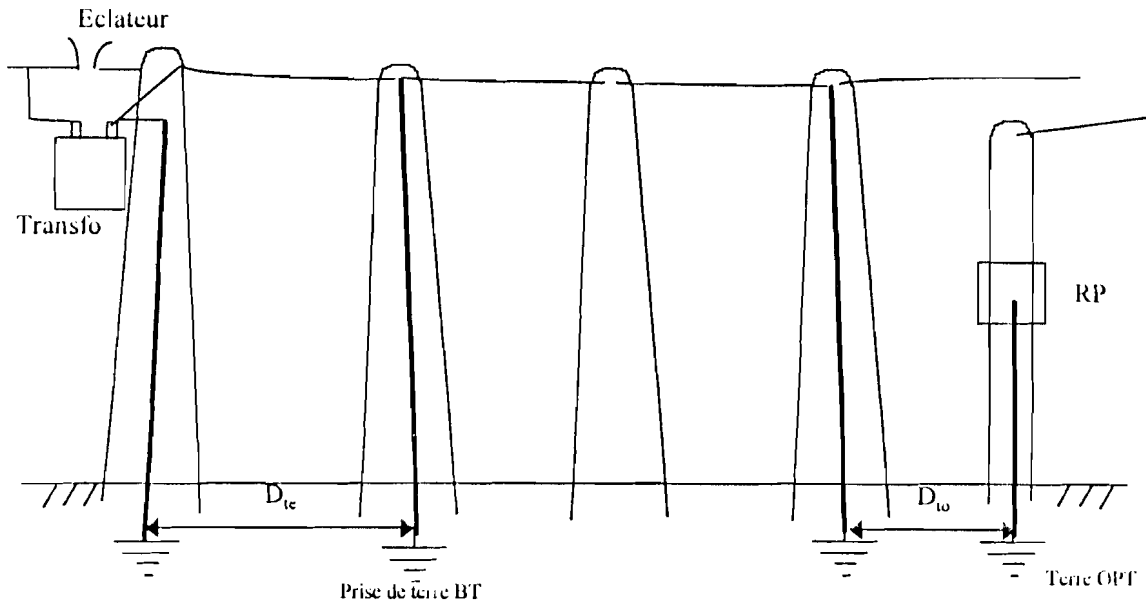


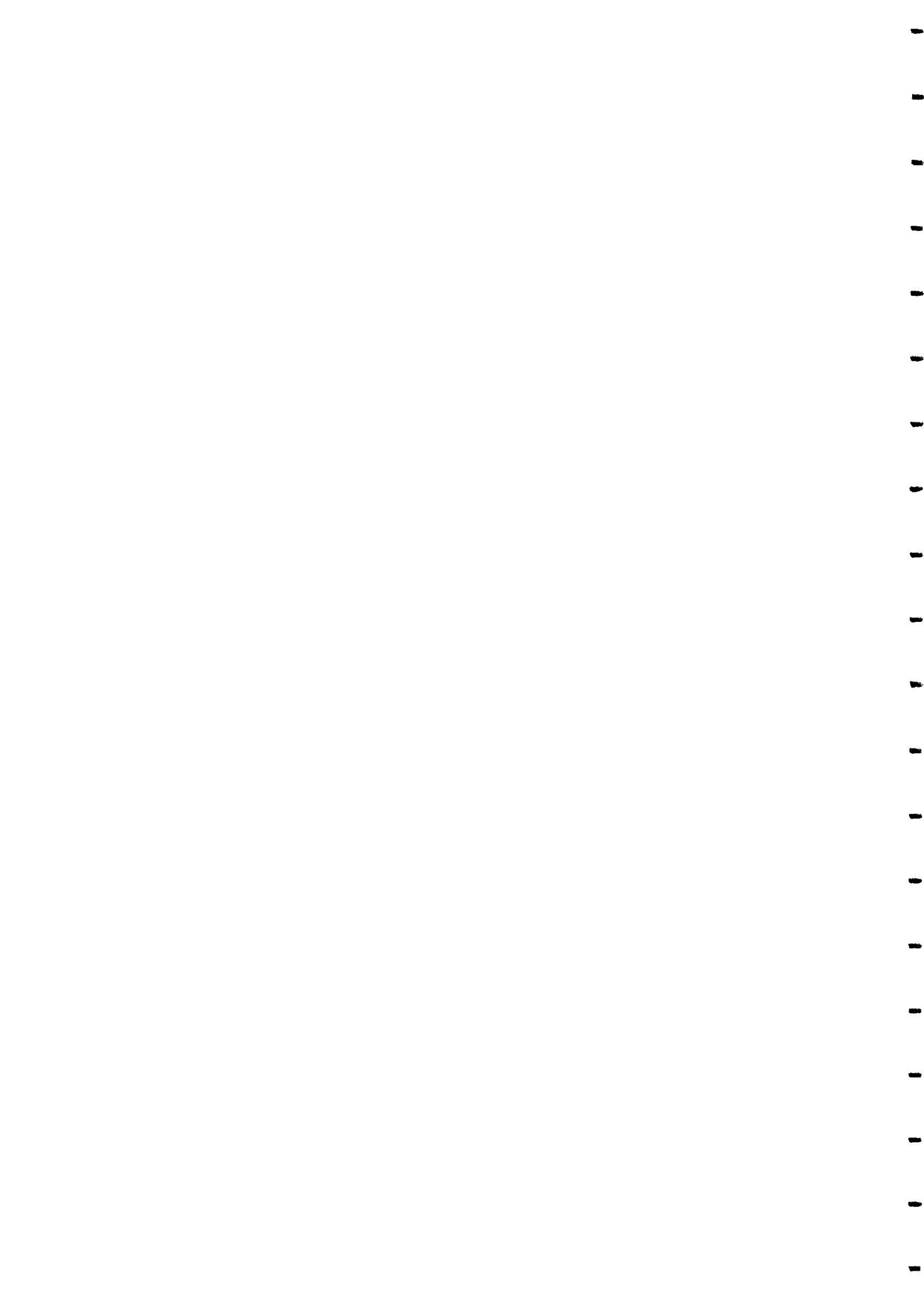
Figure I.11 : Définition de la DMA dans une installation de télécommunications.

1.4.4. Conclusion.

Les techniciens de l'OPT ont souvent eu tendance à reprocher à ceux de la SBEE de ne pas respecter les spécifications techniques en matière de DMA. Reproche que ces derniers ont toujours contesté à cause d'une part des spécifications vagues qui définissent ces grandeurs, d'autre part à cause du manque de concertation entre les deux parties sur la question.

Dans le cadre d'un projet de recherche appliquée, il a été retenu entre autres objectifs de poser et de solutionner les questions liées à la définition des DMA. Le problème n'ayant pas encore été traité dans la littérature scientifique et technique, il a été décidé de le traiter dans le cadre de ce mémoire.

A travers les trois chapitres qui suivent, nous montrons comment, grâce à la méthode des éléments finis, on peut procéder à l'étude de la répartition de la montée de potentiel transitoire à la surface du sol. La connaissance par simulation de cette répartition donne un moyen valable pour la définition des DMA entre les prises de terre de la SBEE et celles de l'OPT.



CHAPITRE II

MODELISATION DE LA PROPAGATION DE L'ONDE DE FOUDRE SUR UN PIQUET DE TERRE



Les principales étapes de la modélisation par la théorie des circuits sont :

1. Segmentation de la structure physique dans des éléments assez petits pour que leurs dimensions soient très inférieures à la longueur d'onde correspondant à la fréquence maximale dans le système ;
2. Représentation des segments par des cellules en pi (figure II.1) ;
3. Résolution par les méthodes de résolution classique des circuits.

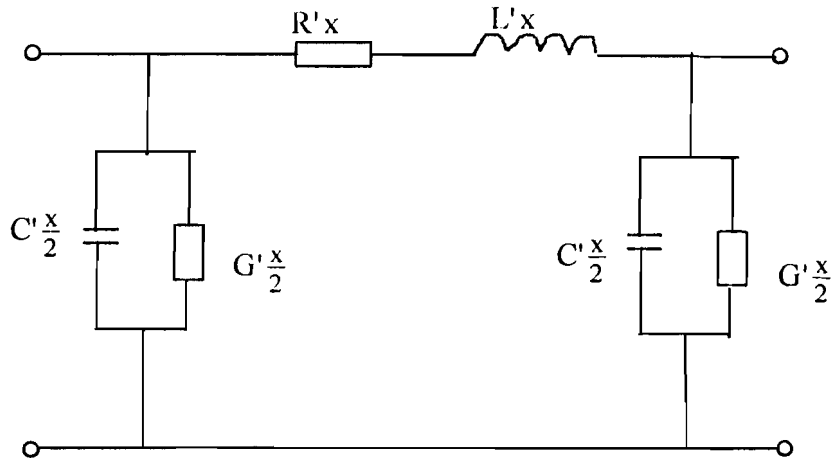


Figure II.1.: Segment de réseau de terre modélisé pour un traitement par la théorie des circuits

Le modèle résultant permet :

- de considérer une configuration de réseau de terre quelconque ;
- d'injecter le courant en tout nœud du réseau.

Les limites de l'approche par la théorie des circuits sont :

- en fréquence car on doit rester dans le domaine de l'approximation quasi-statique (voir annexe I) ;
- en comportement de sol car on néglige la dépendance en fréquence des éléments.

II.2.2. Méthode de la théorie des lignes

Dans la théorie des lignes, le champ en chaque point dans un plan perpendiculaire à la ligne de transmission dépend du courant et de la charge au point d'intersection de la ligne et du

plan, mais pas du courant aux autres points de la ligne. Il est alors possible d'exprimer le courant et le potentiel en chaque point de la ligne par une équation différentielle (équation des lignes ou des télégraphistes).

$$\frac{\partial i}{\partial x} + Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

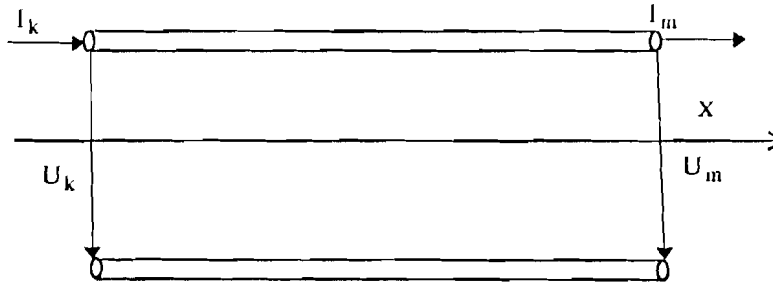


Figure II.2. Modélisation d'un segment de réseau de terre pour le traitement par la théorie des lignes.

Les principales étapes de la modélisation par la théorie des lignes sont :

1. segmentation du réseau de terre en éléments linéaires ;
2. description par la théorie des lignes ;
3. évaluation des éléments constituant le circuit équivalent ;
4. résolution par un code approprié (EMTP, LAPIN, etc.).

Dans ce modèle, les couplages inductifs entre les éléments constituant la prise de terre sont négligés, en supposant que la conduction est prépondérante par rapport aux couplages inductifs, quand des courants de grande amplitude sont dissipés dans un réseau de terre.

Chaque segment peut être représenté par une ligne de transmission, en utilisant les équations de Sunde [56], celles de P. JOHANNET [59] ou d'autres comme celles proposées par PLUMEY et al. [106]. Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

- le sol et l'air sont des milieux homogènes et occupent des demi-espaces avec une surface de séparation commune entre eux ;

- le réseau de terre est fait de conducteurs cylindriques et métalliques avec orientation horizontale ou verticale, qui permet l'approximation des conducteurs filiformes c'est-à-dire que la longueur du segment est largement supérieure à son rayon.

II.2.3. La méthode de la théorie du champ électromagnétique.

Plus rigoureuse que les deux précédentes, cette théorie se subdivise en deux sous-groupes : la théorie des antennes [48, 96-99, 104], et la méthode de couplage électromagnétique [44,45].

La théorie des antennes traite de la transmission d'ondes électromagnétiques en trois dimensions dans l'espace ou les matériaux. La solution des problèmes de champs est généralement fondée sur une équation d'onde tridimensionnelle, avec l'introduction des concepts de potentiels scalaires ou vectoriels. Par le choix adapté d'un système de coordonnées, dépendant du type de symétrie du problème traité, il est possible d'obtenir des solutions mathématiques pour certains problèmes, contenant des matériaux homogènes.

La procédure de base de la modélisation des réseaux de terre avec la théorie des antennes utilise l'équation électrique intégrale pour un conducteur filiforme. Il est tenu compte de l'interface air-sol par la substitution de la fonction de GREEN $g(r,r')$ pour un milieu infini par une fonction de GREEN modifiée $G(r,r')$, qui est composée de $g(r,r')$ et d'un terme de correction pour le champ réfléchi [61,62].

La modélisation du réseau de terre et la simulation de son comportement transitoire sont réalisées en quatre étapes, qui sont visiblement différentes des étapes de base des deux approches précédentes :

1. Modélisation de l'ensemble du réseau de terre par un ensemble de conducteurs filiformes ;
2. Evaluation de la fonction de transfert dans le domaine fréquentiel ;
3. Inversion avec la transformée de Fourier afin d'obtenir la réponse en temporel ;
4. Résolution.

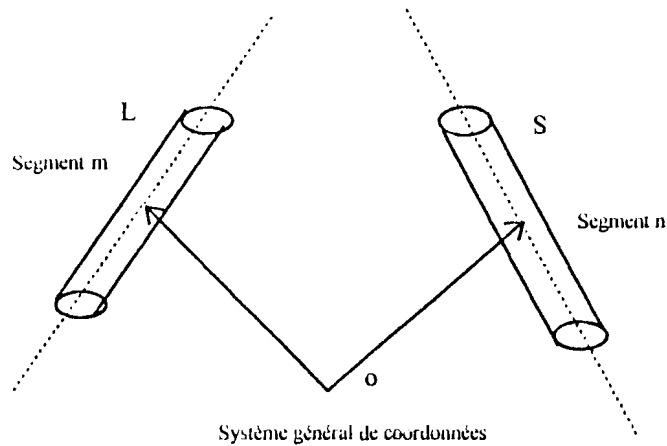


Figure II.3. Modélisation d'un segment de réseau de terre pour traitement par la théorie des antennes.

Le modèle physique employé pour la dérivation de la fonction de transfert est fondé sur les hypothèses suivantes :

- le sol et l'air sont des milieux homogènes et occupent des demi-espaces avec une surface de séparation commune entre eux ;
- le réseau de terre est formé de conducteurs cylindriques et métalliques avec orientation quelconque, qui satisfont l'approximation des conducteurs filiformes.

La méthode consiste en la résolution numérique des équations de Maxwell sous forme intégrale [49]. Dans ce formalisme, les calculs sont faits en deux étapes : calcul du courant puis calcul du champ électrique ou vice versa. Pour prendre en compte les milieux semi-infinis que constituent le sol et l'air, les auteurs de la méthode utilisant l'intégrale de bord et l'intégrale de Sommerfeld selon l'approche introduite par R. J. Lythe et D. L. Lager [90]. Dans une seconde phase, la réponse est déterminée sur la base de la fonction de transfert par la Transformée de Fourier Rapide selon G. J. Burke et E. K. Miller [91].

La méthode de la théorie des antennes est difficile à implanter et très lourde sur le plan numérique. Aussi, elle ne permet de calculer de façon précise que le champ électrique. La

détermination du potentiel (qui est en définitive l'information recherchée), se fait à partir de la connaissance du champ électrique. Il est à noter que cette méthode ne s'applique qu'au milieu homogène.

La méthode de couplage électromagnétique est basée sur une expression exacte du champ électromagnétique et du couplage entre les segments de conducteur. La simplification faite dans cette méthode est celle de la théorie des images modifiée. Cette simplification limite son domaine de validité à des fréquences de quelques MHz, domaine couvrant largement le spectre de fréquence que l'on rencontre dans les phénomènes de propagation d'onde de foudre. Les principales hypothèses sont :

- le réseau de terre est formé de conducteurs cylindriques et métalliques avec orientation quelconque, qui satisfont l'approximation des conducteurs filiformes.
- le courant aux extrémités non interconnectées et ne constituant pas un point d'injection de courant est nul ;
- le sol est modélisé comme un demi-espace linéaire et homogène et ayant des conductivité, permittivité et perméabilité constantes.

L'évaluation de la distribution du courant se fait en prenant en compte l'impédance mutuelle entre segment de conducteur. La connaissance de la distribution du courant est utilisée pour déterminer sur la base des équations rigoureuses développées par D. V. OTTO et J. H. RICHMOND [106], le champ électrique au point considéré. Cela permet ensuite de calculer le potentiel à la surface du conducteur

II.2.4. Méthode des éléments finis

Comme dans les autres méthodes décrites plus haut, la méthode des éléments finis est basée sur les équations de MAXWELL. Deux variantes sont aujourd'hui avancées dans la littérature : la première est celle qu'on peut appeler la méthode <<non combinée>> [72,74] et la méthode <<combinée>> [75].

La méthode <<non combinée>> part de la formulation \vec{A} -V (où \vec{A} est le potentiel magnétique qui est une grandeur vectorielle, et V le potentiel électrique qui est une grandeur

scalaire). O. BIRO et K. PREIS [73] utilise la formulation \vec{A} -V dans le milieu conducteur, et le potentiel vecteur \vec{A} ou le potentiel scalaire V dans l'air. NEKHOUL B. et al. [72] se basant sur cette approche sont partis du système d'équations suivant :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} (\text{rot} \vec{W}) \cdot (\text{rot} \vec{A}) + \frac{1}{\mu} (\text{div} \vec{W})(\text{div} \vec{A}) + \sigma j \omega \vec{W} \cdot \vec{A} + \sigma \vec{W} \cdot \text{grad} V \right) d\Omega = 0 \quad (2.3)$$

$$\int_{\Omega} (\sigma \text{grad} w \cdot (j \omega \vec{A} + \text{grad} V)) d\Omega = 0 \quad (2.4)$$

Pour le milieu non conducteur (air) avec une source de courant, on utilise généralement le potentiel vecteur \vec{A} . Cela s'exprime par la relation :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} (\text{rot} \vec{W}) \cdot (\text{rot} \vec{A}) + \frac{1}{\mu} (\text{div} \vec{W})(\text{div} \vec{A}) \right) d\Omega = 0 \quad (2.5)$$

Tenant compte du fait que la méthode des éléments finis est gourmande en temps de calcul, et dans un souci d'optimisation, NEKHOUL B. et al. [72] ont suggéré de réduire l'utilisation des grandeurs vectorielles autant que possible. Ils ont alors considéré, à la place de l'équation 2.6, la formulation dite de potentiel scalaire magnétique total, exprimée par l'équation :

$$\int_{\Omega} (\mu (\text{grad} w) \cdot (\text{grad} \varphi)) d\Omega = 0 \quad (2.6)$$

Dans le cas des prises de terre, pour un maillage en 3D, la disproportion entre les rayons des conducteurs de terre et leurs longueurs posent des problèmes de maillage. Dans ces conditions, NEKHOUL B. et al. ont pris en compte le fait que pour ces types de milieu (fils conducteurs de faible diamètre), le potentiel vecteur \vec{A} et le potentiel électrique scalaire V restent constants dans toute la section droite du conducteur [86].

La considération que le conducteur est un circuit filiforme autorise à ne pas mailler les conducteurs de terre et l'on peut valablement se limiter à leur découpage en segments de

conducteurs de terre (c'est à dire les prendre comme des éléments linéiques). Dans ce cas, la formulation A -V peut se mettre sous la forme suivante, sachant que $d\Omega = Sd\ell$:

$$\int_{\Omega} S \left(\frac{1}{\mu} (\text{rot} \vec{W}_t) \cdot (\text{rot} \vec{A}) + \frac{1}{\mu} (\text{div} \vec{W}_t) (\text{div} \vec{A}) + \sigma j \omega \vec{W}_t \cdot \vec{A} + \sigma \vec{W}_t \cdot \text{grad} \vec{V} \right) d\ell = 0 \quad (2.7)$$

$$\int_{\Omega} S (\sigma \text{grad} w_t \cdot (j\omega \vec{A} + \text{grad} \vec{V})) d\ell = 0 \quad (2.8)$$

Les expressions déduites de cette formulation dépendent de la fréquence, et permettent surtout de calculer facilement la valeur de l'impédance en haute ou en basse fréquence. On peut remarquer que pour un signal impulsionnel du type coup de foudre, cette formulation nécessiterait l'usage de la transformée de Fourier. Il est évident qu'il se poserait un problème de complexité de mise en oeuvre d'une telle méthode surtout pour le calcul en régime impulsionnel et les temps de calcul deviendraient prohibitifs .

En plus, si l'on s'accorde à dire que la recherche d'une excellente précision dans les calculs des prises de terre est vaine et illusoire à cause des nombreuses incertitudes liées entre autres :

- à la mesure des propriétés du sol ;
- à la modélisation de ce sol de nature très hétérogène ;
- aux variations saisonnières de ses propriétés physiques ;
- à la qualité très hasardeuse des contacts entre les conducteurs de terre ;
- aux phénomènes d'ionisation etc...,

il importe de tenir compte dans le développement des méthodes, du compromis nécessaire entre les approximations, les équations mathématiques de description des phénomènes physiques et surtout de l'efficacité des outils de résolution. C'est en prenant en compte toutes ces considérations, que nous avons proposé la méthode << combinée >> de résolution par éléments finis [75].

La méthode << combinée >> de résolution par éléments finis est une association de la méthode de théorie des lignes avec la méthode des éléments finis. Il a été montré par F. MENTER [55]

que pour des fréquences de 50 Hz à 3 MHz, la méthode de théorie de ligne donne des résultats très satisfaisants et ceci correspond au domaine fréquentiel des coups de foudre.

La méthode <<combinée>> consiste donc à rechercher les conditions aux bords du conducteur par la méthode des lignes de transmission et d'utiliser par la suite ces résultats pour satisfaire les conditions aux limites dans la méthode des éléments finis. L'équation à résoudre par la méthode des éléments finis est déduite également des équations de MAXWELL. On y met en évidence les deux phénomènes physiques qui caractérisent l'écoulement de l'onde de foudre dans le sol : la diffusion du courant et le rayonnement. Pour certaines valeurs de la résistivité du sol, la composante rayonnement peut être négligée.

II.3. ETUDE DE LA PROPAGATION DU COURANT DE Foudre SUR UN PIQUET DE TERRE DANS UN MILIEU HOMOGENE

II.3.1. Calcul de l'impédance impulsionnelle Z_t de la prise de terre [59].

Les paramètres linéiques primaires de la ligne sont :

- impédance Z ($\Omega \cdot m$) avec $Z=R+j\omega L$;
- capacité C (F/m) ;
- perditance G (S/m).

Ses paramètres secondaires sont :

- λ la constante de longueur d'onde ;
- Z_c qui représente l'impédance caractéristique.

$$\text{où : } \lambda = \sqrt{Z(G + j\omega C)} \quad (2.9) \quad \text{et } Z_c = \sqrt{\frac{Z}{G + j\omega C}} \quad (2.10)$$

L'impédance impulsionnelle de la prise de terre est équivalente à l'impédance d'entrée de la ligne de transmission considérée, dont l'expression est :

$$Z_i = \frac{Z_c}{\text{th}(\lambda \ell)} = \frac{\sqrt{\frac{Z}{G + j\omega C}}}{\text{th}(\ell \sqrt{Z(G + j\omega C)})} \quad (2.11)$$

Cette expression fournit donc l'impédance de la prise de terre à toutes les fréquences. Comme elle est fonction de la variable opérationnelle p , elle est applicable à tous les phénomènes transitoires justiciables de la transformée de Laplace.

II.3.2. Constantes linéiques d'une prise de terre

Considérons une prise de terre filiforme constituée d'un conducteur cylindrique droit, de longueur ℓ et de diamètre $2a$, enfoui dans un sol homogène de résistivité ρ ; on supposera la profondeur d'enfouissement grande en première étape.

II.3.2.1. Calcul de la perte G linéique.

Ce terme correspond à la résistance vue par les filets de courant s'écoulant à la terre par unité de longueur du conducteur.

La résistance ohmique transversale d'un élément cylindrique de sol de rayon r et d'épaisseur dr s'écrit :

$$dR_s = \frac{\rho}{2\pi} \frac{dr}{\ell r} \quad (2.12)$$

Pour intégrer le terme dr/r , nous allons introduire la notion de diamètre d'action de la prise de terre notée D . En effet, l'intégration de dr/r conduit à un logarithme dont la valeur est infinie pour r tendant vers l'infini. Les distances existant entre les prises de terre réelle et le sol de référence ne peut pas être infinie. Dans la pratique, elle se situe entre 100 mètres et 200 mètres au plus. P. JOHANNET [59] a montré que le diamètre d'action peut être pris égal à 70 mètres sans commettre d'erreur notable. Dans la suite, nous adopterons cette valeur de diamètre d'action. Avec cette hypothèse, on obtient :

$$R_l = \frac{\rho}{2\pi\ell} \int_a^{D/2} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln\left(\frac{D}{2a}\right) \quad (2.13)$$

Par unité de longueur :

$$G = \frac{1}{R_l} = \frac{2\pi}{\rho \ln\left(\frac{D}{2a}\right)} \quad (2.14)$$

II.3.2.2. Calcul de la capacité linéique C

La formule, classique, est obtenue de façon similaire :

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r \epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{2a}\right)} \quad (2.15)$$

II.3.2.3. Calcul de l'impédance linéique Z

L'impédance linéique Z est celle d'un conducteur cylindrique enterré constituant la prise de terre, le retour du courant s'effectuant par une gaine fictive, parfaitement conductrice de diamètre D.

L'impédance linéique comprend :

- la résistance ohmique du conducteur enterré, tenant compte de l'effet de peau dans ce conducteur de résistivité ohmique ρ_{cu} ;
- l'inductance correspondant au flux magnétique émis dans l'intervalle tubulaire compris entre $2a$ et D .

On obtient [59] :

$$Z = R + j\omega L = \frac{4\rho_{cu}}{\pi(2a)^2} \sqrt{1 + \frac{4\mu_0 a^2}{16\rho_{cu}} j\omega} + \frac{\mu_0}{2\pi} j\omega \ln\left(\frac{D}{2a}\right) \quad (2.16)$$

II.3.3. Equations de propagation dans le cas d'une injection de courant

Dans tout ce qui va suivre, nous supposons que nous travaillons avec une injection de courant du type bi-exponentielle de la forme:

$$i(0, t) = I_0(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.17)$$

L'approche de la théorie des lignes de transmission est fondée sur la description du piquet de terre comme ligne de transmission avec la terre comme retour. Comme une ligne de transmission, le piquet est entièrement décrit par son impédance caractéristique Z_c et son coefficient de propagation γ . Les données de base sont : la longueur du piquet de terre ℓ , le rayon du piquet de terre a , la résistivité du sol ρ , la permittivité relative ϵ_r et la perméabilité μ_0 .

Le courant et le potentiel en chaque point de la ligne sont donnés l'équation des télégraphistes écrite ici après transformation de Laplace :

$$\begin{aligned} -\frac{dV(x, p)}{dx} &= (R + pL)I(x, p) \\ -\frac{dI(x, p)}{dx} &= (G + pC)V(x, p) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Après toutes les transformations nécessaires, ce système peut se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} V(x, p) &= V(0, p) \cosh(\gamma x) - Z_c I(0, p) \sinh(\gamma x) \\ I(x, p) &= -\frac{V(0, p)}{Z_c} \sinh(\gamma x) + I(0, p) \cosh(\gamma x) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Les conditions aux limites sont définies comme suit :

- A l'entrée de la ligne :

$$i(0,t) = I_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.20)$$

dont la transformée de Laplace est :

$$I(0,p) = \frac{b-a}{(a+p)(b+p)} I_0 \quad (2.21)$$

- A l'autre bout de la ligne, le courant est $i(\ell, t) = 0$. Ceci se justifie par le fait que le courant longitudinal qui circule vers le sol à cet endroit est négligeable par rapport au courant transversal total.

On peut, pour n'importe quelle valeur de x , et pour une valeur initiale du courant donnée, déterminer la loi d'évolution de la tension et du courant le long du piquet pour une fréquence donnée. Pour passer de la solution fréquentielle à la solution temporelle, on utilise la transformée inverse de Laplace. P. JOHANNET et al. [59,60] proposent un algorithme de calcul (code LAPIN) de la transformée inverse de Laplace que nous utiliserons.

En éliminant $V_1(0,p)$ (puisque c'est le courant qui est donné), nous aurons :

$$\begin{bmatrix} V(x,p) \\ I(x,p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cosh(\gamma x) \frac{\cosh(\gamma \ell)}{\sinh(\gamma \ell)} & -Z_c \sinh(\gamma x) \\ \frac{\sinh(\gamma x) \cosh(\gamma \ell)}{Z_c \sinh(\gamma \ell)} & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(0,p) \\ I_1(0,p) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Sous cette forme, tout est totalement défini pour la détermination de la répartition de la tension et de courant. En remplaçant $I_1(0,p)$ par sa valeur, on obtient :

$$I(x,p) = \frac{(b-a)I_0}{(a+p)(b+p)} \left[\cosh(\gamma x) - \frac{\cosh(\gamma \ell)}{\sinh(\gamma \ell)} \sinh(\gamma x) \right] \quad (2.23)$$

$$V(x,p) = \frac{(b-a)I_0}{(a+b)(b+p)} Z_c \left[-\sinh(\gamma x) + \frac{\cosh(\gamma \ell)}{\sinh(\gamma \ell)} \cosh(\gamma x) \right] \quad (2.24)$$

II.4. APPLICATION DU CODE LAPIN [59]

Dans la littérature [40,44,96,97,98], pour les simulations des transitoires de foudre dans les prises de terre, les sols sont classés en trois types:

- sol homogène humide ou de bonne résistivité ($\rho = 100 \Omega.m$) ;
- sol homogène de moyenne résistivité ($\rho = 500 \Omega.m$) ;
- sol homogène sec ou de mauvaise résistivité ($\rho = 1000 \Omega.m$) ;

Nous adoptons cette classification et traitons dans nos simulations le sol comme appartenant à l'un des types ainsi définis. Nous étudions l'influence de la longueur du piquet de terre, celle de la permittivité du sol et de la forme de l'onde du courant sur l'élévation en potentiel et la répartition du courant. La valeur du pic du courant est prise égale à 1 kA comme dans les références [43,54,99]. La figure II.4. donne le schéma de principe d'implantation dans le sol du piquet de terre simulé.

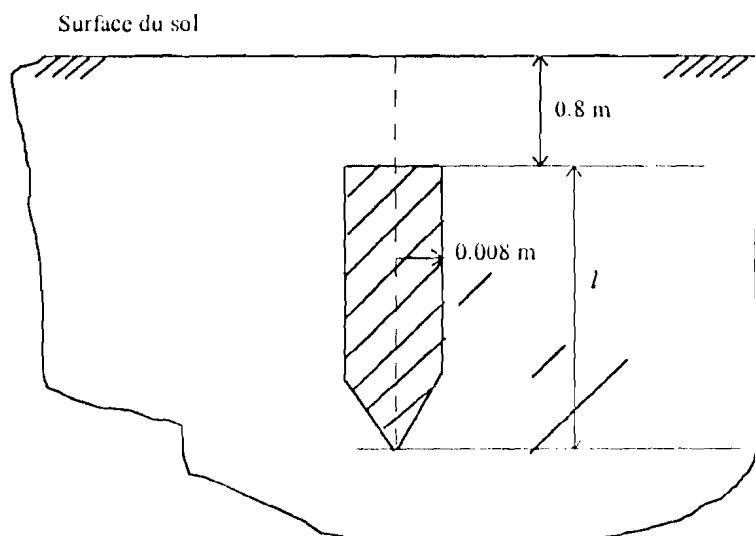


Figure II.4. Dessin d'implantation du piquet dans le sol.

II.4.1. Influence de la longueur du piquet sur la montée en potentiel au point d'injection du courant.

Les figures II.5. et II.6. donnent les variations de la montée en potentiel au point d'injection du courant pour différentes valeurs de la longueur du piquet, respectivement pour $\rho = 100 \Omega.m$ et $\rho = 500 \Omega.m$. et un courant d'amplitude 1 kA et de type 1.2/50 (courbe 9). On ne considère que les premiers instants de l'onde.

De ces courbes, on peut remarquer qu'en doublant la longueur du piquet de terre, de 2 mètres à 4 mètres, on fait chuter la montée en potentiel dans le même rapport. A partir d'une certaine valeur, l'augmentation de la longueur du piquet de terre ne permet plus de réduire de façon sensible la montée en potentiel.

On note aussi, que plus le piquet est long pour une même valeur de résistivité de sol, plus la durée du front de montée en potentiel diminue. Les courbes sont numérotées comme indiquées sur le tableau II.1.

La figure II.7. donne la variation des maximums de montée en potentiel au point d'injection du courant. Dans cette figure, la courbe n° 1 correspond à une résistivité $\rho = 100 \Omega.m$ et la courbe n° 2 correspond à une résistivité $\rho = 500 \Omega.m$. Dans le cas de la première courbe, au delà de 6 mètres l'augmentation de la longueur du piquet n'apporte pas une diminution supplémentaire de la montée en potentiel. La courbe n° 2 décroît très rapidement dans la région des faibles valeurs de longueur de piquet, et cette décroissance prend l'allure d'une exponentielle décroissante vers les valeurs plus grandes de la longueur du piquet.

N° de courbe	1	2	3	4	5	6	7	8
Longueur de piquet (m)	2	4	6	8	10	12	14	16

Tableau II.1. Correspondance des courbes des figures II.5 et II.6.

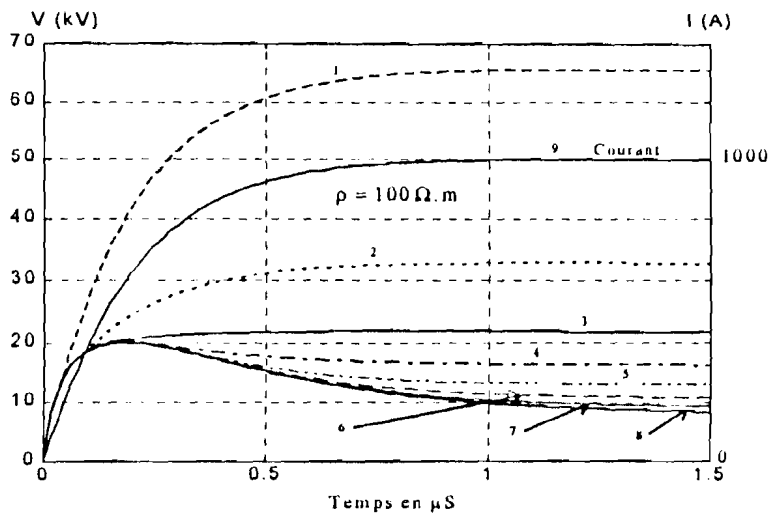


Figure II.5. : Variation de la montée en potentiel pour une bonne résistivité de sol.

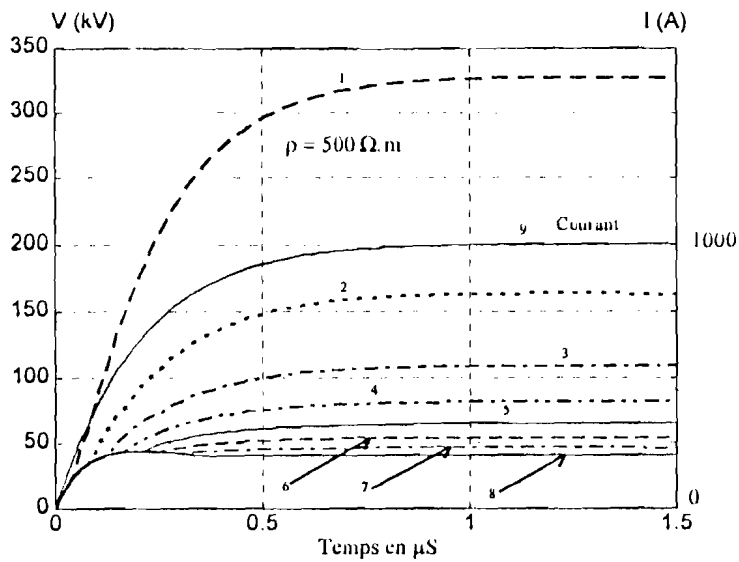


Figure II.6. : Variation de la montée en potentiel pour une résistivité moyenne de sol.

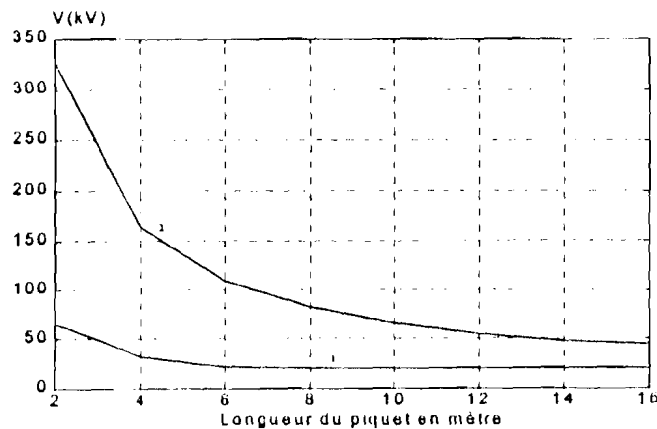


Figure II.7 : Variation des maximums de la montée en potentiel en fonction de la longueur du piquet (1 : $\rho = 100 \Omega.m$; 2 : $\rho = 500 \Omega.m$)

II.4.2. Evolution de la montée en potentiel $v(x,t)$ sur différents points du piquet de terre.

Dans cette partie, nous étudions la variation temporelle de la montée en potentiel le long du piquet de terre. Pour cela, cinq points sont choisis le long du piquet de terre selon le tableau II.2. L'onde de courant est de type 1.2/50. Nous nous plaçons d'abord dans le cas d'une bonne résistivité de sol.

Des figures II.8 à II.22, on peut faire les remarques suivantes :

- les valeurs des montées en potentiels atteignent une même limite après une période transitoire ; cette valeur limite est proportionnelle à la valeur de la résistivité du sol. Ces valeurs sont représentées dans la figure II.23 pour différentes valeurs de la longueur du piquet de terre ;
- pour des sols ayant des valeurs élevées de résistivité, la montée en potentiel aux temps proches du temps initial ne dépasse pas la valeur limite de montée en potentiel ;
- pour les valeurs faibles ou moyennes de résistivités de sol, le pic de la montée en potentiel est supérieur à la valeur de "régime établi" ;
- pour des piquets très courts (de l'ordre de deux mètres), la répartition de la montée en potentiel le long du piquet de terre est quasi identique pour tout les points du piquet ;
- les phénomènes de réflexion font apparaître sur certaines courbes des formes de "bosses" ; ces "bosses" sont plus nettes pour des piquets relativement longs. On constate que plus le piquet est court, moins apparaissent ces "bosses", le front de l'onde n'ayant pas dans ces cas, le temps de se développer complètement avant d'être soumis aux réflexions à l'autre bout du piquet de terre ;
- la vitesse de propagation de l'onde, inférieure à celle de la lumière, est de l'ordre de 1.610^8 m/s ; toutefois, on constate que plus la résistivité du sol augmente et que le maximum de la montée en potentiel croît, plus la période transitoire devient courte due à une plus grande vitesse de propagation de l'onde électromagnétique.

N° de courbe	1	2	3	4	5
X (m)	0	$\frac{\ell}{4}$	$\frac{\ell}{2}$	$\frac{3\ell}{4}$	ℓ

Tableau II.2. : Correspondance des courbes des figures II.8. à II.22.

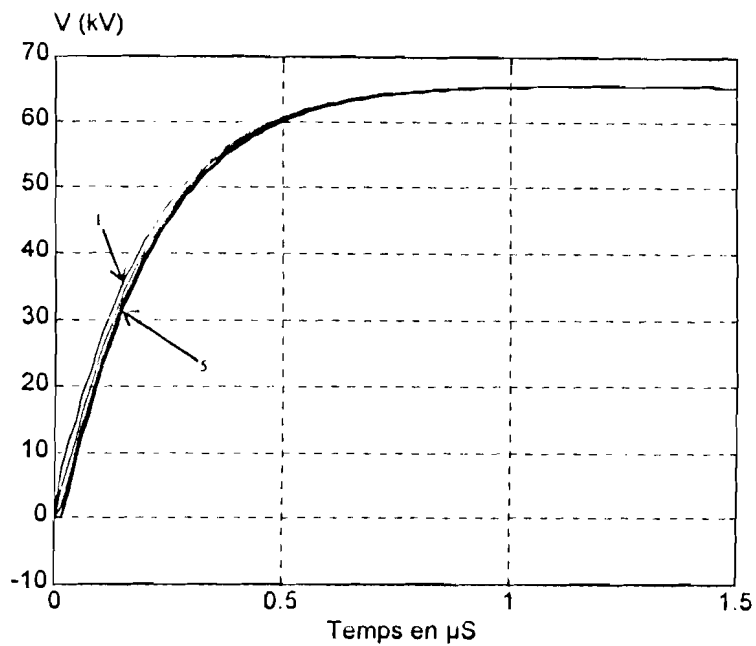


Figure II.8. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ et $\ell = 2 \text{ m}$).

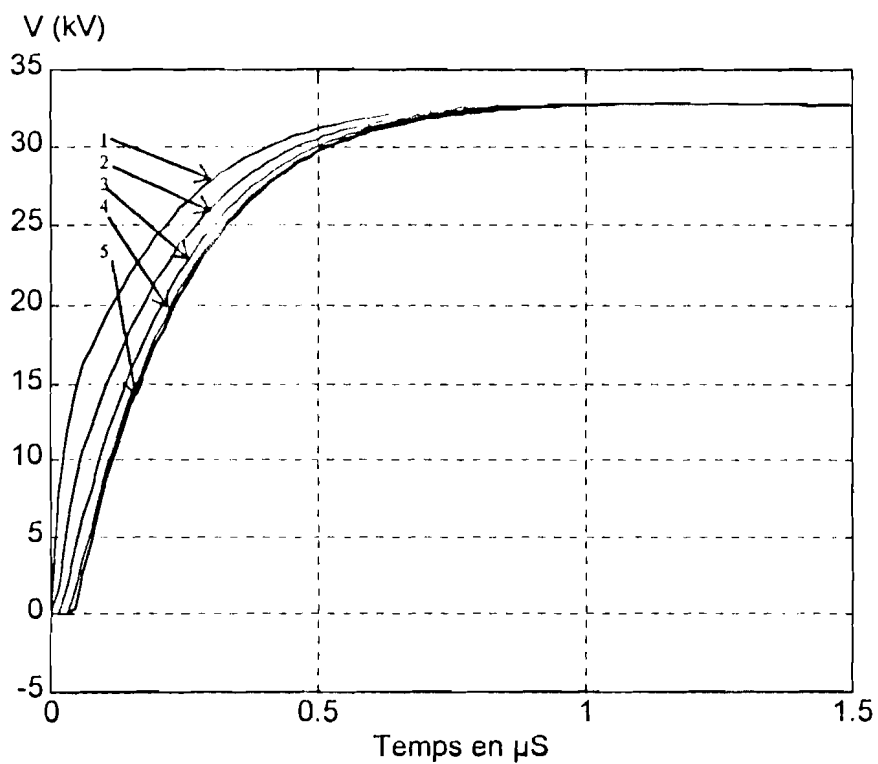


Figure II.9. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ et $\ell = 4 \text{ m}$).

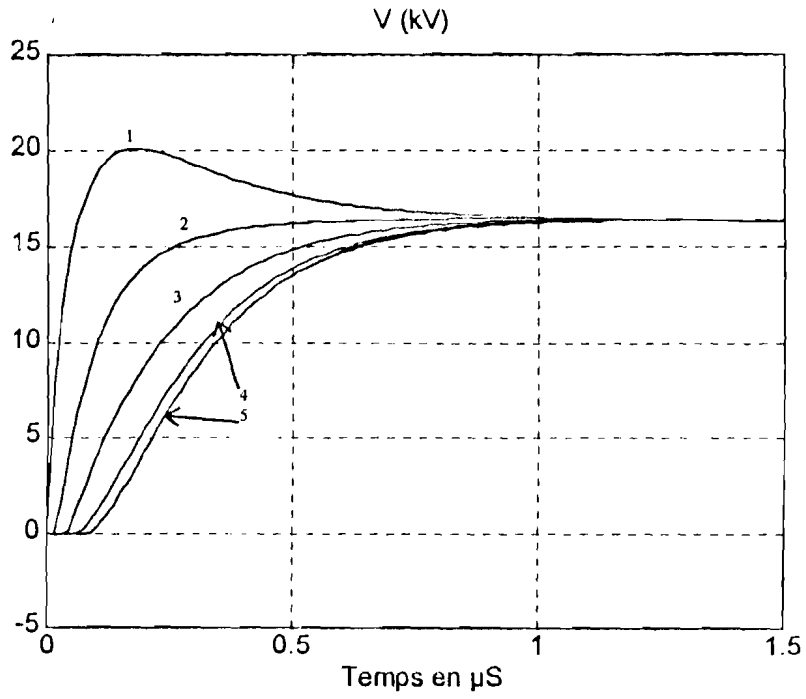


Figure II.10. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 100 \Omega.m$ et $\ell = 8 \text{ m}$).

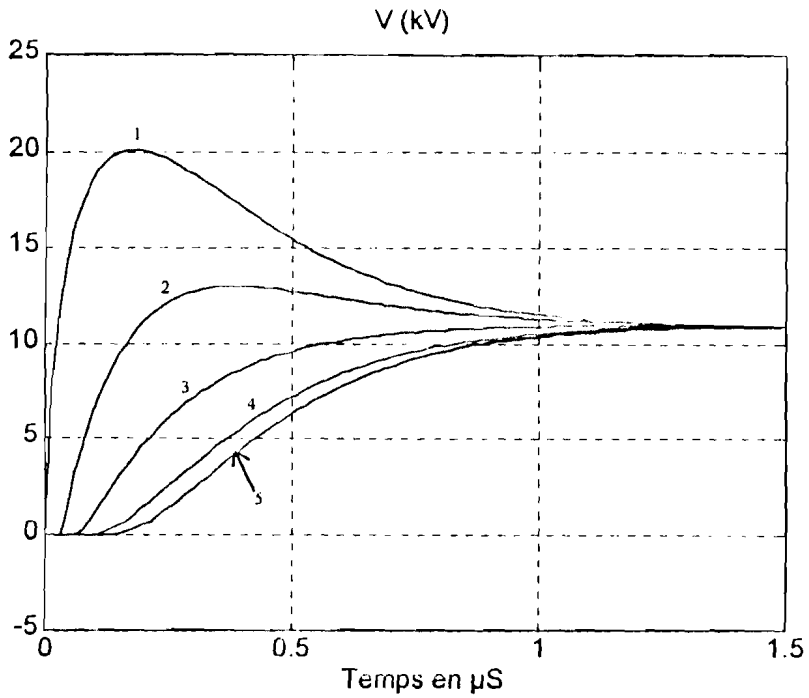


Figure II.11. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 100 \Omega.m$ et $\ell = 12 \text{ m}$).

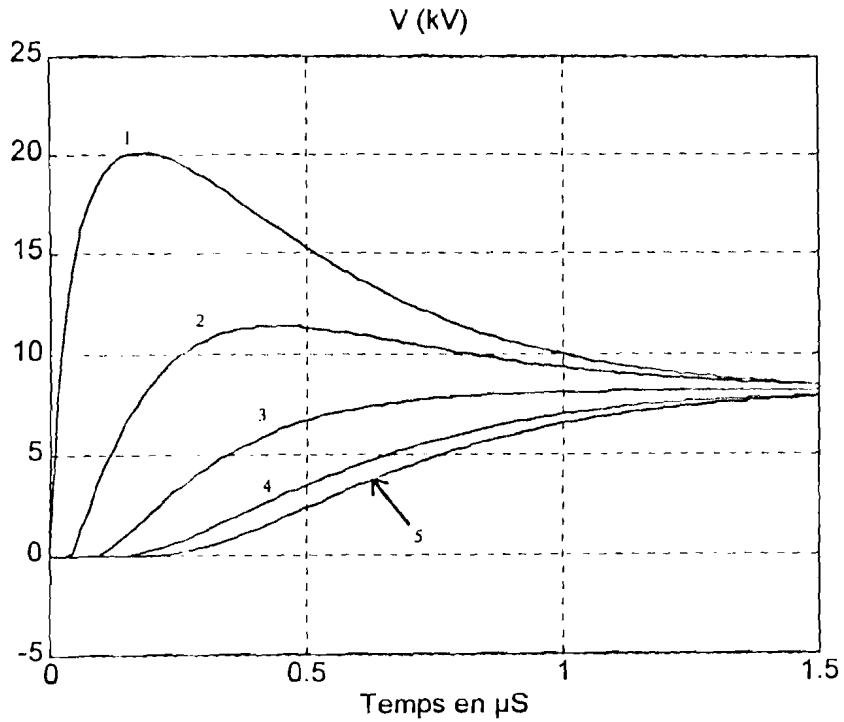


Figure II.12. : Courbe de $v(x,t)$ pour la résistivité $\rho = 100 \Omega.m$ pour $\ell = 16 m$.

Nous reprenons les mêmes courbes pour $\rho = 500 \Omega.m$ puis pour $\rho = 1000 \Omega.m$.

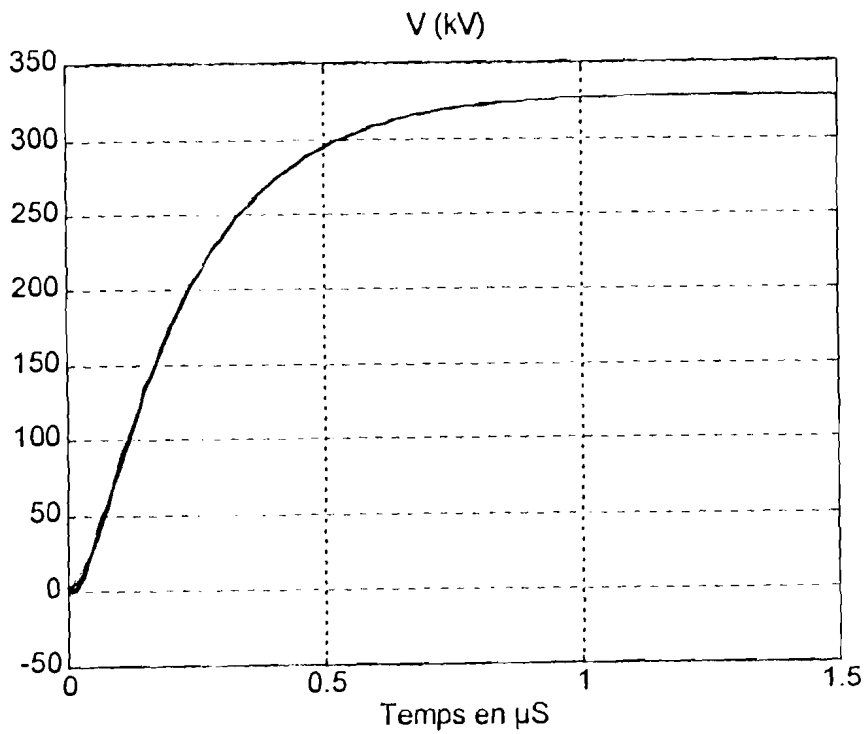


Figure II.13. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 500 \Omega.m$ et $\ell = 2 m$).

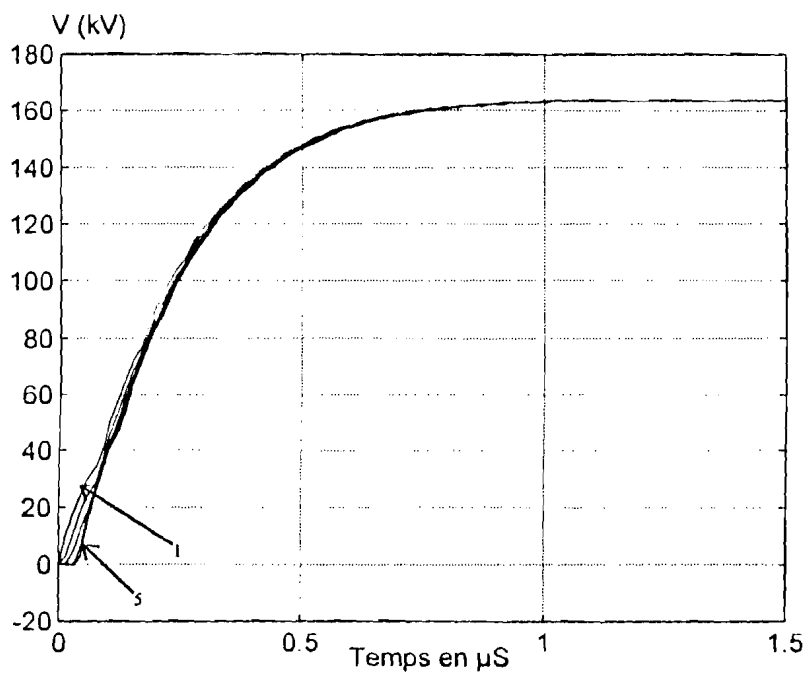


Figure II.14. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 500\Omega.m$ et $\ell = 4$ m).

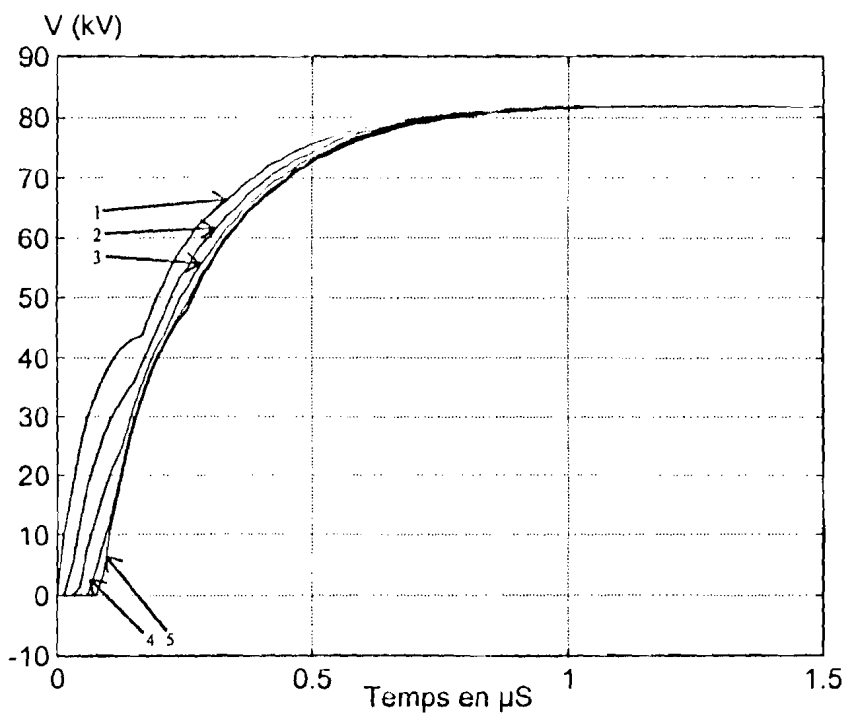


Figure II.15. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 500\Omega.m$ et $\ell = 8$ m).

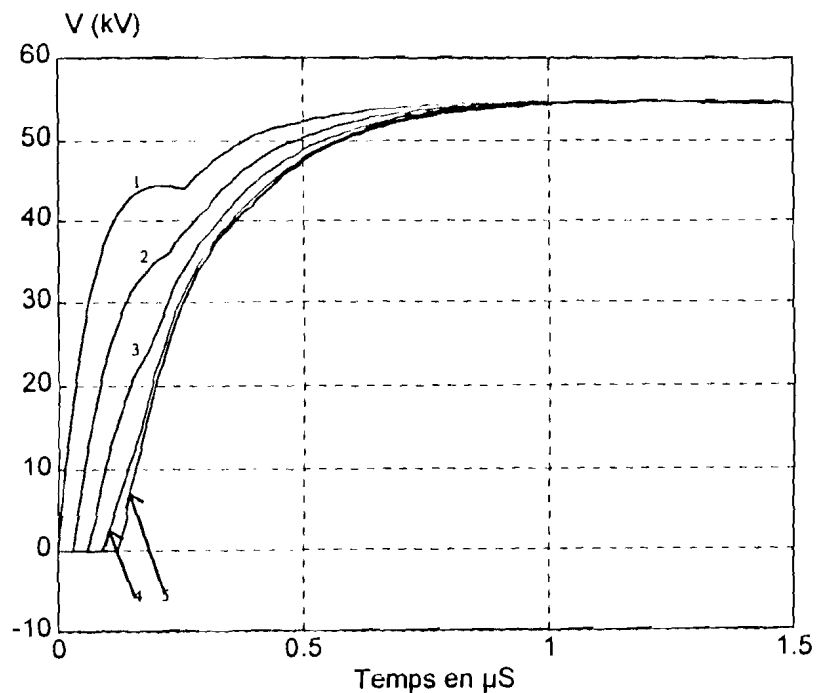


Figure II.16. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 500\Omega.m$ et $\ell = 12$ m).

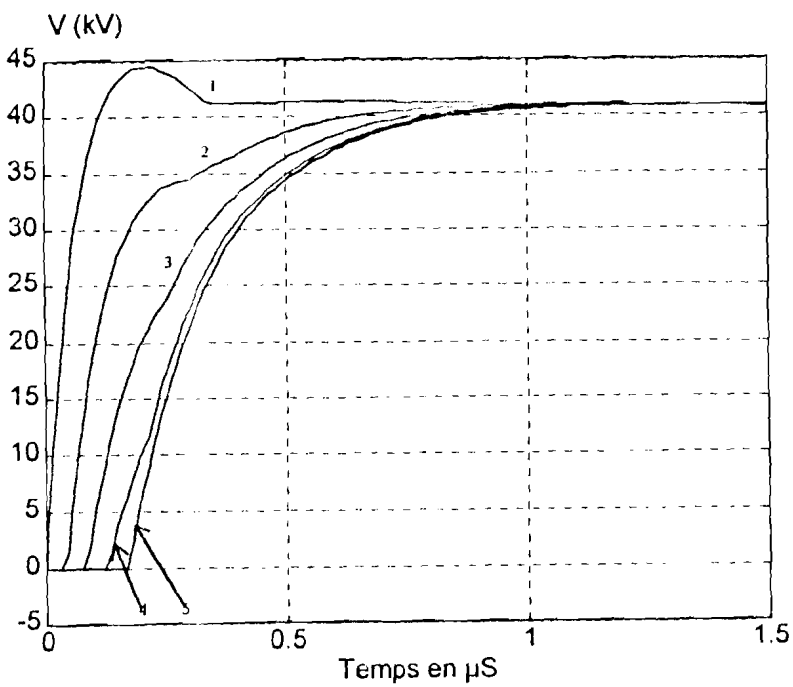


Figure II.17. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 500\Omega.m$ et $\ell = 16$ m).

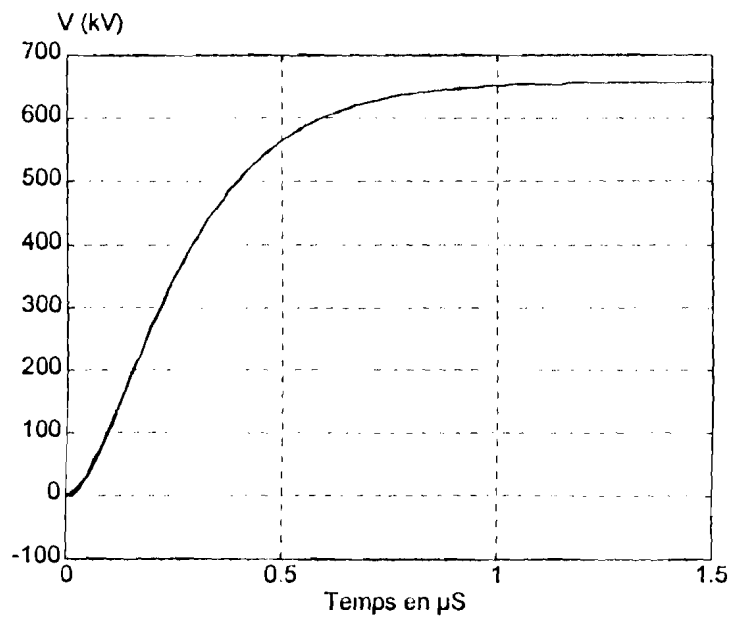


Figure II.18. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 1000 \Omega.m$ et $\ell = 2$ m).

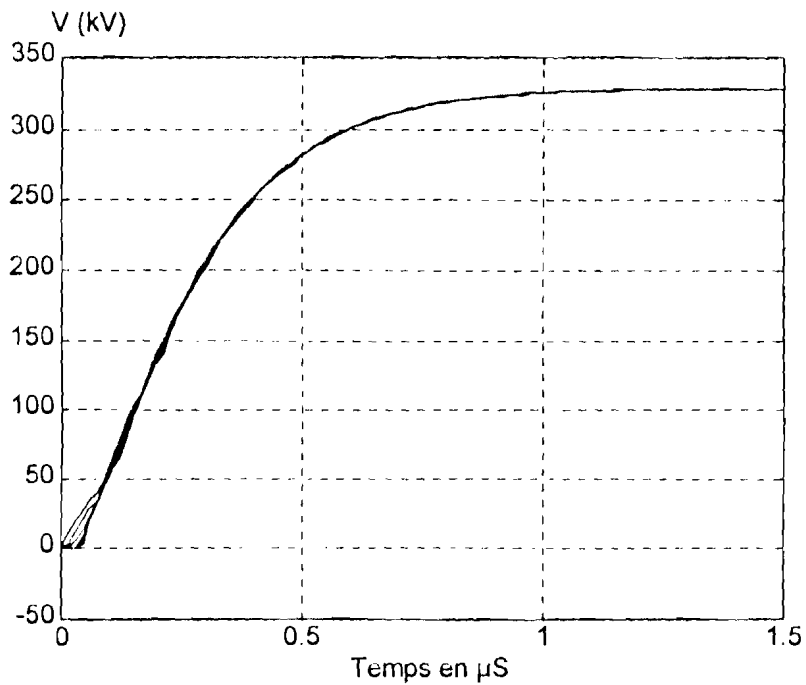


Figure II.19. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 10000 \Omega.m$ et $\ell = 4$ m).

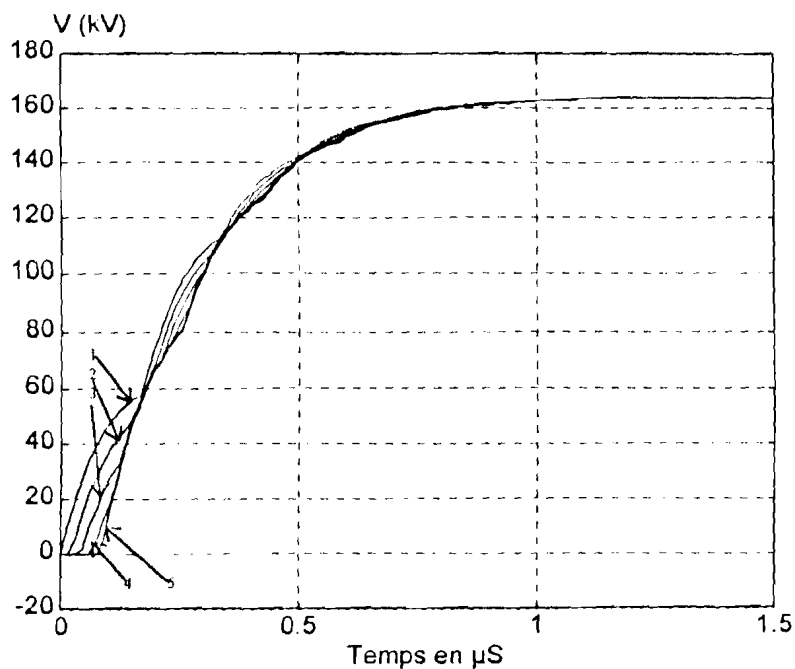


Figure II.20. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 1000\Omega.m$ et $\ell = 8$ m).

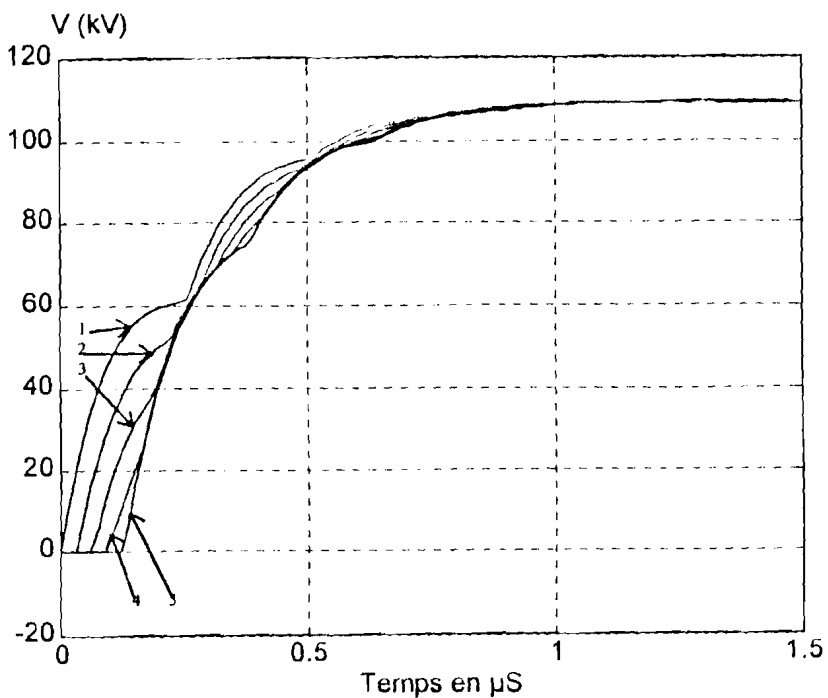


Figure II.21. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 1000\Omega.m$ et $\ell = 12$ m).

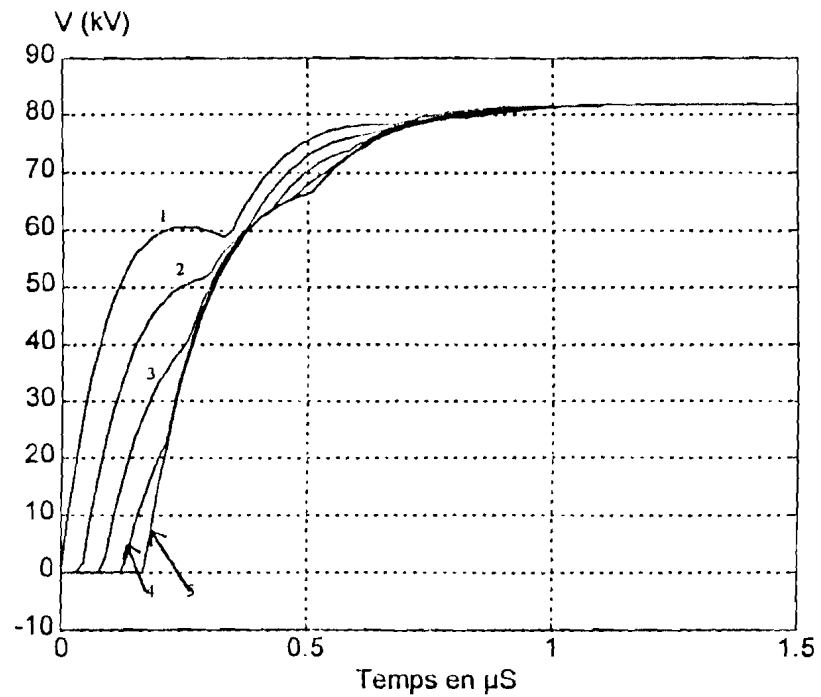


Figure II.22. : Courbe de $v(x,t)$ ($\rho = 1000 \Omega.m$ et $\ell = 16 m$).

Nous déduisons de ces courbes, la variation de la montée en potentiel maximum en fonction de la résistivité du sol pour différentes longueurs de piquet de terre (figure II. 23).

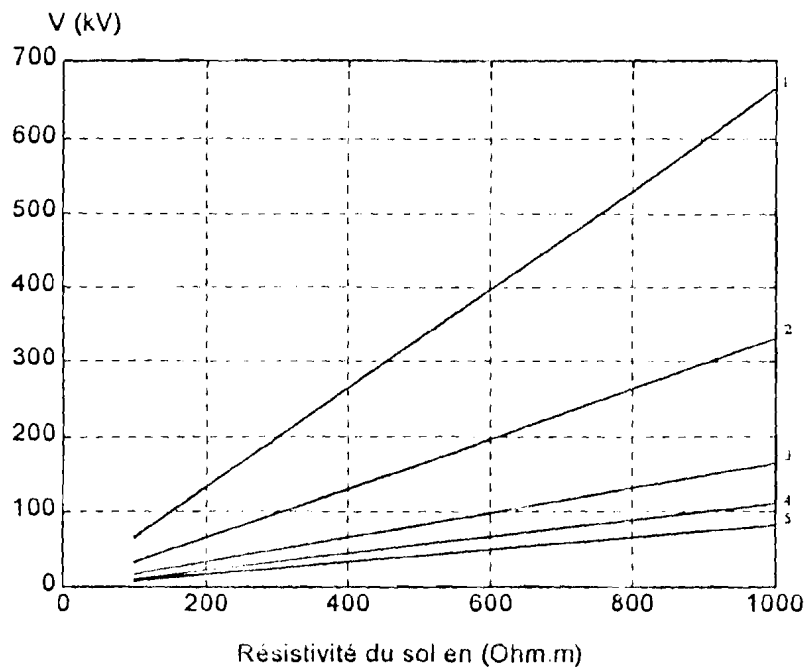


Figure II.23. : Variation de la montée en potentiel établie en fonction de la résistivité du sol.

N° de la courbe	1	2	3	4	5
Longueur du piquet (m)	2	4	8	12	16

Tableau II.3. : Correspondance des courbes de la figure II.23.

II.4.3. Influence de la forme d'onde de courant.

Pour l'étude de l'influence de la forme de l'onde de courant, nous utilisons deux types de forme d'onde de courant représentée dans la figure II.24 : l'onde 0.5/20 et l'onde 6/20. Nous avons choisi ces valeurs pour pouvoir étudier le phénomène dans son ensemble en un temps de calcul raisonnable.

Dans les figures II.25, II.26 et II.27 sont représentées les montées en potentiel pour un piquet de longueur égale à 16 mètres, la résistivité du sol $\rho = 500\Omega.m$. La figure II.27 est un zoom de la figure II.26 dans l'intervalle de temps compris entre 0 et 1 μS . La numérotation des courbes de la figure correspond à la désignation adoptée au point II.4.2 (cf. tableau II.2).

On voit, à l'observation des figures II.25, II.26 et II.27 que la forme de l'onde a une influence dans la zone de front de l'onde de montée en potentiel. Les ondes de courant ayant une durée jusqu'à la crête faible correspondent à des ondes à pentes élevées. La forte valeur de la montée en potentiel dans la phase initiale du signal indique que la prise de terre a dans cette partie, un comportement inductif. Les figures II.26 et II.27 montrent que plus le temps de montée de l'onde augmente (c'est à dire que la pente diminue), plus la valeur de la montée en potentiel dans la zone initiale diminue.

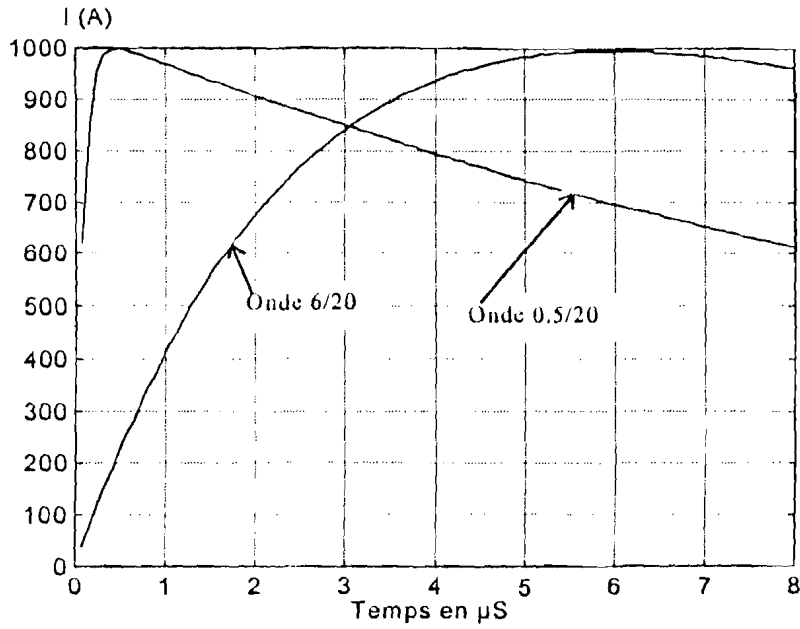


Figure II.24 : Evolution temporelle des ondes 0.5/20 et 6/20.

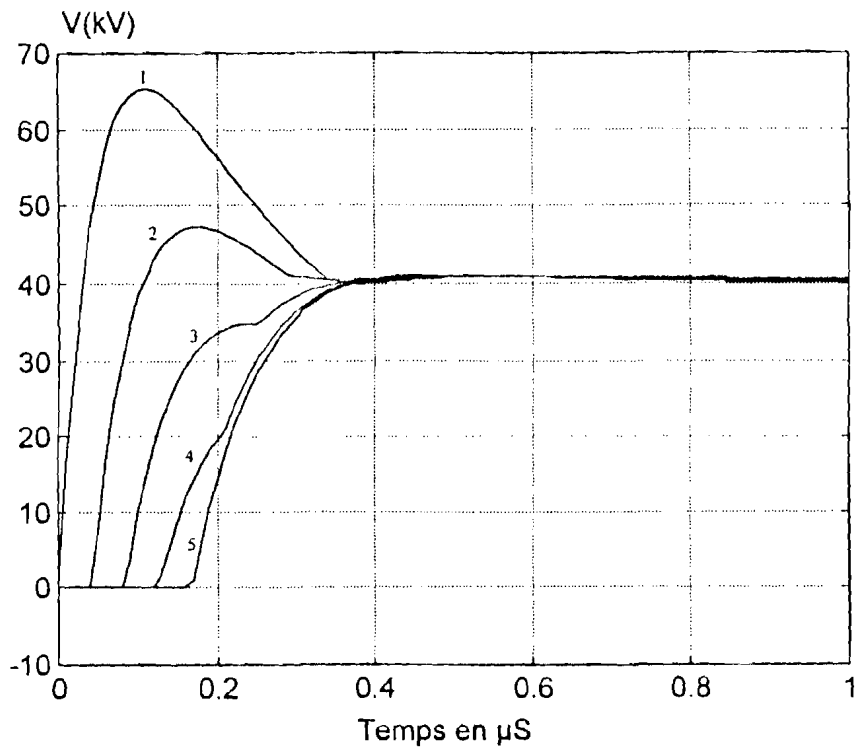


Figure II.25 : Courbe de $v(x,t)$ pour onde 0.5/20 ($\rho = 500\Omega.m$ et $\ell = 16 m$).

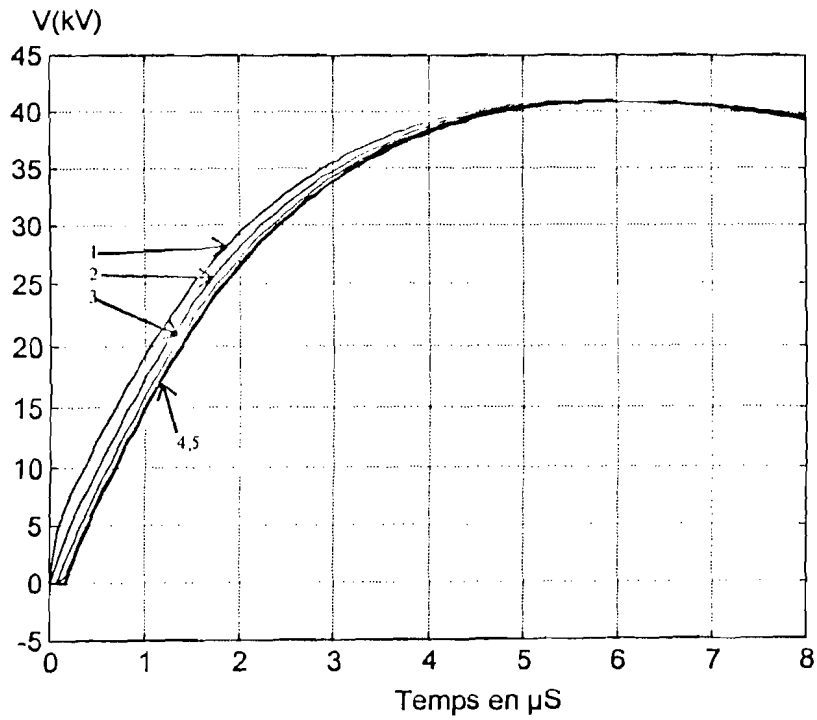


Figure II.26 : Courbe de $v(x,t)$ pour une onde 6/20 ($\rho = 500\Omega.m$ et $\ell = 16$ m)

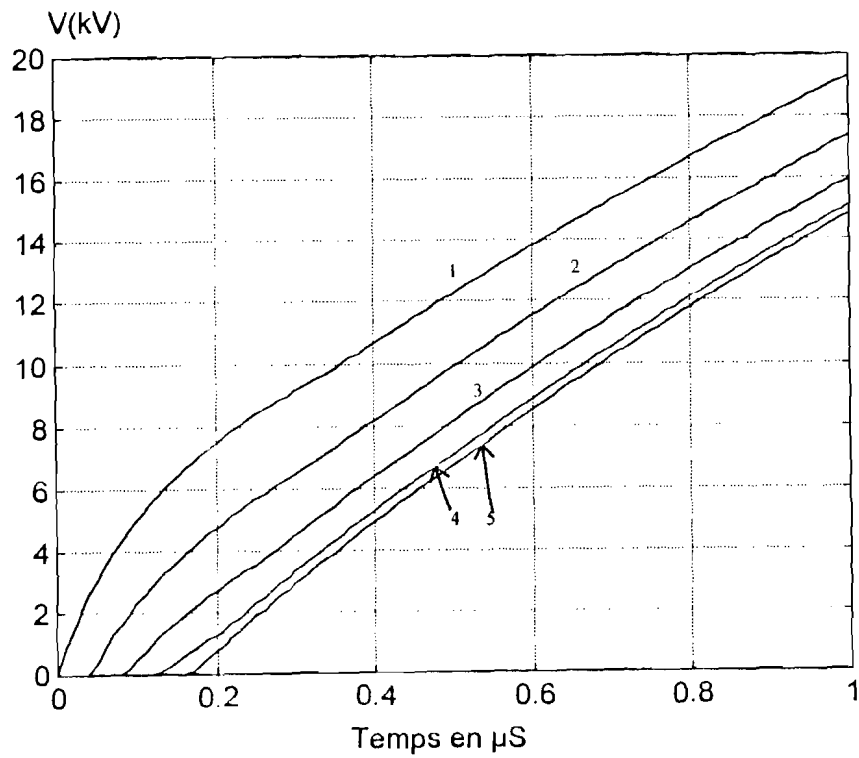


Figure II.27 : Zoom de la figure II.26 .

II.4.4. Influence de la permittivité du sol.

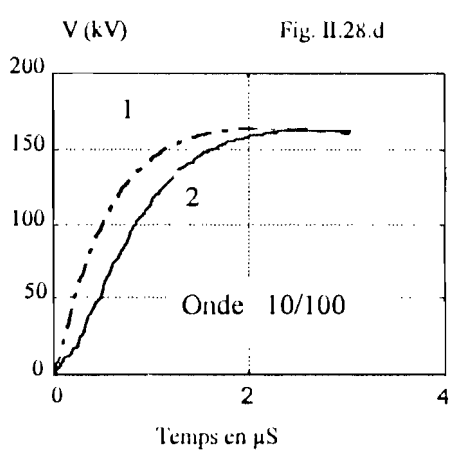
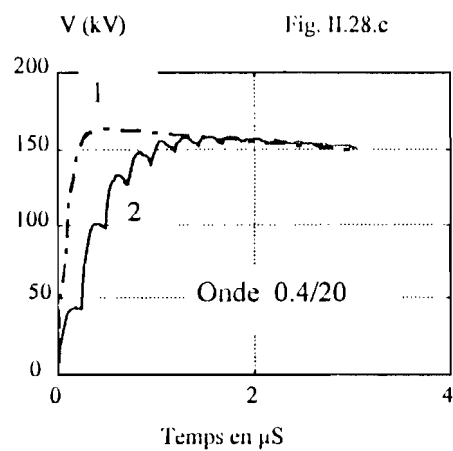
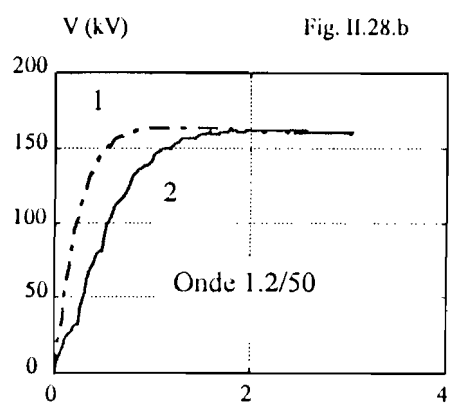
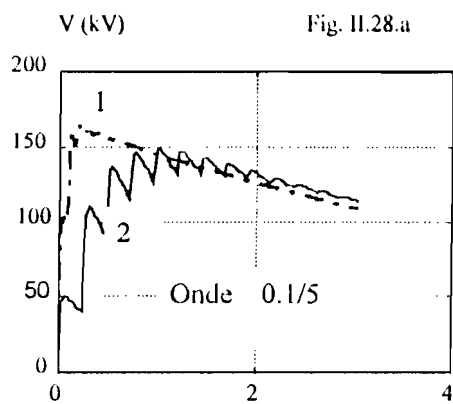
La valeur de la permittivité relative du sol varie de 80 (pour l'eau distillée) à 4 (valeur déjà proche de celle de l'air). Généralement, les valeurs de la permittivité du sol sont prises un peu au hasard. Des valeurs comprises entre 4 et 40 sont les plus utilisées.

C'est seulement ces dernières années que des géophysiciens ont entrepris activement des recherches sur la mesure des permittivités relatives du sol [64].

Dans cette section, une étude de l'influence de la permittivité du sol est faite. La longueur du piquet est de 2.2 mètres et la résistivité du sol $\rho = 250 \Omega.m$. Nous prenons les types d'onde couramment utilisés dans les simulations des lignes de transport d'énergie électrique [59].

La figure II.28. donne l'évolution de la montée de potentiel au point d'injection du courant. Les courbes numérotées 1 correspondent aux valeurs de permittivité relative de sol égale à 10 tandis que celles numérotées 2 sont relatives à une valeur de permittivité relative égale à 80. On peut déjà remarquer que la forme de l'onde a une très faible influence sur l'effet de la valeur de la permittivité relative du sol. D'autre part, la permittivité relative du sol a une influence seulement au front montant de l'onde. ce résultat est en accord avec les travaux de SUNDE [56]. Au front montant du signal, plus la valeur de la permittivité relative est faible, plus la montée en potentiel est importante. Donc, plus la valeur de la permittivité du sol est faible, plus la vitesse de propagation de l'onde croît, ce qui était prévisible.

On peut aussi remarquer que le pic de la montée en potentiel reste pratiquement le même sauf pour la figure Fig.II.28.a où on peut observer une légère différence. Par contre, les dérivées des montées de potentiel sont assez variables et dépendent beaucoup de la forme de l'onde. Cette dérivée pourrait, si elle est élevée comme c'est le cas de la figure Fig.II.28.a, avoir une certaine répercussion sur la diffusion ou la radiation de l'énergie électromagnétique associée à l'onde de foudre. Sous réserve de ces aspects de la question qui méritent des investigations complémentaires, nous pouvons affirmer que la permittivité du sol a peu d'influence sur la diffusion du courant de foudre dans le sol. C'est sur la base de cette hypothèse, que nous adoptons pour le reste de nos études, la valeur de la permittivité relative du sol égale à 10.



Légende: 1- Permittivité du sol égale à 10 2- Permittivité du sol égale à 80.

Figure. II.28. Variation de la montée de potentiel en fonction du temps pour des valeurs différentes de la permittivité du sol.

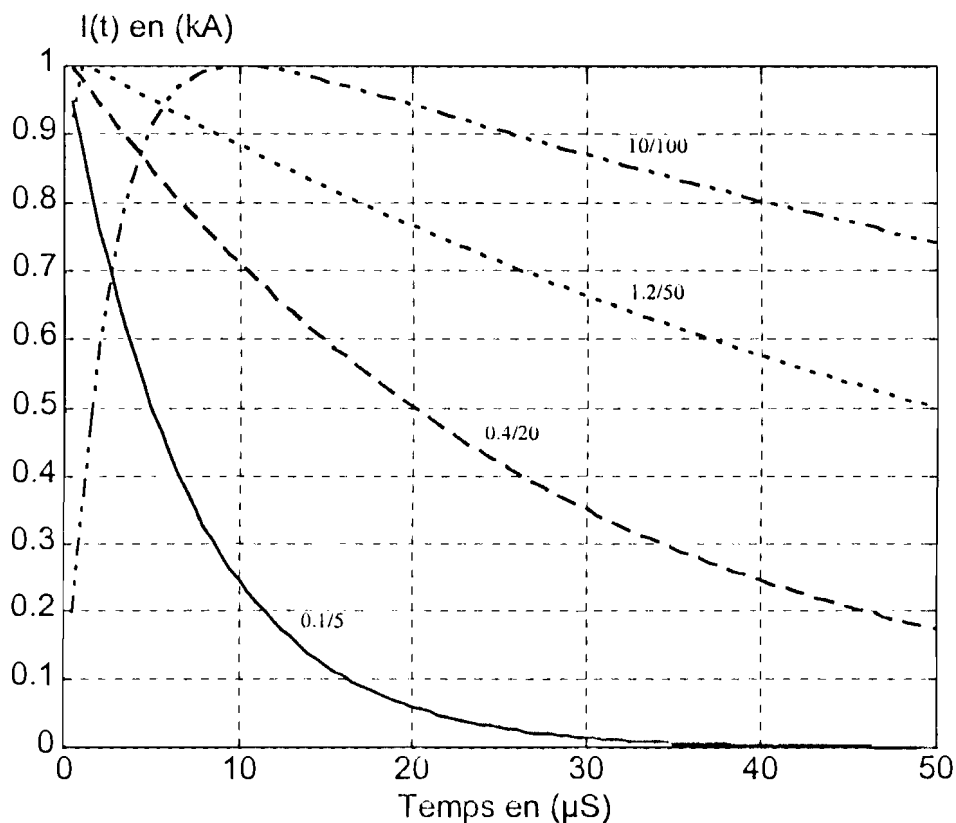


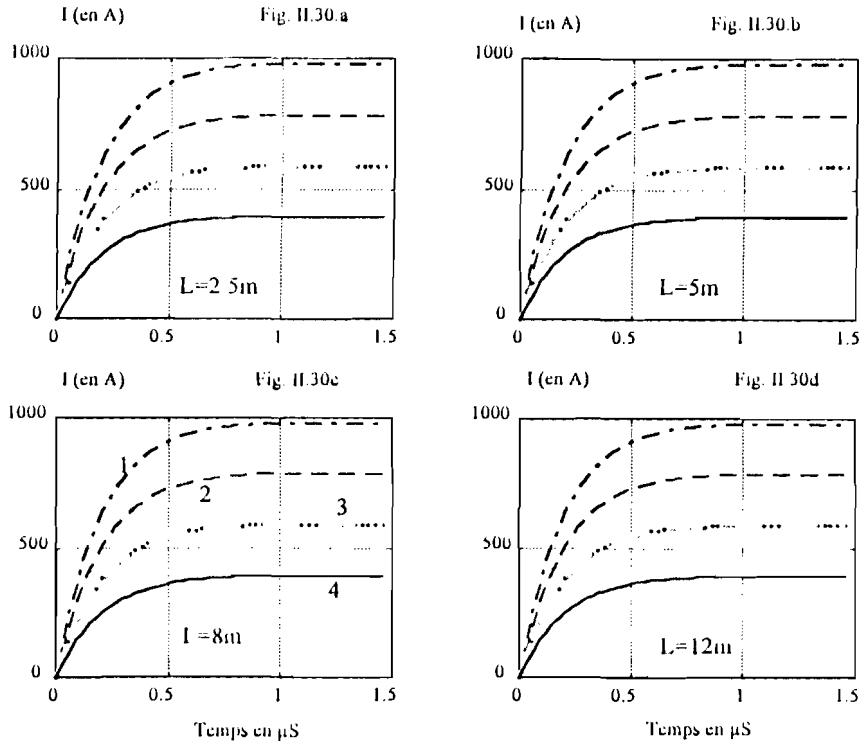
Figure. II.29. Types d'onde utilisés dans la figure II.28.

II.4.5. Calcul de la répartition du courant

Pour cette simulation, nous avons pris la résistivité du sol égale à 500 Ohm.m, l'onde de courant de type 1.2/50, la permittivité du sol égale à 10. Dans la figure II.30, sont données les courbes de variation du courant axial en fonction du temps. On peut remarquer que la répartition du courant a une allure générale très peu dépendante de la longueur du piquet de terre.

La Figure. II.31. donne la variation du courant axial le long du piquet de terre. Les courbes sont tracées pour des valeurs données de temps selon le tableau II.1. A partir de ces courbes, on peut remarquer que la composante radiale du courant reste quasi constante pour un temps donné. C'est ce qui permet, lors de la simulation du

phénomène d'ionisation dans le sol, de prendre la dérivée $\frac{\partial i}{\partial x}$ pratiquement égale à la valeur du courant $i(0,t)$ par unité de longueur.



1- $x = 0$ mètre 2- $x = \frac{\ell}{5}$; 3- $x = \frac{2\ell}{5}$; 4- $x = \frac{3\ell}{5}$.

Figure II.30. : Répartition de la variation spatiale du courant le long du piquet de terre en fonction du temps.

N° de courbe	Valeur du temps (μS)	N° de courbe	Valeur du temps (μS)
1	0.15	4	0.6
2	0.30	5	0.75
3	0.45	6	0.9

Tableau II.4. Correspondance en temps des courbes de la figure II.31.

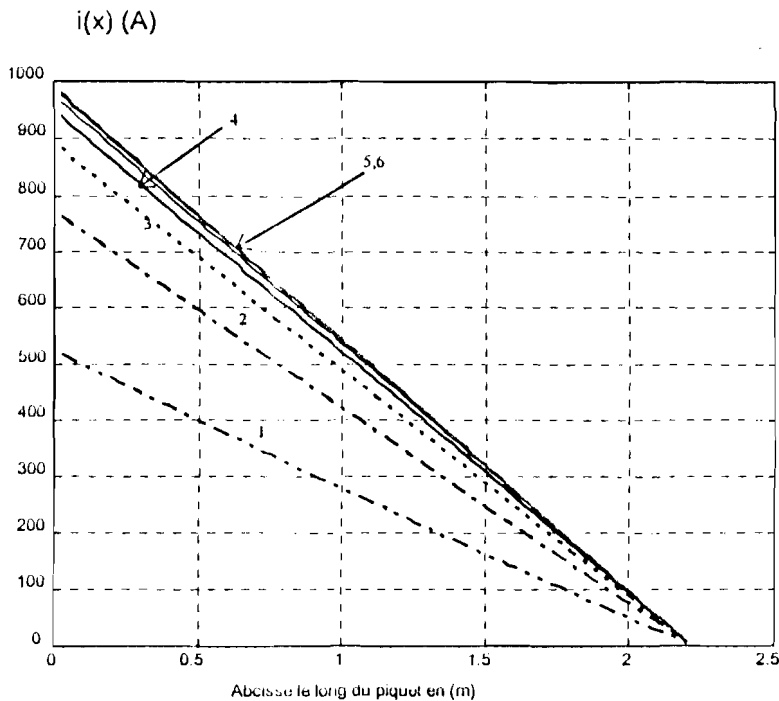


Figure. II.31. Variation du courant axial le long du piquet pour $\ell = 2.2 \text{ m}$.

II.5. MODELISATION DE L'IONISATION DU SOL

II.5.1. NOTIONS FONDAMENTALES

Lorsque le courant de foudre s'écoule dans le sol à travers une prise de terre, le gradient de potentiel à la surface du conducteur de terre est donné par la relation :

$$E = \rho J \quad (2.25)$$

Dès que la valeur du champ électrique E dépasse la valeur du champ de claquage E_c dans le sol, le phénomène d'ionisation s'amorce. L'effet de claquage du sol à la surface du conducteur transforme la couche de terre qui entoure le conducteur de terre de son état de mauvais isolant en conducteur quasi-parfait. Ce phénomène commence à la surface du conducteur parce que c'est à cet endroit que le champ électrique a sa valeur maximale. Au fur et à mesure que le courant électrique va croître, la zone couverte par le phénomène s'étend jusqu'au maximum du champ (champ critique).

L'effet disruptif décrit plus haut peut être vu comme équivalent à un accroissement des dimensions de l'électrode de terre. Par conséquent, la résistance R_i de la terre au cours

du claquage du sol est inférieure à la valeur de la résistance de terre R_s mesurée à courant faible. Les premiers travaux relatifs à ce phénomène ont été réalisés en 1929 par H. M. TOWNE [65]. Depuis, plusieurs autres auteurs y ont travaillé avec pour objectif premier, l'estimation de la valeur du champ électrique de claquage E_c .

En effet, la connaissance de E_c permet d'estimer la valeur de la résistance R_i pour d'autres cas sans forcément avoir besoin de reprendre à chaque fois des mesures expérimentales. A. C. LIEW et al. [70] ont réalisé des études qui ont pris en compte la résistance résiduelle de la zone envahie par l'ionisation c'est à dire qu'ils ont supposé que la zone ionisée n'est pas un conducteur parfait. Ils ont donc pu établir l'expression de la variation de la résistivité de la zone ionisée en fonction du temps pour chaque type d'onde de courant.

Dans le cas des piquets de terre, LIEW et al.[70] ont modélisé la zone ionisée selon la Figure II.32.a et Bellashi et al. [66-68] ont proposé la Figure II.32.b :

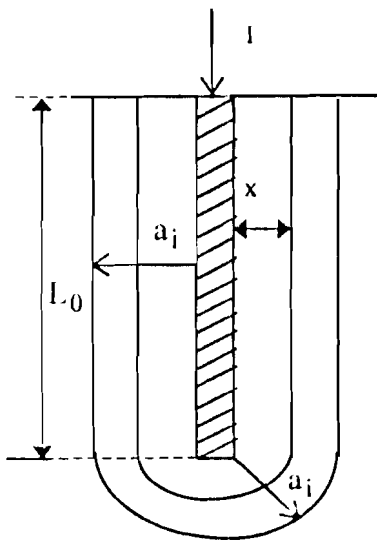


Fig. II.32.a : Méthode de LIEW

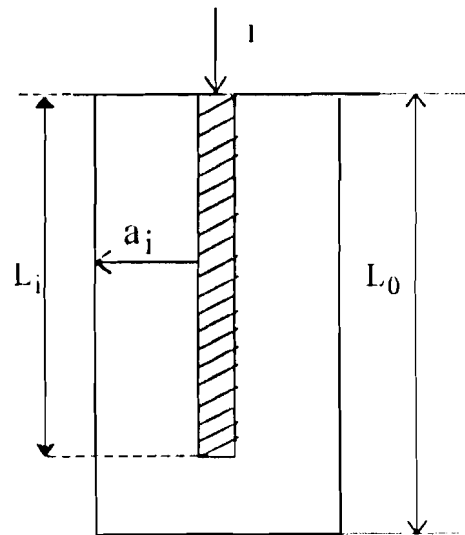


Fig. II.32.b: Méthode de BELLASCHI

Fig. II.32. Modélisation de l'ionisation du sol

Dans l'étude de l'écoulement du courant de foudre dans les prises de terre, il est important de prendre en considération le phénomène d'ionisation du sol et ce, pour trois raisons :

- la portion de sol dans le voisinage immédiat avec l'électrode de terre représente une grande proportion de la résistance totale de la prise de terre, ceci à cause de la très faible valeur de la section d'écoulement du courant dans le sol. Il s'en suit qu'une réduction de cette zone (par ionisation) peut réduire de façon très significative la valeur de la résistance de la prise de terre ;
- la réduction de la valeur maximale de la montée de potentiel de la prise de terre, due à des claquages dans le sol aux voisinages des conducteurs de terre. Cet effet joue d'autant plus que l'amplitude du courant est grande, que l'étendue de la prise de terre est petite et que la résistivité du sol est grande. Le courant utile à l'amorçage du claquage est faible et il est d'autant plus faible que la résistance du sol est élevée, puisque la densité de courant est liée à la résistivité du sol par la relation :

$$J_c = \frac{E_c}{\rho} \quad (2.26)$$

- la prise en compte du phénomène d'ionisation permet d'éviter les surdimensionnements.

Comme dit plus haut, la connaissance de la valeur de E_c est importante et pour cette raison des travaux ont été effectués pour définir cette valeur. En Octobre 1991, la CIGRE [71] a proposé de prendre $E_c = 400$ kV/m. MOUSSA [69] ayant constaté que la CIGRE n'avait pas justifié son choix, a entrepris une étude systématique pour arriver à la conclusion qu'il faut prendre $E_c = 300$ kV/m. Tout en estimant que la recommandation du CIGRE peut être utilisée sans grande altération des estimations, il a rejeté la valeur adoptée par le standard IEEE qui est de l'ordre de 1000 kV/m. C'est pourquoi, dans la suite de notre mémoire, nous adopterons $E_c = 300$ kV/m.

Il nous semble aussi utile de mentionner qu'il n'existe pas de relation directe entre E_c et ρ . En effet, E_c est régi par l'ionisation du sol qui n'est rien d'autre que l'ionisation de l'air qui remplit les vides existant entre les grains de sable du sol alors que la résistivité du sol est fixée par la circulation (déplacement des porteurs de charge) dans l'eau

(ou la vapeur d'eau) qui remplit le vide entre les particules. L'augmentation de la quantité d'eau dans ce vide fera baisser à la fois ρ et E_c . Mais cette diminution ne peut se quantifier en terme de relation directe parce que E_c serait constant pour un échantillon donné de sol si le contenu d'eau est fixé, alors que la résistivité du sol peut varier pour la même quantité d'eau si on fait varier la proportion de porteurs de charge dans le même volume d'eau. Nous passons en revue la modélisation de l'ionisation du sol telle que décrite dans la littérature [41, 65, 69, 70, 71]. Sur cette base, nous introduisons une forme modifiée de cette modélisation dans le but de pouvoir l'utiliser dans le logiciel FLUX2D.

II.5.2. MODELISATION PAR RAYON FICTIF ET SIMULATION

Cette modélisation se base sur une variation du rayon du conducteur de terre de manière à respecter l'inégalité suivante :

$$E \leq E_c \quad (2.27)$$

soit

$$\rho J \leq E_c \quad (2.28)$$

Pour un conducteur de terre de forme cylindrique, de longueur L et de rayon a , et traversé par un courant I , on a la relation :

$$J = \frac{i(0,t)}{2\pi a l} \quad (2.29)$$

En introduisant (2.28) dans (2.29), l'inégalité devient :

$$\frac{\rho i(0,t)}{2\pi a l} \leq E_c \quad (2.30)$$

Comme le courant croît de sa valeur initiale à la valeur critique qui correspond à J_c , l'ionisation du sol se traduira par :

1. Le rayon fictif reste constant et égal à a , ceci jusqu'à ce que l'inégalité (2.27) ne soit plus vérifiée :

$$R_c = a \text{ pour } E \leq E_c$$

2. Si le champ est supérieur au champ de claquage du sol E_c , le rayon du conducteur de terre va croître selon l'équation :

$$E_c = C_w = \rho J_c = \rho \frac{i(0,t)}{2\pi\ell R_c} \quad (2.31)$$

ce qui implique que :

$$R_c(t) = \frac{\rho i(0,t)}{2\pi\ell E_c} \quad (2.32)$$

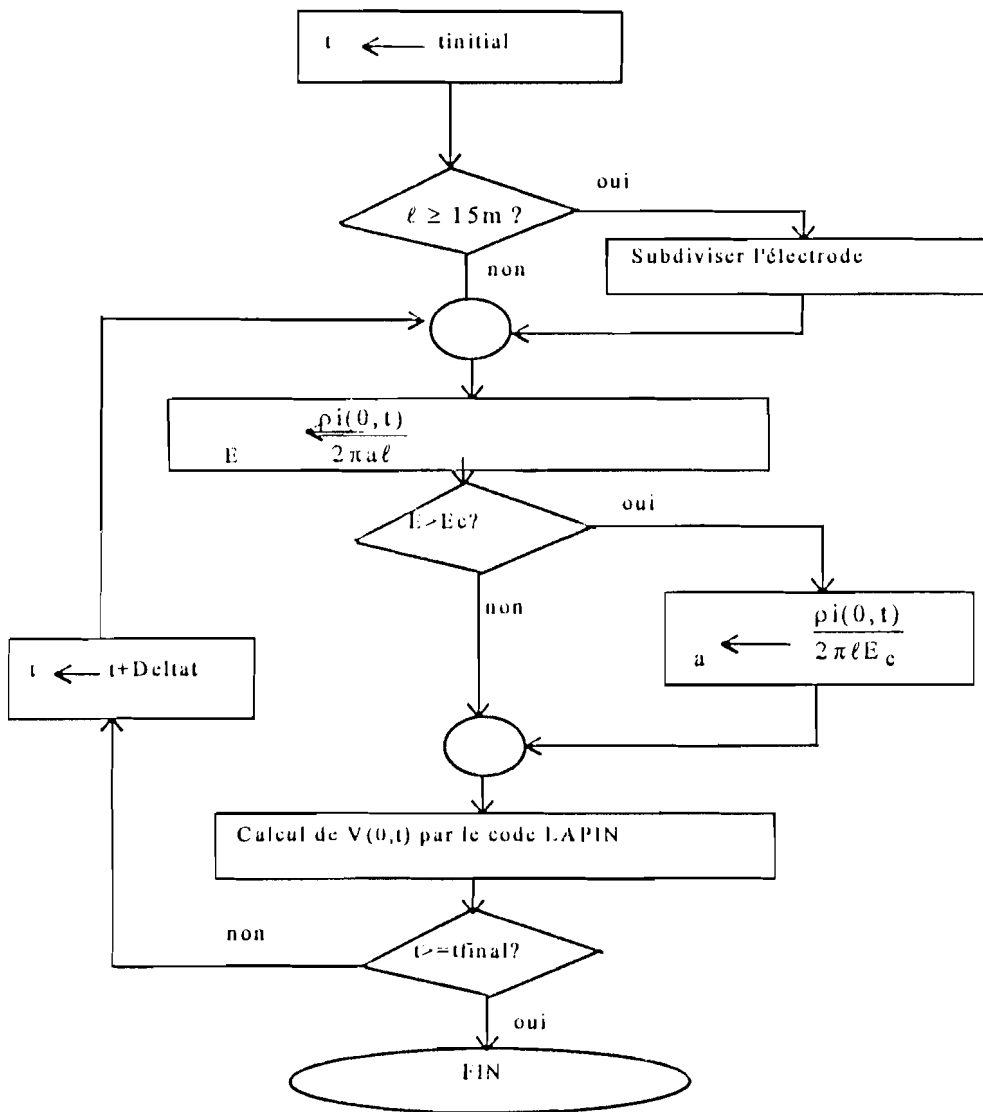


Figure. : II.33. Ordinogramme de calcul de l'ionisation du sol.

Le processus d'ionisation se poursuivra jusqu'au rayon maximum correspondant à la valeur maximale du courant $i(0,t)$. Après, avec la décroissance du courant, le rayon R_c va aussi décroître jusqu'à la valeur initiale $R_c = a$.

Pour calculer la montée de potentiel au point d'injection du courant, on utilise l'organigramme donné par la figure II.33.

II.5.3. MODELISATION PAR RAYON FICTIF MODIFIEE ET SIMULATION

La modélisation telle que décrite plus haut ne permet pas son introduction dans le logiciel d'éléments finis FLUX2D pour la détermination de l'effet du phénomène d'ionisation sur la répartition de la montée de potentiel transitoire. Pour résoudre ce problème, nous introduisons une modification de cette modélisation. Notre approche se base sur les simplifications suivantes :

- la zone couverte par l'ionisation du sol a les mêmes propriétés que toutes les autres parties du sol ; la conséquence de cette simplification est que, dans la zone couverte par l'ionisation du sol, nous obtenons une répartition de la montée en potentiel qui n'est pas conforme à la réalité physique. Mais cela n'est pas si pénalisant dans la mesure où pour l'étude de la DMA, ce n'est pas la répartition de la montée en potentiel transitoire dans les voisinages immédiats du point d'injection du courant qui est recherchée ;
- on suppose que les paramètres primaires de la ligne de varient pas pendant l'ionisation et au cours de la durée d'un pas de temps de calcul. En effet, l'ionisation du sol induit la variation du rayon du piquet de terre dans le temps. Dans les équations 2.14, 2.15 et 2.16, les paramètres primaires de la lignes ne sont donc plus des constantes, mais des variables qui évoluent avec le temps.

Les figures II.5.3.a à II.5.3.f donnent les variations temporelles des paramètres primaires du piquet, du rayon fictif et de la résistivité de sol équivalente sous ionisation du piquet de terre soumis à un onde de courant de type 1.2/50 et d'amplitude maximale égale à 1000 A (voir tableau pour l'identification des courbes).

Partant de ces courbes, une expression rigoureuse de la propagation des ondes de courant et de tension serait décrite par l'équation 2.32.a). La solution de cette équation passe par une manipulation de convolution. Notre hypothèse consiste donc à supposer

que les coefficients évoluent non de façon continue, mais par intervalle de temps, et qu'à l'intérieur de chaque intervalle, ces coefficients restent constants. Pour minimiser l'erreur ainsi commise, il est nécessaire de prendre les intervalles de temps les plus petits possibles.

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} &= R(x,t)I(x,t) + \frac{\partial [L(x,t)I(x,t)]}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} &= G(x,t)V(x,t) + \frac{\partial [C(x,t)V(x,t)]}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.32.a)$$

On peut développer l'équation 2.32.a sous la forme 2.32.b :

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} &= \left[R(x,t) + \frac{\partial L(x,t)}{\partial t} \right] I(x,t) + L(x,t) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} &= \left[G(x,t) + \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} \right] V(x,t) + C(x,t) \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.32.b)$$

Dans le principe même de la modélisation de l'ionisation du sol, il est supposé que l'accroissement du rayon de la prise de terre se fait de façon régulière le long de l'élément de conducteur considéré. Sur cette base, on peut admettre que les paramètres L, R, C et G de l'équation 2.32.b ne dépendent pas de x. Alors, l'équation 2.32.b prend la forme relativement simplifiée 2.32.c:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} &= \left[R(t) + \frac{\partial L(t)}{\partial t} \right] I(x,t) + L(t) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} &= \left[G(t) + \frac{\partial C(t)}{\partial t} \right] V(x,t) + C(t) \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.32.c)$$

L'équation 2.32.c introduit des produits de convolution ce qui rend difficile l'établissement d'une solution analytique, indispensable pour une utilisation de la transformée inverse de Laplace. Pour contourner cette difficulté, nous admettons, sur la base des courbes de variation des coefficients R, L, C et G (c.f. figures II.34.b à II.34.e) les deux hypothèses suivantes:

- les dérivées en fonction du temps de ces coefficients sont négligeables ;
- dans l'intervalle d'un pas de calcul (il est de 0.01 μ S dans toutes nos simulations faites sous FLUX2D) les coefficients ont des valeurs constantes.

C'est sous ces hypothèses qu'ont été faites les simulations prenant en compte le phénomène d'ionisation du sol.

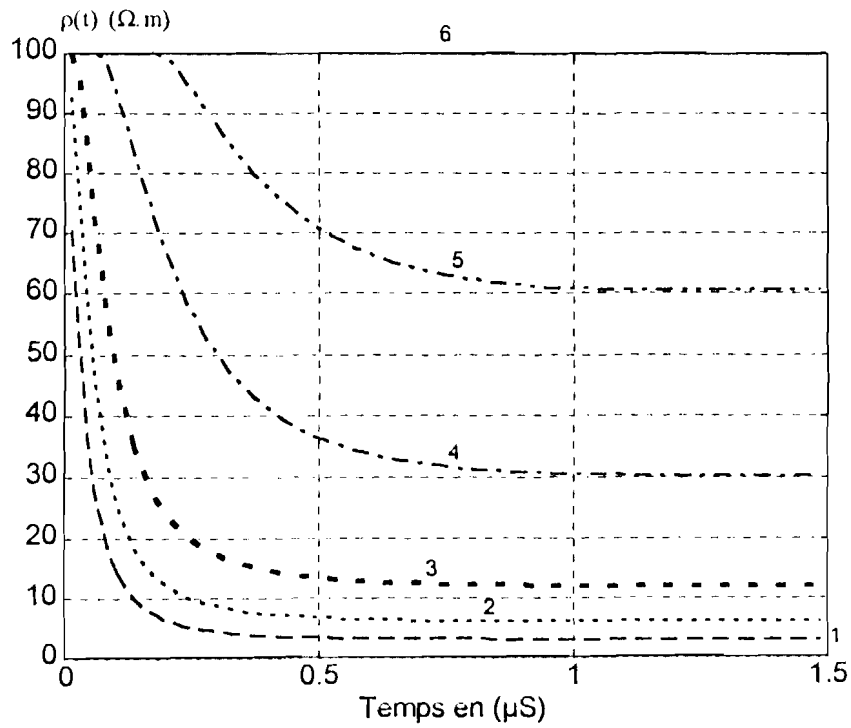


Figure II.34.a : Variation temporelle de la résistivité fictive équivalente.

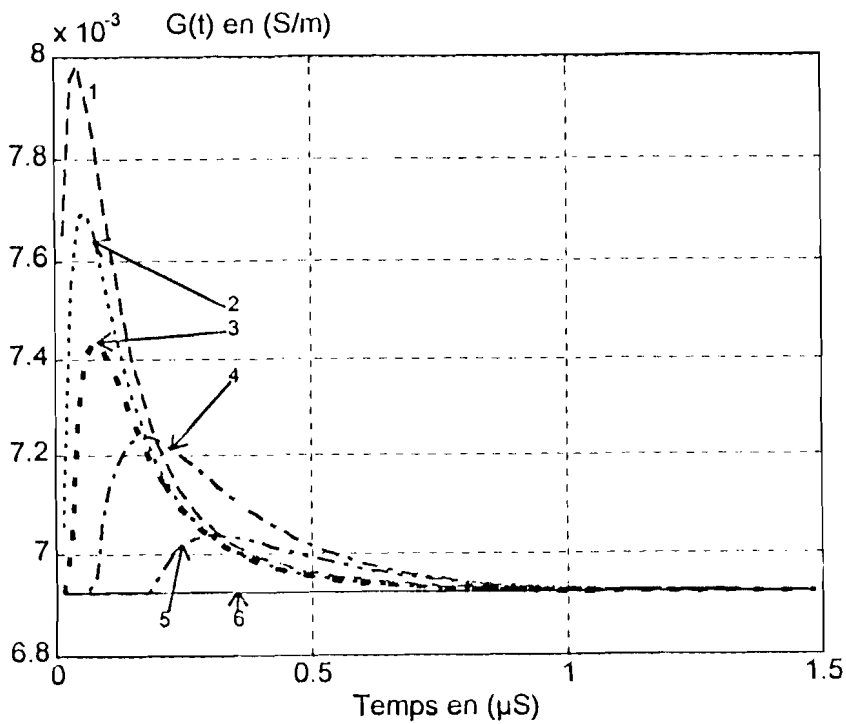


Figure II.34.b : Variation temporelle de la perdittance au cours de l'ionisation du sol..

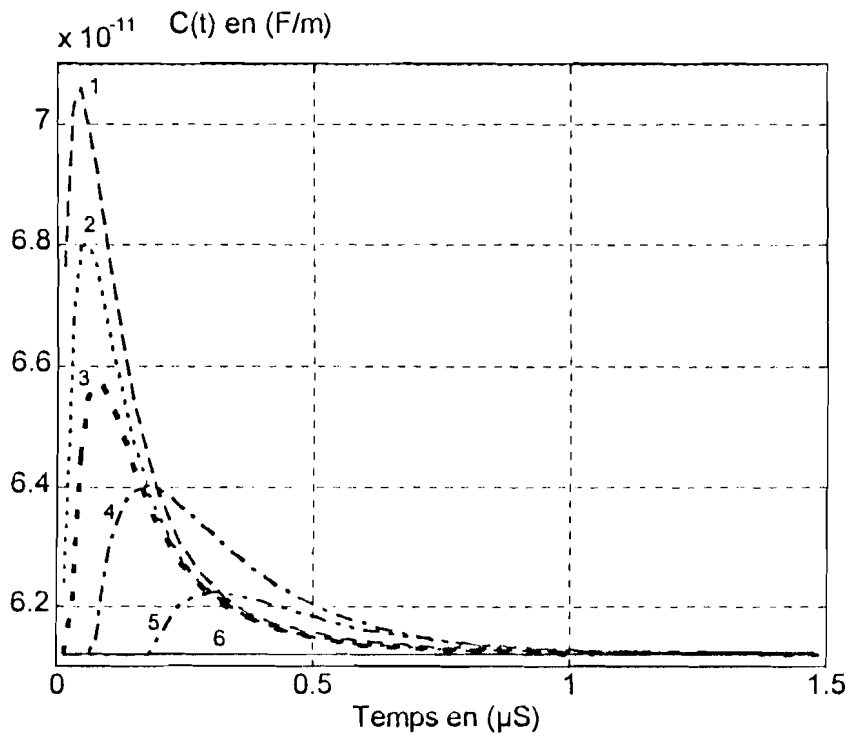


Figure II.34.c : Variation temporelle de la capacité au cours de l'ionisation du sol..

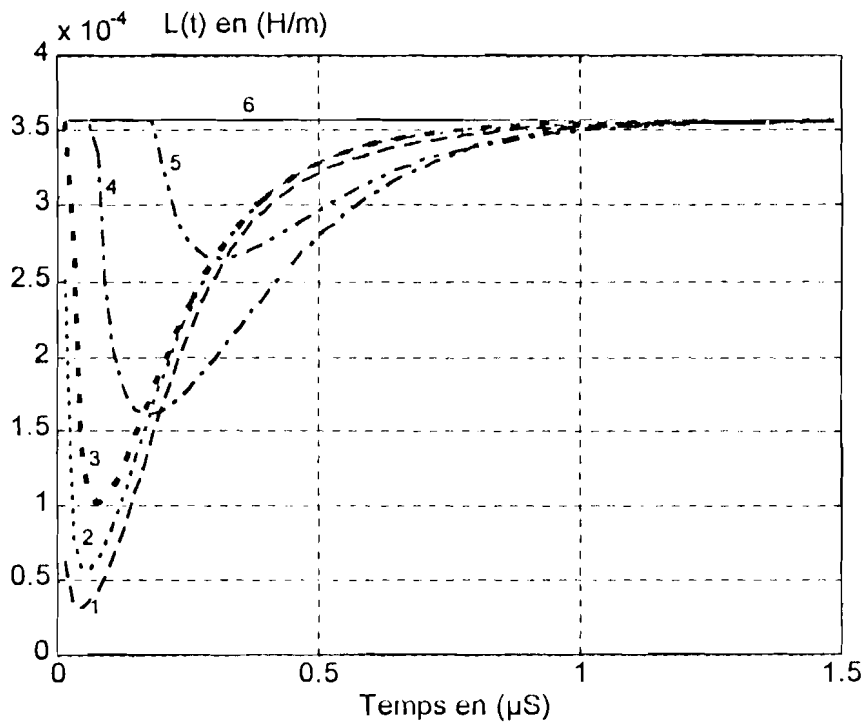


Figure II.34.d : Variation temporelle de l'inductance au cours de l'ionisation du sol..

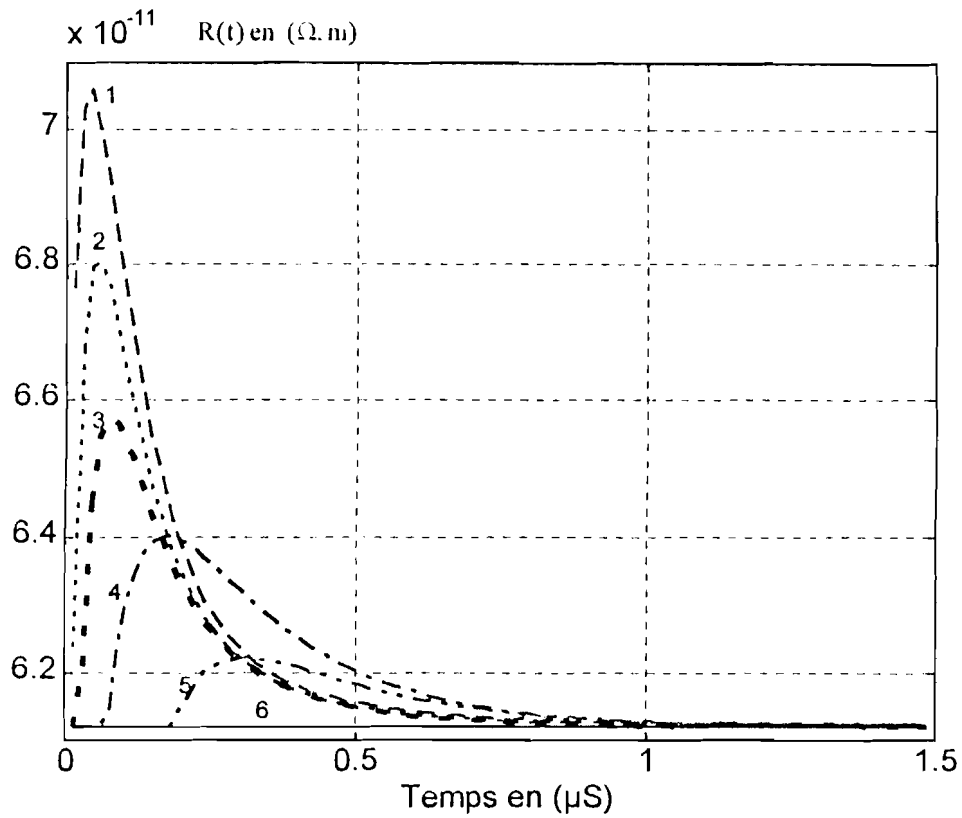


Figure II.34.e : Variation temporelle de la résistance longitudinale du piquet au cours de l'ionisation du sol..

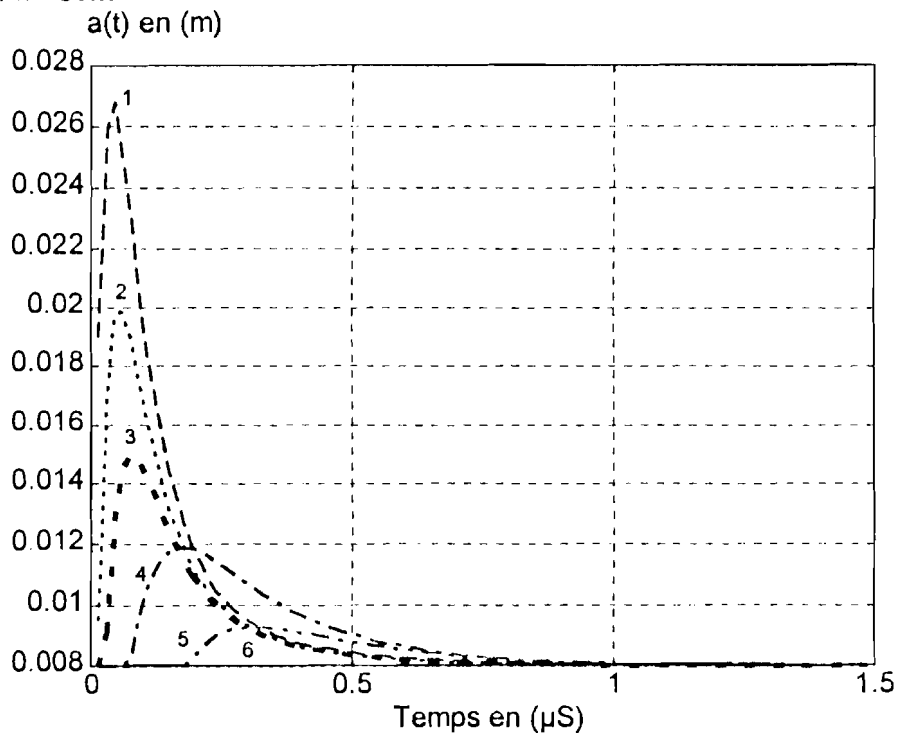


Figure II.34.f : Variation temporelle du rayon du piquet de terre au cours de l'ionisation du sol..

N° de courbe	Longueur du piquet (m)	Amplitude du courant (kA)
1	2	10
2	4	10
3	8	10
4	2	1
5	4	1
6	8	1

Tableau II.5. Identification des courbes des figures II.34.a à II.34.f.

Le principe de la modélisation consiste à maintenir la même loi d'évolution de la montée de potentiel au point d'injection du courant. Ainsi, au lieu de faire varier le rayon de la prise de terre, c'est plutôt la résistivité qui va être ajustée de manière à ce que la relation (2.32) soit vérifiée.

En reprenant l'équation (2.32) on peut récrire :

$$R_c(t) = \frac{\rho i(0,t)}{2\pi\ell E_c} \quad (2.32')$$

De cette dernière, on tire :

$$\rho(t) = \frac{2\pi\ell E_c}{i(0,t)} \quad (2.33)$$

En posant $i(0,t) = I_{\max}(e^{-at} - e^{-bt})$, on pourra écrire que

$$\rho(t) = \frac{2\pi\ell E_c}{I_{\max}(e^{-at} - e^{-bt})} \quad (2.34)$$

En réalité, cette formule permet de trouver de façon approximative la valeur de $\rho(t)$. La modélisation pour qu'elle soit valide, doit permettre de retrouver des résultats identiques que la modélisation par rayon fictif. Ainsi, pour trouver la loi de variation de $\rho(t)$ qui permet d'obtenir les mêmes conditions aux limites, il faudrait donc suivre une procédure de correction. Cette correction se fait grâce à la variation de la résistivité du sol avec comme condition de base de retrouver les mêmes valeurs de montée en potentiel dans le cas de simulation par rayon fictif que celle obtenue par rayon fictif modifié.

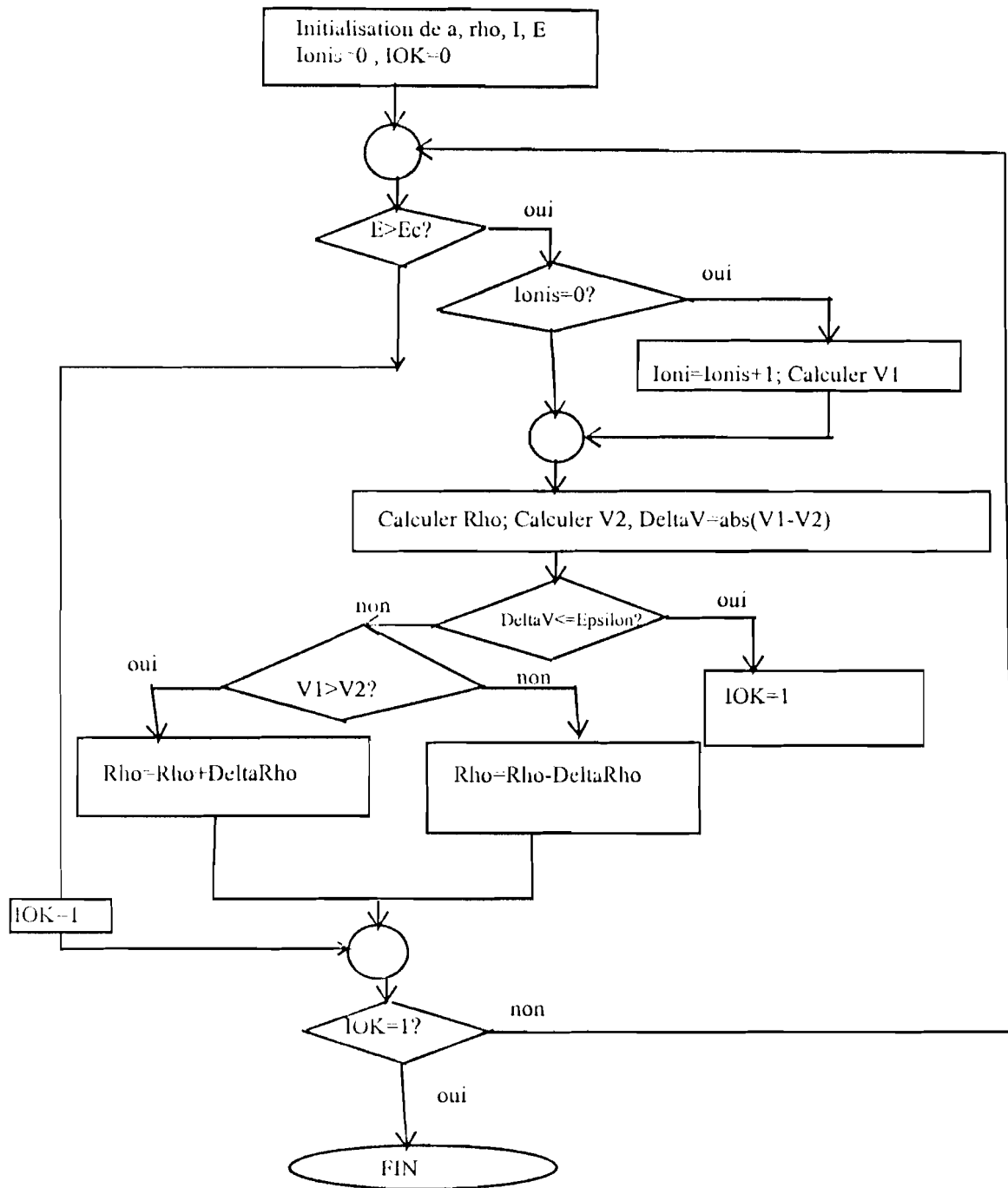


Fig. II.35. Organigramme de la simulation par rayon fictif modifiée

II.5.4. RESULTATS DE SIMULATION

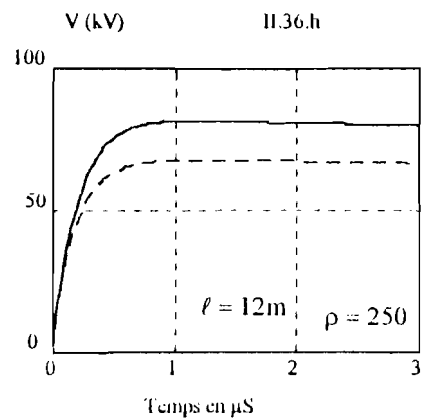
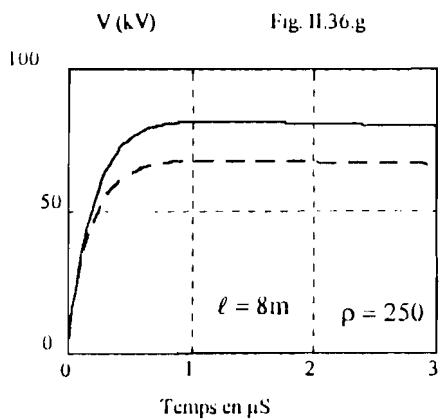
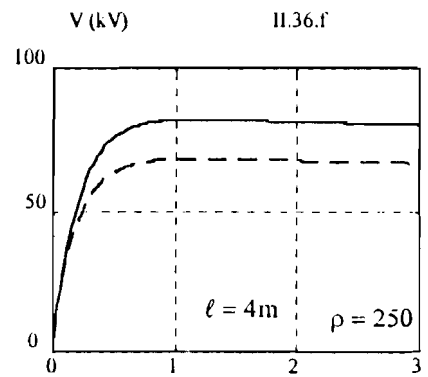
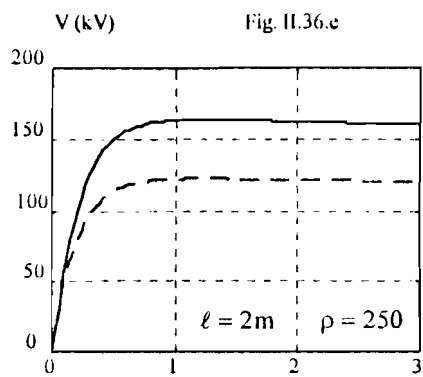
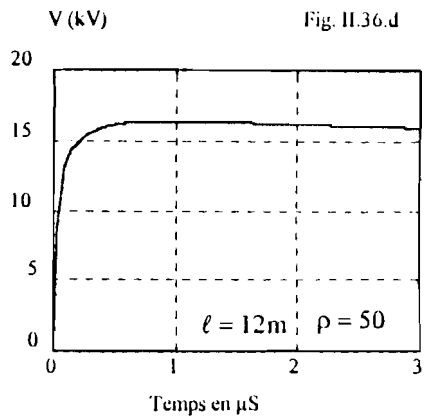
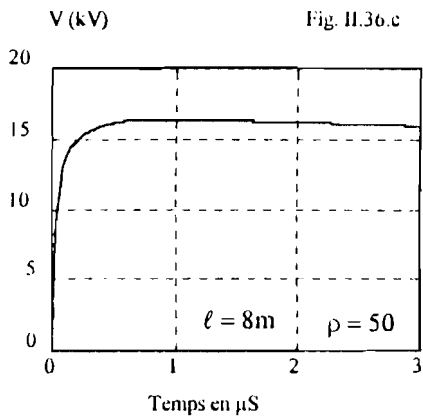
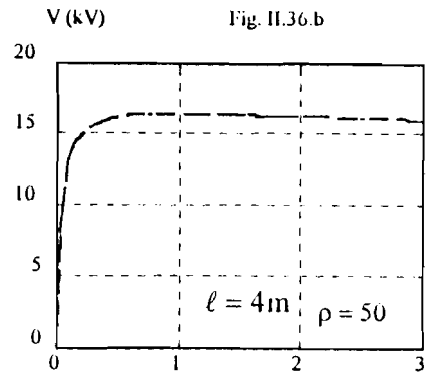
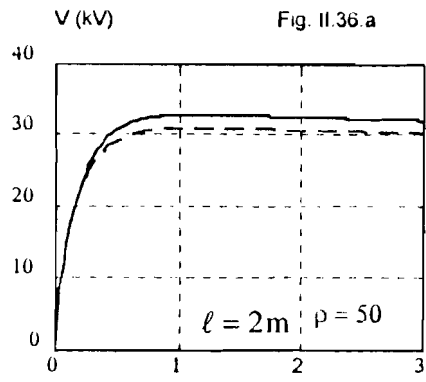
Sur la base de la modélisation par rayon fictif modifiée, quelques simulations ont été faites. Les résultats de ces dernières sont présentées dans cette section.

II.5.4.1. Variation de la montée de potentiel transitoire au point d'injection du courant.

Dans les figures II.36.a à Fig. II.36p, nous avons pris la résistivité du sol égale successivement à 50, 250, 1000, et 2500 $\Omega.m$. De même, nous avons pris la longueur du piquet égale à 2, 4, 8 et 12 mètres. Le courant a une forme d'onde 1.2/50 avec un pic égal à 1 kA.

De l'analyse de ces courbes, on peut faire les constatations suivantes :

1. Si l'on fixe la longueur du piquet à 2 mètres, et qu'on fait varier la résistivité du sol (Fig. II.36.a, e, i, et m), on peut se rendre compte du fait que, pour $\rho = 50 \Omega.m$, les deux courbes sont confondues ; lorsque $\rho = 250 \Omega.m$ et $\rho = 1000 \Omega.m$, l'écart en un temps donné, entre la montée de potentiel au point d'injection du courant sans prise en compte du phénomène d'ionisation du sol et la montée de potentiel avec prise en compte du phénomène d'ionisation croît d'abord avec la résistivité avant de descendre.
2. Pour des valeurs de longueur de piquets égales à 4 mètres et à 8 mètres, on observe que pour $\rho = 50 \Omega.m$, le phénomène d'ionisation n'est pas perceptible puisque les deux courbes sont confondues ; lorsque $\rho = 250 \Omega.m$ et $\rho = 1000 \Omega.m$, l'écart entre les deux courbes croît avec l'augmentation de la résistivité du sol ; et finalement, pour $\rho = 2500 \Omega.m$ l'écart entre les deux courbes se resserre.
3. Enfin, pour la longueur de piquet égale à 12 mètres, l'écart entre les montées de potentiel croît avec l'accroissement de la résistivité du sol.
4. On peut aussi noter que plus la valeur de la résistivité du sol s'élève, plus le phénomène d'ionisation est sensible.



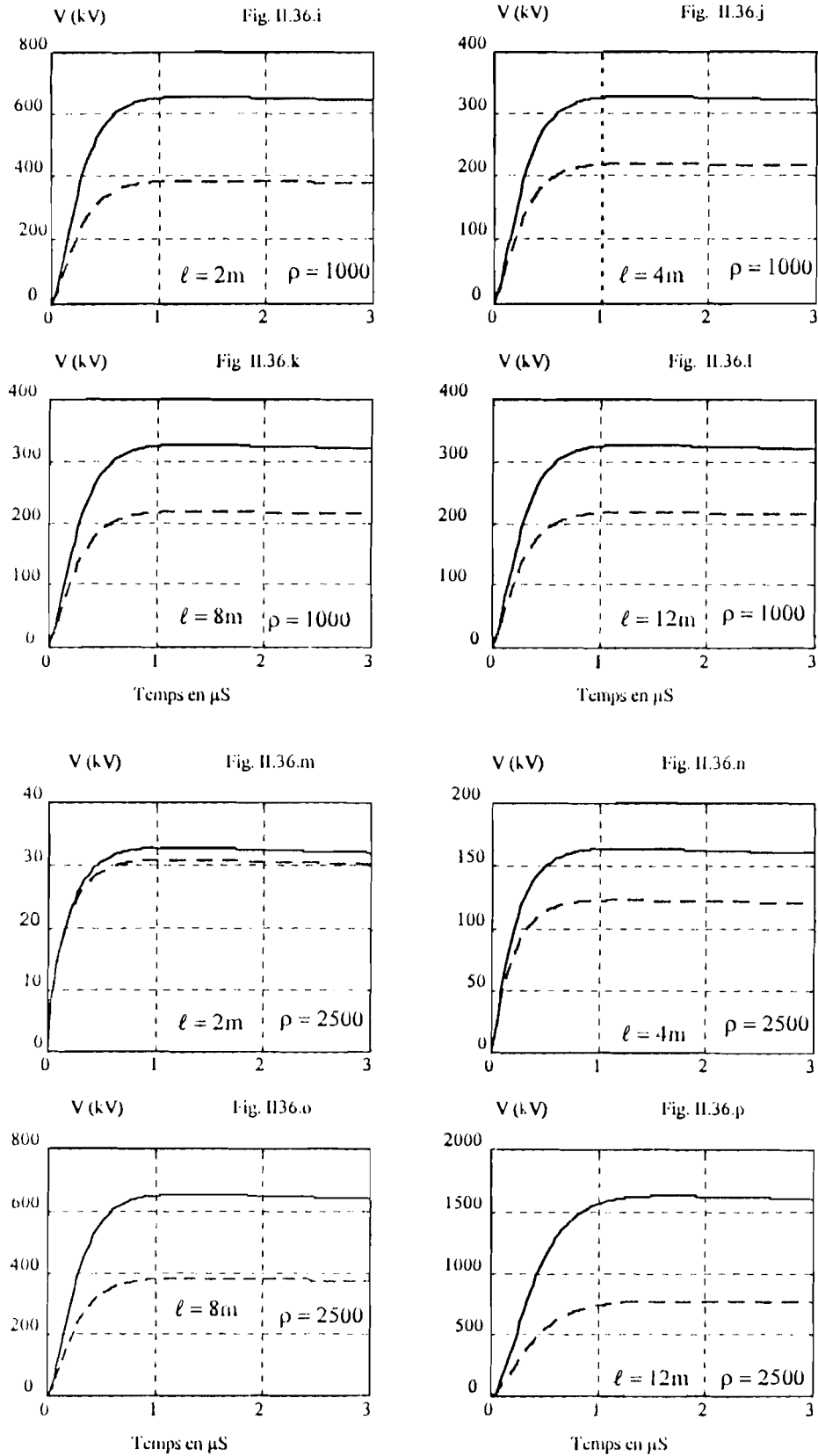
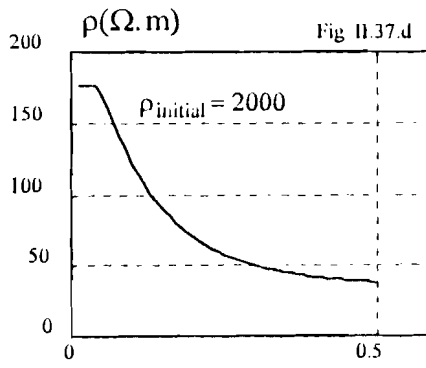
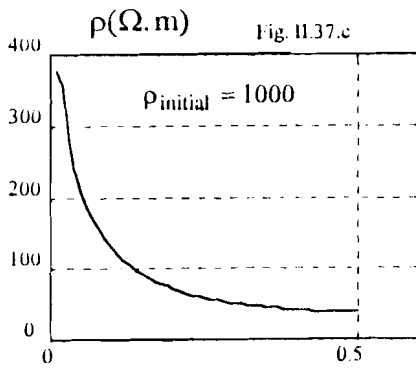
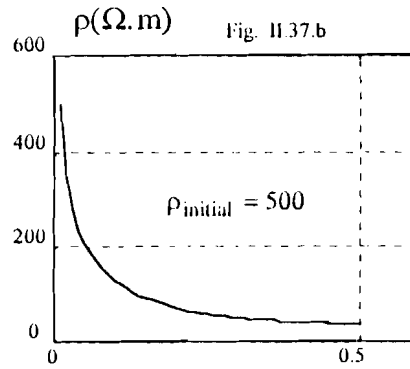
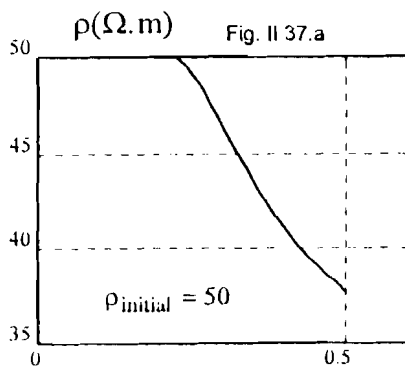


Figure II.36. Variation de la montée de potentiel transitoire $v(0,t)$

II.5.4.2. Variation de la résistivité du sol dans le cas de la modélisation par rayon fictif modifiée.

Dans la Figure II.37. ont produites les courbes de variation de la résistivité du sol en fonction du temps en prenant en compte le phénomène d'ionisation pour une forme d'onde 1.2/50 et une amplitude de 1 kA. Dans la figure Fig. II.37.a, l'ionisation commence environ 0.23 μ S après le début de l'onde, tandis que dans les autres figures, le phénomène d'ionisation démarre dès le temps initial. On peut aussi constater la variation de la résistivité en fonction du temps diffère notablement seulement au front montant de l'onde. Après le front montant, les résistivités varient de façon presque identique.



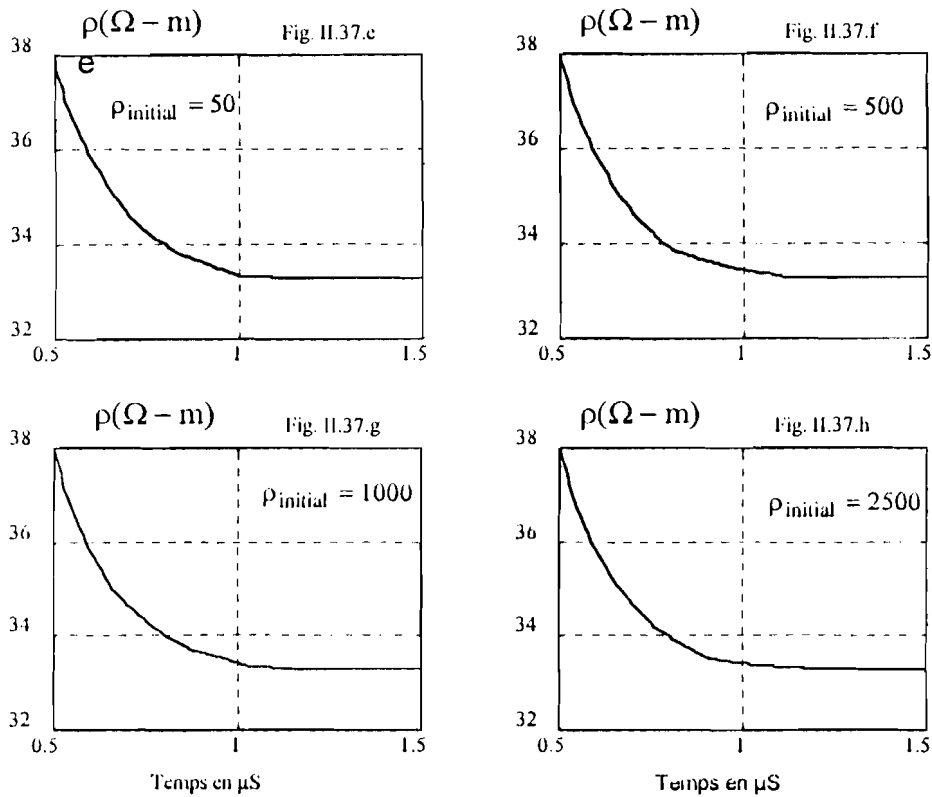


Figure II.37. Variation de la résistivité du sol (longueur de piquet = 2 mètres)

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les équations de propagation des ondes de courant et de tension le long du piquet de terre dans un milieu homogène. Nous avons montré que la permittivité du sol a une faible influence sur la valeur de la montée en potentiel ce qui a permis d'adopter pour le reste des simulations, la valeur de la permittivité relative égale à 10. L'étude de l'influence de la longueur du piquet sur la montée en potentiel montre que la longueur optimale se situe entre 4 et 6 mètres (donc que la longueur de piquet ordinairement utilisée à la SBEE n'est pas adaptée pour les installations d'énergie aux voisinages des systèmes de télécommunications).

Il est à retenir que pour des courants de foudre de forte amplitude, le phénomène d'ionisation fait diminuer la montée en potentiel. Cette diminution est d'autant plus sensible que la longueur du piquet de terre est faible et la résistivité du sol est grande.

Au chapitre III, après avoir établi l'équation de diffusion de l'onde de foudre dans le sol, nous abordons l'étude de la distribution de la montée en potentiel à la surface du sol en utilisant la méthode des éléments finis. La DMA est évaluée et une étude comparative est faite pour déterminer l'influence du phénomène d'ionisation.

CHAPITRE III

ETUDE DE LA MONTEE EN POTENTIEL TRANSITOIRE



III.1. INTRODUCTION

La protection contre la foudre des réseaux de distribution ou des systèmes de télécommunications est assurée par des dispositifs tels que les éclateurs, les parafoudres, ou les parasurtenseurs, destinés à évacuer dans le sol, les ondes générées par des coups de foudre. La qualité de la prise de terre, qui réalise l'écoulement à la terre du courant résultant du fonctionnement du dispositif de protection, a une importance majeure. Il convient en particulier, de limiter les contraintes appliquées en retour aux matériels de distribution ou aux installations de télécommunications, en raison des montées de potentiel transitoire transmises aux masses reliées à la prise de terre.

Afin de faire une étude quantitative des problèmes d'interférence entre des prises de terre non raccordées mais géographiquement voisines les unes par rapport aux autres, nous procédons dans ce chapitre à une étude de la variation de la montée de potentiel transitoire à la surface du sol. La connaissance de cette répartition à la surface du sol permet de tirer des conclusions pour la résolution des problèmes de protection et de compatibilité électromagnétique. Nous nous baserons plus loin sur ces études pour quantifier la Distance Minimale d'Approche entre une prise de terre et d'autres qui seraient situées dans son voisinage.

Nous commencerons par l'établissement de l'équation de diffusion de courant de foudre dans le sol. Cette équation sera résolue ensuite par la méthode des éléments finis afin de déterminer la répartition de la montée de potentiel transitoire à la surface du sol. Après la détermination de DMA, nous terminons par la comparaison des résultats obtenus avec les valeurs de DMA contenues dans les spécifications techniques de l'OPT.

Avant d'étudier le comportement d'une prise de terre écoulant un courant de foudre, il serait instructif d'examiner la nature de la propagation des courants dans le sol, c'est-à-dire la répartition des potentiels autour du réseau ou de la prise de terre en régime statique ou quasi statique.

III.2. REPARTITION DES POTENTIELS AUTOUR DES PRISES DE TERRE EN REGIME STATIQUE

Deux cas types sont à considérer:

- celui du retour de courant à l'infini, comme c'est le cas pour la prise de terre d'un paratonnerre ou d'un parafoudre écoulant un courant de choc ;
- celui du retour de courant par un autre réseau de terre, comme c'est le cas pour un réseau électrique ou une prise de terre plus ou moins éloignée, ou comme dans le cas de la mesure de la résistance de prise de terre.

Dans le présent mémoire, nous étudions le cas particulier du piquet de terre. Cette forme en piquet correspond à la majorité des prises de terre utilisées dans le réseau de distribution de l'énergie électrique au Bénin.

Les problèmes d'interférence entre prises de terre ont pendant longtemps été abordés par des méthodes simplificatrices. Généralement, il n'y a aucune règle à observer de la part des sociétés de transport et de distribution d'énergie électrique lors de la conception d'un réseau de terre pour limiter la valeur de montée en potentiel de terre à une valeur spécifique déterminée. Ce vide serait en partie justifié par le fait que "la fréquence d'occurrence de ces tensions est relativement faible et qu'elles ne durent normalement qu'une faible fraction de seconde" [93].

Dans le cas de montée en potentiel de terre provoquée par le passage d'un courant de foudre par la prise de terre, celle-ci peut présenter une montée en potentiel pouvant atteindre des dizaines de kilovolts, voire des centaines de kilovolts. Ce sont surtout les Compagnies de Télécommunications qui sont le plus fréquemment affectées. Les montées en potentiel de terre causées par les courants de court-circuit sur les câbles de communications ont été étudiés par E. P. DICK et al. [94]. P. G. LAURENT [92] a examiné le couplage entre prises de terre voisines en régime statique ou à fréquence industrielle. La plupart des formules et définitions qui seront utilisées dans la section suivante ont été empruntées à ces auteurs.

On considère que deux prises de terre sont électriquement distinctes si la distance qui les sépare l'une de l'autre est supérieure à dix fois le rayon de l'hémisphère équivalent du plus grand. Ainsi, deux prises de terre voisines ne sont pas indépendantes car l'élévation de potentiel de l'une dépend du courant écoulé dans le sol par l'autre. En régime statique ou quasi-statique, on définit l'interaction entre deux prises de terre par la notion de potentiel de transfert. C'est la montée de potentiel, représentant la fraction de potentiel de la prise de terre par laquelle s'écoule le courant, à laquelle est portée la prise de terre voisine. Selon A. P. LAURENT [92], on peut définir le coefficient de couplage comme étant le rapport de la tension U de la prise de terre voisine sur la tension U_0 de la prise de terre à travers laquelle circule un courant. Dans la répartition de la montée de potentiel à la surface du sol, nous utilisons indirectement cette notion, à travers le taux d'atténuation.

En s'intéressant au rapport des montées en potentiel que prend l'une des prises A ou B suivant qu'elle est inactive ou active, le problème peut être pris d'une façon générale en remarquant que l'ensemble de deux prises de terre quelconques A et B (cf. Figure III.1.) et de la prise de retour constituée ici par le sol lointain constitue un système passif à trois entrées. Les échanges entre bornes d'un tel système sont entièrement définis par trois paramètres internes seulement, pour lesquels on peut choisir par exemple trois résistances R_a , R_b et R_{ab} .

- $R_a + R_{ab}$ est la résistance totale qui s'oppose à l'écoulement d'un courant par A quand B n'intervient pas ;

- $R_b + R_{ab}$ est la résistance totale qui s'oppose à l'écoulement d'un courant par B quand A n'intervient pas ;

- R_{ab} est la partie commune à ces résistances et fixe donc le potentiel d'une des bornes quand c'est l'autre qui écoule le courant.

En régime stationnaire, les coefficients de couplage sont donnés par les relations suivantes :

$$K = \frac{R_{ab}}{R_{ab} + \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}} \quad (3.1)$$

$$k_{ab} = \frac{R_0}{R_0 + R_b} \quad (3.2)$$

$$k_{ba} = \frac{R_0}{R_0 + R_a} \quad (3.3)$$

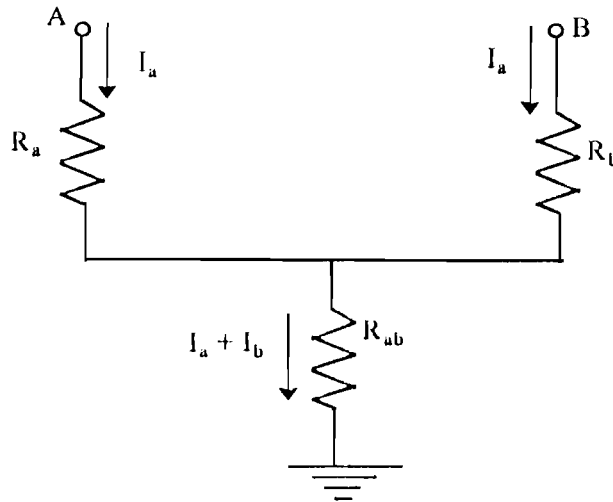


Figure III.1 : Schéma équivalent de deux prises de terre couplées.

Le coefficient K correspond au cas où les deux prises de terre sont traversées par des courants. Le coefficient k_{ab} est le coefficient de couplage de b avec a et k_{ba} est le coefficient de couplage de a avec b .

De façon générale, on montre que les trois coefficients sont liés par la relation :

$$K = \frac{k_{ba} + k_{ab} - 2k_{ba}k_{ab}}{1 - k_{ba}k_{ab}} \quad (3.4)$$

De ces relations, P. G. LAURENT tire les règles suivantes :

1. Pour que le potentiel d'une électrode passive soit inférieur à 10% de celui de l'électrode active, il faut l'éloigner de l'électrode active d'au moins dix fois le rayon de celle-ci ;

2. Un sous-sol plus conducteur que les couches superficielles tend, par ailleurs à réduire les couplages et un sous sol plus résistant à les augmenter ;

Dans le cas de l'écoulement des ondes de foudre dans le sol, l'élévation de potentiel créée par la prise de terre qui écoule le courant de foudre est très grande par rapport au potentiel qui existait sur cette prise de terre. Par conséquent, dans l'étude des interactions entre les prises de terre en régime impulsionnel, on ne tient généralement pas compte de la valeur du potentiel de transfert de la prise de terre sous influence.

III.3. Propagation du courant dans le sol.

III.3.1. Equation de diffusion du courant dans le sol

Dans le sol, l'équation de Maxwell qui donne les relations existant entre les champs électrique et magnétique et les densités de flux électrique et magnétique \vec{E} , \vec{H} , \vec{D} et \vec{B} sont :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.5.)$$

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.6.)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3.7.)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (3.8.)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.9.)$$

En combinant toutes ces équations et prenant en compte que $\text{div}(\vec{E}) = 0$, on obtient l'équation générale de l'onde dans le sol :

$$\nabla^2 E = \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

Lorsque le courant de conduction est prédominant, on peut négliger le terme qui représente le courant de déplacement. Dans ce cas, l'équation (3.10) prend la forme de l'équation de la diffusion et se met sous la forme (3.11):

$$\nabla^2 E = \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.11)$$

L'équation de champ électrique (3.11) a pour analogue l'équation de potentiel électrique (3.12):

$$\nabla^2 V = \mu_0 \sigma \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.12)$$

Pour la résolution de cette dernière équation, l'IGE ne dispose pas d'outil informatique dédié. Mais en nous rendant compte qu'il s'agit de l'équation de la diffusion, nous avons eu l'idée d'utiliser le module thermique du logiciel FLUX2D disponible au Laboratoire de l'IGE. En effet, l'équation de diffusion de la chaleur dans un milieu homogène est donnée par :

$$\nabla^2 T = \frac{\rho C_p}{K} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{P}{K} \quad (3.13)$$

Lorsqu'on suppose que $P = 0$, l'équation (3.13) devient :

$$\nabla^2 T = \frac{\rho C_p}{K} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.14)$$

Les équations (3.12) et (3.14) sont analogues. Sur la base de cette analogie, nous résolvons l'équation (3.12) en utilisant l'équation (3.14) qui est disponible dans le logiciel d'éléments finis FLUX2D. Pour des sols non homogènes, on peut réaménager l'équation (3.12) sous la forme locale (3.15):

$$\text{div}\left(-\frac{1}{\sigma} \text{grad}(V)\right) + \mu_0 \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.15)$$

et :

$$\text{div}(-\rho \text{grad}(V)) + \mu_0 \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.16)$$

où $\frac{1}{\sigma} = \rho$ représente la résistivité du sol en ($\Omega \cdot m$);

L'équation analogue utilisée dans FLUX2D est de la forme:

$$\text{div}(-k \text{grad}(T)) + \rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

où k représente la conductivité thermique ($W/m/K$) ;

ρ_c est la capacité thermique ($J / m^3 / K$)

T représente la température (Kelvin)

Pour la modélisation, nous nous servons des analogies résumées dans le tableau ci-après:

Type	Première caractéristique		Deuxième caractéristique	
	Symbole	Désignation	Symbole	Désignation
Thermique	k	Conductibilité	ρ_c	Capacité
Electromagnétique	$\frac{1}{\sigma} = \rho$	Résistivité	μ_0	Perméabilité

Tableau III.1 : Correspondance des symboles thermiques et électromagnétiques.

III.3.2. Erreur liée à l'équation de diffusion du courant

Dans l'établissement de l'équation de diffusion du courant dans le sol, nous avons négligé le terme qui représente le courant de déplacement. Dans ce paragraphe, nous discuterons des limites générales de validité de l'équation de la diffusion (3.16). En d'autres termes, nous essayerons d'apprécier les limites théoriques de cette simplification.

Supposons que le champ électrique E varie selon une loi sinusoïdale, soit en notation complexe :

$$\underline{E} = E_m(\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)) = E_m e^{j\omega t} \quad (3.18)$$

Après toutes les transformations nécessaires, on peut récrire l'équation (3.18) sous la forme :

$$V^2 \underline{E} = \gamma^2 \underline{E} \quad (3.19)$$

avec

$$\underline{\gamma}^2 = j\mu_0\mu_r\omega(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r) \quad (3.20)$$

Si la permittivité relative du sol est négligée ($\epsilon_r = 0$), nous obtenons:

$$\underline{\gamma}_1^2 = j\mu_0\mu_r\omega\sigma \quad (3.21)$$

L'erreur induite par le fait de négliger la permittivité relative du sol ($\epsilon_r = 0$) est calculée par le nombre complexe Gr:

$$\underline{G}_1 = \left(\frac{\underline{\gamma}}{\underline{\gamma}_1}\right)^2 = 1 + j\frac{\omega\epsilon_0\epsilon_r}{\sigma} \quad (3.22)$$

Dans l'étude de l'onde de foudre, Sunde estime qu'on peut négliger la permittivité ϵ_r du sol lorsque la partie imaginaire de Gr est inférieure à 0.25. La Figure III.2. montre l'évolution de la partie imaginaire de Gr pour une fréquence de $f = 1$ MHz lorsque la résistivité du sol varie de 10 à 1000 Ohm.m.

Il faut avoir présent à l'esprit que cette limite reste valable tant que le phénomène d'ionisation du sol ne rentre pas en jeu. Dans la pratique, et compte tenu des valeurs souvent élevées des courant de foudre qui s'écoulent à travers les prises de terre, l'analyse ne reste rigoureusement valable qu'au début du front montant de l'onde de foudre. En conséquence, dans une plus large mesure que les indications de SUNDE, l'équation de la diffusion décrit le processus d'écoulement du courant de foudre dans le sol à travers une prise de terre.

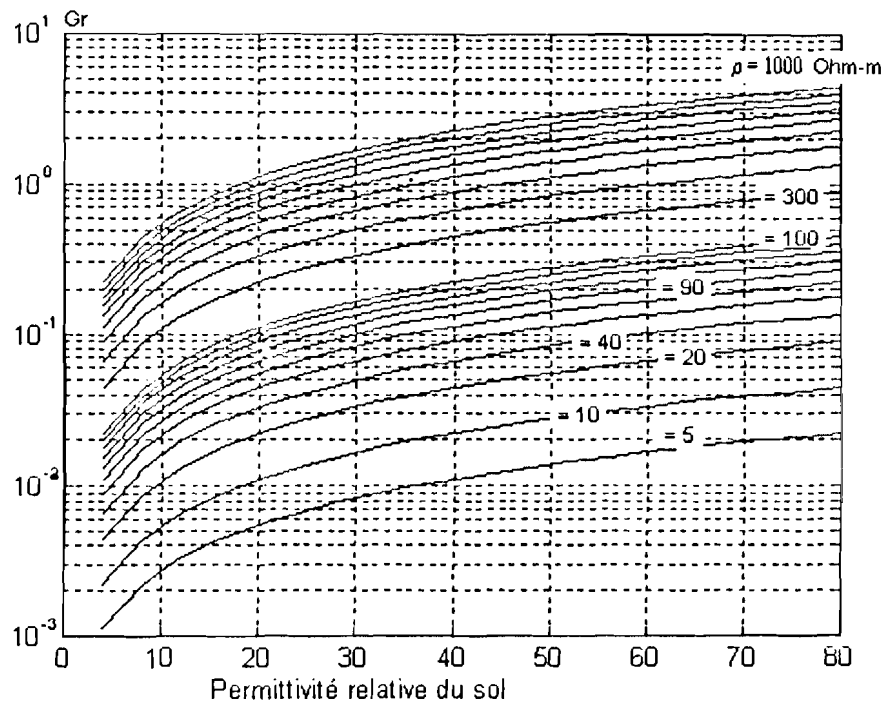


Figure III.2 : Partie imaginaire de Gr

III.4. Résolution de l'équation de diffusion du courant : détermination de la répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol.

La simulation numérique est un procédé d'étude, de plus en plus utilisé grâce aux capacités croissantes des calculateurs. Elle constitue une alternative intéressante aux expérimentations par la possibilité qu'elle donne d'accéder de façon rapide et moins onéreuse à des informations jadis accessibles que par des voies expérimentales. Dans ce mémoire, nous utilisons la simulation numérique pour la détermination de la Distance Minimale d'Approche (DMA) dans le cas de la cohabitation entre les installations de la SBEE et de l'OPT.

La méthode consiste en un couplage de la méthode des Lignes de Transmission avec la méthode des Eléments Finis. Les conditions aux limites sont calculées en utilisant le code LAPIN (voir Annexe I) qui est basé sur la transformée inverse de Laplace. Ensuite, l'équation de la diffusion du courant est résolue par le code FLUX2D qui est un logiciel d'éléments finis de CEDRAT. L'information finale recherchée est la répartition spatio-

d'injection du courant. C'est sur la base de cette dernière, que d'autres informations secondaires telles que le potentiel de pas, le potentiel de contact ou la distance minimale d'approche seront déduites.

Dans tout ce qui suivra, les données géométriques d'implantation du piquet de terre utilisées dans les simulations sont données dans la figure III.3. L'onde de courant est du type 1.2/50 avec une amplitude de 1 kA. Le rayon du piquet est $a = 8 \text{ mm}$.

Après avoir déterminé la propagation de l'onde de tension le long de piquet de terre en fonction du temps, nous nous sommes servis de ces résultats pour définir les conditions aux limites à la surface du piquet de terre.

La résolution de l'équation de la diffusion du courant dans le sol permet l'étude de l'influence sur la répartition de la montée en potentiel transitoire de la résistivité du sol, de la longueur du piquet de terre et de la profondeur de son enfouissement dans le sol. La méthode de calcul de la DMA est abordée à la fin du chapitre.

III.4.1. Représentation du piquet de terre.

On s'aperçoit dans la figure III.3. que le piquet de terre présente une symétrie par rapport à son axe. De ce fait, on peut obtenir la solution de l'équation de diffusion en travaillant avec la moitié de la structure (cf. figure III.5) lorsque les conditions aux limites appropriées sont utilisées. Sur cette base, les dessins du piquet de terre utilisés dans nos simulations sous le logiciel FLUX2D sont de la forme donnée dans la figure III.4.

Suivant cette figure, les segments AG et AF sont pris égaux à 75 mètres. Ces mesures sont fixées en fonction du diamètre d'action de la prise de terre prise égale à 70 mètres. L'arc de cercle GF a son centre au point A. AB représente la profondeur d'enfouissement du piquet, BC son rayon et BE est égale à la longueur du piquet de terre.

Les conditions aux limites sont appliquées de la manière suivante :

- Sur les segments de droite BC, CD et DE, sont appliquées les conditions aux limites de Dirichlet ;

- Sur l'arc de cercle FG est appliquée la condition flottante. Cette condition implique que tous les points situés sur cet arc de cercle sont au même potentiel mais que ce potentiel n'est pas nécessairement nul ; FLUX2D comprend simplement que le milieu a été tronqué en ces points. L'avantage d'une telle représentation par rapport à une condition de Dirichlet égale à zéro est qu'on représente mieux l'infini. Plus loin dans ce chapitre, nous montrons que le zéro à ces endroits n'est effectif que pour des faibles valeurs de résistivité de sol ;
- Partout ailleurs, nous appliquons les conditions de Neumann homogène (en thermique, cela veut dire qu'on rend ces frontières adiabatiques).

Pour trouver la répartition de potentiel à la surface du sol, nous traçons en dessous de la ligne AG, une droite parallèle à cette dernière, de longueur égale à environ 70 mètres, à une profondeur de 5 millimètres. L'axe z est orienté du pont A vers le point G.

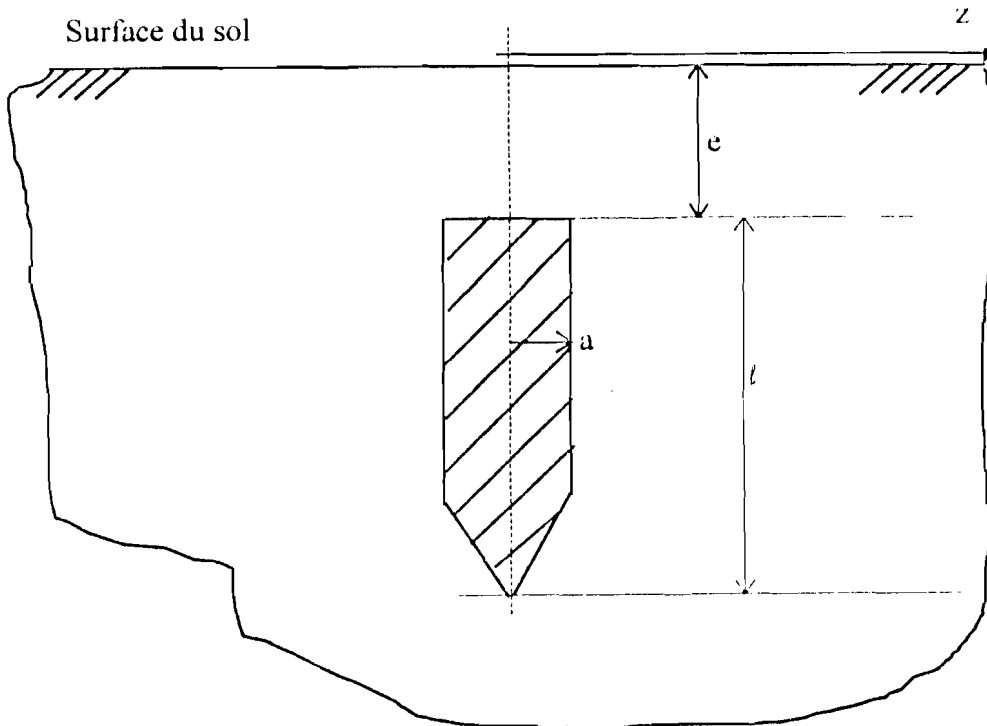


Figure III.3 Dessin d'implantation du piquet de terre dans le sol.

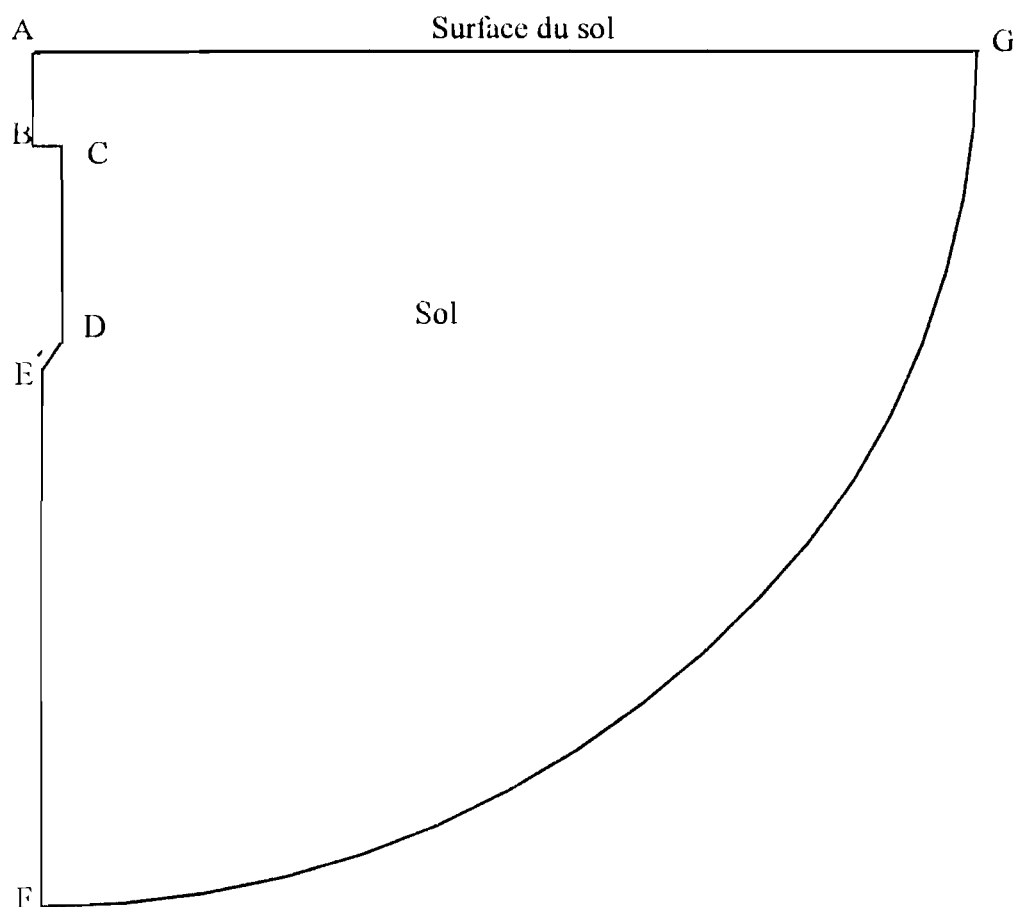


Figure III.4. Dessin de représentation du piquet de terre dans FLUX2D.

III.4.2. Interface FLUX2D - CODE LAPIN

Les conditions aux limites de type Dirichlet indiquée à la section précédente représentent les valeurs des potentiels $v(x,t)$ en chaque point du piquet et pour chaque temps donné. Le logiciel FLUX2D offre la possibilité de faire varier les conditions aux limites de type Dirichlet par usage de son programme utilisateur USRBDR [108]. Pour déterminer le potentiel $v(x,t)$, nous réorganisons le code LAPIN de manière à le mettre sous la forme imposée par FLUX2D mais en nous assurant que les bonnes valeurs sont reprises par FLUX2D pour la résolution de l'équation de diffusion.

Ainsi, pour chaque noeud de maillage se trouvant à la surface du piquet et pour chaque pas de calcul, la valeur du potentiel est calculée à l'aide du code LAPIN puis retournée à FLUX2D.

Lorsqu'on prend en compte le phénomène d'ionisation du sol, la modélisation se fait par "rayon fictif modifiée", consistant à la variation de la résistivité du sol selon une loi prédéterminée. Cette loi de variation de la résistivité du sol est ensuite introduite dans FLUX2D par le biais d'un autre programme utilisateur dénommé USRKTH. Cette sous-routine indique, lorsqu'elle est appelée, la valeur de la résistivité du sol correspondant au pas de calcul considéré

III.4.3. Maillage et pas de calcul.

Le maillage et le pas de calcul peuvent avoir une influence relativement importante sur la précision des résultats. C'est pourquoi, dans toutes les simulations nous essayons de mailler le plus finement possible, chaque fois jusqu'à la limite tolérée par le mailleur. Compte tenu de la forte valeur du potentiel à la surface du piquet, et tenant aussi compte de la connaissance que nous avons de l'allure générale de l'évolution de la distribution du potentiel au fur et à mesure que l'on s'éloigne du piquet, nous maillons de façon plus dense dans la zone proche de la surface du piquet.

T. NAKATA et al. [109] ont montré que pour un conducteur filiforme, les potentiels vecteur et scalaire peuvent être considérés constants dans leur section perpendiculaire à l'axe. Cette propriété autorise à ne pas mailler la partie interne du piquet. C'est pourquoi, dans la figure III.5. elle n'est pas représentée.

Au cours du processus de maillage, nous subdivisons le piquet de terre de 80 à 130 noeuds. En fin de maillage, on se retrouve avec des problèmes comportant 10 000 à 14 000 éléments et de 20 000 à 30 000 noeuds.

Le pas de calcul est choisi en liaison avec la vitesse de propagation de l'onde de foudre, estimée à environ 1.610^8 m/s. Pour cette vitesse et pour le piquet de plus faible longueur (2 mètres dans nos simulations), on obtient un temps de propagation de l'ordre de 1.2510^{-2} μ S. Dans toutes les simulations, le pas de calcul est pris égal à 1.010^{-2} . Il est à noter qu'on peut travailler avec des pas de calcul plus grand à condition de ne pas se retrouver dans la zone de forte variation de l'onde de courant. Pour les ondes de foudre,

ou BT), le front montant de l'onde à une pente considérablement moins raide que celle de l'onde 1.2/50 que nous utilisons.

De si petits pas de calcul s'ils améliorent la précision, ne manquent pas de poser des problèmes de stockage informatique. A titre indicatif, pour simuler un coup de foudre sur une durée de 3 μ S, il faut réaliser 300 pas de calcul. Si l'on désire connaître par exemple l'évolution temporelle de la montée en potentiel en 50 points à la surface du sol, cela conduit à des volumes de fichier FLUX2D de l'ordre de 40 à 50 Mo (ces chiffres correspondent à un stockage tous les six pas de calcul).

La durée d'une simulation (résolution du problème et exploitation des résultats) est fonction de la vitesse de calcul de la machine considérée. Elle est en moyenne de 4 heures pour les micro-ordinateurs fonctionnant à une horloge de 200 MHz, de 6 heures pour une machine cadencée à 166 MHz et de 18 heures pour une machine de fréquence d'horloge égale à 66 MHz.

III.4.4. Influence de la longueur du piquet sur la répartition de la montée en potentiel à la surface du sol (sans prise en compte du phénomène d'ionisation).

Dans les figures III.5. à III.8.bis sont représentées les répartitions de montée en potentiel transitoire à la surface du sol pour différentes valeurs de longueur de piquet de terre (cf. tableau III.2.) avec des valeurs de résistivité de sol égales respectivement à 100, 500 et 1000 $\Omega.m$.

N° de courbe	1	2	3
Longueur de piquet (m)	2	4	8

Tableau III.2 : Correspondance des numéros de courbe avec la longueur de piquet dans les figures de III.5 à III.8.bis.

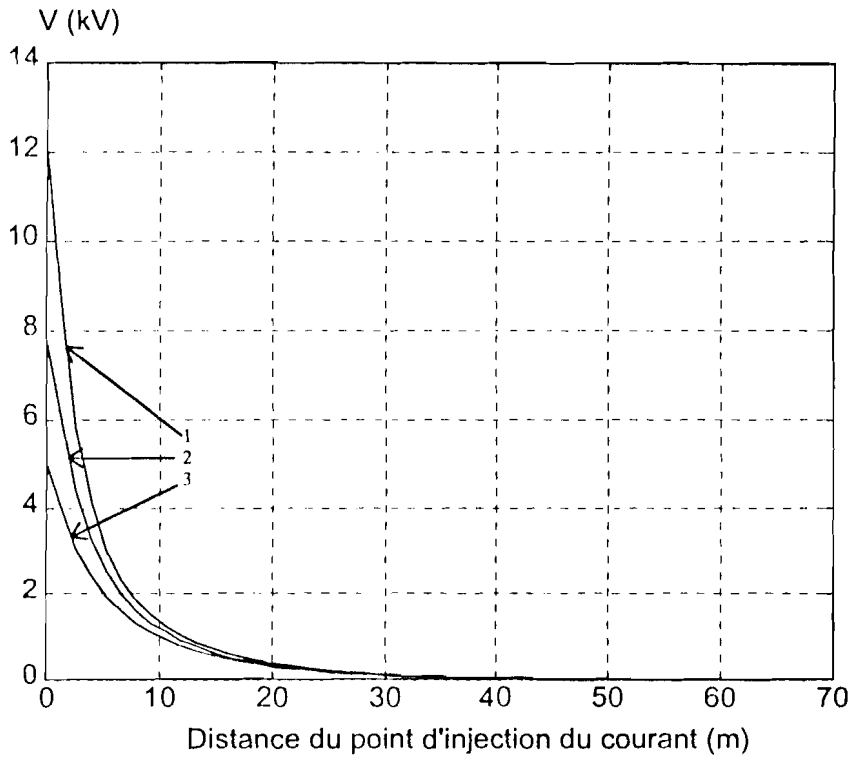


Figure III.5. Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 100 \Omega.m$.

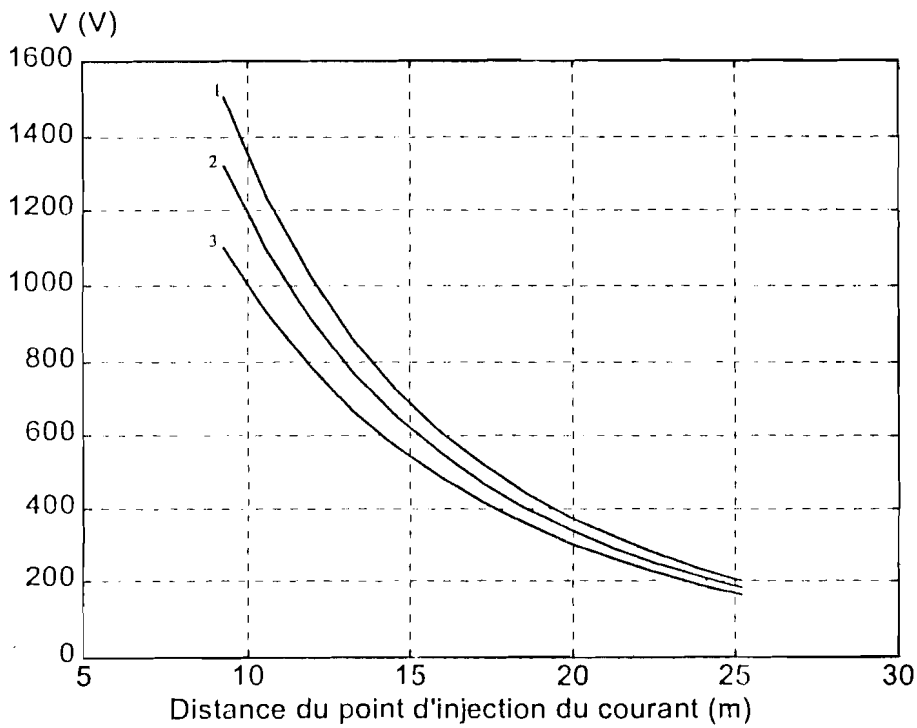


Figure III.6. Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 100 \Omega.m$.

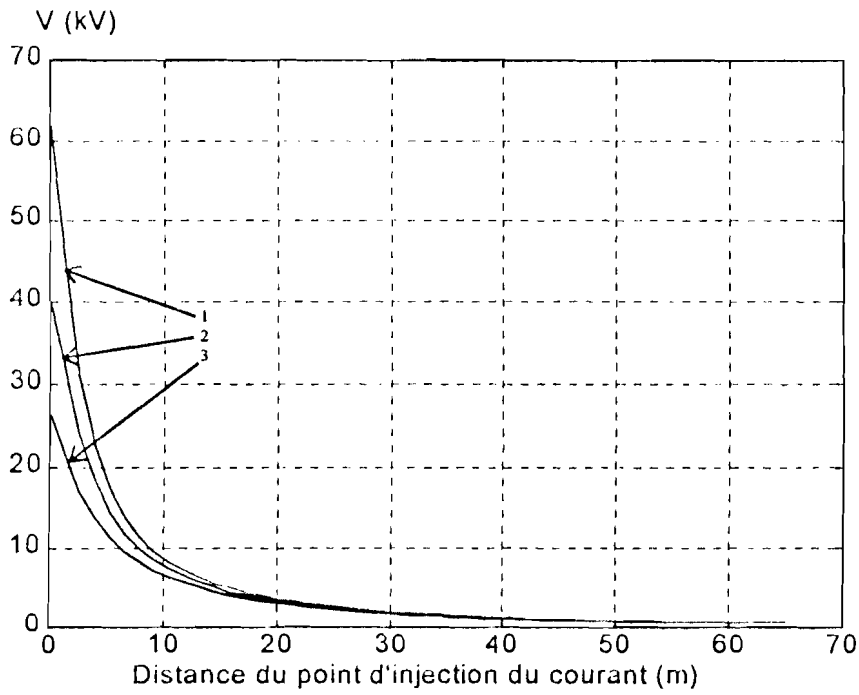


Figure III.7. Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 500 \Omega.m$.

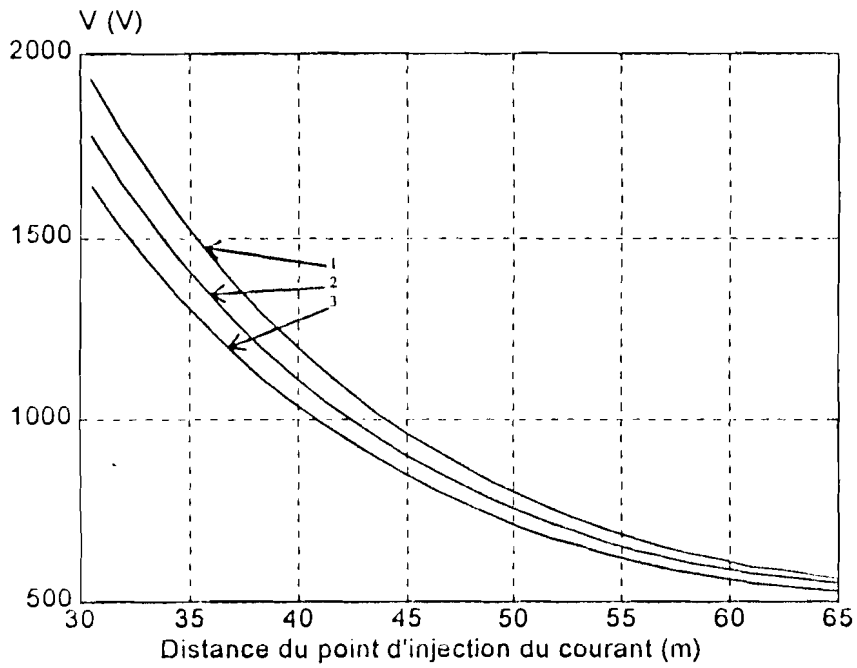


Figure III.7.bis. Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 500 \Omega.m$.

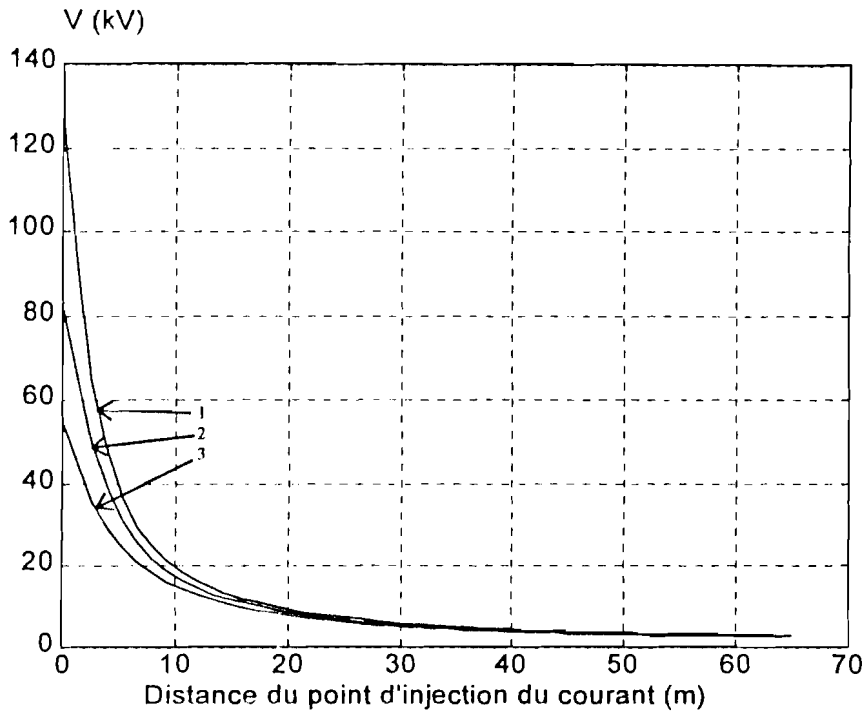


Figure III.8. Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 1000 \Omega.m$.

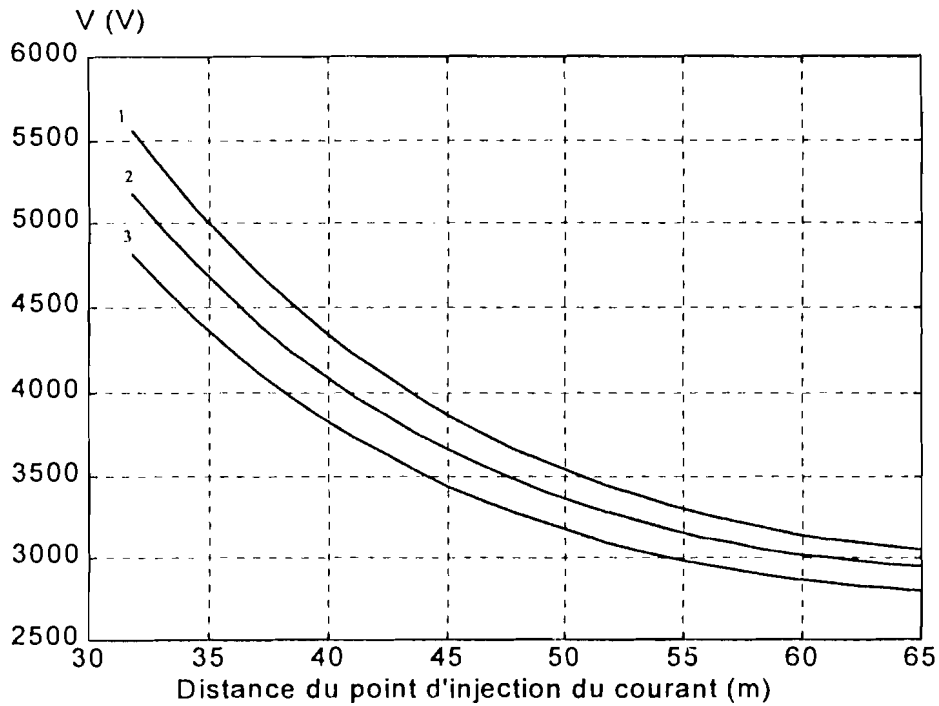


Figure III.8.bis. Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 1000 \Omega.m$.

Au vu de ces figures, on peut retenir que:

- pour les sols ayant une bonne résistivité, de l'ordre de $100 \Omega.m$, la longueur du piquet n'a pas d'influence sensible lorsque qu'on s'éloigne du point d'injection du courant ;
- pour des sols ayant de moyenne ou mauvaise résistivité, environ à partir de $500 \Omega.m$, la longueur du piquet de terre peut contribuer à abaisser la montée en potentiel transitoire à la surface du sol même à des distances de l'ordre de 50 mètres et plus ;
- en général, on peut observer que l'augmentation de la longueur du piquet de terre n'est pas une mesure efficace pour abaisser la valeur de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol.

III.4.5. Influence de la profondeur d'enfouissement du piquet sur la répartition de la montée en potentiel (sans prise en compte de l'ionisation).

La longueur du piquet de terre est prise égale à 2.2 mètres. Dans la figure III.9., la résistivité du sol est égale à $\rho = 100 \Omega.m$ tandis que dans la figure III.10, la résistivité du sol est égale à $\rho = 500 \Omega.m$. Le tableau III.3. donne la correspondance entre les numéros des courbes des figures III.9 et III.10 et la profondeur d'enfouissement (cf. figure III.3.).

N° de courbe	1	2	3
Profondeur d'enfouissement (m)	0	0.5	1

Tableau III.3. : Correspondance des numéros de courbe avec la profondeur d'enfouissement du piquet de terre dans les figures de III.9 et III.10.

L'observation des figures III.9 et III.10. permet de dire que l'augmentation de la profondeur d'enfouissement du piquet de terre permet de réduire considérablement le niveau de la montée en potentiel transitoire dans les voisinages immédiats du point d'injection de la prise de terre. Cette mesure peut donc être utilisée, par exemple pour la

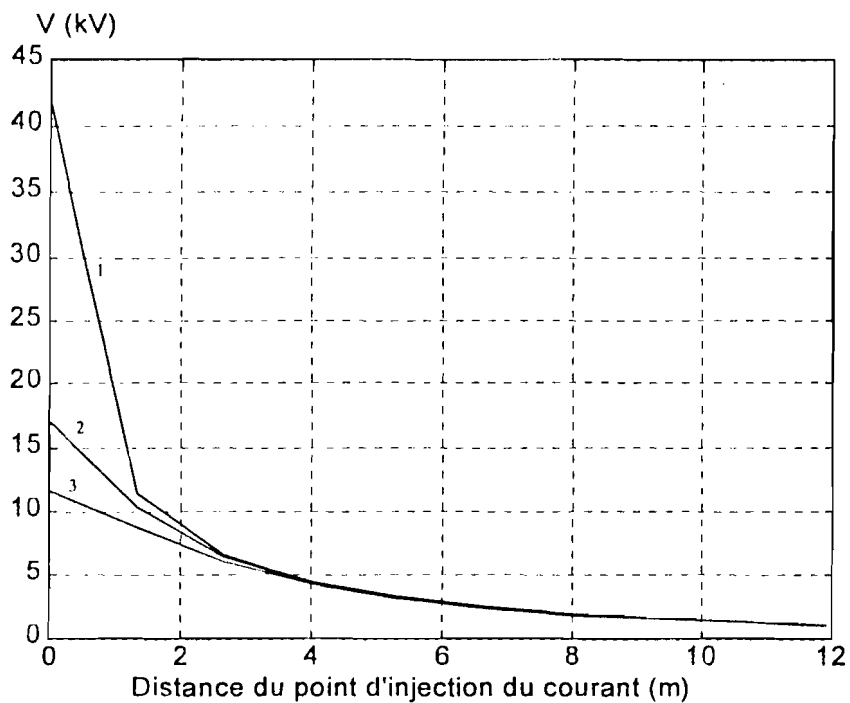


Figure III.9 : Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 100 \Omega.m$.

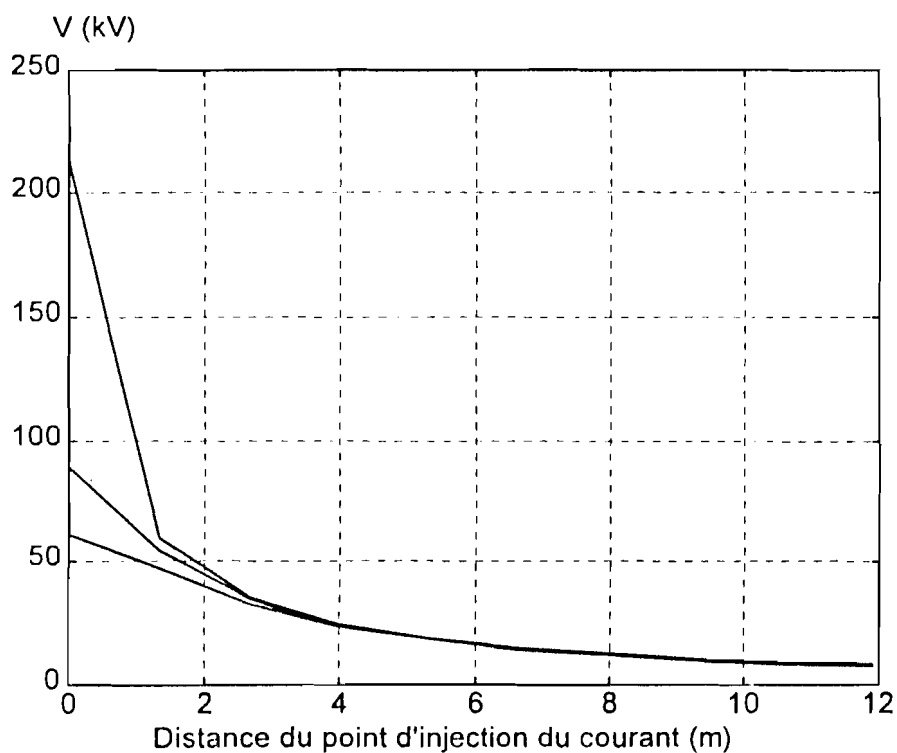


Figure III.10. : Répartition de la montée en potentiel maximale en fonction de la distance avec $\rho = 500 \Omega.m$.

réduction du potentiel de toucher. Mais l'augmentation de la profondeur d'enfouissement ne permet pas de réduire la DMA.

III.4.6. Détermination de la DMA.

La DMA doit être déterminée de manière à s'assurer que l'écoulement du courant de foudre dans la prise de terre de l'installation de la SBEE ne provoque pas une montée en potentiel sur les matériels de télécommunications qui dépassent un certain seuil.

La recommandation K20 de l'Union Internationale des Télécommunications et Télégraphes (UIT-T) définit le niveau de 1000 V comme étant celui pour lequel on doit tester un matériel de télécommunication non protégé par des dispositifs de protection externe. Nous prenons cette valeur comme représentative de la valeur maximale de la montée en potentiel. Elle sert de base pour le calcul de la DMA.

Des simulations sont faites pour des longueurs de piquet de terre égales à 2, 4 et 8 mètres. Différentes valeurs de résistivité de sol sont considérées : 100, 500, 1000 et 2000 $\Omega.m$. L'onde de courant est toujours de type 1.2/50 avec une amplitude de 1 kA. Les durées de simulation sont de 3 μS et nous ne prenons pas en compte le phénomène d'ionisation.

Trois cas de simulation n'ont pu être traités pour des raisons de difficulté de calcul sous FLUX2D :

$\ell = 2$ m et $\rho = 1000$ $\Omega.m$; $\ell = 2$ m et $\rho = 2000$ $\Omega.m$ et $\ell = 4$ m et $\rho = 2000$ $\Omega.m$.

Nous pensons que dans ces cas, la variation de la résistivité du sol (pour la modélisation par rayon fictif modifié) est si forte que l'algorithme utilisée dans la résolution de l'équation temporelle associée à l'équation de diffusion par FLUX2D ne converge pas. Lorsque l'algorithme a du mal à converger, il y a ajustement automatique du pas de calcul. En cas d'insuccès, le programme s'arrête.

Les résultats de calcul de DMA sont résumés sous forme de tableau à la fin de la section. Pour donner une idée sur l'allure générale de l'évolution de la montée en potentiel dans le temps et dans l'espace, quelques courbes ont été tracées en 3D (figures III.11 à 16).

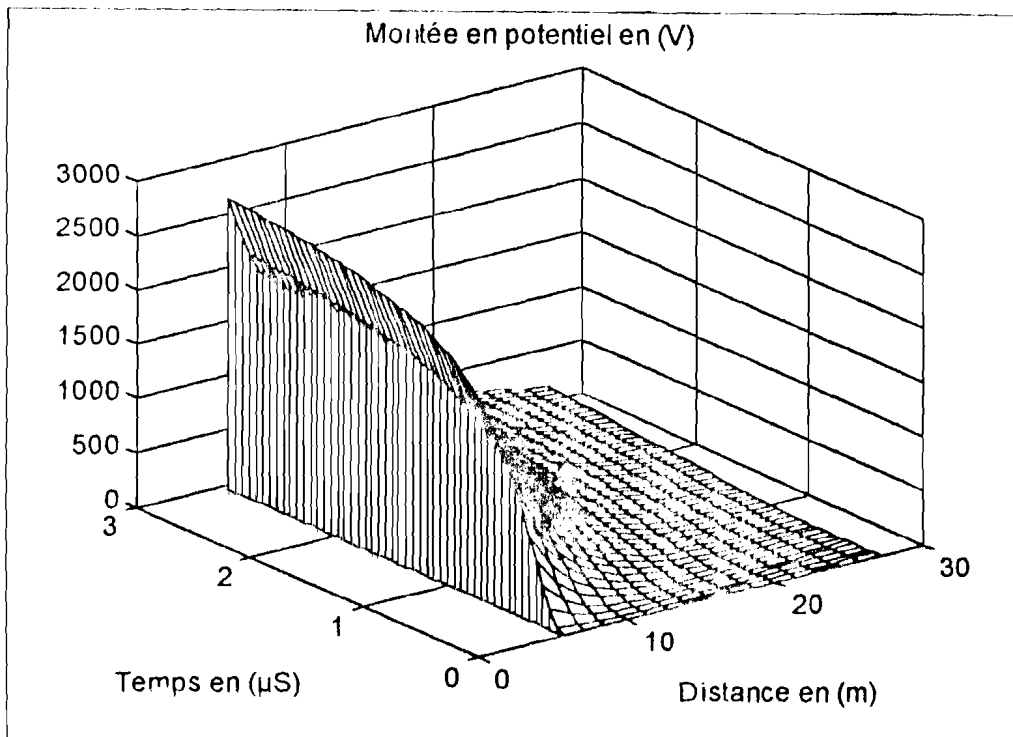


Figure III.11. $v(z,t)$ pour $\ell = 4 \text{ m}$, $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ (sans prise en compte de l'ionisation).

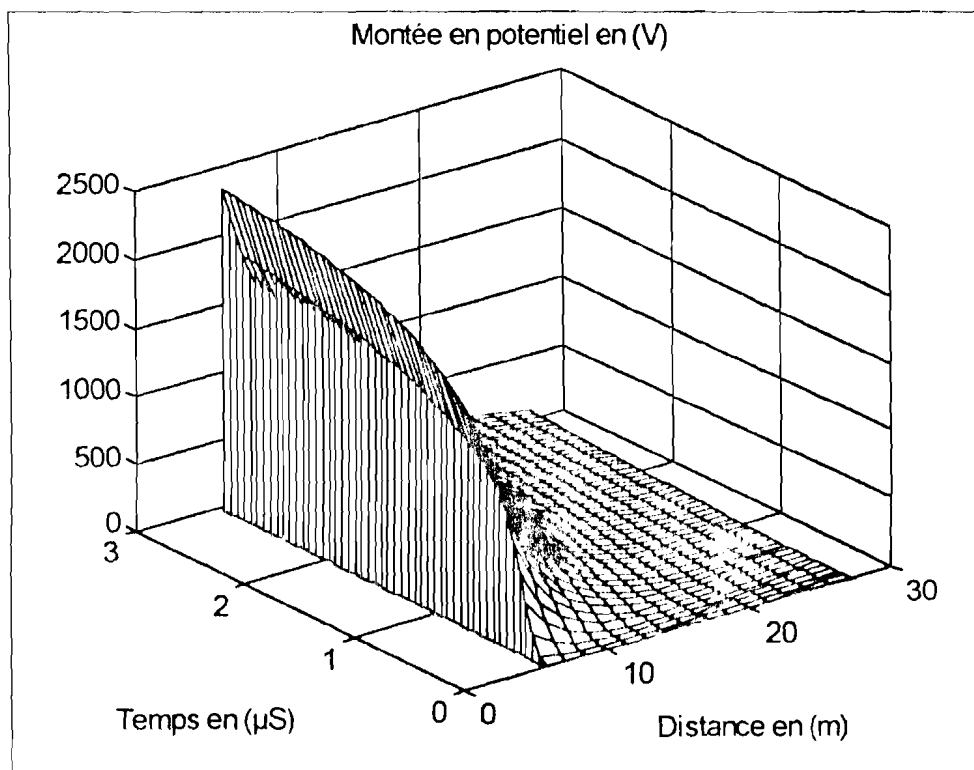


Figure III.12. $v(z,t)$ pour $\ell = 4 \text{ m}$, $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ (avec prise en compte de l'ionisation).

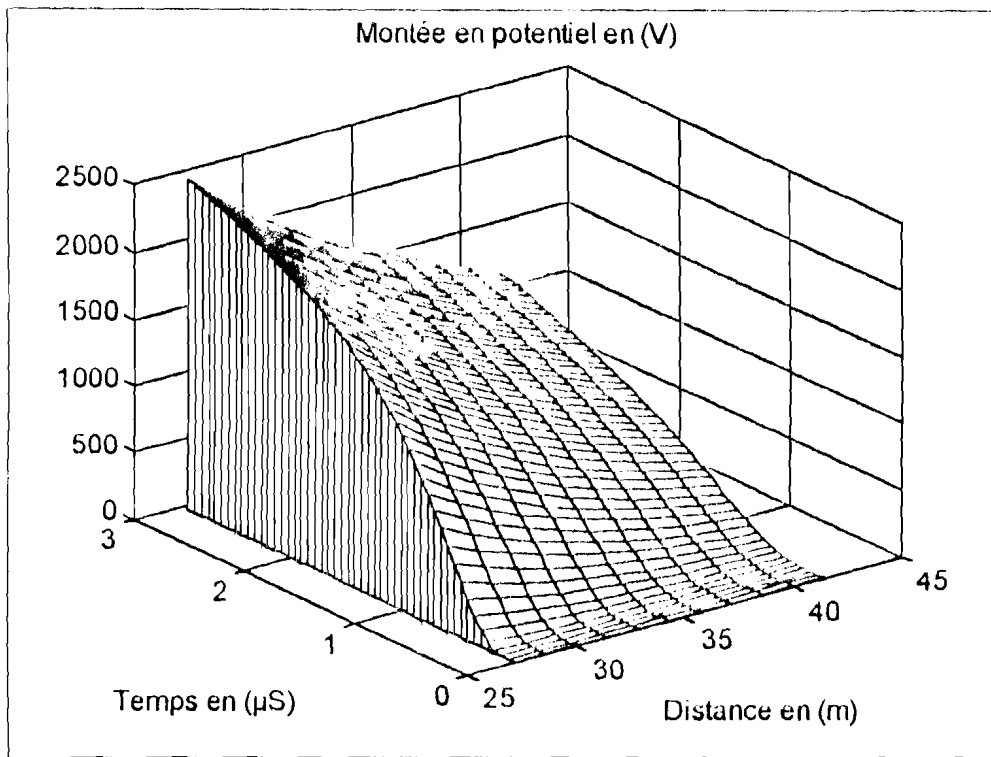


Figure III.13. $v(z,t)$ pour $\ell = 4$ m, $\rho = 500 \Omega \cdot m$ (sans prise en compte de l'ionisation).

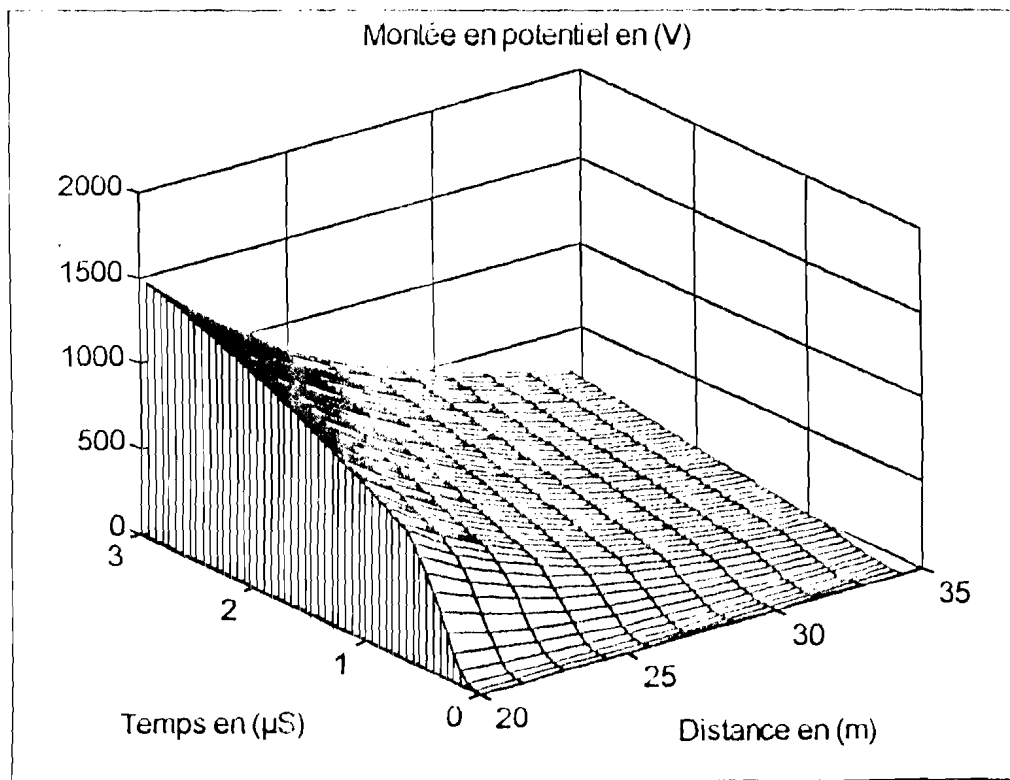


Figure III.14. $v(z,t)$ pour $\ell = 4$ m, $\rho = 500 \Omega \cdot m$ (avec prise en compte de l'ionisation).

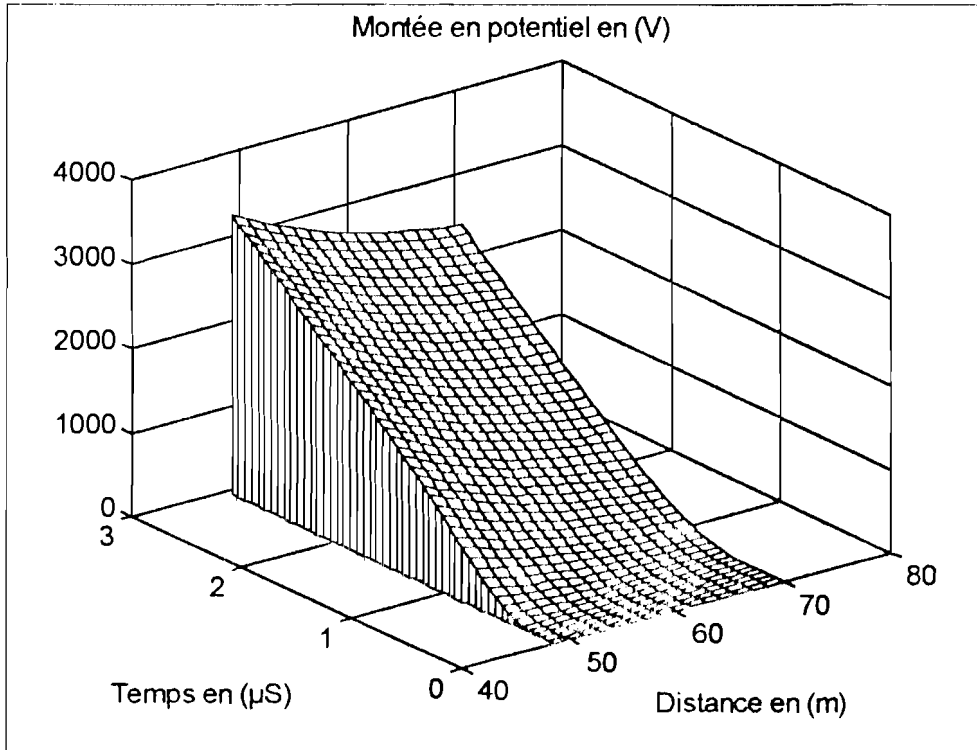


Figure III.15. $v(z,t)$ pour $\ell = 4 \text{ m}$, $\rho = 1000 \Omega \cdot \text{m}$ (sans prise en compte de l'ionisation).

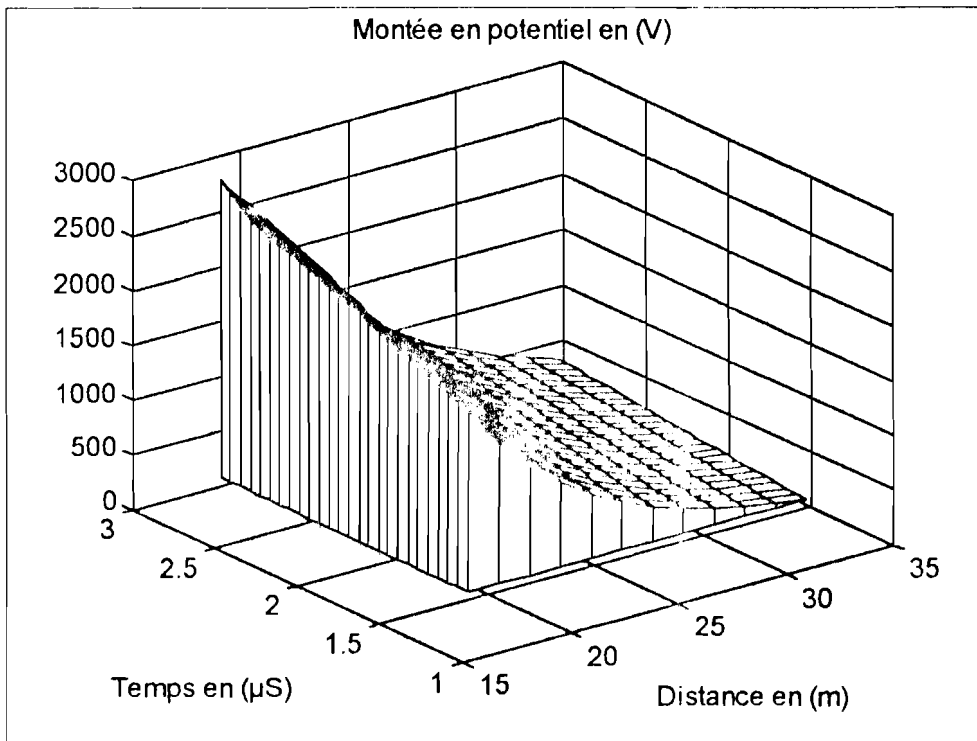


Figure III.16. $v(z,t)$ pour $\ell = 4 \text{ m}$, $\rho = 1000 \Omega \cdot \text{m}$ (avec prise en compte de l'ionisation).

L'écart entre les valeurs des montées en potentiel en différents points à la surface du sol est important. C'est pourquoi, nous choisissons de ne représenter que les zones de transition.

Dans les figures III.17 à 22, nous donnons l'évolution dans le temps de la montée en potentiel au point $z = 70$ mètres. Le phénomène d'ionisation du sol est aussi traité. Nous considérons toujours le cas d'un piquet long de 4 mètres et la résistivité du sol est prise égale à 100, 500 et 1000 $\Omega.m$. Ce choix n'a aucune influence sur la généralité de l'analyse qui suit.

Il ressort de l'observation de ces figures que la montée en potentiel reste quasi nulle (au point de référence de potentiel nul, c'est à dire à une distance égale à 70 mètres) quelle que soit la valeur de la résistivité du sol lorsqu'on prend en compte le phénomène d'ionisation. Ceci n'est plus vérifié lorsqu'on ne tient pas compte de l'ionisation du sol et que la valeur de la résistivité du sol n'est pas faible. C'est une confirmation qu'on peut dans la pratique prendre l'infini théorique à 70 mètres. Mais il convient d'avoir à l'esprit que c'est une hypothèse à utiliser avec discernement.

Le tableau III.5 donne les valeurs de la DMA telles que nous avons pu les déterminer à partir de la montée en potentiel. Elles correspondent à un potentiel de 1000 volts. On peut noter une décroissance de la DMA avec la longueur du piquet si on ne tient pas compte du phénomène d'ionisation. Le phénomène est très différent lorsque l'on fait intervenir le phénomène d'ionisation où l'augmentation de la longueur du piquet conduit à une diminution du potentiel de toucher mais à une décroissance beaucoup plus lente du potentiel. Des courbes dans le chapitre suivant permettent de visualiser ce phénomène.

Il est clair que le phénomène d'ionisation dépend de l'intensité du coup de foudre et ce résultat doit être confirmé. Néanmoins il semble bien que les réductions simultanées du potentiel de toucher et de la distance minimale d'approche semblent incompatibles.

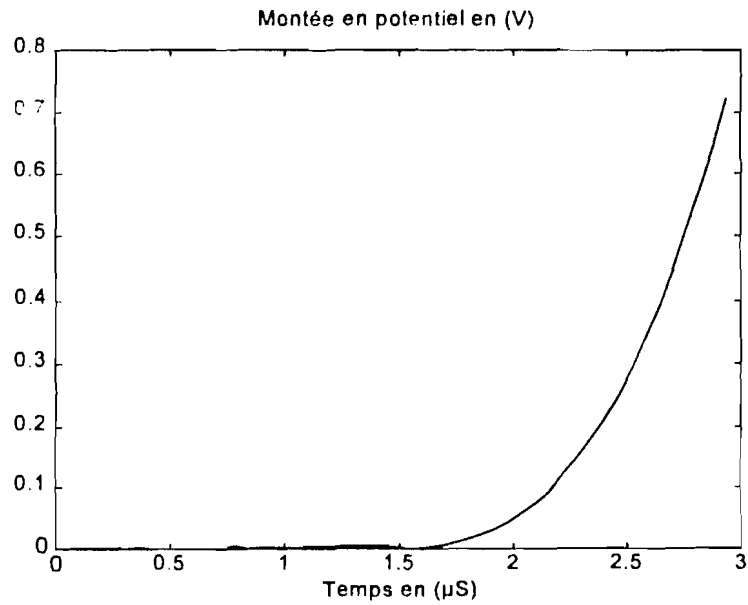


Figure III.17 : Evolution de la montée en potentiel aux bords pour $\rho = 100\Omega.m$ sans prise en compte du phénomène d'ionisation.

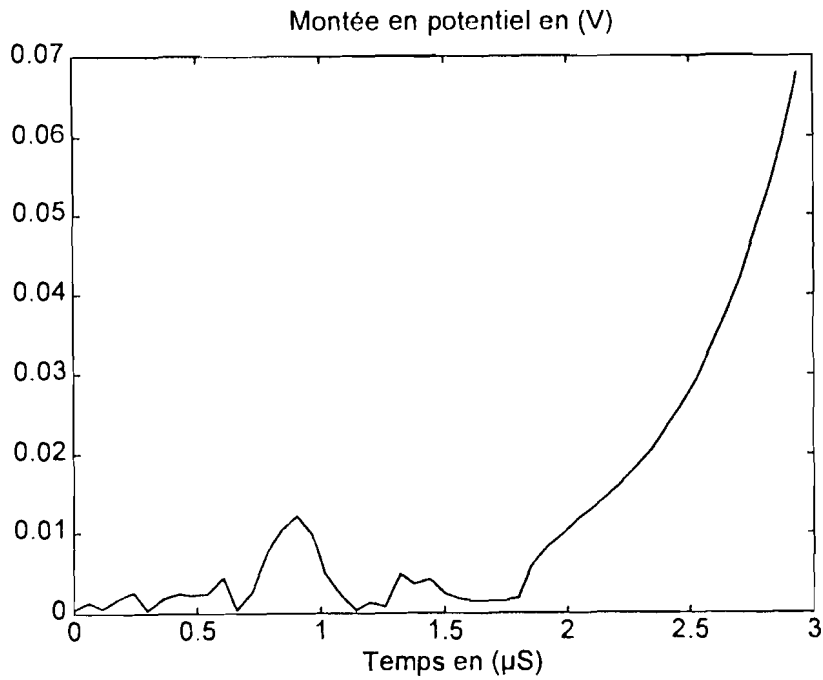


Figure III.18 : Evolution de la montée en potentiel aux bords pour $\rho = 100\Omega.m$ avec prise en compte du phénomène d'ionisation.

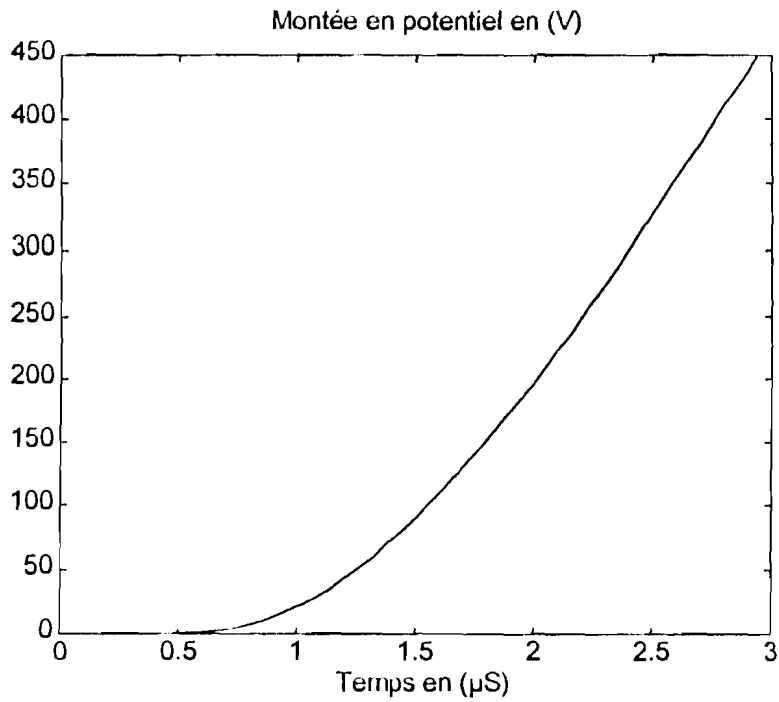


Figure III.19 : Evolution de la montée en potentiel aux bords pour $\rho = 500\Omega.m$ sans prise en compte du phénomène d'ionisation.

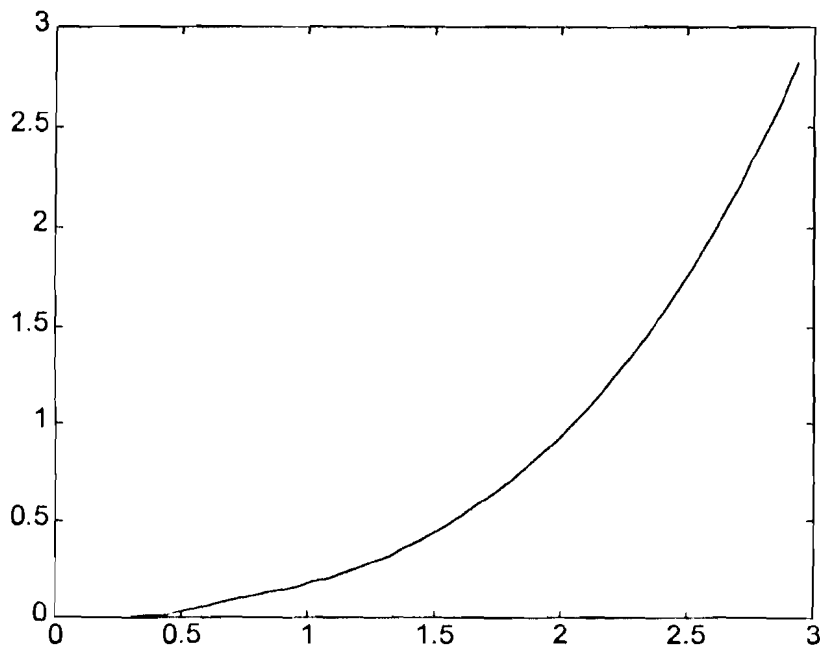


Figure III 20 : Evolution de la montée en potentiel aux bords pour $\rho = 500\Omega.m$ avec prise en compte du phénomène d'ionisation.

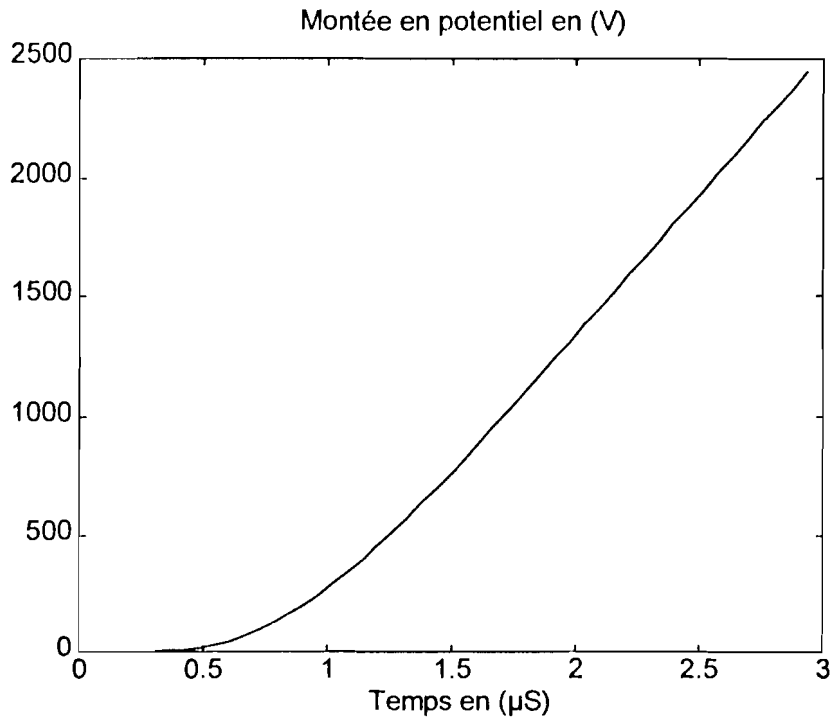


Figure III.21 : Evolution de la montée en potentiel aux bords pour $\rho = 1000 \Omega.m$ sans prise en compte du phénomène d'ionisation.

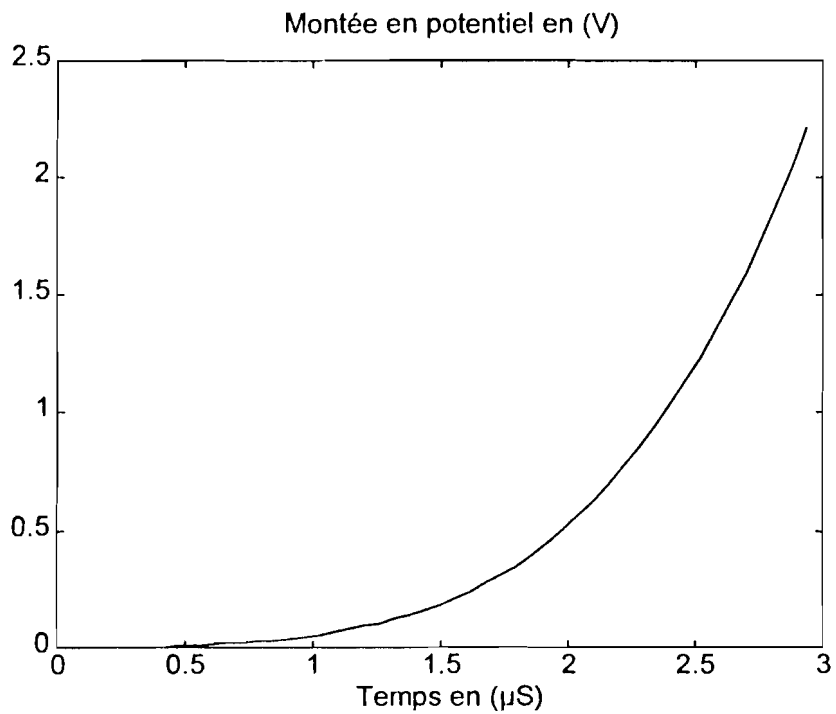


Figure III.22 : Evolution de la montée en potentiel aux bords pour $\rho = 1000 \Omega.m$ avec prise en compte du phénomène d'ionisation.

Longueur (m)	$\rho (\Omega.m)$							
	100		500		1000		2000	
	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
2	14	10	49	19	175	-	413	-
4	12.5	11	45	24	163	27	385	-
8	11	11	43	27	156	34	348	38

Tableau III.5 : Valeur approximative de DMA (m) en fonction de la longueur du piquet et de la résistivité du sol (légende : Avec - Sans - avec ou sans prise en compte de l'ionisation)

III.5. Conclusion

Les spécifications de l'OPT en matière de DMA dans le cas des prises de terre HTA raccordées à des éclateurs ou à des parafoudres ne sont exprimées qu'en terme de valeurs de résistivité de sol supposé homogène. Au moment de conclure ce chapitre, on est tenté de faire une comparaison entre les valeurs des DMA que nous avons trouvées et celles indiquées dans les spécifications en vigueur à l'OPT. Une telle comparaison est compliquée par la simplicité qui caractérise sa définition dans ces spécifications. En effet, en plus des résistivités des sol, nous avons pris en compte d'autres paramètres tels que la longueur de piquet et le phénomène d'ionisation. Mais malgré cette disparité de base d'appréciation, nous pouvons considérer comme longueur de piquet la valeur la plus utilisée à la SBEE, soit 2.2 mètres. Les résultats sont reportés dans le tableau III.6. Les valeurs sont proches pour les plus basses valeurs de résistivité de sol.

	Valeur de la résistivité du sol en $\Omega.m$						
	50	100	400	500	1000	1600	2000
Notice OPT	8	8	8	16	16	16	16
Simulation FLUX2D	5	10	14.5	19	-	-	-

Tableau III.6 : Valeurs des DMA à partir des notices OPT et des simulations FLUX2D.

CHAPITRE IV

ETUDE DE LA PRISE DE TERRE DANS UN MODELE DE SOL A DEUX COUCHES

IV.1. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons supposé que la terre était un milieu homogène. Cette hypothèse est loin de la réalité, car les sols homogènes se rencontrent très rarement. C'est pour mieux tenir compte de cette hétérogénéité que l'on a souvent recours à modèles de sol. Ces derniers permettent de déterminer quantitativement, la résistivité du sol à différentes profondeurs, en comparant la courbe expérimentale des variations de la résistivité apparente à un jeu d'abaques [101] obtenu par calcul et correspondant à certaines structures de sol bien précises qui sont généralement [19] :

- sol dont la résistivité varie en suivant une loi exponentielle;
- sol constitué d'une couche superficielle de résistivité uniforme ρ_1 et d'un sous-sol de résistivité uniforme ρ_2 ;
- sol constitué d'une couche superficielle de résistivité uniforme ρ_1 , d'une couche intermédiaire de résistivité uniforme ρ_2 et d'un sous-sol de résistivité ρ_3 .

Dans notre travail, nous nous limitons à la seconde catégorie de sol sachant bien que les résultats sont aisément extensibles aux autres cas.

L'utilisation du modèle à deux couches peut apporter un supplément de précision dans l'étude de la configuration que nous étudions (piquet de terre enfoui à une profondeur de 0.8 mètre). Dans la majorité des cas, aux environs de un mètre de profondeur, la résistivité du sol varie peu. Par ailleurs, dans les régions tropicales, il est établi que les décharges atmosphériques se produisent essentiellement en saison pluvieuse [1] , ce qui se confirme par les courbes d'activités céramique enregistrées par les services météorologiques de l'Association pour la Sécurité des Compagnies de Navigation Aérienne (ASECNA).

Au Bénin, les saisons pluvieuses alternent avec les saisons sèches de façon cyclique au cours de l'année. Donc, toute saison pluvieuse est toujours précédée d'une saison sèche. Pendant la courte période de transition de la saison sèche vers la saison pluvieuse, le sol garde encore son caractère fortement hétérogène (de type "bi-couche"). Les premières pluies, à cause de la forte capacité d'évaporation de l'atmosphère pendant

cette période de l'année et de la dessiccation prononcée de la couche superficielle du sol durant la saison sèche, n'arrivent pas à mouiller en profondeur la couche superficielle. Ceci se traduit par un prolongement du caractère de type à deux couches du sol. Il semble donc que cette période soit représentative du temps critique à prendre en compte dans la conception de système de prise de terre en régime transitoire. La détermination de la DMA dans ces conditions particulières, entre les prises de terre de la SBEE et celles de l'OPT, revêt un intérêt pratique certain. Ceci justifie que notre choix, dans les simulations qui sont faites dans ce chapitre, se soit porté de préférence aux cas de modèle de sol à deux couches présentant un sous-sol plus conducteur qu'à la surface.

Dans ce chapitre, nous faisons quelques rappels sur la modélisation des sols hétérogènes. Nous exposons ensuite les formules analytiques utiles dans la détermination de la propagation de la tension et du courant le long du piquet de terre. Nous terminons par quelques simulations.

IV.2. MODELE DE SOL A DEUX COUCHES.

Le modèle de sol à deux couches est généralement utilisé en régime statique pour représenter l'hétérogénéité du sol. La définition d'un modèle de sol à deux couches en régime transitoire peut s'appuyer sur les connaissances acquises en régime statique. Nous parlons plus loin des permittivités relatives de sol à considérer pour le modèle à deux couches. Les valeurs des résistivités des sols au niveau des deux couches restent de loin les paramètres les plus sensibles du modèle. En conséquence, un soin particulier doit être accordé à leur détermination. Nous donnons en annexe B une méthode développée par A. P. Méliopoulos [51] avec quelques détails utiles pour sa mise en oeuvre.

IV.2.1. Définition du modèle de sol à deux couches en régime transitoire

En régime transitoire, les phénomènes électromagnétiques sont décrits par trois paramètres caractérisant le milieu terre: la résistivité ρ , la permittivité ϵ et la perméabilité μ . Le modèle à deux couches en régime dynamique est schématisé par la figure IV.1.:

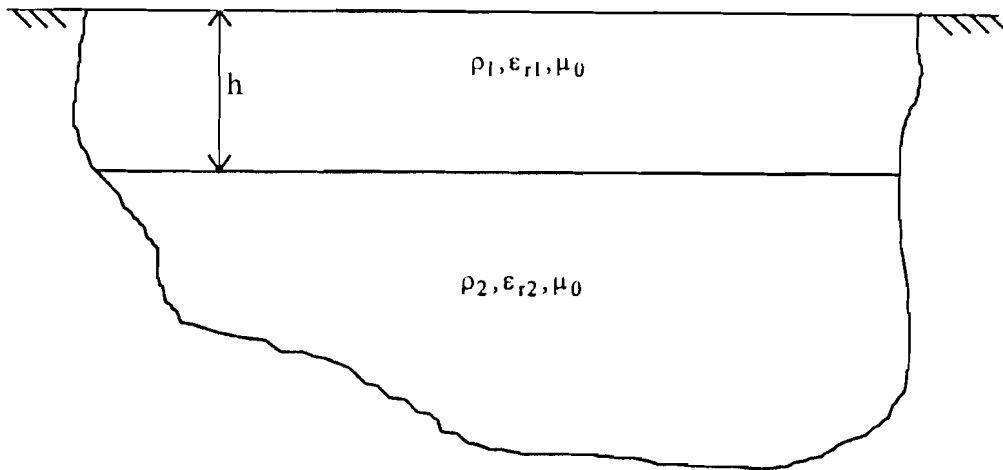


Figure IV.1. Modèle de sol à deux couches en régime dynamique.

Dans ce modèle, les seules paramètres qui restent indéfinis sont les permittivités des deux couches ϵ_{r1} et ϵ_{r2} . Les plus récents travaux en géophysique relatifs à la détermination des résistivités relatives du sol sont effectués par A. TABBAGH et al. [64]. Les méthodes utilisées sont encore très expérimentales et ne permettent pas leur utilisation aisée en électrotechnique comme c'est le cas par exemple de la méthode Wenner pour la mesure de résistivité de sol.

De nos simulations dans un milieu homogène, il est apparu que la permittivité relative du sol joue un certain rôle sur l'onde de foudre dans la phase de montée du courant. Nous avons aussi noté que, plus la valeur de la permittivité relative est faible, plus son effet capacitif sur la montée du potentiel est sensible, et plus grande est la vitesse de propagation de l'onde de foudre. C'est dans le but de confirmer ces constatations faites en milieu homogène, que nous avons voulu reprendre l'étude de l'influence de la permittivité du sol dans le modèle de sol à deux couches. Mais auparavant, nous allons définir le modèle du piquet de terre dans le modèle de sol à deux couches.

IV.2.2. Modélisation du piquet de terre dans le modèle de sol à deux couches.

Un piquet de terre enterré dans un sol comme celui de la figure IV.4. se comportera comme deux morceaux de lignes électriques à constantes réparties et branchées en série. Le système est donc vu comme deux lignes de transmission de longueurs ℓ_1 et ℓ_2 respectivement et dont la seconde est ouverte en extrémité.

Dans ce modèle :

- Z_1 et Z_2 représentent les impédances linéiques;
- G_1 et G_2 les perditances;
- C_1 et C_2 les capacités;

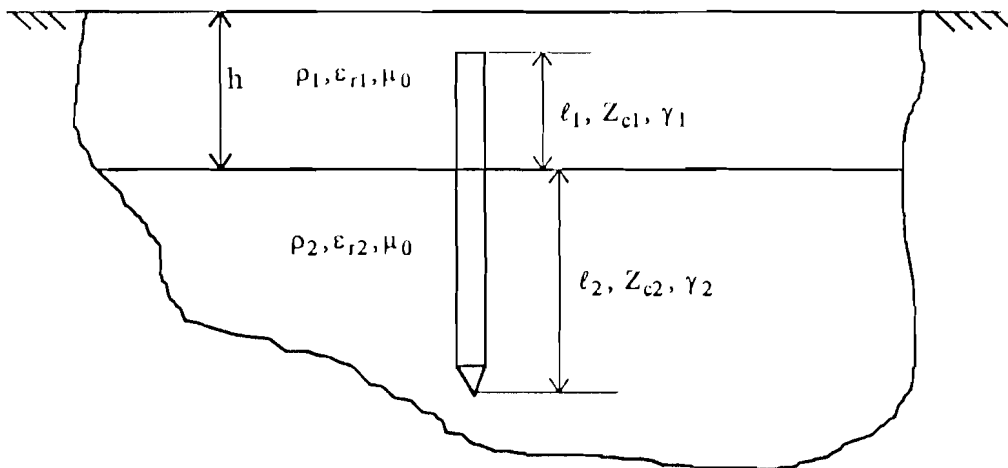


Figure IV.2. Modèle de piquet de terre dans un sol hétérogène

IV.3. ETABLISSEMENT DES EXPRESSIONS ANALYTIQUES DES ONDES DE TENSION ET DE COURANT.

L'étude de la propagation de l'onde de courant et de tension passe d'abord par l'établissement des expressions analytiques de calcul de la tension et du courant le long du piquet de terre. En effet, l'utilisation de la transformée inverse de Laplace [59] nécessite la connaissance de l'expression analytique de la fonction dont on veut

déterminer la loi d'évolution temporelle. C'est pourquoi, la présente section est destinée à l'établissement de ces expressions, en l'occurrence dans le cas du modèle de sol à deux couches.

En observant la figure IV.2., on peut imaginer que la prise de terre se présente comme deux tronçons de ligne branchés en série avec des caractéristiques indiquées dans la figure IV.3.

Selon cette dernière, la ligne se trouvant dans la couche supérieure du sol stratifié a pour constante de longueur d'onde γ_1 et pour impédance caractéristique Z_{c1} , et la seconde ligne située dans la seconde couche a pour constante de longueur d'onde γ_2 et pour impédance caractéristique Z_{c2} . On peut donc faire un schéma équivalent (figure IV.3.).

Ces deux tronçons de ligne peuvent être vus comme une seule ligne se trouvant dans la première couche de sol, et ayant a son bout, une charge d'impédance localisée Z (figure IV.4).

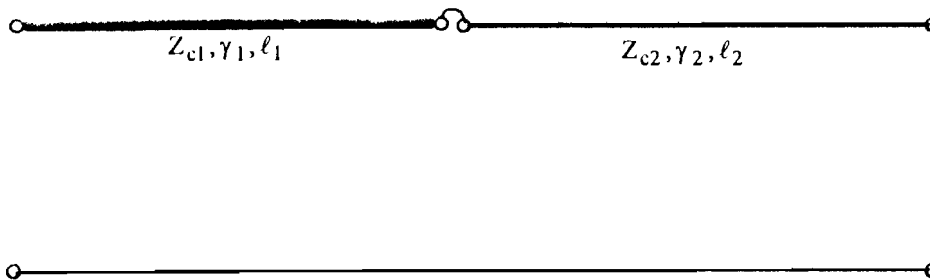


Figure IV.3 : Représentation du piquet de terre dans un modèle à deux couches.

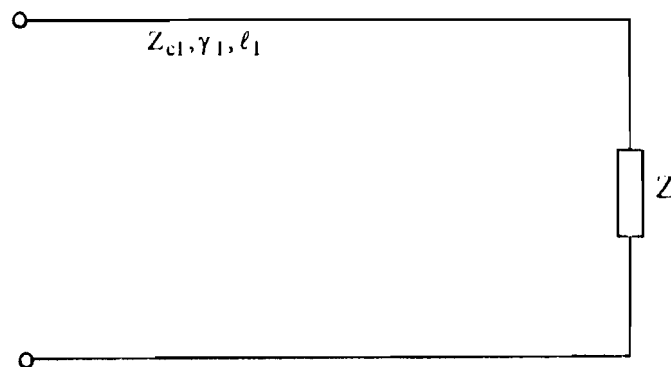


Figure IV.4 : Schéma équivalent.

A la sortie, l'impédance Z lie le courant et la tension par la relation :

$$Z = \frac{V_2(0, p)}{I_2(0, p)} = \frac{Z_{c2}}{\tanh(\gamma_2 \ell_2)} \quad (4.11)$$

Dans le cas d'une ligne fermée sur une impédance Z à son extrémité (figure IV.4), l'impédance d'entrée de la ligne est donnée par la relation :

$$Z_c = \frac{V_1(0, p)}{I_1(0, p)} = \frac{Z \cosh(\gamma_1 \ell_1) + Z_{c1} \sinh(\gamma_1 \ell_1)}{\frac{Z}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_1 \ell_1) + \cosh(\gamma_1 \ell_1)} \quad (4.12)$$

Dans la première partie de la ligne (figure IV.2.), la propagation de la tension et du courant peuvent s'exprimer, en tenant compte de la relation (4.12), par :

$$\begin{bmatrix} V(x, p) \\ I(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c \cosh(\gamma_1 x) & -Z_{c1} \sinh(\gamma_1 x) \\ -\frac{\sinh(\gamma_1 x)}{Z_{c1}} Z_c & \cosh(\gamma_1 x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(0, p) \\ I_1(0, p) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

avec $0 \leq x \leq \ell_1$.

Dans la seconde couche, la tension et le courant sont donnés par l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} V(x, p) \\ I(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 (x - \ell_1)) & -Z_{c2} \sinh(\gamma_2 (x - \ell_1)) \\ -\frac{\sinh(\gamma_2 (x - \ell_1))}{Z_{c2}} & \cosh(\gamma_2 (x - \ell_1)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_c \cosh(\gamma_1 \ell_1) & -Z_{c1} \sinh(\gamma_1 \ell_1) \\ -\frac{\sinh(\gamma_1 \ell_1)}{Z_{c1}} Z_c & \cosh(\gamma_1 \ell_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(0, p) \\ I_1(0, p) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

avec $\ell_1 < x \leq \ell_1 + \ell_2$.

Les deux équations matricielles (4.13) et (4.14) permettent de déterminer entièrement la variation du courant et de la tension le long de l'élément de conducteur de terre dans les deux couches.

IV.4. RESULTATS DE SIMULATIONS.

IV.4. 1 : Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant .

Cette étude consiste à déterminer la montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant pour différentes longueurs de piquets de terre. Dans ces simulations, sauf indication contraire, l'onde de foudre est de type 1.2/50, d'amplitude 1.0 kA. La permittivité relative du sol est égale à 10. L'effet de l'ionisation du sol n'est pas prise en compte. Dans cette partie, nous cherchons à étudier l'influence de la longueur du piquet de terre sur la montée en potentiel.

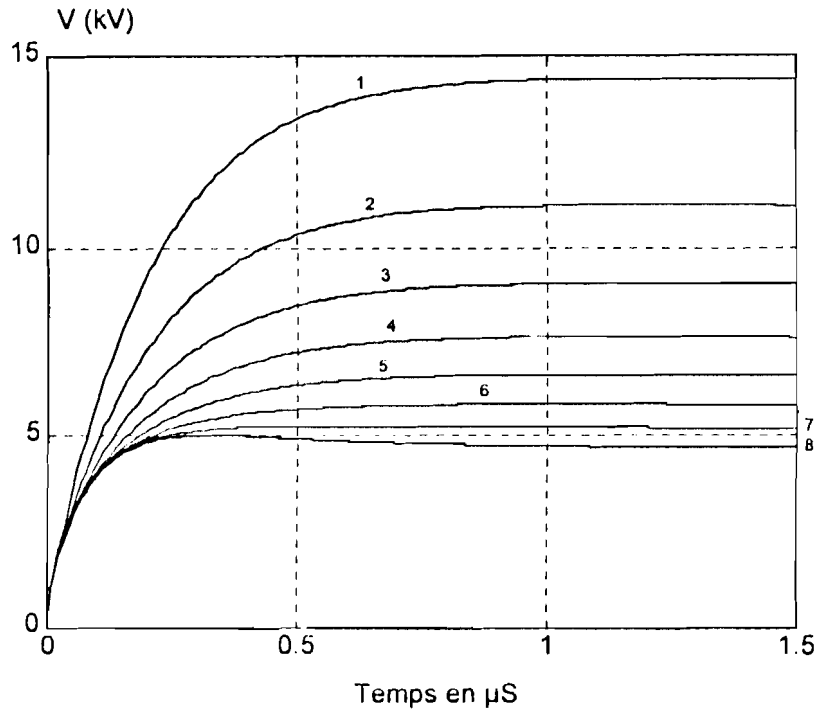
Dans les figures IV.5 à IV.8.bis, l'identification des courbes est donnée dans le tableau IV.1. et conformément aux anotations de la figure IV.4. I. Les courbes type x.bis sont les agrandissements de la courbe x ; elles ont été jugées nécessaires pour des problèmes d'échelle.

N° de la courbe	1	2	3	4	5	6	7	8
Longueur du piquet (m)	2	4	6	8	10	12	14	16

Tableau IV.1. : Identification des courbes des figures IV.5. à IV.8.bis

De l'analyse de ces courbes, il apparaît que :

- plus le piquet est court, plus la forme de l'onde de la montée en potentiel tend à suivre celle de l'onde du courant sans grande déformation ; inversement, plus le piquet est long, plus l'atténuation et la déformation sont prononcées ;
- lorsque le coefficient de réflexion $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ est positif, la diminution de la montée en potentiel transitoire avec l'augmentation de la longueur du piquet est plus régulière que dans le cas d'un coefficient de réflexion négatif ;
- la montée en potentiel transitoire est plus importante lorsque le coefficient de réflexion est négatif, lorsqu'on fait la comparaison entre deux modèles de sol ayant des valeurs absolues de coefficient de réflexion égales mais de signes opposés ;



:

Figure IV.5. Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

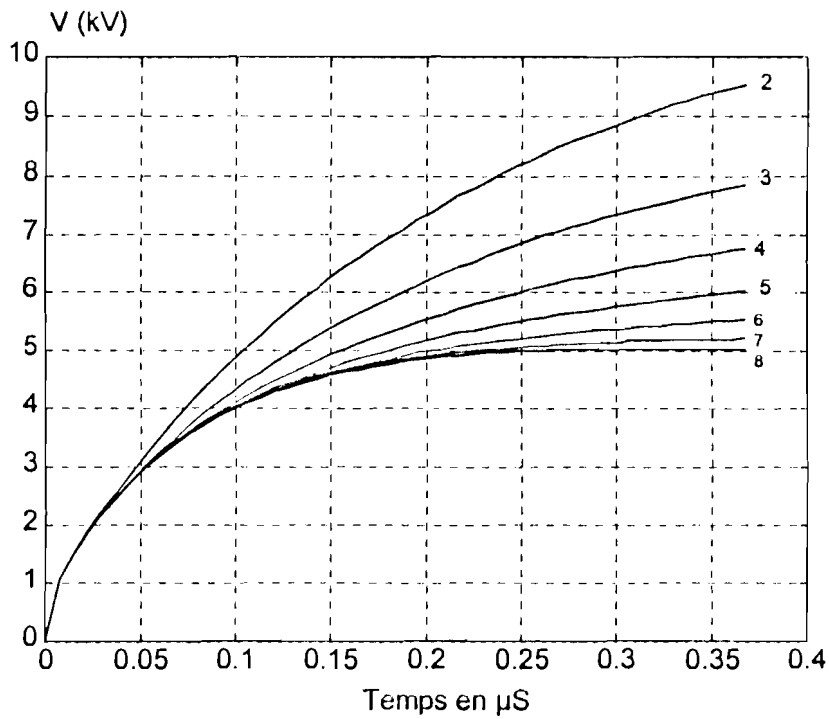


Figure IV.5.bis. Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

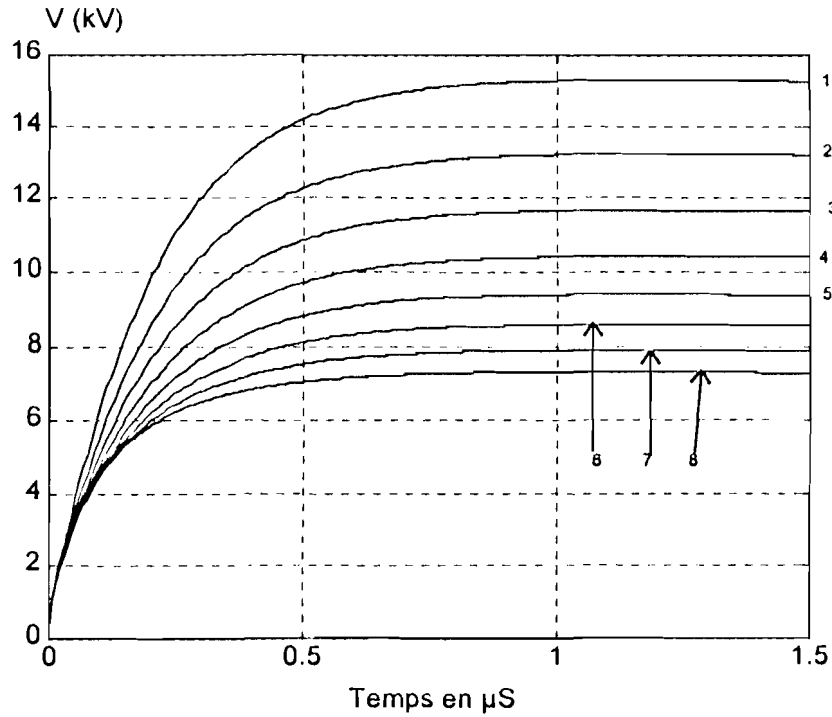


Figure IV.6. Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

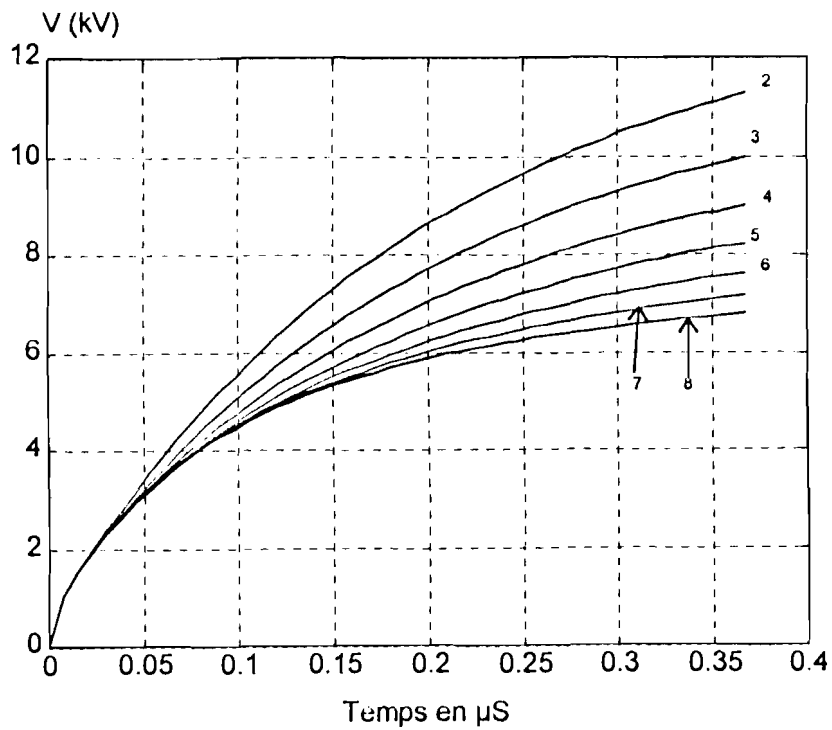


Figure IV.6.bis Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

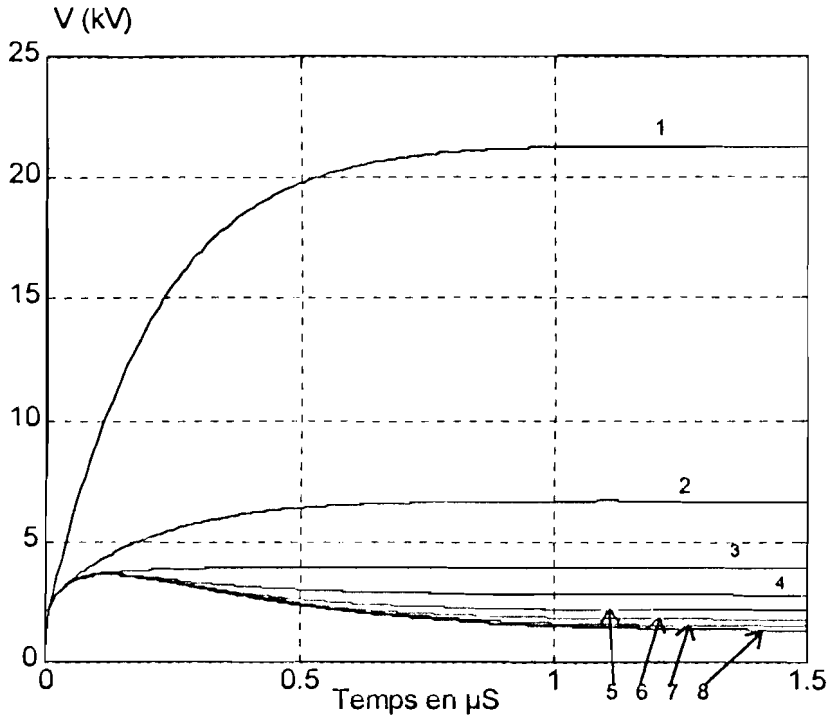


Figure IV.7. Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 100 \Omega.m$.

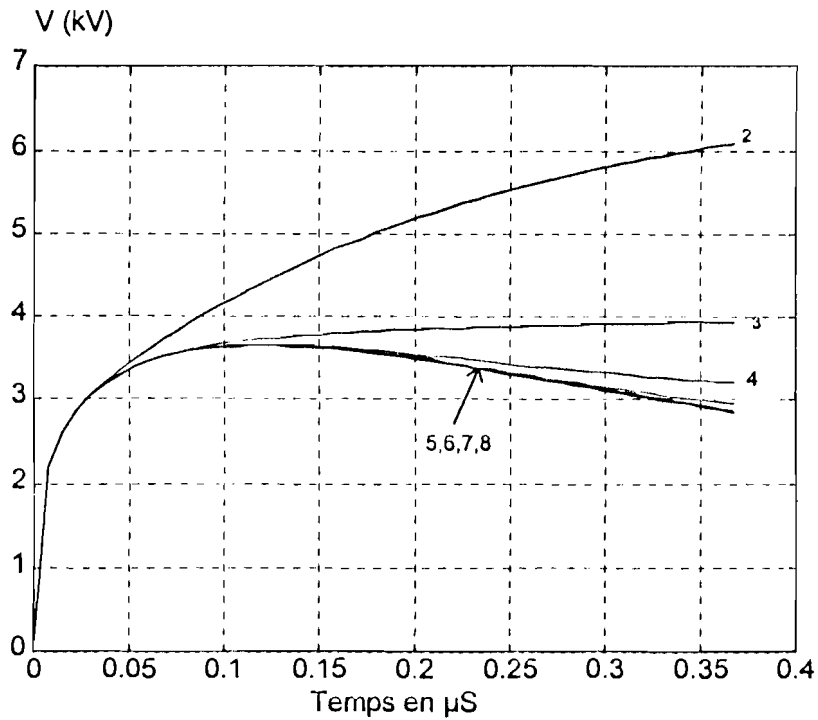


Figure IV.7.bis Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 100 \Omega.m$.

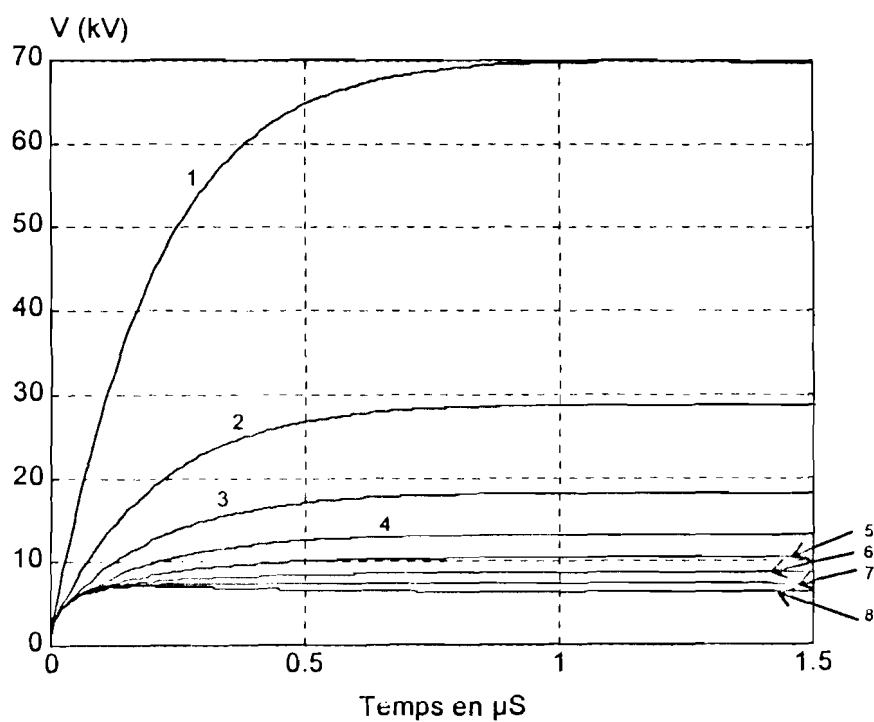


Figure IV.8. Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

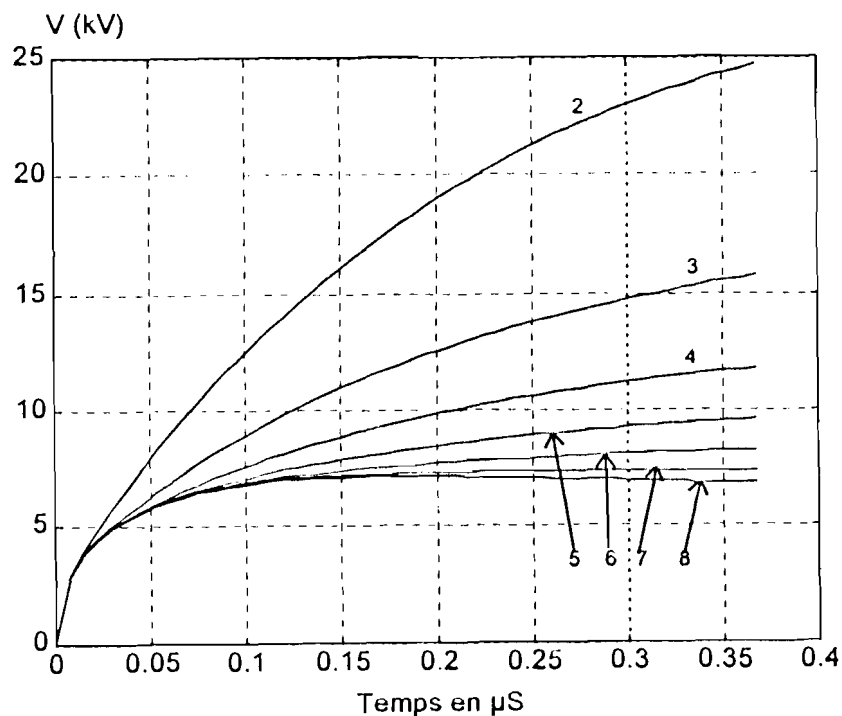


Figure IV.8.bis Montée en potentiel transitoire au point d'injection du courant avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

IV.4.2. Influence de la longueur du piquet sur la montée en potentiel transitoire $V(x,t)$ le long du piquet.

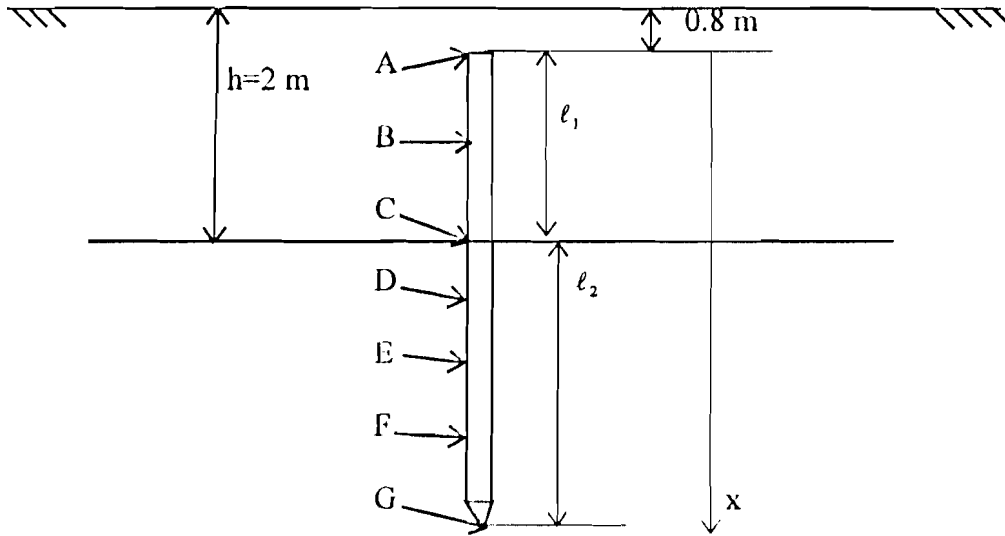


Figure IV.9. Positionnement des points de simulations sur le piquet de terre.

Point	A	B	C	D	E	F	G
Abcisse	0	$\frac{l_1}{2}$	l_1	$l_1 + \frac{l_2}{4}$	$l_1 + \frac{l_2}{2}$	$l_1 + \frac{3l_2}{4}$	$l_1 + l_2$

Tableau IV. 2. Coordonnées des points de simulation sur le piquet.

Dans cette partie on cherche à trouver l'évolution dans le temps des montées de potentiel au niveau des échantillons de points régulièrement choisis A, B, C, D, E, F et G (cf. figure IV.9 et le tableau IV.2) le long du piquet. Le point A désigne le début du piquet, le point G la fin et le point C l'interface entre les deux couches du modèle de sol à deux couches..

La figure IV.10. donne l'allure de la montée en potentiel en différents points le long du piquet de terre avec des résistivités $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$. D'autres simulations avec la même longueur de piquet de terre donnent une répartition de potentiel ayant la

même allure de courbes que celles de la figure IV.10. C'est pourquoi, nous ne reprenons pas ces courbes, mais donnons les résultats dans le tableau IV.3 en termes d'amplitude maximale de la montée en potentiel V_{max} et de la durée jusqu'à la crête T_h .

On voit dans cette figure qu'à cause de la faiblesse de la longueur du piquet, le front de l'onde n'a pas eu le temps de se développer complètement avant d'être soumis aux réflexions sur l'interface entre les deux couches et à l'autre bout du piquet. La différence de potentiel entre le début et la fin du piquet reste négligeable.

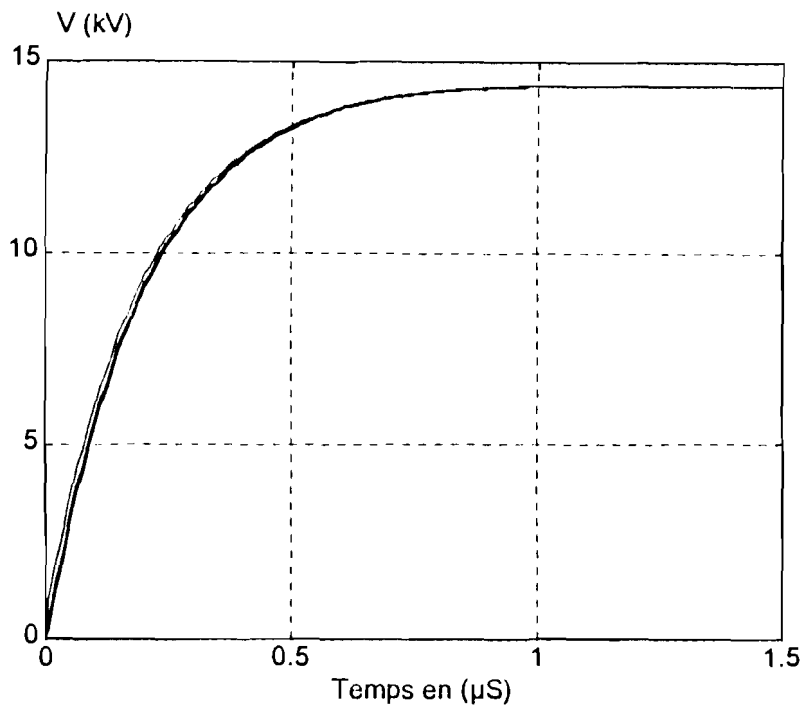


Figure IV.10. : Répartition de la montée en potentiel sur le piquet de terre pour un piquet de longueur égale à deux mètres.

ρ_1 ($\Omega.m$)	ρ_2 ($\Omega.m$)	V_{max} (kV)	T_h (μS)
100	500	14	1
100	1000	15.5	1
1000	100	22	1
1000	500	70	1

Tableau IV.3. : Valeurs maximales de montée en potentiel pour une longueur de piquet égale à 2 mètres.

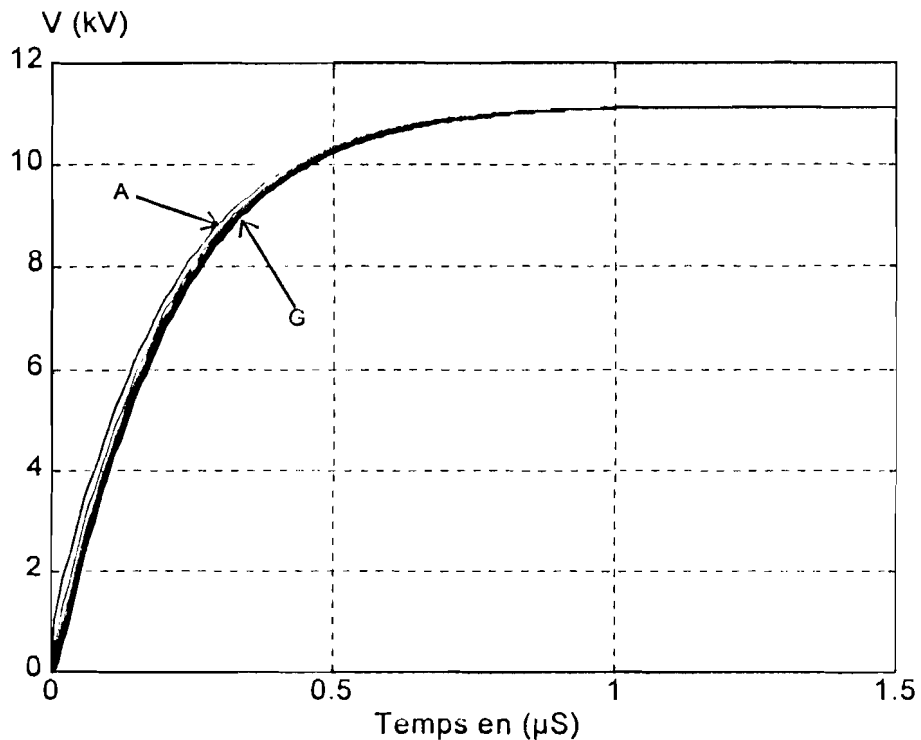


Figure IV.11. : Répartition de la montée en potentiel sur le piquet de terre pour un piquet de longueur égale à quatre mètres avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

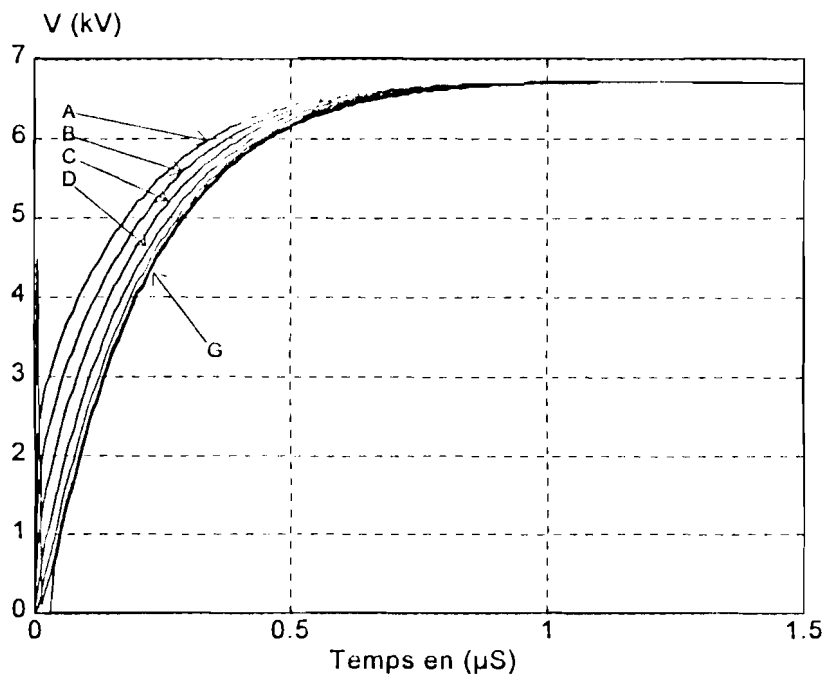


Figure IV.12. : Répartition de la montée en potentiel sur le piquet de terre pour un piquet de longueur égale à quatre mètres avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 100 \Omega.m$.

Si pour les piquets ayant deux mètres de longueur les variations de montée en potentiel sont faibles le long du piquet, il n'en est pas toujours ainsi lorsque la longueur du piquet augmente. Ainsi, l'on peut déjà observer dans la figure IV.12. que pour un piquet de 4 mètres, entre 0 à 0.5 μS , une différence sensible entre la montée en potentiel à l'entrée du piquet (point A) et à l'autre bout (point G).

En comparant les figures IV.11 et IV.12, on voit qu'elles présentent par rapport aux deux précédentes figures des différences dans la zone des temps faibles. La figure IV.12 en particulier, présente vers les temps voisins de zéro une montée plus rapide. Dans cette zone, la différence de montée en potentiel entre l'entrée et la sortie du piquet est importante de près de 30%.

Les figures IV.13 et IV.14. représentent l'évolution dans le temps des montées en potentiel transitoire sur un piquet de huit mètres de long avec respectivement $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$ pour la première figure et $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 100 \Omega.m$ pour la seconde. La première figure présente une montée en potentiel plus importante et régulièrement répartie le long du piquet tandis que la montée en potentiel dans la seconde figure est nettement plus faible mais avec une répartition très irrégulière le long du piquet.

Il semble que la répartition de la montée en potentiel est presque homogène dans le cas où la résistivité du sol est élevée, mais avec pour conséquence une valeur plus élevée de l'impédance d'entrée, donc une montée en potentiel transitoire plus importante.

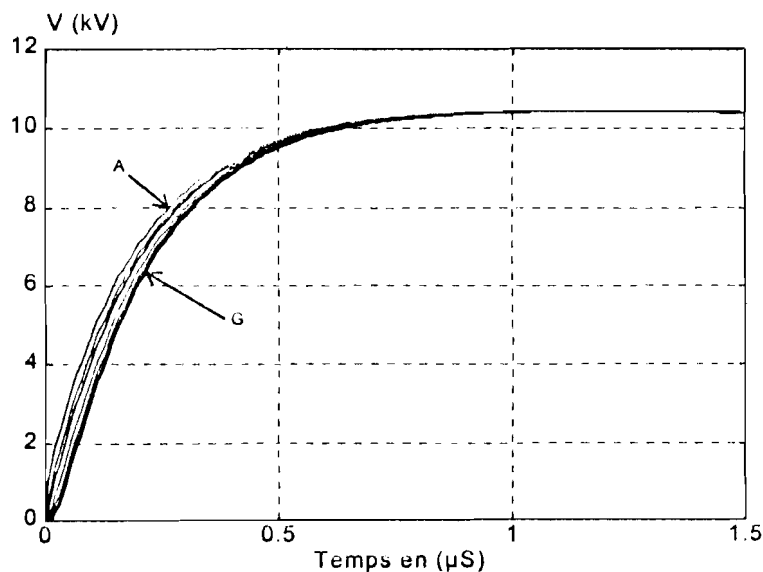


Figure IV.13. : Répartition de la montée en potentiel sur le piquet de terre pour un piquet de longueur égale à huit mètres avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

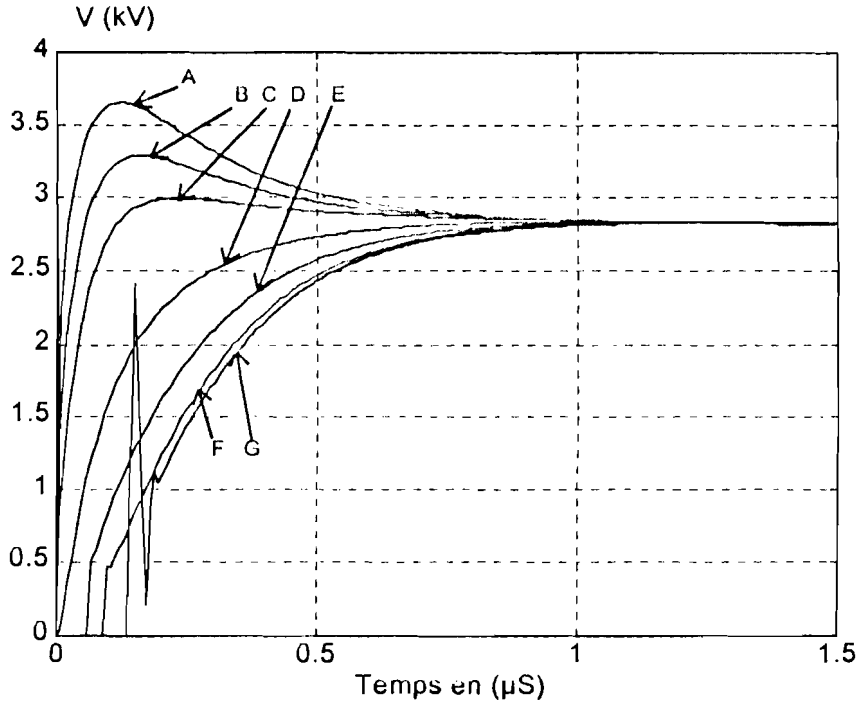


Figure IV.14. : Répartition de la montée en potentiel sur le piquet de terre pour un piquet de longueur égale à huit mètres avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 100 \Omega.m$.

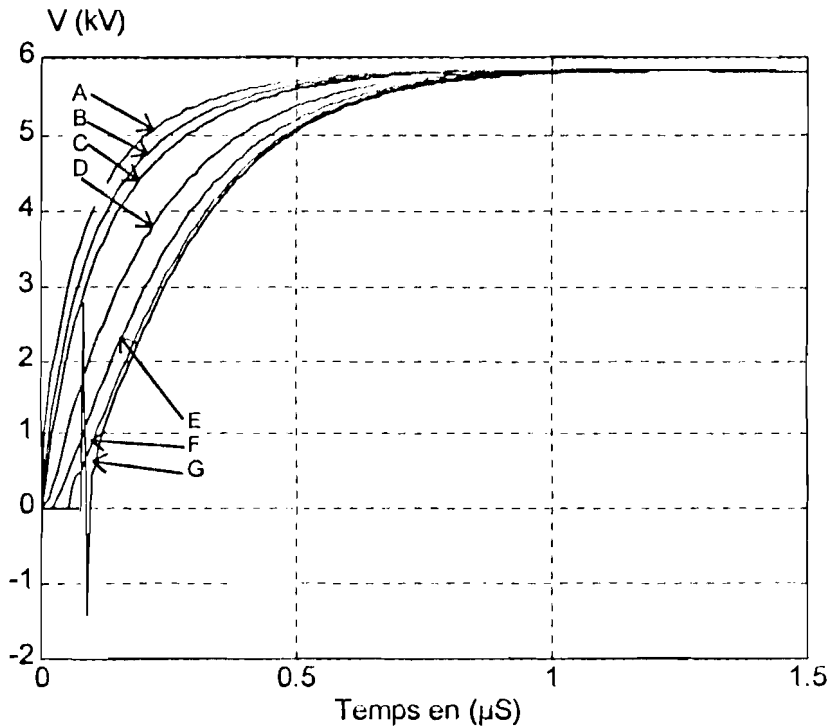


Figure IV.15 : Répartition de la montée en potentiel sur un piquet de longueur égale à 12 mètres avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

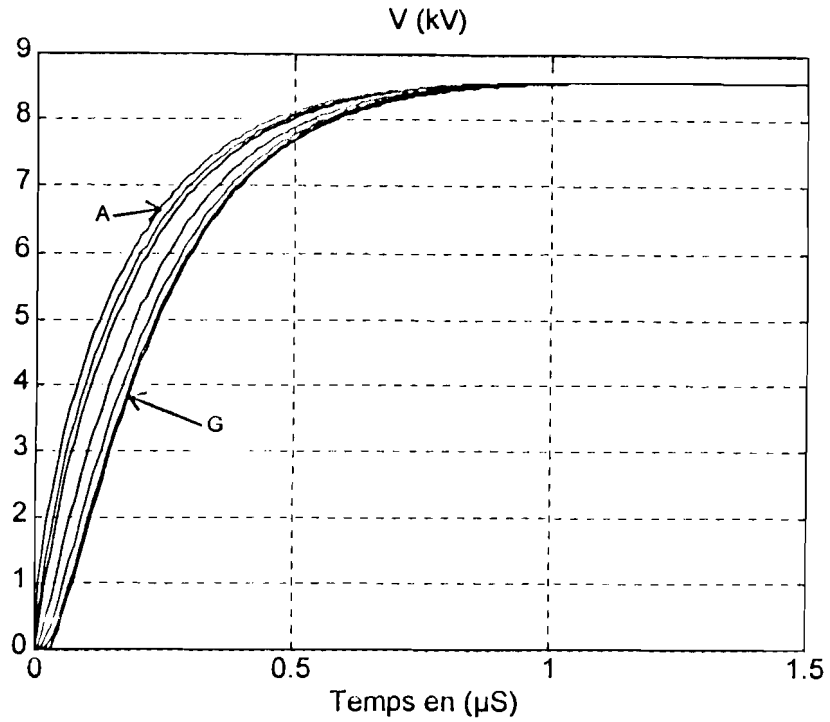


Figure IV.16 : Répartition de la montée en potentiel sur un piquet de longueur égale à 12 mètres avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

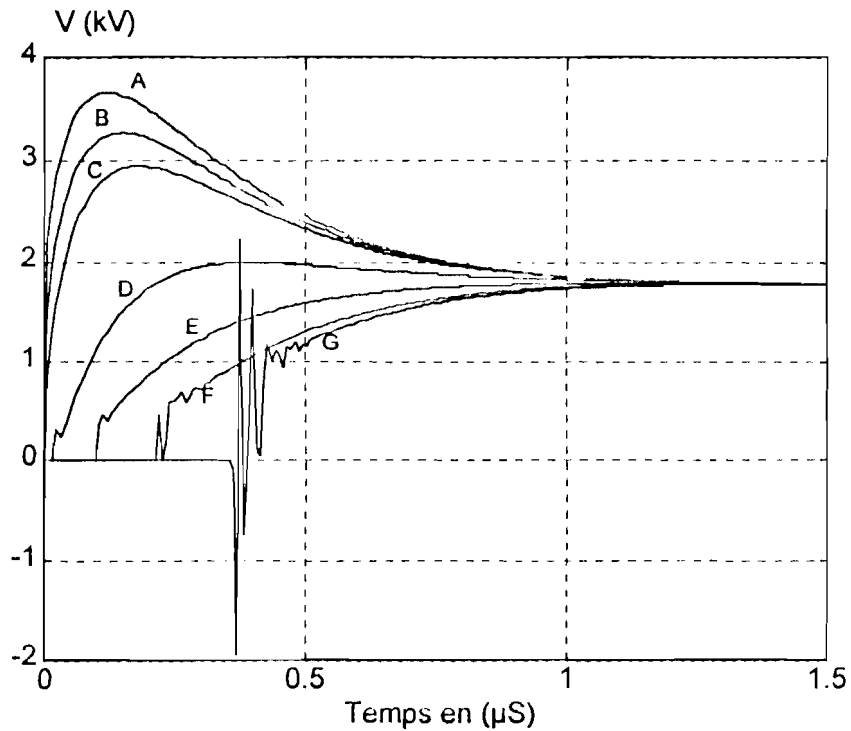


Figure IV.17. Répartition de la montée en potentiel transitoire sur un piquet de longueur 12 mètres avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

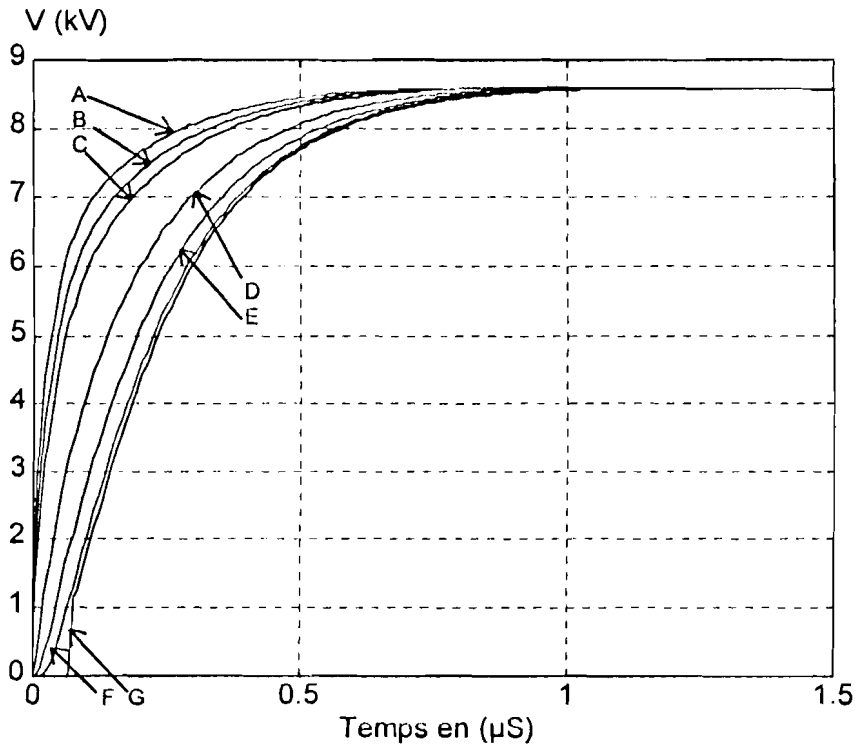


Figure IV.18 : Répartition de la montée en potentiel transitoire sur un piquet de longueur égale à 12 mètres avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

Les figures IV.16 et IV.17 ont la même valeur absolue de coefficient de réflexion. On voit bien que la montée en potentiel transitoire est plus importante (presque le double) dans le cas du coefficient de réflexion positif, c'est à dire le cas où la seconde couche est moins conductrice.

Dans la figure IV.17, il apparaît des oscillations de très grandes amplitudes (les plus fortes ont été supprimées après des vérifications que nous explicitons plus loin) surtout à des temps voisins de zéro. On remarque que ces oscillations deviennent plus importantes au fur et à mesure que l'on s'approche de la fin du piquet. Ce phénomène est accentué pour des piquets longs, disons à partir de la dizaine de mètres. Après avoir calculé la vitesse de propagation qui est de l'ordre de 0.9810^8 m/s, on se rend compte qu'il faut $0.12 \mu\text{S}$ pour que l'onde traverse un piquet de 12 mètres de long ; nos pas de calcul étant pris égaux à $0.0075 \mu\text{S}$, on s'est retrouvé à calculer des grandeurs qui physiquement devraient être nulles. C'est un détail qu'il faut avoir présent à l'esprit puisque sa non prise en compte peut entraîner des résultats de simulations erronés dans le calcul par éléments finis.

IV.4.3. Etude de l'évolution du courant.

Sont tracées dans les figure IV.19., figure IV.20. et figure IV.21, l'évolution de l'onde de courant le long du piquet de terre.

Le premier groupe de courbes (Fig. IV.19.a à Fig. IV.19.d) donne l'évolution du courant en fonction du temps pour des valeurs données de x. La longueur du piquet est égale à 2.2 mètres, cette longueur est choisie en fonction des usages techniques à la SBEE. La profondeur d'enfouissement est de 0.8 mètre et la hauteur de la première couche égale à 2 mètres. Les identifications de ces courbes sont résumées dans les tableaux IV.4 et IV.5.

Titre de la figure	$\rho_1 (\Omega.m)$	$\rho_2 (\Omega.m)$	k
Fig. IV.19.a	100	1900	0.9
Fig. IV.19.b	1900	100	-0.9
Fig. IV.19.c	100	300	0.5
Fig. IV.19.d	300	100	-0.5
Fig. IV.20.a	100	1900	0.9
Fig. IV.20.b	1900	100	-0.9
Fig. IV.20.c	100	300	0.5
Fig. IV.20.d	300	100	-0.5
Fig. IV.21.a	100	1900	0.9
Fig. IV.21.b	1900	100	-0.9
Fig. IV.21.c	100	300	0.5
Fig. IV.21.d	300	100	-0.5

Tableau IV.4 : Identification des résistivités des figures IV.21 à IV.23.

N° de la courbe	Correspondance dans la 1ère couche	Correspondance dans la 2ème couche
1	0	l_1
2	$\frac{l_1}{4}$	$l_1 + \frac{l_2}{5}$
3	$\frac{2l_1}{4}$	$l_1 + \frac{2l_2}{5}$
4	$\frac{3l_1}{4}$	$l_1 + \frac{3l_2}{5}$
5	l_1	$l_1 + \frac{4l_2}{5}$

Tableau IV.5 : Identification des positions sur le piquet des figures IV.21 à IV.23

Pour mettre en évidence comment se répartit le courant dans chacune des deux couches du modèle de sol, nous reprenons dans les figure IV.20 et IV.21. les courbes de répartition du courant axial.

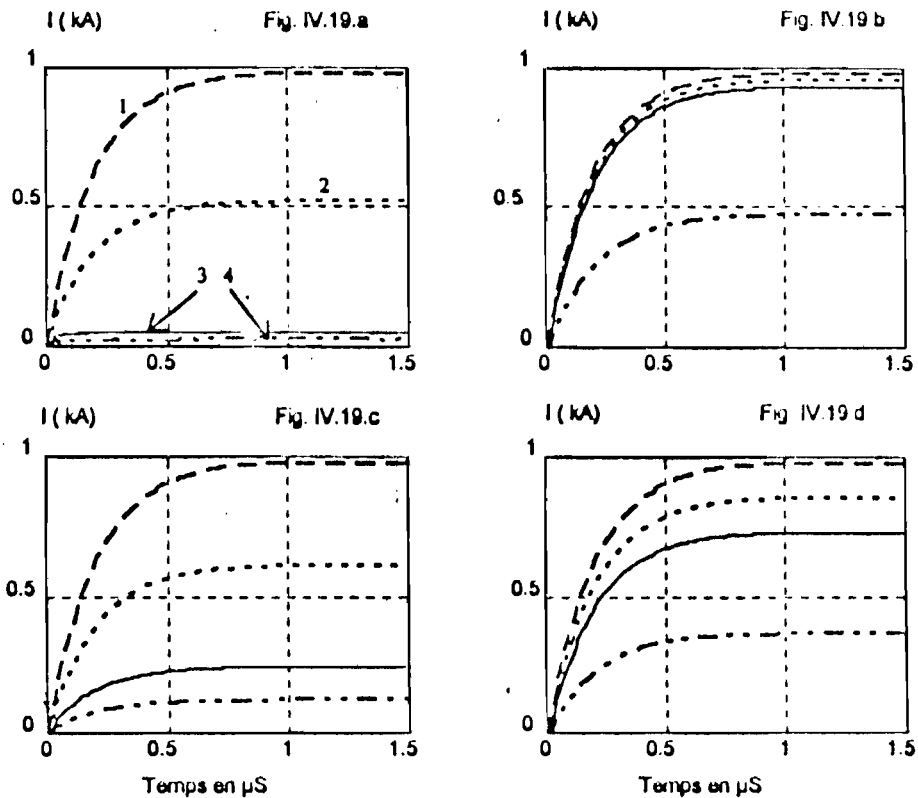


Figure IV.19. Courbes d'évolution du courant dans les deux couches du modèle de terre.

La figure IV.20 correspond à la partie du piquet de terre qui se trouve dans la première couche du modèle de terre tandis que la figure IV.21. correspond à la seconde couche , c'est à dire la partie du piquet de terre se trouvant dans cette partie.

L'observation de ces deux figures permet de constater que la composante radiale du courant dans toutes ces figures se répartit de façon quasi homogène le long du piquet de terre. Cette propriété est prise en compte dans l'étude de l'ionisation du sol.

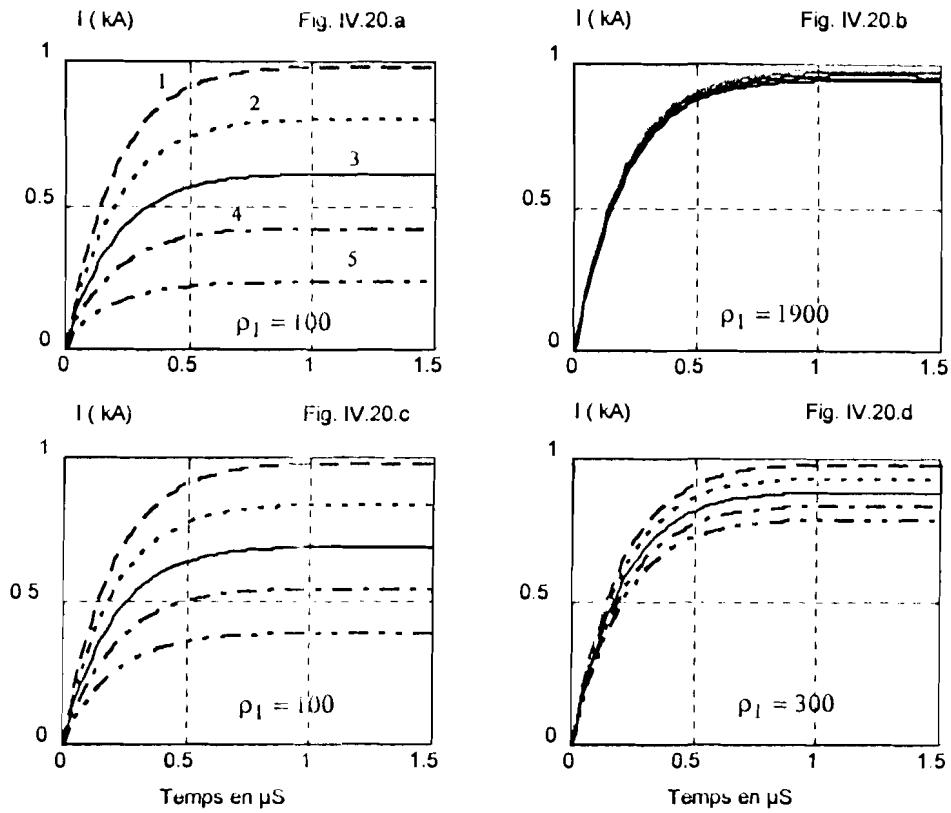


Figure IV.20. Courbes d'évolution du courant dans la première couche.

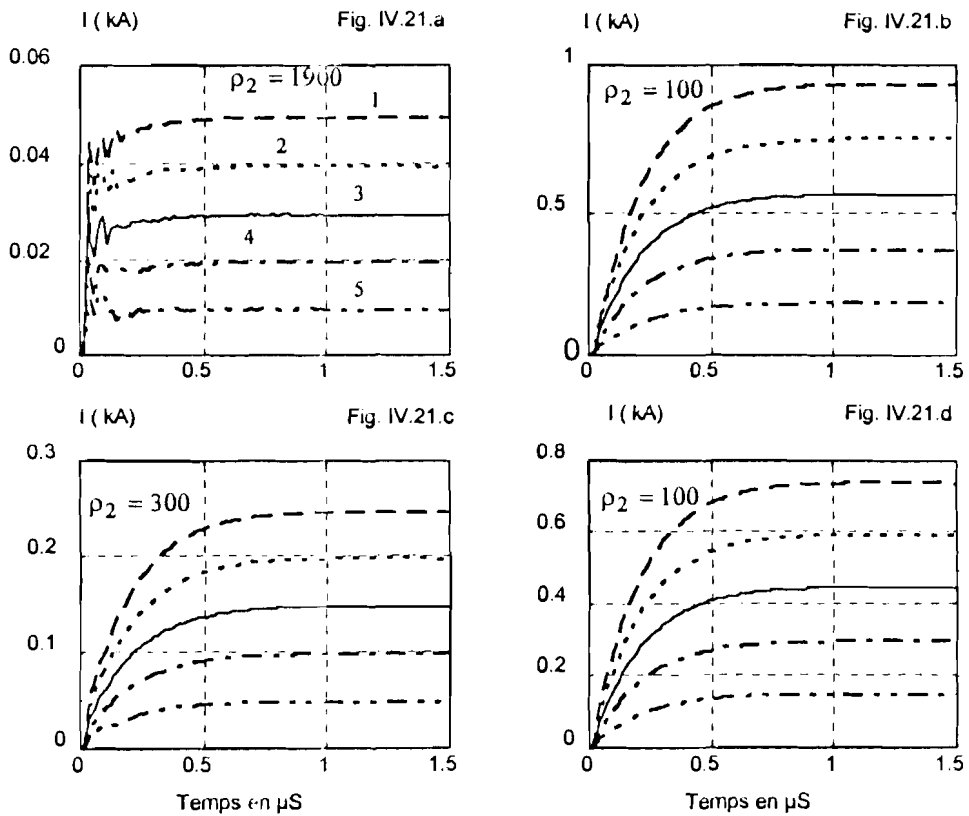


Figure IV.21. Courbes d'évolution du courant dans la seconde couche.

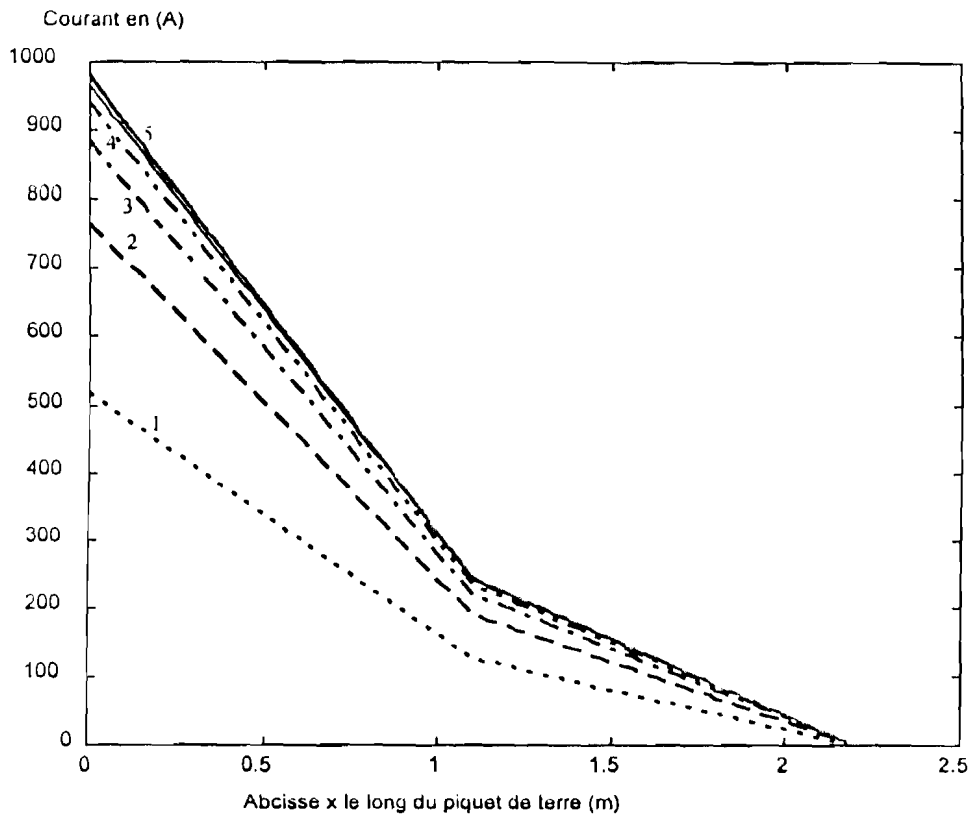


Figure IV.22 : Evolution du courant axial en fonction de x pour des temps fixés.

N° de la courbe	1	2	3	4	5
t(μS)	0.15	0.3	0.45	0.6	1.5

Tableau IV.6: Numérotation des courbes de la figure IV.22 en fonction du temps d'observation.

La figure IV.22 donne l'évolution du courant en fonction de x pour des valeurs données de temps selon le tableau IV.6. En se rapportant à la figure IV.4., $\ell_1 = \ell_2 = 1.1$ mètre, avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 300 \Omega.m$. La profondeur d'enfouissement est de 0.8 mètre et donc la hauteur de la première couche est égale à 1,9 mètres. On peut remarquer que dans chacune des deux couches, et pour un temps donné, la dérivée par rapport à x de $i(x,1)_{t=c1c}$ est pratiquement constante. Cette dérivée est légèrement variable aux premiers instants du front montant de l'onde et devient quasiment constante après.

IV.4.4. Influence de la permittivité du sol sur la montée de potentiel au point d'injection du courant.

Dans la définition du modèle de sol à deux couches, on avait vu au paragraphe IV.1.3. que le sol en régime transitoire se caractérise par sa résistivité, sa perméabilité et sa permittivité. L'une des méthodes couramment utilisée dans la pratique pour déterminer les résistivités équivalentes des deux couches de sol représentant le modèle de sol est donnée en annexe. La perméabilité étant celle du vide, elle est donc connue pour les deux couches. Quant à la permittivité relative, il reste à trouver la valeur correspondante de permittivité pour chacune des deux couches.

Dans la littérature, on remarque que différentes valeurs de permittivité de sol sont adoptées notamment dans [49], [20], [15], [10], [9]. Mais de plus en plus, des valeurs de permittivité égales à 9 ou à 10 semblent être admises quelle que soit la valeur de la résistivité du sol. De par nos études (dans les chapitres précédents) dans le cas de sol homogène, nous avons vu que plus la valeur de la permittivité du sol est faible plus la montée de potentiel est élevée. La présente section reprend la même étude pour un modèle de sol à deux couches.

Pour ce faire, nous avons pris des combinaisons de valeurs extrêmes de permittivité de sol selon le tableau IV.7 :

n° de combinaison	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}
1	4	80
2	80	4
3	4	4
4	80	80
5	10	10

Tableau IV.7. Combinaison des valeurs des permittivités relatives de sol pour respectivement la première et de la deuxième couche du modèle de sol.

A l'observation de la figure IV.23, trois groupes de courbes apparaissent:

- La combinaison (selon le tableau IV.7) des numéros 1 et 2 donne les courbes du milieu (n° 2) dans Fig.25.a.
- La combinaison des numéros 3 et 5 (selon le tableau IV.7), donnent les courbes n° 3 correspondant aux plus fortes valeurs ;
- Enfin, la combinaison numéro 4 (selon le tableau IV.7) correspondant aux plus basses valeurs de montée de potentiel.

Quelles que soient les combinaisons choisies, on peut remarquer que, globalement, les différences entre les valeurs extrêmes et les valeurs les plus basses ne sont pas grandes. Il serait alors indiqué de chercher à faire les simulations avec les valeurs extrêmes parce qu'elles donneraient aux simulations basées sur ce choix un caractère sécuritaire lors du dimensionnement. Sur cette base, et dans tout le reste de notre étude, nous travaillerons avec des valeurs de résistivité de sol correspondant à la combinaison numéro 5 du tableau IV.7.

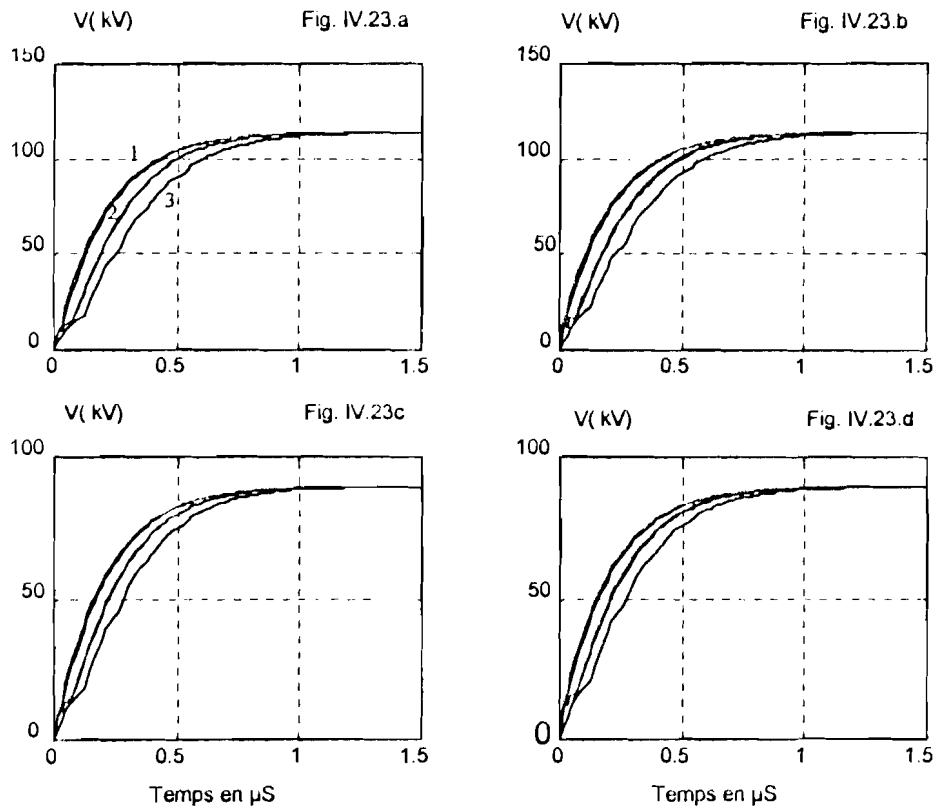


Figure IV.23 : Montée de potentiel pour différentes valeurs de la permittivité du sol.

IV.4. : ETUDE DE LA DISTANCE MINIMALE D'APPROCHE

Comme dans le milieu homogène, nous abordons dans cette partie l'étude de la Distance Minimale d'Approche (DMA) dans le cas de modèles de sol à deux couches. Cette étude se fait par la mise en évidence de l'influence de trois principaux paramètres : les résistivités des deux couches, la longueur du piquet de terre et son enfouissement dans le sol. Dans cette section, nous ne prenons pas en compte le phénomène d'ionisation du sol. L'influence des résistivités des deux couches du modèle de sol sera étudiée à travers les deux autres paramètres, les couples de valeurs des résistivités de sol étant pris tel que nous l'avons indiqué précédemment.

IV.4.1.. Influence de la longueur du piquet

Pour connaître l'influence que la longueur du piquet de terre peut avoir sur la répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol, des simulations sont faites avec différentes longueurs de piquets de terre. La profondeur d'enfouissement du piquet est de 0.8 metre. Les résultats de ces simulations sont portés dans les figures IV.26 à IV.28.bis. Dans ces courbes la correspondance des courbes aux numéros de figure est donnée dans le tableau IV.8.

N° de la courbe	1	2	3	4
Longueur du piquet (m)	2	4	6	8

Tableau IV.8: Identification des courbes des figures IV.24 à IV.26.bis.

Une analyse des courbes des figures IV.26 à IV.28.bis permet de dire :

- lorsque la seconde couche a une valeur de résistivité plus grande que celle de la première, l'augmentation de la longueur du piquet de terre entraîne une augmentation de la DMA et vice versa ;
- lorsque la seconde couche est moins conductrice que la première, une augmentation de la longueur du piquet permet de diminuer la montée de potentiel de pas transitoire ;
- malgré les fortes valeurs de résistivités de sol qui interviennent dans le modèle de terre (jusqu'à 1000 $\Omega.m$ dans l'une des couches), les valeurs des DMA sont restées faibles par rapport à ce qu'elles sont en milieu homogène ; une explication pourrait être que ceci est dû à la baisse de la montée en potentiel consécutive aux effets de réflexion combinée au fort niveau de courant de fuite dans le sol.

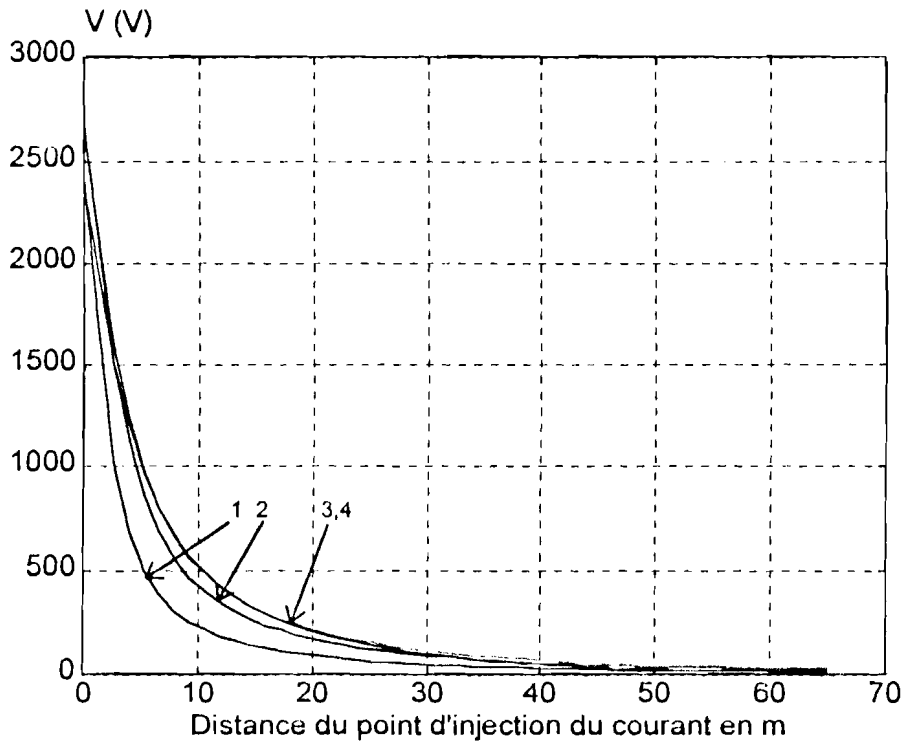


Figure IV.24. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

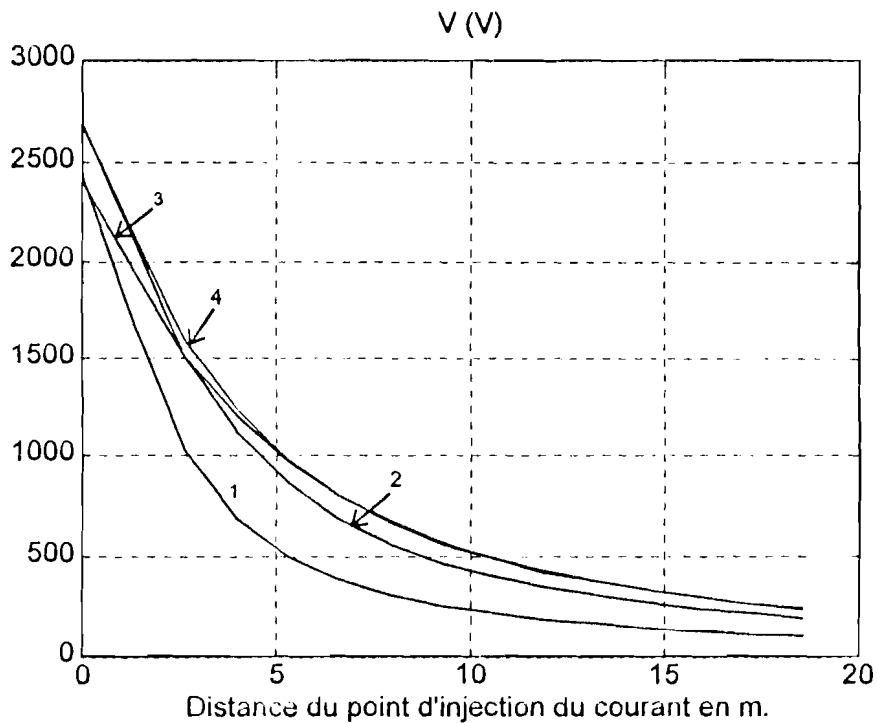


Figure IV.24.bis. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

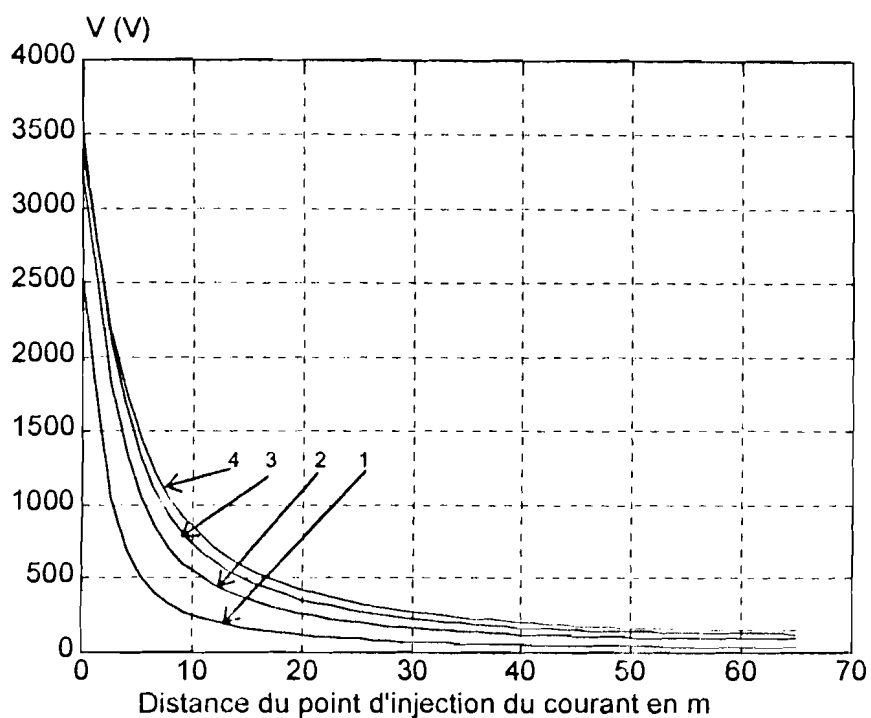


Figure IV.25. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

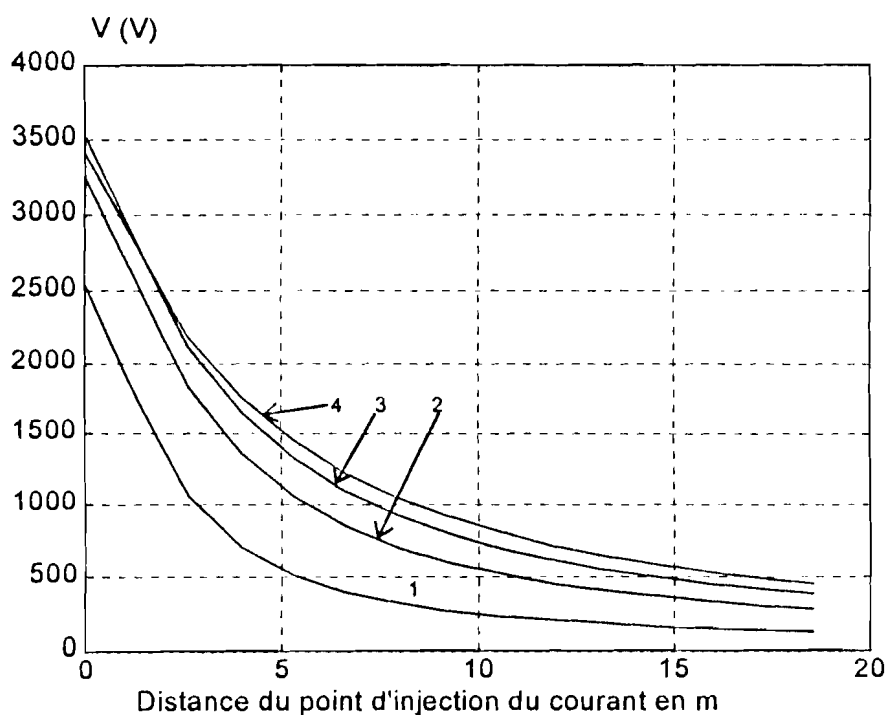


Figure IV.25.bis. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.



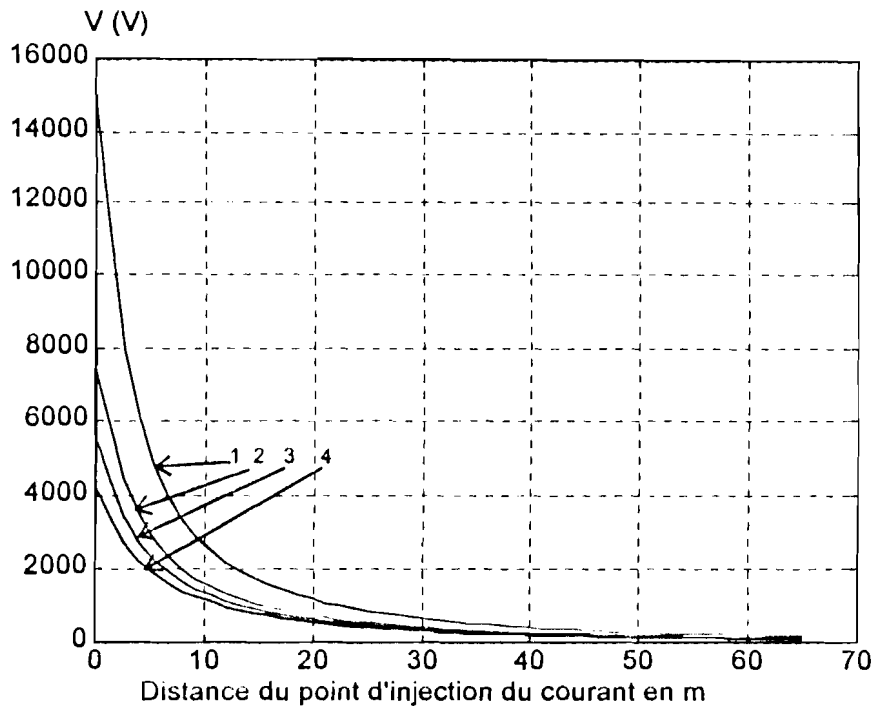


Figure IV.26. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

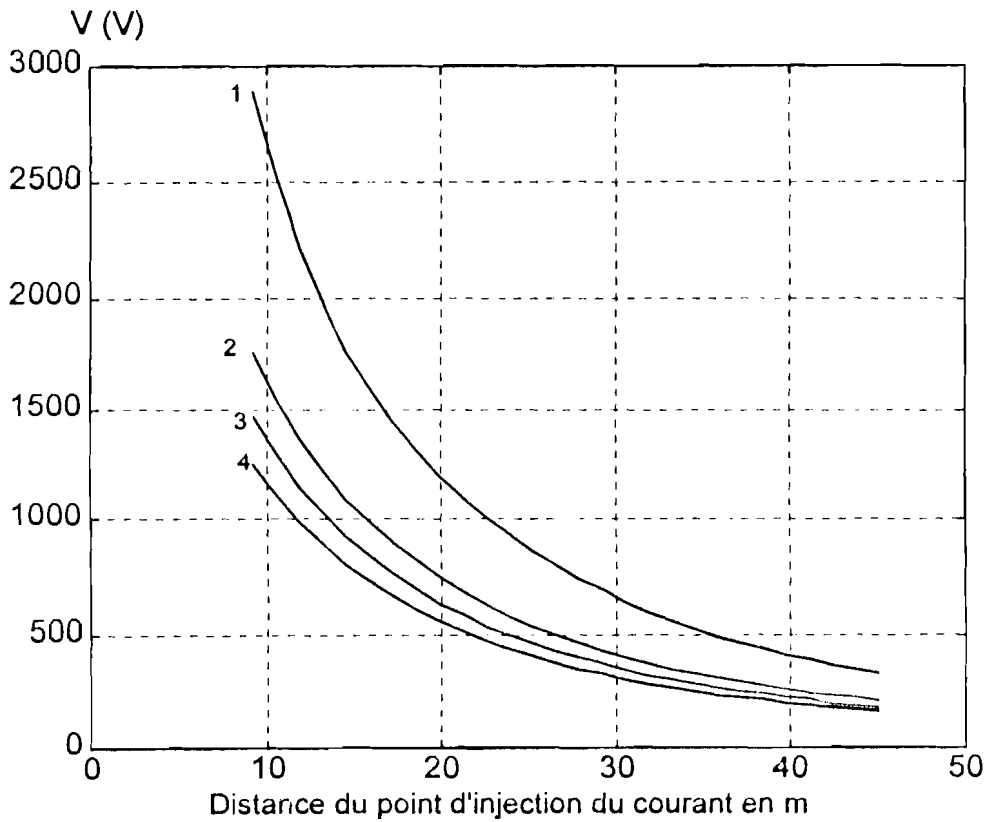


Figure IV.26.bis Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 500 \Omega.m$.

IV.4.2.. Influence de la profondeur d'enfouissement du piquet dans le sol.

L'influence de la profondeur d'enfouissement du piquet de terre sur la répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol est étudiée dans cette section. Des simulations sont faites avec différentes profondeurs d'enfouissement d'un piquet de terre de longueur égale à 2.2 mètres.. Les profondeurs d'enfouissement sont prises égales successivement à 0, 0.5 et 1.0 mètre. Les résultats des simulations sont portés dans les figures IV.27 à IV.29.bis. Dans ces courbes la correspondances des courbes aux numéros de figure est donnée dans le tableau IV.9.

N° de la courbe	1	2	3
Profondeur d'enfouissement du piquet (m)	0	0.5	1.0

Tableau IV.9: Identification des courbes des figures IV.27 à IV.28.bis.

Des courbes des figures IV.27 à IV.28.bis on se rend compte que :

- la montée en potentiel transitoire diminue avec l'augmentation de la profondeur d'enfouissement quand la couche superficielle est meilleure conductrice que la seconde couche ;
- l'enfouissement du piquet de terre permet de diminuer de façon considérable la montée en potentiel de contact quelque soit le coefficient de réflexion du modèle à deux couches.

On note sur les premières courbes lorsque la résistivité du premier domaine est plus faible que celle du deuxième que les courbes présentent des intersections et que le potentiel décroît moins vite avec la profondeur d'enfouissement du piquet.

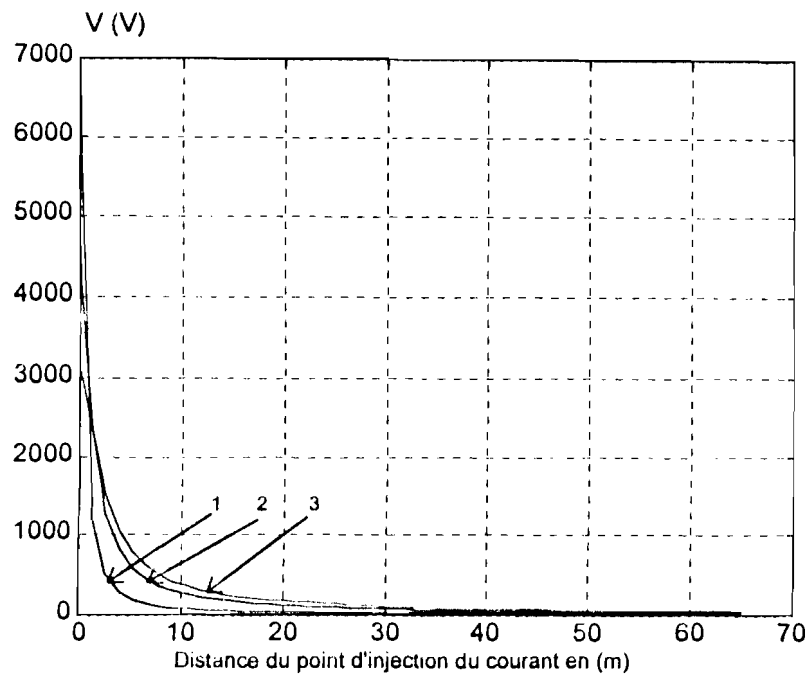


Figure IV.27. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

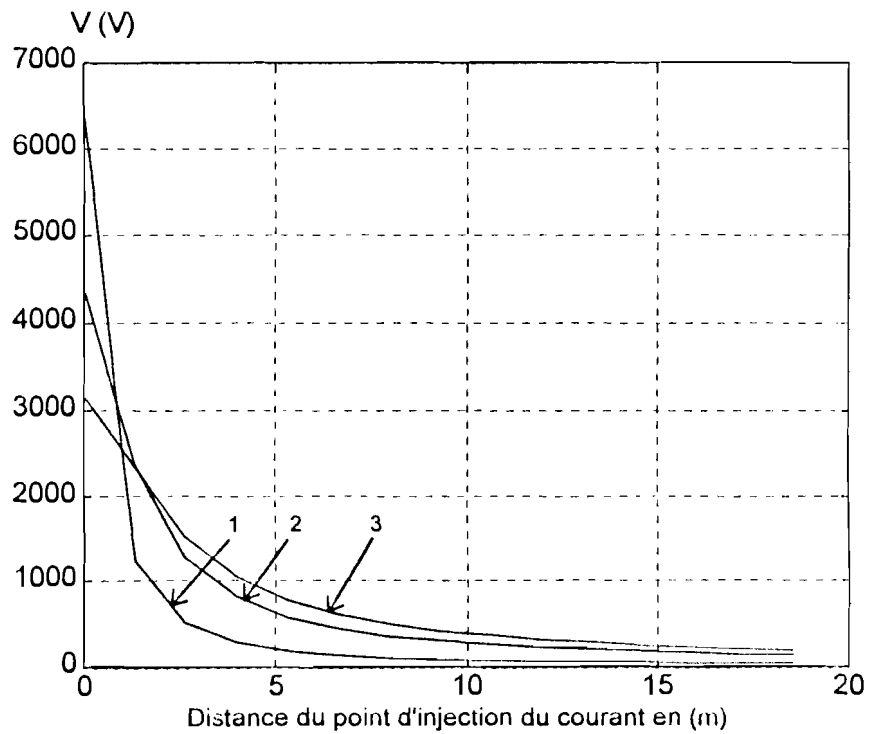


Figure IV.27.bis Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 100 \Omega.m$ et $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

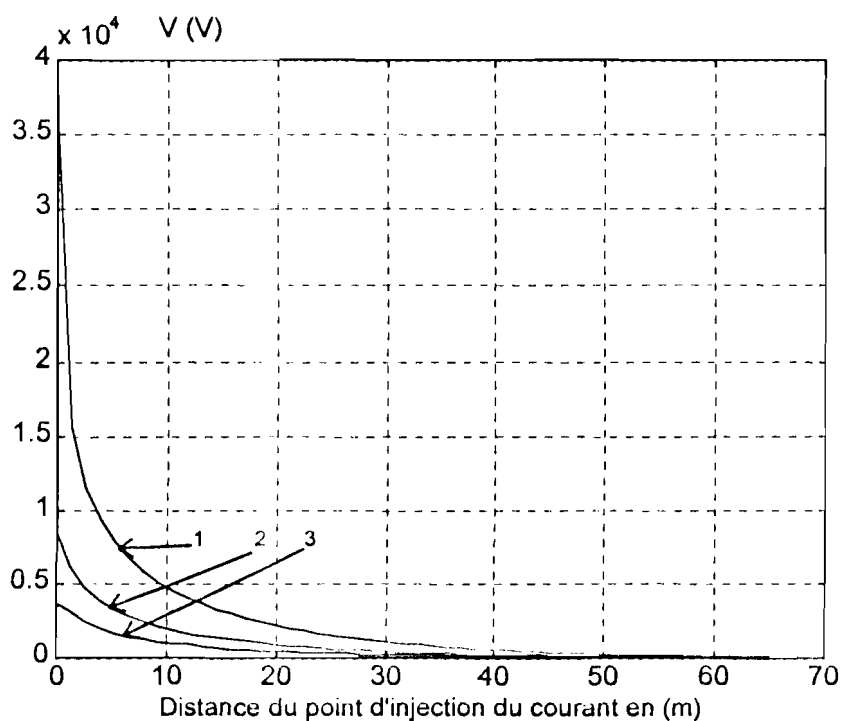


Figure IV.28.. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 100 \Omega.m$.

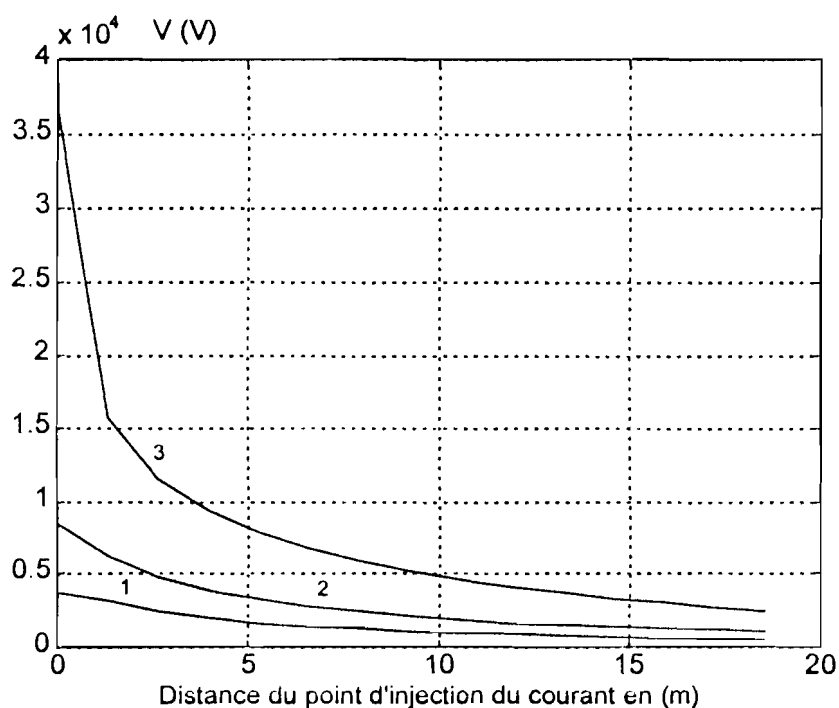


Figure IV.28.bis. Répartition de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol avec $\rho_1 = 1000 \Omega.m$ et $\rho_2 = 100 \Omega.m$.

Des courbes des figures IV.27 à IV.28.bis on se rend compte que :

- la montée en potentiel transitoire diminue avec l'augmentation de la profondeur d'enfouissement quand la couche superficielle est meilleure conductrice que la seconde couche ;
- l'enfouissement du piquet de terre permet de diminuer de façon considérable la montée en potentiel de contact quelque soit le coefficient de réflexion du modèle à deux couches.

IV.5. ETUDE DU PHENOMENE D'IONISATION

IV.5.1. Modélisation

Nous avons vu au point II.4.5 (figure II.31), qu'au niveau de chacune des deux couches, la dérivée du courant par rapport à x est constante. C'est pourquoi, au niveau de chacune des deux couches, il faut déterminer pour chaque temps de calcul, la valeur du rayon équivalent traduisant la prise en compte du phénomène d'ionisation du sol. Et c'est sur la base des deux rayons fictifs traduisant le phénomène d'ionisation dans les différentes couches, que l'on détermine les deux résistivités équivalentes. On s'arrange à maintenir constant, lors de la recherche des résistivités relatives fictives, le coefficient de réflexion. Une fois les lois d'évolution des résistivités des deux couches en fonction du temps connues, leur prise en compte lors de la simulation dans FLUX2D ne pose aucun problème particulier.

IV.5.2. Simulation de la diffusion du courant de foudre

Ce paragraphe traite de la diffusion du courant de foudre dans le modèle de sol à deux couches. Partant du fait que la méthode des éléments finis prend en compte de façon automatique l'hétérogénéité du sol, nous revenons seulement sur les spécificités de la modélisation du phénomène d'ionisation du sol avant d'aborder le calcul de la DMA.

IV.5.2.1. Modélisation de l'ionisation du sol hétérogène .

Dans la modélisation de l'ionisation du sol à deux couches, on a à faire à deux milieux ayant des résistivités distinctes. On peut appliquer la modélisation à rayon fictif modifiée

(traitée au chapitre III), comme dans le cas de sol homogène, mais en y associant les règles complémentaires suivantes:

- le phénomène d'ionisation doit être pris en compte dans chacune des deux couches séparément, ce qui suppose une variation appropriée de la résistivité du sol dans chacune des deux couches;
- au cours des variations, on doit s'arranger pour maintenir le coefficient de réflexion constant. Cette contrainte découle du souci de ne pas perturber la loi de variation du courant dans les deux couches. Mathématiquement, cette règle peut s'exprimer sous la forme:

$$\frac{\rho_2(t) - \rho_1(t)}{\rho_2(t) + \rho_1(t)} = k = \text{Cte}$$

- dans le calcul des conditions aux limites par le code LAPIN, les rayons fictifs qui permettent de tenir compte de l'ionisation du sol dans chacune des deux couches doit être pris en compte .

IV.5.2.2. Simulation de la répartition de la montée en potentiel transitoire: courbes d'atténuation.

Les cas traités sont résumés dans le tableau IV.10. Dans ce tableau, n° désigne le numéro affecté aux courbes de la figure IV.29. Vmax représente la valeur maximale de la montée en potentiel transitoire au point d'abscisse x = 0 mètre. h est fixé à 2 mètres.

Une analyse de l'ensemble de ces courbes permet de tirer les conclusions suivantes :

- Toutes les courbes d'atténuation présentent, approximativement, deux parties distinctes:
 - une première comprise entre 0 et 4 mètres ; dans cette partie, pour une valeur donnée de la résistivité du sol à la surface, on peut exprimer l'atténuation suivant une courbe linéaire partant de l'origine. Par exemple, pour $\rho_2 = 200 \Omega.m$, la pente de la courbe est de -2.25 dB/m et pour $\rho_2 = 1000 \Omega.m$, la pente est de -1.375 dB/m.
 - une deuxième partie qui se situe au delà des 4 mètres. Dans cette partie, par exemple, pour $\rho_2 = 200 \Omega.m$, la pente de la courbe est de -1.0 dB/m et pour $\rho_2 = 1000 \Omega.m$, la pente est de -0.683 dB/m.

- on peut évaluer l'influence de ℓ_1 sur l'allure de la pente en fixant la valeur de ρ_2 . En observant les groupes de courbes 1-2-3, 4-5-6, 7-8-9, 10-11-12 et 13-14-15, on se rend compte que plus ℓ_1 augmente, plus la pente de la courbe croît, ce qui est prévisible;
- enfin, plus la valeur de ρ_2 augmente, plus la pente de la courbe augmente, indiquant un amoindrissement de l'atténuation de la montée en potentiel transitoire en fonction de l'éloignement du point d'injection du courant.

N°	ℓ_1 (m)	Vmax(kV)	ρ_1 ($\Omega.m$) (ρ_2 ($\Omega.m$)	k
1	0.55	6.871	200	100	-1/3
4	0.55	7.67	400	100	-3/5
7	0.55	8.096	600	100	-5/7
10	0.55	8.390	800	100	-7/9
13	0.55	8.614	1000	100	-9/11
2	1.1	8.493	200	100	-1/3
5	1.1	11.081	400	100	-3/5
8	1.1	12.471	600	100	-5/7
11	1.1	13.383	800	100	-7/9
14	1.1	14.045	1000	100	-9/11
3	1.65	10.490	200	100	-1/3
6	1.65	16.687	400	100	-3/5
9	1.65	20.637	600	100	-5/7
12	1.65	23.398	800	100	-7/9
15	1.65	25.454	1000	100	-9/11

Tableau IV.10 : Correspondance des courbes de la figure IV.29, suivant les paramètres de simulation.

IV.5.2.3. Calcul de la DMA

Nous utilisons les résultats du paragraphe précédent pour déterminer des valeurs approchées de la DMA ; nous nous sommes donc placés dans les mêmes conditions. La première sous-couche est plus résistante que la deuxième. Nous faisons varier la profondeur du piquet dans ce premier domaine.

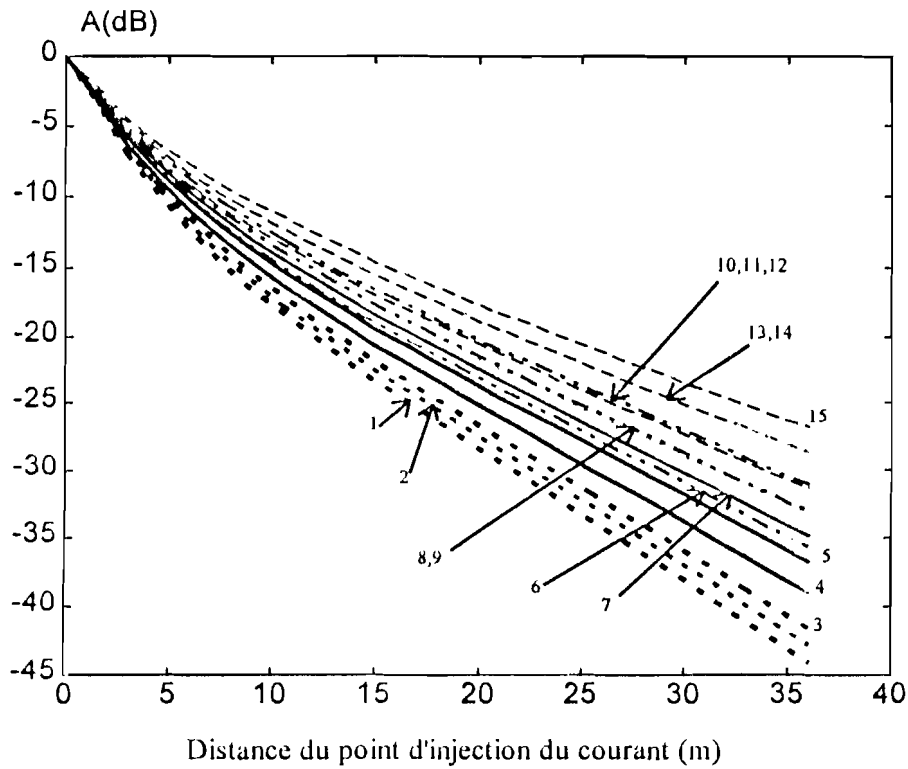


Figure IV.29 : Courbe de variation de l'atténuation de la montée en potentiel transitoire en fonction de la distance du point d'injection du courant.

ℓ_1 (m)	ρ_1 ($\Omega.m$)	ρ_2 ($\Omega.m$)	DMA (m)
0.55	200	100	8
0.55	400	100	10
0.55	600	100	14
0.55	800	100	17
0.55	1000	100	19
1.1	200	100	11
1.1	400	100	16
1.1	600	100	20
1.1	800	100	23
1.1	1000	100	26
1.65	200	100	14
1.65	400	100	22
1.65	600	100	26
1.65	800	100	30
1.65	1000	100	38

Tableau IV.11 : Valeurs de la DMA pour un sous-sol moins résistif

On retrouve des résultats très logiques. La distance augmente avec la résistivité du premier milieu et avec la longueur de piquet qui s'y trouve. Les valeurs obtenues peuvent être importantes et s'écartent fortement des valeurs préconisées habituellement. Celles-ci ne dépassent pas 16 mètres d'après les spécifications qui précisent que :

- la résistivité du sol doit être mesurée avec un écartement d'électrode $a = 5$ mètres ;
- la DMA pour un neutre découplé est de 2 mètres lorsque la résistivité du sol est inférieure à $500 \Omega.m$ (on considère que la première mise à la terre du neutre est découplée de la terre des masses MT, lorsque la distance qui les sépare est supérieure ou égale à 8 mètres [1,2]).

Ces spécifications appellent les remarques suivantes, sur cette méthode empirique de détermination de DMA :

- un écartement de 5 mètres entre électrode pour la mesure de la résistivité apparente du sol conduit à ne déterminer, dans la pratique que la résistivité de la seconde couche du modèle de sol à deux couches puisqu'on admet généralement que la seconde couche se situe généralement entre 1,6 et 2,8 mètres ;
- rien n'est dit quant à la valeur de l'amplitude du courant ;
- la forme de l'onde n'est pas pris en compte.

Au vu de ce qui précède et de ce qui a été dit dans les chapitres précédents, nous pouvons définir la démarche de calcul de la DMA de la façon suivante:

1. tenir compte de l'hétérogénéité du sol en surface et en profondeur, ce qui est relativement facile à partir des mesures de résistivités. Il convient surtout de tenir compte des variations saisonnières de la résistivités du sol pour que les calculs tiennent surtout compte des périodes les plus défavorables.
2. fixer l'amplitude du courant à 10 kA pour une prise de terre non découplée et à 1 kA pour une prise de terre découplée ;

3. tracer à l'aide de la simulation les courbes d'atténuations et évaluer les montées en potentiel transitoire au point d'implantation de la prise de terre.

4. la connaissance des montées en potentiel maximum et des courbes d'atténuation permettent de trouver la montée de potentiel au point de localisation de la prise de terre OPT.

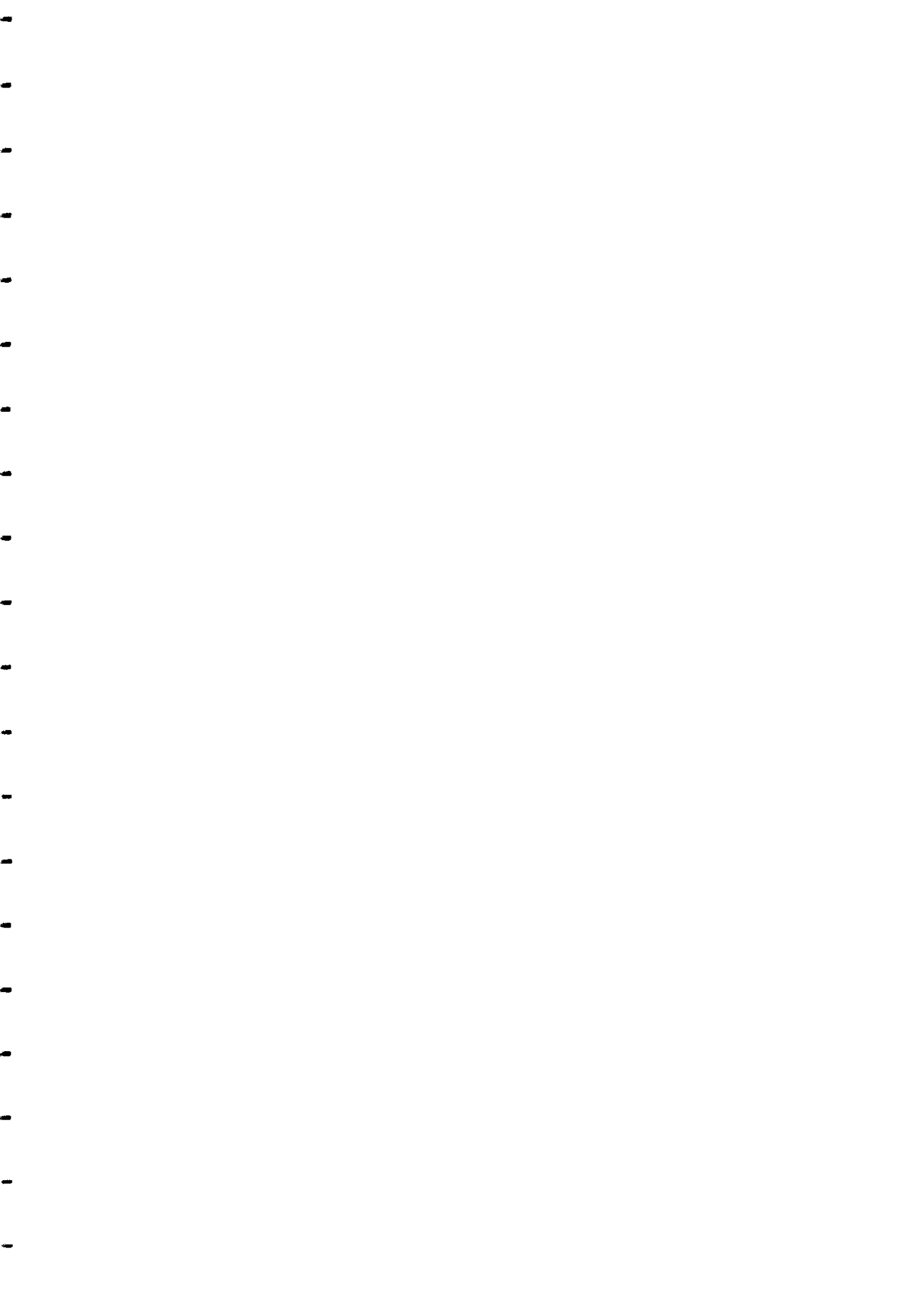
5. si la valeur de la montée en potentiel transitoire au point de localisation de la prise de terre OPT est supérieure à 1000 V, alors la règle de respect de la DMA est violée. Il faut, dans ce cas, prendre des mesures de protection par des dispositifs de protection externe.

IV.6. Conclusion

Les problèmes de cohabitation des prises de terre ont été abordés jusque là de façon empirique faute de moyen pour effectuer des calculs quantitatifs afin d'estimer de façon acceptable les niveaux de risque. C'est une preuve supplémentaire, comme l'a si bien noté P. G. LAURENT [92], "il est cependant peu de domaines de l'électrotechnique où une plus large part ait été laissée jusqu'ici à l'empirisme", que l'empirisme détient encore une part non négligeable dans les techniques de mise à la terre.

Le calcul par éléments finis, comme appliqué pour le calcul de DMA est un moyen rationnel de calcul, qui peut servir valablement dans les prises de décisions relatives à la nécessité d'envisager une protection externe, et dans ce cas de prévoir approximativement les contraintes auxquelles on peut s'attendre.

Avec le modèle de sol à deux couches, nous nous sommes rendus compte que l'introduction de point de discontinuité supplémentaire, en particulier au niveau de la zone d'interface entre les deux couches du modèle, a une grande influence sur le comportement général de la prise de terre en régime transitoire. La terre étant très rarement homogène, pour se rapprocher le plus possible des ordres de grandeur de la répartition de la montée en potentiel à la surface du sol, le recours au modèle de sol à deux couches doit être préféré à la représentation du sol comme étant homogène.



CONCLUSION GENERALE

Dès les années 60, la connaissance des principales caractéristiques du phénomène foudre, permettait de protéger les installations contre ses effets directs et notamment son impact. De nos jours, l'utilisation croissante d'ensembles électroniques, informatiques et automatiques toujours plus sophistiqués, associée à l'interconnexion grandissante des systèmes, conduisent à une sensibilité accrue aux effets de la foudre. Cette sensibilité est notablement due aux effets indirects liés à la circulation de courant de foudre de fortes amplitudes. Les coûts des pertes occasionnées par ces effets indirects dépassent largement ceux occasionnés par les effets directs.

Le passage des courants de foudre de fortes amplitudes dans les prises de terre des matériels MT ou des neutres BT entraîne des problèmes d'interférence entre ces dernières et les prises de terre des installations de télécommunication ou autres systèmes comportant de l'électronique. L'apparition de surtensions peut devenir extrêmement dangereuses pour les installations électroniques. L'élaboration de méthodes d'analyse et de quantification de ces surtensions transitoires dues au coup de foudre est d'une grande importance dans la protection d'ensemble de ces systèmes.

Les courants induits par les effets indirects de foudre sur les lignes de télécommunication sont de niveau bas, dépassant rarement 100 A, et en conséquence les installations de télécommunications sont efficacement protégés contre leurs effets par des parasurtenseurs sous formes de modules intégrés. Par contre, les surtensions causées par la montée en potentiel au niveau des prises de terre MT/BT des lignes d'énergie restent encore mal maîtrisées à cause de la faiblesse des connaissances des phénomènes physiques qui s'y déroulent.

Ainsi, il ressort que les surtensions susceptibles d'être transférées des prises de terre d'énergie sur les prises de terre de télécommunications dépendent :

- beaucoup de la résistivité du sol ; plus la résistivité du sol est grande, plus la montée en potentiel transmise est importante et par conséquent plus la DMA est élevée ;

- moins de la permittivité du sol qui a un effet limité sur la valeur de la montée en potentiel et cet effet n'est perceptible qu'au front montant de l'onde de courant ;
- de la forme de l'onde de courant ; elle a une certaine influence sur la valeur de la montée en potentiel au point d'injection du courant donc de la DMA ; plus la pente de l'onde de courant est grande, plus la montée en potentiel est élevée ;
- de l'amplitude de l'onde de courant ; son influence est similaire à celle de la résistivité du sol ;
- de la vitesse de propagation de l'onde de courant le long du piquet de terre ; elle croît avec la résistivité du sol et décroît avec l'augmentation de la permittivité.

Dans ce mémoire, les phénomènes physiques qui se déroulent lors du passage d'un courant de foudre dans le sol à travers une prise de terre sont traduits en terme de rayonnement et de diffusion. Sur la base de certaines simplifications dont les limites de validité sont données, la propagation de l'onde de courant est décrite par l'équation de la diffusion du courant dans le sol. Cette équation est résolue par la méthode des éléments finis par utilisation du logiciel FLUX2D. Les conditions aux limites sont définies grâce à la résolution de l'équation des télégraphistes en utilisant la transformée inverse de Laplace (code LAPIN).

Par l'interfasage de FLUX2D avec le code LAPIN, nous obtenons la distribution de la montée en potentiel transitoire à la surface du sol. De cette connaissance de la répartition de la montée en potentiel transitoire découle la détermination des Distances Minimales d'Approche (DMA) pour chaque type de problème traité.

Dans le but de prendre en considération le phénomène d'ionisation du sol lors du passage du courant de foudre, nous avons établi l'expression rigoureuse de l'équation des télégraphistes en prenant en compte la variation des paramètres primaires de la ligne que constitue le piquet de terre. Ce système d'équations aux dérivées partielles à coefficients variables a été simplifié sur la base de quelques hypothèses et considérations d'ordre physique. Contrairement à la méthode traditionnelle de modélisation de l'ionisation du sol, nous avons introduit et utilisé la modélisation de l'ionisation du sol par "rayon fictif modifié". Des résultats de simulation basée sur cette modélisation, il est établi que l'ionisation du sol contribue à diminuer la DMA dans une proportion qui dépend de l'amplitude du courant, de la longueur du piquet de terre et enfin de la résistivité du sol.

Pour prendre en considération son hétérogénéité, le sol a été remplacé par un modèle à deux couches. En utilisant ce modèle, nous avons montré que :

- l'enfouissement du piquet de terre ne contribue pas toujours, et rarement de façon sensible à la diminution de la DMA. ;
- l'augmentation de la longueur du piquet de terre fait baisser la DMA lorsque cette augmentation se fait dans la partie de la couche du modèle de sol ayant la plus faible résistivité ;
- la composante transversale du courant dans le sol reste quasi constante dans chaque couche du modèle de sol.

E. D. SUNDE [56] indique que la représentation du sol non homogène par un modèle de sol ayant une variation exponentielle de la résistivité est plus précise que le modèle de sol à deux couches. C'est pourquoi, nous pensons qu'il serait intéressant d'envisager une étude de l'hétérogénéité du sol avec une telle modélisation du sol, ce qui donnerait un moyen de comparaison avec le modèle de sol à deux couches.

Enfin, nous avons vu que l'augmentation de l'enfouissement du piquet dans le sol ou l'augmentation de la longueur du piquet ne sont pas toujours des mesures efficaces de diminution de la DMA. C'est pourquoi nous recommandons lorsque cela est possible, de rechercher à diminuer la valeur de la montée en potentiel au point même d'injection du courant. De façon classique, on y arrive en multipliant le nombre de conducteurs de terre directement reliés au point où le courant de foudre pénètre dans la prise de terre, ce qui conduit par exemple à préférer, à résistance de terre égale en basses fréquences, une prise de terre formée de plusieurs brins rayonnants à celle qui serait constituée d'un seul conducteur enfoui rectilignement soit verticalement ou horizontalement. Une telle mesure peut faire diminuer de façon considérable la valeur de l'impédance transitoire de la prise de terre et du coup faire chuter le maximum de la montée en potentiel transitoire, donc à une réduction de la DMA.

A la lumière de nos études, nous pensons que les spécifications en vigueur au Bénin en matière de DMA sont à affiner. La révision doit porter sur les points suivants :

1. Remplacement de la définition de la DMA par pallier de valeurs de résistivité de sol par une relation analytique approchée continue de DMA en fonction de la résistivité

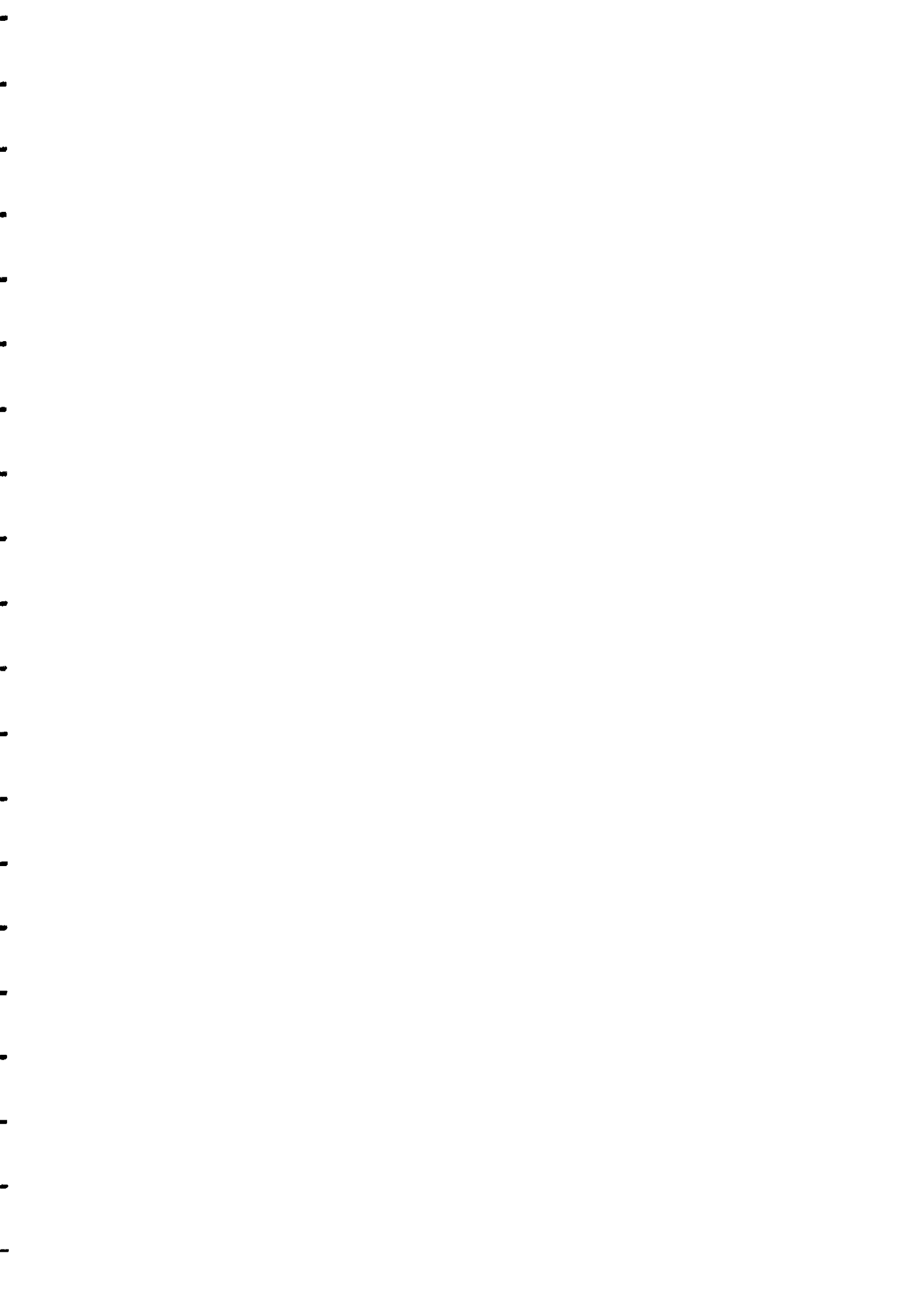
- du sol ; dans ce cas, la résistivité doit être entendue égale à celle correspondant aux mesures faites en saison sèche ;
2. L'espacement de cinq mètres entre les piquets de terre lors de la mesure de la résistivité du sol par la méthode de WENNER est ambiguë et peut conduire à des résultats erronés dans la détermination de la DMA. En effet, un espacement de cinq mètres dans un milieu hétérogène conduit à un modèle de sol assez loin de la réalité. Dans le cas de sol hétérogène (et c'est généralement le cas), il est préférable de remplacer le sol par un modèle de sol à deux couches. En procédant de la sorte, on se rapproche mieux de la réalité ;
 3. Il est de règle dans la conception et la réalisation des prises de terre de chercher à réduire l'amplitude des montées en potentiel à partir de leur point d'origine, de manière à les empêcher d'atteindre les installations fragiles avec une amplitude dangereuse. Les prises de terre de la SBEE pouvant constituer ici les points d'origine des perturbations, il est donc nécessaire de prendre en compte la configuration de ces dernières dans une étude globale de DMA. Cela suppose d'envisager aussi une modification conséquente des règlements et spécifications de la SBEE en la matière lorsque les prises de terre doivent être installées à proximité des installations de télécommunication ;
 4. Faut-il interconnectés en réseaux les prises de terre d'énergie et celles de télécommunication pour obtenir une équipotentialité? Toute réponse à cette question mérite des nuances. En règle générale, il est recommandé, lorsque l'installation de clients BT est protégée à l'entrée par des parafoudres, de relier la prise de terre de l'installation à celle des parafoudres. Dans ces conditions effectivement, toute montée en potentiel transitoire entre les conducteurs de phase et la masse doit toujours être limitée au niveau de protection des parafoudres. Mais dans le cas des installations de télécommunication en particulier, il faut veiller à séparer les terres parce que la montée en potentiel, si elle est importante, peut perturber l'installation et à la limite la détruire. La terre permet de mieux baisser les montées en potentiel en mode commun qu'une liaison directe entre prises de terre d'installations à courant fort avec des installations à courant faible. En tout cas, le gain en mode différentiel au mieux baisse rarement en dessous de la moitié de la montée en potentiel de la prise de terre perturbatrice. Car dans la conception des systèmes de télécommunication, le référentiel est toujours pris par rapport à la terre éloignée qui est supposée théoriquement au potentiel nul.

Tout au long de ce mémoire, nous avons travaillé avec un courant d'amplitude 1 kA. Ce choix qui est conforme aux pratiques rencontrées dans la littérature traitant du sujet, a l'inconvénient de ne pas permettre d'aborder la question de définition de DMA en terme de méthode sûre d'analyse de degré de risque. L'approche déterministe de détermination de la DMA que nous avons adoptée présente l'avantage d'une simplicité d'utilisation surtout si l'on prend en considération les temps de simulation. En général, l'approche déterministe est mieux adaptée à l'analyse de phénomènes parfaitement définis, ce qui est loin d'être le cas pour les ondes de foudre.

Le caractère aléatoire des courants de foudre où l'amplitude et la pente du courant ont un comportement variable lié à d'autres grandeurs aléatoires, seule l'approche stochastique semble être en mesure de fournir des estimations "réalistes" tout en restant dans des conditions économiques acceptables. C'est pourquoi, à titre de perspective d'évolution des travaux entamés de le cadre de ce mémoire, nous envisageons, la création d'un outil plus efficace de détermination de DMA. Cet outil doit se baser sur la description des courants de foudre par des lois de probabilité basées sur des mesures in situ.

Pour étendre la méthode d'étude développée dans ce mémoire à des fréquences plus élevées que celles des courants de foudre, une résolution complète de l'équation de l'onde s'avère indispensable. De même, pour des configurations de prises de terre ne présentant pas des symétries comme les piquets de terre, la méthode des éléments finis en 3D s'impose.

L'avantage principal que présente la méthode des équations des ondes combinée à une autre méthode de détermination des conditions aux limites est qu'on retrouve directement le potentiel scalaire électrique, sans passer par les calculs de champ ou la transformée inverse de Fourier. Il reste alors à espérer que la réalisation d'un tel outil verra le jour dans les prochaines années ce qui permettrait de compléter les acquis enregistrés dans le cadre du projet de recherche appliquée qui lie l'OPT, la SBEE et le CPU depuis Janvier 1995.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. BERGER, A. HERMANT, "Le phénomène de la foudre en milieu tropical". REE n° 9, Octobre 1996, pp. 27-32.
- [2] E. P. KRIDER, "Physics of lightning today", RGE, n° 6/94, Juin 1994, pp. 2-7
- [3] R. LANOIE, C. DESBIENS, S. P. COTE, "Lightning position and tracking system 'LAPTS' of HydroQuebec". Ninth International Symposium On High Voltage Engineering, August 28 - September 1, 1995, Graz Convention Center, Austria
- [4] C. D. WEIDMAN, E. P. KRIDER, "The fine structure of lightning return stroke waveforms". J. Geophys. Res. Vol. 83, pp. 6239-6247, 1978, also 'correction' n° 87, pp. 7361, 1982.
- [5] R. B. ANDERSON, H. R. VAN NIEKERK, D. V. MEAL, "Ninth progress report on the development and testing of lightning flash counters in the Republic of South Africa during 1976/1977", Special report ELEK 122, May 1977.
- [6] E. P. KRIDER, R. C. NOGGLE, M. A. UMAN, "A gated wideband magnetic direction-finder for lightning return strokes". J. Appl. Meteor. Vol. 15, pp. 301-306, 1976.
- [7] E. P. KRIDER, R. C. NOGGLE, A. E. PIFER, D. L. VANCE, "Lightning direction finding systems for forest fire detection, Bul. Amer. Meteor. Soc. Vol. 61, pp. 980-986, 1980
- [8] R. E. LOPEZ, R. M. PASEL, "Simulation experiments in site error estimation for direction finders, J. Géophys. Res. Vol. 96, pp. 15287-15296.
- [9] R. S. BENT, W. A. LYONS, "Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Position and Tracking System) to monitor

- lightning ground strike using a time of arrival (TOA) technique" in reprints, 7th International Conference on Atmospheric Electricity June 3-8, Albany, New-York, Boston, MA American Meteorological Society, 1984, pp. 317-324.
- [10] P. W. CASPER, R. B. BENT, "Results from the LPATS USA national lightning detection and tracking system for the 1991 lightning season" in Proceedings 21st International Conference on Lightning Protection, September 22-25, Berlin, 1992 pp. 339-342
- [11] P. RICHARD, A. SOULAGE, J. LAROCHE, "The SAFIR lightning monitoring and warning system: application to aerospace activities", in Proceedings International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, April 19-22, OKLAHOMA City, Oklahome, National Interagency Coordination Groups, 1988, pp. 383-390.
- [12] P. RICHARD, A. SOULAGE, F. BROUTET, "The SAFIR lightning warning system", in Proceedings 1989 International Conference on Lightning and Static Electricity, September 26-28, Both England, Ministry of Defense, Procurement Executive 1989, pp. 2B1.1.-2B.1.5.
- [13] Claude GARY, "La foudre et les phénomènes orageux", Revue Générale de l'Electricité (Paris), 1989, n° 3, pp. 3-11.
- [14] K. BERGER, R. B. ANDERSON, H. KRONINGER, " Paramètres des coups de foudre". Electra, n° 41, 1975, pp. 23-27.
- [15] A. BONAMY, "La foudre : courant électrique atmosphérique". EDF/DER, Juillet 1996.
- [16] M. AGUET, M. IANOZ, "Haute tension", DUNOD, 1987.
- [17] "Protection de lignes". Code 203002. CFP/PT, France Télécom/Sofrecom Befor 94 1301, Edition 1.

- [18] Th. APETI, "Circuit et prise de terre". Communauté Electrique du Bénin, Juin 1994, CFPP, Calavi.
- [19] "Principes de conception et de réalisation des mises à la terre". EDF/Centre de Normalisation H115, Janvier 1984.
- [20] R. PEZZANI, E. BERNIER, "Une démarche d'intégration fonctionnelle et technologique : le cas des composants de protection pour les réseaux téléphoniques". REE n° 4, Avril 1997, pp. 26-31.
- [21] M. THRASHER, "A solid state Solution". Telephony, June 12, 1989.
- [22] M. A. UMAN, "Lightning return stroke electric and magnetic fields". J. Geophys. Res. Vol. 90, pp. 6121-6130, 1985.
- [23] C. A. NUCCI, G. DIENDORFER, M. A. UMAN, F. RACHIDI, M. IONOS, C. MAZZETTI, "Lightning return stroke currents models with specified channel-base current : A review and comparison". J. Geophys. Res. Vol. 95, pp. 20395-20408, 1990.
- [24] R. THOTTAPPILIL, M. A. UMAN, "Comparison of lightning return-stroke models". J. Geophys. Res. Vol. 98, pp. 22903-22914, 1993.
- [25] R. B. ANDERSON, H. R. Van NIEKERK, H. KRONINGER, D. R. MEAL, "Development and field evaluation of a lightning earth flash-counter". IEE Proc., 131, Part A, n° 2, 118, 1984.
- [26] R. B. ANDERSON, H. R. Van NIEKERK, J. J. GERTENBACH, "Improved lightning earth-flash-counters". Electron. Lett. 9, 394, 1973.
- [27] R. B. ANDERSON, H. R. Van NIEKERK, J. J. GERTENBACH, "Improved lightning earth-flash-counters". Electra 66, 85, 1979.
- [28] R. B. ANDERSON, A. J. ERIKSON, "Lightning parameters for engineering application". Electra 69, 65, 1980.

- [29] E. O. OLADIRAN, E. PISLER, S. ISRAELSSON, "New lightning flash counter and calibration circuit with improved discrimination of cloud and ground discharges". IEE Proc. 135, Part A, n° 1, 22, 1988.
- [30] CIGRE WORKING GROUP ON LIGHTNING, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines". CIGRE, Paris, October 1991.
- [31] A. MERLIN, "La maîtrise du risque foudre: un enjeu pour demain". REE n° 6, Juin 1997, pp. 62-63.
- [32] C. GARY, A. CIMADOR, R. FIEUX, "Connaissance actuelle de la foudre et méthode de calcul de la protection des lignes de transport". RGE Tome 84, n° 1, 1975, pp. 25-34.
- [33] A. A. FEW, A. J. DESSLER, "Theoretical discussion on the acoustic energy of thunder". Planetary Electrodynamics, Gordon & Breach, New-York, Vol. 2, ch. 4.11, 1969.
- [34] S. A. PRENTICE, D. MACKERRAS, "Recording range of a lightning-flash counter". Proc. IEE, Vol. 166, n° 2, 1969, pp. 294-302.
- [35] K. S. KREIELSHEIMER, D. LODGE-OSBORN, "A lightning counter to distinguish between ground and cloud flashes". Planetary Electrodynamics, Gordon & Breach, New-York, Vol. 2, ch. 5.3, 1969, pp. 29-42.
- [36] R. B. ANDERSON, H. R. Van NIEKERK, S. A. PRENTICE, D. MACKERRAS, "Les compteurs de coup de foudre perfectionnés". Electra, CIGRE, n° 66, Octobre 1979, pp. 85-99.
- [37] J. R. GUMBY, M. I. E. AUST, "Lightning Prediction Technique". Elect. Eng. Trans. 1973, pp. 13-18.

- [38] M. AGUET, Ph. BLECH, M. IANOVICI, B. SCHAEDELI, " Influence des prises de terre durant un choc de foudre". Proc. 14ème Conférence Internationale pour la Protection contre la Foudre, Gdansk, 1978.
- [39] A. ZEDDAM, "Protection des installations de télécommunications contre la foudre". RGE n° 6, Juin 1994. Pp. 38-44.
- [40] B. BOURIOT, E. DE RAEMY, "Evaluation des risques encourus par des hommes en cas de foudroiement". REE n° 6, Juin 1997, pp. 64-69.
- [41] R. VELASQUEZ, D. MUKHEDKAR, "Analytical modelling of grounding electrode transient behavior". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, n° 6, June 1984.
- [42] A. P. MELIOPOULOS, A. D. PAPALEXOPOULOS, R. P. WEBB, "Estimation of soil parameters from driven rod measurements". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-103, n° 9, September 1984.
- [43] A. D. PAPALEXOPOULOS, A. P. MELIOPOULOS, "Frequency dependent characteristics of grounding systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, October 1987.
- [44] L. D. GRCEV, M. HEIMBACH, "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems". IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 12, n° 1, January 1997.
- [45] M. HEIMBACH, L. D. GRCEV, "Grounding systems analysis in transients programs applying electromagnetic field approach". IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 12, n° 1, January 1997.
- [46] S. BOURG, B. SACEPE, T. DEBU, "Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour". EDF-DER, 1995.
- [47] F. E. MENTER, L. GRCEV, "EMTP-Based Model for Grounding Systems Analysis". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, n° 4, October 1994.

- [48] L. GREV, F. DAWALIBI, "An electromagnetic model for transients in grounding systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 5, n° 4, November 1990.
- [49] W. XIONG, F. P. DAWALIBI and A. SALBY, "Frequency response of substation ground systems subject to lightning strikes". CIGRE International Symposium, Power System Electromagnetic Compatibility, Switzerland, Lausanne 93, pp. 100- 106.
- [50] F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR, "Optimum design of substation in two layer earth structure, Part I, analytical study", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-94, n° 2, pp. 252-261, March/April 1975.
- [51] A. P. Sakis MELIOPOULOS, "Power system grounding and transients: an introduction". Marcel Dekker, Inc., 1988.
- [52] R. VERMA, D. MUKHEDKAR, "Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, n° 3, March 1983.
- [53] A. P. Sakis MELIOPOULOS, F. XIA, E. B. JOY, G. J. COKKINIDES, "An advanced computer model for grounding system analysis". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, n° 1, January 1993. pp. 13-23.
- [54] A. P. MELIOPOULOS, M. G. MOHARAM, "Transient analysis of grounding systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, n° 2, February 1983, pp. 389-399.
- [55] F. MENTER, "Transient analyse of earthing systems". 20th ICCP, Berlin, September 1992.
- [56] E. D. SUNDE, "Earth conduction effects in transmission systems". Dover Publications, New-York, 1968.

- [57] J. P. PLUMEY, D. J. FONTAINE, P. KOUTEYNIKOFF, "Impédance haute fréquence d'une antenne déposée dans un demi espace conducteur". Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique. Trégastel, 1988.
- [58] H. W. DOMMEL, "EMTP Theory Book". Bonneville Power Administration, Portland USA, August 1986.
- [59] P. JOHANNET, "Comportement des prises de terre en régime impulsionnel: Application de la Transformée de Laplace Inverse (Code LAPIN 3.5)". EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et de la Recherche, Série B, n° 2, 1987, pp. 49-58.
- [60] A. AHMAD, P. JOHANNET, Ph. AURIOL, "Efficient inverse Laplace transform algorithm for transient overvoltage calculation". IEE Proc. C, Vol. 139, n°2, MArch1992.
- [61] E. K. MILLER, A. J. POGGIO, G. J. BURKE, E. S. SELDEN, "Analysis of wire antennas in presence of a conducting half space. Part I : The vertical antenna in a free space.". Canadian Journal of Physics, Vol. 50, pp. 879-888.
- [62] E. K. MILLER, A. J. POGGIO, G. J. BURKE, E. S. SELDEN, "Analysis of wire antennas in presence of a conducting half space. Part II : The horizontal antenna in a free space ". Canadian Journal of Physics, Vol. 50, pp. 2614-2627.
- [63] P. JOHANNET, " La transformée de Laplace inverse: calcul des phénomènes de propagation". Note EDF-HM/71-5228-PJO/AF, 1987.
- [64] A. TABBAGH, A. HESSE, R. GRARD, "Determination of electrical properties of the ground at shallows depth with an electrostatic quadrupole: field trials on archeological sites", Geophysical Prospecting 41, 579-597, 1993.
- [65] H. M. TOWNE, "Impulse characteristics of Driven Grounds". AIEE Lightning Reference Book, 1948-1935, pp.259-263.

- [66] P. L. BELLASCHI, "Impulse characteristics of driven grounds". AIEE Transactions, Vol. 61,1941, pp. 123-127.
- [67] P. L. BELLASCHI, R. E. ARMINGTON, A. E. SNOWDEN, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds-II". AIEE Transactions, Vol. 61,1941, pp. 349- 362.
- [68] P. L. BELLASCHI, R. E. ARMINGTON, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds-III. Effect of Lead in Ground Installation". AIEE Transactions, Vol. 63,1942, pp. 349-362.
- [69] A. M. MOUSSA, "The soil ionisation gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes". IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 9, n° 3, July 1994. pp. 1669-1677.
- [70] A. C. LIEW, M. DARVENIZA, "Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earth". Proc. IEE, Vol. 121, n° 2, pp. 123-135.
- [71] CIGRE WORKING GROUP ON LIGHTNING, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines". CIGRE, Paris, October 1991.
- [72] B. NEKHOUL, C. GUERIN, P. LABIE, R. FEUILLET, G. MEUNIER, X. BRUNOTTE, "A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, n° 3, 1995, pp. 2150-2153.
- [73] O. BIRO, K. PREIS, "On the use of the magnetic vector potential in the Finite Element Analysis of the three dimensional eddy current". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, n° 4, 1989, pp. 3145-3159.
- [74] B. NEKHOUL, P. LABIE, F. X. ZGAINSKI, G. MEUNIER, F. MORILLON, S. BOURG, "Calcul par éléments finis de l'impédance d'un réseau de terre". EDF, 96NR00048, Setembre 1995, Service Matériel Electrique.

- [75] K. CHABI-SIKA, J. BARRAL, J. M. KAUFFMANN, "Evaluation of the Transient Ground Potential Rise due to lightning current in vertical ground rod". Submitted to Sixteenth IASTED International Conference, February 17-19, 1997 Innsbruck Austria.
- [76] A. ROUSSEAU, " Choix d'un parafoudre basse tension basé sur l'analyse du risque". Publifoudre, Soulé. Traduit de l'anglais, publié à Power Quality 95, Brême-Allemagne 6-9 Novembre 1995.
- [77] A. ROUSSEAU, " Coordination de parafoudres dans les installations basse tension". Publifoudre, Soulé. Traduit de l'anglais, publié à Intelec 95, La Haye-Hollande, 29 Octobre- 1Novembre 1995.
- [78] IEEE Standard 81: "Recommended guide for measuring ground resistance and potential gradients in the earth (1980)".
- [79] G. F. TAGG, "Earth resistance". George Newnes Ltd. (London), 1964.
- [80] Y. L. CHOW, M. ELSHERBINY, M. M. A. SALAMA, "An efficient Computation of the Rodbed Grounding Resistance in a homogeneous Earth by the Galerkin's Moment Method". IEE Proceedings C, Vol. 142, n° 6, 1995. pp. 655-660.
- [81] M. M. ELSHERBINY, Y. L. CHOW, M. M. A. SALAMA, "A fast and accurate analysis of grounding resistance of driven rodbed in a homogeneous and two layer soil". presented at IEEE/PES SM July 23-27 1995, Portland OR (95 SM 362-4 PWRD).
- [82] Y. L. CHOW, M. M. ELSHERBINY, M. M. A. SALAMA, "Surface voltages and resistance of grounding systems of grid and rods in two-layer earth by rapid Galerkin's moment method". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, n° 1, January 1997.
- [83] P. JOHANNET, "Les phénomènes de propagation. Généralités sur l'analyse modale". EDF-DER, avril 1994.

- [84] P. ANZANEL, C. GRASSIN, "Réponse électrique transitoire des prises de terre des réseaux de distribution lors des coups de foudre". EDF-DER, ARD M7301M.
- [85] A. ZEDDAM, "Protection des installations de télécommunications contre la foudre". RGE, n°6, Juin 1994.
- [86] T. NAKATA, N. TAKAHASI, K. FUJIWARA, Y. SHIRAKI, "3D magnetic field analysis using special elements". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, n° 5, September 1990, pp. 2379-2381.
- [87] C. R. I. EMSON, "Methods for the solution of open boundary electromagnetic field problems". IEE Proc., Vol. 135, Pt. A, n° 3, March 1988.
- [88] X. BRUNOTTE, G. MEUNIER, J. P. BONIGIRAUD, "Ship magnetizations modelling by the finite elements method". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, n° 2, March 1993, pp. 1970-1975.
- [89] X. BRUNOTTE, G. MEUNIER, J. F. IMHOFF, "Finite elements solution of unbounded problems using transformation: a rigorous powerful and easy solution". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, n° 2, March 1992, pp. 1663-1666.
- [90] R. J. LYTHER, D. L. LAGER, "Numerical Evaluation of Sommerfeld Integrals", UCRL 51688, Lawrence Livermore Laboratory, 1974.
- [91] G. J. BURKE, E. K. MILLER, "Modeling antennas near to and Penetrating a Lossy Interface.". IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP. 32, n° 10, pp. 1040- 1049, October 1984.
- [92] P. G. LAURENT, "Les bases générales de la technique des mises à la terre dans les installations électriques." Bulletin de la Société Française des Electriciens, Vol. 1, pp. 368-402, 1951.
- [93] H. SELJESTH, K. H. FEIST, M. KUUSSAARI, "Mise à la terre des postes vue sous les aspects de la sécurité et des interférences". Electra n° 71, pp. 47-69.

- [94] E. P. DICK, C. C. ERVEN, S. M. HARVEY, "Grounding system tests for analysis of fault-induced voltages on communication cables". IEEE Trans. on PAS 98, pp. 2115- 2125, 1979.
- [95] CCITT, "Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines. Geneva 1963.
- [96] L. GRCEV, "Computation of Transient Voltages Near Complex Grounding Systems Caused by Lightning Currents", Proc. of IEEE 1992 International Symposium on EMC, 92CH3169-0 pp.393-399.
- [97] W. XIONG, F. DAWALIBI, "Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lightning and Similar Surge Currents", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, July 1994, pp. 1421-1427.
- [98] F. DAWALIBI, W. XIONG, J. MA, "Transient Performance of Substation Structures and Associated Grounding Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N° 3, May/June 1995, pp. 520-527.
- [99] L. D. GRCEV, "Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, n° 2, April 1996, pp. 815-818.
- [100] Coordination de l'isolement : définitions, principes et règles. Publications CEI 71-1, 1993.
- [101] Standard Graphs for Resistivity Prospecting European Association of Exploration Geophysicists (La Haye).
- [102] R. VERMA, D. MUKHEDKAR, " Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, March 1981, pp. 1023-1030.

- [103] M. RAMAMOORTY, M. M. B. NARAYANAN, S. PARAMESWARAN, D. MUKHEDKAR, "Transient Performance of Grounding Grids", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, October 1989, pp. 2053-2059.
- [104] F. DAWALIBI, A. SELBY, "Electromagnetic Fields of Energized Conductors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, N° 3, July 1993, 1275-1284.
- [105] R. G. OLSEN, M. C. WILLIS, "A Comparaison of Exact and Quasi-Static Methods for Evaluating Grounding Systems at High Frequencies", 1995 IEEE/PES Summer Meeting, Portland, OR, IEEE Paper 95, SM 395-4 PWRD.
- [106] J. P. PLUMEY, D. J. ROBERTOU, J. M. FONTAINE, P. KOUTEYNIKOFF, "Impédance haute fréquence d'une antenne déposée dans un demi-espace conducteur", Proc. Colloque sur la Compatibilité Electromagnétique, paper C1, Trégastel, France, January 1981.
- [107] D. V. OTTO, J. H. RICHMOND, "Rigorous Field Expressions for Piecewise-Sinusoidal Line Sources", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP. 17, January 1969, pp. 98.
- [108] FLUX2D Version 7.20, "Analyse des dispositifs électriques, magnétiques et thermiques par la méthode des éléments finis". Notice d'utilisation, CEDRAT, Copyright , Octobre 1996.
- [109] T. NAKATA, N. TAKAHASI, K. FUJIWARA and Y. SHIRAKI, "3D Magnetic Field Anaysis Using Special Elements", IEEE Trans. on Magnetics Vol. 26, N° 5, September 1990, pp. 2379-2381.

ANNEXES

Annexe A : Transformée inverse de Laplace

Supposons une fonction réelle $f(t)$ pour $t \geq 0$, et sa transformée de Laplace $F(s)$ définie par :

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (A1)$$

On suppose que $f(t)$ est continue par morceaux et d'ordre exponentiel α c'est-à-dire que $|f(t)| \leq M e^{\alpha t}$. Dans ce cas, la fonction transformée $F(s)$ est définie pour $\text{Re}(s) > \alpha$.

La transformée inverse est donnée par la formule :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\alpha - i\infty}^{\alpha + i\infty} e^{st} F(s) ds \quad (A2)$$

où $s = a + \omega i$ est l'opérateur de Laplace, a pouvant être tout nombre réel supérieur à α . P. JOHANNET et al. [59,60] ont proposé, pour calculer (A2), la formule approchée suivante :

$$f(t) \approx \frac{e^{at}}{T} \left[\frac{F(a)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \rho \cos\left(\theta + \frac{k\pi t}{T}\right) \right] \quad (A3)$$

Les paramètres a et T sont choisis de manière à accélérer la convergence de la série. C'est cette approximation qui est à la base du code LAPIN (Laplace Inverse).

Annexe B : Détermination des paramètres du modèle de sol à deux couches en régime statique

Parmi les méthodes de calcul sur ordinateur qui sont proposées dans la littérature pour le calcul des paramètres du modèle de sol à deux couches, celle donnée par A. P. Meliopoulos et al. [35] et basée sur la méthode des moindres carrés nous semble relativement précise et simple à mettre en oeuvre. Cette méthode repose sur le principe de discrétisation, selon lequel une prise de terre filiforme est découpée en un nombre N de petits segments élémentaires rectilignes, repérés par leur indice i . N est d'autant plus élevé que la géométrie de la prise de terre est complexe.

On définit le coefficient R_{ij} comme l'élévation de potentiel du segment (i) lorsque le segment (j) et lui seul écoule dans le sol un courant égal à l'unité. En notant par I_h le courant écoulé dans le sol par le segment (h), on peut écrire l'expression du potentiel du segment (i) en appliquant le principe de superposition:

$$V(i) = \sum_{h=1}^N R_{ih} I_h \quad (B.1)$$

Or le potentiel $V(i)$ est constant sur la prise de terre et égal à RI , produit de la résistance R de la prise de terre étudiée (inconnue et faisant l'objet de calculs) et du courant total I s'écoulant de la prise de terre dans le sol (connu par hypothèse). La somme des courants I_h étant égale à I , on peut former le système d'équations suivant:

$$\begin{aligned} R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + \dots + R_{1N}I_N - RI &= 0 \\ R_{11}I_1 + \dots + R_{ih}I_h + \dots + R_{iN}I_N - RI &= 0 \\ R_{N1}I_1 + \dots + R_{NN}I_N - RI &= 0 \\ I_1 + \dots + I_h + \dots + I_N &= I \quad (B.2) \end{aligned}$$

Ces $N+1$ équations permettent de calculer les $N+1$ inconnues que sont les courants I_h . Connaissant ces derniers, on peut ensuite déterminer le potentiel en tout du sol. La

connaissance de la répartition du potentiel permet de trouver la valeur de la résistance de prise de terre. Dans le cas d'un modèle de sol à deux couches, le calcul des coefficients R_{ih} est possible également en utilisant par exemple la méthode des images.

A partir donc des valeurs des résistances de sol dans le modèle à deux couches, on résout l'équation de minimisation suivante:

$$\text{Minimum}(\rho_1, \rho_2, h) \sum_{i=1}^n \eta_i^2 = \sum_{i=1}^n (R_i - f_i(\rho_1, \rho_2, h, a_i, d))^2 \quad (\text{B.3})$$

où R_i est la valeur en Ohm de la résistance mesurée par la méthode Wenner pour un espacement des électrodes a_i ;

La solution à ce problème s'exprime sous la forme d'un algorithme itératif [35]:

$$p^{k+1} = p^k + (H^T_k W H_k)^{-1} H^T_k W \eta \quad (\text{B.4})$$

$$\text{où: } p = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ h \end{bmatrix}, \quad H = \frac{\partial f_i}{\partial p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \rho_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \rho_2} & \frac{\partial f_1}{\partial h} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \rho_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \rho_2} & \frac{\partial f_2}{\partial h} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f_n}{\partial \rho_1} & \frac{\partial f_n}{\partial \rho_2} & \frac{\partial f_n}{\partial h} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} 1/R_1 & 0 \\ 0 & 1/R_n \end{bmatrix}$$

Les R_i représentent résistances mesurées. Le vecteur des erreurs:

$$\{\eta_i\} = \{R_i - f_i(\rho_1, \rho_2, h, a_i, d)\} .$$

L'équation (B.10) est résolue par l'algorithme suivant:

1. Choisir les valeurs initiales des paramètres ρ^0_1, ρ^0_2, h^0 .
2. Initialiser les compteurs j à zéro.
3. Utiliser la méthodologie préconisée dans [36] pour calculer les valeurs des n résistances .
4. Calculer les erreurs η_i .
5. Calculer la matrice H .
6. Utiliser l'équation (4.10) pou trouver le vecteur p^{k+1} .
7. Comparer les différences $|\rho_1^{j+1} - \rho_1^j|$, $|\rho_2^{j+1} - \rho_2^j|$ et $|h^{j+1} - h^j|$.
8. Si ces valeurs sont supérieures à une limite prédéterminée ϵ , alors terminer
9. Sinon repartir au point 3.

