

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**RÉPONSE TRANSITOIRE DES COUPS DE Foudre SUR LES
INSTALLATIONS ÉOLIENNES**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

KEVIN APOTE A. TETE

JUN 2019



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Ce mémoire est dédié :

À ma famille

REMERCIEMENTS

Comme le veut la tradition, je vais tenter de satisfaire au difficile exercice de la page des remerciements, peut-être la tâche la plus ardue de ces années de mon projet. Non qu'exprimer ma gratitude envers les personnes en qui j'ai trouvé un soutien soit contre ma nature, bien au contraire, la difficulté tient plutôt dans le fait de trouver les mots pour remercier chaque personne qui a, d'une manière ou d'une autre, contribué au bon déroulement et l'aboutissement de ce projet.

La première personne que je tiens à remercier est mon directeur de recherche, **le Pr. Fouad Slaoui Hasnaoui**, qui a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé. Nos échanges continuels, si riches, ont sûrement été la clé de réussite de ce travail.

Je prends un immense plaisir à exprimer ma gratitude à tous les professeurs qui m'ont enseigné au cours de mon programme de maîtrise. J'adresse ensuite mes remerciements à tous mes amis et collègues, et l'ensemble du personnel de l'UQAT pour tout le soutien qu'ils m'ont accordé durant mon séjour.

Je voudrais remercier mes parents, pour leurs encouragements et leur soutien constants et inconditionnels tout au long de mon parcours éducatif. J'exprime ma reconnaissance la plus profonde à ma famille qui, pour sa patience, et surtout pour son soutien indéfectible durant toute cette période. À toutes les personnes qui m'ont suivi de près ou de loin, j'exprime ma sincère gratitude.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DE TABLEAUX.....	xi
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT.....	xiii
LISTE DES SIGLES ET NOTATIONS.....	xiv
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1. Contexte de l'étude	1
1.2. Méthodologie et démarche scientifique.....	3
1.3. Problématique du sujet.....	3
1.4. Limitation du sujet.....	4
1.5. Objectifs du projet	4
CHAPITRE 2	6
REVUE DE LITTÉRATURE DES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE DES INSTALLATIONS ÉOLIENNES	6
2.1. Le réseau éolien	6
2.2. Mise à la terre du réseau éolien	7
2.3. Rôle des systèmes de mise à la terre.....	7

2.4.	Configuration des systèmes de mises à la terre des éoliennes.....	9
2.5.	Modèle de système de mise à la terre des éoliens.....	10
2.6.	Cas des grilles sectionnées.....	12
2.7.	Formules empiriques.....	14
2.8.	Mise à la terre des postes	15
2.9.	Environnement : sol et fondation.....	16
2.9.1.	Nature des sols	16
2.9.2.	Caractéristiques électriques des sols	16
2.10.	Le comportement diélectrique des fondations	19
2.11.	Le phénomène de foudre.....	20
2.12.	Le processus de la décharge négative nuage-sol	22
2.12.1.	Le traceur par bond	23
2.12.2.	Le processus d'attachement	23
2.12.3.	L'arc en retour.....	24
2.12.4.	Le traceur continu et les arcs en retour subséquents.....	24
2.12.5.	Les effets de la foudre sur le réseau éolien	25
2.13.	Non linéarité et variation fréquentielle des paramètres électriques des sols	26
2.13.1.	Phénomène d'ionisation.....	26
2.13.2.	Paramètres électriques et fréquence	26
2.13.3.	Variation avec la fréquence d'un système de mise à la terre	27
2.14.	Les modèles de mise à la terre pour les études des transitoires	29
2.14.1.	Les modèles issus de la théorie des circuits	29
2.14.2.	Les modèles issus de la théorie des lignes	30
2.14.3.	Les modèles électromagnétiques.....	31

2.15. Méthode d'amélioration de la résistivité du sol.....	32
2.16. Mise à la terre dans le sol non homogène.....	35
2.16.1. Sol en deux couches de résistivités différentes.....	35
2.16.2. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes.....	37
2.17. Conclusion.....	38
CHAPITRE 3.....	39
REPRÉSENTATION FRÉQUENTIELLE DES SYSTEMES DE MISE À LA TERRE.....	39
3.1. Présentation et méthodologie.....	39
3.2. La détermination des paramètres.....	39
3.3. Théorie des antennes.....	40
3.4. Modélisation d'une mise à la terre par la théorie des antennes.....	42
3.5. Hypothèses.....	43
3.5.1. Homogénéité des sols.....	43
3.5.2. Caractéristiques électriques du sol constantes.....	44
3.5.3. Approximation des fils minces.....	44
3.6. Principe général du modèle.....	45
3.7. Expression du champ électrique.....	46
3.7.1. Conducteur avec pertes dans un milieu homogène.....	50
3.7.2. Conducteur enterré pour sol homogène.....	51
3.8. Méthode des images.....	52
3.9. Conclusion.....	53
CHAPITRE 4.....	54
RÉSOLUTION NUMÉRIQUE PAR LA MÉTHODE DES MOMENTS.....	54

4.1.	La méthode des moments	54
4.2.	Présentation de la méthode	54
4.3.	Application à la méthode des moments	55
4.4.	Principe de la méthode.....	56
4.4.1.	Distribution du courant dans la prise de terre	56
4.4.2.	Développement de la grandeur h sur des fonctions de bases	56
4.5.	Calcul de la distribution de courant	58
4.6.	Jonctions entre fils	62
4.7.	Avantages de l'application de cette méthode	64
4.8.	Limites de la méthode des moments.....	64
4.8.1.	Domaine de validité	64
4.8.2.	Temps de calcul.....	64
4.8.3.	La complexité des équations	65
4.9.	Méthode de validation	65
4.10.	Forme analytique du courant	65
4.10.1.	Le modèle bi-exponentiel.....	65
4.10.2.	Modèle de Heidler.....	67
4.11.	Cas d'étude	68
4.12.	Effet de la permittivité	69
4.12.1.	Cas de la première configuration	69
4.12.2.	Cas de la deuxième configuration.....	71
4.13.	Effet de la résistivité	72
4.14.	Conclusion	73
CHAPITRE 5	75

PERFORMANCE DES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE DES INSTALLATIONS ÉOLIENNES	75
5.1. Performance des systèmes de mise à la terre	75
5.2. Présentation du modèle	75
5.3. Exploitation du modèle	76
5.4. Étude d'un système de mise à la terre	77
5.4.1. Grille de mise à la terre d'un pylône éolien onshore	77
5.4.2. Grille de mise à la terre d'un poste de réseau éolien	81
5.4.3. Étude de protection de 3 pylônes éoliens	84
5.5. Réseau éolien en mer	86
5.5.1. Cas d'une éolienne en mer	87
5.6. Optimisation des systèmes de mise à la terre	89
5.6.1. Optimisation par des composants chimiques	89
5.6.2. Effet des dimensions de la grille sur les performances des grilles des mises à la terre	93
CHAPITRE 6	96
CONCLUSION ET SUGGESTION DE TRAVAUX FUTURS	96
6.1. Conclusion	96
6.2. Suggestion de travaux futurs	97
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	98

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2-1 : RÉSEAU ÉOLIEN ET MISE À LA TERRE DE PYLÔNES ET D'UN POSTE	8
FIGURE 2-2 : MODÈLE DE SYSTÈME DE MISE À LA TERRE DE BASE D'ÉOLIENNE	10
FIGURE 2-3 : PARC ÉOLIEN TERRESTRE AVEC 5 ÉOLIENNES	10
FIGURE 2-4 : ILLUSTRATION DU MODÈLE DE MISE À LA TERRE D'ÉOLIENNE	10
FIGURE 2-5 : SYSTÈME DE MISE À LA TERRE DE BASE POUR ÉOLIENNES.....	11
FIGURE 2-6 : SYSTÈME DE MISE À LA TERRE DE L'ÉOLIENNE AVEC TOUR COMPLÈTE....	11
FIGURE 2-7 : MODÈLE ÉTENDU DE MISE À LA TERRE.....	12
FIGURE 2-8 : GRILLE CARRÉE CHOISIE POUR LES CALCULS	13
FIGURE 2-9 : GRILLE SECTIONNÉE	14
FIGURE 2-10 : ILLUSTRATION DE LA HAUTEUR DU PYLÔNE ÉOLIEN	21
FIGURE 2-11 : CLASSIFICATION DES COUPS DE FOUDRE.....	22
FIGURE 2-12 : FORMATION DE FLASH DESCENDANT - ÉTAPES PROGRESSIVES.....	23
FIGURE 2-13 : ÉVOLUTION DU COURANT À LA BASE DU CANAL DE FOUDRE	25
FIGURE 2-14 : PRISE DE TERRE AVEC TROUS PROFONDS	34
FIGURE 2-15 : SOL EN DEUX COUCHES DE RÉSISTIVITÉS DIFFÉRENTES	36
FIGURE 3-1 : ILLUSTRATION DE LA SITUATION PHYSIQUE	42
FIGURE 3-2 : CONDUCTEUR FILAIRE	47
FIGURE 3-3 : CAS DE MÉTHODE DES IMAGES	52
FIGURE 4-1 : SEGMENTATION DU SYSTÈME DE MISE À LA TERRE	58
FIGURE 4-2: FORME DU COURANT DE FORME BI-EXPONENTIEL	66
FIGURE 4-3 : PRISES DE TERRES ÉTUDIÉES.....	69
FIGURE 4-4 : IMPÉDANCE DE LA PRISE DE TERRE	70
FIGURE 4-5 : ARGUMENTS DE LA PRISE DE TERRE.....	70
FIGURE 4-6 : IMPÉDANCE DE LA PRISE DE TERRE	71
FIGURE 4-7 : ARGUMENTS DE LA PRISE DE TERRE.....	72

FIGURE 4-8 : IMPÉDANCE DE LA PRISE DE TERRE POUR LA CONFIGURATION 2.....	73
FIGURE 5-1 : GRILLE DE PROTECTION D'UN PYLÔNE ÉOLIEN	77
FIGURE 5-2 : ILLUSTRATION DE LA SITUATION PHYSIQUE.....	78
FIGURE 5-3 : IMPÉDANCE TRANSITOIRE	78
FIGURE 5-4 : VALEUR DES ANGLES.....	79
FIGURE 5-5 : RÉPONSE EN TENSION AU POINT D'ALIMENTATION	80
FIGURE 5-6 : CAS D'ÉTUDE : GRILLE DE MISE À LA TERRE D'UN POSTE.....	82
FIGURE 5-7 : MISE À LA TERRE DE 3 PYLÔNES ÉOLIENS	85
FIGURE 5-8 : IMPÉDANCE TRANSITOIRE.....	85
FIGURE 5-9 : TENSION TRANSITOIRE.....	86
FIGURE 5-10 : SCHÉMA D'UNE INSTALLATION ÉOLIENNE OFFSHORE.....	87
FIGURE 5-11 : MODÈLE DE SYSTÈME DE MISE À LA TERRE POUR ÉOLIENNE EN MER	88
FIGURE 5-12 : TENSION TRANSITOIRE	89
FIGURE 5-13 : PRISE DE TERRE ENTOURÉE DE BENTONITE	91
FIGURE 5-14 : IMPÉDANCE DE LA PRISE DE TERRE POUR LA CONFIGURATION 1	92
FIGURE 5-15 : IMPÉDANCE DE LA PRISE DE TERRE POUR LA CONFIGURATION 2	93
FIGURE 5-16 : GRILLE DE MISE À LA TERRE DE 100 MAILLES.....	94
FIGURE 5-17 : IMPÉDANCE DE LA GRILLE POUR 1000 Ω .M.....	94

LISTE DE TABLEAUX

TABLEAU 2-1: PARAMÈTRES D'ENTRÉE	15
TABLEAU 2-2: RÉCAPITULATIF DES VALEURS DE RÉSISTIVITÉ MESURÉES	18
TABLEAU 2-3: LONGUEUR D'ONDE DANS LE SOL EN FONCTION DE SA RÉSISTIVITÉ	28
TABLEAU 5-1: VALEURS DE LA GRILLE DE MISE À LA TERRE D'UN POSTE	81

RÉSUMÉ

Pour améliorer la précision des études de l'impact de la foudre sur la génération éolienne des réseaux électriques, il est nécessaire de développer des outils de simulation plus rapides, précis et d'utiliser des modèles de plus en plus sophistiqués.

L'objectif du travail exposé dans ce rapport est consacré à l'étude et la modélisation des systèmes de mise à la terre des installations éoliennes soumis à des transitoires de foudre.

Nous identifions et caractérisons tout d'abord les différents paramètres qui influencent le comportement des systèmes de mise à la terre, en particulier lorsqu'ils diffusent un courant de la foudre. Pour ce faire, un modèle électromagnétique issu de la théorie des antennes permet de représenter le comportement d'un système de mise à la terre dans le domaine fréquentiel.

Il permet de simuler à la fois les phénomènes électromagnétiques conduits et rayonnés. Sa mise en œuvre nécessite l'écriture de l'équation intégrale du champ électrique (EFIE). La formulation simplifiée est résolue par la méthode des moments.

Les modèles développés dans ce projet servent à étudier des phénomènes transitoires de réseau de mise à la terre des éoliens sur une large gamme de hautes fréquences pour des problèmes de la décharge électrique sur les installations éoliennes. Des solutions concrètes pour une meilleure appréhension des mises à la terre des éoliennes en minimisant les dommages causés par la foudre sont proposées.

ABSTRACT

To improve the accuracy of studies on the impact of lightning on the wind power grid generation, it is necessary to develop faster and more accurate simulation tools and to use more sophisticated models.

A direct lightning strike can cause damage to wind farms which are usually located in rocky and mountainous areas where the wind potential is high. These areas remain among the preferred targets of lightning strike which can discharge high current because of their geographical position. The work presented in this report is devoted to the study and modeling of the grounding systems of wind turbines subjected to lightning transients.

We first identify and characterize the different parameters that influence the behavior of grounding systems, especially when these systems are diffusing the current of a lightning. To do so, a model based on the antenna's theory is developed in the frequency domain. This model makes possible the simulation of both conducted and radiated electromagnetic phenomena. The formulation is based on the electric field integral equations (EFIE). The simplified equation is solved by using the method of moments.

The models developed in this project are used to study transient phenomena over a wide range of high frequencies to counter problems of electric discharge on wind farms. Concrete solutions for a better understanding of the grounding of wind turbines to minimize the damages caused by lightning are also proposed.

LISTE DES SIGLES ET NOTATIONS

Symbole	Grandeur Physique	Unité
MoM	Méthode des moments	-
EMTP	Electro Magnetic Transients Program	-
TEM	Transverse électromagnétique	-
MALT	Mise à la terre	-
L_g	Longueur d'une électrode	m
P	Profondeur d'un conducteur	m
d	Distance entre deux conducteurs	m
L_{TOT}	Longueur totale de conducteurs d'une grille	m
a	Rayon du conducteur de terre	m
N	Nombre de points de connexion	-
Z_s	Impédance de surface	Ω
ρ	La résistivité du sol	Ω/m
ρ_1	La résistivité de la couche supérieure du sol	Ω/m
ρ_2	La résistivité de la couche profonde du sol	Ω/m
ρ_m	La résistivité de la matière autour de l'électrode	Ω/m
μ_1	La perméabilité du milieu	H/m
μ_0	la perméabilité du vide	H/m
σ_1	La conductivité du milieu	S/m
ε_1	La permittivité du milieu	F/m
ε_0	La permittivité du vide	F/m
$\bar{\varepsilon}_1$	La permittivité complexe du milieu	F/m
σ_2	La conductivité du conducteur	S/m
ε_2	Permittivité du conducteur	F/m
r_m	Le rayon de la matière autour de l'électrode	m
I_{60Hz}	Courant 60 Hz total injecté dans la mise à la terre	A

$V_{60\text{Hz}}$	Potentiel du système de mise à la terre à 60 Hz	V
$R_{60\text{Hz}}$	Résistance de terre à 60 Hz,	Ω
R'	Résistance linéique d'une ligne	Ω/m
L'	Inductance linéique d'une ligne	H/m
C'	Conductance linéique d'une ligne	Ω^{-1}/m
G'	Capacitance linéique d'une ligne	F/m
I_n	Courant dans le point de connexion n ($1 \leq n \leq N$)	A
U_N	Potentiel électrique scalaire en un point d'injection N	V
I	Courant de foudre	A
I_0	L'amplitude du courant à la base du canal	A
τ_1	La constante de temps de front	s
τ_2	La constante de décroissance	s
Z_{mn}	Impédance mutuelle entre les points n et m	Ω
Z	Matrice impédance de taille $N \times N$ portant les termes	Ω
Z_{self}	Termes de la diagonale de $[Z]$ lorsque ceux-ci sont égaux	Ω
I_n	Courant dans le point de connexion n	A
I_l	Courant longitudinal dans un conducteur	A
L	Opérateur linéaire connu	-
D	Domaine de définition de L	-
g	Excitation connue du système considéré	-
H	Réponse du système considéré	-
\hat{h}	Approximation de h	-
N_s	Nombre de segments	-
Δ_m	Longueur du segment	m
F_n	Fonctions de base ($1 < n < N_s$)	-
α_n	Constantes définissant \hat{h}	-
$\langle u \ v \rangle$	Produit interne sur D	-
\tilde{I}_s	Courant imposé au segment source	A

\vec{E}_M	Champ électrique au point M	V/m
V_M	Potentiel scalaire au point M	V
(\vec{E}^d, \vec{H}^d)	Champ électromagnétique diffracté	-
(\vec{E}^i, \vec{H}^i)	Champ électromagnétique incident	-
\vec{j}	Densité de courant sortant d'un conducteur de terre	A/m ²
$\sigma(r)$	Charge surfacique	C/m ²
$\Phi(r)$	Potentiel électrique scalaire	V
$g_1(r, r')$	Fonction de Green pour un espace libre	-
$G_1(r, r')$	Fonction dyadique de Green pour un espace libre	-
$G(r, r')$	Fonction de Green prenant en compte l'interface 'sol/air'	-
$G_i(r, r')$	Terme dû à l'image du conducteur	-
$G_s(r, r')$	Terme correctif pour $G(r, r')$	-
$J_0; J_1$	Fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1	-
H	Le facteur de correction d'amplitude	-
Δt	Pas de simulation	s
T	Durée d'écoulement	t
T_{end}	Durée du courant persistant	s
M	Point situé dans l'espace	-
P	Point situé sur la surface du conducteur	-
s	Vecteur unité tangent à la surface du segment	-
s'	Vecteur unité le long de l'axe du segment	-
r	Position d'un point sur l'axe du conducteur	-
r'	Position d'un point en surface du conducteur	-
w	Pulsation de l'onde	Hz
f	Fréquence de l'onde	Hz
λ	Longueur d'onde dans le sol	m/s
λ_0	Longueur d'onde dans le vide	m/s
K^n	Coefficient de réflexion	-

$\vec{A}(\mathbf{r})$	Le potentiel vecteur	v
-----------------------	----------------------	---

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1. Contexte de l'étude

Avec la crise pétrolière de 2008 et celle énergétique mondiale qui sévit, il est important de préconiser d'abord et avant tout, l'économie d'énergie par l'efficacité énergétique et la consommation responsable. De plus, en raison de la raréfaction des combustibles fossiles, et conformément au plan d'action dont se sont dotés le Québec et le Canada afin de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici les années futures, il est crucial de réduire la consommation de combustibles fossiles [1]. Ces raisons amènent les décideurs et chercheurs à envisager de plus en plus, l'utilisation des techniques de production d'énergie électrique issues des sources renouvelables comme l'eau, le soleil, le vent, la biomasse, etc.

Les sources d'énergies renouvelables sont abondantes et économiques. Elles représentent une option attrayante pour une électrification durable. Les sources d'énergies renouvelables sont souvent considérées comme des sources importantes d'énergie d'appoint.

Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie éolienne demeure celle qui a une croissance assez mature et la plus économique après l'hydroélectricité. Mais toutes ces énergies font face à un défi majeur : celui de la foudre.

Les premières recherches relatives à la protection des éoliennes contre la foudre ont été entreprises à la fin des années 1970 et au début des années 1980 aux États-Unis [2]. Les premiers rapports étaient axés sur la protection contre la foudre d'une éolienne à axe vertical. Une conception sensiblement différente de la machine à axe horizontal maintenant en utilisation répandue. Au cours des années suivantes, d'autres études ont

été menées sur les machines plus similaires aux conceptions modernes. Jusqu'en 1994, un certain nombre de documents indiquaient qu'il n'existait aucune trace de foudre sur une éolienne et, à ce titre, l'échelle du problème n'était pas connue.

Plus récemment, des travaux considérables ont été entrepris pour examiner les applications à la protection des éoliennes à la suite d'une décharge de la foudre.

On peut affirmer que les éoliennes sont vulnérables aux dégâts de la foudre. En conséquence, il est important que leurs protections soient traitées de façon optimale pour qu'elles répondent aux normes de fiabilité, et de sécurité. Les exigences de fiabilité des éoliennes deviennent de plus en plus importantes vu que la place qu'occupe l'énergie éolienne dans le bilan énergétique global ne cesse de croître. Prenant en compte l'emplacement et la taille des éoliennes aujourd'hui, leur protection contre la foudre est devenue une question de grande envergure.

La démarche classique pour estimer l'effet de cette onde électromagnétique sur le réseau et son environnement est de calculer l'évolution temporelle et fréquentielle de plusieurs grandeurs électriques y afférentes. Chaque élément du réseau à étudier est représenté par un modèle numérique, basé sur la connaissance de son comportement. La validité des résultats obtenus lors d'une étude dépend beaucoup de la rigueur des modèles utilisés. Une attention particulière doit être portée à la définition du modèle des systèmes de mise à la terre, car ceux-ci jouent un rôle crucial dans la réponse du système électrique foudroyé.

Afin d'étudier ces phénomènes électromagnétiques, de nombreuses études théoriques et campagnes expérimentales ont toujours été menées. Cependant, devant le coût de certaines expérimentations et la complexité de certains cas, les simulations numériques ont pris une place de plus en plus importante lors des dernières décennies. Ainsi, la modélisation et l'étude de problèmes complexes sont désormais possible via la simulation numérique.

1.2. Méthodologie et démarche scientifique

Dans ce travail, notre intérêt est porté sur la réponse transitoire de mise à la terre d'une éolienne excitée par une décharge orageuse (foudre). Ce sujet a déjà fait l'objet de plusieurs travaux publiés, consacrés majoritairement à l'analyse de l'augmentation du potentiel de la terre ainsi qu'à la variation de l'impédance transitoire.

Le deuxième chapitre aborde un bref rappel des notions théoriques les plus rencontrées dans la littérature. A cet effet, ce chapitre est dédié à la définition de la mise à la terre des différents éléments du réseau d'énergie éolienne. Les concepts d'exposition et de protection des éoliennes contre la foudre d'un point de vue technique et pratique sont mis en avant. Des méthodes d'analyses sont aussi mentionnées ainsi que les paramètres qui peuvent influencer le comportement d'un tel système, en particulier la nature du sol environnant et des fondations de la structure.

Le troisième chapitre présentera une méthode qui permet de construire une représentation d'un système de mise à la terre dans le domaine fréquentiel. Cette méthode s'appuie sur le modèle électromagnétique [3]. On définira donc les bases théoriques de ce modèle.

Le chapitre 4 présente, avec plus de détails, la méthode des moments qui sera utilisée dans notre cas pratique. On s'attachera à le valider pour des configurations de mise à la terre proches de celles qui équipent le réseau d'énergie électrique des éoliennes.

Enfin au dernier chapitre, à partir de la représentation fréquentielle d'un système de mise à la terre, nous montrerons la modélisation de son comportement temporel, son interaction avec le réseau. Cette approche est ensuite employée pour réaliser des études de coordination des grilles de poste et de parc d'énergie éolienne.

1.3. Problématique du sujet

Notre projet s'inscrit dans la problématique globale de la protection régulière et sécuritaire par les systèmes de mise à la terre des installations éoliennes.

L'une des questions posées sur ce système est de savoir comment procéder continuellement à la protection du système de mise à la terre pour une production d'énergie électrique sans interruption majeure?

Dans ce travail, notre intérêt est porté sur la modélisation des systèmes de mise à la terre des installations électriques éoliennes soumises à des transitoires de foudre. Les turbines éoliennes et les pylônes de transport sont sujets à des phénomènes de la foudre qui ne cessent de leur causer un problème majeur à cause de leur hauteur et de leur position géographique.

Il est donc essentiel que les systèmes de protection des installations éoliennes soient performants et réguliers pour assurer la continuité de la production en énergie électrique.

1.4. Limitation du sujet

Une fois que la problématique et les objectifs du sujet de recherche ont été définis, il y a malheureusement quelques limites qui seraient afférentes à la complexité du système sous investigation.

- notre projet de recherche se développe autour d'une interface sol/air. Malheureusement la majorité des sols n'a jamais été homogène. Face à la complexité des calculs qui en découleraient, nous nous sommes limités à notre hypothèse très conservatrice qui est le sol homogène, pour plus de simplicité;
- les installations éoliennes sont un ensemble de sous-systèmes qui s'interagissent à savoir la fondation, la tour, la machine génératrice. Mais notre étude se limite à la fondation qui demeure le seul élément pris en compte.

1.5. Objectifs du projet

- modéliser et identifier les paramètres des différents composants du système de mise à la terre des éoliens;
- calculer les différents paramètres des systèmes de mise à la terre : courants, tensions et impédances transitoire en fréquentiel comme en temporel;

- élaborez à partir du domaine fréquentiel, un modèle décrivant le comportement dynamique des systèmes de mise à la terre pour les études de transitoires des éoliennes en temporel;
- enfin, proposer des alternatives pour assurer une bonne continuité optimale du système de protection des installations éoliennes.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE DES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE DES INSTALLATIONS ÉOLIENNES

2.1. Le réseau éolien

Les éoliennes sont très souvent installées dans des zones hautes. Leur envergure et rotation en font des points d'impacts préférentiels pour la foudre. En cas de coup de foudre, l'extrémité de la pale doit absorber en quelques millisecondes des courants de 30 à 200 kA [4] ce qui va générer des températures locales pouvant aller jusqu'à 10000°C. Ce choc électrique et thermique peut détruire la pale et entraîner l'arrêt de l'éolienne. Au-delà de la diminution instantanée de la production d'électricité, le coût des réparations est si élevé qu'un système de protection performant devient indispensable pour assurer la productivité, la sécurité et réduire les coûts de maintenance.

Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux systèmes de mise à la terre du réseau électriques des installations éoliennes et nous insisterons sur la nécessité de développer un modèle représentant leur comportement pour les études de transitoire de foudre.

Nous allons tout d'abord préciser ce que désigne l'expression "système de mise à la terre". Nous identifierons les paramètres qui peuvent influencer le comportement d'un tel système, en particulier la nature du sol environnant, la nature des fondations de la structure, et la forme des courants mis en jeu.

Un bref rappel des origines et des conséquences du phénomène de foudre nous permettra ensuite d'aborder la question du comportement des systèmes de mise à la terre lorsque le réseau éolien est foudroyé.

Nous nous intéresserons finalement au fonctionnement de l'outil que nous utilisons classiquement pour les études de transitoires sur le réseau, dans l'optique de le coupler à un modèle de systèmes de mise à la terre.

2.2. Mise à la terre du réseau éolien

La protection par les systèmes de mise à la terre des installations éoliennes contre la foudre et les surtensions revêt une importance particulière dans la mesure où celles-ci, en raison de leur complexité, de leur hauteur et de leur position exposée, risquent d'être frappées par la foudre. Nous présentons ici ce que nous entendons désigner par l'expression, système de mise à la terre. Les configurations classiques de systèmes de mise à la terre équipant les réseaux éoliens, qui seront considérées tout au long de ce mémoire, seront décrites. On s'intéresse tout d'abord à la nature de leur environnement immédiat, c'est-à-dire le sol et les fondations de la structure.

2.3. Rôle des systèmes de mise à la terre

Les documents [5] définissent le rôle et les objectifs des systèmes de mise à la terre. D'une manière générale, il s'agit de relier les masses à la terre par l'intermédiaire d'un ou plusieurs conducteurs afin de permettre aux courants permanents et aux courants de défaut de s'y écouler.

Une bonne mise à la terre doit assurer:

- la sécurité des personnes à proximité des installations électriques éoliennes, notamment dans les zones fréquentées;
- la protection des équipements (qualité de service) ou des installations de tiers, reliés, ou à proximité;

Le courant à écouler dans le sol peut être de différente nature :

- un courant à fréquence industrielle (par exemple à la suite d'un court-circuit phase - terre);

- un courant harmonique;
- un courant transitoire d'origines diverses (foudre, manœuvre, etc...)

Un système de mise à la terre peut être composé d'un ou plusieurs sous-systèmes qui ne sont pas nécessairement connectés directement, mais qui sont mutuellement influencés par couplage électromagnétique. On représente ainsi en la figure 2-1, le cas d'un réseau éolien. On admet que les pylônes et les postes sont suffisamment éloignés pour que l'on puisse considérer séparément leur mise à la terre. Chaque système de mise à la terre est relié en un ou plusieurs points de connexion au réseau électrique.

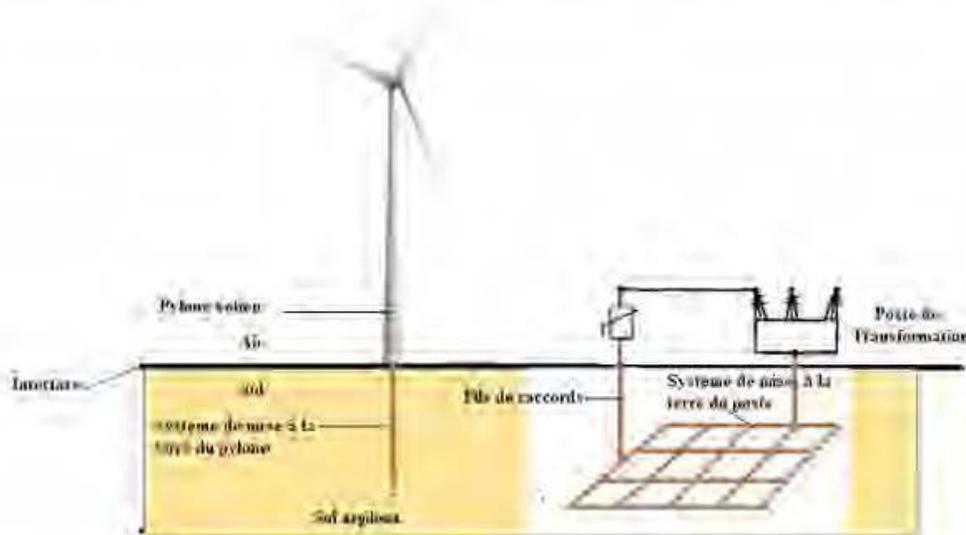


Figure 2-1 : Réseau éolien et mise à la terre de pylônes et d'un poste

Pour des systèmes de mise à la terre de faible étendue, comme c'est le cas pour les pylônes, on pourra parler de prise de terre. On caractérise souvent la capacité d'une mise à la terre à écouler un courant 60 Hz par sa « résistance de terre ». Il s'agit du rapport entre le courant total injecté $I_{60\text{Hz}}$ dans le système de mise à la terre et sa montée en potentiel $V_{60\text{Hz}}$ (comme nous le détaillerons plus tard, les éléments connectés du

système de mise à la terre peuvent raisonnablement être considérés comme étant équipotentiels à 60 Hz)

2.4. Configuration des systèmes de mises à la terre des éoliennes

La configuration d'un système de mise à la terre dépend de la nature de la structure connectée, de l'environnement, et des performances recherchées. Nous nous intéresserons ici aux prises de terre des pylônes d'énergie éolienne et des postes de transformation qui composent le réseau.

Le système de mise à la terre d'une éolienne unique est normalement réalisé en plaçant une électrode annulaire autour de la fondation et en la liant à la tour à travers la structure de la fondation. Conformément aux normes correspondantes [6], le diamètre minimal des électrodes de terre incorporées dans le béton est de dizaines de millimètres (acier rond plein). Des tiges verticales ou des électrodes en bande sont souvent utilisées avec l'électrode en anneau pour obtenir la valeur de résistance 10Ω pour un système de mise à la terre individuel d'une turbine.

L'interconnexion des systèmes de mise à la terre est souvent réalisée entre des éoliennes en reliant les systèmes entre eux. Une telle interconnexion forme un système d'électrodes de terre étendu occupant une grande surface et fournit une impédance beaucoup plus faible. Différents chercheurs [7] ont étudié les systèmes de mise à la terre d'éoliennes, y compris l'électrode étendue interconnectée dans des conditions de fréquence d'alimentation et de transitoire.

La référence [7] a effectué des mesures sur site de la résistivité du sol et du système d'électrodes de terre prolongées d'un parc éolien en utilisant la méthode de la pente [8]. Les valeurs mesurées de résistance à la terre étaient supérieures aux valeurs calculées obtenues à l'aide d'un circuit équivalent à paramètre local. Cette différence a été attribuée au remblayage des tranchées non compactées. Il a également été signalé que les conditions de résistivité du sol variaient considérablement d'un site à l'autre.

Voici en quelques sortes les différents systèmes de mise à la terre des éoliens.

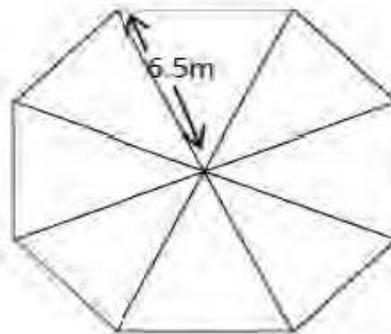


Figure 2-2 : Modèle de système de mise à la terre de base d'éolienne

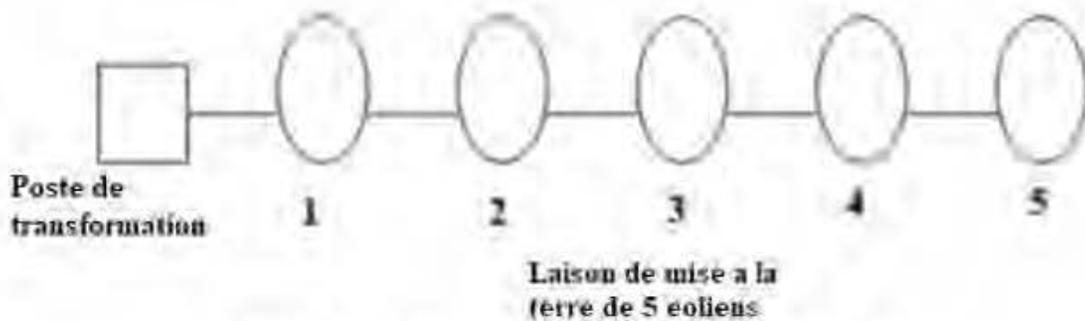


Figure 2-3 : Parc éolien terrestre avec 5 éoliennes

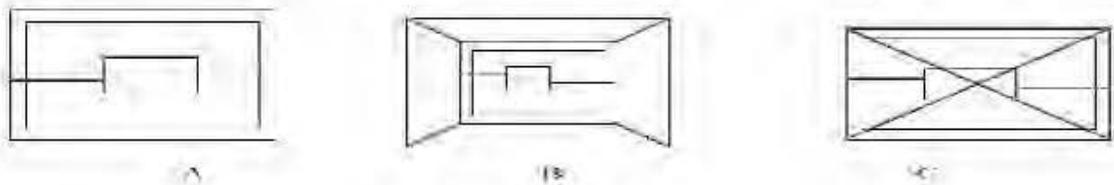


Figure 2-4 : Illustration du modèle de mise à la terre d'éolienne

2.5. Modèle de système de mise à la terre des éoliens

L'augmentation du nombre de parcs éoliens et la taille physique des éoliennes individuelles ont fortement accru la probabilité de foudre des structures de turbines. De ce fait, la protection des êtres humains, du parc et du matériel à proximité de ces

structures devient de plus en plus importante. Les éoliennes sont généralement construites sur des zones hautes où le potentiel éolien est élevé. Ainsi, le risque de foudre est important pour les éoliennes, qui sont par nature des structures élevées. Le courant de foudre traverse les pales, le rotor et la tour. Par conséquent, les systèmes de mise à la terre devraient être conçus pour les éoliennes afin d'éviter que les composants de la turbine et les personnes ne soient endommagés par des tensions dangereuses dues aux courants de foudre. Voici les modèles particuliers des figures 2-5 ; 2-6 ; 2-7 qui feront l'objet de nos études sur la protection des installations éoliennes [7].

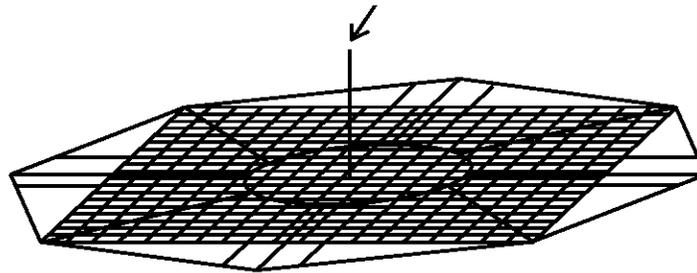


Figure 2-5 : Système de mise à la terre de base pour éoliennes

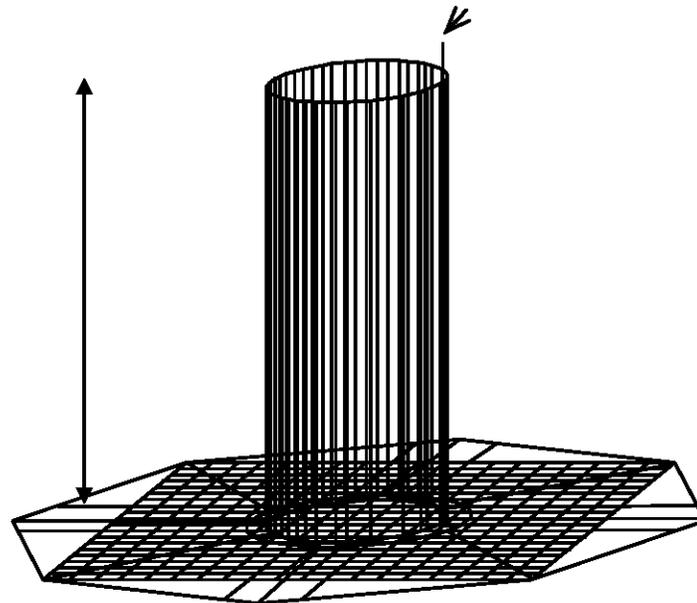


Figure 2-6 : Système de mise à la terre de l'éolienne avec tour complète

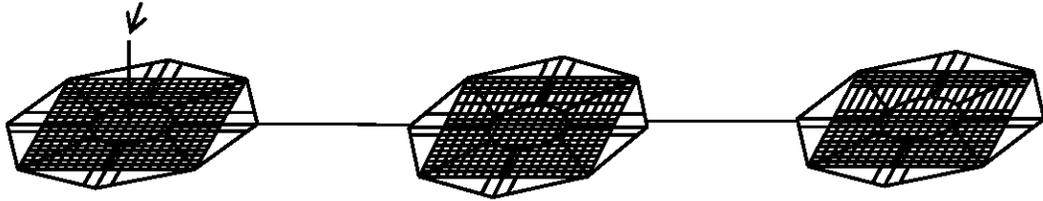


Figure 2-7 : Modèle étendu de mise à la terre

2.6. Cas des grilles sectionnées

L'une des mesures prises pour réduire l'augmentation du potentiel du réseau de mise à la terre consiste à augmenter la surface de la grille. Cela réduira l'impédance de mise à la terre du réseau, mais ceci a une limite au-delà laquelle toute augmentation supplémentaire de la surface n'entraîne aucune réduction du potentiel.

Nous considérons ici une grille carrée avec des dimensions comme illustrée à la figure 2-8. La grille est composée de plusieurs mailles carrées d'espacement s entre conducteurs, compris entre 5 et 10 m. Les conducteurs sont construits en cuivre avec un rayon de 7 mm. La grille est enterrée à une profondeur de 0.8 m dans un sol homogène dont la résistivité ρ est comprise entre 10 $\Omega\cdot\text{m}$ et 1000 $\Omega\cdot\text{m}$, et la permittivité relative ϵ_r .

Cette partie [9] propose la surface réelle générale basée sur des formules empiriques pour le coefficient d'impulsion et la surface effective de grilles de mise à la terre. Ceux-ci ont été dérivés de simulations numériques sur un grand nombre de cas de test pour les paramètres de la plage d'intérêt des cas pratiques (c'est-à-dire la résistivité du sol variant de 10 Ω à 1000 $\Omega\cdot\text{m}$, le côté de la grille carrée allant de 5-100 m, et la séparation des conducteurs qui varie de 5-10 m. Ensuite, la position de l'injection de courant : au centre ou au coin de la grille, et l'impulsion du courant de foudre allant du début jusqu'à sa valeur maximale comprise entre 0,8-8 μs).

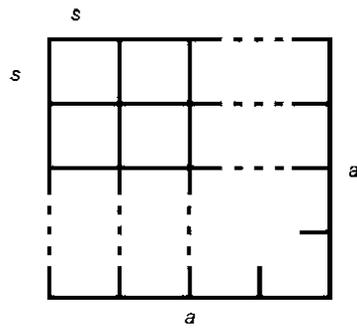


Figure 2-8 : Grille carrée choisie pour les calculs

La référence [10] définit la zone effective comme la limite de la zone de la grille de mise à la terre autour du point d'alimentation qui est efficace pour contrôler l'impédance d'impulsion.

Suivant la définition de Thapar, nous déterminons la surface effective de la grille qui est représentée par l'aire efficace a_{eff} . Pour cette raison, nous examinerons les zones effectives de la grille sous des formes illustrées sur la figure 2-9.

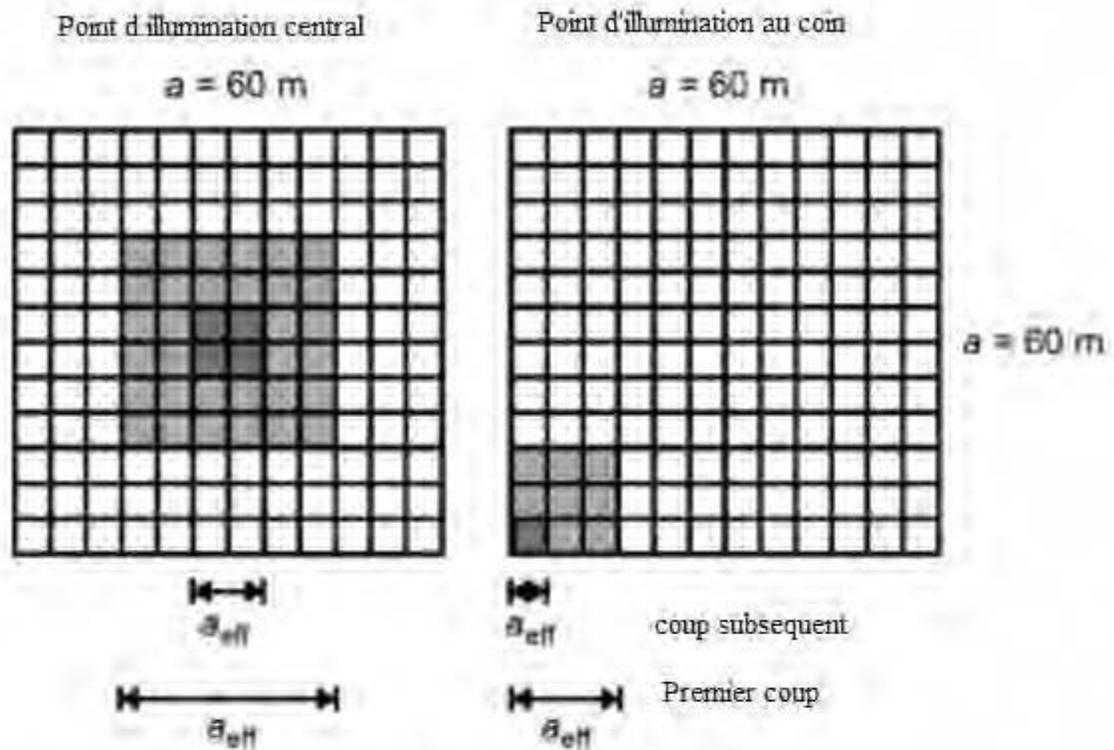


Figure 2-9 : Grille sectionnée

2.7. Formules empiriques

De nouvelles formules empiriques simples pour l'aire efficace a_{eff} et le coefficient d'impulsion A [9] sont déduites à partir des résultats de simulations. On a :

$$a_{eff} = k \exp[0.84(\rho T_1)^{0.22}] \quad (2.1)$$

- $K=1$ au milieu de la grille ;
- $K=0.5$ au coin de la grille.

$$A = 1 \text{ si } a \leq a_{eff} \quad (2.2)$$

$$A = \frac{a}{a_{eff}} \text{ si } a \geq a_{eff} \quad (2.3)$$

Tableau 2-1: Paramètres d'entrée

Paramètre	Symbole	Unité	Domaine de validité
Coté de la grille carrée	a	m	5-100
Résistivité du sol	ρ	$\Omega.m.$	10 à 1000
Impulsion du courant De zéro à son pic	T_1	μs	0.2-10

L'impédance d'impulsion peut être déterminée à partir de (2.1) à (2.3) pour une résistance de mise à la terre basse fréquence connue où :

$$Z = A \times R \quad (2.4)$$

Une comparaison des valeurs de A pour différents conducteurs d'espacement suggère de légers effets sur la plage considérée de valeurs de $s = 5-10$ m. De même, des données issues des simulations suggèrent une influence négligeable de la profondeur de la grille sur la plage de 0,5 à 1 m. On sait également que les rayons des conducteurs n'ont pas assez d'effet sur A . Tous ces effets sont négligés dans les relations de (2.1) et (2.3).

2.8. Mise à la terre des postes

La mise à la terre des postes de transformation est cruciale, tout d'abord parce qu'ils constituent chacun, un point clé du réseau sur lequel les incidents doivent rester exceptionnels et ensuite, parce qu'ils sont munis d'équipements onéreux et fréquentés par des opérateurs dont il faut assurer la sécurité. Une mise à la terre de poste classique est constituée d'une grille dont les dimensions approchent la centaine de mètres et dont le maillage est resserré autour des installations [11].

De nombreux éléments du poste sont connectés à la grille de mise à la terre (portiques, transformateurs, bâtiments ...). Cette configuration de type 'grille' permet de limiter les tensions de pas (liées au gradient de potentiel au sol) en maîtrisant la décroissance de potentiel autour de la structure (en 60 Hz) et d'obtenir une valeur de résistance de terre $R_{60\text{Hz}}$ inférieure à 10 Ω . [11]

2.9. Environnement : sol et fondation

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

2.9.1. Nature des sols

La nature des sols est très variée. Pour connaître précisément de façon locale, la topologie d'un terrain et la nature des différentes couches, on effectue des forages. Les données de forages ne sont valides que très localement (la nature du sol dépend beaucoup de la position géographique) et sont en pratique difficilement exploitables dans le domaine qui nous intéresse (il existe de nombreux types de sol et les caractéristiques électriques correspondantes ne sont pas évidentes à déterminer). De plus, pour des raisons financières, il n'est pas raisonnable d'envisager de réaliser un forage avant chaque installation ou réhabilitation d'un ouvrage. Pour le dimensionnement d'un système de mise à la terre, on se contente donc en pratique de mesurer localement les paramètres électriques du sol.

2.9.2. Caractéristiques électriques des sols

Comme pour tout milieu conducteur, le comportement électrique du sol est caractérisé par les trois grandeurs suivantes:

- la résistivité;
- la permittivité;
- la perméabilité.

a. La résistivité

Le sol est composé de plusieurs matériaux dont la proportion va avoir une influence sur chacune de ces grandeurs (notamment l'eau, dont la proportion varie en fonction du temps). La conduction dans le sol est principalement de type électrolytique. La résistivité électrique du sol, noté ρ , dépend de la densité de porteurs libres (ions) et est donc très étroitement liée à la pression, la température et plus que tout, au degré d'humidité. En général, plus le sol est humide et mieux il conduira l'électricité [12]. Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité d'un terrain. Notons qu'il existe également des méthodes de mesures indirectes, qui passent, par la mesure de la résistivité thermique du sol (les mesures de résistivité thermique des sols sont courantes en génie civil) [13].

Le tableau 2-2 [14] récapitule les valeurs de résistivité mesurées pour les principaux sols. On retiendra que ρ est compris entre 10 $\Omega.m$ et 10000 $\Omega.m$.

Tableau 2-2: Récapitulatif des valeurs de résistivité mesurées

Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)
Terrain marécageux	Quelques unités à 30
Limon	20 à 100
Humus	10 à 150
Tourbe humide	5 à 100
Argile plastique	10 à 70
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Marnes du jurassique	30 à 40
Sable argileux	50 à 500
Sable siliceux	200 à 3000
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 300
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Schistes	50 à 300
Micaschistes	800 à 5000
Granite et grès suivant altération	1500 à 10000
Granite et grès très altérés	100 à 600
Béton humide	50 à 100
Béton sec	2000 à 10000

b. La permittivité

La permittivité d'un matériau, notée ϵ caractérise son comportement diélectrique. Elle est fonction de la permittivité propre des différents composants du sol et de leur proportion. Dans la nature, le liquide polarisé le plus répandu est l'eau, dont la permittivité relative à 60 Hz est d'environ 80, contre environ 5 pour le quartz, constituant majeur des sols sableux. Comme c'est le cas pour la résistivité, la permittivité apparente d'un sol poreux est donc largement influencée par son taux d'humidité [15]. Pour les agronomes, la mesure de la permittivité apparente est même un excellent moyen de sondage non destructif du taux d'humidité des sols [16].

On dispose de plusieurs méthodes pour mesurer la permittivité apparente du sol, parmi lesquelles les deux plus utilisées sont [17]:

- la méthode TDR (Time Domain Reflectometry): On mesure la vitesse de l'onde électromagnétique dans le sol pour en déduire la permittivité du milieu;
- la méthode SCIP (Surface Capacitance Insertion Probe): Deux plaques parallèles sont plongées dans le milieu. La capacité C du condensateur ainsi créée est mesurée et permet d'estimer la permittivité du milieu à partir de la relation:

$$C = \epsilon_r \times g \times \epsilon_0 \quad (2.5)$$

Avec g une constante qui dépend de la géométrie de l'installation, ϵ_r la permittivité relative du milieu, et ϵ_0 la permittivité du vide. On retiendra que ϵ_r est généralement comprise entre 5 (sol sec) et 30 (sol humide) (ces valeurs ont été obtenues pour des fréquences voisines de 60 Hz) [18].

c. La perméabilité

On considère que le sol est constitué de matériaux amagnétiques (ce qui se vérifie toujours en pratique, sauf dans le cas de quelques roches riches en oxyde de fer comme la magnétite). Sa perméabilité relative μ est donc égale à 1 et nous ne considérerons plus ce paramètre dans la suite.

2.10. Le comportement diélectrique des fondations

La tenue mécanique des ouvrages (pylônes, postes, etc..) est assurée par des fondations en béton armé (béton dans lequel sont noyées des armatures en acier). Une question récurrente est la contribution des fondations dans la mise à la terre des structures. Les parties métalliques noyées dans le béton participent-elles à l'écoulement du courant dans la terre ou sont-elles isolées par le béton?

Comme pour le sol, la conduction électrique dans le béton est principalement de type électrolytique. Pour de grandes densités de courant, il peut y avoir apparition d'étincelles et d'arcs électriques, mais ces cas de non linéarité ne seront pas abordés ici. Nous considérons en effet que les ouvrages sont dimensionnés de telle manière que ces phénomènes n'apparaissent que très rarement, car s'il en était autrement, ils compromettraient gravement la tenue mécanique de l'ensemble [19].

Le béton est naturellement bon conducteur, en comparaison avec la majorité des sols naturels. Il est en effet hygroscopique (tend à s'imprégner d'eau) et son contenu électrolytique est riche. Les documents [20] notent que dans la majorité des sols, la résistivité du béton est approximativement la même, ou est inférieure, à celle du sol environnant.

2.11. Le phénomène de foudre

Les documents [4] présentent un état de l'art sur les caractéristiques et mécanismes du phénomène de foudre. Ces connaissances sont basées sur des observations et mesures de coups de foudre naturels ou déclenchés. Les structures éoliennes sont souvent placées en hauteur, endroits où ils sont malheureusement plus exposés à la foudre comme le montre la figure 2-10. Un facteur important de la puissance d'une éolienne est la hauteur de la tour. Puisque la vitesse du vent augmente avec l'altitude, elle augmente jusqu'à la hauteur de la tour. Ce qui entraîne une augmentation de la quantité d'électricité produite par celle-ci. Par exemple, en élevant un générateur de 10 kW d'une hauteur de tour de 60 pieds à une tour de 100 pieds pourrait produire 25% plus de puissance. C'est la raison pour laquelle les structures éoliennes sont souvent placées en hauteur, endroits où ils sont malheureusement plus exposés à la foudre. La figure 2-10 nous en renseigne [21].

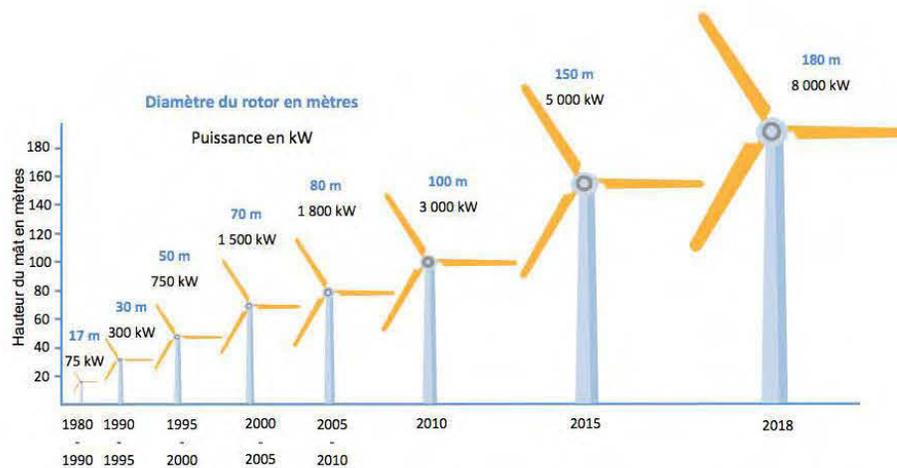


Figure 2-10 : Illustration de la hauteur du pylône éolien

La foudre est l'un des phénomènes naturels le plus fréquent et le plus spectaculaire. Depuis que Benjamin Franklin a démontré, il y a deux cents ans, qu'il s'agissait d'une gigantesque décharge électrique, nombreux sont les chercheurs qui ont étudié les nuages et les éclairs.

Pourtant, malgré la mise au point de nouveaux appareillages et de nouvelles techniques de recherche, certains mécanismes d'électrification des nuages pluvieux nous échappent encore. Benjamin Franklin avait mis le doigt sur l'une des difficultés fondamentales du problème.

En 1752, il observa que " les nuages d'une ondée orageuse sont le plus souvent dans un état d'électricité négative, mais parfois dans un état d'électricité positive ".

Depuis, on admet que la foudre est un transfert de charges électriques, soit positives soit négatives, d'une région, d'un nuage à une autre, ou entre le nuage et le sol.

D'une manière générale, l'origine de la foudre est un nuage orageux volumineux dont la base est chargée de façon opposée au sol. Lorsque le champ électrique résultant est suffisant, une pré-décharge peu lumineuse progresse en direction du sol (coup de foudre descendant) ou du sol vers le nuage (coup de foudre ascendant). Cette pré-décharge appelée traceur, se déplace par bonds à une vitesse variant de 2 à

6×10^4 m/s. Au moment où le traceur atteint le sol ou le nuage, un intense courant électrique s'engouffre dans le canal ionisé (c'est l'arc en retour). Plusieurs types de coups de foudre sont définis selon la polarité et la direction du traceur. Dans les régions à climat tempéré, 80 à 90% des coups de foudre sont négatifs (charges négatif). De plus, on rencontre généralement dans les plaines, des coups de foudre descendants, alors que les montagnes sont plus propices à des coups de foudre ascendants.

On représente en la figure 2-11 la classification des coups de foudre

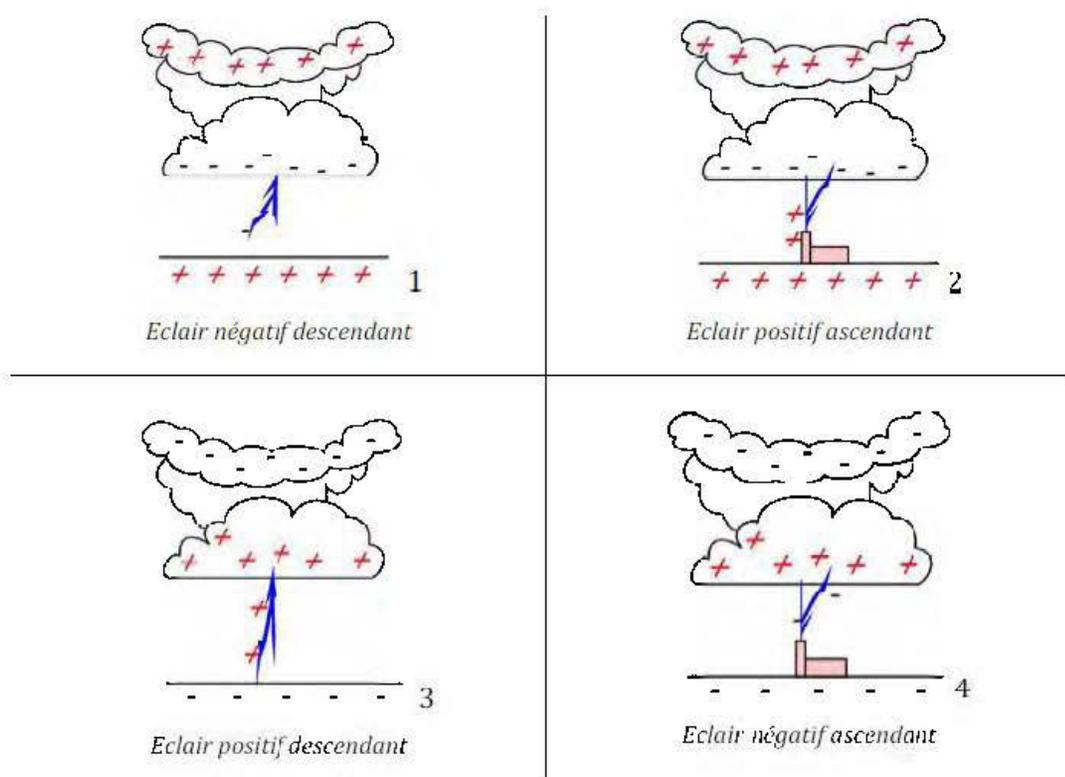


Figure 2-11 : Classification des coups de foudre

2.12. Le processus de la décharge négative nuage-sol

Le processus de la décharge négative nuage-sol représenté sur la figure 2-12 peut se scinder en 4 étapes :

- le traceur par bond;
- le processus d'attachement;
- l'arc en retour,
- le traceur continu et les arcs en retour subséquents.

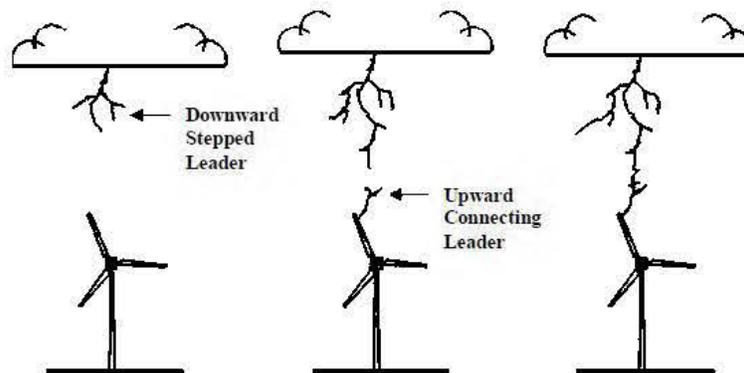


Figure 2-12 : Formation de flash descendant - étapes progressives

2.12.1. Le traceur par bond

Le traceur n'est qu'un pont suffisamment conducteur pour préparer la voie au coup de foudre proprement dit. Sa progression s'effectue par une succession de bonds lumineux ayant une longueur de quelques dizaines de mètres et d'une durée avoisinant la microseconde. Deux bonds successifs sont espacés d'une pause de l'ordre de 500 microsecondes. Chaque bond du traceur correspond à une impulsion de courant dépassant le kiloampère. Ces fluctuations de courant sont associées à des variations de champ électrique de l'ordre de 0,1 microseconde de durée. Au fur et à mesure de sa progression vers le sol, on assiste à une ramification de l'éclair.

2.12.2. Le processus d'attachement

Du fait de son potentiel élevé, le traceur à l'approche du sol provoque une intensification du champ de l'ordre de 500 kV.m^{-1} , et initie une ou plusieurs décharges ascendantes (upward-connecting leader) dont l'origine est liée aux aspérités du sol ou

aux structures. L'effet de pointe créé par les aspérités du relief (végétation, constructions, relief) favorise l'apparition des coups de foudre à cet endroit. Ce phénomène s'appelle l'effet de couronne.

2.12.3. L'arc en retour

Lorsque la jonction entre le précurseur ascendant et le traceur est établie, une onde de potentiel se propage du sol vers le nuage avec une vitesse de l'ordre $1.1 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ et neutralise le canal chargé par le traceur. Le premier arc de retour produit alors un courant au niveau du sol de valeur crête typique de 15 kA et d'une durée de quelques dizaines de microseconde. L'élévation rapide de la température du canal atteignant jusqu'à 30000°K provoque une onde de choc appelée tonnerre. Le premier arc de retour constitue, par son énergie, la plus grande manifestation lumineuse communément appelée éclair

2.12.4. Le traceur continu et les arcs en retour subséquents

Néanmoins, plusieurs décharges peuvent succéder au premier arc en retour (10 à 70 ms). Il s'agit des arcs en retour subséquents provenant d'une quantité éventuelle de charge résiduelle au sommet du canal. Il se développe dans ce même canal un traceur continu beaucoup plus rapide que le premier, appelé trait pilote. L'amplitude des arcs subséquents associés aux coups de foudre négatifs est inférieure à celle du premier arc de retour, tandis que leurs temps de montée sont beaucoup plus rapides. Entre deux décharges consécutives, il reste toujours un courant d'une centaine d'Ampère, appelé « courant persistant ». Ce phénomène, s'écoulant à travers le canal, est à l'origine des effets thermiques les plus importants.

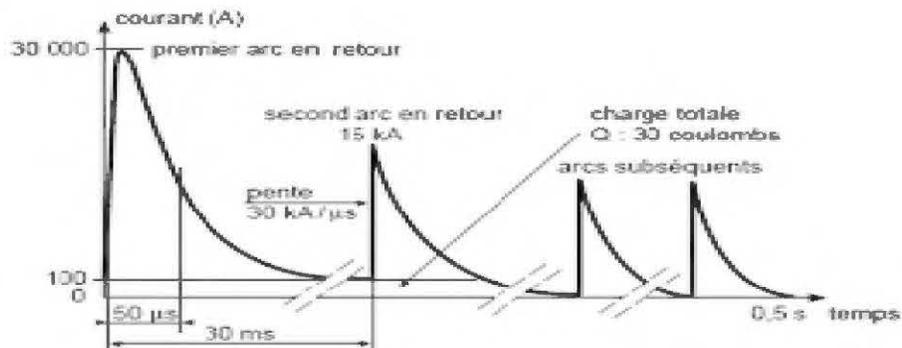


Figure 2-13 : Évolution du courant à la base du canal de foudre

2.12.5. Les effets de la foudre sur le réseau éolien

La foudre peut affecter les réseaux d'énergie éolienne par divers mécanismes d'agression :

- l'impact direct sur les conducteurs filaires : la décharge atteint directement les conducteurs de la ligne ; le courant de foudre se répartit dans la ligne et circule dans les deux sens. Il se crée alors des surtensions électriques fonction du courant de foudre;
- l'impact direct sur les pylônes : lorsque la foudre frappe directement un pylône de réseau éolien, le courant de foudre s'écoule à la terre. Le pylône subit alors une élévation de potentiel qui est fonction de l'impédance de mise à la terre du pylône.
- le rayonnement électromagnétique : la foudre génère un champ électromagnétique transitoire qui induit des surtensions sur les lignes de transmission aériennes proches. Du fait de la forte radiation électromagnétique générée, le courant des arcs en retour est considéré comme la source principale des surtensions induites. Ces surtensions occasionnent des dysfonctionnements et peuvent endommager dans certains cas, les circuits électroniques, les calculateurs et automates

On peut considérer que la décharge est constituée d'une ou de plusieurs impulsions de courant de très forte intensité (de quelques kA à plus de 100 kA pour la première impulsion) se superposant à un courant persistant.

2.13. Non linéarité et variation fréquentielle des paramètres électriques des sols

2.13.1. Phénomène d'ionisation

Si la densité de courant dans le sol dépasse un certain seuil, sa nature est modifiée par ionisation et il en résulte une baisse temporaire significative de sa résistivité apparente. Les références [22] s'intéressent en détail à ce phénomène. Des expérimentations ont été réalisées par plusieurs auteurs pour déterminer une valeur limite, E_0 du champ électrique dans le sol au-delà de laquelle il y a ionisation. Des références ont présenté un récapitulatif des mesures publiées entre 1958 et 1988 pour lesquels E_0 varie entre 50 kV/m et 1000 kV/m. Des chercheurs [12] mesurent $E_0 = 300$ kV/m, une valeur plus en accord avec la valeur 400 kV/m préconisée par le guide CIGRE. Une densité de courant encore plus élevée peut conduire à la vitrification du sol (fusion due à l'élévation en température et formation de fulgurite) et ainsi à une hausse locale de sa résistivité [23]. Contrairement à l'ionisation, les effets de la vitrification persistent même après extinction du courant de foudre. La vitrification s'observe principalement lorsque le coup de foudre tombe directement sur le sol, car dans ce cas, les densités de courant sont très élevées.

2.13.2. Paramètres électriques et fréquence

Dans la quasi-totalité des études consultées, dont l'ouvrage de référence de Sunde, on considère que les paramètres électriques du sol sont constants pour les fréquences qui nous concernent (de 0 Hz à quelques mégahertz). Seuls les auteurs qui s'intéressent à des fréquences de l'ordre du gigahertz s'accordent à noter une variation significative des paramètres électriques du sol avec la fréquence [17].

En marge de cette remarque, Portela présente en [24] une étude qui tend à prouver que ρ et ε varient sur [0 Hz -1 MHz]. D'après cet auteur, ces paramètres augmentent avec la fréquence f en suivant une loi de la forme:

$$\rho = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 \times \omega^{\alpha_3}} \times \omega \times \varepsilon = \alpha_4 \omega^{\alpha_3} \quad (2.6)$$

Avec $\omega = 2 \times \pi \times f$ et σ la conductivité du sol. Les constantes, α_1 , α_2 , α_3 , α_4 sont obtenues à partir de mesures.

2.13.3. Variation avec la fréquence d'un système de mise à la terre

Dès lors que la longueur totale des conducteurs enterrés (notée L_{TOT}) n'est plus insignifiante devant la longueur d'onde dans le sol λ , les conducteurs de terre ne seront pas équipotentiels et leur potentiel dépendra de la fréquence. Pour prendre en compte le comportement fréquentiel d'un système de mise à la terre connectée en n points au réseau, on propose de définir non plus une simple résistance R_{60Hz} , mais une matrice impédance $[Z]$. En notant $\bar{U}_n(f)$ et $\bar{I}_n(f)$, le potentiel électrique scalaire et le courant au point de connexion n ($1 \leq n \leq N$), on a :

- Si f telle que λ soit négligeable devant L_{TOT} ($f = 60$ Hz)

$$\bar{U}_1(f) = \bar{U}_2(f) = \bar{U}_3(f) = \dots = \bar{U}_N(f) = V_{60Hz}$$
- Si f telle que λ ne soit pas négligeable devant L_{TOT}

$$\bar{U}_1(f) \neq \bar{U}_2(f) \neq \bar{U}_3(f) \dots \neq \bar{U}_N(f) \neq V_{60Hz}$$

L'expression : $\bar{U}_1(f) \neq \bar{U}_2(f) \neq \bar{U}_3(f) \dots \neq \bar{U}_N(f) \neq V_{60Hz}$ est une représentation 'nodale' de la prise de terre. Ici Z_{mn} avec $1 \leq n, m \leq N$ est l'impédance mutuelle entre le point de connexion m et le point de connexion n c'est-à-dire la valeur du potentiel scalaire $U_n(\mathbf{f})$ si seul le point de connexion n était parcouru par un courant $I_n(\mathbf{f})$ unitaire. Remarquons que d'après le principe de réciprocité, la matrice impédance est symétrique. On a : $Z_{nm}(f) = Z_{mn}(f)$, $1 \leq n, m \leq N$.

La longueur d'onde dans le sol λ s'écrit:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (2.7)$$

Où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide et n est l'indice de réfraction du sol :

$$n^2 = |\bar{\epsilon}| = \left| \epsilon_r - j \frac{1}{2\pi\rho f \epsilon_0} \right| \quad (2.8)$$

avec $\bar{\epsilon}$, la permittivité complexe du sol, ϵ_r et ρ sa permittivité relative et sa résistivité, ϵ_0 la permittivité du vide, f , la fréquence de l'onde considérée, et $j = \sqrt{-1}$. Le tableau 2-3 donne, pour différentes fréquences, la longueur d'onde dans un sol de résistivité 50 $\Omega.m$ ou 200 $\Omega.m$ (calculée à partir de la relation (2.7) pour un sol de permittivité relative $\epsilon_r = 5$)

Tableau 2-3: Longueur d'onde dans le sol en fonction de sa résistivité

Valeur de la résistivité	Longueur d'onde	
	λ	
	$\lambda_{60\text{Hz}}$	$\lambda_{1\text{MHz}}$
50 $\Omega.m$	2.23km	15.8m
200 $\Omega.m$	4.46km	31.6m

On voit ici que pour une fréquence de 1 MHz, les dimensions des systèmes de mise à la terre considérées ne seront pas négligeables devant la longueur d'onde: la notion de résistance de terre ne sera pas rigoureuse pour les études de courants de foudre dont le spectre s'étale au-delà de 1 MHz.

Tant que la longueur d'onde est beaucoup plus grande que l'étendue d'un système de mise à la terre, les impédances sont égales à la résistance de terre $R_{60\text{Hz}}$. On parlera de comportement inductif si, lorsque la fréquence augmente, $[Z_{mn}]$ augmente, et de comportement capacitif dans le cas contraire. Un système de mise à la terre capacitif aura un meilleur comportement vis-à-vis de la foudre qu'une mise à la terre de même résistance de terre en basse fréquence, mais dont le comportement est inductif.

2.14. Les modèles de mise à la terre pour les études des transitoires

La nécessité de disposer d'outils de simulation du comportement des systèmes de mise à la terre valide en haute fréquence, notamment pour l'étude des phénomènes de foudre, a débouché sur le développement de plusieurs types de modèles. On présente une synthèse sur le sujet. Ces modèles sont souvent classés en trois groupes, selon leur origine:

- les modèles issus de la théorie des circuits;
- les modèles issus de la théorie des lignes;
- les modèles issus de la théorie des antennes, ou modèles électromagnétiques.

2.14.1. Les modèles issus de la théorie des circuits

Pour ces modèles, le principe est de diviser le système de mise à la terre en plusieurs éléments de longueur finie, et de modéliser chacun de ces éléments par un circuit électrique équivalent. Certains travaux permettent la prise en compte des couplages entre chaque élément. Les paramètres électriques des circuits équivalents (résistances, conductances, inductances, capacités) ainsi que leur couplage, sont calculés à partir de relations empiriques qui dépendent du niveau de raffinement choisi (prise en compte de la non homogénéité du sol, prise en compte de l'ionisation). Les lois de Kirchhoff sont ensuite appliquées pour le calcul des courants et des tensions aux nœuds. L'approche théorie des circuits est la plus simple et la plus facile à mettre en œuvre, puisque l'analogie avec des circuits électriques permet une intégration aisée aux logiciels tels qu'EMTP et Matlab. De plus, ces modèles permettent la prise en compte des phénomènes non linéaires (ionisation et/ou vitrification du sol). La théorie des circuits n'est néanmoins pas la mieux adaptée à nos besoins. En effet :

- les formules de décomposition ne sont en général valides que pour des configurations de prise de terre simples (grilles, antennes);

- les phénomènes de propagation sur chaque élément sont négligés. On se trouve dans le cas d'une approximation quasi statique, ce qui n'est pas nécessairement rigoureux en haute fréquence pour des systèmes étendus.

2.14.2. Les modèles issus de la théorie des lignes

Cette approche consiste à considérer le système de mise à la terre comme une ligne, ou un ensemble de lignes. Dans la plupart des cas, le terme « modèle issu de la théorie des lignes » désigne plutôt un modèle qui synthétise numériquement un système de mise à la terre comme un ensemble de lignes équivalentes.

Sunde est le premier à avoir proposé en [25] de modéliser un conducteur enterré par une ligne. Pour un conducteur enterré de longueur L_g , Les paramètres de lignes R, L, C, G sont calculés soit à partir de formules analytiques, soit à partir de calculs par éléments finis. Notons qu'initialement, cette approche était utilisée pour modéliser le comportement transitoire des contrepoids enterrés. Les modèles de systèmes de mise à la terre issus de la théorie des lignes sont plus rigoureux que ceux issus de la théorie des circuits, notamment en haute fréquence car ils prennent en compte les phénomènes de propagation. De plus, pour des mises à la terre assez simple, ils sont facilement exploitables dans les logiciels de calcul de transitoires sur les réseaux, qui sont à même de modéliser des lignes. Enfin, certains de ces modèles prennent en compte les phénomènes non linéaires dans le sol (ionisation, qui se traduit par une modification de la matrice R [26]).

Cette approche n'est pas la mieux adaptée à une structure complexe, pour laquelle le nombre de lignes devient important et les paramètres R, L, C, G deviennent difficiles à évaluer sans passer par une modélisation par éléments finis. On préférera alors les modèles de type électromagnétique, qui sont les plus rigoureux au niveau théorique.

2.14.3. Les modèles électromagnétiques

On appelle ici modèles électromagnétiques, les modèles directement basés sur les expressions rigoureuses de l'électromagnétisme dans le sol (équations de Maxwell). Ces expressions sont résolues soit par la méthode des moments [27], soit par éléments finis [28]. Du fait de la rigueur des expressions sur lesquelles ils sont basés, les modèles électromagnétiques sont ceux qui correspondent le mieux à la réalité, principalement en haute fréquence pour des configurations de prises de terre complexes. Le principal défaut de ces modèles provient de la complexité des algorithmes à développer et du temps de calcul nécessaire lors de la simulation. Le premier modèle électromagnétique des systèmes de mise à la terre a été présenté en [2]. Les équations de Maxwell sont discrétisées pour une fréquence donnée en segmentant la prise de terre (méthode des moments) afin de calculer la distribution du courant sur les conducteurs de mise à la terre, la matrice impédance $[Z]$, et le champ électromagnétique créé en chaque point du sol. Il s'agit du modèle que nous utiliserons, et il sera détaillé au chapitre suivant.

La méthode des éléments finis peut être utilisée comme alternative à la méthode de moments pour calculer la matrice impédance $[Z]$, d'un système de mise à la terre [28]. Cette seconde approche, qui consiste à mailler tout le milieu en N_v petits volumes, permet la modélisation de formes quelconques (y compris les formes qui sont difficilement divisibles en éléments filaires), et de phénomènes non linéaires dans le sol (ionisation). Une modélisation par éléments finis est néanmoins une tâche longue et complexe. Comme nous l'avons vu, les systèmes de mise à la terre que nous considérons peuvent être étendus et de forme complexe, et peuvent être segmentés en éléments filaires.

Le modèle électromagnétique reposant sur l'application de la méthode des moments présenté en [27] sera donc le mieux adapté à nos études.

2.15. Méthode d'amélioration de la résistivité du sol

La résistivité naturelle de certains sols est parfois si élevée qu'il est presque impossible d'obtenir une résistance satisfaisante avec les prises de terre. Pour réduire cette résistance, le sol peut être traité chimiquement par l'addition de certains éléments tels que le sulfate de magnésium, le sulfate de cuivre, le charbon, le sel, le chlorure de sodium, le chlorure de calcium, la limaille de fer, enrobage de béton et ainsi de suite. Divers autres additifs, y compris un mélange d'eau et de graphite, ont également été essayés. La réduction de la résistance de terre et le choix ultime dépendent du coût, de la disponibilité et de la résistance à la corrosion.

Remarquons que la norme [29] recommande les matériaux à utiliser comme électrode de mise à la terre et les risques de corrosion en présence d'autres matériaux dans le sol. Pour les mises à la terre, d'autres produits sont disponibles sur le marché pour ce faire. Dans tous les cas, il faut éviter une solution tendant à réduire les performances de la mise à la terre avec le temps. Le principal désavantage de la plupart des traitements chimiques est qu'ils attaquent et corrodent la plupart des métaux. Il permet d'accroître les dimensions apparentes de la prise de terre métallique elle-même et il entraîne une forte réduction de la résistance à la terre, souvent d'au moins 15 à 90%. Le sulfate de magnésium et le graphite n'ont presque pas d'effets corrosifs, mais d'autres additifs accélèrent généralement l'usure des prises de terre. Un autre désavantage consiste dans la plupart des traitements chimiques dissipés et transportés au loin par le drainage naturel dans le sol, le taux de cette dissipation dépendant du type et de la porosité du sol, ainsi que des précipitations. La durée utile de ce traitement chimique peut varier entre deux et cinq années ou plus. Des nombreuses solutions existent mais il nous faudra choisir celles qui minimisent le coût des installations, tout en respectant les normes. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons énumérer ces différents moyens et évaluer l'impact de l'amélioration des résistivités des mises à la terre qu'ils permettent. Plusieurs chercheurs [30] proposent une technique qui permet d'entourer l'électrode de terre d'une couche de matière peu résistive.

Cette matière ne devra pas causer une corrosion aux piquets métalliques (qui sont souvent en cuivre ou en acier inoxydable). Plusieurs produits de faible résistivité sont utilisés (la bentonite par exemple). La matière qui conviendrait et coûte moins cher dans les régions tropicales est le charbon de bois. La réduction de résistance justifie l'intérêt de bentonite. La note [31] a développé la relation analytique (2.9) pour évaluer la résistance d'une électrode verticale.

$$R_m = \frac{1}{2 \times \pi \times l} \left(\rho_m \left[\ln \left(\frac{r_m}{r} \right) + \rho \left[\ln \left(\frac{4l}{r_m} \right) \right] - 1 \right] \right) \quad (2.9)$$

où l est la longueur du piquet, ρ la résistivité du sol, ρ_m est la résistivité de la matière autour de l'électrode, r le rayon de l'électrode et r_m le rayon de la matière autour de l'électrode.

La résistivité électrique du charbon de bois a été évaluée avec des résultats dans plusieurs références. La référence [32] indique que les mesures effectuées sur un échantillon de la poudre de charbon de bois avaient donné une résistivité assez faible de quelques ohmmètres, dépendant de l'espèce du bois utilisée pour fabriquer le charbon de bois. Il est donc intéressant de faire usage de la poudre de charbon de bois autour des piquets de terre car la résistivité diminue avec la baisse de la taille des grains.

La référence [33] propose une méthode de réduire la résistivité du sol et d'augmenter la teneur en humidité du sol (augmentation de la teneur en humidité de 5 à 10% abaisse la résistivité de façon significative). Une autre façon d'abaisser la résistivité est de traiter le sol avec le sel infiltré (sulfate de cuivre, le magnésium, chlorure de sodium). Cette méthode est plus durable et plus pratique que la précédente car elle implique beaucoup moins de travaux d'entretien. Les auteurs [34] ont proposé une technique basée sur les trous profonds dans le sol. Cette nouvelle technique a été appliquée dans les zones où la terre contient beaucoup d'eaux souterraines. Le puits de sol est formé par un tube métallique avec des ouvertures latérales qui permettent la pénétration d'eau

souterraine, qui a la capacité de recueillir l'eau et de mouiller l'environnement au tour du sol. Le principe des trous profonds est de diminuer la résistivité de la région du sol entourant la mise à la terre et donc de diminuer la résistance de mise à la terre. Cette technique a été appliquée à un système de mise à la terre et un bon effet a été obtenu. La figure 2-14 nous renseigne davantage [35].

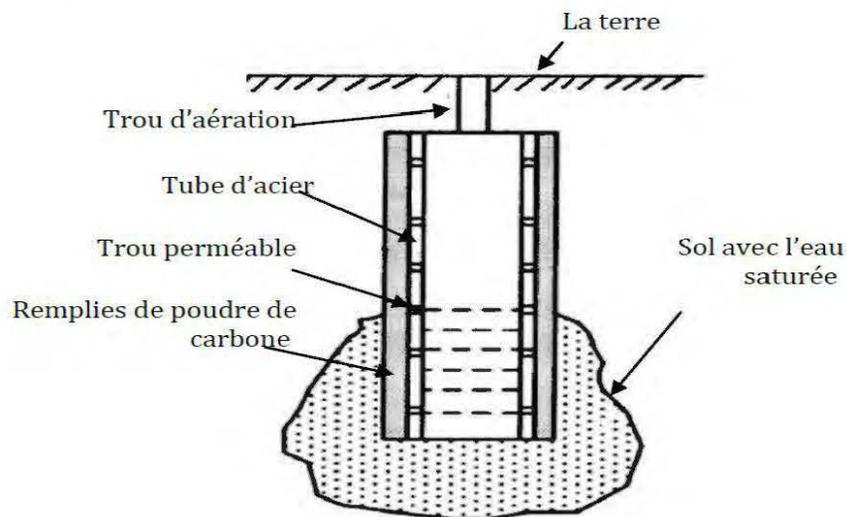


Figure 2-14 : Prise de terre avec trous profonds

Les chercheurs [36] ont développé la méthode d'explosion pour le cas des mises à la terre dans les régions du sol à très haute résistivité. Cette méthode nécessite trois étapes:

- forer des trous profonds dans la terre dans les coins de la région de la mise à la terre;
- faire des nombreuses fissures dans le sol à l'aide des explosifs (par exemple, les dynamites) dans les trous;
- remplir les trous par des matériaux de faible résistivité (matériaux d'amélioration de la mise à la terre) sous pression.

Ainsi une structure en arbre d'un matériau à faible résistivité est formée sous la région de mise à la terre. Dans la phase finale, la partie supérieure des arbres est connectée à la grille de mise à la terre. Les éléments de traitement chimique du sol sont coûteux et l'amélioration obtenue par addition de ces éléments n'est pas particulièrement important lorsque la profondeur de l'électrode est faible. Par conséquent, Les auteurs [30] ont proposé une méthode qui utilise l'eau de la mer morte à la place de ces éléments. Dans cette approche, l'eau de la mer morte est ajoutée dans un trou autour de l'électrode à une distance n'excédant pas 10 cm jusqu'à un niveau de 30 cm de la surface du sol.

Pour réduire encore la résistance de terre, ils ajoutent l'eau de la mer morte avec le charbon et de la limaille de fer. Le charbon et la limaille de fer ne sont pas chers et en plus sont disponibles. Ainsi, l'eau de la mer morte doit être renouvelée toutes les deux années en fonction de la porosité du sol et de la quantité de pluie

2.16. Mise à la terre dans le sol non homogène

En pratique, la résistivité du sol n'est pas homogène, le sol est constitué de plusieurs couches de résistivités différentes. Ce paragraphe a pour but de donner la modélisation des sols en couches dans le but d'évaluer la résistance et les autres paramètres des mises à la terre. En général, les modèles du sol uniforme et à deux couches de résistivités différentes, sont les plus utilisés [36] mais pour plus de précision dans les calculs des mises à la terre, il est judicieux d'adopter le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes.

2.16.1. Sol en deux couches de résistivités différentes

La modélisation du sol en deux couches de résistivités différentes est la plus utilisée dans les calculs de mise à la terre comme le montre la figure 2-15

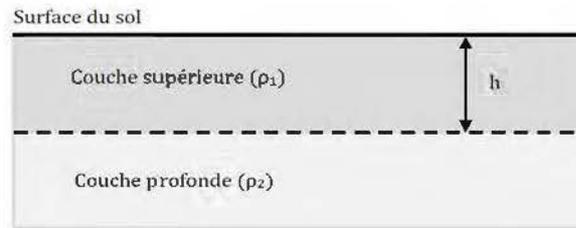


Figure 2-15 : Sol en deux couches de résistivités différentes

Depuis plusieurs dizaines d'années, des formules simples ont été développées pour calculer la résistance d'une mise à la terre en modélisant le sol en deux couches. La référence [8] établira une relation de la résistivité apparente du sol, donnée par la relation suivante :

$$\rho(a) = \rho_1 \left(1 + 4 \sum \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^n}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^n}} \right) \quad (2.10)$$

Avec la valeur de K qui est de :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.11)$$

a: La distance entre les électrodes de terre lors de la mesure;

h: La profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 ;

K^n : Coefficient de réflexion;

ρ_1 : La résistivité de la couche supérieure du sol;

ρ_2 : La résistivité de la couche profonde du sol.

Une autre méthode est proposée par [37]. Cette méthode basée sur la méthode des expressions finis de résistivité de Wenner. L'expression de série infinie de résistivité apparente est donnée par l'équation suivante :

$$\rho(a) = \rho_1 \left(1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{nh}{a}\right)^2}} \right) \right) \quad (2.12)$$

2.16.2. Sol en plusieurs couches de résistivités différentes

Cette modélisation de sol en différentes couches (elles peuvent être verticales ou horizontales) requiert des méthodes numériques ou graphiques car les méthodes analytiques sont limitées. On peut aussi considérer le sol comme uniforme en lieu et place du sol en plusieurs couches de résistivités différentes.

La résistivité apparente du sol supposé homogène peut, dans ce cas, être trouvée par les deux relations suivantes [36].

$$\rho_a = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) \dots + \rho_a(n)}{n} \quad (2.13)$$

où $\rho_a(1), \rho_a(2), \rho_a(3), \rho_a(n)$ sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de quatre électrodes.

$$\rho_a = \frac{\rho_a(max) + \rho_a(min)}{2} \quad (2.14)$$

2.17. Conclusion

Ce chapitre a exposé l'essentiel de notions théoriques rencontrées dans ce domaine. En premier, la notion de système de mise à la terre a été introduite brièvement. Ensuite, s'en est suivie une identification des paramètres qui peuvent influencer le comportement d'un tel système, en particulier la nature du sol environnant et la nature des fondations de la structure qui est présentée. Enfin, ce chapitre a été conclu par un bref examen des méthodes disponibles pour l'analyse du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre des installations éoliennes et des méthodes d'amélioration des sols.

CHAPITRE 3

REPRÉSENTATION FRÉQUENTIELLE DES SYSTEMES DE MISE À LA TERRE

3.1. Présentation et méthodologie

Notre objectif ici se résume à la nécessité de développer un modèle représentant le comportement des systèmes de mise à la terre des éoliens pour les études de transitoire de foudre dans le domaine fréquentiel.

Parmi les différents types de modèles de systèmes de mise à la terre, nous avons choisi de nous appuyer, pour notre travail, sur le modèle électromagnétique présenté par la référence [3]. Cette approche se plaçant dans le domaine fréquentiel, nous allons donc l'exploiter afin de construire une représentation du système de mise à la terre qui englobe les transitoires de foudre. Nous utiliserons pour cela une matrice impédance pour le calcul du champ et du potentiel en un point du sol.

Nous proposons ici de représenter dans le domaine fréquentiel un système de mise à la terre possédant plusieurs points de connexion avec le réseau éolien par une matrice impédance.

3.2. La détermination des paramètres

Considérons l'exemple d'un réseau éolien relié à un système de mise à la terre en n points de connexion. Sur la figure 3-1, I est le courant qui est injecté par la décharge électrique au réseau éolien de mise à la terre, au point de connexion n ($1 \leq n \leq N$) alors que U est le potentiel électrique scalaire de ce même point.

En considérant que le système de mise à la terre a une réponse linéaire en courant (ce qui revient à négliger les phénomènes d'ionisation du sol, hypothèse qui est discutée

plus loin), on propose de relier l'ensemble des tension $U_1 \dots U_N$ à l'ensemble des courant $I_1 \dots I_N$, par une matrice impédance de la forme).

$$\begin{bmatrix} U_1(f) \\ \dots \\ U_N(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(f) & \dots & Z_{1N}(f) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1}(f) & \dots & Z_{NN}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(f) \\ \dots \\ I_N(f) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$Z_{mn}(f)$ est l'impédance de connexion entre le point n et m pour la fréquence f .

3.3. Théorie des antennes

La méthode des équations intégrales, connue aussi sous l'appellation de théorie des antennes, est basée sur la résolution des équations de Maxwell, dans le domaine temporel ou fréquentiel, sous forme intégrale, dont l'inconnue est la densité de courant et échantillonnée par des éléments finis de frontières.

C'est une formulation surfacique. Il s'agit de déterminer les champs à partir des charges et des courants.

Dans la formulation intégrale, le champ électrique produit par les courants de surface est remplacé par son expression en termes de fonctions de Green, celles-ci n'étant autre que les solutions de la densité de courant. Cette méthode consiste à déterminer les distributions de courant induit à la surface d'une structure illuminée par une source connue, en mettant sous la forme d'une équation intégrale, la relation entre les courants induits, la fonction de Green et la source. Elle implique donc de connaître les sources de champ pour déterminer les distributions de courants à la surface de l'objet.

Une procédure numérique, basée généralement sur la méthode des moments (MoM), doit ensuite être appliquée pour déterminer la solution des équations intégrales. Une des caractéristiques principales de cette méthode est de réduire d'un degré, la dimension spatiale d'un problème. L'étude d'une structure volumique se résout par une approche surfacique ce qui rend cette méthode particulièrement bien adaptée aux domaines finis en milieu infini.

Déterminer le champ électromagnétique rayonné par un objet dans un certain volume de calcul revient à échantillonner la surface de cet objet et à déterminer les courants circulant sur cette surface, ce qui permet ensuite de trouver le champ électromagnétique rayonné par la structure dans tout l'espace [38]. Une formulation portant non plus sur les surfaces mais sur les interfaces de la structure peut être établie : c'est la méthode des éléments de frontière.

Par rapport aux méthodes volumiques, ce type de formulation ne rencontre pas de problème de troncature du domaine, ni de conditions aux limites d'espace ouvert. Ces méthodes sont donc mieux adaptées aux problèmes de propagation en milieu infini.

Cependant, elles nécessitent un traitement de résolution plus lourd que les méthodes volumiques, car elles génèrent des systèmes d'équations linéaires complexes et pleins, à l'inverse des méthodes volumiques dont les systèmes sont relativement creux.

En théorie des antennes, trois types d'équations intégrales sont proposées dans la littérature:

- l'équation intégrale en champ électrique EIFE (Electric Field Integral Equation);
- l'équation intégrale en champ magnétique MFIE (Magnetic Field Integral Equation);
- l'équation intégrale mixte EIFE-MFIE.

Cette dernière (EFIE) est bien adaptée pour les structures dites à fils minces de petit volume, tandis que le MFIE, qui échoue pour le cas de fil mince, est plus attrayante pour les structures volumineuses ayant de grandes surfaces lisses.

L'EFIE peut également être utilisée pour modéliser des surfaces et elle est utilisée pour représenter des surfaces de grilles métalliques avec un succès raisonnable. Pour une structure composée de fils minces et de surfaces, EFIE et MFIE sont couplés pour donner l'équation hybride EFIE -MFIE.

3.4. Modélisation d'une mise à la terre par la théorie des antennes

Dans le but d'analyser le comportement transitoire d'un réseau de mise à la terre, la référence [39] propose une approche basée sur la théorie des antennes dans le cas des fils minces. Bien que le formalisme en [39] soit plus général du point de vue mathématique, car il permet de tenir compte de l'interaction entre deux antennes filiformes, son fondement est inspiré de l'équation générale de Pocklington.

Pour cette étude, on propose d'utiliser des transformations temps-fréquence et inversement. La figure 3-1 représente une illustration de la situation physique du problème.

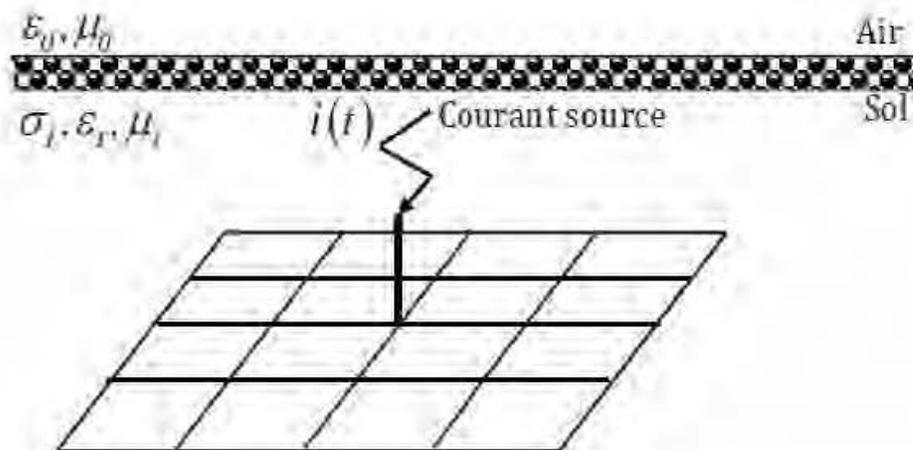


Figure 3-1 : Illustration de la situation physique

Si $i(t)$ représente le courant injecté en un point de l'électrode enterrée, sa réponse $x(t)$ est calculée suivant la formule :

$$x(t) = F^{-1}(W(j\omega))F[i(t)] \quad (3.2)$$

Où : F et F^{-1} sont respectivement la transformée de Fourier direct et inverse et $W(j\omega)$ est une fonction de transfert.

La distribution du courant dans le réseau enterré pour une excitation harmonique est déterminée par le modèle mathématique. Le champ électrique est calculé, dans le cas

où le réseau est considéré comme étant plongé dans un milieu conducteur infini, puis une correction est apportée à ce calcul afin de tenir compte de l'existence des deux demi-espaces.

3.5. Hypothèses

Plusieurs hypothèses fondamentales sont à la base du modèle électromagnétique que nous étudions :

- le sol est homogène ;
- les différents milieux ainsi que les conducteurs présentent des caractéristiques électriques linéaires, isotropes et invariantes avec la fréquence;
- la prise de terre doit pouvoir être considérée comme un ensemble de cylindres droits d'orientation diverses et connectés entre eux ou non. Adams précise que ces ensembles, que nous nommerons dans la suite 'segments', doivent respecter les conditions d'application de l'approximation des fils minces, c'est-à-dire que leur longueur doit être grande devant leur rayon et que leur rayon doit lui-même être petit devant la longueur d'onde

3.5.1. Homogénéité des sols

Nous avons vu au chapitre précédent qu'en pratique, les sols sont loin d'être homogènes, et que même s'ils le sont, la présence des fondations modifie localement les propriétés électriques du milieu dans lequel se trouvent les prises de terre. Certains modèles électromagnétiques permettent de définir un sol à deux couches [40] et il est courant de les associer à des méthodes qui permettent de ramener un sol réel à un sol équivalent à deux couches.

On se contente de considérer un sol homogène. Nous jugeons que cela n'est pas trop dommageable pour nos études en remarquant:

- qu'il est en pratique souvent difficile de déterminer les propriétés électriques et la géométrie de chaque constituant du sol ;
- que l'on puisse considérer que le béton des fondations a les mêmes propriétés électriques que le sol. Nous avons vu, en chapitre 2, que c'est un compromis conservateur, au vu de la nature hygroscopique du béton.

Cette hypothèse nous limitera tout de même aux cas qui ne sont pas trop éloignés d'un sol homogène.

3.5.2. Caractéristiques électriques du sol constantes

On admet que les caractéristiques électriques du sol (permittivité ϵ , perméabilité μ et résistivité ρ) sont constantes et indépendantes de la fréquence et de l'amplitude des courants électriques mis en jeu. Le modèle électromagnétique évolue en fréquentiel et est, par conséquent, mal adapté à la prise en compte des phénomènes non linéaires. Aucune solution n'a été proposée pour tenir compte des phénomènes d'ionisation. Ce défaut ne nuit pas trop aux performances du modèle électromagnétique si on considère que :

- il y a ionisation à partir d'un champ électrique seuil (de l'ordre de 1000 kV/m) qui est rarement atteint;
- l'ionisation a souvent une influence positive sur le comportement de la prise de terre (baisse locale de la résistivité du sol, si on exclut la probabilité d'une vitrification) et la négliger est donc une hypothèse conservatrice dans la majorité des cas.

3.5.3. Approximation des fils minces

L'approximation des fils minces consiste à modéliser un conducteur filaire par un fil sur son axe parcouru par un courant équivalent, afin de s'affranchir de l'intégration sur le périmètre du conducteur lors des calculs de champs. Cette approximation est basée sur les deux hypothèses suivantes.

- on considère que le courant dans le conducteur est axial. Ceci est vrai si le rayon du segment est petit devant la longueur d'onde. Le vecteur densité de courant est parallèle à l'axe;
- on suppose que le vecteur densité de courant \vec{j} est constant sur une section transversale du conducteur. On peut alors réduire la géométrie de la structure à un fil sur son axe, parcouru par un courant équivalent.

Ces hypothèses sont valides uniquement si le diamètre du fil est petit devant le chemin parcouru par l'onde électromagnétique durant le temps de montée du champ incident, ce que [41] a traduit par l'inégalité suivante : $(c\tau_m/a) \geq 3$ avec τ_m le temps de montée de l'onde incidente, c la vitesse de la lumière et a le rayon du fil. Dans le cas d'un fil dans le vide proche du sol, la référence [42] discute de l'erreur due à l'approximation des fils minces.

On peut raisonnablement considérer que les configurations de mise à la terre présentées au chapitre 2 peuvent être décomposées en éléments filaires soumis à l'approximation des fils minces.

3.6. Principe général du modèle

S'inspirant des travaux effectués en théorie des antennes, [39] propose en 1990, le modèle électromagnétique des systèmes de mise à la terre que nous utiliserons. Ils assimilent les prises de terre à des antennes enterrées et ils emploient la méthode des moments pour résoudre les équations de Maxwell.

Les spécialistes des antennes s'intéressent en effet, depuis longtemps, au comportement électromagnétique d'une structure filaire située proche du sol. Une approche classique consiste à :

- exprimer le champ électrique en surface du conducteur en fonction du courant longitudinal qui y circule (expression du champ électrique dans le vide en présence d'un sol parfaitement conducteur) ;
- résoudre l'équation intégrale obtenue grâce à la méthode des moments, proposée en 1968 par [27], pour déterminer la distribution du courant sur le conducteur d'antenne, le potentiel et le champ électromagnétique en tout point du milieu (diagramme de rayonnement de l'antenne).

3.7. Expression du champ électrique

Nous considérons un système de mise à la terre composé d'un fil mince de forme quelconque, illuminé par un champ électromagnétique incident (\vec{E}^i, \vec{H}^i) . La figure 3-2 présente le repère de coordonnées choisi.

Nous admettrons que le courant dans le conducteur est axial, donc porté par le vecteur \vec{s}' (approximation des fils minces).

Nous chercherons à obtenir une relation entre le champ électrique appliqué en surface du conducteur $\vec{s} \cdot \vec{E}^i$ et le courant longitudinal $I_l \vec{s}'$. Nous étudierons successivement, du plus simple au plus compliqué, les cas suivants :

- le conducteur filaire est un conducteur parfait (conductivité infinie) et il est plongé dans l'espace libre ;
- le conducteur filaire n'est pas parfait et il est plongé dans l'espace libre ;
- le conducteur n'est pas parfait et il est enterré dans un sol homogène.

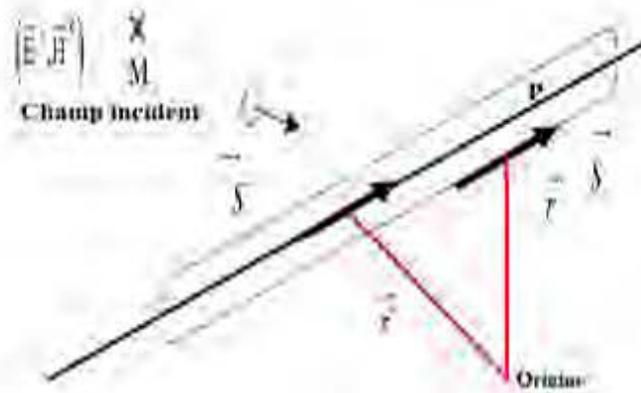


Figure 3-2 : Conducteur filaire

Nous notons les spécifications suivantes :

M : Point situé dans l'espace ;

P : Point situé sur la surface du conducteur ;

s^c : Vecteur unité tangent à la surface du segment ;

s^i : Vecteur unité le long de l'axe du conducteur ;

r^c : Position d'un point sur l'axe du conducteur ;

r^p : Position d'un point en surface du conducteur.

Soit une onde électromagnétique incidente $(\vec{E}^i(t), \vec{H}^i(t))$ illuminant le conducteur. Cette onde va induire dans celui-ci un courant, qui lui-même est à l'origine d'un champ électromagnétique diffracté $(\vec{E}^d(t), \vec{H}^d(t))$. Le champ électromagnétique total en un point M peut alors être présenté comme la somme du champ incident et du champ diffracté :

$$\vec{E}_M(t) = \vec{E}_M^i(t) + \vec{E}_M^d(t) \quad (3.3)$$

Avec t la variable temps. En admettant que les propriétés électriques du milieu sont linéaires, on peut raisonner dans le domaine fréquentiel

$$\vec{E}_M(f) = \vec{E}_M^d(f) + \vec{E}_M^i(f) \quad (3.4)$$

Avec f la fréquence de l'onde électromagnétique, qui ne sera plus écrite dans la suite pour alléger les notations.

Le champ électrique diffracté par le fil parcouru par le courant $I_l(r')$ et de charge surfacique $\sigma_l(r')$ en un point M, \vec{E}_M^d peut être écrit en fonction du potentiel électrique scalaire φ_M et du vecteur magnétique \vec{A}_M créé par la circulation du courant $I_l(r')$.

$$\vec{E}_M^d = -\overrightarrow{grad}(\varphi_M) - j\omega\vec{A}_M \quad (3.5)$$

Avec $\omega = 2 \times \pi \times f$

On aura en particulier si le point se situe sur la surface du fil (point P, repéré dans le plan par le vecteur r).

$$\vec{E}_p^d = -\left(\overrightarrow{grad}(\varphi(r)) + j\omega\vec{A}(r)\right) \quad (3.6)$$

Le potentiel vecteur $\vec{A}(r)$ et le potentiel scalaire φ_M sont développés sous la forme de potentiels retardés. Par intégration sur la longueur totale, on a :

$$\vec{A}(r) = \frac{\mu_1}{4\pi} \int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' \quad (3.7)$$

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \int \sigma(r') \cdot g_1(r, r') dr' \quad (3.8)$$

L'intégrale est prise sur la longueur totale du conducteur L_{TOT} (Longueur totale) et $g_1(r, r')$ est la fonction de Green pour un milieu homogène :

$$g_1(r, r') = \frac{1}{|r - r'|} \exp(-\gamma_1 |r - r'|) \quad (3.9)$$

$\gamma_1^2 = -\omega^2 \mu_1 \bar{\epsilon}_1$ avec σ_1 , μ_1 et ϵ_1 respectivement la conductivité (S/m), la perméabilité (H/m), et la permittivité (F/m) du milieu.

$\bar{\epsilon}_1 = \epsilon_1 + \frac{\sigma_1}{j\omega}$ est la permittivité complexe du milieu.

Les conditions aux limites imposent les relations suivantes pour le point P situé à la surface du conducteur parfait :

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_P = 0 \quad (3.10)$$

$$\vec{s} \wedge \vec{H}_P = \vec{0} \quad (3.11)$$

En reportant dans (3.3)

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_P = \vec{s} \cdot (\vec{E}_P^i + \vec{E}_P^d) \quad (3.12)$$

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_P^i = -\vec{s} \cdot \vec{E}_P^d \quad (3.13)$$

Ces relations nous permettent de relier le champ appliqué au champ diffracté. On a donc l'ensemble des équations :

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_P^i = -\vec{s} \cdot \vec{E}_P^d = -\left(-\overrightarrow{\text{grad}}\varphi(r) - j\omega\vec{A}(r)\right) \cdot \vec{s} \quad (3.14)$$

$$\vec{A}(r) = \frac{\mu_1}{4\pi} \cdot \int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' \quad (3.15)$$

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\bar{\epsilon}_1} \int \sigma_l(r') \cdot g_1(r, r') dr' \quad (3.16)$$

On peut, de plus, développer à partir des équations de continuité :

$$\sigma_l(r) = -\frac{1}{j\omega} \frac{\partial}{\partial r} \times \left(\vec{s}' I_l(r)\right) \quad (3.17)$$

L'expression du champ électrique diffracté devient alors sur la longueur totale:

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_P^i = \frac{j\omega\mu_1}{4 \times \pi} \cdot \int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr' + \frac{1}{4\pi\bar{\epsilon}_1} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \left(\int \sigma_l(r') \cdot g_1(r, r') dr' \right) \quad (3.18)$$

L'équation (3.18) est une équation intégrale du courant et est nommée 'Équation de Pocklington'. En posant ∇ l'opérateur dérivé spatiale, elle est souvent écrite dans la littérature.

$$\vec{E}_p^i \cdot \vec{s} = -\frac{1}{4\pi j\omega\bar{\epsilon}_1} [(\nabla\nabla - \gamma_1^2)(\int I_l(r') \vec{s}' \cdot g_1(r, r') dr')] \quad (3.19)$$

Dans cette expression du champ électrique à la surface du conducteur, le premier terme est dû à la distribution de charges et le second au courant longitudinal :

Cela montre que peut également être formulée :

$$\vec{s} \cdot \vec{E}_p^i = -\frac{j\omega\mu_1}{4 * \pi} * \int I_l(r') \cdot G_1(r, r') dr' \quad (3.20)$$

Où $G_1(r, r')dr'$ est la fonction dyadique de Green pour un milieu homogène et \vec{s} exprime :

$$G_1(r, r') = \left(\left[\frac{1}{\gamma_1^2} (\vec{s}' \cdot \nabla) \cdot (\vec{s}' \cdot \nabla) - \vec{s} \cdot \vec{s}' \right] \right) g_1(r, r') \quad (3.21)$$

3.7.1. Conducteur avec pertes dans un milieu homogène

Si on considère la présence de pertes dans le conducteur, il faut tenir compte dans les conditions aux limites d'un champ électrique dû à l'impédance de surface d'un segment, notée Z_s .

$$\vec{s} \cdot (\vec{E}_p^i + \vec{E}_p^d) = I_l(r) Z_s \quad (3.22)$$

Si σ_2 , et ϵ_2 représentent respectivement la conductivité (S/m) et la permittivité (H/m) du conducteur et 'a' le rayon du segment alors Z_s est donnée par l'expression :

$$Z_s = \frac{\lambda_2}{2\pi a(\sigma_2 + j\omega\epsilon_2)} \times \frac{J_0(\lambda_2 a)}{J_1(\lambda_2 a)} \quad (3.23)$$

Avec $\omega^2(\mu_2\bar{\epsilon}_2 - \mu_1\bar{\epsilon}_1)$, J_0 et J_1 sont les fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1.

L'équation (3.23) devient alors :

$$\vec{s} \cdot (\vec{E}_p^i) = I_l(r) \cdot Z_s - \vec{E}_p^d \cdot \vec{s} = -I_l(r) \cdot Z_s - \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \times \int I_l(r') \cdot G_1(r, r') dr' \quad (3.24)$$

3.7.2. Conducteur enterré pour sol homogène

De nombreuses études théoriques traitent des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques dans le sol. On citera en particulier les travaux de Sunde, qui a proposé, en 1968, un ouvrage de référence sur le sujet [43], ainsi que ceux plus récents de Dawalibi [40].

Expression rigoureuse

Le cas d'un conducteur situé dans un sol homogène est différent car il faut prendre en compte l'interface 'sol/air' dans le développement de l'équation intégrale du courant. Le comportement des conducteurs plongés dans un demi-espace a fait l'objet de nombreuses études et Sommerfeld a proposé une approche qui fait aujourd'hui l'unanimité. L'idée est de remplacer l'expression de $G_1(r, r')$ dans l'équation intégrale (3.24) par une fonction $G(r, r')$ prenant en compte l'interface 'sol/air'. De la présence de cette interface résultent de nombreuses réflexions du champ électromagnétique, ce qui implique une expression de type intégrale $G(r, r')$ complexe d'emploi si l'on ne fait aucune approximation. Miller a proposé de décomposer le calcul de $G(r, r')$ de la façon suivante:

$$G(r, r') = G_1(r, r') - G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (3.25)$$

Dans cette expression : $G_i(r, r')$ est la fonction qui tient compte de l'image du courant dans le conducteur due à l'interface 'sol/air' ;

$G_s(r, r')$ est un terme correctif exprimé sous la forme d'une intégrale de Sommerfeld. Dans la formulation (3.25), le calcul de l'intégrale $G_s(r, r')$ de Sommerfeld est très complexe. La majorité des modèles utilise donc une simplification pour la prise en compte des interfaces entre les différents milieux. Il s'agit de la méthode des images.

3.8. Méthode des images

Considérons deux milieux séparés par une frontière plane verticale et dont les caractéristiques électriques sont différentes. Un conducteur filaire parcouru par un courant I_l est situé dans le milieu 1, comme présenté en figure 3.3-a. En appliquant les conditions aux limites sur le champ électrique dans le milieu 1 (composante tangentielle continue), la référence [44] se ramène à un milieu homogène possédant les mêmes caractéristiques que ce milieu 1 et pour lequel toute source de courant dans ce milieu a une image symétrique par rapport à la frontière (figure 3.3-b) et d'amplitude :

$$I_l' = \frac{\underline{\varepsilon}_2 - \underline{\varepsilon}_1}{\underline{\varepsilon}_2 + \underline{\varepsilon}_1} I_l \quad (3.26)$$

Avec $\underline{\varepsilon}_n = \rho_n + j\omega\varepsilon_1$ la permittivité complexe du milieu n ($n = 1,2$). Dans notre cas, le milieu 1 est le vide (air), donc $\underline{\varepsilon}_1 = \varepsilon_0$ soit $I_l' = \frac{\underline{\varepsilon}_2 - \varepsilon_0}{\underline{\varepsilon}_2 + \varepsilon_0} I_l$

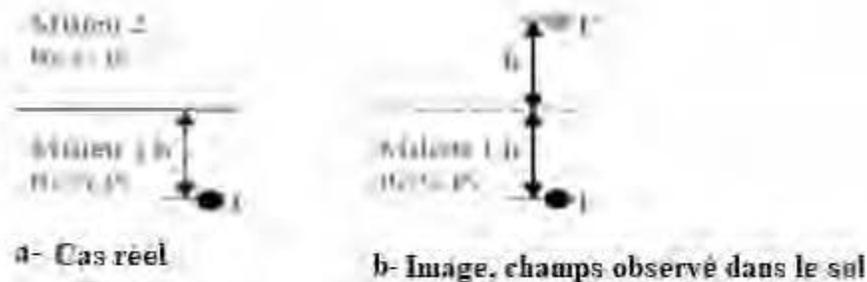


Figure 3-3 : Cas de méthode des images

Une représentation graphique de la méthode des images est présentée en [45]. On peut montrer que cette méthode revient à négliger le terme $G_a(r, r')$ dans l'expression de la fonction-dyadique de Green pour un sol homogène (3.25):

$G(r, r') \approx G_1(r, r') - G_i(r, r')$ ce qui n'est strictement rigoureux que pour une fréquence nulle et peut introduire de grandes erreurs en haute fréquence. Le modèle qui sera employé considère un sol homogène et traite le problème d'interface air/sol par la méthode des images que nous venons de décrire. La méthode des moments est alors appliquée pour calculer la distribution du courant sur les conducteurs de terre à partir de l'équation (3.24). On présente tout d'abord le formalisme de cette méthode avant de l'appliquer à notre cas.

3.9. Conclusion

D'un point de vue théorique, la mise à la terre est considérée comme un problème de diffraction électromagnétique. L'équation intégrale du champ électrique, établie dans le domaine fréquentiel, va être résolue numériquement par la méthode des moments. La présence de l'interface sol-air fait apparaître dans l'expression de la fonction de Green, un second terme de Green image et une intégrale infinie dite intégrale de Sommerfeld.

La modélisation par la méthode des moments, bien que très attrayante car elle nécessite uniquement la discrétisation linéaire de la structure métallique, conduit à un système matriciel plein et impose la nécessité du calcul des intégrales de Sommerfeld sur l'ensemble des segments après discrétisation. Ces contraintes sont l'inconvénient de cette méthode.

CHAPITRE 4

RÉSOLUTION NUMÉRIQUE PAR LA MÉTHODE DES MOMENTS

4.1. La méthode des moments

Il est connu, en électromagnétisme, que le calcul du champ électromagnétique rayonné (émission) par une antenne excitée par un générateur ou le calcul des courants induits (réception) par une onde électromagnétique sur une antenne par résolution d'une équation intégrale en champ électrique ou en champ magnétique dans une large gamme de fréquence est le formalisme le plus rigoureux.

Ce formalisme fréquentiel dit « des antennes » consiste à résoudre une équation intégrale par une technique numérique connue sous l'appellation de la méthode des moments. Elle est, par ailleurs, bien simplifiée lorsqu'il s'agit de dispositifs de natures filiformes.

Dans ce chapitre, nous proposons un exposé de l'essentiel de ce formalisme en l'adaptant théoriquement à l'analyse d'une structure filaire excitée par un générateur de courant ou agressée par un champ électrique exciteur.

4.2. Présentation de la méthode

Ce chapitre présente et décrit l'outil de simulation numérique qui a été développé pour modéliser et étudier, dans le domaine fréquentiel, le comportement des structures filaires soumises à une agression électromagnétique conduite (générateurs localisés) ou rayonnée (illumination par une onde).

Le but de la méthode est d'aboutir à la construction d'un système linéaire dont les inconnues sont les valeurs du courant en chaque point de la structure étudiée, et pour chacun des instants pour lesquels on désire connaître leur valeur. Dans ce but, on définit de fonctions test et un produit scalaire entre ces fonctions et celles intervenant dans le problème. Plusieurs alternatives sont possibles pour le choix de ces fonctions tests.

Pour des raisons de simplicité et de rapidité de convergence, la méthode de collocation a été très utilisée par de nombreux auteurs.

4.3. Application à la méthode des moments

L'idée de base, qui consiste à discrétiser une équation fonctionnelle linéaire pour la représenter par une équation matricielle linéaire, est relativement ancienne. Toutes les méthodes reprennent à leur compte sous différents aspects les mêmes théories mathématiques des espaces linéaires et des projections orthogonales sur des sous-espaces d'espaces fonctionnels.

Les plus connues sont la méthode des moments, la méthode des résidus pondérés, la méthode de Petrov-Galerkin. Des chercheurs en [46] donnèrent à Harrington l'idée de nommer sa méthode numérique « Méthode des Moments », équivalente elle aussi à la méthode variationnelle de Raleigh-Ritz.

La méthode de Galerkin, de même que la méthode variationnelle de Raleigh-Ritz, utilisent des fonctions de base et test identiques. Cependant, comme le constate Harrington, ce choix est en fait un traitement particulier, car il n'y a aucune raison valable pour que les fonctions de base et de test soient semblables, si ce n'est la facilité que procure ce cas particulier, pour prouver un certain nombre de théorèmes mathématiques, au détriment de la simplicité calculatoire [47].

Ainsi, lorsque les fonctions test sont identiques aux fonctions de base, ce procédé de calcul est connu sous le nom de la méthode Galerkin. Si le résidu (erreur entre la solution approchée et la solution exacte) est multiplié scalairement par lui-même (norme des résidus), la procédure s'appelle la méthode des moindres carrés. La plus simple des procédures de calcul est la méthode de collocation (ou point-matching), où la fonction test est la fonction impulsion de Dirac.

4.4. Principe de la méthode

4.4.1. Distribution du courant dans la prise de terre

- Formalisme de la méthode des moments

La méthode des moments se distingue par un formalisme. Présentée par Harrington en [27], c'est un outil mathématique qui permet la résolution d'équations linéaires inhomogènes de type :

$$L(h) = g \quad (4.1)$$

Où L est un opérateur linéaire connu et g est l'excitation connue appliquée en entrée du système dont la réponse h est à déterminer. La méthode de résolution consiste à discrétiser le problème en développant la grandeur inconnue h sur des fonctions de base et en vérifiant que la relation (4.1) est vraie sur un espace défini par des fonctions test.

4.4.2. Développement de la grandeur h sur des fonctions de bases

Le choix de fonctions de base (ou fonctions d'expansion) est dicté par un certain nombre de critères découlant directement du principe de la méthode des moments. Les fonctions de base doivent être choisies dans le domaine L de l'opérateur. Il faut, pour que la matrice $[L_{mn}]$ ne soit pas singulière, que les fonctions $L(h)$ soient linéairement indépendantes, et forment une base complète afin qu'il soit possible de représenter une fonction d'excitation f quelconque. Ce dernier critère implique que les fonctions soient linéairement indépendantes et forment-elles aussi une base complète. La fonction h est assimilée de façon approximative à un développement sur une série de N_s fonctions de base telles que :

$$h = \tilde{h} = \sum_{n=1}^{N_s} \alpha_n \cdot F_n \quad (4.2)$$

La détermination de h se réduit alors à celle des constantes α_n . La forme des fonctions de base définira la forme de l'approximation \tilde{h} de h

➤ Discrétisation de l'équation linéaire inhomogène

Grâce à la propriété de linéarité de l'opérateur L , l'équation (4.1) peut se mettre sous la forme suivante :

$$\sum_{n=1}^{Ns} \alpha_n \cdot L(F_n) = g \quad (4.3)$$

On choisit un produit intérieur dans le domaine de définition D de l'opérateur L tel que :

$$\langle u, v \rangle = \int u(s) \cdot v(s) \cdot ds \quad (4.4)$$

On fixe alors un autre ensemble de fonction, N_s fonction test $\omega_1; \omega_2; \dots \omega_{N_s}$ auxquelles on applique le produit interne pour transformer (4.3) en :

$$\sum_{n=1}^{Ns} \alpha_n \cdot \langle L(F_n), \omega_m \rangle = \langle g, \omega_m \rangle \quad (4.5)$$

$$m = 1 \dots N_s$$

On obtient le système matriciel

$$\begin{bmatrix} \langle \omega_1, L(F_1) \rangle & \dots & \langle \omega_1, L(F_n) \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \omega_{N_s}, L(F_1) \rangle & \dots & \langle \omega_{N_s}, L(F_{N_s}) \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_{N_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \omega_1, g \rangle \\ \dots \\ \langle \omega_{N_s}, g \rangle \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

avec la matrice $[\alpha_1; \alpha_2 \dots]$ qui représente les inconnus.

Ce système est de la forme :

$$[L_{mn}] \cdot [\alpha] = [g_m] \quad (4.7)$$

Et les inconnus α sont calculés à partir de la relation :

$$[\alpha] = [L_{mn}]^{-1} \cdot [g_m] \quad (4.8)$$

Pour faciliter le calcul des termes $\langle L(F_n), \omega_m \rangle$, la méthode dite du 'Point Matching' peut être utilisée. Elle consiste à prendre comme fonctions-test la distribution de Dirac :

$$\omega_m = \delta_m.$$

4.5. Calcul de la distribution de courant

La structure filaire étudiée est subdivisée en un nombre N_s de segments spatiaux de longueur Δ_m (figure 4.1) et on définit une fonction porte pour exprimer le courant inconnu.

Pour simplifier les calculs numériques, le développement des fonctions inconnues est effectué sur des bases discrètes, c'est à dire différentes de zéro uniquement dans un sous domaine.

On utilise des fonctions portes qui, pour un domaine D limité à une dimension, donnent le développement suivant :

L'expression du champ électrique dans le sol en fonction du courant dans le système de mise à la terre est de la forme (4.1) :

$$\vec{E}_p^i \vec{s} = L(I_i \vec{s}') \quad (4.9)$$

Où le courant longitudinal I_i est l'inconnu, $\vec{E}_p^i \vec{s}$ est l'excitation connue et L est l'opérateur linéaire :

$$L(I_i) = -I_i(r) Z_s - \frac{j\omega\mu_1}{4 \times \pi} \int I_i(r') G_1(r, r') dr \quad (4.10)$$

On peut donc appliquer la méthode des moments. On segmente tout d'abord le système de mise à la terre en N_s éléments filaires.

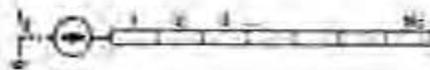


Figure 4-1 : Segmentation du système de mise à la terre

On décompose alors la distribution du courant le long des conducteurs de terre :

$$I \approx \hat{I} = \sum_{n=1}^{Ns} I_n F_n \quad (4.11)$$

Pour laquelle des fonctions de base F_n de type ‘portes’ sont choisies :

$$F_n(x) = 1 \text{ si } x_n - \frac{\Delta_n}{2} \leq x \leq x_n + \frac{\Delta_n}{2} \quad (4.12)$$

$$F_n(x) = 0 \text{ sinon} \quad (4.13)$$

Avec Δ_n la longueur du segment n on choisira, en suivant le formalisme de la méthode des moments, des fonctions-test de type ‘Dirac’ (‘Point Matching’), définies le long du conducteur par :

$$\omega_m(x) = \delta_m(x) = 1 \text{ si } x = x_m \quad (4.14)$$

$$\omega_m(x) = \delta_m(x) = 0 \text{ sinon} \quad (4.15)$$

La fonction δ_m est donc nulle, sauf au milieu du segment m . On voit déjà que, d’après ce qui a été dit sur la méthode du Point Matching on aura $I = \tilde{I}_i$ au milieu de chaque segment.

En définissant le produit interne : $\langle u, v \rangle = \int u \cdot \bar{v} dv$. Dans notre cas, il s’agit d’une intégration sur la longueur L_{TOT} du conducteur. On écrira sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \langle \omega_1, L(F_1) \rangle & \cdots & \langle \omega_1, L(F_{Ns}) \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \omega_{Ns}, L(F_1) \rangle & \cdots & \langle \omega_{Ns}, L(F_{Ns}) \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \cdots \\ \alpha_{Ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \omega_1, E^i \rangle \\ \cdots \\ \langle \omega_{Ns}, E^i \rangle \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

En intégrant sur la longueur totale, on a :

$$\langle \omega_m, L(F_n) \rangle = \int \omega_m(r) \times L(F_n(r)) dr \quad (4.17)$$

$$\langle \omega_m, E^i \rangle = \int \omega_m(r) \times E^i(r) dr \quad (4.18)$$

A partir de la définition des fonctions test ω_m on trouve alors :

$$\langle \omega_m, L(F_n) \rangle = L(F_n(r_m)) \quad (4.19)$$

$$\langle \omega_m, E^i \rangle = E^i_m(r_m) \quad (4.20)$$

On peut donc écrire (4.16) :

$$\begin{bmatrix} L(F_1(r_1)) & \cdots & L(F_{N_s}(r_1)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L(F_1(r_{N_s})) & \cdots & L(F_{N_s}(r_{N_s})) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \cdots \\ \alpha_{N_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E^i(r_1) \\ \cdots \\ E^i(r_{N_s}) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Dans ce système d'équations, le terme de droite correspond aux valeurs du champ électrique incident au milieu de chaque segment (coordonnées r_n).

En, on considère pour chaque segment n , une tension généralisée V_n définie comme le produit du champ $E_n^i(N_s)$ par sa longueur Δ_n :

$$V_n = -\Delta_n \vec{s} \cdot \vec{E}^i(r_n) \quad (4.22)$$

Nous ne considérons ici aucun champ incident (hypothèse 1 en 3.5) :

$$E^i(r_n) = 0 \quad (4.23)$$

avec $1 \leq n \leq N_s$; On transforme alors le système (4.18) en :

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1N_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N_s 1} & \cdots & Z_{N_s N_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \cdots \\ I_{N_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \cdots \\ V_{N_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Avec :

$$Z_{mn} = -\Delta_m \times L(F_n(r_m)) \quad (4.25)$$

Harrington appelle en [27] :

$[I_n]$ = Courants généralisés

$[Z_{mn}]$ = Impédances généralisées

$[V_m]$ = Tensions généralisées

Les termes Z_{mn} définissent les interactions électromagnétiques entre chaque segment. Ils ne dépendent que de la géométrie de la structure, des propriétés du milieu, et de la fréquence du courant excitateur.

Remarque : La tension généralisée prise le long du segment n est égale à la somme des contributions de chaque courant dans chaque segment m :

$$Z_{mn} = -\Delta m \times L(F_n(r_m)) \quad (4.26)$$

$$V_n = \sum_1^{Ns} Z_{mn} \times I_m \quad (4.27)$$

En développant l'expression de l'opérateur L, (4.10) on obtient :

$$Z_{mn} = -\Delta m \times L(F_n(r_m)) \quad (4.28)$$

$$Z_{mn} = -\Delta m \times L(F_n(r_m)) = -\Delta m \left[-F_n(r) \cdot Z_s - \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int F_n(r') \cdot G_1(r, r') dr' \right] \quad (4.29)$$

À partir de la définition des fonctions de base F_n , on trouve alors l'expression des impédances généralisées :

Sur la longueur du conducteur, on a :

$$Z_{mn} = \Delta m \cdot \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int G_1(r_m, r_n') dr_n' \text{ si } (m \neq n) \quad (4.30)$$

$$Z_{mn} = \Delta m \times Z_s + \Delta m \cdot \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int G_1(r_m, r_n') dr_n' \text{ si } (m = n) \quad (4.31)$$

En fixant $I_1 = I_s$ le courant source, on obtiendra enfin le système à N_s équations et (N_s-1) inconnues (courants dans les segments 2 à N_s) :

$$\begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{Ns1} & \cdots & Z_{NsNs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \cdots \\ I_{Ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \cdots \\ V_{Ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s \\ \cdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Une fois les impédances Z_{mn} et Z_s avec $0 \leq m, n \leq N_s$ déterminées, la distribution du courant est calculée simplement en résolvant de façon matricielle ce système.

4.6. Jonctions entre fils

De nombreux auteurs se sont heurtés avec plus ou moins de succès à l'étude de la diffraction d'une onde plane sur une structure filaire en croix. Ceci a fait l'objet de nombreuses publications. De ce fait, de nombreuses approches numériques et analytiques ont été développées pour prendre en compte la loi de Kirchhoff sur les courants.

Ainsi, cette méthode de collocation avec des fonctions de base triangulaire semble être inadaptée aux jonctions multiples, sauf si les fonctions-test sont elles aussi triangulaires. Un code développé, utilisant des fonctions de base rectangulaires et des fonctions de test impulsions, propose une méthode numérique pour traiter les jonctions multiples basées sur une redistribution des charges aux jonctions. En ce qui concerne les autres codes qui utilisent des fonctions de base et de test plus sophistiquées, le traitement des jonctions multiples peut être résolu par la procédure de chevauchement des segments (overlapping wires). Ce modèle de jonction, présenté dans [48], est l'un des plus performants. Il permet de respecter la loi de Kirchhoff de la théorie des circuits basse fréquence sur les courants de façon implicite sans ajout d'équation. L'exemple le plus simple pour illustrer une jonction est celui de la jonction d'un fil, avec lui-même sans changement de rayon. Une telle jonction peut être imaginée en tout point d'un fil rectiligne. Lorsque les fonctions de base et de test sont des fonctions triangulaires, linéaires ou sinusoïdales, chaque segment du fil supportant une fonction triangulaire

peut être considéré comme étant relié au segment suivant par une jonction s'étalant sur le support d'une demi-fonction triangulaire.

Une autre méthode a été développée. Elle est basée sur le traitement numérique des couplages entre segments.

Pour notre part, lorsque l'on étudie une structure présentant une jonction multiple, on considère un fil prolongé par un élément parcouru par un courant caractéristique de la jonction. Ce courant est obtenu à chaque pas de temps en appliquant la loi des nœuds à la jonction.

Lorsque l'on se trouve dans le cas d'une jonction, on doit s'assurer localement:

- du respect des lois de Kirchhoff ;
- de la continuité du potentiel électrique scalaire.

L'expression de Z_{mn} est alors modifiée localement à partir de la méthode de Schelkunof, qui consiste à remplacer localement l'équation de continuité en imposant pour chaque nœud de N_j conducteurs [49].

$$\sum_{i=1}^{N_j} I_i(\varepsilon) = -j\omega \int q(l') dl' \quad (4.33)$$

Le calcul de chaque impédance Z_{mn} est très coûteux en ressources informatiques, car il fait intervenir une intégrale de Sommerfeld. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature. On pourra, par exemple, utiliser la méthode de quasi Monte-Carlo. La référence [50] propose quant, à elle, de réaliser une estimation par interpolation à partir d'un ensemble de valeurs pré calculées pour l'intégrale.

Le modèle qui sera utilisé s'affranchit du calcul des intégrales de Sommerfeld en utilisant la méthode des images. On ramène l'ensemble des N_s segments situés dans un milieu non homogène (sol/air) à $2 \times N_s$ segments situés dans un milieu homogène. On associe, pour cela, à chaque segment original, son image. L'ordre du système (4.32) augmentera, mais les termes de la matrice impédance généralisée seront plus simples à calculer.

4.7. Avantages de l'application de cette méthode

La méthode des moments présente l'avantage de ne modéliser que le circuit (les structures métalliques), et non pas tout l'espace environnant. Ainsi, elle est la mieux adaptée pour la modélisation de fils minces (fins et longs). Cette méthode permet l'insertion facile de composants discrets dans la structure en définissant simplement l'impédance équivalente au niveau du segment correspondant.

Cependant, cette méthode est plus délicate lors de la résolution de problèmes avec diélectriques ou matériaux magnétiques. La MoM est une méthode fréquentielle. Ainsi, le traitement de problèmes non linéaires est impossible

4.8. Limites de la méthode des moments

4.8.1. Domaine de validité

Il se limite à un milieu linéaire, homogène isotrope, avec des éléments de longueurs caractéristiques $< \lambda$. De plus, la taille des objets étudiés ne doit pas dépasser quelques longueurs d'ondes pour que la simulation soit réalisable numériquement.

4.8.2. Temps de calcul

La méthode des moments fait partie des méthodes exactes. Cependant, une contrainte importante de la théorie des antennes est le temps de calcul qui peut devenir très vite difficilement réalisable.

A titre d'exemple, pour une fréquence de 4.1 Mhz, la méthode impose de décomposer le canal foudre en cellules élémentaires dont la longueur ne doit pas excéder 3 m.

Ainsi pour traiter le cas d'un canal foudre, de longueur moyenne 7.5 km, il est nécessaire de le décomposer en 2500 segments d'où l'augmentation de la taille de la matrice soit la taille de la mémoire. Si bien que la taille du problème est très vite limitée par les performances du calculateur utilisé. La méthode des moments sera donc appliquée à des structures de taille de l'ordre de quelques longueurs d'onde au maximum.

4.8.3. La complexité des équations

L'évaluation des différentes expressions intégrales et différentielles développées dans les équations à résoudre ne peut pas se faire directement sur ordinateur. Une mise en forme de ces équations est nécessaire. Cette mise en forme consiste généralement à faire un développement limité en série de Taylor des fonctions complexes et de procéder ensuite à l'intégrale ou à la dérivée de ces fonctions. Ceci est possible en adoptant des hypothèses sur les différentes grandeurs caractéristiques telles que les dimensions des fils conducteurs par rapport à la longueur d'onde. De plus, le modèle fil fin ne peut être appliqué que dans certaines conditions. D'autre part, le choix des fonctions de bases et tests conditionne la convergence et la précision de nos résultats.

4.9. Méthode de validation

L'objectif est d'utiliser le modèle électromagnétique dans le cadre de l'étude des phénomènes liés à la foudre. Le domaine fréquentiel de validation doit donc contenir l'essentiel du spectre de l'énergie diffusée par la foudre soit de 100 Hz à 1 MHz. Nous définirons, pour chaque simulation, plusieurs fréquences de calcul entre 100 Hz et 1 MHz. Les courbes fréquentielles présentées dans ce document correspondent aux valeurs calculées par le modèle électromagnétique pour chacune de ces fréquences, avec une interpolation linéaire entre chaque point.

4.10. Forme analytique du courant

Afin de pouvoir étudier le comportement transitoire des systèmes de MALT parcouru par une décharge orageuse et sa dissipation à travers un réseau de terre, il est important de connaître en premier lieu les caractéristiques du courant de foudre, ainsi que sa vitesse de propagation le long de l'arc en retour.

4.10.1. Le modèle bi-exponentiel

Le modèle bi-exponentiel est le premier modèle adopté et le plus utilisé dans la littérature. Les fonctions exponentielles, fréquemment utilisées par un certain nombre

d'auteurs, présentent l'avantage d'avoir des transformées de Fourier analytiques, ce qui permet de faire une analyse directe dans le domaine fréquentiel.

Les études ont permis de représenter mathématiquement le coup de foudre par un générateur de courant à la base du canal dont l'amplitude peut varier de quelques kA à quelques centaines de kA. Deux expressions analytiques sont les plus souvent utilisées pour représenter le courant à la base du canal. La forme d'onde bi-exponentielle est définie mathématiquement par la différence entre les deux exponentielles de décomposition :

$$I(t) = I_m(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.34)$$

Les paramètres α et β sont deux nombres constants en s^{-1} et I_m est un nombre constant défini en kA. La figure 4-2 représente l'allure du courant de forme bi-exponentiel

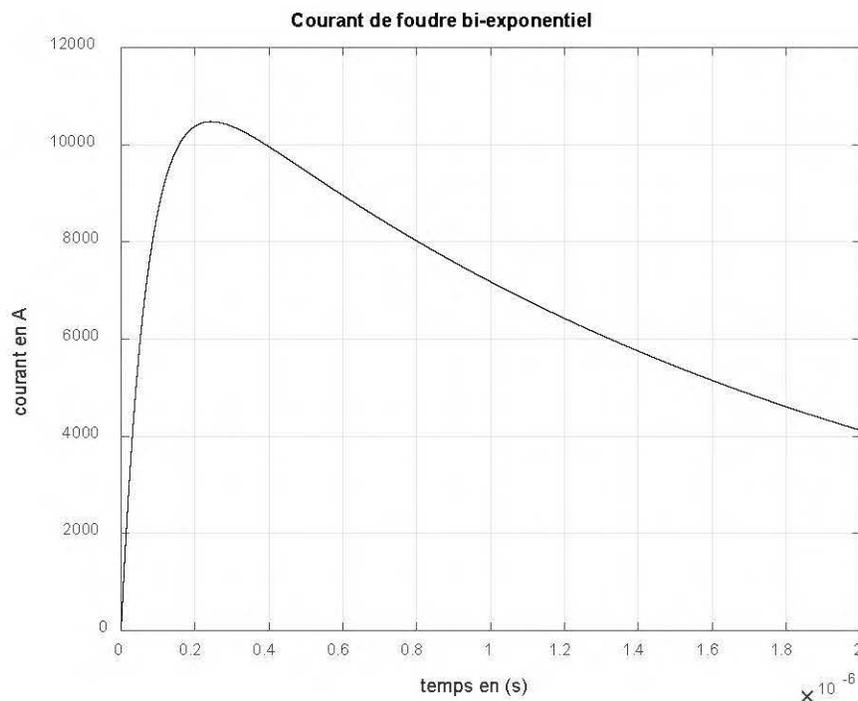


Figure 4-2: Forme du courant de forme bi-exponentiel

4.10.2. Modèle de Heidler

En 1985, Heidler a présenté une nouvelle expression analytique montrant le courant à la base du canal de foudre. L'utilisation de cette dernière a donné des résultats correspondant mieux aux observations expérimentales.

La forme analytique du courant de foudre d'Heidler, se compose de sommes de fonctions exponentielles. Ce type de fonction présente l'intérêt d'avoir une transformée de Fourier pouvant être calculée de manière analytique, ce qui facilite l'analyse dans le domaine fréquentiel.

L'expression du courant de foudre dite de forme de Heidler est de la forme :

$$i(t) = \frac{I_0}{n} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (4.35)$$

Avec la valeur de η qui est de :

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n\right) \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}} \quad (4.36)$$

n = Exposant ayant des valeurs comprises entre 2 à 10.

η = Le facteur de correction d'amplitude

I_0 = L'amplitude du courant à la base du canal

τ_1 et τ_2 représentent respectivement la constante de temps de front et la constante de décroissance

Une autre expression généralement utilisée pour décrire la forme d'onde à la base du canal proposé par Heidler dans le cas d'arcs subséquents est la somme de deux fonctions d'Heidler

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{n_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}} \exp\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right) + \frac{I_{02}}{n_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}} \exp\left(\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad (4.37)$$

4.11. Cas d'étude

Plusieurs types de prise de terre ont été étudiés lors de cette recherche. On s'intéressera ici au conducteur enterré horizontal et vertical. Les conducteurs ont une section de 50 mm², soit un rayon a= 4 mm.

Dans le but de tracer leur réponse fréquentielle, ces prises de terre ont successivement été soumises à des chocs de foudre déclenchée ou à une impulsion de courant générée par un générateur de choc. On a obtenu les caractéristiques $|Z_{11}(f)|$ de chaque prise de terre. On se trouve ici confronté au problème du choix de la résistivité et de la permittivité relative pour un sol homogène. Pour la permittivité relative, on utilisera les valeurs de permittivité relative qui sont de :10-30-50 qui définissent une gamme de valeurs cohérentes pour un sol de type argileux plus ou moins humide. Nous allons vérifier son impact sur le système de mise à la terre de faible étendue.

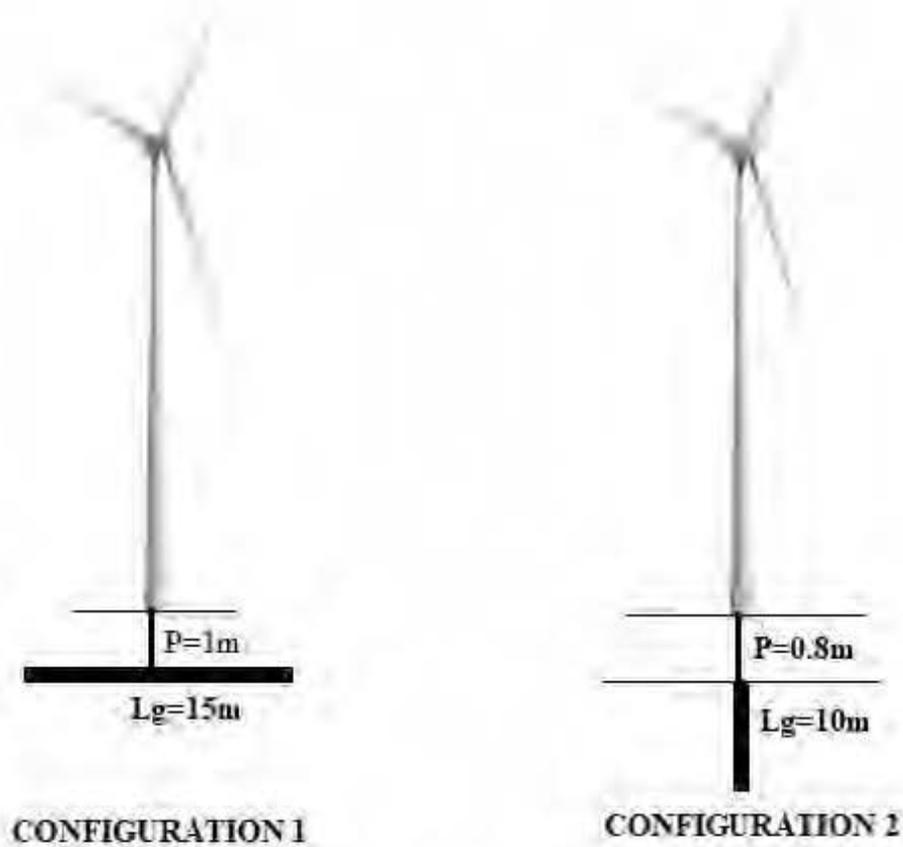


Figure 4-3 : Prises de terre étudiées

4.12. Effet de la permittivité

Nous essayons d'analyser l'influence de cette dernière sur les prises de terre, pour une résistivité de sol égale à $100 \Omega.m$.

4.12.1. Cas de la première configuration

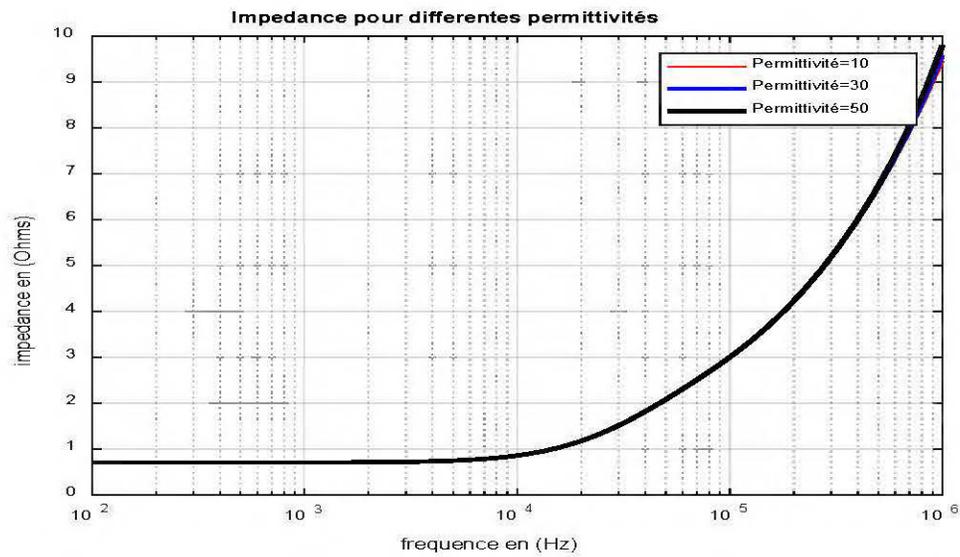


Figure 4-4 : impédance de la prise de terre

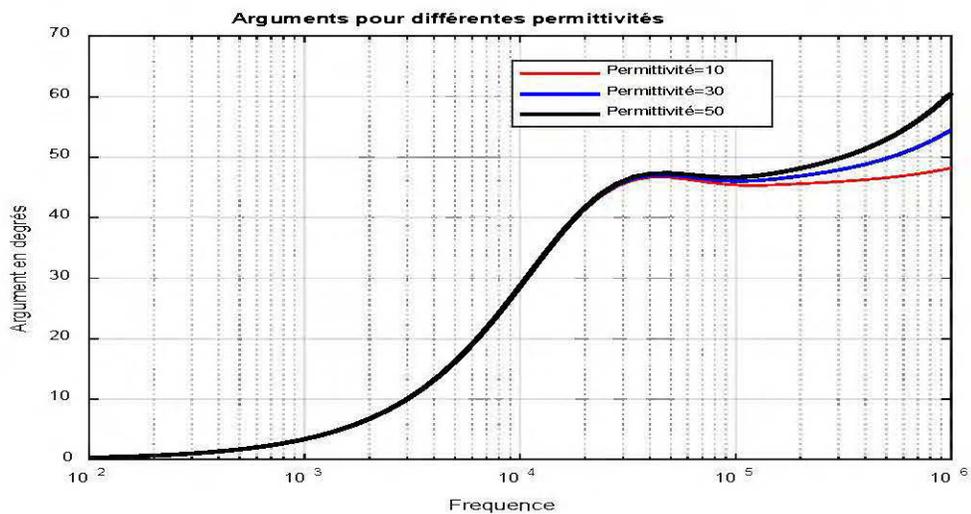


Figure 4-5 : Arguments de la prise de terre

Sur la gamme de fréquence de 100 Hz jusqu'à 10^4 Hz, l'impédance pourrait être ramenée à sa valeur de résistance car elle est stationnaire. En haute fréquence elle présente un

comportement inductif. De même pour le déphasage, il est faible en basse fréquence. Cependant en haute fréquence, elle augmente quand la fréquence augmente.

4.12.2. Cas de la deuxième configuration

Il s'agit ici de la deuxième configuration. On s'intéressera ici au conducteur vertical enterré. Le conducteur a une section de 50 mm^2 , soit un rayon $a=4 \text{ mm}$.

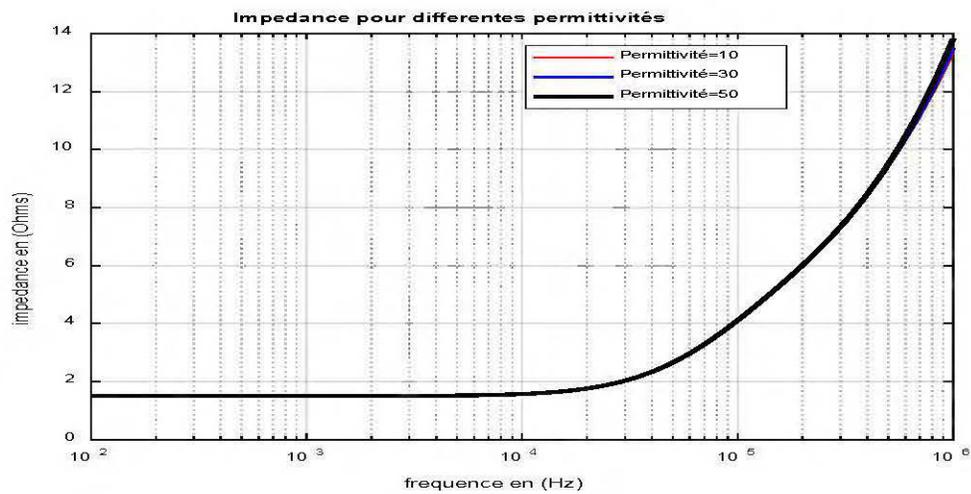


Figure 4-6 : impédance de la prise de terre

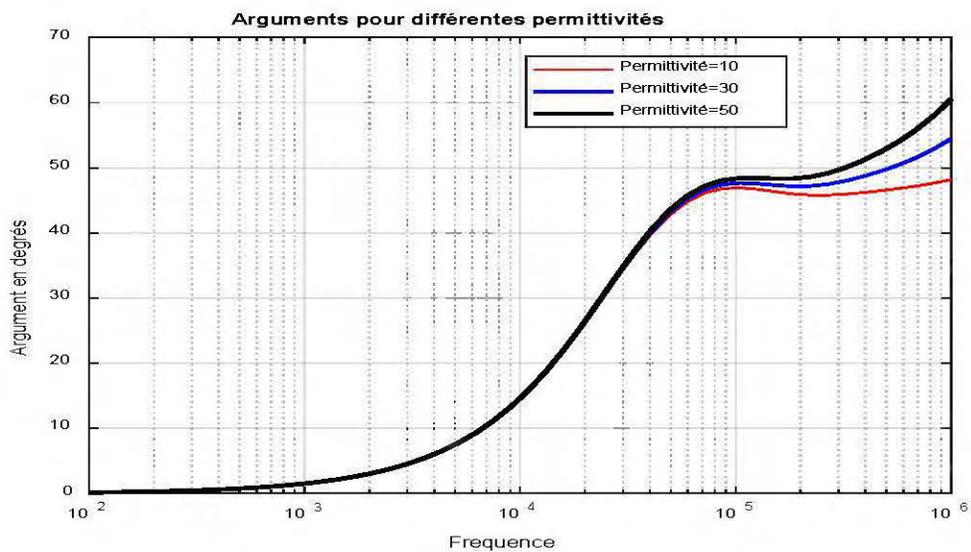


Figure 4-7 : Arguments de la prise de terre

A travers les résultats, on remarque que la permittivité du sol ne semble pas avoir une influence importante sur la réponse fréquentielle de ce type de mise à la terre de faible entendue.

4.13. Effet de la résistivité

Pour la résistivité, on utilisera les valeurs suivantes qui sont de : 100 $\Omega.m$ - 500 $\Omega.m$ et 1000 $\Omega.m$ avec une permittivité de 5.

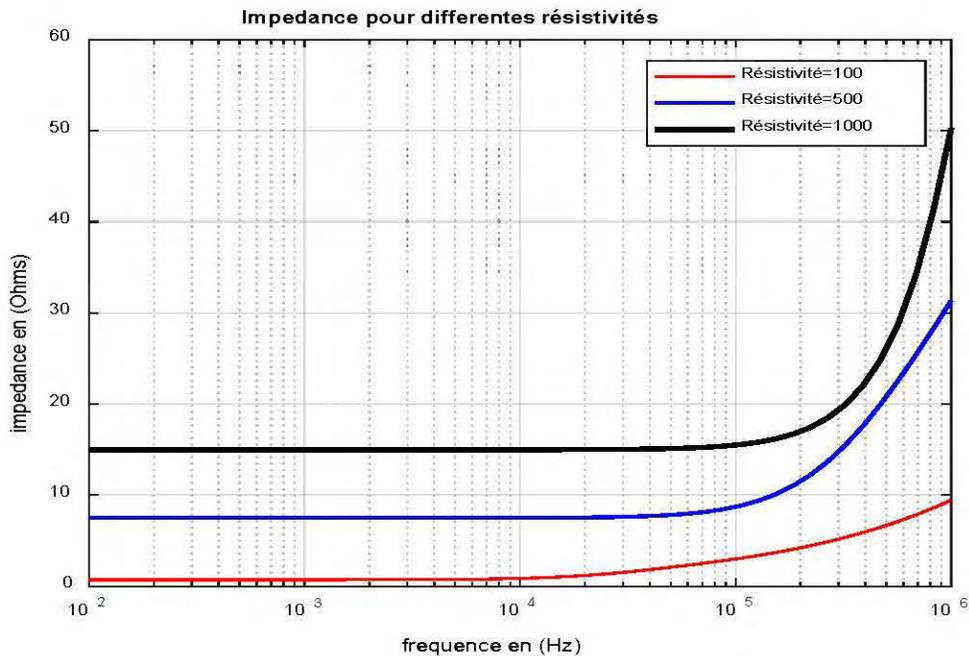


Figure 4-8 : impédance de la prise de terre pour la configuration 2

On note que ces résultats montrent une bonne correspondance. Plus la résistivité du sol augmente, plus l'impédance augmente. Elle semble avoir une influence importante sur la réponse fréquentielle de ce type de mise à la terre de faible entendue. Plus elle devient grande, plus son impédance varie et augmente.

4.14. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est la résolution de l'équation intégrale du champ électrique. La méthode de résolution retenue est la méthode des moments dans le domaine fréquentiel.

Elle utilise les fonctions de type porte pour représenter la solution discrète du courant. Concernant les fonctions tests, on utilise la méthode de collocation (impulsion de Dirac) plutôt que la méthode de Galerkin qui nécessite une intégration supplémentaire et présente une implémentation plus difficile. Cette méthode numérique est appliquée sur des cas de mise à la terre simple des installations éoliennes pour voir sa portabilité.

Le chapitre suivant présente les performances des différents modèles de systèmes de mise à la terre complexes des éoliennes soumis à la foudre.

CHAPITRE 5

PERFORMANCE DES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE DES INSTALLATIONS ÉOLIENNES

5.1. Performance des systèmes de mise à la terre

L'étude des comportements dynamiques des réseaux de mise à la terre des installations éoliennes nécessite d'avoir un regard précis et localisé sur les composants du système. Les chapitres précédents nous ont permis de cerner les différents moyens de modéliser les structures de nos réseaux éoliens. Le but de ce dernier chapitre est maintenant de nous appliquer à la modélisation effective de ces structures complexes.

Afin d'évaluer les performances du système de protection de mise à la terre des éoliens, un modèle permettant une simulation fréquentielle a été développé. Il est donc nécessaire de réaliser une simulation temporelle sur une certaine période de fonctionnement afin d'estimer les performances. Le modèle est intéressant, s'il permet d'évaluer si un système de mise à la terre des éoliens donné, répond aux exigences de protection pour une certaine distribution du courant donné. Il permet également d'étudier l'influence des différentes composantes des systèmes de mise à la terre que constituent l'entrée, la sortie et la charge électrique sur les performances du système. Nous en déduisons ici les paramètres qui influencent les systèmes de mise à la terre des éoliens soumis à des transitoires de foudre tout en proposant des alternatives qui s'offrent au sol plus résistif.

5.2. Présentation du modèle

Nous avons présenté dans le chapitre précédent, comment obtenir une représentation fréquentielle d'un système de mise à la terre, en définissant la matrice impédance $[Z]$ [51] qui relie pour chaque fréquence f , l'ensemble des courants à chaque point de connexion à l'ensemble de potentiels scalaires correspondants.

Nous cherchons à disposer d'un outil permettant de calculer l'interaction du réseau avec le système de mise à la terre lors d'un transitoire électromagnétique de foudre, c'est-à-dire d'imposer à chaque pas de temps, la relation entre les tensions et courants en chaque point de connexion.

La référence [32] a présenté une première méthode pour inclure dans EMTP, le modèle de prise de terre considéré. Son approche est basée sur l'utilisation de lignes dont l'impédance caractéristique est égale aux impédances d'entrée de la mise à la terre. Pour un système de mise à la terre disposant de nombreux points de connexion avec le réseau électrique, le schéma équivalent est donc rapidement complexe.

5.3. Exploitation du modèle

L'outil de modélisation des systèmes de mise à la terre des éoliennes que nous avons présenté est appliqué sur trois exemples afin de montrer son intérêt.

- le premier exemple est une étude sur une grille de protection d'un pylône éolien. Pour différentes résistivités, on désire connaître la tension associée au courant de foudre;
- le deuxième exemple est une étude de protection d'une installation éolienne par une grille de mise à la terre. D'une part, on modélise dans ce cas précis, la grille de mise à la terre par une simple résistance, ce qui revient à négliger son comportement inductif. D'autre part, nous appliquons notre modèle électromagnétique. Nous effectuerons une comparaison pour dégager le cas précis et plus rigoureux;
- le dernier exemple est une étude de protection de trois pylônes éoliens. On souhaite étudier l'éventualité d'une liaison souterraine des prises de terre d'un parc éolien.

5.4. Étude d'un système de mise à la terre

Nous nous intéressons ici à la modélisation d'une grille de mise à la terre de pylône éolien pour des calculs de coordination d'isolement et de compatibilité électromagnétique. Comme nous l'avons vu au deuxième chapitre, ces systèmes sont très étendus (ils couvrent souvent une surface supérieure à 25 m^2), ce qui limite théoriquement la validité des modèles de types 'résistance simple' pour des études de transitoires rapides. Nous nous servirons ici du modèle que nous avons présenté comme modèle de référence afin de répondre à cette question par une étude comparative. Nous présenterons aussi les résultats en tenant compte des différents facteurs qui influencent sur la réponse transitoire des mises à la terre.

5.4.1. Grille de mise à la terre d'un pylône éolien onshore

Le système de mise à la terre est une grille enterrée dont la surface totale est de quelques dizaine de mètres carrés à une profondeur de 0.5 m et pour laquelle les conducteurs sont longilignes parallèles et perpendiculaire ayant une section de 50 mm^2 . Le pylône éolien est frappé par la foudre. Pour évaluer la tension associée au courant de foudre au milieu de la grille (figure 5.2), on a considéré les valeurs suivantes pour les résistivités de sol qui sont : $100 \Omega.m$, $500 \Omega.m$ et $1000 \Omega.m$ et de permittivité relative ϵ_r égale à 5.

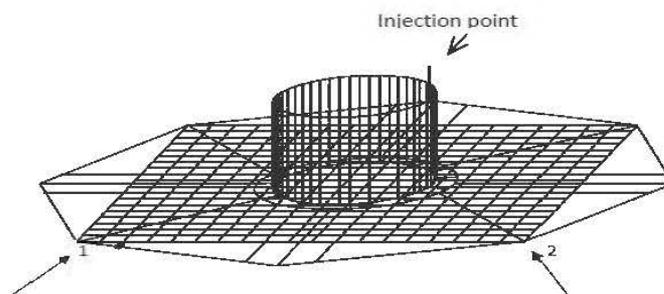


Figure 5-1 : Grille de protection d'un pylône éolien

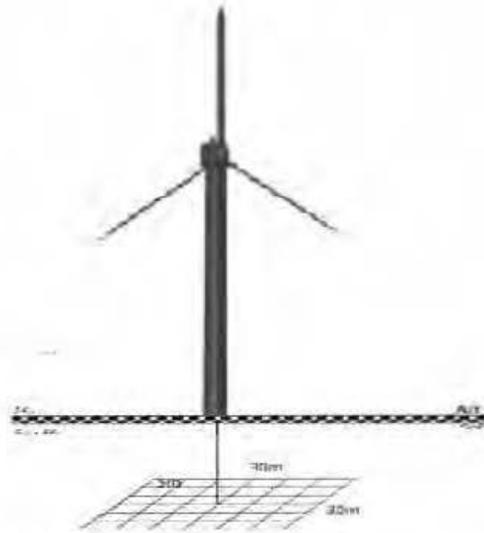


Figure 5-2 : Illustration de la situation physique

- Cas de la résistivité : 100 Ω .m- 500 Ω .m -1000 Ω .m

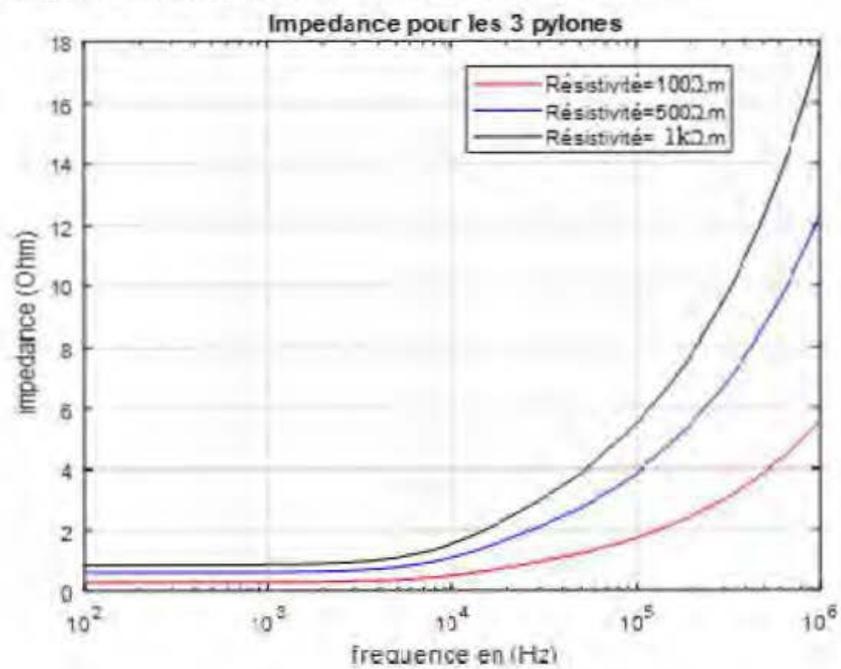


Figure 5-3 : impédance transitoire

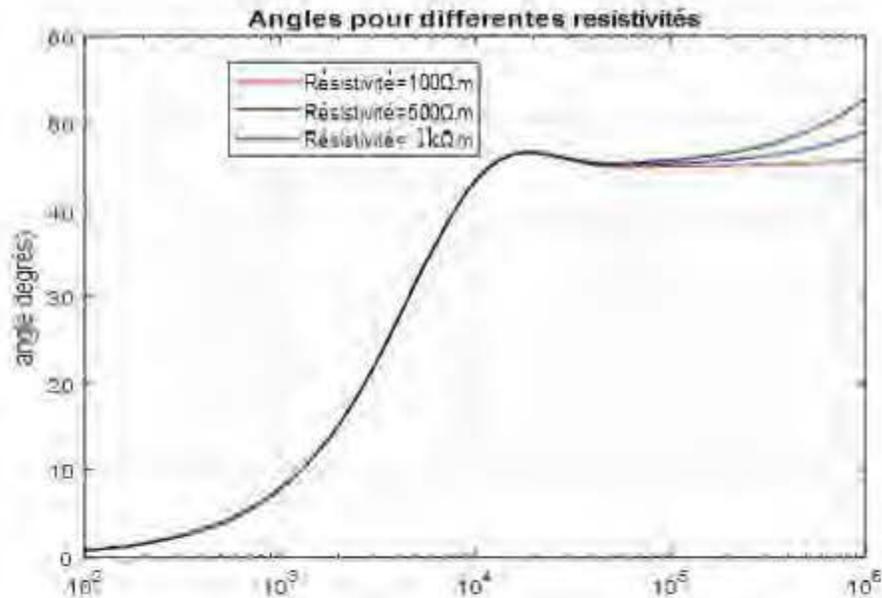


Figure 5-4 : Valeur des angles

La figure montre la variation de l'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence pour la grille. En examinant cette figure, on peut voir que l'impédance reste indépendante de la fréquence et égale à la résistance de terre, à faible fréquence, allant de quelques fréquences jusqu'à 10 kHz. Dans la gamme des hautes fréquences, elle expose un comportement inductif et sa valeur devient plus grande.

Un des phénomènes ici est la réactance. La grille est faite des fils de cuivre qui est un bon conducteur. À basse fréquence, la valeur des caractéristiques de résistance et de réactance inductive de ces fils est généralement très petite, donc négligeable. Cependant, à haute fréquence ces valeurs deviennent significatives par le fait que l'équation de la réactance inductive varie en fonction de la fréquence.

Voici l'équation de la réactance inductive.

$$X = 2\pi \times f \times L \quad (5.1)$$

Avec L : l'inductance et f la fréquence

Un fil d'une longueur quelconque pourrait avoir une inductance faible de quelques μH à basse fréquence, ce qui donne une réactance inductive négligeable. Cependant, si on admet une fréquence de quelques MHz, la réactance inductive aurait une valeur importante, ce qui est non négligeable.

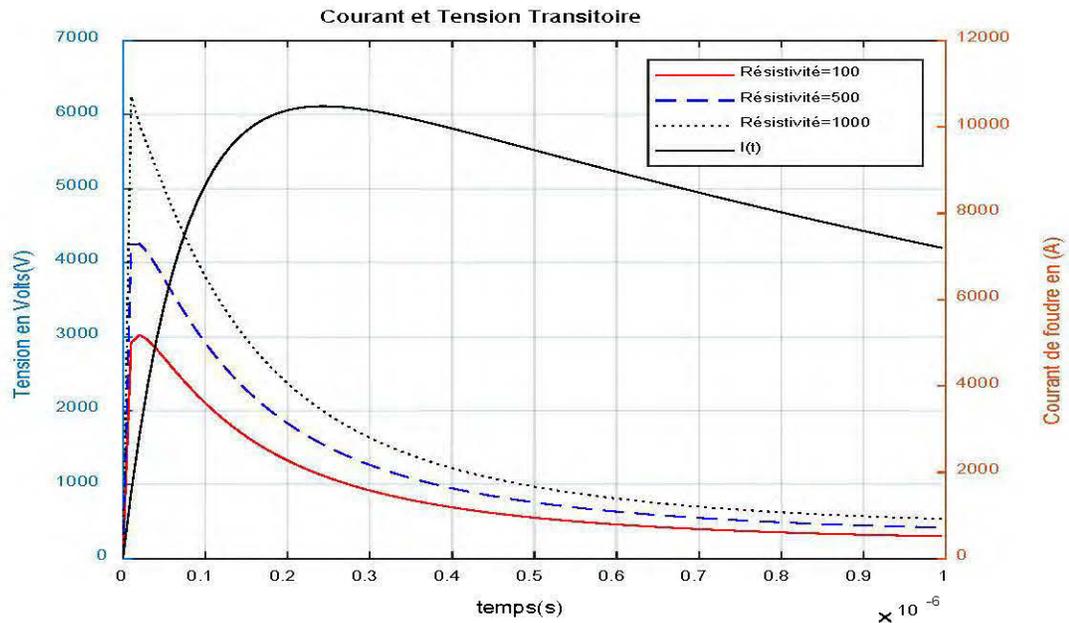


Figure 5-5 : Réponse en tension au point d'alimentation

La résistivité du sol est l'un des facteurs importants dans la protection des infrastructures contre la foudre. En effet, plus la résistivité du sol sera faible (sa conductivité élevée), meilleur sera l'écoulement des charges. Malheureusement, la résistivité du sol est un paramètre que l'on ne peut pas modifier facilement, mais avec laquelle on doit s'accommoder. La figure 5.5 montre que la résistivité du sol joue un rôle important sur la variation de la tension transitoire en tous points de l'électrode. Par ailleurs, plus la résistivité du sol augmente, les tensions augmentent selon les valeurs de résistivité, ce qui montre l'influence importante de cette dernière sur la réponse transitoire de la mise à la terre.

5.4.2. Grille de mise à la terre d'un poste de réseau éolien

On s'intéresse ici au cas d'un poste de transformation d'un réseau d'énergie éolienne dont la mise à la terre est une grille étendue. Le dernier pylône éolien de la ligne est frappé par la foudre. On considère plusieurs portées de 300 m. Le système de mise à la terre est une grille carrée enterrée dont la surface totale est grande à une profondeur de 1 m et pour laquelle les conducteurs ont une section de 50 mm². On désire évaluer la tension au coin de la grille comme sur la figure 5-6. La permittivité relative du sol est $\epsilon_r = 5$. On définit pour notre étude, la résistivité du sol et la géométrie de la grille.

Tableau 5-1: Valeurs de la grille de mise à la terre d'un poste

Paramètres	Valeur
Coté de la grille	50 m
Résistivité du sol	200 Ω .m
Permittivité relative du sol	5

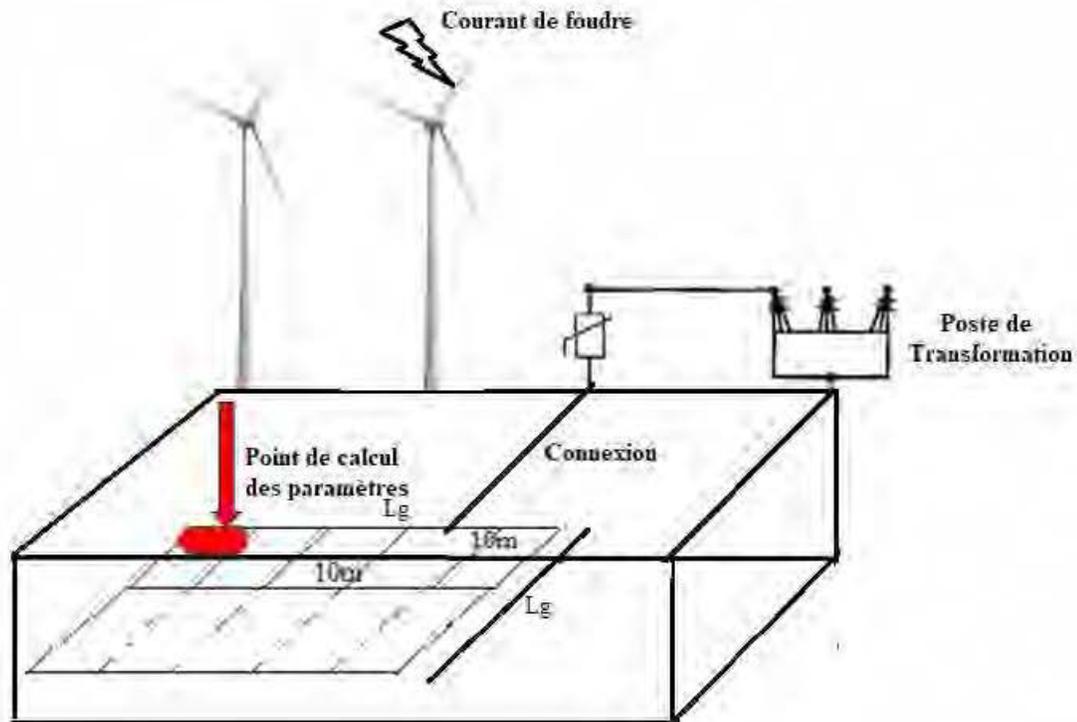


Figure 5-6 : Cas d'étude : grille de mise à la terre d'un poste

On considère dans un premier temps, la grille de mise à la terre

➤ Modèle simplifié de mise à la terre

On considère dans un premier temps le modèle le plus simple pour le système de mise à la terre : une simple résistance R_{60Hz} . Afin de déterminer la valeur de R_{60Hz} , on utilise la formule approchée IEEE [52]:

$$R_{60Hz} \approx \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_{TOT}} \quad (5.2)$$

avec $R_{60\text{Hz}}$, la résistance de la grille en basse fréquence (en Ω), ρ la résistivité du sol (en $\Omega.m$), L_{TOT} , la longueur totale des conducteurs et A la surface de la grille. On obtient alors pour le cas d'étude :

$$R_{60\text{Hz}} = 2.10 \Omega$$

➤ Modèle électromagnétique de mise à la terre

Forme du modèle

L'approche présentée au chapitre 3 nous permet de calculer pour différentes fréquences f les termes de la matrice impédance Z_{mn} :

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1NS} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{Ns1} & \cdots & Z_{NsNs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_{NS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_{NS} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$|Z_{11}(60\text{Hz})| = 4.82 \Omega$$

En supposant $I_2 = 0$, on a :

Résultats

Nous avons calculé grâce au modèle électromagnétique les différentes impédances sur le domaine fréquentiel [60Hz-1MHz]. Le modèle électromagnétique nous donne:

$$|Z_{11}(60\text{Hz})| = 4.82 \Omega$$

On note un écart par rapport au modèle de la résistance. Mais ce résultat présente des avantages par rapport au modèle de la résistance pour plusieurs raisons :

- d'un point de vue pratique, notre approche nous permet de représenter par un bloc unique un système de mise à la terre complexe possédant un ou plusieurs points de connexion avec le réseau électrique. Notre modèle va nous permettre d'estimer les erreurs engendrées par cette simplification.

- d'un point de vue théorique, notre modèle hérite de la rigueur du modèle électromagnétique des systèmes de mise à la terre en tenant en compte de son comportement inductif ou capacitif, notamment pour des transitoires rapides pour lesquelles les fréquences mises en jeux vont de la fréquence industrielle à quelques MHz.

On note que l'approche électromagnétique utilisée est la plus précise d'autant plus que cette dernière prend en compte tous les accouplements électromagnétiques mutuels et propres entre les éléments des conducteurs de terre alors que l'autre approche utilisée les néglige. De plus lorsque l'on souhaite étudier le comportement d'un ensemble de circuits aériens et/ou souterrains par la théorie électromagnétique, la première étape est le calcul de l'ensemble des impédances mutuelles et propres qui entrent en jeu

Cette étude nous a permis de montrer que le modèle de résistance 60 Hz nous entraîne à sous-estimer la montée en potentiel du point d'injection. Ceci vient du fait que l'on néglige le comportement inductif de la mise à la terre.

Lors des études de transitoires électromagnétiques sur les postes, il est important de bien choisir parmi les modèles de systèmes de mise à la terre, qui vont des plus simples, qui ne sont théoriquement valides qu'en basse fréquence, aux plus rigoureux et compliqués. En pratique, l'approche basse fréquence qui consiste à réduire le système de mise à la terre à une simple résistance est souvent utilisée, même pour les systèmes étendus comme les grilles de postes, ce qui entraîne la négligence de leur comportement inductif de la mise à la terre.

5.4.3. Étude de protection de 3 pylônes éoliens

On s'intéresse ici au cas de trois pylônes éoliens formant un parc d'énergie éolienne dont la mise à la terre est une grille individuelle. On injecte le courant de foudre au milieu de la grille du premier pylône. On considère des portées de 250 m chacune. Les grilles sont à une profondeur de 1m et laquelle pour les conducteurs ont une section de

50 mm². (Les grilles sont carrées ayant chacun 30 m de côté et séparées par des cloisons de 5m pour chacun)

La permittivité relative du sol est $\epsilon_r=5$ avec une résistivité de 400 $\Omega.m$.

On désire évaluer les impédances et tensions transitoires en chacun des points de connexion qui est le milieu de chaque grille. Les éoliennes sont interconnectées pour former un système de mise à la terre s'étendant souvent sur plusieurs kilomètres.

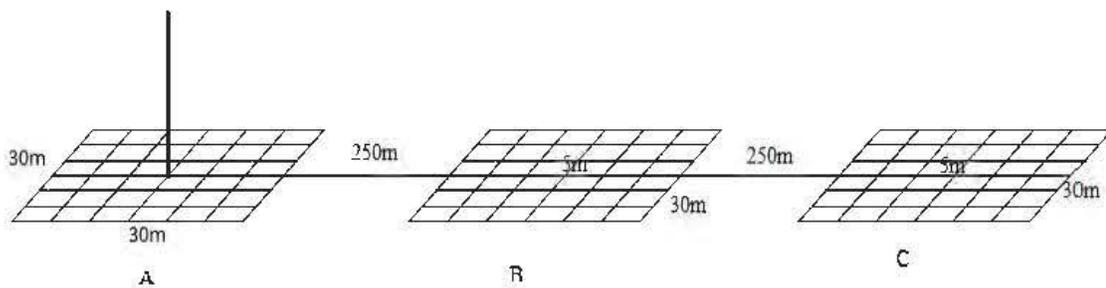


Figure 5-7 : Mise à la terre de 3 pylônes éoliens

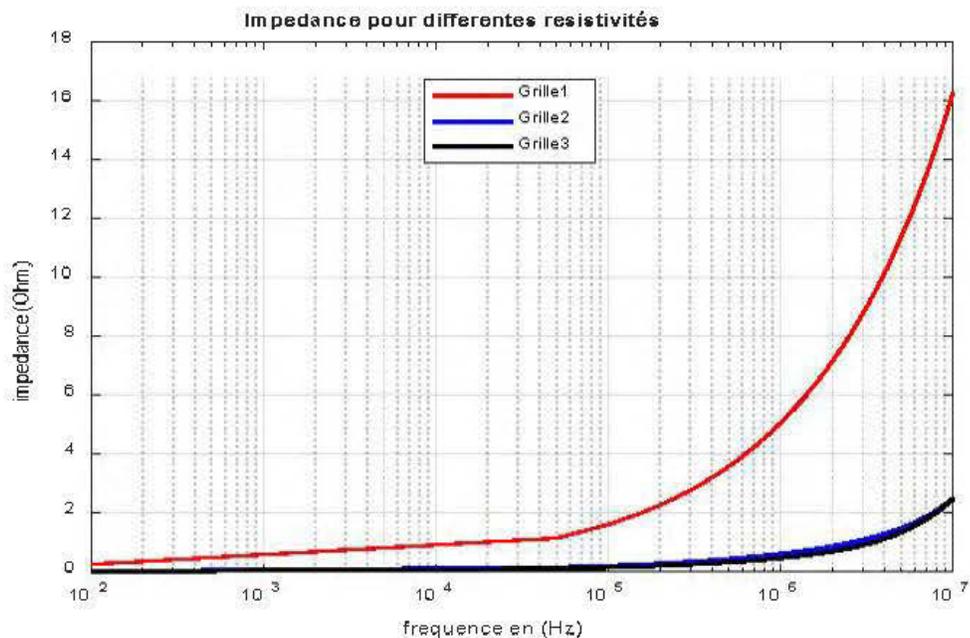


Figure 5-8 : Impédance transitoire

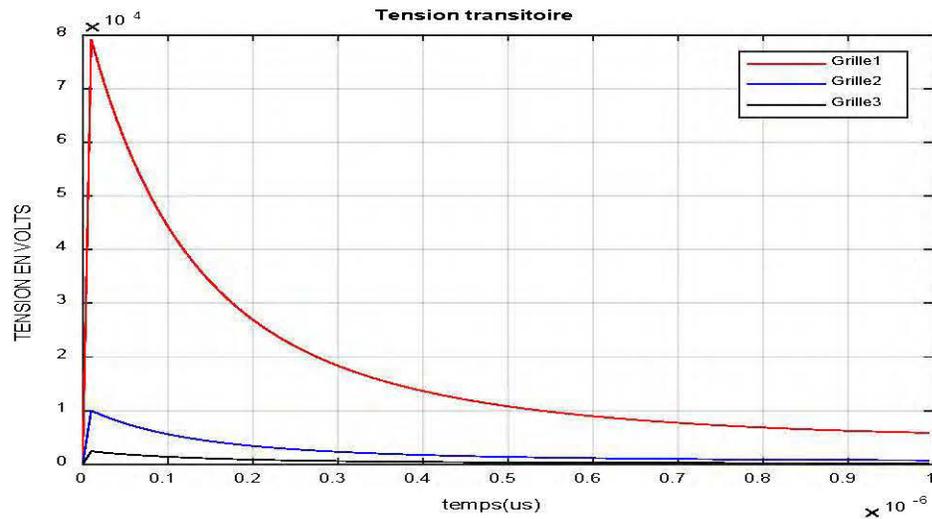


Figure 5-9 : Tension transitoire

À partir de ces résultats, on remarque le comportement de l'impédance transitoire et de la tension transitoire. À chaque augmentation du maillage, la limitation de courant de défaut est plus rapide due à l'augmentation de voies conductrices. Les résultats des figures montrent bien l'effet du point d'injection des pics de courant qui conduit à l'épanouissement des courants de défaut, s'il offre plus de chemins de conducteurs.

5.5. Réseau éolien en mer

Les éoliennes sont de plus en plus utilisées au large des côtes car, sans obstruction, le vent peut souffler fortement et des éoliennes plus grandes peuvent être installées. Les grandes zones offshore avec des eaux peu profondes sont particulièrement appropriées. La première éolienne offshore a été installée en Suède en 1991, à une profondeur de 6 mètres. La puissance de cette turbine avait été évaluée à 210 kW. De nos jours, plusieurs projets offshore ont vu le jour et ont tendance à s'accroître considérablement. Dans cette partie, la réponse fréquentielle et les performances transitoires des systèmes de mise à la terre d'éoliennes en mer sont étudiées. La figure 5-10 nous en parle [53].



Figure 5-10 : schéma d'une installation éolienne offshore

5.5.1. Cas d'une éolienne en mer

Le système de mise à la terre des éoliennes en mer présente des caractéristiques très différentes des installations onshore [54]. Les fondations en béton armé de la turbine offshore sont considérées comme son système de mise à la terre. La base de la fondation en acier renforcé peut être considérée comme une électrode de terre et le béton devrait avoir la même résistivité que le sol environnant. Des simulations sont réalisées pour contribuer à une meilleure compréhension du comportement des systèmes de mise à la terre en mer, en présence de tensions et de conditions transitoires.

On considère une éolienne en mer avec les caractéristiques suivantes de sa tige centrale long de 80 m. La résistivité de l'eau de mer étant faible, nous l'estimons à $0.2 \Omega.m$. La permittivité relative est de 80.

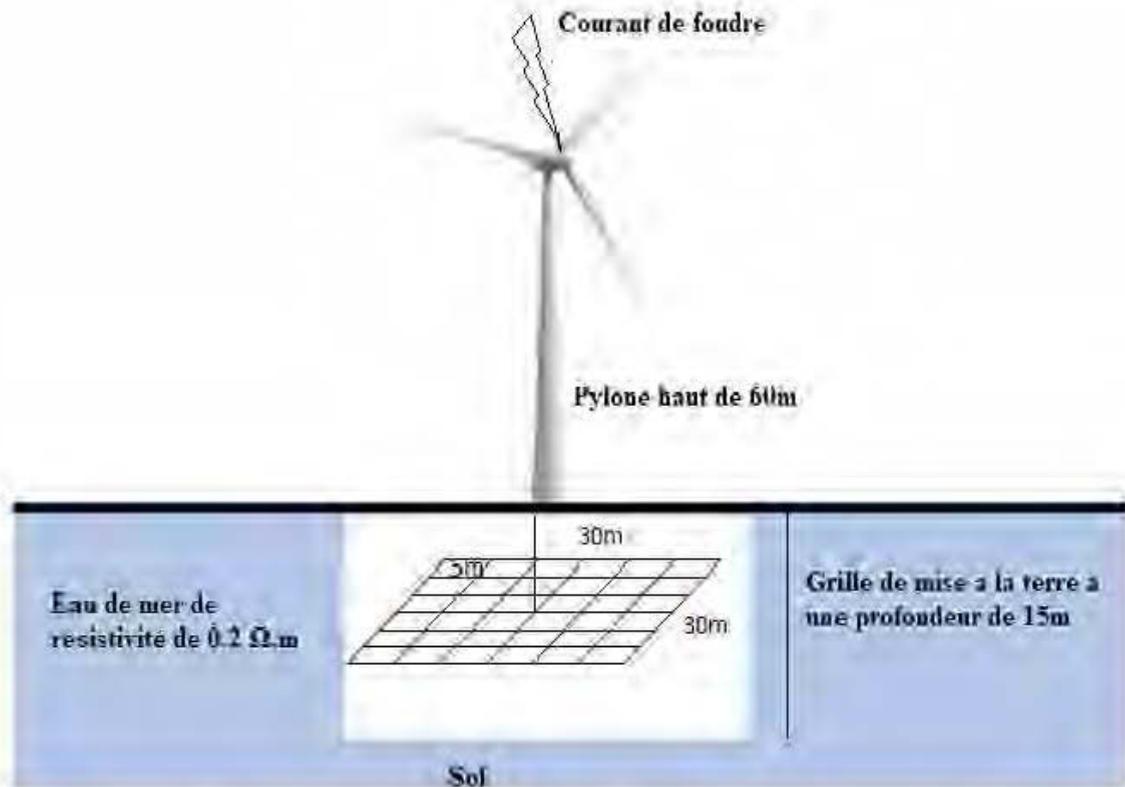


Figure 5-11 : Modèle de système de mise à la terre pour éolienne en mer

On considère un courant de foudre de 10^5 kA qui a été injecté au sommet de la tour en acier d'éolienne offshore. Les tensions ont été calculés le long de la tour en acier. Comme on peut le voir sur la figure 5.12, l'amplitude de la tension décroît au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'eau de mer. Une forte diminution de la tension a été observée en particulier chez les parties proches de l'eau de mer. Cette diminution peut être expliquée par la très faible résistivité de l'eau de mer qui rend l'impédance de la terre très faible, ce qui permet de dissiper une grande quantité de courant de défaut.

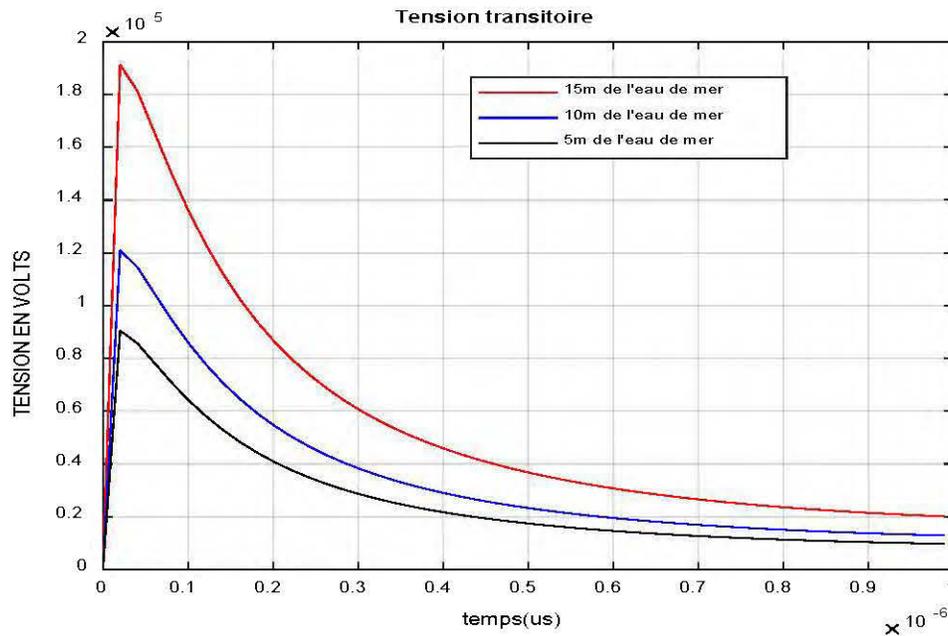


Figure 5-12 : Tension transitoire

Ces résultats ont étudié l'effet de la résistivité de l'eau de mer sur les performances du système de mise à la terre d'éoliennes dans des conditions de fréquences et de transitoires variables. Les résultats ont montré que l'eau de mer joue un rôle important ce qui entraîne une diminution de la tension à mesure qu'on se rapproche de celle-ci. Dans le cas des systèmes de mise à la terre d'éoliennes en mer, les avantages de l'interconnexion sont moins importants en raison de la très faible résistivité de l'eau.

5.6. Optimisation des systèmes de mise à la terre

5.6.1. Optimisation par des composants chimiques

Des composants chimiques sont couramment utilisés pour améliorer les systèmes de mise à la terre afin de réduire l'impédance globale de mise à la terre. Cependant, comme démontré dans les chapitres précédents, la capacité de ces produits à réduire l'élévation du potentiel de terre est limitée. Le même concept s'applique en termes de surface aux réseaux de terre des postes. La longueur effective d'un conducteur et la surface utile

d'un réseau de terre à haute fréquence ou dans des conditions de transitoire rapide sont limitées, en particulier dans le cas de systèmes de mise à la terre enfouis dans un sol de faible résistivité.

Dans cette partie, une méthode est proposée pour améliorer les systèmes de mise à la terre afin de réduire l'impédance de la terre en installant le conducteur dans la bentonite. Les prises de terre des systèmes éoliens étudiées sont composées de pieux de diverses longueurs seuls entourées de bentonite (matériau de résistivité électrique faible). Les pieux ont une section de 50 mm^2 , soit un rayon de 4mm.

On présente les résultats obtenus lors de cette campagne. On s'intéressera ici à trois configurations de prise de terre :

- configuration 1 : pieu simple de longueur $L_g = 2\text{m}$;
- configuration 2 : pieu simple de longueur $L_g = 16\text{m}$.

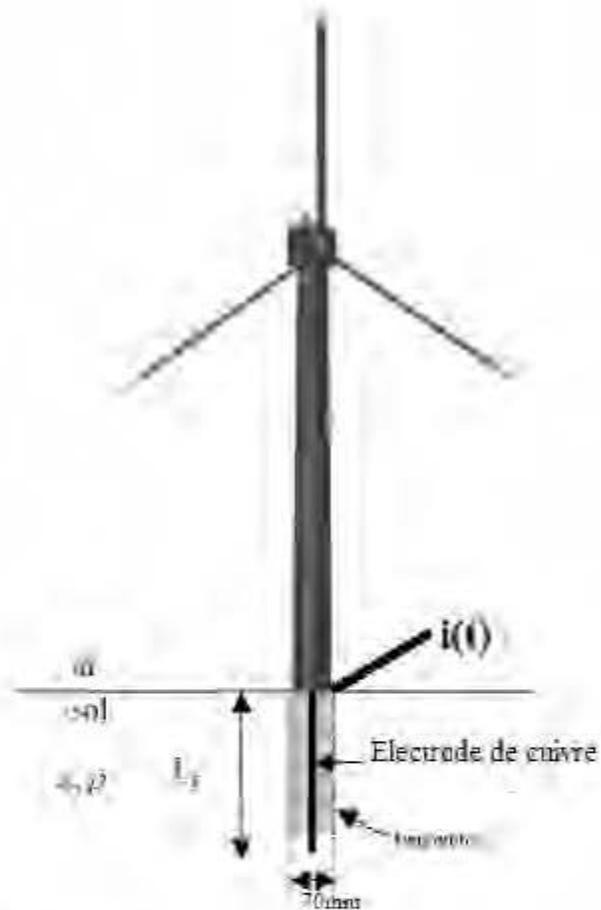


Figure 5-13 : Prise de terre entourée de bentonite

Pour la permittivité relative, on utilisera les valeurs de 40 et 80. Ces valeurs sont arbitraires mais cohérentes avec les valeurs de permittivité relative, comprises entre 3 et 30 pour un sol de type argileux et entre 10 et 100 pour la bentonite. On prendra une résistivité de $450 \Omega \cdot m$.

➤ Première configuration

La figure ci-dessous représente les résultats pour la première configuration.

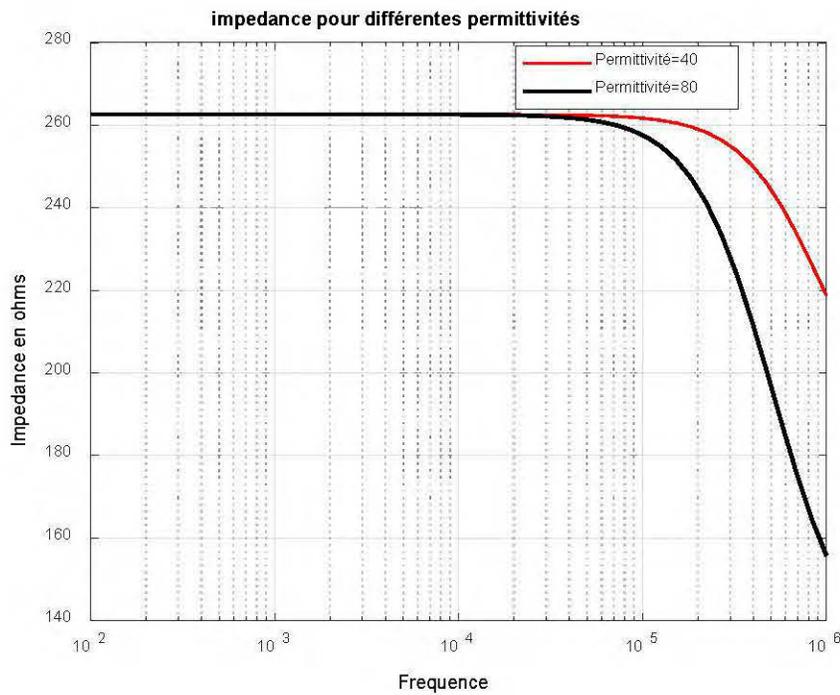


Figure 5-14 : Impédance de la prise de terre pour la configuration 1

Les résultats de la figure 5-14 montre qu'à faible longueur, le comportement transitoire est capacitif. Le système de mise à la terre capacitif aura un meilleur comportement vis-à-vis de la foudre.

➤ Deuxième configuration

La figure 5-15 représente les résultats pour la deuxième configuration

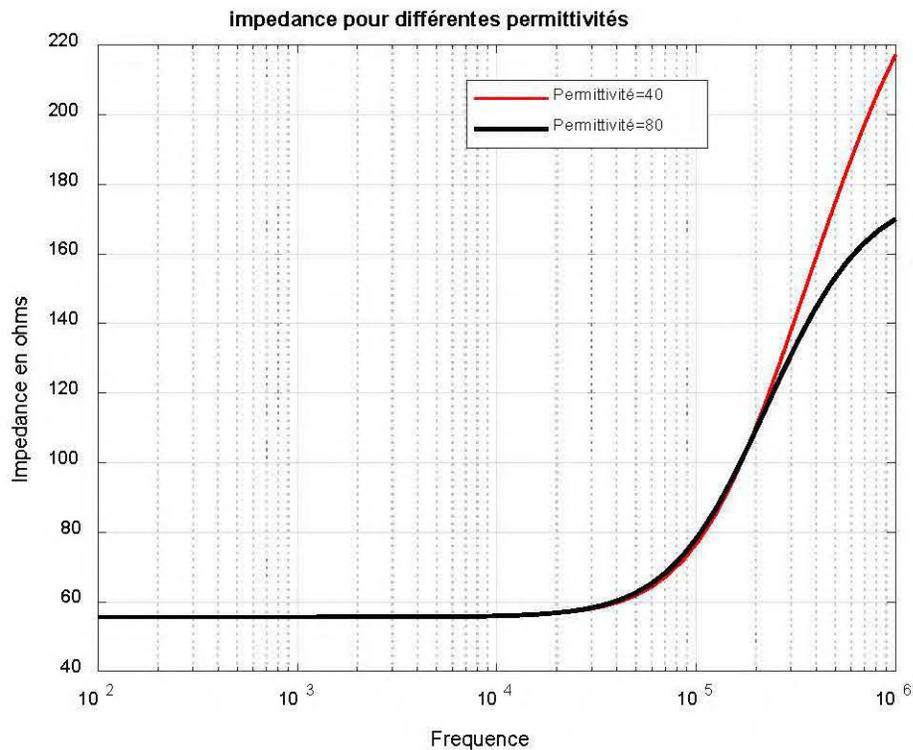


Figure 5-15 : Impédance de la prise de terre pour la configuration 2

On remarque que dans le sol constitué de bentonite entourant l'électrode de terre, plus la longueur de l'électrode devient importante, le comportement de la prise de terre est inductif.

5.6.2. Effet des dimensions de la grille sur les performances des grilles des mises à la terre

Des études antérieures [55] ont montré que les descentes raccordées au réseau de mise à la terre peuvent jouer un rôle important dans l'amélioration des performances d'un réseau de terre. Ici il est proposé d'améliorer les performances du réseau de terre en créant un autre réseau de surface et avoir plusieurs descentes reliant celui-ci au réseau de terre enterré. Analyser cela, revient à mettre en place une grille de 50 m x50 m, 100 mailles, enfouie à une profondeur de 1 m sous le sol avec une résistivité de 1000 Ω .m..

Le réseau a été alimenté par un des fils descendants reliant une grille identique installée juste au-dessus de la surface naturelle du sol (6 cm) sous les gravillons. Cela permet de connecter l'ensemble du système de mise à la terre sous la surface des gravillons. Les réseaux sont reliés par de courtes descentes réparties sur tous les points de croisement et sur la limite de la grille.

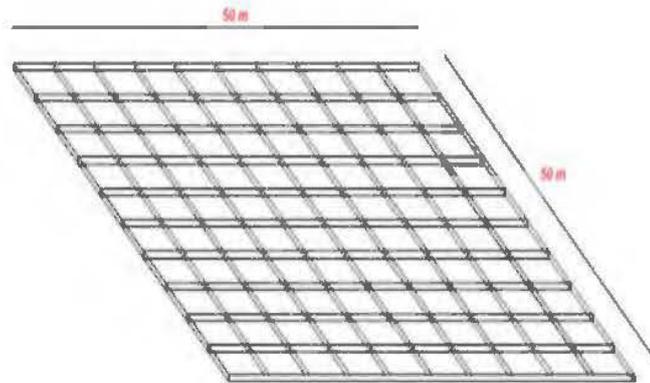


Figure 5-16 : Grille de mise à la terre de 100 mailles

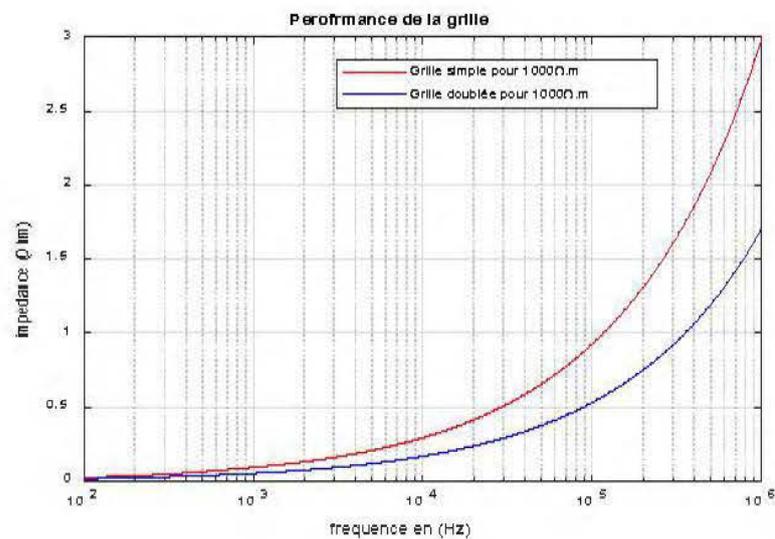


Figure 5-17 : Impédance de la grille pour 1000 $\Omega.m$

Connecter les grilles, entraîne une réduction significative de l'impédance au point d'injection. Plus la longueur devient grande, plus l'impédance est faible, et son comportement est inductif. Cela se produit uniquement au-dessus d'une fréquence particulière où l'effet inductif devient dominant. Bon nombre des mesures recommandées dans les normes pour améliorer le réseau de mise à la terre ont été présentées. Les performances fréquentielles ont été étudiées.

On a constaté que la réponse du réseau de mise à la terre est influencée par l'augmentation de la densité de maillage globale.

L'ajout de barres au réseau de distribution introduit une réduction de l'impédance de ce dernier jusqu'à la fréquence de reprise, où l'effet inductif devient dominant.

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET SUGGESTION DE TRAVAUX FUTURS

6.1. Conclusion

Les travaux de recherche présentés dans ce projet de maîtrise contribuent à l'analyse de la réponse électromagnétique transitoire des systèmes de mise à la terre en régime perturbé, particulièrement à la suite d'une décharge de foudre sur les installations éoliennes.

Nous avons tout d'abord identifié et caractérisé les différents paramètres qui influencent le comportement des systèmes de mise à la terre, en particulier lorsqu'ils diffusent un courant de foudre. La résistivité est l'élément le plus important dans la conception des systèmes de mise à la terre. Lorsque sa valeur est très élevée, le potentiel engendré par une décharge atmosphérique devient important.

Une synthèse des méthodes disponibles pour l'analyse du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre a été aussi décrite.

Ensuite un modèle a été décrit pour représenter le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre dans le domaine fréquentiel. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur le modèle électromagnétique. Ce modèle basé sur la théorie des antennes, utilise la méthode numérique dite des moments. Le formalisme des antennes qui conduit vers la résolution d'un système matriciel en fréquentiel est le plus rigoureux mais de mise en œuvre délicate et nécessite des moyens numériques importants. Cette modélisation fréquentielle nous a finalement permis d'établir diverses règles d'ingénierie permettant d'optimiser la structure des systèmes de mise à la terre des installations éoliennes.

Enfin, notre modèle nous a permis également d'estimer les réponses temporelles de l'onde électromagnétique créée par le système de mise à la terre sur son environnement matériel et proposer des solutions d'optimisations au sol plus résistif.

La contribution donnée dans ce travail, grâce à des simulations, pourrait être l'application des pratiques d'ingénierie afin d'évaluer les réponses fréquentielles et temporelles dans des systèmes de mise à la terre des éoliennes.

6.2. Suggestion de travaux futurs

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire de maîtrise ont donné des résultats attrayants. Toutefois, ces travaux peuvent encore être améliorés dans certains aspects en incluant les éléments suivants :

- étude des prises de terre de sol hétérogène;
- étude des prises de terre des éoliennes avec la prise en charge de tous ces composants;
- calculer les contraintes électromagnétiques imposées aux câbles de connexion enterrés;
- disposer d'une alternative aux formules approchées pour les configurations où celles-ci se montreraient inapplicables.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M.-J. Fortin and Y. Fournis, "Vers une définition ascendante de l'acceptabilité sociale: les dynamiques territoriales face aux projets énergétiques au Québec," *Natures Sciences Sociétés*, vol. 22, pp. 231-239, 2014.
- [2] F. Grange, S. Journet, R. Moini, and F. P. Dawalibi, "Safety of wind farm grounding systems under fault and lightning currents," in *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2016, pp. 1-7.
- [3] L. Grcev and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems," *IEEE transactions on Power Delivery*, vol. 5, pp. 1773-1781, 1990.
- [4] C. Bouquegneau, *Doit-on craindre la foudre?*: EDP sciences, 2013.
- [5] Y. Ma and G. G. Karady, "Investigating grounding grid integrity based on the current injection method," in *41st North American Power Symposium*, 2009, pp. 1-5.
- [6] Y. Yasuda, N. Uno, H. Kobayashi, and T. Funabashi, "Surge analysis on wind farm when winter lightning strikes," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 257-262, 2008.
- [7] N. Jenkins and A. Vaudin, "Earthing of wind farms," *Wind Engineering*, vol. 18, pp. 37-43, 1994.
- [8] G. Tagg, "Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1970, pp. 2185-2190.
- [9] L. Grcev, "Lightning surge efficiency of grounding grids," *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 26, pp. 1692-1699, 2011.
- [10] B. Gupta and B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2357-2362, 1980.

- [11] J. D. McDonald, *Electric power substations engineering*: CRC press, 2016.
- [12] Y. Liu, N. Theethayi, R. M. Gonzalez, and R. Thottappillil, "The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results," in *2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 03CH37446)*, 2003, pp. 794-799.
- [13] D. N. Singh and K. Devid, "Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 22, pp. 133-143, 2000.
- [14] G. Vijayaraghavan, M. Brown, and M. Barnes, *Practical grounding, bonding, shielding and surge protection*: Elsevier, 2004.
- [15] T. Saarenketo, "Electrical properties of water in clay and silty soils," *Journal of applied geophysics*, vol. 40, pp. 73-88, 1998.
- [16] H. Stoffregen, T. Zenker, and G. Wessolek, "Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data," *Journal of Hydrology*, vol. 267, pp. 201-206, 2002.
- [17] D. Robinson, C. Gardner, and J. Cooper, "Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity," *Journal of Hydrology*, vol. 223, pp. 198-211, 1999.
- [18] G. C. Topp, J. Davis, and A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines," *Water resources research*, vol. 16, pp. 574-582, 1980.
- [19] W. Bogajewski, F. Dawalibi, Y. Gervais, and D. Mukhedkar, "Effects of sustained ground fault current on concrete poles," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2686-2693, 1982.
- [20] G. Le_Roy and C. Gary, *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*: Eyrolles, 1984.

- [21] B. FRANCOIS, B. ROBYNS, E. DE JAEGER, and F. MINN, "Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension: L'Energie éolienne," *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique*, pp. 65-74, 2005.
- [22] C. SC, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," *CIGRE Technical Brochure*, vol. 63, 1991.
- [23] J. E. T. Villas and C. M. Portela, "Soil heating around the ground electrode of an HVDC system by interaction of electrical, thermal, and electroosmotic phenomena," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 18, pp. 874-881, 2003.
- [24] C. Portela, "Frequency and transient behavior of grounding systems. I. Physical and methodological aspects," in *IEEE 1997, EMC, Austin Style. IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 97CH36113)*, 1997, pp. 379-384.
- [25] E. D. Sunde, *Earth conduction effects in transmission systems*: Dover Publications Inc., 1949.
- [26] Y. Liu, "Transient response of grounding systems caused by lightning: Modelling and experiments," *Acta Universitatis Upsaliensis*, 2004.
- [27] R. F. Harrington, *Field computation by moment methods*: Wiley-IEEE Press, 1993.
- [28] B. Nekhoul, C. Guerin, P. Labie, G. Meunier, R. Feuillet, and X. Brunotte, "A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, pp. 2150-2153, 1995.
- [29] I. E. S. DI ESERCIZIO, "CEI EN 62305-1," 2006.
- [30] S. C. Lim, C. Gomes, M. Kadir, and M. Abidin, "Characterizing of bentonite with chemical, physical and electrical perspectives for improvement of electrical grounding systems," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 8, pp. 11429-11447, 2013.

- [31] E. J. Fagan and R. H. Lee, "The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes," *IEEE Transactions on Industry and general applications*, pp. 337-348, 1970.
- [32] L. D. Greev and M. Heimbach, "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, pp. 172-178, 1997.
- [33] K. Switzer, "Achieving an acceptable ground in poor soil," *Primedia Business Magazines & Media Inc., USA*, 2003.
- [34] J. He, G. Yu, J. Yuan, R. Zeng, B. Zhang, J. Zou, *et al.*, "Decreasing grounding resistance of substation by deep-ground-well method," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 20, pp. 738-744, 2005.
- [35] L. Greev, "Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements," in *2007 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 325-328.
- [36] Y. El-Tous and S. A. Alkhaldeh, "An efficient method for earth resistance reduction using the Dead Sea water," *Energy and Power Engineering*, vol. 6, p. 47, 2014.
- [37] C.-N. Chang and C.-H. Lee, "Computation of ground resistances and assessment of ground grid safety at 161/23.9-kV indoor-type substation," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 21, pp. 1250-1260, 2006.
- [38] B. Patel and T. I. Zohdi, "Numerical estimation of effective electromagnetic properties for design of particulate composites," *Materials & Design*, vol. 94, pp. 546-553, 2016.
- [39] L. Greev and V. Arnautovski-Toseva, "Analysis of electromagnetic transients in thin structures above, below and penetrating the ground," 2002.
- [40] F. P. Dawalibi and F. Donoso, "Integrated analysis software for grounding, EMF, and EMI," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 6, pp. 19-24, 1993.

- [41] C. Dumond, "Etude de la réponse de structures filaires à des parasites électromagnétiques transitoires en présence du sol réel," Limoges, 1994.
- [42] G. Bridges and L. Shafai, "Validity of the thin-wire approximation for conductors near a material half-space," in *Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1989, pp. 232-235.
- [43] A. M. Mousa, "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 1669-1677, 1994.
- [44] T. Takashima, T. Nakae, and R. Ishibashi, "High frequency characteristics of impedances to ground and field distributions of ground electrodes," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1893-1900, 1981.
- [45] K. Ewy and H. Smolleck, "A graphical explanation of the resistance and surface-potential calculations for grounding systems in two-layer earth," *IEEE transactions on power apparatus and systems*, pp. 631-639, 1984.
- [46] J. M. Ortega, "The newton-kantorovich theorem," *The American Mathematical Monthly*, vol. 75, pp. 658-660, 1968.
- [47] Z. Lin, Y. Zhang, S. Jiang, X. Zhao, and J. Mo, "Simulation of airborne antenna array layout problems using parallel higher-order MoM," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, 2014.
- [48] R. Mittra, C. E. Baum, D. Sengupta, C.-T. Tai, J. Fuller, and J. Wait, *Transient electromagnetic fields* vol. 10: Springer Science & Business Media, 2006.
- [49] E. Sayre, "Junction discontinuities in wire antenna and scattering problems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 21, pp. 216-217, 1973.
- [50] G. Burke and E. Miller, "Modeling antennas near to and penetrating a lossy interface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, pp. 1040-1049, 1984.
- [51] M. Heimbach and L. D. Grcev, "Grounding system analysis in transients programs applying electromagnetic field approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, pp. 186-193, 1997.

- [52] T. A. Short, *Electric power distribution handbook*: CRC press, 2014.
- [53] A.-R. Laali and M. Benard, "Production d'électricité par énergie éolienne: situation dans le monde et programme français éole 2005," *La Météorologie*, 1999.
- [54] B. Maingueneau, "Analyse multicritère pour l'implantation d'éoliennes aux îles de la Madeleine," 2016.
- [55] V. Kontargyri, I. Gonos, and I. Stathopoulos, "Frequency response of grounding system of wind turbine generators," *A A*, vol. 3, p. 1, 2005.