

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
ÉCOLE DE GÉNIE

**MODÉLISATION ET SIMULATION SOUS L'EFFET DE LA FOUDRE DES PYLÔNES
CONNECTÉS AUX GRILLES DE MALT ET AU VOISINAGE D'UN PIPELINE**

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Par

NDIKWA TCHOPKREO

Décembre 2019

Résumé

Les pylônes électriques sont plus exposés au phénomène naturel de la foudre grâce à leurs hauteurs élevées. Ces derniers se font traverser par des courants très forts pour se dissiper dans le sol à travers les grilles de malt, et peuvent atteindre les pipelines souterrains environnant indirectement. Pour prédire la propagation de ce dernier jusqu'au pipeline et visualiser le phénomène d'ionisations, il est nécessaire de modéliser tous les composants traversés par ces courants par la méthode des lignes de transmission avec un outil de simulation plus précis. Le but du présent travail intitulé « Modélisation et simulation sous l'effet de la foudre des pylônes connectés aux grilles de malt et au voisinage d'un Pipeline », est de modéliser et simuler les tensions, courants et impédances sous l'effet d'un impact direct d'un courant de coup de foudre. L'étude met particulièrement l'accent sur la propagation de l'onde de foudre à partir de son point d'impact à travers les différents bras du pylône jusqu'au circuit de conduit pipeline en passant par la grille de malt. Le modèle synoptique est constitué de cinq pylônes reliés chacun à une grille de malt. Une interconnexion entre les cinq grilles de malt est considérée. Les grilles de malt sont supposées être au voisinage d'un pipeline environnant se situant à 700m dans un sol homogène. Chaque bras ou tronçon du pylône et chaque segment ou élément de la grille de malt a été considéré comme une ligne de transmission. De plus, la simulation des tensions, des courants et des impédances de foudre direct sur le modèle composé du pylône-grille de malt, grille de malt-pipeline et pylône-grille de malt-Pipeline sont aussi présentées. Et en fin, trois configurations de modèles de ligne de transmission du pipeline ont été simulées pour valider les résultats en conformité avec ceux rencontrés dans la littérature: tous en utilisant le logiciel Matlab/Simulink pour la simulation théorique.

Mots clés : Foudre, Pylônes, Grille de Malt, ligne de transmission, pipeline.

Abstract

Electric towers are more exposed to the natural phenomenon of lightning due to their high heights. The latter are crossed by very strong currents to dissipate into the ground through the malt grids and can reach the surrounding underground pipelines indirectly. To predict the propagation of the latter to the pipeline and visualize the ionization phenomenon, it is necessary to model all the components crossed by these currents by the transmission line method with a more accurate simulation tool. The purpose of this work, entitled "Lightning Modelling and Simulation of Towers Connected to Malt Grids and in the Vicinity of a Pipeline", is to model and simulate the voltages, currents and impedances under the effect of a direct impact of a lightning strike current. The study places particular emphasis on the propagation of the lightning wave from its point of impact through the various arms of the tower to the pipeline conduit circuit through the malt grid. The synoptic model consists of five towers each connected to a malt grid. An interconnection between the five malt grids is considered. The malt grates are assumed to be in the vicinity of a surrounding pipeline located 700m in homogeneous soil. Each arm or section of the pylon and each segment or element of the malt grid was considered as a transmission line. In addition, the simulation of direct lightning voltages, currents and impedances on the model composed of malt grid tower, malt pipeline grid and malt pipeline grid tower are also presented. And finally, three configurations of pipeline transmission line models were simulated to validate the results in accordance with those found in the literature: all using Matlab/Simulink software for theoretical simulation.

Keywords: Lightning, Towers, Malt Grid, transmission line, pipeline.

Remerciement

Je remercie notre créateur le **DIEU TOUT PUISSANT**. Grâce à Lui, j'ai pu traverser toutes ces longues années qui ont séparé ma naissance et ce jour. Il n'a cessé de me soutenir, me fortifier, m'encourager et pour tout cela, je lui dis merci.

J'adresse particulièrement et sincèrement un grand merci à mon directeur de mémoire le Professeur Fouad Slaoui Hasnaoui pour son suivi, son dynamisme, son encadrement, son professionnalisme, sa compréhension et pour tous les conseils qu'il m'a apporté. Il a toujours été disponible quand j'avais besoin de lui et a tout fait pour sortir le meilleur en moi, que Dieu vous bénisse.

Un merci particulier à mon codirecteur Professeur Nahi Kandil pour son encadrement, son encouragement et son soutien.

Je tiens également à remercier tout le personnel administratif et enseignant de l'UQAT pour les enseignements et la formation acquise.

Je tiens également à remercier sincèrement mon grand frère Albert Ayang qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, seul Dieu peut te rembourser ces multiples soutiens.

Je tiens également à remercier particulièrement Martin Taiki Vaitchemé et Benoît Belobo Mevo pour leur disponibilité, leur suggestion, leur conseil, leur apport et leur soutien morale en tout genre dans la réalisation de ce projet.

Je ne terminerais pas sans dire « un merci particulier » à toute ma famille, mes ami(e)s pour tout leur encouragement, leur soutien financier, moral et spirituel qu'ils m'ont apporté dans les moments déterminants de ma vie, merci du fond du cœur.

Je n'oublie pas tous ceux qui de près ou de loin ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail.

A tous et toutes, trouvez en ces quelques mots ma profonde gratitude pour ce travail, fruit de la détermination de la persévérance et des efforts consentis. Ensemble nous l'avons fait, merci encore.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Remerciement.....	iii
Table des matières	iv
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tableaux.....	xi
Listes des Abréviations, sigles et acronymes	xi
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : CONTEXTE ET ETAT DE L'ART DE L'IMPACT	3
DE LA Foudre SUR UN Pylone ELECTRIQUE	3
RACCORDÉ A UNE GRILLE DE MALT.	3
1.1. Introduction	3
1.2. Contexte de l'étude.....	3
1.3. Problématique du sujet	4
1.4. Objectif général et spécifique.....	4
1.5. État de l'art	5
1.6. Méthodologie	10
1.6.1. Cadre scientifique	10
1.6.2. Démarche suivie	10
1.7. Résultats attendus.....	11
1.8. Retombées	11
1.9. Conclusion.....	11
CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LE MÉCANISME	
D'AGRESSION DE LA Foudre SUR LES	
PYLONES ELECTRIQUES RACCORDÉS AUX	
GRILLES DE MALT ET AU VOISINAGE D'UN PIPELINE	12
2.1. Introduction	12
2.2. Mécanisme de la formation de l'orage	12
2.2.1. Formation d'orage	12
2.2.2. Différents coups de foudre	13
2.2.3. Énergie de la foudre.....	14
2.2.4. Paramètre électrique de la foudre	15
2.2.5. Foudroiement d'une ligne.....	16

2.2.6.	Origine des surtensions.....	16
2.3.	Coup de foudre sur un pylône.	16
2.3.1.	Impact direct.....	16
2.3.2.	Impact indirect.....	16
2.4.	Coup de foudre sur une grille de malt.	17
2.5.	Impact de la foudre sur un pipeline.	17
2.5.1.	Fréquence, cause et conséquence de défaillance de pipeline.....	18
2.6.	Système de protection contre la foudre.	20
2.6.1.	Système de protection contre l'impact direct.	20
2.6.2.	Système de protection contre l'impact indirect	23
2.7.	Normes relatives aux systèmes de protection contre la foudre	24
2.8.	Conclusion.....	26
CHAPITRE III : ÉLEMENTS CONSTITUANTS		
L'ENSEMBLE DU SYSTEME PYLÔNES-		
GRILLES DE MALT-PIPELINE		
3.1.	Introduction	27
3.2.	Éléments influençant le comportement de la foudre sur le pylône électrique.....	27
3.2.1.	Fil de garde.....	27
3.2.2.	Taille du pylône.....	27
3.2.3.	Les bras horizontaux du pylône.....	27
3.2.4.	Les bras verticaux du pylône	28
3.3.	Éléments influençant le comportement de la foudre sur la grille de malt	28
3.3.1.	Généralité sur la mise à la terre	28
3.3.2.	Rôle d'une mise à la terre	28
3.3.3.	Éléments d'une mise à la terre.....	29
3.3.4.	Environnement de la grille de malt.....	30
3.3.5.	Type de sol	30
3.3.6.	La résistivité du sol.....	30
3.3.7.	La résistance	31
3.3.8.	Permittivité	31
3.3.9.	Perméabilité.....	32
3.4.	Éléments influençant le comportement de la foudre sur le pipeline.....	32
3.4.1.	Généralité sur le pipeline.....	32
3.4.2.	Modèle du sol	33
3.4.3.	Type de revêtement	33

3.4.4.	Distance entre le pipeline et la grille de malt	33
3.4.5.	Longueur du conduit de pipeline	33
3.5.	Conclusion.....	34
CHAPITRE IV : MODÈLES ET MODÉLISATIONS DES		
SYSTÈMES PYLÔNES, GRILLES DE		
MALT ET PIPELINE.		
		35
4.1.	Introduction	35
4.2.	Modélisation du courant de foudre.....	35
4.2.1.	Expression de Heidler.....	36
4.2.2.	Expression Bi-exponentielle.....	36
4.3.	Modélisation du Champ Électromagnétique.	37
4.3.1.	Modélisation de la distribution de courant dans le canal de foudre.....	37
4.3.2.	Géométrie du problème	39
4.4.	Modélisation du pylône.	40
4.4.1.	Le modèle ligne de transmission par T. Hara et all.	41
4.4.2.	Modélisation de ligne de transmission non uniforme du pylône	42
4.4.3.	Développement analytique du pylône	47
4.5.	Modélisation de la Grille de Malt.....	64
4.5.1.	Modèle d'une grille de malt.....	64
4.5.2.	Model électrique de la grille de malt comme ligne de transmission	65
4.5.3.	Paramètre analytique	65
4.6.	Modélisation du pipeline.	66
4.6.1.	Modèle électrique du pipeline comme ligne de transmission.....	67
4.6.2.	Paramètres analytiques du pipeline	67
4.7.	Conclusion.....	70
CHAPITRE V : SIMULATION DES SYSTÈMES PYLÔNE,		
RILLE DE MALT ET PIPELINE.		
		71
5.1.	Introduction	71
5.2.	Simulation de l'impact de foudre sur le Pylône	71
5.2.1.	Tensions sur les Pylônes.....	72
5.2.2.	Courants sur les Pylônes.....	73
5.2.3.	Impédance sur le Pylône 1.....	74
5.3.	Simulation de l'impact de foudre sur la Grille de Malt.....	74
5.3.1.	Tensions sur la Grille de Malt pour $\rho=100 \Omega.m$	75
5.3.2.	Courants sur la Grille de Malt pour $\rho=100 \Omega.m$	76

5.3.3.	Impédances sur la Grille de Malt pour $\rho=100 \Omega.m$	77
5.3.4.	Tensions sur la Grille de Malt pour $\rho=300 \Omega.m$	77
5.3.5.	Courants sur la Grille de Malt pour $\rho=300 \Omega.m$	78
5.3.6.	Impédances sur la Grille de Malt pour $\rho=300 \Omega.m$	79
5.3.7.	Tensions sur la Grille de Malt pour $\rho=600 \Omega.m$	79
5.3.8.	Courants sur la Grille de Malt pour $\rho=600 \Omega.m$	80
5.3.9.	Impédances sur la Grille de Malt pour $\rho=600 \Omega.m$	80
5.4.	Simulation de l'impact de foudre l'ensemble Pylône-Grille de malt.	81
5.4.1.	Tensions sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=100 \Omega.m$	81
5.4.2.	Courants sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=100 \Omega.m$	83
5.4.3.	Impédances sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=100 \Omega.m$	84
5.4.4.	Tensions sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=300 \Omega.m$	84
5.4.5.	Courants sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=300 \Omega.m$	85
5.4.6.	Impédances sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=300 \Omega.m$	86
5.4.7.	Tensions sur de foudre l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho = 600$	86
5.4.8.	Courants sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho = 600$	87
5.4.9.	Impédances sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho = 600$	87
5.5.	Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble grille de malt-pipeline	88
5.5.1.	Tensions sur l'ensemble Grille de malt-Pipeline.....	88
5.5.2.	Courants sur l'ensemble Grille de malt-Pipeline.....	89
5.6.	Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble pylône-grille de malt-pipeline.	89
5.6.1.	Tensions ensemble Pylône-Grille de Malt-Pipeline.	90
5.6.2.	Courants sur ensemble Pylône-Grille de Malt-Pipeline	91
5.6.3.	Tension à l'intérieur du Pipeline.	91
5.6.4.	Tension extérieure du pipeline.	93
5.6.5.	Courant de retour dans le pipeline	93
5.6.6.	Densité de courant de fuite pénétrant le pipeline.....	95
5.7.	Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble pylône-grille de malt-Pipeline (Pipeline de Forme R_x, L_x, C_x et G_x).....	95
5.7.1.	Tensions pipeline de modèle R_x, L_x, C_x et G_x	96
5.7.2.	Courants pipeline de modèle R_x, L_x, C_x et G_x	97
5.8.	Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble pylône-grille de malt-Pipeline (Pipeline de modèle R_c, R_x, L_x, C_x).....	98
5.8.1.	Tensions pipeline de modèle R_c, R_x, L_x, C_x	99
5.8.2.	Courants pipeline de modèle R_c, R_x, L_x, C_x	100

5.9. Conclusion.....	100
6.Conclusion générale.....	101
7.Bibliographie.....	103
8. Perspectives.....	95
9. Annexe.....	107

Liste des Figures

Figure 1:Figure synoptique ensemble Pylône -grille de Malt-Pipeline.	9
Figure 2: Organigramme de travail.	10
Figure 3: Représentation des flux d'air entraînant un épisode orageux [21].	12
Figure 4: Classification des coups de foudre [25].	14
Figure 5: Modèle du réseau de terre 2 x 2 avec impact de foudre.	17
Figure 6: Exemple de protection par tige simple [33].....	21
Figure 7: Paratonnerre à cage maillée [33].....	21
Figure 8: Protection par file de garde [33].	23
Figure 9: Exemple de Réseau de varistances.....	24
Figure 10: Construction de conduit enterré pipeline	32
Figure 11 : Ondes de tension et de courant dans le canal de la foudre.....	35
Figure 12: Modelé équivalent d'un pylône (ligne de transmission) [63-65].....	41
Figure 13: Electrode verticale entre le pylône et la grille de malt [66, 67].	41
Figure 14: Schéma du rayon équivalent [49].....	42
Figure 15: Bras vertical par Ishii, M. et al.,[70, 71].	44
Figure 16: Géométrie pour calcul des impédances pour un tronçons du pylône (par Jordan) [5, 67]......	45
Figure 17: Corps principale verticale de la forme Trapézoïdale [72].....	46
Figure 18: Pylône (cas particulier)	48
Figure 19: Bras du Pylône	49
Figure 20: Courant Bi-exponentiel de foudre de la matrice.	56
Figure 21: Nœud d'interconnexion 4 du pylône d'étude	56
Figure 22: Nœud d'extrémité 2 du type 0 du pylône d'étude	57
Figure 23: Nœud d'extrémité 2 du type 1 du pylône d'étude	58
Figure 24: Tensions et Courants Analytique	63
Figure 25: Tension et Courant Simulink	64
Figure 26:Modèle d'une grille de malt.....	65
Figure 27: a) Potentielle au voisinage d'une électrode; b) Pipeline au voisinage d'une électrode de terre [13].....	66
Figure 28: Charge linéaire représentant la réaction du pipeline [13].	66
Figure 29: Portion du Pipeline comme ligne de transmission [13].	67
Figure 30: Impacte de foudre sur le pylône.....	72
Figure 31: Tensions de l'impact de foudre au pied des pylônes.....	72
Figure 32: Courant au pied du pylône 1.	73
Figure 33: Impédance au pied du pylône 1.....	74
Figure 34: Coup de foudre sur Grilles de malt.	75
Figure 35: Tensions aux points A, B, C, D et E de la grille	75
Figure 36: Courant aux points A, B, C, D et E quelconque de la grille.	76
Figure 37: Impédances aux points A, B, C, D et E de la grille.....	77
Figure 38: Tensions grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=300 \Omega.m$	78
Figure 39: Courants grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=300 \Omega.m$	78
Figure 40: Impédances grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=300 \Omega.m$	79
Figure 41: Tensions grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=600 \Omega.m$	79

Figure 42: Courants grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=600 \Omega.m$	80
Figure 43: Impédances grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=600 \Omega.m$	80
Figure 44: Ensemble Pylône-Grille de malt.....	81
Figure 45: Tensions pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=100 \Omega.m$	82
Figure 46: Courant pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=100 \Omega.m$	83
Figure 47: Impédances pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=100 \Omega.m$	84
Figure 48: Tensions pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=300 \Omega.m$	85
Figure 49: Courants pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=300 \Omega.m$	85
Figure 50: Impédances pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=300 \Omega.m$	86
Figure 51: Tensions pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=600 \Omega.m$	86
Figure 52: Courants pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=600 \Omega.m$	87
Figure 53: Impédances pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=600 \Omega.m$	87
Figure 54: Ensemble Grille de malt-Pipeline.....	88
Figure 55: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Grilles de malt-Pipeline situé à 700.....	88
Figure 56: Courants sur le pipeline de l'ensemble Grilles de malt-Pipeline situé à 700.....	89
Figure 57: Ensemble Pylône-Grille de Malt-Pipeline.....	90
Figure 58: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Pylône-Grille de malt- pipeline situé à 700m.....	90
Figure 59: Courants sur le pipeline de l'ensemble Pylône-Grille de malt-pipeline situé à 700m.....	91
Figure 60: Tension intérieur du pipeline situé à 700m de la grille de malt.....	92
Figure 61: Tension extérieur du pipeline.....	93
Figure 62: Courant de retour dans pipeline situé à 700m de la grille de malt.....	94
Figure 63: Densité de courant de fuite pénétrant dans le pipeline.....	95
Figure 64: Élément électrique du pipeline de la forme R_x, L_x, C_x et G_x	96
Figure 65: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle R_x, L_x, C_x et G_x	96
Figure 66: Courants sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle R_x, L_x, C_x et G_x	97
Figure 67: Élément électrique du pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$ [19].....	98
Figure 68: Circuit électrique pipeline modèle $R_c R_x L_x C_x$	98
Figure 69: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$	99
Figure 70: Courants sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$	100

Liste des Tableaux

Tableau 1: Périodicité des vérifications des protections contre la foudre	22
Tableau 2: Normes relatives à la protection contre la foudre des installations au sol	26
Tableau 3: Tableau de résistivité du sol	31
Tableau 4: Vitesse de corrosion en fonction de la résistivité des sols [54].	31
Tableau 5: Perméabilité du sol [55].....	32

Listes des Abréviations, sigles et acronymes

Abréviations et acronymes	Significations	Unités de mesure
a	Rayon de l'électrode toroïdale	m
c	Rayon du conducteur	m
cc	Courant Continu	-
d	Profondeur d'enfouissement du pipeline	m
$dF(x)$:	Réaction de tension infinitésimale	V
du	Distance infinitésimale	m
$E_{zi(2)}^e$	Tension excitatrice	V
E_r ou E_y	Champ horizontal	N/C
E_z	Champ vertical	N/C
$E_x(u)$:	Composante de champ électrique le long de l'axe x	N/C
E_x	Champ électrique le long du pipeline	N/C
G	Conductance linéaire du pipeline	S/m
G_c	Conductance linéaire de revêtement	S/m
G_g	Conductance linéaire à la surface du pipeline	S/m
h_k	Hauteur entre la traverse et le sol	m
H	Hauteur du pylône	m
h	Hauteur à laquelle l'élément infinitésimal vertical est situé	m
h	Profondeur d'enfouissement de l'électrode de mise à la terre	m

H_ϕ	Champ magnétique	T
h_i	Hauteur de chaque section de tour	m
$i_1(t)$ et $i_2(t)$	Amplitudes des composantes i_1 et i_2 du courant i .	A
IEMF	Impulsion Électromagnétique de Foudre	-
I_0	Représente la valeur crête du courant de foudre	A
$I(x)$	Courant du conducteur le long de l'axe x	A
I_e	Courant de retour de l'électrode	A
EMTP	Programme de transitoires électromagnétiques	
F(x)	Tension (V) de Distribution sur la surface du pipeline représentant la réaction du conducteur	V
FTDT	Finite Difference Time Domain	-
K	Impédance caractéristique	Ω
k	Les paramètres dépendent de la géométrie de l'électrode et de la position du point (X, y, Z)	-
TCS	Traveling Current Source	-
MTL	Ligne de Transmission Modifié	-
L	Longueur de la ligne	m
N_1	Foudroisement du conducteur horizontal le plus élevé	-
TL	Transmission Line	-
N_k	Niveau kéraunique	-
N_L	Foudroisement de la ligne	-
Γ	Constante de propagation	m^{-1}
l	Largeur de la ligne en m (entre les conducteurs extérieurs)	m
l_i	Longueur du $i_{\text{ème}}$ segment de l'électrode en m	m
L(h), R(h) et C(h)	Respectivement l'inductance, la résistance et la capacité par unité de longueur du conducteur	H, Ω, F
$Q(u)$:	Densité de charge linéaire	C/m

P^m	Vecteur contenant des sources de courant ou de tension et/ou les excitations dues aux champs excitateurs	-
r	Rayon de la conduite du pipeline	m
r_{Ak}	Le quart de la largeur de la barre transversale au niveau du joint du pylône	m
r_{eq}	Rayon équivalent du système à quatre conducteurs	m
r_{circ}	Rayon du cercle circonscrit au système à quatre conducteurs	m
R	Distance radiale de l'électrode	m
u	Coordonner le long de l'axe	m
U_{i2}^{2s}	Tension au niveau du nœud	V
UHV	Ultra Haute Tension (UHV)	-
R_C	Résistance du revêtement	$\Omega.m^2$
r_i	La résistance du $i_{ème}$ segment de l'électrode	Ω
r_0	Rayon équivalent de la base pylône	m
r_1	Rayon équivalent du sommet pylône	m
t	Épaisseur de la paroi du pipeline	m
v	Vitesse de l'arc en retour	m/s
V_i	Fonction d'évaluation de la tension	-
$V(R, z)$	Tension au voisinage de l'électrode	V
Y_k^m	Matrice résultant de l'application des lois de Kirchhoff dans le nœud m	Ω^{-1}
Z	Impédance linéaire du pipeline	Ω/m
z	Distance verticale	m
Z_{Lc} et Z_g	Impédances du canal de foudre et de prise de terre	Ω
Z_{TK}	Impédance branche verticale	Ω
Z_{AK}	Impédance branche horizontale	Ω
Z_0, Z_i	Impédance de terminaisons du bras du pylône	Ω

Z_k^m	Matrice résultant de l'application des lois de Kirchhoff dans le nœud m	Ω
α	Facteur d'influence des pylônes et des câbles de garde	-
ρ_{gr}	Coefficient de réflexion	-
τ_{11}	Temps de montée	s
τ_{12}	Durée de l'impulsion	s
η_1 et η_2	Nombres entiers compris dans l'intervalle	-
α_i	L'inverse du temps de descente	s
β	L'inverse du temps de montée	s
μ	Perméabilité magnétique $4\pi \times 10^{-7}$	H / m
μ_0	Perméabilité du vide $4\pi \times 10^{-7}$	$\text{Kg m A}^{-2} \text{s}^{-2}$
μ_c	Perméabilité magnétique du conducteur	H/m
σ_E	Conductivité électrique du sol	s/m
ω	Fréquence angulaire du courant de foudre	H_z
ε	Permittivité	$F \cdot m^{-1}$
ρ	Résistivité du conducteur	$\Omega \cdot m$
ρ_s	Résistivité de l'acier ($5 \cdot 10^{-7}$)	$\Omega \cdot m$
ρ_e	Résistivité du sol du pipeline	$\Omega \cdot m$
$\Phi_i(x)$	Tension à l'intérieur du pipeline	V

Introduction générale

L'énergie électrique haute et moyenne tension dans sa phase de transport et de distribution est exposée à des perturbations et à la non continuité de service lors d'une décharge de foudre sur un pylône électrique. Cette perturbation concourt aussi souvent à des destructions totales ou partielles des équipements de production, du transport et de distribution de l'énergie électrique. L'improviste dégât naturel sur le réseau électrique, dans les habitations, sur les animaux, les arbres etc par la foudre est une préoccupation majeure pour les résidences et sociétés de production d'énergie sur l'ensemble du réseau électrique. Cependant, le mécanisme de création de la foudre est plus complexe que cela. Le courant de décharge de foudre peut être de l'ordre de 3 à 200 kA, environ 1% est égal à 140 kA ou plus, tandis que 50% environ dépasse 32 kA [1]. On distingue deux impacts de foudre. L'impact direct (thermoélectrique) : la circulation d'un très fort courant électrique chauffe la matière et cause des dommages mécaniques souvent très importants, voire spectaculaires. Et l'impact indirect (électromagnétiques) : le courant de foudre induit d'une part une tension de mode commun $(U = RI + L \frac{di}{dt})$ et un champ électromagnétique d'une intensité exceptionnelle [2]. En générale, un pylône est constitué entre autres des sections verticales, des bras horizontaux et des bras inclinés. Il est analysé que moins de 1% de l'énergie du courant de foudre se propage le long des parties inclinées lors de la propagation et ne se propage guère le long des parties horizontales [3]. Par conséquent, les parties horizontales et inclinées reliant les structures du pylône peuvent être ignorées lors de la modélisation. Seules les structures verticales nécessitent une modélisation, c'est-à-dire que le courant de foudre ne se propage que le long des bras verticaux. En pratique, plusieurs éléments des centrales, des postes et des lignes de transport d'énergie doivent être mis à la terre. Cela assure un chemin de retour au courant en cas de défaut, une protection contre la foudre et les surtensions ainsi qu'une protection des individus contre les chocs électriques.

Nous avons pour tâche : la « Modélisation et simulation sous l'effet de la foudre des pylônes connecté aux grilles de malt et au voisinage d'un Pipeline ». Dans le présent document, pour se rapprocher plus de la réalité, nous allons utiliser la théorie de ligne de transmission pour la modélisation du pylône de la grille de malt et du pipeline. Et les simulations seront effectuées par Matlab/Simulink.

Pour l'atteinte de nos objectifs, le plan de rédaction en chapitre est comme suit :

- ✓ Nous aurons une étude sur le contexte et l'état de l'art de l'impact de la foudre sur le pylône électrique raccordé à une grille de malt ;
- ✓ Puis, une étude sur la généralité du mécanisme d'agression de foudre sur le pylône électrique raccordé à une grille de malt ;
- ✓ Ensuite, nous allons détailler les éléments constituant l'ensemble pylône-grille de malt –Pipeline ;
- ✓ Et, les modèles et modélisation des sous-systèmes pylône, grille de malt et pipeline ;
- ✓ En fin, des simulations des systèmes pylône-grille de malt-pipeline et de l'ensemble.

CHAPITRE I : CONTEXTE ET ETAT DE L'ART DE L'IMPACT DE LA Foudre SUR UN PYLONE ELECTRIQUE RACCORDE AUX GRILLES DE MALT.

1.1.Introduction

La Foudre peut ici se définir comme un phénomène naturel de décharge électrostatique susceptible de se produire lorsqu'une grande quantité d'électricité statique s'accumule dans des zones de nuages d'orage. Dans [4], les accidents de rupture de ligne causés par la foudre représentaient entre 40% et 70% du total des accidents sur les lignes. Par ordre de priorité et de taux d'impact dans les classes de contraintes, la foudre représente le phénomène naturel et imprévisible le plus néfaste sur tous les systèmes électro-énergétiques. Et si on peut affirmer que de nos jours, les transporteurs d'énergie maîtrisent convenablement la protection du réseau contre les défauts accidentels (internes), ce n'est pas le cas pour sa protection contre la foudre. Surtout, lors d'un impact indirect où rayonne des champs électromagnétiques importants et qui vont induire par couplage électromagnétique des surtensions cruelles dans leurs cibles, notamment les réseaux de transport d'énergie électrique. Un support de ligne de transport d'énergie est constitué principalement d'un fil de garde, d'un pylône et d'un système de mise à la terre (grille de malt). Lors d'un coup de foudre sur une ligne de transport d'énergie, le courant de défaut cherche à s'écouler dans le sol à travers le pylône jusqu'aux électrodes de mise à la terre ce qui fait monter le potentiel local du sol par rapport à celui d'une terre lointaine. Les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus importantes en cas de défaut. Pour limiter les surtensions, la méthode la plus logique consiste à mettre en série une résistance adéquate dans le circuit de terre.

1.2.Contexte de l'étude

La Foudre est un éclair qui tombe au sol. C'est un phénomène fréquent qui se comporte comme un générateur parfait de courant électrique. Pour se protéger dans 95% des cas, le courant à prendre en compte est de 100kA avec un temps de montée très bref. En plus du phénomène de conduction, le canal ionisé de la foudre se comporte comme un fil long qui rayonne un champ électromagnétique. Ce champ induit dans les grandes boucles de masse des tensions qui se comptent en kilovolts. Ces surtensions peuvent détruire des composants d'interface du propriétaire de production, de transport et de

distribution d'énergie électrique, entrainer la mort humaine, des animaux etc. Nous considérons ici le pylône d'étude comme une ligne électrique composée des résistances, inductances (de Selfs) et Capacités. La grille et le conduit pipeline sont considérés dans un sol homogène.

1.3.Problématique du sujet

Pour produire de l'électricité, les industriels ont besoin d'énergie pour faire fonctionner leurs équipements, car l'énergie est un élément fondamental aussi bien dans la production que chez les consommateurs. Mais lorsque cette énergie produite se déforme dans sa phase de distribution à travers son support qui est le pylône, et qui est exposé à des phénomènes naturels tel que la foudre, il y'a perturbation. Jusqu'ici, nous soulignons que des études ont été effectuées par le passé, et divers modèles ont été élaborés afin de contrer ces perturbations. Dans notre cas, la problématique ici est de simuler afin de prédire, puis observer les comportements dynamique (courants, tensions et impédances) du système « pylône-grille-de-malt-pipeline » par Matlab/Simulink sous l'effet de la foudre jusqu'ici non évoqué dans la littérature rencontrée. Cela étant dans le but de prédire les dégâts et prévenir les usagers intervenant sur les pipelines. Pour pouvoir relever ce défi nous nous sommes fixés des objectifs nécessaires.

1.4.Objectif général et spécifique

L'objectif général du présent document est de Modéliser et simuler les tensions, courant et impédance sur le pylône, la grille de malt et le conduit Pipeline lord d'un impact direct de coup de foudre sur le pylône. Pour ce faire, on se basera bien évidemment sur l'impact direct (thermoélectrique) sur le pylône et Indirect (électromagnétique) au voisinage de Pipeline. En déduisant les courants et les tensions induites sur l'ensemble des extrémités des barres du pylône. Et finalement connecter le pylône à une grille de malt au voisinage du conduit pipeline afin de simuler les caractéristiques (tensions et courants) interagissant sur l'ensemble du système.

Pour atteindre un tel objectif, nous nous sommes fixé les objectifs spécifiques suivants :

- Simuler les tensions, courants et impédances sur les pylônes, grilles de malt et le conduit Pipeline sous l'effet d'un coup de foudre direct et indirect;
- Simuler l'ensemble du système.

1.5.État de l'art

Dans cette partie, nous présentons quelques références non exhaustives qui mettent en lumière les travaux déjà effectués dans la littérature autour de notre projet de maitrise. Cette revue bibliographique est portée essentiellement sur l'effet de la foudre sur les pylônes, la grille de malt, le jumelage de ces derniers (pylône-Grille de malt) ou encore sur le pipeline utilisant principalement le logiciel EMTP. La méthode de différence fini (FTDT) a aussi été évoqué par de nombreux chercheurs.

J.L. Bermudez et al., ont simulé au laboratoire un modèle à échelle réduite développé pour analyser la réponse de surtension frappées au sommet du pylône par un coup de foudre. La hauteur du modèle de tour à échelle réduite pourrait varier de 40 cm à 1 m et le temps de montée minimum de la tension injectée à son sommet est d'environ 500ps. L'un des objectifs du système est l'étude de la variation du courant de foudre mesurée à l'aide d'un pylône instrumenté [5].

Dans [6, 7], une réalisation via le logiciel EMTP d'une approche directe dans le domaine temporel basée sur les équations des lignes de transmission correspondantes et la méthode Finite Différence Time Domain (FDTD) est proposée pour analyser un coup de foudre direct sur un tour (pylône) de lignes de transmission. Le modèle proposé traite un cas réel de tours reliées par des fils de terre et équipées de systèmes de mise à la terre avec des topologies différentes. En particulier, ces travaux représentent de manière réaliste la géométrie de la tour et rendent compte des phénomènes de propagation le long de la tour et entre les tours. L'approche directe dans le domaine temporel proposée traite des dispositifs électriques assez complexes (tours, fils de terre et systèmes de mise à la terre), mais requiert en même temps un coût de calcul très bas et une mise en œuvre relativement simple [5, 6, 8-10].

Liu et al., ont travaillé sur un modèle de ligne de transmission dans le domaine temporel du système de mise à la terre, qui inclut le couplage électromagnétique mutuel entre les parties de la structure de mise à la terre et l'influence de l'interface air-terre. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec celui du modèle basé sur la solution des équations complètes ainsi qu'avec les mesures rapportées. L'influence de différents paramètres, tels que la permittivité relative du sol, la résistivité du sol, la conductivité et le diamètre du conducteur, sur la distribution de tension transitoire du système de mise à la terre est

étudiée. Il montre que, parmi les paramètres étudiés ici, la résistivité du sol est le paramètre le plus important qui affecte la réponse transitoire des conducteurs nus enterrés. La permittivité du sol a très peu d'influence sur la réponse transitoire du système de mise à la terre lorsque celui-ci est enfoui dans le sol à faible résistivité, mais a une influence modérée sur le sol à très haute résistivité [7].

Dans [11, 12], la principale caractéristique du comportement transitoire d'un système de mise à la terre est la diminution de la résistivité du sol et par conséquent de l'impédance de la mise à la terre, due aux phénomènes d'ionisation du sol qui se produisent lorsque la densité du courant injecté dépasse une valeur critique. Les résultats de la simulation sont comparés aux mesures obtenues en imposant des tensions de choc aux échantillons de sol. La précision de chaque modèle est évaluée en fonction du niveau de proximité des oscillogrammes et des conclusions sont tirées sur l'efficacité de chaque approche de modélisation.

Les conducteurs enfouis à la terre de grandes étendues tel que les câbles, les pipelines, les voies ferrées et, à un degré moindre, les réservoirs et les structures métalliques sont les plus susceptibles aux perturbations causées par les courants de terre. Parmi les effets à long terme sur les conducteurs portant un courant de retour, on retrouve la corrosion qui peut atteindre un stade avancé particulièrement dans les régions où le courant retourne à la terre de façon régulière. Les effets de ces courants peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres. Le comportement des tensions et de courants dans un pipeline pour différentes valeurs de recouvrement ($R_c=0; 6250; 28600$ et 105000) ont été simulés [13].

Dans [14, 15], les lignes de transport d'électricité en parallèle avec les pipelines et les installations ferroviaires deviennent de plus en plus courants. Cependant, un tel partage de couloir peut entraîner un couplage indésirable de l'énergie électromagnétique des lignes électriques aux installations en parallèle. Les principales préoccupations concernent à la fois la sécurité du personnel et la compatibilité des équipements. Des tensions et courants parasites induits peuvent résulter de l'induction magnétique ou électrostatique des circuits de ligne électrique. L'induction peut se produire soit pendant le fonctionnement normal du système d'alimentation, soit pendant une panne. Les situations à l'origine des problèmes, ainsi que les mesures d'atténuation envisagées, dépendent des susceptibilités, des

paramètres d'excitation et de l'interaction entre les composants électromagnétique couplés en parallèle.

Li, Y., Dawalibi et al., ont examiné les mécanismes de l'interférence électromagnétique causés par une sous-station de réseau, y compris une partie de ses lignes de transmission entrantes et sortantes sur un pipeline voisin. Deux approches ont été abordés, une approche par circuit et une approche par terrain sont utilisées pour mener à bien cette étude. L'approche du modèle de circuit exige que les paramètres de ligne de l'ensemble du réseau soient d'abord calculés, à l'aide d'une formule constante de ligne appropriées au logiciel spécialisé. Les éléments localisés, tels que les impédances de terre des réseaux de mise à la terre des sous-stations et des tours de transmission, sont calculés à l'aide d'outils appropriés, tels qu'un logiciel de mise à la terre. Ce modèle de circuit est ensuite résolu pour produire le composant d'interférence inductif. L'approche de champ est basée sur la théorie des champs électromagnétiques. Tout d'abord, l'approche de la théorie des champs est utilisée pour modéliser, tel quel le réseau de conducteurs complet considéré. Les effets d'interférence inductifs, capacitifs et conducteurs entre tous les éléments du réseau sont simultanément pris en compte en une seule étape [16].

Hui-Chun Xie, Guang-Zhang et al., ont étudié l'impact électromagnétique sur les pipelines métalliques enterrés en utilisant le logiciel EMPT. En soulignant que l'impact de la foudre sur les lignes, les pylônes pourrait avoir des effets électromagnétiques sur les pipelines métalliques enterrés adjacents. Le couplage de résistance dans les pipelines est le plus sévère, car le courant de foudre est directement injecté dans la terre par le conducteur de masse du pylône lorsqu'un coup de foudre se produit. Sous l'effet de la foudre, la tension du pipeline est rapidement atténuée lorsqu'elle s'éloigne du pylône foudroyé. Le résultat montre que pour un courant de foudre de 100 kA, même si la distance entre le pylône et les pipelines est de 50 m, aucun dommage ne sera causé au revêtement anticorrosif à proximité du pipeline. Le résultat indique que, lorsqu'un impact de foudre survient sur le pylône, l'interférence sur le pipeline est réduite avec l'augmentation de l'angle de croisement [17].

D. Caulker H. Ahmad et al., en 2008 ont démontré que dans une zone à haute iso kéraunique, les pipelines sont davantage exposés aux dangers de la foudre directe ainsi qu'aux tensions induites par la foudre. Et ont prouvés pour un courant de foudre 40 kA sur un pipeline situé à 167 cm de la source, la contrainte du champ électrique entre les gazoducs

doit toujours être maintenue à une valeur non inférieure à 0,6 kV / cm afin d'éviter les contournements ou les perforations du côté du pipeline [18].

K Bhumkittipich, B Topradith et al., ont analysé le phénomène foudre sur l'oléoduc souterrain et sa protection. Ils ont montré que le potentiel sera plus élevé instantanément lorsque la distance de la longueur du pipeline augmente en raison de son inductance qui varie directement à sa longueur et que le courant instantanément a tendance à diminuer lorsque sa longueur augmente. Lorsque l'on considère l'impédance du pipeline et le câble du circuit de protection contre la corrosion, on constate que le potentiel instantané et le courant sont supérieurs aux valeurs de sécurité des dispositifs qui sont suffisantes pour provoquer des dégâts aux dispositifs de protection contre la corrosion. Le résultat de la simulation de protection a montré qu'il peut limiter le potentiel instantané à moins de 1500 volts, ce qui permet de l'utiliser pour contrôler potentiel apparaissent au-dessus du pipeline [19].

Grace à la revue de la littérature inspirante ci-dessus ou plusieurs chercheurs ont travaillé sur les sous-systèmes sous l'effet de la foudre à savoir pylône-grille de malt et pipeline en utilisant le logiciel EMTP, notre apport consiste à jumeler ces sous-systèmes en un système pylône-grille de malt-pipeline en utilisant le logiciel Matlab/Simulink comme représenté à la figure 1.

✓ Schéma synoptique du problème

Le synoptique centré sur notre thème de recherche est constitué de cinq Pylônes connecté chacun à une grille de Malt et au voisinage d'un conduit Pipeline comme illustré ci-dessous.

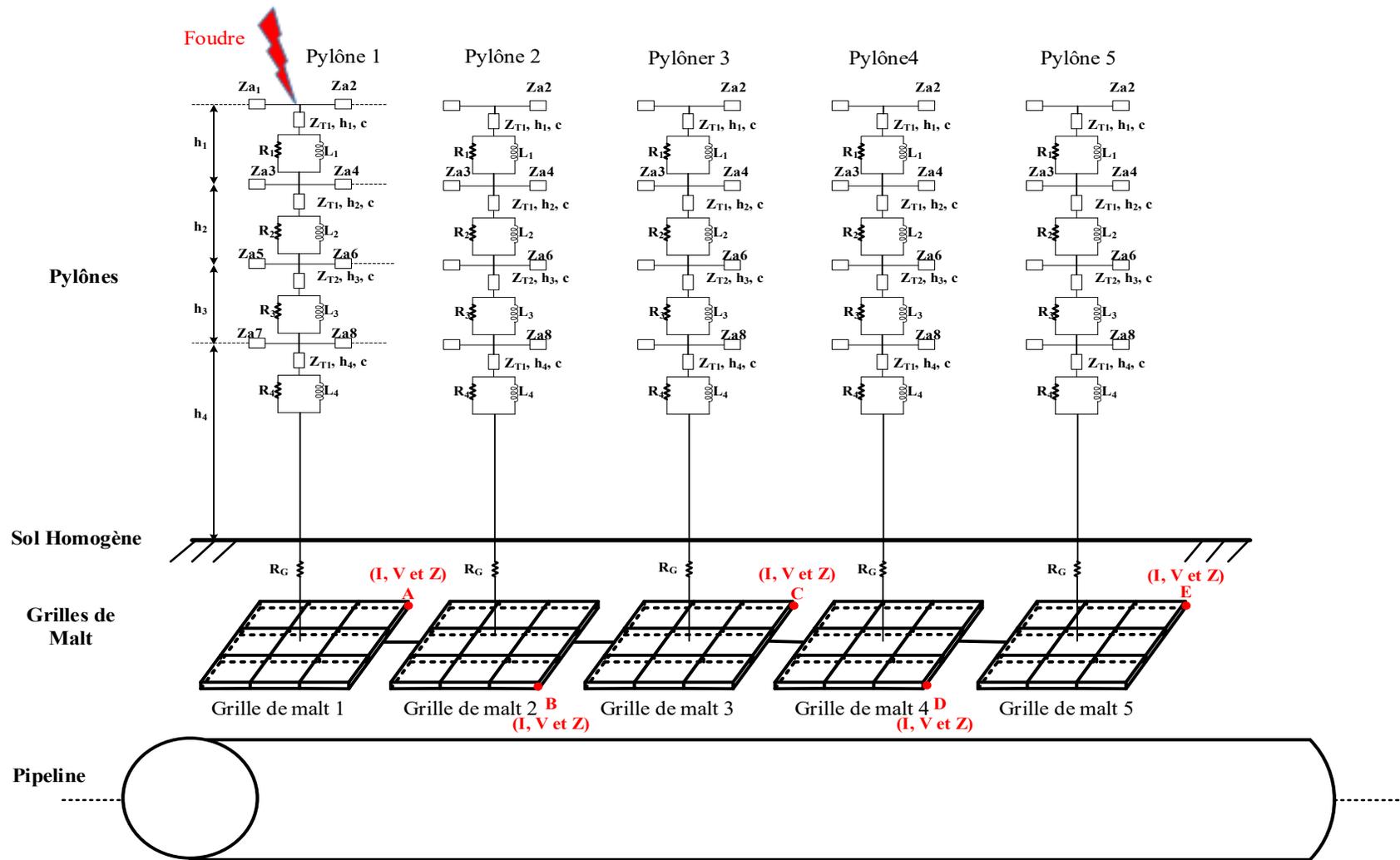


Figure 1: Figure synoptique ensemble Pylône - grille de Malt - Pipeline.

1.6.Méthodologie

1.6.1. Cadre scientifique

Dans le but d'atteindre nos objectifs fixés ci-haut, une démarche méthodologique a été mise en place en s'appuyant sur les modèles et les modélisations rencontrées dans la revue mettant en exergue des simulations par approche numérique par le logiciel Matlab/Simulink.

1.6.2. Démarche suivie

Dans cette partie, nous présentons la démarche à suivre pour résoudre le problème posé qui est celui de modéliser et simuler les tensions et courants sous l'effet de la foudre sur son trajet en partant du point d'impact du pylône jusqu'au conduit de pipeline par l'intermédiaire de la grille de terre. L'organigramme ci-dessous nous détaille les points essentiels que nous allons développer au courant de notre projet.

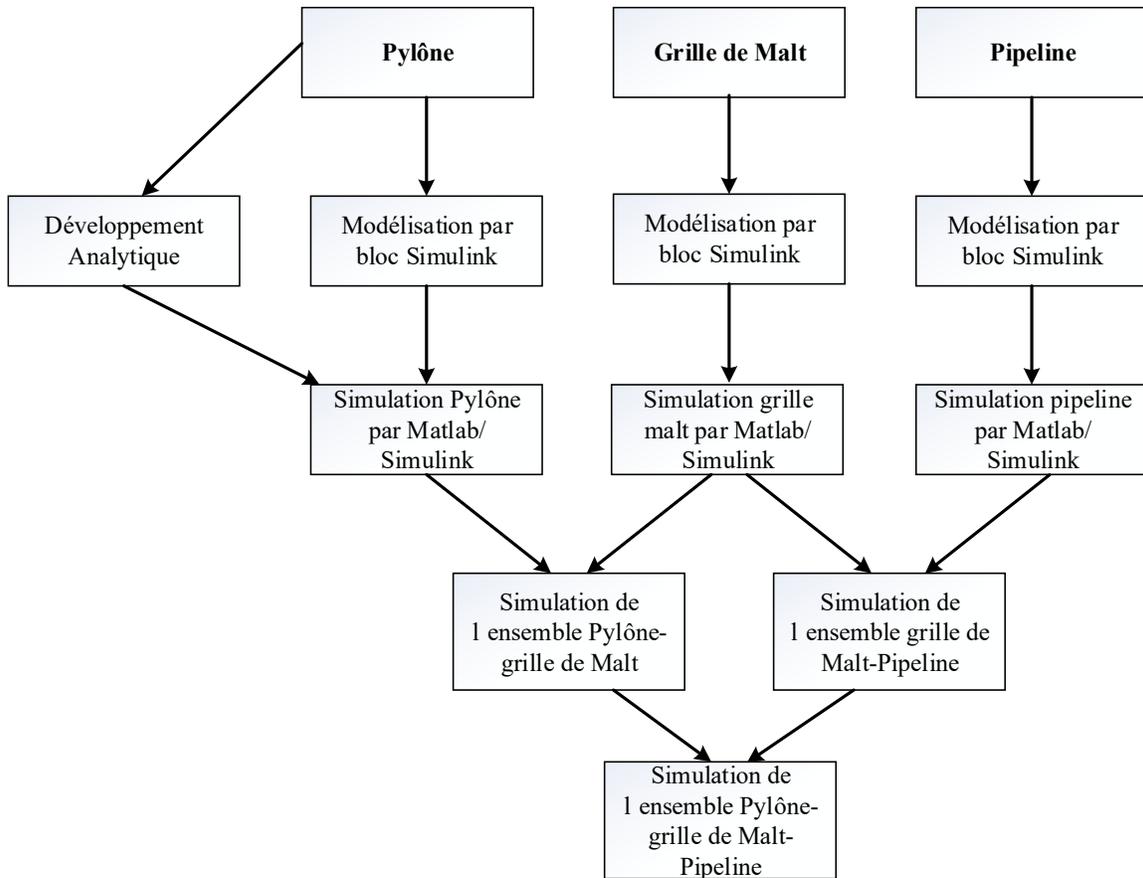


Figure 2: Organigramme de travail.

1.7.Résultats attendus

Prédire le comportement de la foudre (tension courant et impédance dans le temps) sur l'ensemble du système.

1.8.Retombées

Les principales retombées seront entre autres :

- ✓ Limiter les dégâts matériels sur l'ensemble du système;
- ✓ Limiter les pertes en vie humaine et des animaux ;
- ✓ Optimiser la disponibilité du réseau électrique.

1.9.Conclusion

Le pylône connecté à une grille de malt et soumis à un impact de coup de foudre a été détaillé dans son contexte d'étude en supposant certaines conditions, à savoir le type de sol qui est homogène et celui où le conduit pipeline sera enfoui. Les objectifs fixés étant de simuler le comportement dynamique des courant et des tensions lors d'un impact de foudre, une méthodologie relevant de la démarche à suivre a été élaboré pour atteindre les objectifs fixés. Avec ces résultats, il sera évident de limiter les dégâts matériels sur l'ensemble du système, limiter les pertes en vie humaine et des animaux, optimiser la disponibilité du réseau électrique. Dans le chapitre 2 suivant, il sera détaillé les généralités sur le mécanisme d'agression de la foudre sur les pylônes électrique raccordés aux grilles de malt et au voisinage d'un pipeline.

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LE MÉCANISME D'AGRESSION DE LA Foudre SUR LES PYLONES ELECTRIQUES RACCORDÉS AUX GRILLES DE MALT ET AUX VOISINAGE D'UN PIPELINE

2.1.Introduction

La foudre étant l'un des phénomènes naturels imprévisibles et néfastes a été évoqué par plusieurs chercheurs. Le célèbre chercheur Benjamin Franklin a fait allusion en démontrant il y a quelque décennie, que sa décharge électrique est gigantesque. Des nombreux chercheurs ont étudié des nuages et éclairs, à l'instar de Richard E. Orville qui a travaillé sur la densité des éclairs au sol aux États-Unis en 1989. Il révèle que le réseau national de détection de la foudre est composé de 114 radiogoniomètres magnétiques à large bande permettant de localiser les éclairs nuage-sol. Plus de 13,4 millions d'éclairs ont été enregistrés au cours de cette année [20]. Dans cette partie du chapitre, nous verrons le mécanisme de formation, les différents coups de foudre sur un pylône, sur une grille de malt, sur le pipeline et les systèmes de protection pour chaque cas spécifique d'un impact de foudre sera bien évidemment aussi détaillé.

2.2.Mécanisme de la formation de l'orage

2.2.1. Formation d'orage

La formation des nuages orageux résulte de la rencontre entre un flux d'air anormalement froid issu de l'électrophore et un flux d'air anormalement chaud venant du sol, comme le montre la Figure suivante :

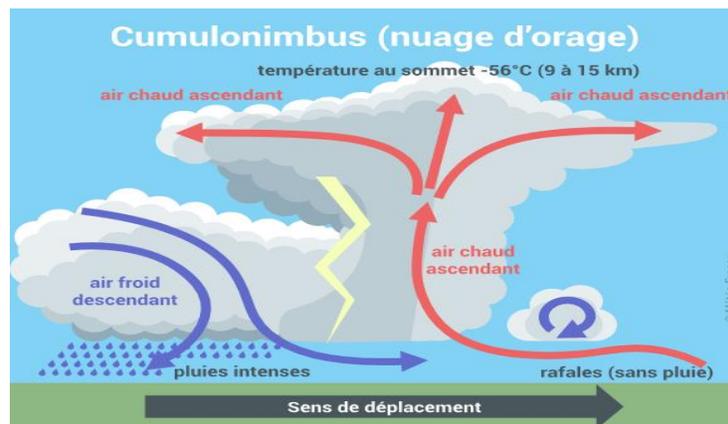


Figure 3: Représentation des flux d'air entraînant un épisode orageux [21].

Lorsque la valeur du champ électrique dépasse la valeur critique de rupture diélectrique, la décharge se produit selon un mécanisme complexe, c'est le coup de foudre.

La formation de nuage d'orage est constituée des étapes suivantes :

- ✓ La formation d'un nuage d'orage appelé le cumulo-nimbus,
- ✓ En suite l'électrisation du nuage en fin production d'éclairs [22].

Lorsqu'on se retrouve dans certaines conditions atmosphériques (humidité, chaleur, etc.), on assiste à la formation de nuages orageuses. Ces énormes masses nuageuses, généralement de type cumulo-nimbus, sont constituées de gouttes d'eau à leur partie inférieure et de cristaux de glace à leur partie supérieure. Sous l'effet de courants ascendants internes violents, une séparation des charges électriques de ces particules d'eau s'opère ou aboutit à une concentration positive de la partie supérieure de ces nuages, tandis que leur base est chargée négativement. Parfois, une poche de charges positives est enserrée dans la base négative. Lorsqu'un nuage orageux se forme au-dessus du sol, il constitue avec ce dernier un large dipôle [23].

Niveau kéraunique : L'activité orageuse d'une commune peut être quantifiée par un niveau kéraunique. Le niveau kéraunique est défini comme étant le nombre moyen de jours par an au cours desquels le tonnerre est entendu.

2.2.2. Différents coups de foudre

Par définition, la foudre est la manifestation lumineuse de la décharge électrique entre le nuage et le sol. Dans la littérature, plusieurs chercheurs ont effectué des études, à l'instar de Berger [24], Golde, Mason et Uman [20] qui ont permis de mieux comprendre le principe de déclenchement des coups de foudre.

Ces diverses études ont permis de classer les coups de foudre en différentes catégories qui sont fonction de deux critères importants : Le premier est lié à l'origine de la décharge et le second à la polarité des charges véhiculées. On obtient alors quatre types de coups de foudre comme indiqués sur la figure suivante.

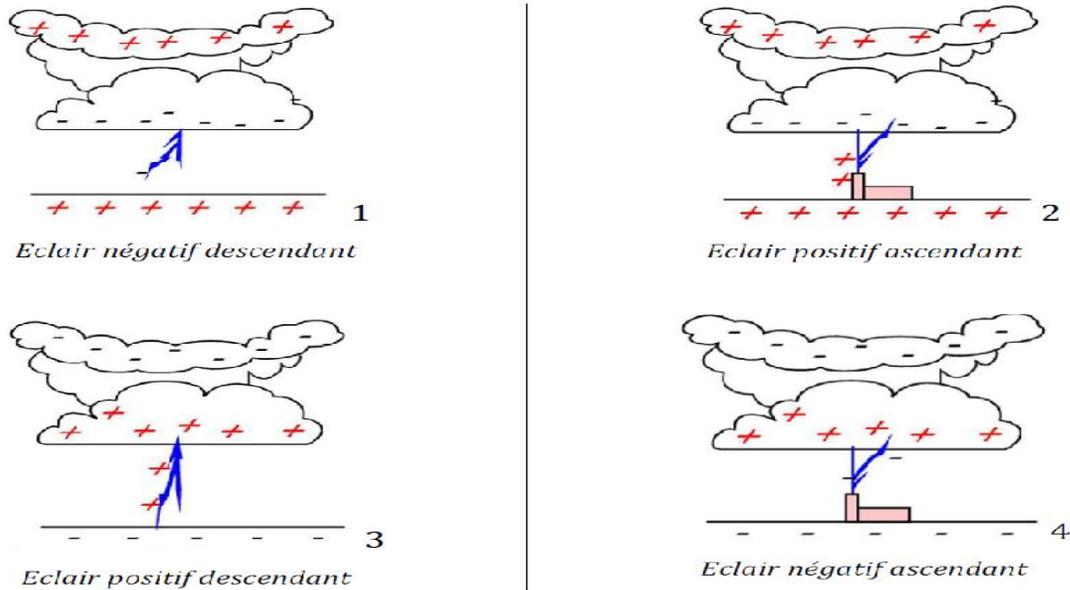


Figure 4: Classification des coups de foudre [25].

Dans les pays tempérés, 90% des décharges orageuses sont de type 1. Ce type de décharge, appelée décharge négative, peut par conséquent être considérée comme la forme la plus commune des décharges nuage-sol. Ce type d'éclair est déclenché par un traceur descendant chargé négativement.

Les coups de foudre appartenant à la 3eme catégorie sont eux aussi déclenchés par un traceur descendant, mais chargé positivement (décharge dite positive). Cette catégorie regroupe moins de 10% des décharges nuage-sol. Enfin, les décharges des catégories 2 et 4 sont déclenchées par des traceurs ascendants et sont relativement rares car elles se produisent généralement aux sommets de montagnes ou de hautes structures.

2.2.3. Énergie de la foudre

La foudre est définie comme une décharge électrique d'une longueur de plusieurs kilomètres associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. La formation des nuages orageux résulte de la rencontre entre un flux d'air anormalement froid issu de l'électrophore et un flux d'air anormalement chaud venant du sol. A l'origine les nuages orageux sont des cumulus. A ce stade, un courant ascendant, d'air chaud prédomine au sein du nuage. Ce courant vertical atteint habituellement sa vitesse maximale dans la partie supérieure (de l'ordre de 25m/s). Durant son ascension, l'eau contenue dans le courant d'air chaud se condense au contact de l'air ambiant plus froid et provoque la création de gouttes d'eau et de glace dans la partie haute du nuage ainsi qu'un courant

descendant constituer d'air froid. On parle alors de cumulonimbus. Ce type de nuage est facilement reconnaissable grâce à sa forme en enclume provoquée par la rencontre entre le courant ascendant et les couches hautes de l'atmosphère.

2.2.4. Paramètre électrique de la foudre

2.2.4.1. Courant à base du canal

Dans la littérature, plusieurs modèles ont été développés avec différents degrés de complexité afin d'évaluer le rayonnement de la foudre. La difficulté liée à cette étude est due au fait que les seuls éléments pour lesquels on possède suffisamment d'informations sont les courants mesurés de l'arc et l'onde électromagnétique mesurée à différentes distances.

Dans le cas d'un impact direct de coup de foudre, la totalité du courant de foudre se repartit de chaque côté du point d'impact et la perturbation se propage ainsi vers les deux extrémités du point d'impact avant d'atteindre le sol. Par conséquent, ce courant élevé peut provoquer la destruction ou le dysfonctionnement des équipements connectés au point foudroyé.

2.2.4.2. Vitesse de l'arc en retour

La vitesse de l'arc en retour détermine le pic initial du champ rayonné. La vitesse moyenne de l'arc en retour est de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière. Cette vitesse subséquente est en général plus grande que celle des arcs en retour. D'autre part, il a été mis en évidence que cette vitesse tant pour les premiers que pour les subséquents, décroît en fonction de la hauteur et que la décroissance est plus marquée pour les premiers arcs en retour. Elle est comprise entre 0.9 et 1.9×10^8 m/s.

2.2.4.3. Champ électromagnétique

Les champs électriques et magnétiques sont présents et forment le champ électromagnétique, lorsqu'il y a simultanément évolution de tension et de courant dans le temps. Le champ électromagnétique rayonné par la foudre se propage dans l'espace par ses trois composantes; deux électriques, horizontal E_r et vertical E_z et l'autre magnétique azimutal H_ϕ . Pour une approximation générale, ils se présentent pour toute distance (entre 1 km et 200 km) un premier pic dont l'intensité est approximativement, inversement proportionnelle à la distance. A des distances relativement proches, le champ magnétique présente une « bosse » à environ $30 \mu\text{s}$, alors que le champ électrique a une croissance en rampe après son pic initial. Les champs électriques et magnétiques lointains (distance

supérieure à environ 50 km) ont essentiellement la même forme d'onde, et présentent une inversion de polarité.

2.2.5. Foudroisement d'une ligne

La formule empirique générale indiquant le foudroisement (nombre total de CDF par an) d'une ligne (pylônes, câbles de phases et de garde) se donne par :

$$N_L = N_k \left(\frac{N_1}{30} + \frac{l}{70} \right) \cdot \alpha \frac{L}{100} \quad (2.1)$$

N_k = niveau kéraunique;

N_L = foudroisement de la ligne,

N_1 = foudroisement du conducteur horizontal le plus élevé;

L = longueur de la ligne en km;

l = largeur de la ligne en m (entre les conducteurs extérieurs);

α = facteur d'influence des pylônes et des câbles de garde.

2.2.6. Origine des surtensions

Nous parlons de surtension d'un réseau ou d'une ligne, lorsqu'une tension fonction du temps dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale elle aura lieu dans un phénomène transitoire, qui définit l'évolution des surtensions entre deux états de fonctionnement permanent.

2.3. Coup de foudre sur un pylône.

2.3.1. Impact direct.

On parle de coup de foudre direct lorsque la foudre tombe sur un pylône ou un conducteur de phase d'une ligne. Le courant $i(t)$ se répartit par moitié de chaque côté du point d'impact et se propage le long des conducteurs qui présentent une impédance d'onde Z de valeur comprise entre 300 et 500 Ω .

2.3.2. Impact indirect.

Contrairement au cas de l'impact direct, le coup de foudre indirect ne touche pas directement le réseau. Dans ces conditions, le couplage du champ électromagnétique rayonne par l'arc en retour avec le réseau génère des courants et tensions induits sur les différents conducteurs filaires. Les signaux induits sont fonction de la position du point d'impact, des paramètres du courant de foudre ainsi que les caractéristiques du sol et du réseau. Les perturbations électromagnétiques ainsi générées peuvent atteindre plusieurs kA

et kV et se propagent le long des conducteurs en direction des équipements d'extrémités. Les effets de ce type d'impact peuvent se traduire également par des destructions ou des dysfonctionnements d'équipements.

2.4. Coup de foudre sur une grille de malt.

La grille de malt est un dispositif de protection dont le rôle est d'intercepter la décharge de type foudre ou un courant de défaut vers le sol. Dans le cas d'un coup de foudre sur une grille de malt, l'effet de la propagation du courant de foudre est la même que celle sur un pylône ou une ligne électrique.

Il existe plusieurs modèles de grille de malt dans la littérature. Yaqing Liu et al. présentent dans [26, 27] les modèles 1 x 1 et 2 x 2. Plus on a des grilles associées, moins est l'amplitude de dissipation du courant ou de la tension [28].

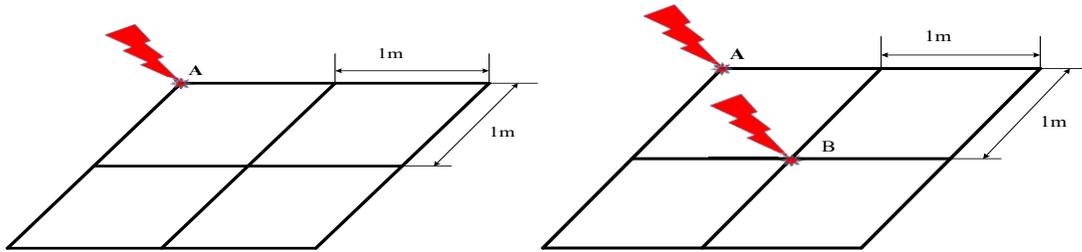


Figure 5: Modèle du réseau de terre 2 x 2 avec impact de foudre.

2.5. Impact de la foudre sur un pipeline.

Le transport du pétrole par pipeline est le plus rapide, le plus pratique et le plus sûr. Son coût unitaire d'énergie est le plus faible par rapport aux autres modes de transport. Normalement, un oléoduc souterrain sera posé à environ 1,5 mètre de profondeur à partir de la surface du sol et parallèlement à la voie ferrée ou à la ligne de transport haute tension. D'après les enregistrements faites, les dispositifs de protection contre la corrosion qui se raccordent à la canalisation sont toujours endommagés par la foudre [19].

Il existe plus de 2,5 millions de kilomètres de pipelines de pétrole et de gaz aux États-Unis. Environ 900 défaillances ont eu lieu sur des pipelines de liquides dangereux entre 2002 et 2003, et 9% de ces défaillances ont été attribuées à des dommages dus à la force naturelle, notamment des coups de foudre, entre autres événements naturels. [29].

2.5.1. Fréquence, cause et conséquence de défaillance de pipeline.

De nos jours, des pertes de confinement dans les pipelines se produisent et peuvent être le début d'un accident aux conséquences graves. Dans de nombreux cas, des dommages environnementaux importants, de graves destructions de biens et plusieurs victimes sont causés. L'évaluation des risques est reconnue comme un outil très précieux pour améliorer la sécurité dans l'exploitation des pipelines. L'utilisation de l'évaluation des risques permet aux exploitants de pipelines de gérer rationnellement l'inspection et la maintenance préventive (primordiale pour l'allocation des ressources de prévention).

2.5.1.1. La fréquence de défaillance.

Selon la base de données des statistiques allant de 1970 à 2010 aux États-Unis, au Canada et au Brésil, selon Sérgio Barros da Cunha, les pipelines transportant des produits chauffés, présente un taux de défaillance beaucoup plus élevé. Pour les pipelines transportant de liquide, le taux de défaillance est compris entre 0,1 et 0,15/10³ km par an. Et pour les pipelines transportant de gaz, le taux de défaillance des dernières années se situe entre 0,25 et 0,3 défaillance/10³ km par an. Les données sur les défaillances indiquent que les pipelines de liquides sont défaillants environ deux fois plus souvent que les gazoducs et que le gaz sec ne provoque généralement pas de défauts de corrosion interne [30].

2.5.1.2.Cause de défaillance.

Les causes de défaillance des pipelines sont entre autres :

- La corrosion : c'est l'une des causes de défaillance des pipelines transportant des produits chauffés. Parmi les paramètres qui régissent le taux de défaillance de corrosion externe, le type du revêtement externe semble être le plus important. Un autre paramètre important pour la fréquence de corrosion externe est l'épaisseur de la paroi du tuyau . Le taux de défaillance de la corrosion externe est affecté par d'autres facteurs, tels que l'efficacité du système de protection cathodique , l'intégrité du revêtement externe, les courants vagabonds non atténués et l'existence de défauts de corrosion.
- Les actions humaines accidentelles ou intentionnelles sont les principales causes de défaillance du pipeline; c'est la cause principale dans 6 bases de données sur 8 et est à l'origine de 22 à 67% des défaillances. Les données de CONCAWE (Davis et al., 2011) indiquent que 91% des incidents enregistrés se sont produits dans des zones résidentielles, industrielles ou commerciales, mais elles ne tiennent pas de statistiques sur l'exposition

pour chaque type d'utilisation des terres [31]. Le Canada fait exception, où ce mode de défaillance n'est responsable que pour 6% des défaillances signalées. Les données sur les défaillances de pipeline indiquent que le taux de défaillance dû à l'action humaine dépend fortement du diamètre de la conduite, les diamètres les plus petits présentent un risque de défaillance plus élevé. Aussi, la profondeur de l'enterrement est un facteur important dans la prévention des dommages causés aux canalisations par l'action humaine. Cela est probablement dû au fait que de nombreux pipelines canadiens traversent des régions éloignées et non peuplées.

La fissuration ne semble poser un problème que dans des cas particuliers. La fissuration est associée au transport de gaz manufacturé humide. Au Canada, environ la moitié des cas sont causés par une fissuration par corrosion sous contrainte externe, un mode de défaillance lié à des conditions de sol spécifiques associées à des problèmes de revêtement externe.

- La fréquence des pannes dues à des causes naturelles dépend du type de terrain, des conditions topographiques et géologiques, des caractéristiques hydrologiques, du niveau de pluie et de foudre, de la possibilité de tremblements de terre, etc. Ces conditions sont non seulement très distinctes selon les pays et les régions, mais ne sont pas nécessairement constantes le long du tracé d'un pipeline.

2.5.1.3. Conséquence de défaillance de pipeline.

Pour qu'une défaillance de la conduite devienne un incendie, il est nécessaire que l'atmosphère combustible créée par la fuite contacte une source d'allumage. La source d'inflammation peut être l'événement endommageant le pipeline lui-même. Une fuite de gaz générera une atmosphère combustible beaucoup plus large et nécessitera une énergie d'activation plus faible qu'une fuite de liquide. Par conséquent, l'inflammation des défaillances de gazoducs est plus fréquente et a été étudiée plus en profondeur [32].

Les données EGIG (EGIG, 2011) indiquent que 57% des cas de fuites dans les gazoducs causés par la foudre ont provoqué une inflammation, tandis que la base de données DOT (Kiefner et al., 2001) en indique 50% [32].

La base de données CONCAWE (Davis et al., 2011) a enregistré 378 fuites de pipelines de liquides au cours de 30 années d'exploitation en Europe occidentale. Les fuites causées par la foudre dans les pipelines de liquides se sont incendiées dans 79% des pipelines

réglementés par le DOT (Kiefner et al., 1999) [32]. Neuf d'entre eux ont provoqué un incendie; cinq avec des produits raffinés légers et quatre avec du pétrole brut. Aucun incendie n'a été observé dans les fuites de produits raffinés lourds. Deux cas d'incendie au pétrole brut ont été causés par des procédures de réparation inappropriées.

La perte de confinement d'un pipeline de liquide ou de gaz à base de pétrole peut être le début d'un accident aux conséquences graves. Dans de nombreux cas, des dommages environnementaux importants, de graves dégâts matériels et plusieurs pertes en vies humaines.

2.6.Système de protection contre la foudre.

Les systèmes de protection doivent répondre à deux objectifs :

- En cas d'impact direct sur la structure, le système de protection doit écouler le courant de foudre vers la terre en évitant des amorçages avec les différentes parties de l'installation. Ce type de protection est assuré par des paratonnerres constitués par des tiges simples, des fils tendus ou encore une cage maillée.
- Limiter ou supprimer les contraintes des surtensions dans les installations. Cette protection est généralement assurée par des dispositifs composés des parafoudres à gaz, et/ou varistances.

2.6.1. Système de protection contre l'impact direct.

Ce type de protection doit assurer la maîtrise de la connexion de la foudre sur les structures afin d'évacuer une partie du courant de foudre à la terre. Elle peut être réalisée à partir de différents systèmes de captage selon le type de structure à protéger.

2.6.1.1.Les paratonnerres à tige simple.

Le paratonnerre à tige simple (ou tige de Franklin du nom de son inventeur en 1753) est constitué d'une tige simple effilée à son extrémité de manière à favoriser l'effet de pointe. Le but est de capter la foudre sur une zone donnée afin d'écouler le courant de foudre vers la terre par l'intermédiaire de conducteurs de descente. La zone de protection assurée par un paratonnerre est directement liée à sa hauteur et peut être déterminée à l'aide du modèle de la sphère fictive proposée dans la norme française NF EN 62305. Ce type de protection est plus particulièrement réservé aux petites structures de type, pylône, cheminée industrielle, mat ou cuve.

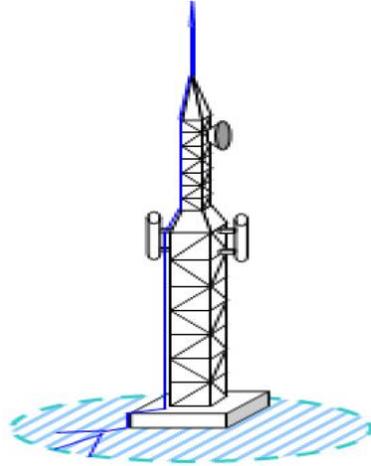


Figure 6: Exemple de protection par tige simple [33]

2.6.1.2.Cage maillée

Le principe d'une protection par cage maillée, consiste à favoriser la répartition et l'écoulement vers la terre du courant de foudre par un ensemble de conducteurs et de prises de terre. Une cage maillée est constituée d'un nombre important de conducteurs de descente, elle constitue de ce fait une solution intéressante lorsque le matériel situé à l'intérieur du bâtiment est sensible aux perturbations électromagnétiques. En effet, le courant de foudre obéit à la loi de Kirchhoff, et la faible valeur du courant circulant dans les mailles permet de diminuer le couplage de type inductif.

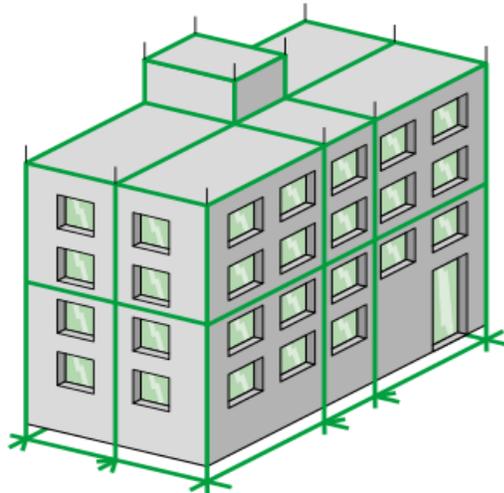


Figure 7: Paratonnerre à cage maillée [33]

a. Vérification de système de terre

La norme NF C 17-100 recommande des vérifications dont la périodicité dépend du niveau de protection retenu. Ces vérifications concernent les prises de terre (anciennes et nouvelles) ainsi que les parafoudres lorsque cela est possible.

Tableau 1: Périodicité des vérifications des protections contre la foudre

Niveau de protection	Périodicité normale	Périodicité renforcée
I	2 ans	1 an
II	3 ans	2 ans
III	3 ans	2 ans
IV	4 ans	3 ans

b. Protection du Système de mise à la terre

Les électrodes de mise à la terre verticales et horizontales sont traditionnellement utilisées dans les systèmes de protection contre la foudre «pour diriger le courant de foudre des conducteurs de descente vers la terre avec une augmentation minimale du potentiel de la partie aérienne du système de protection» [34]. Les critères de sécurité fondés sur « une augmentation minimale du potentiel » sont tirés de l'analyse des systèmes d'alimentation [35, 36].

2.6.1.3. Le fil de garde ou fil tendu

Les protections réalisées à l'aide de fils de garde ou fils tendus sont principalement utilisées pour protéger des sites dont la structure ne peut pas recevoir de protection par cage maillée. On retrouve, par exemple, ce type de protection sur l'aire de lancement de la fusée ariane, les zones de stockage, les champs de panneaux solaires, ou encore sur le réseau électrique haute tension. La protection est assurée à l'aide d'un conducteur nu placé au-dessus de la zone à protéger et connecté à des malts de terre.

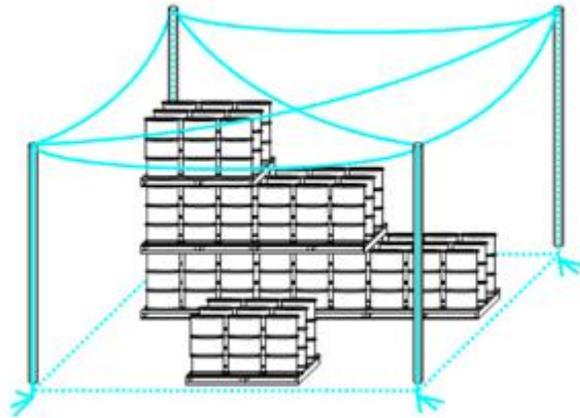


Figure 8: Protection par file de garde [33].

Dans le cas particulier de la protection du réseau électrique haute tension, un fil de garde est placé sur le haut de chaque pylône. Le but de ce fil est de capter la foudre et de dissiper son courant vers le réseau de terre par l'intermédiaire des pylônes.

2.6.2. Système de protection contre l'impact indirect

Ces dispositifs de protection sont destinés à limiter les surtensions transitoires provoquées par la foudre sur les accès filaires. On retrouve deux types de protection pouvant être utilisées séparément ou en complément l'une de l'autre :

- ✓ Les éclateurs à gaz : ils disposent d'un fort pouvoir d'écoulement et sont généralement placés en tête de câble, en entrée d'installation, et connectés entre chaque fil et la terre. Ils ont pour principal objectif d'évacuer à la terre les perturbations électromagnétiques afin de protéger les équipements connectés aux câbles et situés à l'intérieur des bâtiments. Le principal inconvénient de ce type de composant est lié à son temps de réponse et à la disparité des tensions d'amorçage qui dépendent des conditions atmosphériques environnantes.
- ✓ Le réseau de varistances est composé de trois varistances à oxyde de zinc (ZnO). Les deux varistances, en bleu, assurent une protection de mode commun alors que celle représentée en rouge assure la protection de mode différentiel (figure 9). Le principe de base d'une varistance est de présenter une résistance variable entre ses deux bornes afin de limiter la tension à une valeur maximale (U_p) pouvant être supportée par les équipements.

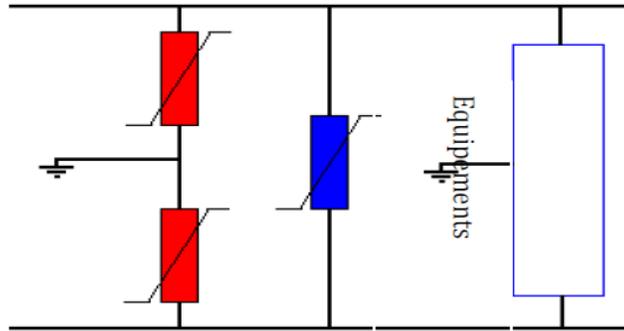


Figure 9: Exemple de Réseau de varistances

2.7. Normes relatives aux systèmes de protection contre la foudre

Il existe plusieurs normes internationales de protection contre la foudre, qui ont été appliquées aux éoliennes [37]. Ceux-ci inclus:

- IEC 61024 Protection des structures contre la foudre;
- IEC 61662 Évaluation du risque lié à la foudre;
- IEC 61312 1-5 Protection contre les impulsions électromagnétiques par la foudre.

En 2010, une deuxième édition de la série CEI 62305 a été publiée[38-41] . Cette deuxième édition a annulé et remplacé la première édition parue en 2006 et constitue une révision technique. Cette nouvelle édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- ✓ L'évaluation des risques pour les services liés aux structures est exclue du champ d'application.
- ✓ Les blessures des êtres vivants causées par un choc électrique à l'intérieur de la structure sont prises en compte.
- ✓ Le risque tolérable de perte du patrimoine culturel passe de 10^{-3} à 10^{-4} .
- ✓ La valeur du risque de perte de valeur économique tolérable ($RT= 10^{-3}$) est introduite, à utiliser lorsque les données pour l'analyse coûts / avantages ne sont pas disponibles.
- ✓ Les dommages étendus aux structures environnantes ou à l'environnement sont pris en compte.
- ✓ Différentes équations sont fournies pour évaluer les zones de collecte (relatives aux flashes proches d'une structure et aux flashes situés à proximité d'une ligne), pour déterminer les probabilités qu'un flash puisse causer des dommages, pour les

- facteurs de perte même dans les structures présentant un risque d'explosion, pour les risques pertinents à une zone d'une structure, pour le coût de la perte.
- ✓ Des tableaux sont fournis pour sélectionner le montant de la perte dans tous les cas.
 - ✓ Le niveau de tension de tenue aux chocs des équipements a été étendu à 1 kV.

En 2006, La CEI a restructuré l'ensemble de ses publications, et mis à jour certaines parties de normes, au travers de la série CEI-62305-x.

Cette série comporte 4 normes relatives à la « Protection contre la foudre » selon la décomposition suivante :

CEI-62305-1 : Cette norme regroupe les principes généraux de la protection contre la foudre des bâtiments, en tenant compte d'une part, des équipements et des personnes à l'intérieur, et d'autre part des adductions de la structure. La méthode de protection à adopter est établie en fonction de divers paramètres prédéfinis du courant de foudre pour lequel la protection est recherchée [42];

CEI-62305-2 : Cette norme traite de l'évaluation des risques. La méthode proposée permet de choisir les mesures de protection appropriées afin d'obtenir un niveau de risque acceptable d'un point de vue économique et technique. Elle donne une procédure de détermination du niveau de risque, basé, entre autres, sur la probabilité des dommages dus à la foudre et l'estimation du cout annuel moyen des pertes consécutives à une agression de type foudre [43];

CEI-62305-3 : Cette partie traite de la protection, à l'intérieur d'une structure, contre les dommages physiques dus à la foudre, et contre les lésions d'êtres vivants (tension de contact/ tension de pas). Cette norme traite essentiellement des systèmes de capture de la foudre, du dimensionnement du réseau de terre, et de l'équipotentialité à l'intérieur du bâtiment. La norme CEI-62305-3 traite des mesures de protection pour la diminution du risque de dommage physique dans la structure mais elle ne traite pas la protection des réseaux d'énergie ou de Télécommunications [44];

CEI-62305-4: La partie 4 de la série de norme NF EN 62305 fournit les informations relatives à une installation de protection contre l'impulsion électromagnétique de foudre (IEMF), au niveau : de la conception, de l'installation, de l'inspection, de la maintenance, des essais.

Le tableau ci-dessous ressort les normes, nationales et internationales, applicables à la protection contre la foudre des infrastructures.

Tableau 2: Normes relatives à la protection contre la foudre des installations au sol

Référence Internationale	Domaine d'application « Protection contre la foudre »
CEI-62305-1	Principes généraux
CEI-62305-2	Evaluation des risques
CEI-62305-3	Dommages physiques sur les structures et risques humains
CEI-62305-4	Réseau de puissance et de télécommunication dans les structures

Dans [45], Geiges ressort les effet physiologiques des chocs électriques. Pour cela, il souligne que le courant produisant une contraction musculaire involontaire est de l'ordre de 20 mA pour un adulte. La résistance minimale du corps humain, utilisée dans l'évaluation du courant lors d'un accident industriel serait fixée à environ 500 ohms tandis que la résistance entre les mains d'un travailleur se situe à environ 1500 ohms. Dalziel dans [46] confirme ce fait et démontre que l'impédance du corps humain est de l'ordre de 1000 ohms.

2.8. Conclusion

Dans le présent chapitre, un aperçu détaillé sur le mécanisme d'agression de la foudre sur les pylônes électrique, la grille de malt et le pipeline lors d'un impact direct (thermoélectrique) et indirect (électromagnétique) a été présenté. Contrairement au cas de l'impact direct, le coup de foudre indirect ne touche pas directement le réseau. Dans ces conditions, le couplage du champ électromagnétique rayonné par l'arc en retour avec le réseau génère des courants et tensions induits sur les différents conducteurs filaires. De ce fait, un bon choix de système de protection adéquat est primordial pour limiter le dégât que causerais la foudre. De plus pour la protection des personnes intervenant sur le pipeline, la vérification permanente de l'isolant de revêtement est indispensable. On note aussi que la corrosion contribue à plus de 30% de la défaillance des pipelines [47]. Dans la suite, les éléments constituant les différentes parties de notre étude sera détaillé pour éclaircir la propagation de l'onde de foudre.

CHAPITRE III : ÉLÉMENTS CONSTITUANTS L'ENSEMBLE DU SYSTEME PYLÔNES-GRILLES DE MALT-PIPELINE

3.1.Introduction

Avec le développement rapide de l'économie, la demande en énergie se fait de plus en plus pressante, les lignes de transport d'électricité et les oléoduc/gazoduc sont en construction. Les projets de gaz à ultra haute tension (UHV) sont les principaux projets nationaux de ces dernières années. En raison de la similitude de la sélectivité de la voie de transmission dans les secteurs de l'énergie et du pétrole/gaz, des situations de parallélisme, d'approche oblique et de croisement entre la ligne de transport et le pipeline ont été fréquemment rencontrées. Par conséquent, l'influence électromagnétique sur l'oléoduc pétrole/gaz près de la ligne de transport devient de plus en plus importante [48]. Les trois sous-systèmes pylône-grille de malt -pipeline sont constitués des éléments, composants et paramètres qui définissent chaque sous système. Et chacun de ses composants à un rôle précis et contribue à l'écoulement du courant de foudre lors d'un impact. Le chemin de courant de foudre commence au point d'impact sur un point quelconque du pylône à travers les bras verticaux, la grille de malt pour l'écoulement du courant au sol, puis sur le pipeline au voisinage par couplage électromagnétique.

3.2.Eléments influençant le comportement de la foudre sur le pylône électrique

3.2.1. Fil de garde

Le fil de garde est un conducteur nu reliant les sommets des pylônes les uns aux autres et mis à la terre sur chaque pylône.

3.2.2. Taille du pylône

La taille du pylône joue un rôle important sur l'amplitude de la tension crête et le temps. Il a été démontré dans [49] au fur et à mesure que le nombre de segments de la hauteur nominale augmente, la valeur crête de la tension au sommet du pylône diminue progressivement, et le temps également. Lorsque le nombre de segments atteint un certain niveau, la forme d'onde de réponse transitoire du pylône change peu.

3.2.3. Les bras horizontaux du pylône

Dans la modélisation, on tient compte également des bras horizontaux et des bras inclinés. Mais ces éléments n'ont pas trop d'influence dans la simulation pour la

propagation de l'onde de foudre. Il a été démontré dans [3], que pas plus de 1% de cette énergie se propagent le long des bras inclinés et qu'une énergie pratiquement nulle se propagent le long des barres transversales.

3.2.4. Les bras verticaux du pylône

Les bras verticaux sont très essentiels pour la propagation de l'onde de foudre, car c'est le chemin principal de la propagation. Ils jouent une influence sur l'amplitude de la tension et le temps de propagation. Plus les bras verticaux se multiplient (plus de segment), l'amplitude de tension diminue progressivement.

3.3.Éléments influençant le comportement de la foudre sur la grille de malt

3.3.1. Généralité sur la mise à la terre

Les mises à la terre (MALT) sont des éléments vitaux des circuits électriques et jouent un rôle essentiel dans la protection contre les accidents électriques. Elles ont été introduites dans le domaine de l'électrotechnique par Benjamin Franklin, célèbre inventeur des parafoudres. Les MALT étaient jugées indispensables dans les systèmes électriques, qui commençaient à se reprendre vers la fin du XIXe siècle, pour assurer la protection des individus et pour permettre le fonctionnement adéquat des installations.

À présent, plusieurs des éléments des centrales, des postes et des lignes électriques doivent être mis à la terre. Cela assure un chemin de retour au courant en cas de défaut, une protection contre la foudre et les surtensions ainsi qu'une protection des individus contre les chocs électriques. Dans les réseaux à courant continu (cc), les MALT assurent le passage du courant par la terre pour de longues durées.

De nombreuses publications existent dans le domaine des MALT [50].

3.3.2. Rôle d'une mise à la terre

Une mise à la terre (MALT) est une connexion entre un objet et la terre. En pratique, il s'agit d'une connexion conductrice entre un équipement et une électrode. Les objectifs de cette connexion sont de maintenir le potentiel du bâti d'un équipement et, s'il y a lieu, le point neutre d'un circuit à une valeur très proche de celle du sol environnant ainsi que de faciliter le passage du courant électrique vers le sol ou inversement. D'une façon générale, les MALT assurent d'une part la protection des individus et des équipements et d'autre part la qualité du service. Certaines pièces métalliques peuvent devenir accidentellement à un

potentiel électrique inacceptable du point de vue de la sécurité des individus. La connexion de ces objets à la MALT permet de réduire tant l'amplitude que le temps d'apparition de la tension de choc. Les risques d'un accident en sont d'autant diminués. Cela protège les matériaux isolants des équipements. Pour protéger les équipements contre la foudre, des installations de MALT doivent pouvoir évacuer vers la terre, le courant engendré par celle-ci et limiter le potentiel électrique des objets protégés. L'intensité et la rapidité du front d'onde d'une décharge provoquée par la foudre peut amener l'apparition d'un potentiel de l'ordre du méga volt sans la présence de ces installations. Les parafoudres, les éclateurs et les fils de garde des lignes à haute tension sont des exemples d'appareillages raccordés à une MALT assurant ainsi la protection contre la foudre [7].

3.3.3. Éléments d'une mise à la terre

Le MALT d'une ligne de transport est habituellement constitué des fondations du pylône ou des ancrages en contact avec le sol. Une électrode horizontale est souvent ajoutée entre les pylônes. Cette électrode est constituée d'un conducteur, nommé contrepoids, enfoui à une faible profondeur et pouvant relier les pylônes entre eux sur une grande distance. Des fils de garde, ayant pour objectif la protection contre la foudre, relient les sommets des pylônes les uns aux autres. Il peut arriver qu'un éclateur les isole des structures en régime non perturbé. Des tiges et ou des conducteurs enroulés aux pieds des structures des réseaux à moyenne ou à basse tension peuvent aussi être ajoutés lorsque la résistivité du sol est élevée. Les électrodes d'une prise de terre sont, le plus souvent, fabriquées en cuivre ou en acier recouvert d'une couche de zinc, ce qui assure une protection contre la corrosion. Dans le cas d'une électrode à courant continu, le conducteur métallique est entouré d'une bonne épaisseur de poussière ou de granules de carbone. Parfois des objets métalliques installés dans le sol pour différentes fonctions peuvent servir d'électrodes additionnelles. Par exemple, les fondations en béton armé, les canalisations d'eau, les conduites forcées des centrales ou toute autre installation métallique peuvent être mises à profit. Ces objets constituent des prises de terre naturelles [7].

Les pylônes des lignes de transport d'énergie sont reliés à des prises de terre conçues avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance [51]. Il ne faut pas que la chute de tension dans la prise de terre provoquée par un courant de foudre qui frappe le pylône

dépasse la tension de contournement des isolateurs. Sinon les trois phases de la ligne se mettent en court-circuit entre elles et à la terre. Le courant de court-circuit résultant entraîne l'ouverture du disjoncteur de protection et la mise hors service de la ligne.

3.3.4. Environnement de la grille de malt

3.3.5. Type de sol

La dimension des particules qui le composent et leurs agencements permettent de déterminer le type de sol. Les sols varient en fonction de leur texture et de leur structure. La texture d'un sol dépend de la taille des particules qui le composent. En effet, un sol composé majoritairement d'argile forme une boule qui se tient dans la main alors qu'un sol fait de sable file plutôt entre les doigts. La texture du sol influence directement sa structure, sa teneur en nutriments, son humidité et sa capacité à drainer l'eau. On peut regrouper les sols en quatre grands types [52] : Sol sableux; Sol Limoneux; Sol argileux; Sol humifère

3.3.6. La résistivité du sol

La résistivité d'un horizon de sol est sa capacité à limiter le passage du courant électrique. Elle dépend de plusieurs facteurs qui influencent la formation d'électrolytes [53]. Les facteurs principaux sont : le type de sol, la dimension des grains, la température (une augmentation de la température du sol permet à un électrolyte de mieux se dissocier ce qui fait réduire la résistivité du sol). Cependant, une augmentation de la température à 100° C cause l'évaporation de l'eau du sol et ainsi une augmentation de la résistivité. Lorsque la température tombe en-dessous de 0° C comme le cas des régions froides, la conductivité de l'électrolyte diminue et ainsi un accroissement rapide de la résistivité se produit, la porosité, le pourcentage d'eau contenu dans le sol, le pourcentage de sels solubles, le pourcentage d'acide et de bases.

Tableau 3: Tableau de résistivité du sol

Type de sol	Résistivité ρ ($\Omega.m$)	
	Plage	Valeur moyenne
Argile, sol tourbeux, sol organique, sol végétal, humus, sol marécageux	2 à 200	40
Argile sablonneuse. Argile poussiéreuse, sol blanc, marne sablonneuse	30 à 260	100
Sable argileux et poussiéreux, sol blanc composé d'argile sablonneuse	50 à 600	200
Sable. Gravier. Sol blanc composé de sable et de gravier	50 à 3000	400
Sable et gravier sec au-dessous de 3 m de profondeur	50 à 50 000	1000
Sol pierreux	100 à 8000	2000
Sol rocheux	1000 à 20 000	10 000

Tableau 4: Vitesse de corrosion en fonction de la résistivité des sols [54].

Résistivité du sol ρ ($\Omega.m$)	Classement selon la vitesse de corrosion (10^6 mm/an)
<25	Très corrosive (>13)
\approx 26-50	Modérément corrosive (9-12)
\approx 51-100	Moyennement corrosive (4-9)
\approx 100	Très corrosive (<4)

3.3.7. La résistance

La résistance d'une mise à la terre est directement proportionnelle à la résistivité du sol. Celle-ci peut être considéré comme homogène.

3.3.8. Permittivité

La permittivité d'un matériau est caractérisée par le comportement diélectrique de ce matériau. Elle est notée ϵ . Elle est fonction de la permittivité propre des différents composant du sol et de leur proportion.

3.3.9. Perméabilité

Le sol est constitué d'un certain nombre d'horizons ayant chacun des propriétés physiques et chimiques généralement différentes. La perméabilité du sol est la propriété qu'a le sol de transmettre l'eau et l'air. Plus le sol est perméable, plus l'eau s'infiltré. De nombreux facteurs influent sur la perméabilité du sol. Certains, comme les fissures et les trous. Pour déterminer la perméabilité du sol dans son ensemble, il convient d'étudier chaque horizon séparément [55].

Tableau 5: Perméabilité du sol [55].

Type de sol	Perméabilité (Cm/h)
Sable	5,0
Limon sableux	2,5
Limon	1,3
Limon argileux	0,8
Argile silteuse	0,25
Argile	0,05

3.4.Eléments influençant le comportement de la foudre sur le pipeline

3.4.1. Généralité sur le pipeline

Un pipeline est une canalisation construit à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol ou aérien transportant des combustibles sous forme solide, liquide (eau, pétrole, par exemple) ou gazeuse (gaz naturel, par exemple).



Figure 10: Construction de conduit enterré pipeline

Les conduites sont supposées être continuellement enfouies dans un sol homogène et sont situées à proximité de la grille de malt. Les effets à long terme incluent la corrosion du

conducteur en particulier dans les régions où le courant se dirige régulièrement vers le sol. La ligne de transmission électrique a été utilisée pour évaluer la tension induite sur les canalisations par des lignes aériennes à courant alternatif. Il est aussi à noter que les propriétés électriques du conducteur et du sol sont uniformes.

3.4.2. Modèle du sol

Le modèle du sol où sera enfuit le conduit pipeline est de type homogène comme celui de la grille de malt.

3.4.3. Type de revêtement

Les différents types de protection employés pour le revêtement interne sont principalement à base de résines thermodurcissables se présentant soit sous forme liquide, soit sous forme pulvérulente [56].

Les diverses familles de produit susceptible d'être utilisées sont :

Pour les systèmes polymérisables à froid :

- Les résines époxydes à durcisseur polyamide ou aminé ;
- Les résines polyuréthane ;
- Les association brai de houille-résines époxydes ou polyuréthane.

Pour les systèmes polymérisables à chaud :

- Les résines époxydes formophénoliques ;
- Les résines en poudre à base de résines époxydes et éventuellement de résines thermoplastiques comme le polyamide 11.

3.4.4. Distance entre le pipeline et la grille de malt

La distance entre le pipeline et la grille de malt n'est pas standard, mais elle sera considérée à 700m dans la modélisation et la simulation pour un impact indirect d'un coup de foudre sur un pylône au voisinage de celui-ci.

3.4.5. Longueur du conduit de pipeline

Nous allons considérer ici un pipeline de longueur non infini (700m) pour être précis dans la simulation.

3.5.Conclusion

Les éléments influençant le comportement de l'onde de foudre dans les sous système pylône-grille de malt et pipeline sont essentiels pour prédire le chemin de propagation et caractériser chaque élément qui sera pris en compte dans la simulation. Pour ce qui sera pris en compte dans les simulations, nous avons le type du sol où sera enfouit la grille de malt et le pipeline qui est homogène. Pas plus de 1% d'énergie se propagent le long des barres inclinées du pylône et qu'une énergie pratiquement nulle se propagent le long des barres transversales du pylône [3]. De plus, le pipeline sera considéré non infini. Dans le chapitre suivant seront développé les modèles et modélisations des pylônes, des grilles de malt et du pipeline.

CHAPITRE IV : MODÈLES ET MODÉLISATIONS DES SYSTÈMES PYLÔNES, GRILLES DE MALT ET PIPELINE.

4.1.Introduction

Les éléments de support des lignes de transport (Pylône et grille de malt) et le conduit pipeline enterré sont les plus exposés aux perturbations lors d'une décharge de foudre. Leur étude de comportement transitoire est en générale basé sur la théorie des lignes de transmission avec des composants électriques R, L, C et G. Plusieurs équations existent pour leurs modélisations dépendamment de la forme et de la caractéristique du matériel utilisé dans l'installation. Dans ce travail, le modèle d'une ligne de transmission est choisi et utilisé pour la modélisation des éléments du pylône, de la grille de malt et du pipeline.

4.2.Modélisation du courant de foudre

Ce courant est de nature impulsionnelle, et sa forme se caractérise par une valeur crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée) et un temps de décroissance comme illustré à la figure ci-dessous.

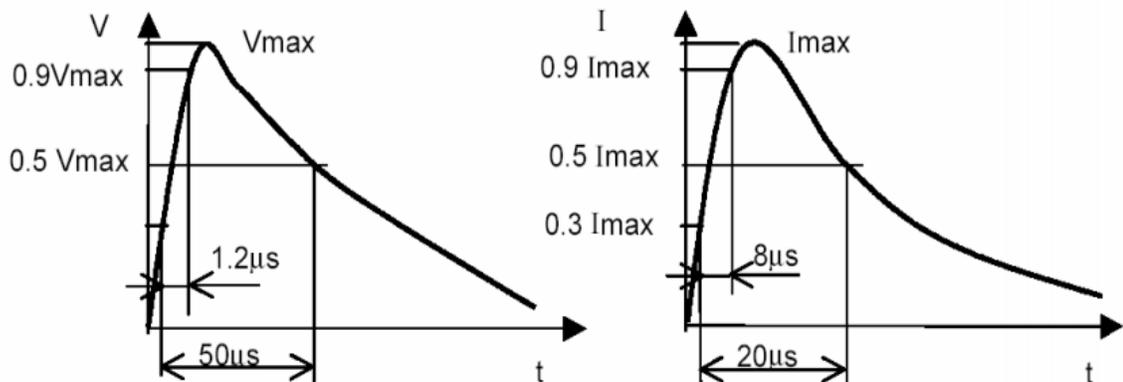


Figure 11 : Ondes de tension et de courant dans le canal de la foudre

Pour cela, plusieurs expressions analytiques peuvent être utilisées afin de simuler l'allure du courant de la foudre

4.2.1. Expression de Heidler

Une nouvelle expression analytique du courant à la base du canal de foudre a été présenté par **Heidler** En 1985. L'utilisation de cette dernière a donné des résultats correspondant mieux aux observations expérimentales [57].

$$I(0, t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (4.1)$$

$$i_1(t) = \frac{i_{01}}{\eta_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{\eta_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{\eta_1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{12}}\right) \quad (4.2)$$

$$i_2(t) = \frac{i_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{\eta_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{\eta_2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad (4.3)$$

τ_{11} : Temps de montée $1,2\mu\text{s}$;

τ_{12} : Durée de l'impulsion $50\mu\text{s}$;

$i_1(t)$ et $i_2(t)$ Désignent respectivement les amplitudes des composantes i_1 et i_2 du courant i .

η_1 et η_2 : Nombres entiers compris dans l'intervalle [2 10].

$$\eta_1 = \exp\left[\frac{-\tau_{11}}{\tau_{12}} \times \left(\frac{\eta_1 \tau_{12}}{\tau_{11}}\right)^{1/\eta_1}\right] \quad (4.4)$$

4.2.2. Expression Bi-exponentielle

Les fonctions exponentielles, utilisées par un certain nombre d'auteurs et qui présentent l'avantage d'avoir des transformées de Fourier analytiques, ce qui permet de faire une analyse directe dans le domaine fréquentiel.

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.5)$$

Les paramètres du courant sont :

I_0 : représente la valeur crête du courant (A);

α_i : est l'inverse du temps de descente;

β : est l'inverse du temps de montée.

4.3. Modélisation du Champ Électromagnétique.

Le calcul du champ électromagnétique nécessite :

- ✓ Une modélisation du courant de foudre mesuré à la base du canal.
- ✓ Une modélisation spatio-temporelle de la distribution du courant dans le canal de foudre.

4.3.1. Modélisation de la distribution de courant dans le canal de foudre.

Le calcul du champ électromagnétique généré par la foudre nécessite le courant de foudre le long du canal. Pour cela, plusieurs modèles ont été développée du fait de la complexité du phénomène de propagation du courant dans le canal ionisé afin de reproduire au mieux les phénomènes physiques. Cependant, ces modèles peuvent être scindés en deux catégories:

- ✓ Les modèles « d'ingénieur »,
- ✓ Les modèles antennes.

4.3.1.1. Les modèles « d'ingénieur »

Ci-dessous le récapitulatif des principales formulations mathématiques :

- Modèle de Bruce et Golde (BG) en 1941.
- Modèle « Ligne de Transmission » (ou Transmission Line, TL) en 1969.

Uman, McLain ont présenté un modèle qui est largement utilisé. Ils assimilent le canal de foudre à une ligne de transmission de très faible section sans perte, dans laquelle une impulsion de courant se propage à partir du sol avec une vitesse v de l'arc en retour généralement très inférieure à la vitesse de la lumière c_0 . La distribution du courant est définie [58, 59]:

- Si $Z_c \leq v \cdot t$ par:

$$i(Z_c, t) = \left(0, t - \frac{Z_c}{v}\right) \quad (4.6)$$

- Si $Z_c > v \cdot t$ par:

$$i(Z_c, t) = 0$$

$i(Z_c, t)$: est la distribution du courant le long du canal de foudre à toute hauteur Z_c et à tout moment de t .

L'inconvénient du modèle réside dans le fait que l'intensité du courant le long du canal reste constante car le modèle TL ne permet aucun transfert de charge entre le traceur et

l'arc en retour. Or, les mesures des variations du champ électrique associé au traceur ont mis en évidence que le traceur est bel et bien porteur d'une certaine densité de charge. Les différentes études concordent sur le fait que le premier arc en retour à une vitesse de propagation plus lente que les arcs en retour secondaires.

- Modèle de Master, Uman, Lin et Standler (MULS) en 1980.
- Modèle « Source de courant mobile » (ou Traveling Current Source, TCS) en 1985.
- Modèle de Diendorfer et Uman (DU) en 1990 [60].
- Modèle « Ligne de Transmission Modifié » (ou *Modified Transmission Line*, MTL) en 1990.

Ce modèle a l'avantage de pallier les défauts du modèle TL tout en gardant sa simplicité qui permet une utilisation aisée dans les calculs de couplage. La distribution du courant est définie :

- Si $Z_c \leq v \cdot t$ par:

$$i(Z_c, t) = e^{-\frac{Z_c}{\lambda}} \cdot i\left(0, t - \frac{Z_c}{v}\right) \quad (4.7)$$

- Si $Z_c > v \cdot t$ par:

$$i(Z_c, t) = 0 \quad (4.8)$$

Le paramètre λ indique la distance par rapport au sol pour laquelle le courant de foudre a diminué « e » fois (où « e » correspond au nombre de Neper) et représente donc le taux de décroissance de l'intensité du courant le long du canal qui est due à la recombinaison des charges emmagasinées dans le traceur pendant la phase d'arc en retour.

- Modèle de Y. Baba et V.A. Rakov en 2005 [61].

Ce modèle considère le canal comme une ligne de transmission sans perte caractérisée par son coefficient de réflexion à sa base ρ_{gr} .

$$i(Z_c, t) = \frac{1+\rho_{gr}}{2} \cdot i\left(0, t - \frac{Z_c}{v}\right) \quad (4.9)$$

La valeur du coefficient de réflexion ρ_{gr} peut être calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\rho_{gr} = \frac{Z_{lc} - Z_g}{Z_{lc} + Z_g} \quad (4.10)$$

Où Z_{lc} et Z_g représentent respectivement les impédances du canal de foudre et de prise de terre.

Enfin, signalons qu'aucun de ces sept modèles ne reproduit la structure fine des champs observés expérimentalement.

4.3.1.2. Les modèles de type antenne

La théorie des antennes dans le domaine fréquentiel a été très récemment utilisée pour étudier le couplage entre le champ rayonné par la foudre et les réseaux électriques. La résolution de l'équation intégrale s'effectue généralement grâce à la méthode des moments qui consiste à associer l'équation intégrale à un système d'équations algébriques linéaires équivalent à une équation matricielle.

Dans le formalisme, le canal foudre est représenté par des fils minces afin de déterminer la distribution de courant. Cependant, une contrainte importante de la théorie des antennes est le temps de calcul qui peut devenir très vite prohibitif.

4.3.2. Géométrie du problème

Le canal de foudre est considéré comme une antenne verticale unidimensionnelle de hauteur H . L'arc en retour se propage verticalement à partir du sol avec une vitesse v . Il est parcouru par un courant dont la distribution spatiotemporelle $i(Z_c, t)$ détermine le champ électromagnétique en un point quelconque de l'espace. De plus, la symétrie cylindrique du problème rend les composantes du champ électromagnétique indépendantes de l'angle azimutal. Le champ sera donc défini par :

- Le champ électrique vertical E_z ,
- Le champ électrique radial E_r ,
- Le champ magnétique radial H_θ .

Les relations temporelles du champ rayonné par un dipôle électrique sont déduites des équations de Maxwell et de la théorie des images. Elles sont définies par les relations suivantes [58]:

$$H_{\phi p(r,z,t)} = \frac{1}{4.\pi} \cdot \left[\underbrace{\int_{-H}^H \frac{r}{R^3} \cdot i \left(z_c, t - \frac{R}{c_o} \right) dz_c}_{\text{Induction}} + \underbrace{\int_{-H}^H \frac{r}{c_o \cdot R^3} \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \left(z_c, t - \frac{R}{c_o} \right) dz_c}_{\text{Rayonnement}} \right] \quad (4.11)$$

$$H_{zp(r,z,t)} = \frac{1}{4.\pi.\epsilon_0} \cdot \left[\underbrace{\int_{-H}^H \left(\frac{2.(z-z_c)^2 - r^2}{R^5} \cdot \int_0^t i \left(z_c, \tau - \frac{R}{c_o} \right) d\tau \right) dz_c}_{\text{Électrostatique}} + \underbrace{\int_{-H}^H \left(\frac{2.(z-z_c)^2 - r^2}{c_o.R^4} \cdot i \left(z_c, \tau - \frac{R}{c_o} \right) \right) dz_c}_{\text{Induction}} + \underbrace{\int_{-H}^H \left(\frac{r^2}{c_o^2.R^3} \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \left(z_c, \tau - \frac{R}{c_o} \right) \right) dz_c}_{\text{Rayonnement}} \right] \quad (4.12)$$

$$E_{rp(r,z,t)} = \frac{1}{4.\pi.\epsilon_0} \cdot \left[\underbrace{\int_{-H}^H \left(\frac{3.(z-z_c)}{R^5} \cdot \int_0^t i \left(z_c, \tau - \frac{R}{c_o} \right) d\tau \right) dz_c}_{\text{Électrostatique}} + \underbrace{\int_{-H}^H \left(\frac{2.r.(z-z_c)}{c_o.R^4} \cdot i \left(z_c, \tau - \frac{R}{c_o} \right) \right) dz_c}_{\text{Induction}} + \underbrace{\int_{-H}^H \left(\frac{r.(z-z_c)}{c_o^2.R^3} \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \left(z_c, \tau - \frac{R}{c_o} \right) \right) dz_c}_{\text{Rayonnement}} \right] \quad (4.13)$$

Le premier terme des équations (4.12) et (4.13) est généralement appelé composante électrostatique du champ et a pour source l'intégrale du courant de foudre, correspondant à la charge déposée dans le canal ; le second terme apparaissant dans les équations (4.11), (4.12) et (4.13) est appelé terme d'induction et a pour source le courant de foudre ; quant au dernier terme, il correspond à la composante rayonnée du champ et a pour source la dérivée du courant de foudre.

4.4.Modélisation du pylône.

Les pylônes des lignes haute tension sont constitués des éléments tels que les bras horizontaux, verticaux et inclinés. De plus, en générale les bras sont modélisés par la théorie des lignes de transmissions composé d'une résistance, d'une impédance, d'une capacité et ou d'une admittance. Plusieurs modèles sont rencontrés dans la littérature.

4.4.1. Le modèle ligne de transmission par T. Hara et all.

Le modèle d'impédance à surtension multiple comprend les corps verticaux, les bras horizontaux et les bras inclinés. L'impédance Z de chaque partie est exprimé par une formule qui tient compte de la taille et de sa géométrie du pylône et convient à la généralisation du pylône de transmission à structure complexe et de grande hauteur [62, 63].

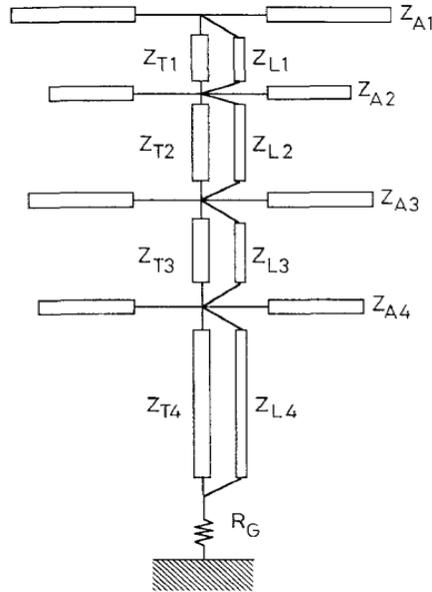


Figure 12: Modelé équivalent d'un pylône (ligne de transmission) [63-65].

$$Z_{Tk} = 60 \ln \left(\frac{2h_k \sqrt{2}}{r_{eK}} - 2 \right) \quad K = (1,2,3,4) \quad (4.14)$$

$$Z_{LK} = 9 \cdot Z_{TK} \quad (K = 1,2,3,4) \quad (4.15)$$

$$Z_{AK} = 60 \ln \frac{2h_{AK}}{r_{AK}} \quad (4.16)$$

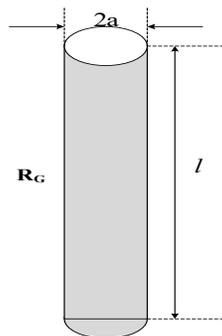


Figure 13: Electrode verticale entre le pylône et la grille de malt [66, 67].

$$R_G = \frac{\varphi}{2\pi l} \left(\ln \left(\frac{4l}{a} \right) - 1 \right) \quad (4.16a)$$

a : Rayon de l'électrode en (m);

l : Longueur de l'électrode en (m);

φ : Résistivité du sol $\Omega \cdot m$;

R_G : Resistance de l'électrode en Ω ;

h_k : Hauteur entre la traverse et le sol en (m);

r_{eK} ($K = 1,2$): Rayon équivalent des Kth branches.

r_{AK} : est le quart de la largeur de la barre transversale au niveau du joint du pylône (m).

4.4.2. Modélisation de ligne de transmission non uniforme du pylône

Le modèle du pylône a une grande influence sur le calcul de la surtension de foudre, de sorte que la précision des résultats dépend d'un modèle de pylône raisonnable. Cependant, étant donné que la hauteur nominale représente presque toute la partie de la tour, la modélisation avec une seule impédance de surtension ne peut pas refléter l'influence des changements de structure spatiale de la tour sur les réponses transitoires de ses caractéristiques. La tour est généralement composée de plusieurs modules en treillis, chacun comprenant quatre pieds reliés par d'autres parties horizontales et inclinées plus courtes. La propagation du courant de foudre sur différentes parties de la tour est un problème à quatre dimensions impliquant des ondes sphériques.

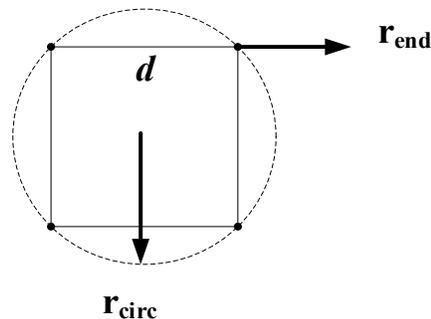


Figure 14: Schéma du rayon équivalent [49]

Les principaux modules en treillis de la tour sont généralement de structure trapézoïdale et sa structure en pilier est composée de quatre conducteurs non parallèles. Cependant, lors du calcul des paramètres de l'élément cylindre infinitésimal, nous pouvons le traiter comme quatre structures de conducteur parallèles. Le système à quatre conducteurs de l'élément cylindre infinitésimal de chaque module principale peut être équivalent à une structure à un conducteur par la formule de regroupement suivante [68] :

$$r_{eq} = \sqrt[4]{4 \times r_{end} \times r_{circ}^3} \quad (4.17)$$

$$r_{circ} = \frac{d}{2 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad (4.18)$$

Où r_{eq} est le rayon équivalent du système à quatre conducteurs, r_{end} est le rayon d'un seul conducteur lui-même et r_{circ} est le rayon du cercle circonscrit au système à quatre conducteurs.

Si les modules en treillis sont modélisés comme des conducteurs équivalents de section transversale circulaire, le pylône peut être modélisée comme un réseau cylindrique équivalent. Par conséquent, sa réponse transitoire électromagnétique peut être décrite par l'équation de télégraphique comme suit [69] :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} v(h,t) = -Ri(h,t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(h,t) \\ \frac{\partial}{\partial x} i(h,t) = -Gv(h,t) - C \frac{\partial}{\partial t} v(h,t) \end{cases} \quad (4.19)$$

Où $L(h)$, $R(h)$ et $C(h)$ sont respectivement l'inductance, la résistance et la capacité par unité de longueur du conducteur. Ils varient avec la hauteur de l'élément cylindre infinitésimal.

L'inductance $L(h)$ comprend les parties suivantes:

$$L(h) = L_G(h) + L_E(h) + L_C(h) \quad (4.20)$$

Où, $L_G(h)$ reflète le flux magnétique dans l'air, $L_E(h)$ indique que la terre n'est pas un plan conducteur idéal et $L_C(h)$ est l'inductance interne du conducteur. La résistance $R(h)$ comprend les parties suivantes:

$$R(h) = R_E(h) + R_C(h) \quad (4.21)$$

Où $R_E(h)$ reflète la conductivité limitée de la terre; $R_C(h)$ est la résistance interne du pylône, représentant la perte de puissance active lorsque le champ électromagnétique pénètre à l'intérieur du conducteur. Quant à la capacité $C(h)$, elle est uniquement composée de la capacité géométrique $C_G(h)$, il reflète l'effet du champ électrique autour du conducteur.

4.4.2.1. Modélisation des bras horizontaux

Pour les parties de bras transversales horizontales, chacune correspond à un seul conducteur et est parallèle au sol. Les paramètres du conducteur sont donc égaux partout et chaque bras de traverse horizontal peut être modélisé par une impédance de surtension. L'impédance de surtension de la traverse Z_{A1} , Z_{A2} , Z_{A3} et Z_{A4} peut être calculée à l'aide de la formule suivante [70]:

$$Z_{AK} = 60. \ln \frac{2h_{AK}}{r_{AK}} \quad (4.22)$$

h_{AK} : La hauteur de la K ème traverse ;

r_{AK} : Rayon de la K ème traverse.

4.4.2.2. Modélisation du corps principal vertical

La modélisation du corps vertical d'un pylône quelconque dépend de la forme géométrique du pylône. Les formes géométriques du corps vertical rencontrés généralement sont conique et trapézoïdale.

Le model équivalent complet d'un bras vertical du pylône est composé d'une résistance R_i , d'une impédance Z_{Ti} et d'une inductance L_i .

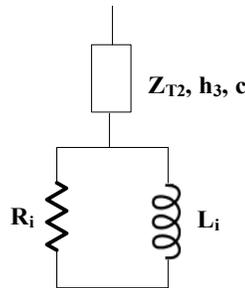


Figure 15: Bras vertical par Ishii, M. et al., [70, 71].

$$R_i = \frac{-2.Z_{T1}.ln\sqrt{\gamma}}{h_1+h_2+h_3} . h_i \quad (i = 1,2,3) \quad (4.23)$$

$$R_4 = -2 . Z_{T2} . ln\sqrt{\gamma} \quad (4.24)$$

$$L_i = \alpha . R_i . \frac{2h}{c} \quad (i = 1,2,3) \quad (4.25)$$

Z_{T1} : est l'impédance de surtension des trois sections supérieures de la tour

Z_{T2} : est l'impédance de surtension de la partie inférieure de la tour.

h_i : est la hauteur de chaque section de la tour.

γ : est le coefficient d'atténuation compris entre 0,7 et 0,8.

α : est le coefficient d'amortissement compris entre 70 et 85.

Le calcul de l'impédance Z_{T1} dépend de la forme du pylône.

4.4.2.2.1. Modélisation du corps principale verticale de la forme conique.

La modélisation du corps vertical d'un pylône quelconque dépend de la forme géométrique du pylône. Les formes géométries du corps vertical rencontrés généralement sont conique et trapézoïdale. La figure ci-dessous est une forme de colonne verticale d'un tronçon du pylône permettant de déterminer l'expression analytique de l'impédance Z_{TK} en fonction du rayon et de la hauteur du tronçon à déterminer.

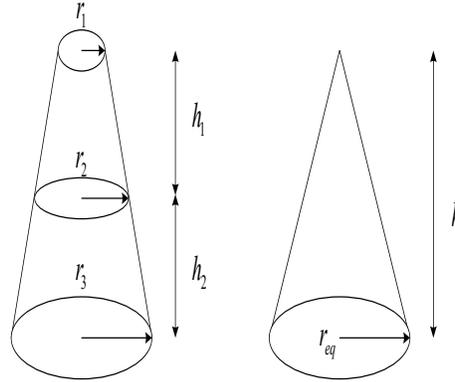


Figure 16: Géométrie pour calcul des impédances pour un tronçons du pylône (par Jordan) [5, 67].

$$Z_{TK} = 60 \left(\ln \left(\frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right) \quad (K = 1,2) \quad (4.26)$$

$$r_{eq} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{2h} \quad (h = h_1 + h_2) \quad (4.27)$$

Z_{TK} : est l'impédance de surtension de chaque tronçon supérieur du pylône;

h_i : est la hauteur de chaque section de tour.

Le coefficient d'atténuation est compris entre 0,7 et 0,8, tandis que l'unité a été la valeur habituellement choisie pour le coefficient d'amortissement.

4.4.2.2.2. Modélisation du corps principale verticale de la forme Trapézoïdale.

La structure principale verticale du pylône étant trapézoïdale, le rayon équivalent de l'élément infinitésimal vertical est obtenu par la méthode proportionnelle proposé par Y Huangfu et al représenté sur la figure ci-dessous.

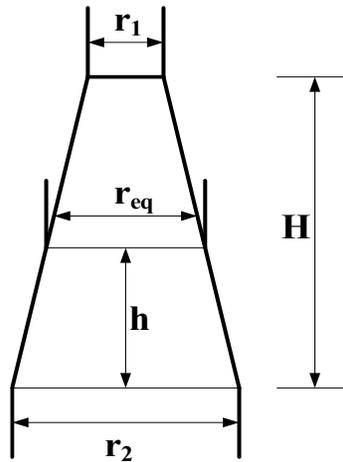


Figure 17: Corps principale verticale de la forme Trapézoïdale [72]

$$r_{eq} = \frac{r_0 - r_1}{H} h \quad (4.28)$$

r_0 : rayon équivalent de la base pylône;

r_1 : rayon équivalent du sommet pylône;

H : hauteur du pylône;

h : est la hauteur à laquelle l'élément infinitésimal vertical est situé.

La profondeur de pénétration de l'onde se propageant vers la Terre est noté p et est calculée par [69] :

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_E\sigma_E}} \quad (4.29)$$

μ_E : est perméabilité magnétique;

σ_E : conductivité électrique du sol;

ω : fréquence angulaire du courant de foudre.

$$Z_E = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_{eq}^2} + (h+p)}{\sqrt{h^2 + r_{eq}^2} + h} \quad (4.30)$$

μ : perméabilité magnétique ($4\pi \times 10^{-7}$ H / m);

ε : est la constante diélectrique du milieu au-dessus du plan de sol ($8,85 \times 10^{-12}$ F / m).

$$L_G = Z_G \sqrt{\mu\varepsilon} \quad (4.31)$$

$$L_{EC} = Z_E \sqrt{\mu\varepsilon} \quad (4.32)$$

$$L_E = Re\{L_{EC}\} \quad (4.33)$$

$$R_E = -\omega Im\{L_{EC}\} \quad (4.34)$$

$$Z_C = \frac{\sqrt{j\omega\mu_C\rho}}{2\pi r_{eq}} \quad (4.35)$$

ρ : résistivité du conducteur;

μ_C : perméabilité magnétique du conducteur.

$$L_C = \frac{Im\{Z_C\}}{\omega} \quad (4.36)$$

$$R_C = Re\{Z_C\} \quad (4.37)$$

$$C_G = \mu\varepsilon(L_G)^{-1} \quad (4.38)$$

Avec tous ces équations, on pourra calculer les impédances des différents troncs principaux verticaux et bras horizontaux. Ainsi tout le modèle de ligne de transmission non uniforme peut être établi.

4.4.3. Développement analytique du pylône

Le développement analytique représenté ci-dessous est basé sous la représentation d'un bras ou portions sous forme d'une ligne de transmission où nous négligeons l'admittance et l'utilisation de la méthode différence finie centré de la théorie de Taylor. Chaque extrémité du pylône est considérée comme un nœud (extrémité et interconnexion) et nous

utilisons la méthode Kirchhoff pour illustrer la tension, courant et impédance interagissant entre le nœud et le bras du pylône. Et en suite nous utilisons la forme de l'équation matricielle $[A][X] = [B]$ où nous cherchons l'inconnue X constitué des courant et tensions pour la simulation dans le domaine temporel.

4.4.3.1.Pylône (cas particulier)

Notre Pylône d'étude comprend les caractéristiques suivantes :

- 4 Nœud (3 nœuds d'extrémités et un nœud d'intersection);
- 03 Bras ou branches de liaison.

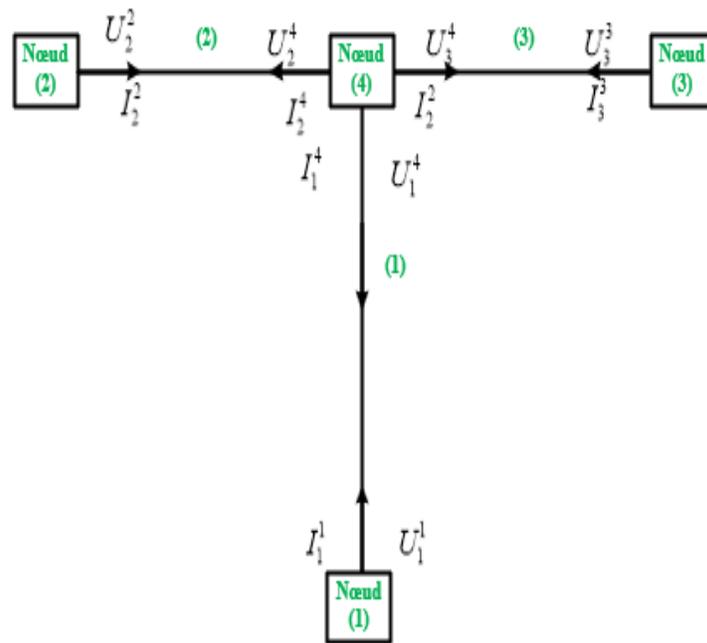


Figure 18: Pylône (cas particulier)

Chaque branche ou bras du pylône est considéré comme une ligne de transmission composé des éléments résistifs, inductifs et Capacitifs qui seront étudié dans la suite pour la modélisation en utilisant les équations de télégraphistes.

4.4.3.2.La théorie de ligne de transmission et application de la méthode de différence finie.

Les schémas ci-dessous représentent une branche d'un pylône électrique qui est modélisé comme une ligne de transmission, nous appliquons la loi de Kirchhoff pour la résolution et la méthode de Taylor des différences finies centrés. U_1^1

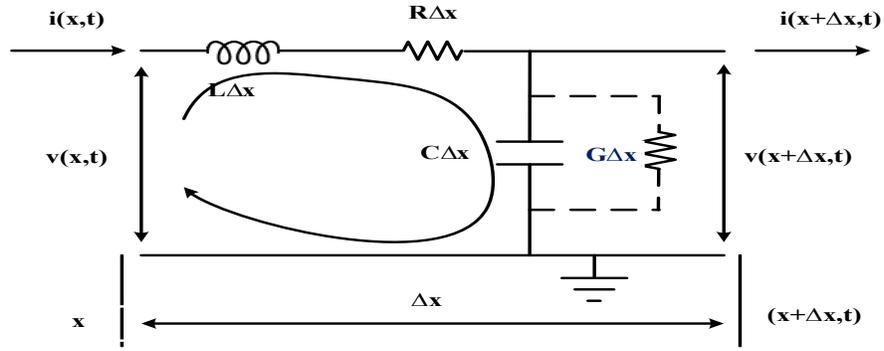


Figure 19: Bras du Pylône

D'après la figure ci-dessus, on ressort les équations suivantes :

$$v(x + \Delta x, t) = v(x, t) - R\Delta x i(x, t) - L\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \quad \text{Or} \quad (4.39)$$

$$\frac{v(x + \Delta x, t) - v(x, t)}{\Delta x} = -Ri(x, t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \quad (4.40)$$

Prenons la limite $\Delta x \rightarrow 0$ on a :

$$\frac{\partial}{\partial x} v(x, t) = -Ri(x, t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \quad (4.41)$$

De même, nous pouvons obtenir l'équation de la deuxième ligne de transmission par :

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - G\Delta x v(x + \Delta x, t) - C\Delta x \frac{\partial}{\partial t} v(x + \Delta x, t) \quad (4.42)$$

Par substitution de (4.39) dans (4.42), on a :

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - G\Delta x \left(v(x, t) - R\Delta x i(x, t) - L\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \right) - C\Delta x \frac{\partial}{\partial t} \left(v(x, t) - R\Delta x i(x, t) - L\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \right) \quad (4.43)$$

$$\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = -Gv(x, t) - C \frac{\partial}{\partial t} v(x, t) + \Delta x \cdot \left(GRi(x, t) + (GL + RC) \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) + LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} i(x, t) \right) \quad (4.44)$$

De même, prenons la limite $\Delta x \rightarrow 0$ on obtient :

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = -Gv(x, t) - C \frac{\partial}{\partial t} v(x, t) \quad (4.45)$$

De l'équation (4.41) et (4.45), nous déduisons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} v(x,t) = -Ri(x,t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(x,t) \\ \frac{\partial}{\partial x} i(x,t) = -Gv(x,t) - C \frac{\partial}{\partial t} v(x,t) \end{cases} \quad (4.46)$$

En négligeant l'admittance dans notre cas, le système (4.46) devient :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} v(x,t) = -Ri(x,t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(x,t) \\ \frac{\partial}{\partial x} i(x,t) = -C \frac{\partial}{\partial t} v(x,t) \end{cases} \quad (4.47)$$

Impacte direct de l'onde de Foudre

$$\begin{cases} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v(x,t0) \\ i(x,t0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & R \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(x,t) \\ i(x,t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L \\ C & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v(x,t) \\ i(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Impacte indirect de l'onde de Foudre

$$\begin{cases} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = v_s(x,t) \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = i_s(x,t) \end{cases} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v(x,t0) \\ i(x,t0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & R \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(x,t) \\ i(x,t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L \\ C & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v(x,t) \\ i(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s(x,t0) \\ i_s(x,t0) \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = v_s(x,t) \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = i_s(x,t) \end{cases} \quad (4.52)$$

Nous souhaitons résoudre notre système que ce soit lors d'un impact direct ou indirect de la forme suivante :

$$[A][X] = [B] \quad (4.53)$$

Où :

[A] : est la matrice topologique du réseau qui tient compte des éléments propagatifs (partie verticale et bras) et des réseaux d'extrémités et d'interconnexion (nœuds).

[X] : est le vecteur inconnu des courants et tensions sur l'ensemble des nœuds.

[B] : est le vecteur excitation qui peut être un générateur de courant onde de foudre ou une onde électromagnétique.

E_L et E_T : Vecteurs contenant les composants du champ électrique incident qui sont transversale E_T et les sources de champ longitudinales E_L à la ligne et parallèles aux conducteurs de ligne.

$$\begin{cases} v_s(x,t) = -\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} E_T(x,t) + E_L(x,t) \\ i_s(x,t) = -C \frac{\partial E_T(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (4.54)$$

De l'équation (4.50), on a :

$$\begin{cases} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} E_T(x,t) + E_L(x,t) \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = -C \frac{\partial E_T(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (4.55)$$

On trouve des approximations plus précises connues sous le nom de différences centrée en développant $f(t+h)$ et $f(t-h)$ dans les séries de Taylor.

$$f'(t) \cong \frac{f(t+h)-f(t-h)}{2h} \quad (4.56)$$

$$f''(t) \cong \frac{f(t+h)-2f(t)+f(t-h)}{h^2} \quad (4.57)$$

D'après l'équation (4.55), par application de différence centrée de Taylor, on a :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + R \frac{\partial}{\partial x} i(x,t) + L \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} E_T(x,t) + \frac{\partial}{\partial x} E_L(x,t) & (a) \\ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = -C \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial E_T(x,t)}{\partial t} & (b) \end{cases} \quad (4.58)$$

D'après (4.58a), on a :

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + R \frac{\partial}{\partial x} i(x,t) + L \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial E_T(x,t)}{\partial x} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} E_L(x,t) \quad (4.59a)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\Delta x} \frac{v(x+h)-v(x-h)}{2h} + R \frac{I(x+h)-I(x-h)}{2h} + \frac{L}{\Delta t} \frac{I(x+h)-I(x-h)}{2h} \quad (4.59b)$$

$$= -\frac{E_T(x+h) - E_T(x-h)}{2h} \frac{v(x+h) - v(x-h)}{2h} + \frac{E_L(x+h) - E_L(x-h)}{2h} \quad (4.59c)$$

$$\Rightarrow \frac{v(x+h) - v(x-h)}{\Delta x} + R[I(x+h) - I(x-h)] + L \frac{I(x+h) - I(x-h)}{\Delta t} \quad (4.59d)$$

$$= -[E_T(x+h) - E_T(x-h)][v(x+h) - v(x-h)] + E_L(x+h) - E_L(x-h) \quad (4.59e)$$

$$\Rightarrow \frac{v(x+h) - v(x-h)}{\Delta x} + L \frac{I(x+h) - I(x-h)}{\Delta t} + \frac{R[I(x+h) - I(x-h)]}{2} \quad (4.59f)$$

$$= -\frac{[E_T(x+h) - E_T(x-h)]}{2} [v(x+h) - v(x-h)] + \frac{R[I(x+h) - I(x-h)]}{2} \quad (4.59g)$$

D'après (4.58b), on a :

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = -C \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial E_T(x,t)}{\partial t} \quad (4.60)$$

$$\frac{1}{\Delta x} \frac{I(x+h) - I(x-h)}{2h} + \frac{C}{\Delta t} \frac{v(x+h) - v(x-h)}{2h} = \frac{C}{\Delta t} \frac{E_T(x+h) - E_T(x-h)}{2h} \quad (4.60a)$$

$$\Rightarrow \frac{I(x+h) - I(x-h)}{\Delta x} + C \frac{v(x+h) - v(x-h)}{\Delta t} = -C \frac{E_T(x+h) - E_T(x-h)}{\Delta t} \quad (4.60b)$$

Nous faisons l'approximation $\Delta x = \frac{\Delta x}{2}$, on a :

$$\Rightarrow \frac{I(x+h) - I(x-h)}{\Delta x} + C \frac{v(x+h) - v(x-h)}{\Delta t} = -C \frac{E_T(x+h) - E_T(x-h)}{\Delta t} \quad (4.60c)$$

D'où on a le développement de Taylor suivant pour la 2ième équation (4.58b) k=1 (x=0):

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right) U_1^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right) U_1^{n-1} - \frac{I_1^{n-1/2} - I_0^{n-1/2}}{\Delta x / 2} - C \frac{(E_T)_1^n - (E_T)_1^{n-1}}{\Delta t} \quad (4.61)$$

En posant :

$$U_1^n = (U(0))^n \quad \text{et} \quad I_0^{n-1/2} = (I(0))^{n-1/2}, \text{ l'équation devient :}$$

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right) (U(0))^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right) (U(0))^{n-1} - \frac{I_1^{n-1/2} - (I(0))^{n-1/2}}{\Delta x / 2} - C \frac{(E_T)_1^n - (E_T)_1^{n-1}}{\Delta t} \quad (4.62)$$

$$\text{Avec : } (I(0))^{n-1/2} = \frac{(I(0))^n + (I(0))^{n-1}}{2}, \text{ on a :}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{C}{\Delta t}\right) (U(0))^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right) (U(0))^{n-1} + \frac{(I(0))^n - (I(0))^{n-1}}{\Delta x} - \frac{I_1^{n-1/2}}{\Delta x / 2} - C \frac{(E_T)_1^n - (E_T)_1^{n-1}}{\Delta t} \quad (4.63)$$

La deuxième équation d'extrémité est de la forme :

$$\Rightarrow \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^n - \frac{1}{\Delta x}(I(0))^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(0))^{n-1} - \frac{2I_1^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(E_T)_1^n - (E_T)_1^{n-1}}{\Delta t} \quad (4.64)$$

À l'extrémité $k = k_{max} + 1, x = L$, la deuxième équation devient :

$$\Rightarrow \left(\frac{C}{\Delta t}\right)U_{k_{max}+1}^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)U_{k_{max}+1}^{n-1} - \frac{2I_{k_{max}+1}^{n-1/2} - I_{k_{max}}^{n-1/2}}{\Delta x / 2} - C \frac{(E_T)_{k_{max}+1}^n - (E_T)_{k_{max}+1}^{n-1}}{\Delta t} \quad (4.65)$$

En posant $U_{k_{max}+1}^n = (U(L))^n$ et $I_{k_{max}+1}^{n-1/2} = (I(L))^{n-1/2}$, on a l'équation finale suivante :

$$\Rightarrow \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(L))^n + \frac{1}{\Delta x}(I(L))^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(L))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(L))^{n-1} - \frac{2I_1^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(E_T)_{k_{max}+1}^n - (E_T)_{k_{max}+1}^{n-1}}{\Delta t} \quad (4.66)$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U(0))^n \\ (I(0))^n \\ (U(L))^n \\ (I(L))^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(0))^{n-1} - \frac{2I_1^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(E_T)_1^n - (E_T)_1^{n-1}}{\Delta t} \\ \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(L))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(L))^{n-1} - \frac{2I_{k_{max}}^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(E_T)_{k_{max}+1}^n - (E_T)_{k_{max}+1}^{n-1}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

Représentation des sous-matrices $[A_1]$, $[A_2]$, $[B_1]$ et $[B_2]$ en tenant compte des nœuds après numérotation des tubes. Nous utilisons la notation discrète suivantes :

$$U_k^n = U[(k-1)\Delta x, n\Delta t] \quad (4.68)$$

$$I_k^n = I\left[\left(k - \frac{1}{2}\right)\Delta x, n\left(k + \frac{1}{2}\right)\Delta t\right] \quad (4.69)$$

Notons que la tension alternative de discrétisation spatio-temporelle Nœud et nœud actuel séparés par $\Delta x/2$, dans l'espace et $\Delta t/2$ dans le temps.

Les nœuds aux extrémités de la ligne sont des tensions, et ils sont donnés par :

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)U_1^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)U_1^{n-1} - \frac{I_1^{n-1/2} - I_0^{n-1/2}}{\Delta x / 2} \quad (4.70)$$

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)u_{k_{max}+1}^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)u_{k_{max}+1}^{n-1} - \frac{i_{k_{max}+1}^{n-1/2} - i_{k_{max}}^{n-1/2}}{\Delta x / 2} \quad (4.71)$$

Il est à noter que :

$$U_1^n = (U(0))^n, U_{k_{max}+1}^n = (U(L))^n \quad (4.72)$$

Afin de représenter la ligne par un quadruple, nous créons deux Nœuds courants, nœud à la fin de la ligne (pour $x=0$ and $x=L$).

Ainsi, nous avons :

$$I_0^{n-1/2} = (I(0))^{n-1/2} \text{ Pour } x=0 \quad (4.73)$$

$$I_{k_{max}+1}^{n-1/2} = (I(L))^{n-1/2} \text{ Pour } x=L \quad (4.74)$$

En supposant les approximations, on a :

$$(I(0))^{n-1/2} = \frac{(I(0))^n + (I(0))^{n-1}}{2} \quad (4.75)$$

$$(I(L))^{n-1/2} = \frac{(I(L))^n + (I(L))^{n-1}}{2} \quad (4.76)$$

On obtient l'équation à la première extrémité de la ligne $k = 1$ ($x = 0$) :

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^n - \frac{1}{\Delta x}(I(0))^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^{n-1} - \frac{2.I_1^{n-1/2}}{\Delta x} \quad (4.77)$$

À l'autre extrémité $k = k_{max} + 1$ ($x = L$) :

Nous avons la forme matricielle représentée suivante pour un impact direct, donc sans l'effet électromagnétique pour ce qui est de l'impact de foudre sur point particulier du pylône.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U(0))^n \\ (I(0))^n \\ (U(L))^n \\ (I(L))^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(0))^{n-1} - \frac{2.I_1^{n-1/2}}{\Delta x} \\ \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(L))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(L))^{n-1} - \frac{2.I_{k_{max}}^{n-1/2}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

On obtient la matrice [A1] à partir de l'équation (4.78) ci-dessus :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \left(\frac{C_i}{\Delta t}\right) & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 \\ [0] & [0] & \left(\frac{C_i}{\Delta t}\right) & \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Et la matrice [B2] à partir de l'équation (4.78) ci-dessus :

$$[B_1] = \begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(0))^{n-1} - \frac{2.I_1^{n-1/2}}{\Delta x} \\ \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(L))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(L))^{n-1} - \frac{2.I_{k_{max}}^{n-1/2}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

De même la matrice [X] à partir de l'équation (4.78) ci-dessus :

$$[X] = \begin{bmatrix} (U(0))^n \\ (I(0))^n \\ (U(L))^n \\ (I(L))^n \end{bmatrix} \quad (4.81)$$

Les courant $i_k^{n+1/2}$ et $i_{i_{k_{\max}}}^{n-1/2}$ sont calculés par :

$$I_k^{n+1/2} = \left(\frac{L}{\Delta t} + \frac{R}{2} \right)^{-1} \left(\left(\frac{L}{\Delta t} - \frac{R}{2} \right) I_k^{n+1/2} - \frac{U_{k+1}^n - U_k^n}{\Delta x} \right) \quad (4.82)$$

$$U_k^n = \left(\frac{C}{\Delta t} \right)^{-1} \left(\left(\frac{C}{\Delta t} \right) U_k^{n-1} - \frac{U_k^{n-1/2} - U_{k-1}^{n-1/2}}{\Delta x} \right) \quad (4.83)$$

4.4.3.3. Courant d'injection de foudre

Le vecteur secondaire [B2] contient des zéros, à l'exception du nœud dans lequel se produit le coup de foudre pour le cas d'un impact direct. Dans le cas de la modélisation de l'injection de foudre en utilisant le générateur bi-exponentiel on a :

$$[B_2] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_0 (\exp(-\alpha \cdot n(\Delta t)) - \exp(-\beta \cdot n(\Delta t))) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.84)$$

Avec $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ qui est le courant de foudre sur le long du pylône dans le cas d'un impact direct avec les caractéristiques suivantes : $I_0 = 12,5KA$, $\alpha = 3 \times 10^{-4} s^{-1}$, $\beta = 10^7 s^{-1}$.

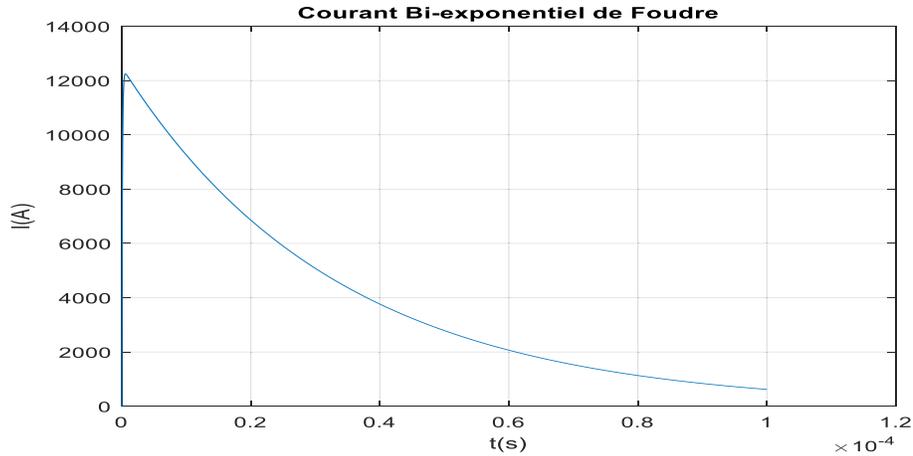


Figure 20: Courant Bi-exponentiel de foudre de la matrice.

Ce courant commence à se dissiper toujours dans le temps à partir 500A pour un temps $t = 1 \times 10^{-4}s$. Il est à noter que ce courant est pratiquement nul dans le cas d'un impact indirect et sera représenté sur la matrice [B2] par :

$$[B_2] = \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.85)$$

4.4.3.4. Application de la méthode de Kirchhoff aux différents nœuds du pylône pour déterminer la matrice A2

Un nœud est défini pour le cas de notre pylône comme un point d'extrémité ou d'intersection d'un bras ou d'une branche sur l'ensemble du pylône. Pour déterminer les courants et tensions sur chaque nœud du pylône, nous illustrons les composant du nœud 4 de notre pylône par une impédance source Z_s et une tension source U_s comme détaillé sur la figure ci-dessous :

Illustration

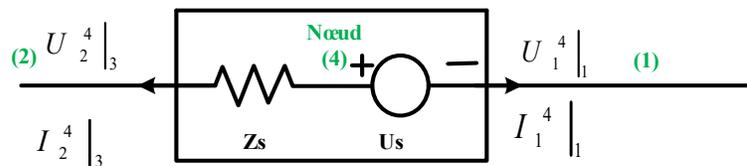


Figure 21: Nœud d'interconnexion 4 du pylône d'étude

$$\begin{aligned} [U_2^4]_3 - [U_1^4]_2 + Z_s [I_1^4]_2 = U_s \quad \text{de même} \quad [I_2^4]_3 - [I_1^4]_2 + Y_s [U_1^4]_2 = I_s \\ [I_2^4]_3 + [U_1^4]_1 = 0 \quad \text{et} \quad [U_2^4]_3 = [U_1^4]_2 \end{aligned} \quad (4.86)$$

Pour un pylône comprenant trois bras et quatre nœuds ci-dessus, nous déterminons la matrice [A2] dégagé de l'équation initiale suivante:

$$\sum_{k=1}^N ([Y_k^m][U_k^m] + [Z_k^m][I_k^m]) = [P^m] \quad (4.87)$$

$[Z_k^m]$: Matrice résultant de l'application des lois de Kirchhoff dans le nœud m, qui peut contenir les valeurs 0, 1, -1 ou des impédances suivant la topologie du réseau.

$[Y_k^m]$: Matrice résultant de l'application des lois de Kirchhoff dans le nœud m, qui peut contenir les valeurs 0, 1, -1 ou des admittances suivant la topologie du réseau.

$[P^m]$: est le vecteur contenant des sources de courant ou de tension et/ou les excitations dues aux champs excitateurs.

a. Conditions au niveau de nœuds d'extrémités

Pour chaque conducteur i d'un tube (2) dont le nœud (2) est l'un de ses extrémités, on a :

- Si (2) est un nœud d'extrémité du type 0 ((2) est la première extrémité du conducteur i du tube (2)), l'équation correspondante à la tension diffractée s'écrit comme suit :

$$U_{i2}^{2s}(0) = -Z_0 I_{i2}^2(0) + \int_0^h E_{zi(2)}^e(0, z) dz \quad (4.88)$$

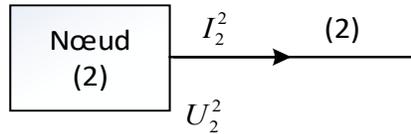


Figure 22: Nœud d'extrémité 2 du type 0 du pylône d'étude

- Si (2) est un nœud d'extrémité du type 1 ((2) est la deuxième extrémité du conducteur i du tube (2)), la condition sur la tension diffractée est la suivante [6, 73]:

$$U_{i2}^{2s}(l) = Z_l I_{i2}^2(l) + \int_0^h E_{zi(2)}^e(l, z) dz \quad (4.89)$$

$E_{zi(2)}^e$: Tension excitatrice en V; Z_0, Z_i : Impédance de terminaisons du bras du pylône en ohm, U_{i2}^{2s} : Tension au niveau du nœud en V.

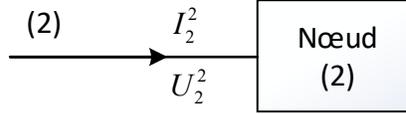


Figure 23: Nœud d'extrémité 2 du type 1 du pylône d'étude

En appliquant la loi de Kirchoff au nœud 4 sur l'équation initiale ci-dessus, nous avons :

$$Y_2^4 U_2^4 + Z_2^4 I_2^4 + Y_1^4 U_1^4 + Z_1^4 Y_1^4 + Y_3^4 U_3^4 + Z_3^4 I_3^4 = P^4 \quad (4.90)$$

$$\begin{cases} I_2^4 = Y_{S2} U_2^4 + Y_{M2} U_2^2 + I_{S2}^4 & (a) \\ I_1^4 = Y_{S1} U_1^4 + Y_{M1} U_1^1 + I_{S1}^4 & (b) \quad S = source \\ I_3^4 = Y_{S3} U_3^4 + Y_{M3} U_3^3 + I_{S3}^4 & (c) \quad M = Mutuel \end{cases} \quad (4.91)$$

Par substitution de (4.91a), (4.91b) et (4.91c) dans (4.90), on a :

$$\begin{aligned} (Y_2^4 + Z_2^4 Y_{S2}) U_2^4 + (Y_1^4 + Z_1^4 Y_{S1}) U_1^4 + (Y_3^4 + Z_3^4 Y_{S3}) U_3^4 + Z_2^4 Y_{M4} U_2^2 + Z_1^4 Y_{M1} U_1^1 + Z_3^4 Y_{M3} U_3^3 \\ = P^4 - Z_2^4 I_{S2}^4 - Z_1^4 I_{S1}^4 - Z_3^4 I_{S3}^4 \end{aligned} \quad (4.92)$$

D'après (4.92), on a la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} (Y_2^4 + Z_2^4 Y_{S2}) & (Y_1^4 + Z_1^4 Y_{S1}) & (Y_3^4 + Z_3^4 Y_{S3}) & (Z_2^4 Y_{M4}) & (Z_1^4 Y_{M1}) & (Z_3^4 Y_{M3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2^4 \\ U_1^4 \\ U_3^4 \\ U_2^2 \\ U_1^1 \\ U_3^3 \end{bmatrix} = [P^4 - Z_2^4 I_{S2}^4 - Z_1^4 I_{S1}^4 - Z_3^4 I_{S3}^4] \quad (4.93)$$

b. Assemblage de la matrice [A2] :

Les équations suivantes sont obtenues par l'application de la loi de Kirchhoff au niveau des nœuds, et nous avons :

$$\begin{cases}
[U_1^1]_1 = Us(t) - Z_1^1 [I_1^1]_1 & (a) \\
[U_1^1]_2 = Z_1^1 [I_1^1]_2 & (b) \\
[U_1^1]_3 = Z_1^1 [I_1^1]_3 & (c) \\
[U_1^1]_4 = Z_1^1 [I_1^1]_4 & (d)
\end{cases} \quad (4.94)$$

$$\begin{cases}
[U_2^2]_1 = Z_2^2 [I_2^2]_1 & (a) \\
[U_2^2]_2 = Z_1^1 [I_2^2]_2 & (b) \\
[U_3^3]_1 = -Z_3^3 [I_2^2]_1 & (c) \\
[U_3^3]_2 = -Z_3^3 [I_3^3]_2 & (d)
\end{cases} \quad (4.95)$$

$$\begin{cases}
[U_1^4]_1 - [U_2^4]_1 = -Z_1^4 [I_1^4]_1 \\
[U_1^4]_2 = 0 \\
[U_1^4]_3 - [U_3^4]_2 = 0 \\
[U_1^4]_4 - [U_2^4]_1 = 0
\end{cases} \quad (4.96)$$

$$\begin{cases}
[I_1^4]_1 - [I_2^4]_1 = 0 \\
[I_1^4]_3 - [I_3^4]_2 = -Y_1^4 [U_1^4]_3 \\
[I_1^4]_4 - [I_3^4]_1 = 0 \\
[I_2^4]_2 = 0
\end{cases} \quad (4.97)$$

La matrice [A2] est la matrice composée des vecteurs contenant des impédance, admittance, des tension et courant au niveau des nœuds.

$$P^1 = Y_1^1 U_1^1 - Z_1^1 Y_{S1} U_1^4 - Z_1^1 Y_{M1} Y_1^4 - Z_1^1 I_{S1}^4 \quad (4.98)$$

$$\Rightarrow P^1 = (Y_1^1 - Z_1^1 Y_{M1}) U_1^1 - Z_1^1 Y_{S1} U_1^4 - Z_1^1 I_{S1}^4 \quad (4.99)$$

$$\Rightarrow P^1 = \begin{bmatrix} Y_1^1 - Z_1^1 Y_{M1} & -Z_1^1 Y_{S1} & -Z_1^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^1 \\ U_1^4 \\ I_{S1}^4 \end{bmatrix} \quad (4.100)$$

$$\Rightarrow P^1 = \begin{bmatrix} Y_1^1 - Z_1^1 Y_{M1} & 0 & 0 & 0 & -Z_1^1 Y_{S1} & -Z_1^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^1 \\ I_{S1}^1 \\ U_2^2 \\ I_{S2}^2 \\ U_1^4 \\ I_{S1}^4 \end{bmatrix} \quad (4.101)$$

De même

$$P^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_2^2 - Z_2^2 Y_{M2} & 0 & -Z_2^2 Y_{S2} & -Z_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^1 \\ I_{S1}^1 \\ U_2^2 \\ I_{S2}^2 \\ U_2^4 \\ I_{S2}^4 \end{bmatrix} \quad (4.102)$$

$$P^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_3^3 - Z_3^3 Y_{M3} & -Z_3^3 & -Z_3^3 Y_{S3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^1 \\ I_{S1}^1 \\ U_3^3 \\ I_{S3}^3 \\ U_3^4 \\ I_{S3}^4 \end{bmatrix} \quad (4.103)$$

$$P^4 = \begin{bmatrix} Y_1^4 + Z_1^4 Y_{S2} + Z_1^4 Y_{M1} & -Z_1^4 & Y_2^4 + Z_2^4 Y_{S2} + Z_2^4 Y_{M4} & -Z_2^4 & -Y_3^4 + Z_3^4 Y_{S3} + Z_3^4 Y_{M3} & -Z_3^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^1 \\ I_{S1}^1 \\ U_2^2 \\ I_{S2}^2 \\ U_3^3 \\ I_{S3}^3 \end{bmatrix} \quad (4.104)$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} Y_1^1 - Z_1^1 Y_{M1} & 0 & 0 & 0 & -Z_1^1 Y_{S1} & -Z_1^1 \\ 0 & 0 & Y_2^2 - Z_2^2 Y_{M2} & 0 & -Z_2^2 Y_{S2} & -Z_2^2 \\ 0 & 0 & Y_3^3 - Z_3^3 Y_{M3} & -Z_3^3 & -Z_3^3 Y_{S3} & 0 \\ (Y_1^4 + Z_1^4 Y_{S2} + Z_1^4 Y_{M1}) - Z_1^4 & (Y_2^4 + Z_2^4 Y_{S2} + Z_2^4 Y_{M4}) - Z_2^4 & -Z_2^4 & -Y_3^4 + Z_3^4 Y_{S3} + Z_3^4 Y_{M3} & -Z_3^4 \end{bmatrix} \quad (4.105)$$

$$[A_1] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C}{\Delta t} & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C}{\Delta t} & \frac{1}{\Delta x} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.106)$$

La matrice [A] égale :

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C}{\Delta t} & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C}{\Delta t} & \frac{1}{\Delta x} & 0 \\ Y_1^1 - Z_1^1 Y_{M1} & 0 & 0 & 0 & -Z_1^1 Y_{S1} & -Z_1^1 \\ 0 & 0 & Y_2^2 - Z_2^2 Y_{M2} & 0 & -Z_2^2 Y_{S2} & -Z_2^2 \\ 0 & 0 & Y_3^3 - Z_3^3 Y_{M3} & -Z_3^3 & -Z_3^3 Y_{S3} & 0 \\ Y_1^4 + Z_1^4 Y_{S2} + Z_1^4 Y_{M1} & -Z_1^4 & Y_2^4 + Z_2^4 Y_{S2} + Z_2^4 Y_{M4} & -Z_2^4 & -Y_3^4 + Z_3^4 Y_{S3} + Z_3^4 Y_{M3} & -Z_3^4 \end{bmatrix} \quad (4.107)$$

c. Assemblage globale de la matrice [A][X] = [B]

$$\begin{bmatrix}
 0 & \frac{C}{\Delta t} & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{C}{\Delta t} & \frac{1}{\Delta x} & 0 \\
 Y_1^1 - Z_1^1 Y_{M1} & 0 & 0 & 0 & -Z_1^1 Y_{S1} & -Z_1^1 \\
 0 & 0 & Y_2^2 - Z_2^2 Y_{M2} & 0 & -Z_2^2 Y_{S2} & -Z_2^2 \\
 0 & 0 & Y_3^3 - Z_3^3 Y_{M3} & -Z_3^3 & -Z_3^3 Y_{S3} & 0 \\
 Y_1^4 + Z_1^4 Y_{S2} + Z_1^4 Y_{M1} & -Z_1^4 & Y_2^4 + Z_2^4 Y_{S2} + Z_2^4 Y_{M4} & -Z_2^4 & -Y_3^4 + Z_3^4 Y_{S3} + Z_3^4 Y_{M3} & -Z_3^4
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 U_1^1 \\
 I_{S1}^1 \\
 U_2^2 \\
 I_{S2}^2 \\
 U_3^3 \\
 I_{S3}^3
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(0))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(0))^{n-1} - \frac{2.I_1^{n-1/2}}{\Delta x} \\
 \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(U(L))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(I(L))^{n-1} - \frac{2.I_{k_{\max}}^{n-1/2}}{\Delta x} \\
 0 \\
 I_0(\exp(-\alpha.n(\Delta t)) - \exp(-\beta.n(\Delta t))) \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (4.108)$$

4.4.3.1. Simulation du développement analytique d'un pylône (3 bras et 4 Nœuds) et par Simulink.

Un modèle simplifié du pylône a été simulé après développement analytique et par circuit électrique. La grande particularité réside du faite que le développement analytique prend en compte une étude détaillé du pylône dans son ensemble (bras horizontaux, verticaux et même incliné s'il y'a lieu) alors qu'en pratique la propagation du courant de foudre prend le chemin horizontale du pylône et certains paramètre de l'analytique sont négligés. Ci-dessous illustrés la simulation analytique et par circuit.

4.4.3.1.1. Simulation du développement analytique du pylône

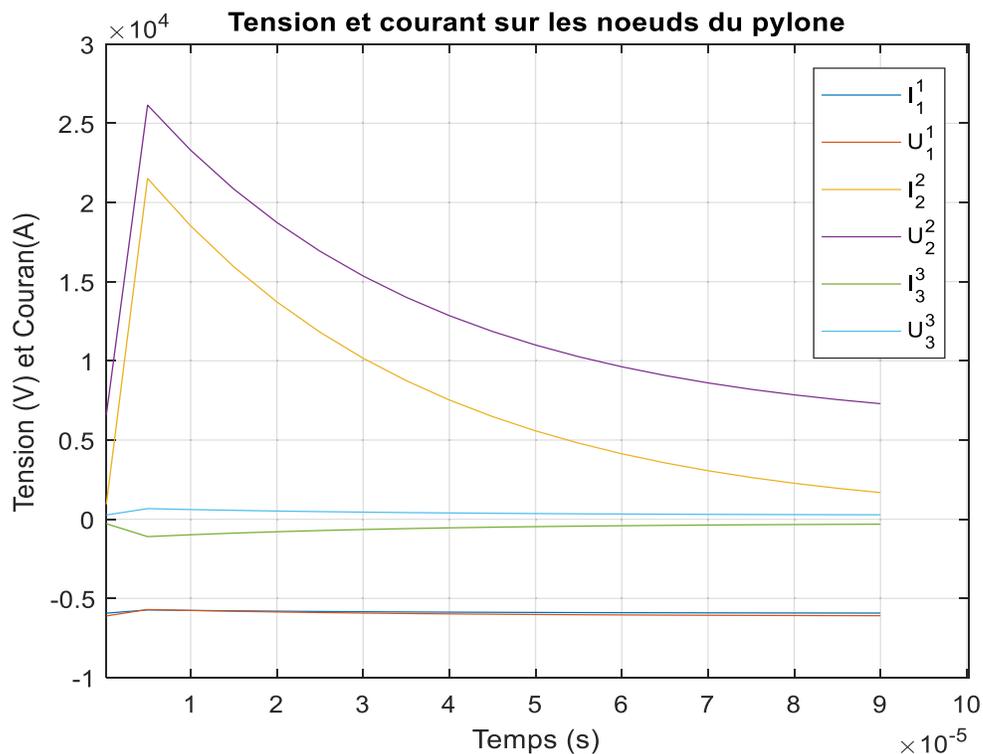


Figure 24: Tensions et Courants Analytique

Dans le développement analytique, le vecteur secondaire [B2] contient des zéros, à l'exception du nœud dans lequel se produit le coup de foudre pour le cas d'un impact direct. Le courant I_0 de l'impact est de 12.5 KA au sommet, ce courant s'atténue dans le sol à zéro pour le nœud d'impact et les autres nœuds sans impact ont des courants sensiblement nuls.

4.4.3.1.2. Simulation par Simulink du pylône

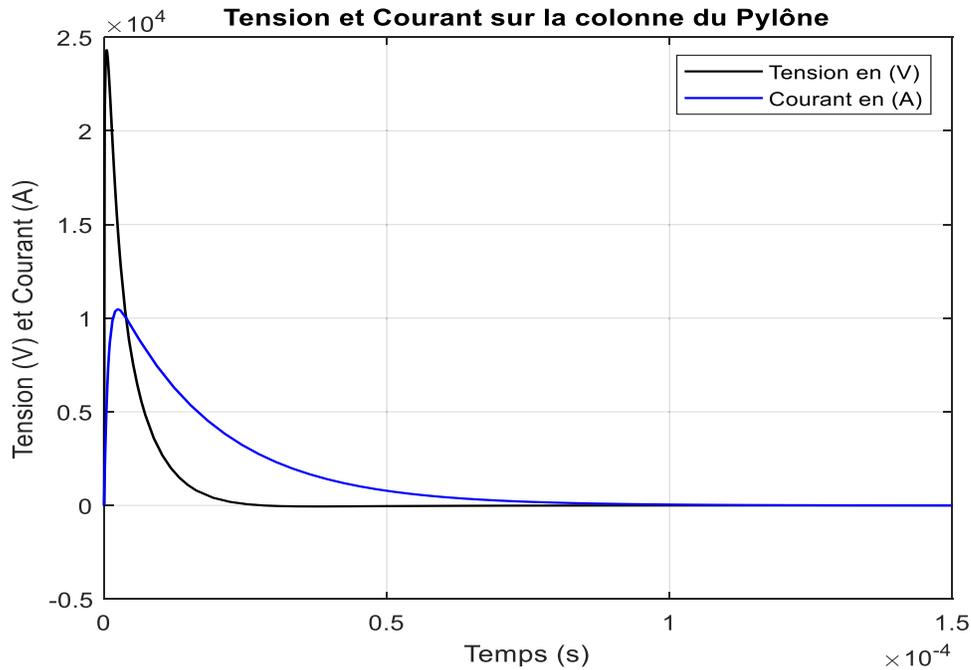


Figure 25: Tension et Courant Simulink

De même, pour la modélisation du pylône par circuit électrique, les barre incliné et horizontaux sont négligé dans la simulation du fait que le courant circule sur les bras verticaux pour atteindre le sol. Pour un courant I_0 d'impact, nous observons une atténuation à zéro à environs $75 \mu\text{s}$.

4.5. Modélisation de la Grille de Malt.

La modélisation de la grille par la théorie de ligne de transmission permet de considérer chaque portion du segment de la grille comme une ligne de transmission composé d'une résistance (R), d'une inductance (L), d'une capacité (C) et d'une conductance (G).

4.5.1. Modèle d'une grille de malt

Une grille est constituée généralement d'au moins quatre portions carré connectés entre elle.

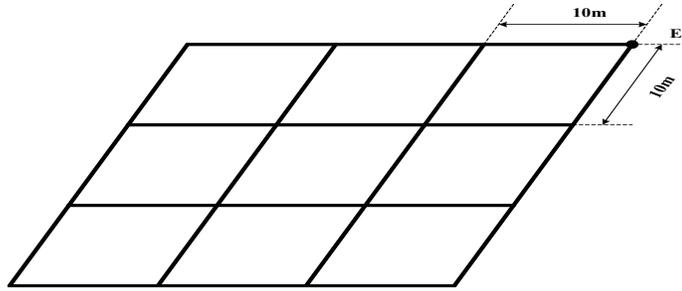


Figure 26:Modèle d'une grille de malt

4.5.2. Model électrique de la grille de malt comme ligne de transmission

Le circuit électrique ci-dessous est une représentation d'une portion du modèle en π de la grille de malt.

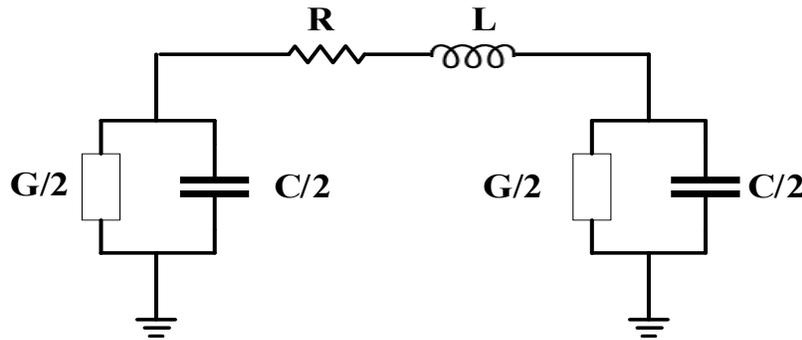


Figure 5 : Représentation d'une électrode de terre [28].

4.5.3. Paramètre analytique

Les formules régissant pour la détermination de la résistance, de l'inductance de la capacité de condensateur et de la conductance de la grille de malt sont donnés par les équations suivantes [74-76]:

$$R = \frac{\rho}{\pi} A \quad (4.109)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} A \quad (4.110)$$

$$C = \frac{\pi \varepsilon}{A} \quad (4.111)$$

$$G = \frac{1}{R} \quad (4.112)$$

$$A = \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right) \quad (4.113)$$

l : Longueur du segment de l'électrode en m;
 μ_0 : Perméabilité du vide $4\pi \times 10^{-7} \text{ kg m A}^{-2} \text{ s}^{-2}$;
 r : Rayon de l'électrode en m ;
 ρ : la résistivité du sol en $\Omega. m$;
 h : Profondeur d'enfouissement de l'électrode de mise à la terre en m ;
 ε : Permittivité en $F. m^{-1}$.

4.6.Modélisation du pipeline.

Les figures 27 et 28 représente le potentielle au voisinage d'une électrode, pipeline au voisinage d'une électrode de terre et la charge linéaire représentant la réaction du pipeline.

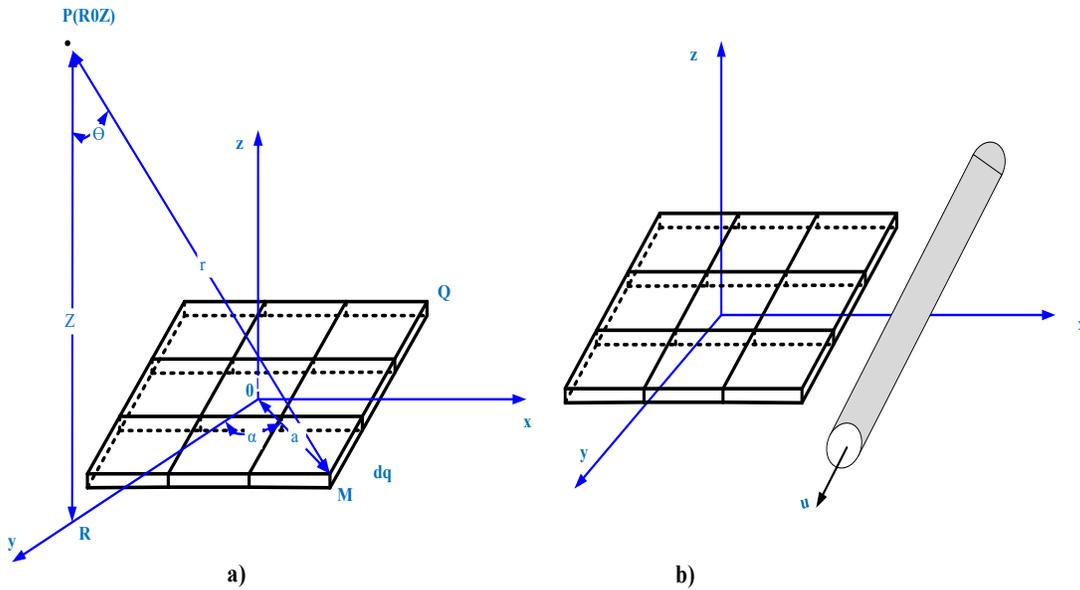


Figure 27: a) Potentielle au voisinage d'une électrode; b) Pipeline au voisinage d'une électrode de terre [13].

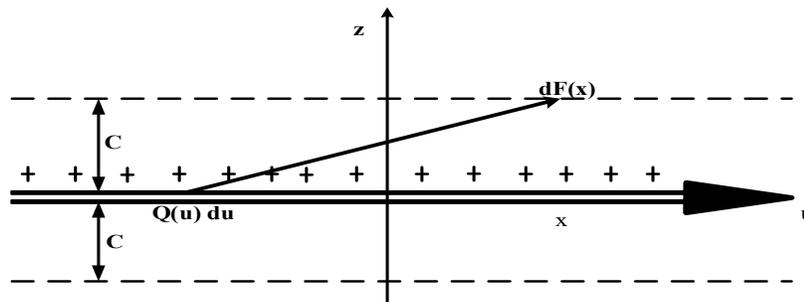


Figure 28: Charge linéaire représentant la réaction du pipeline [13].

4.6.1. Modèle électrique du pipeline comme ligne de transmission.

La représentation sous forme électrique de notre conduit pipeline composé des impédances et des conductances tient compte de la distance ou de la longueur de la canalisation. Les conducteurs considérés sont infiniment longs et peuvent être protégés par un revêtement isolant.

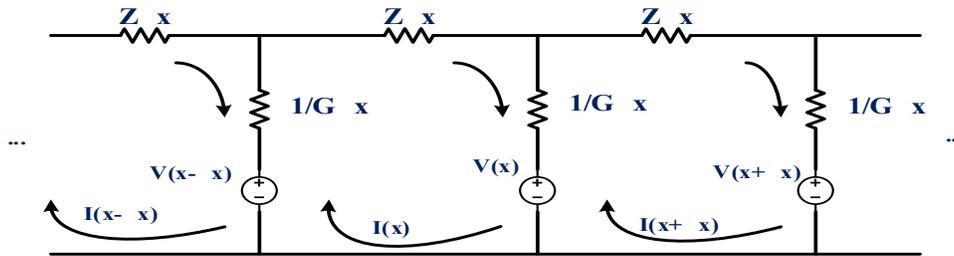


Figure 29: Portion du Pipeline comme ligne de transmission [13].

4.6.2. Paramètres analytiques du pipeline

4.6.2.1. Modélisation de la distribution de potentiel du pipeline

Soit $F(x)$ la réaction à la surface du pipeline par une excitation externe. Le pipeline peut être modélisé par une ligne chargée si une distribution de charge linéaire $Q(u)$ peut produire la même distribution de tension le long de la surface du conducteur.

Le potentiel en un point le long de la surface de la ligne de conduite en raison d'un élément de charge $Q(u)$ du est donné par [13]:

$$dF(x) = \frac{Q(u)du}{4\pi\epsilon_0[(x-u)^2+c^2]^{1/2}} \quad (4.114)$$

$dF(x)$: Réaction de tension infinitésimale (V)

$Q(u)$: Densité de charge linéaire (C/m);

du : Distance infinitésimale en (m)

c : Rayon du conducteur (m)

u : Coordonner le long de l'axe des x (m)

ϵ_0 : Permittivité du vide.

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q(u)du}{4\pi\epsilon_0[(x-u)^2+c^2]^{1/2}} \quad (4.115)$$

F(x) : Tension (V) de Distribution sur la surface du pipeline représentant la réaction du conducteur.

4.6.2.2.Composant analytique de la ligne de transmission

$$Z = R_p = \frac{\rho_s}{\pi t(2r-t)} \quad (4.116)$$

$$G = \left[\frac{1}{G_c} + \frac{\rho_e}{\pi} \ln \left[\frac{1.123}{[r^2+4d^2]^{1/2}} \right] \right]^{-1} \quad (4.117)$$

$$\Gamma = [ZG]^{1/2} \quad (4.118)$$

$$K = [Z/G]^{1/2} \quad (4.119)$$

$$G_c = \frac{2\pi r}{R_c} \quad (4.120)$$

$$G_g = \left[\frac{\rho_e}{\pi} \ln \left(\frac{1.123}{\Gamma[r^2+4d^2]} \right) \right]^{-1} \quad (4.121)$$

G : Conductance linéaire du pipeline (S/m);

G_c : Conductance linéaire de revêtement en (S/m).

G_g : Conductance linéaire à la surface du pipeline en (S/m).

r: Rayon du conduit en (m);

d : Profondeur d'enfouissement en (m);

Z : Impédance linéaire du pipeline en (Ω/m)

t = Épaisseur de la paroi du pipeline en (cm);

ρ_s : la résistivité de l'acier (5.10^{-7}) en ($\Omega.m$)

ρ_e : la résistivité du sol en ($\Omega.m$) ;

R_c : Résistance du revêtement ($\Omega.m^2$);

Γ : Constante de propagation (m^{-1}) ;

K : Impédance caractéristique (Ω).

En appliquant la loi de Kirchhoff au circuit de la figure ci-dessus, on obtient l'équation différentielle pour le courant I(x) [13]:

$$\frac{d^2 I(x)}{d(x)} - ZGI(x) = GE_x(x) \quad (4.122)$$

E_x : Champ électrique le long du pipeline en (N/C).

Pour une distribution de potentiel de terre symétrique, le courant est donné par :

$$I(x) = \frac{1}{2K} \int_0^{+\infty} E_x(u) [e^{-\Gamma|x-u|} - e^{-\Gamma(x+u)}] du \quad (4.123)$$

$$\phi_i(x) = \frac{\Gamma}{2} \int_0^{+\infty} V(u) [e^{-\Gamma|x-u|} + e^{-\Gamma(x+u)}] du \quad (4.124)$$

La distribution du potentiel $\phi_0(x)$ à la surface du pipeline est obtenu en tenant compte de la chute de tension dans le revêtement protecteur comme suit [13]:

$$\phi_0(x) = \phi_i(x) + \frac{1}{G_c} \frac{dI(x)}{dx} \quad (4.125)$$

Γ : Constante de propagation du conducteur en (m^{-1});

$\phi_i(x)$: Tension à l'intérieur du pipeline en Volt;

$E_x(u)$: Composante de champ électrique le long de l'axe x en (N/C);

$I(x)$: Courant du conducteur le long de l'axe x en (A)

$$V(R, Z) = \frac{\rho_e I_e}{2\pi^2 ((z-h)^2 + (a+R)^2)^{1/2}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{(1-k^2 \sin^2 \psi)^{1/2}} \quad (4.126)$$

$$k = \frac{4aR}{((z-h)^2 + (a+R)^2)^{1/2}} \quad (4.127)$$

$$R = [x^2 + y^2]^{1/2} \quad (4.128)$$

k : Les paramètres dépendent de la géométrie de l'électrode et de la position du point (X, y, Z).

$V(R, z)$: Tension au voisinage de l'électrode en (V);

a : Rayon (1/2 du diamètre de la grille) de l'électrode en (m) ;

h : Profondeur d'électrode enfouie en (m) ;

I_e : Courant de retour de l'électrode en (A);

R : Distance radiale de l'électrode (m) ;

z : Distance verticale (m).

$$V(x, y, z) = \sum_0^{\infty} C_i V_i \quad (4.129)$$

$$\text{Où } C_i = 1 \text{ pour } i = 0 \quad (4.130)$$

$$C_i = \prod_{j=1}^i \left[\frac{(2i-1)}{2j} \right]^2 \text{ Pour } i > 0 \quad (4.131)$$

$$V_i = \frac{\rho_e I_e [4aR]^i}{4\pi (z^2 + (a+R)^2)^{i+1/2}} \quad (4.132)$$

V_i : Fonction d'évaluation de la tension V (R, z)

ρ_e : Résistivité de la terre ($\Omega.m$)

L'expression du champ électrique le long du pipeline est obtenue à l'aide du gradient du potentiel $V(y, z)$ de l'équation (4.129).

$$E_x = -\frac{dV}{dx} = \frac{x}{4aR^2} \sum_{i=0}^{\infty} C_i [(2i + 1)(a + R)V_{i+1} - 4aiV_i] \quad (4.133)$$

4.7. Conclusion

Les supports des lignes électrique étant constitué des éléments tel que le pylône et la grille de malt. De plus, le développement du secteur de pétrole qui impose sa distribution via le pipeline sont enfouit proches des supports de ligne électrique. Ces éléments ont nécessité dans cette partie du chapitre une modélisation des différentes approches rencontrés dans la littérature. L'approche particulière a été bien évidemment porté sur le modèle de ligne de transmission et celle par circuit. Ces différents modèles et modélisations nous permettrons d'entamer la dernière partie de notre mémoire qui est celle de simuler le comportement transitoire dynamique des tensions, courants et impédances dans Matlab/Simulink.

CHAPITRE V : SIMULATIONS DES SYSTÈMES PYLÔNES, RILLES DE MALT ET PIPELINE.

5.1.Introduction

Il était question dans le chapitre précédent de modéliser par la théorie des lignes de transmission des éléments du support de la ligne électrique de la grille de malt et du pipeline pour pouvoir les implémenter dans le logiciel Matlab/Simulink pour simulation. Dans cette partie du chapitre, nous simulons les comportements dynamiques des courants, tensions et impédances pour différentes résistivités (ρ) et observons par la suite la dissipation de ces derniers dans le temps. Dans un premier temps, nous simulons l'impact de la foudre sur cinq pylônes électrique relié chacun à une grille de malt et par la suite le couplage de ce dernier au conduit pipeline. Le canal du courant de foudre passe par les bras verticaux du pylône pour atteindre la grille de malt, puis une dissipation par couplage électromagnétique pour atteindre le pipeline situé 700m de la grille de malt ou du pylône de longueur 2.8Km. La grille de malt se trouvent dans un sol homogène de profondeurs 1.75m et le pipeline également dans un sol homogène de profondeur 1m.

5.2.Simulation de l'impact de foudre sur le Pylône

La simulation de l'impact de la foudre se fait en injectant un courant de foudre de l'ordre 12.5KA au sommet d'un des cinq pylônes qui sont modélisés par la théorie de ligne de transmission. La forme d'onde de la tension, du courant et de l'impédance visualisé au pied du pylône est représentée sur la figure suivant.

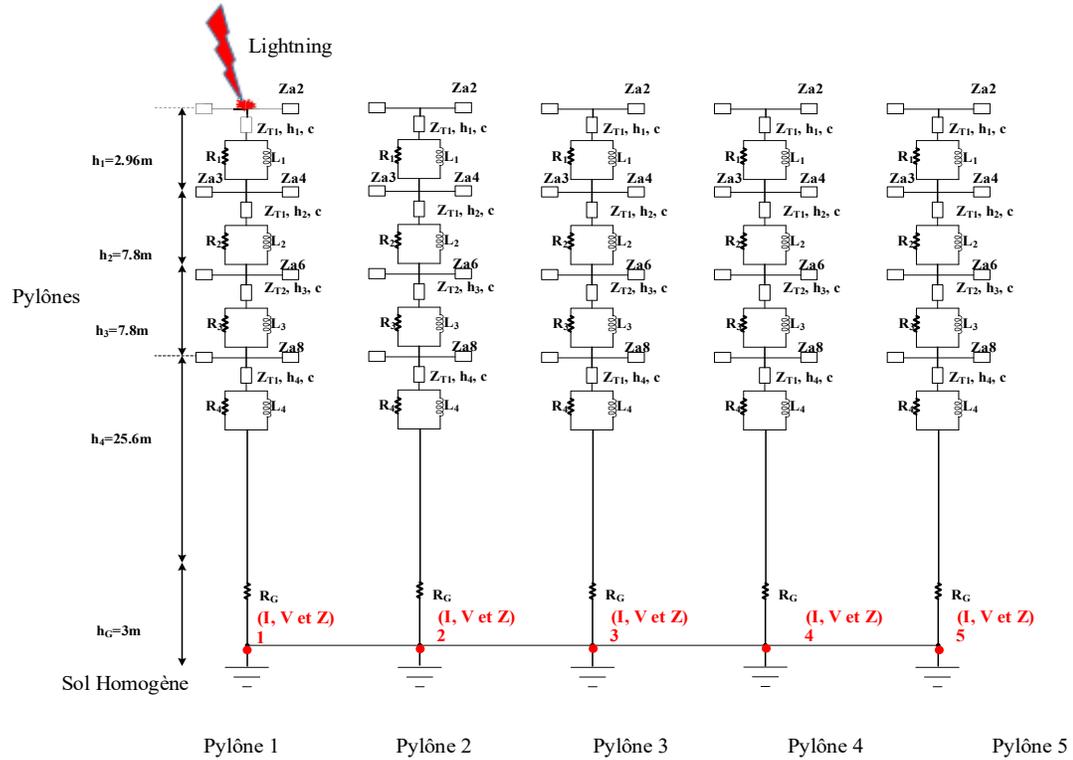


Figure 30: Impacte de foudre sur le pylône.

5.2.1. Tensions sur les Pylônes.

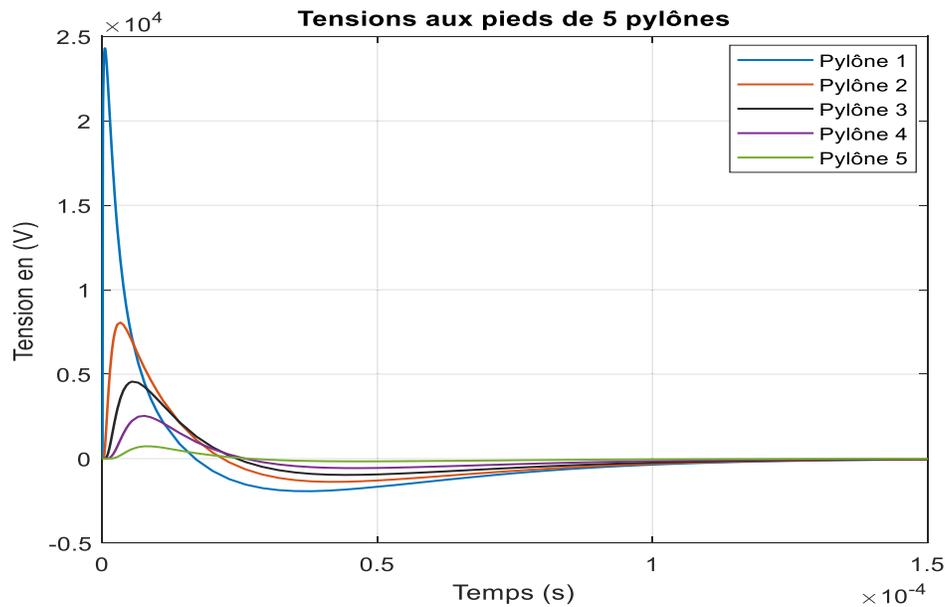


Figure 31: Tensions de l'impact de foudre au pied des pylônes.

Sur la figure 31 ci-dessus, nous avons les tensions aux pieds des pylônes après un impact de foudre. Nous observons une grande amplitude de l'ordre 2.4×10^4 V en environ $10 \mu\text{s}$ et qui s'atténue à zéro en environ 1.5×10^{-4} s sur le pylône 1 où a lieu l'impact. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les pylônes s'éloignent du point d'impact.

5.2.2. Courants sur les Pylônes.

Etant donné que la dissipation du défaut d'un courant électrique peut être matérialiser comme la fuite d'un liquide transporté par un tuyau percé. Le liquide à tendance à se verser directement au sol en empruntant la voie percée. La simulation de la fuite de courant de défaut au pied du pylône 1 dans le temps avant d'atteindre la grille de malt est représenté sur la figure ci-dessous.

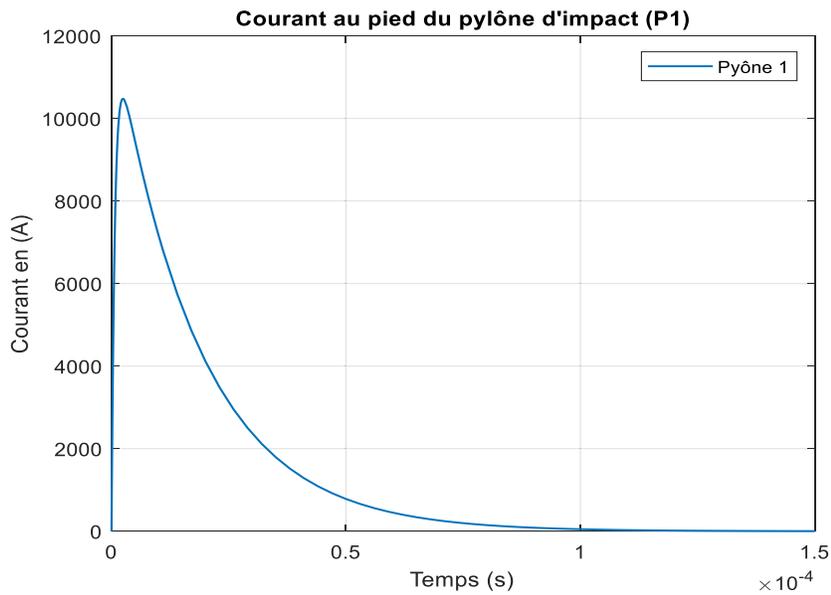


Figure 32: Courant au pied du pylône 1.

Ci-dessus, l'allure du courant sur le pylône 1 à travers les bras verticaux avant d'atteindre le sol. Ce courant est observé sur le pylône 1 sur lequel a eu lieu l'impact de coup de foudre. Un pic de 10.5 KA est observé en environ $10 \mu\text{s}$ et s'atténue à zéro ampère, à environ 1.5×10^{-4} s.

5.2.3. Impédance sur le Pylône 1.

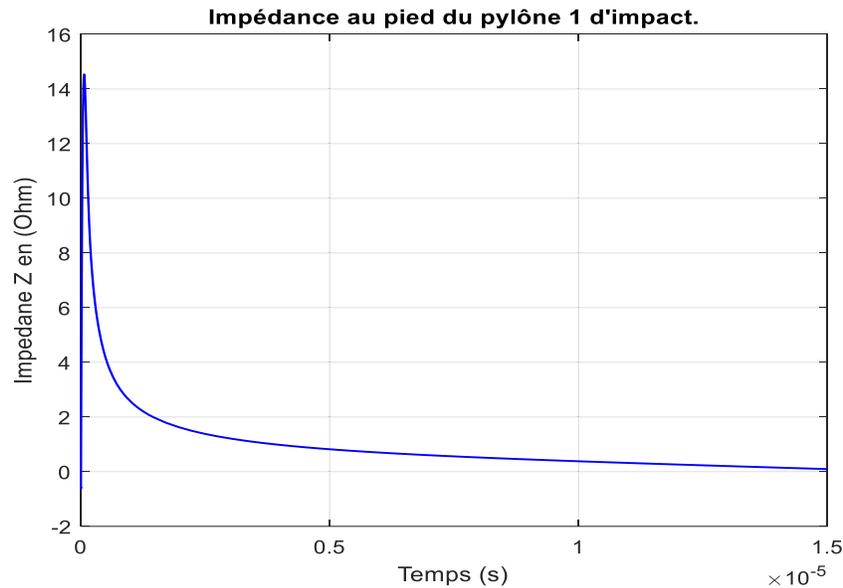


Figure 33: Impédance au pied du pylône 1.

De même, nous simulons dans le temps l'impédance de la réponse transitoire du pylône dans le sol sur la figure ci-dessus.

5.3. Simulation de l'impact de foudre sur la Grille de Malt

Nous considérons cinq grilles de malt carrée ayant chacune un côté de 30 m. Chaque élément carré de la grille à un côté de 1m comme illustré à la figure 6. La forme 3×3 de la grille est illustré à la figure 1 du schéma synoptique. La grille est composée de mailles carrées égales. Les conducteurs sont construits en cuivre avec un rayon de 7 mm. Les 5 grilles de malt des 5 pylônes sont interconnectés entre elle (contrepois) et est enterrée à une profondeur de 1.75 m dans un sol homogène de résistivité. Un courant de foudre est injecté au point sur la grille de malt 1 (point d'impact). La forme d'onde de la tension, du courant et de l'impédance visualisé au point A, B, C, D et E des 5 grilles de malt sont représentées sur les figures suivant.

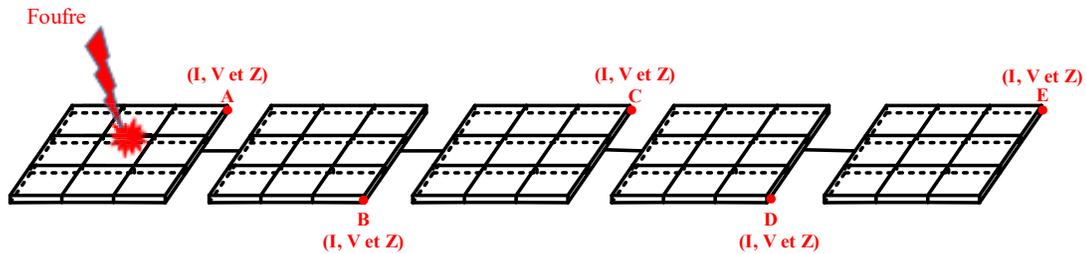


Figure 34: Coup de foudre sur Grilles de malt.

5.3.1. Tensions sur la Grille de Malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

Les cinq grilles de malt étant interconnecté entre elles, pour une résistivité de sol $\rho=100 \Omega.m$ et à des points quelconques choisis sur les grilles de malt, nous observons différents tensions, courants et impédances. Les formes d'ondes de ceux-ci sont représentées sur les figures ci-dessous.

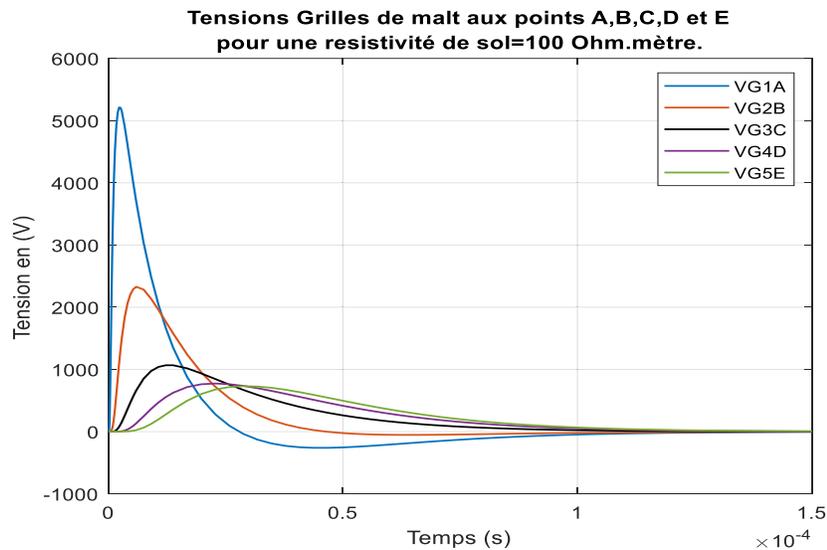


Figure 35: Tensions aux points A, B, C, D et E de la grille

Sur la figure 35 ci-dessus, nous observons les tensions sur la grille de malt après un impact de courant de foudre de 12.5 KA et pour une résistivité de sol $\rho=100 \Omega.m$. Nous observons une amplitude de l'ordre 5.25 KV en environ $10\mu s$ et qui s'atténue à zéro Volt à environ 1.5×10^{-4} s sur la grille de malt 1 où a lieu l'impact. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les pylônes s'éloignent du point d'impact. De plus, en variant la résistivité de sol ($\rho=100, 300$ et $600 \Omega.m$) les allures restent les même seule les amplitudes qui augmentent lorsque la résistivité du sol augmente pour les figures 38 et 41.

5.3.2. Courants sur la Grille de Malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

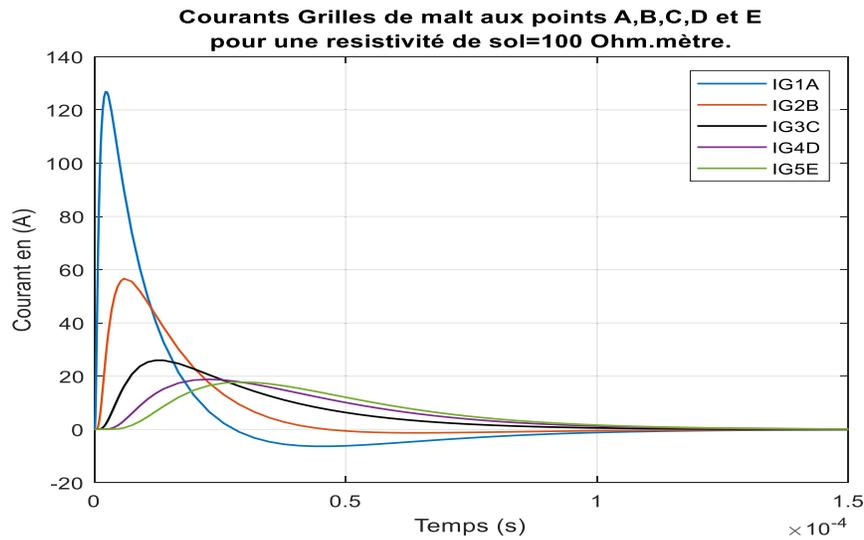


Figure 36: Courant aux points A, B, C, D et E quelconque de la grille.

La figures 36 ci-dessus illustre les formes d'onde des courants sur les cinq points de l'ensemble pylône-grilles de malt interconnectés pour une résistivité de sol $\rho=100 \Omega.m$. L'amplitude maximale du courant sur la grille de malt 1 est 126A en $10\mu s$ environ et s'atténue à zéro ampère en 1.5×10^{-4} s. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les pylônes s'éloignent du point d'impact. De plus, en variant la résistivité de sol ($\rho=100, 300$ et $600\Omega.m$) les allures restent les même seule les amplitudes qui diminuent lorsque la résistivité du sol augmente pour les figures 39 et 42.

Ci-dessous les impédances observées sur les points A, B, C, D et E des grilles de malt interconnecté.

5.3.3. Impédances sur la Grille de Malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

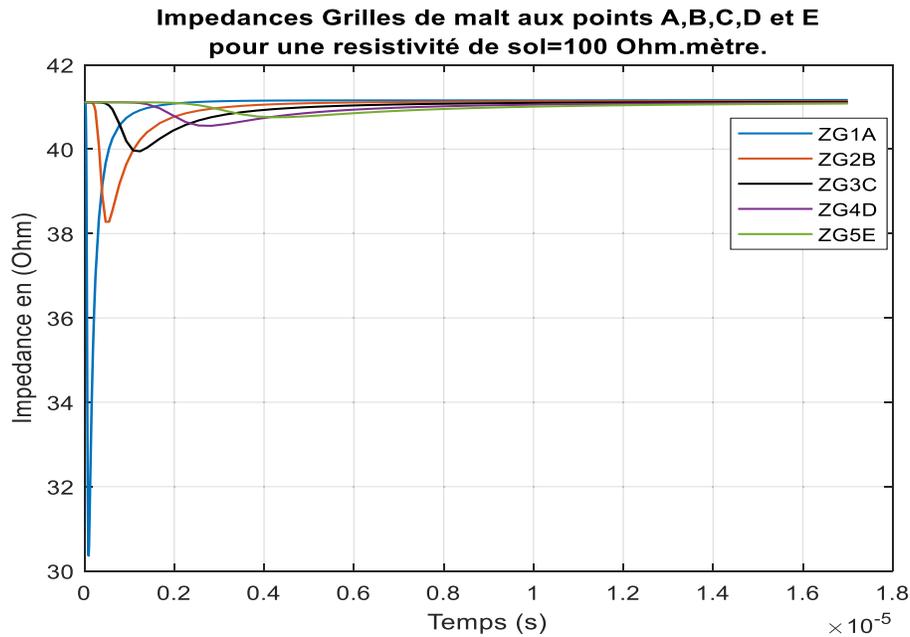


Figure 37: Impédances aux points A, B, C, D et E de la grille.

Les impédances observées sur les différents points de l'ensemble pylône-grilles de malt ont dans l'ensemble un pic pratiquement égal (41.8Ω) à environ $10\mu s$ pour une résistivité de sol donnée. Cependant leurs oscillations sont différentes et varient en fonction de la distance qui les sépare du point d'impact. Mais finissent par se converger et être linéaire dans le temps. De plus, en variant la résistivité de sol ρ leur amplitude augmente mais les allures restent les mêmes pour les figures 40 et 43.

Dans la suite, nous varions la résistivité du sol $\rho=300 \Omega.m$ et observons les comportements dynamiques des tensions, courants et impédances.

5.3.4. Tensions sur la Grille de Malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

Les cinq grilles de malt étant interconnectées entre elles, pour une résistivité de sol $\rho=300 \Omega.m$ et à des points quelconques choisis sur les grilles de malt, nous observons différentes tensions, courants et impédances. Les formes d'ondes de ceux-ci sont représentées sur les figures ci-dessous.

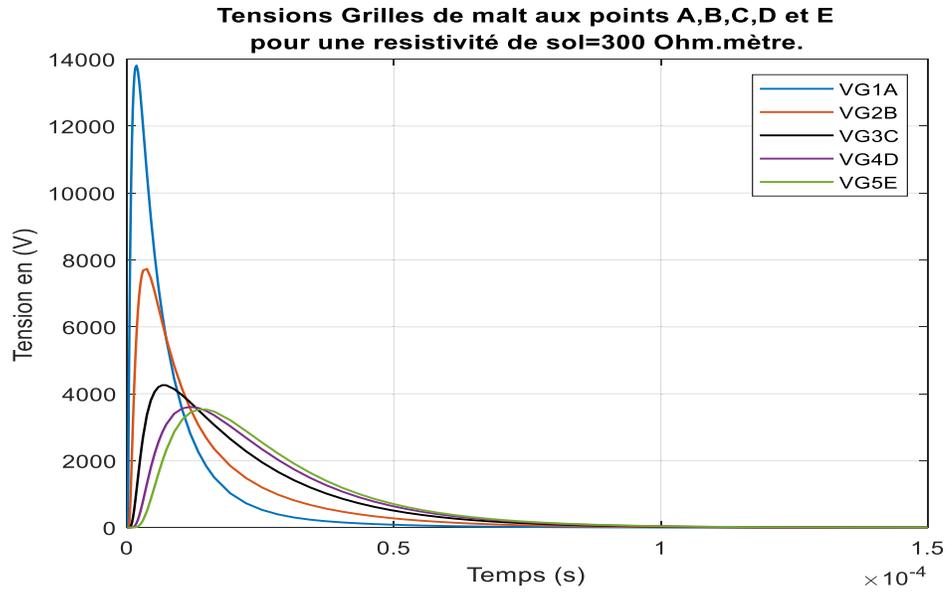


Figure 38: Tensions grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=300 \Omega.m$.

Ci-dessous les formes d'onde des courant sur les grilles de malt.

5.3.5. Courants sur la Grille de Malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

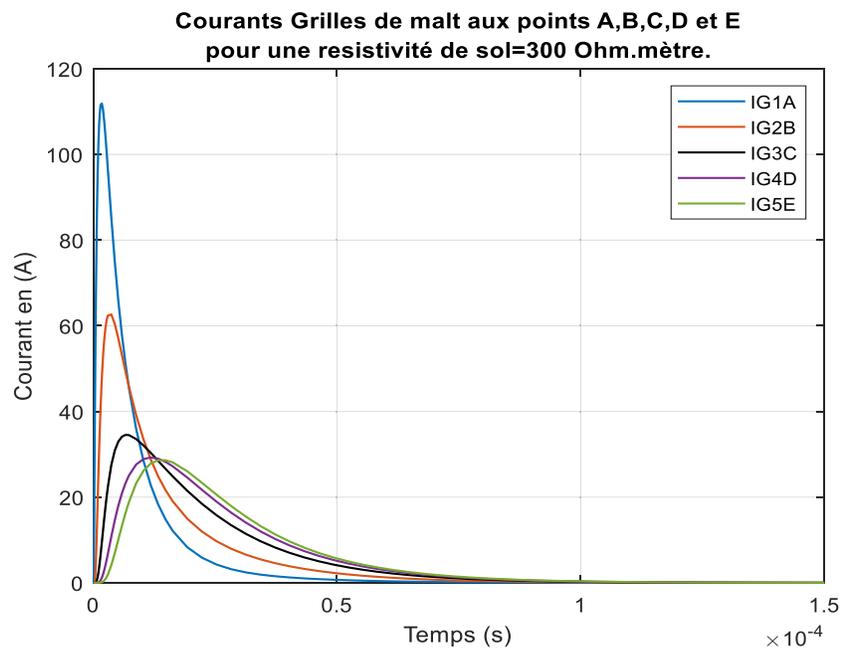


Figure 39: Courants grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=300 \Omega.m$.

Ci-dessous les formes d'onde des impédances sur les grilles de malt.

5.3.6. Impédances sur la Grille de Malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

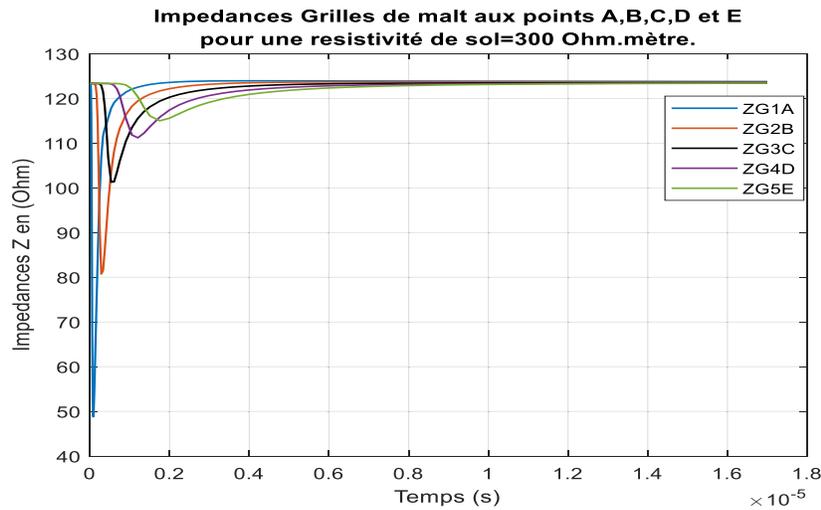


Figure 40: Impédances grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=300 \Omega.m$.

Dans la suite, nous varions la résistivité du sol $\rho=600 \Omega.m$ et observons les comportements dynamiques des tensions, courants et impédances.

5.3.7. Tensions sur la Grille de Malt pour $\rho=600 \Omega.m$.

Les cinq grilles de malt étant interconnecté entre elles, pour une résistivité de sol $\rho=600 \Omega.m$ et à des points quelconques choisis sur les grilles de malt, nous observons différents tensions, courants et impédances. Les formes d'ondes de ceux-ci sont représentées sur les figures ci-dessous

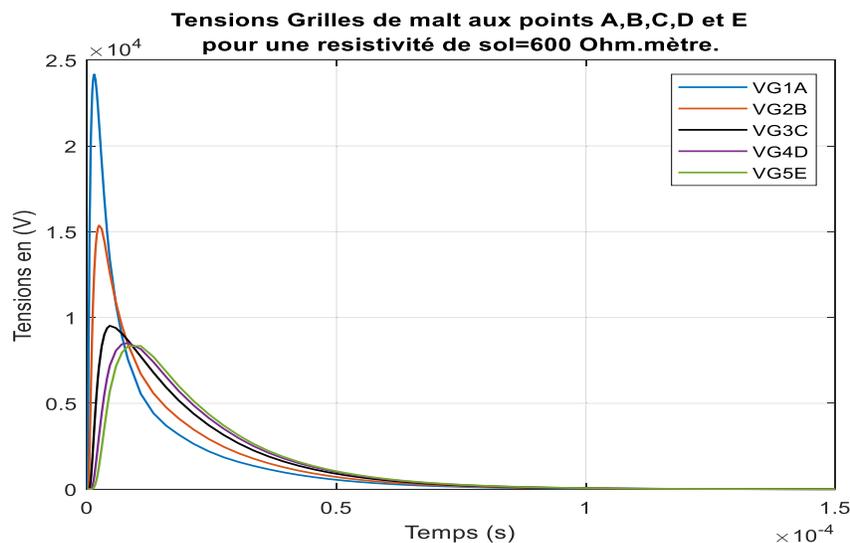


Figure 41: Tensions grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=600 \Omega.m$.

Ci-dessous les formes d'onde des courant sur les grilles de malt.

5.3.8. Courants sur la Grille de Malt pour $\rho=600 \Omega.m$.

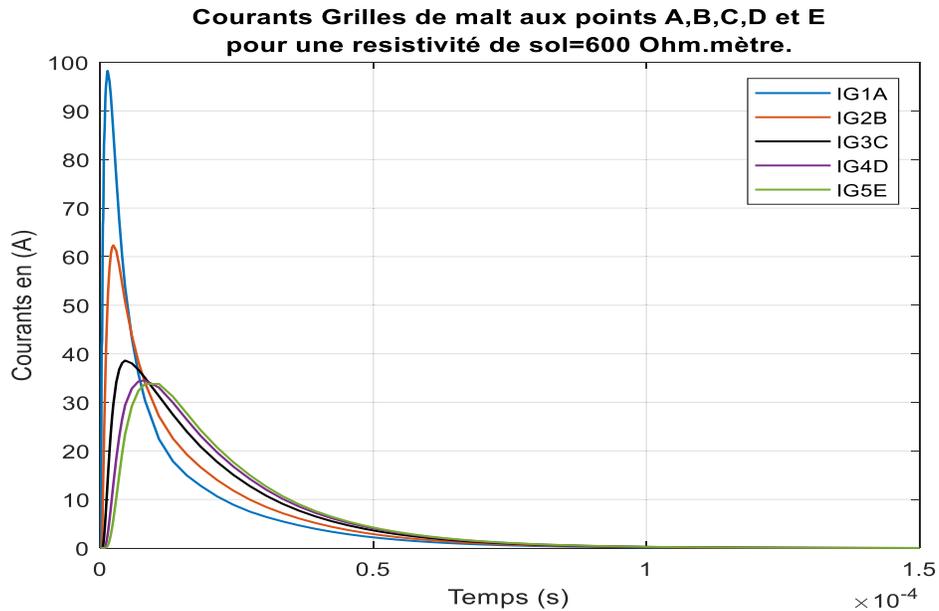


Figure 42: Courants grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=600 \Omega.m$.

Ci-dessous les formes d'onde des impédances sur les grilles de malt.

5.3.9. Impédances sur la Grille de Malt pour $\rho=600 \Omega.m$.

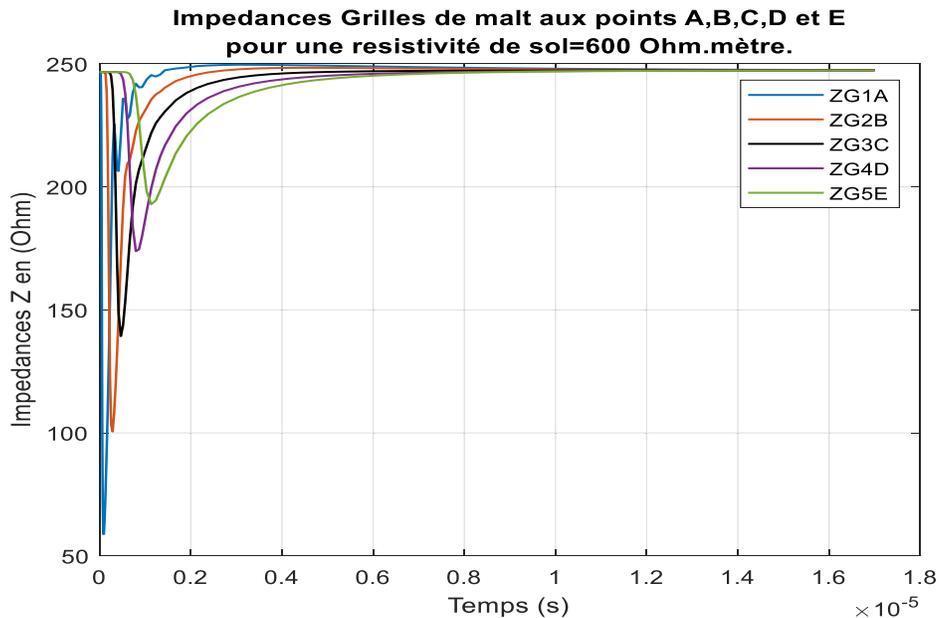


Figure 43: Impédances grilles de malt aux points A, B, C, D et E pour $\rho=600 \Omega.m$.

5.4. Simulation de l'impact de foudre l'ensemble Pylône-Grille de malt.

Les 5 pylônes étant connecté chacun à une grille de malt et les grilles interconnecté entre elles, un courant de foudre est injecté au sommet du pylône 1. Les résistivités de sol des grilles de malt varient de 100 à 600 $\Omega.m$. Nous observons dans le temps le comportement dynamique des tensions, courants et impédances sont observés aux points A, B, C, D et E des grilles de malt.

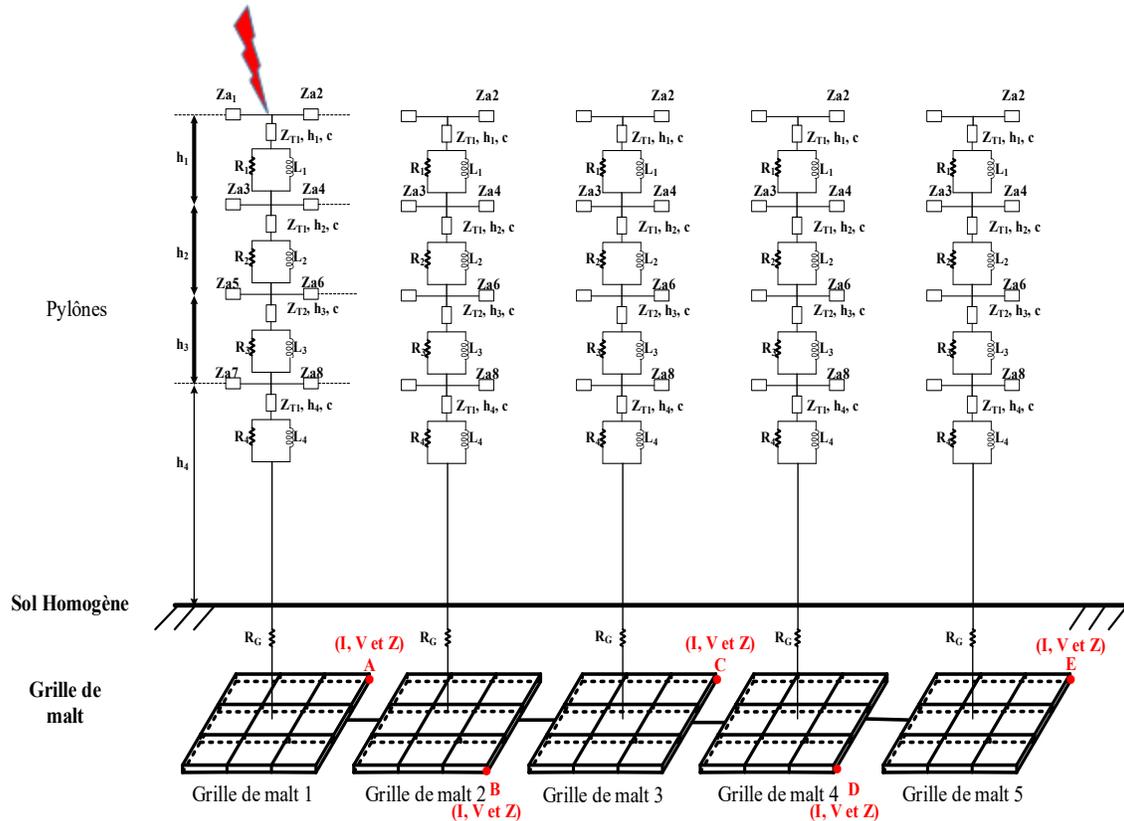


Figure 44: Ensemble Pylône-Grille de malt.

5.4.1. Tensions sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

Pour une résistivité de sol $\rho=100 \Omega.m$, nous simulons dans le temps l'évolution des Tensions, courants et impédances après impact de coup de foudre traversant le pylône électrique jusqu'aux points A, B, C, D et E sur les grilles de malt.

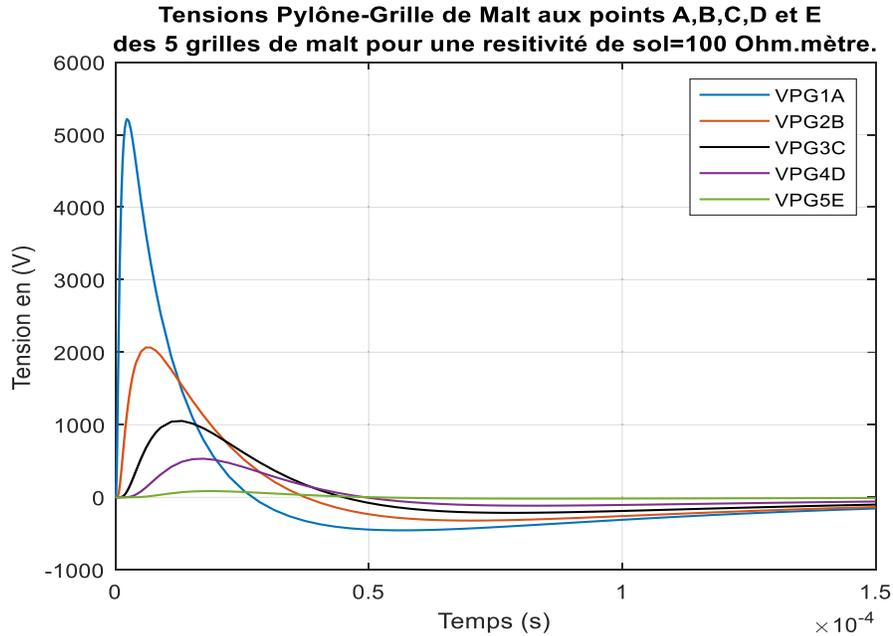


Figure 45: Tensions pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

Sur la figure 45 ci-dessus, nous observons les tensions sur l'ensemble pylône-grilles de malt après un impact de courant de foudre de 12.5 KA et pour une résistivité de sol $\rho=100 \Omega.m$. Nous observons une amplitude de l'ordre 5200 V en environ $10\mu s$ et qui s'atténue à zéro Volt à environ 1.5×10^{-4} s sur l'ensemble pylône-grilles de malt 1 où a lieu l'impact. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les pylônes s'éloignent du point d'impact. De plus, en variant la résistivité de sol ($\rho=100, 300$ et $600 \Omega.m$) les allures restent les mêmes seules les amplitudes qui augmentent lorsque la résistivité du sol augmente pour les figures 48 et 51.

Ci-dessous les formes d'onde des courants sur l'ensemble pylône-grilles de malt.

5.4.2. Courants sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

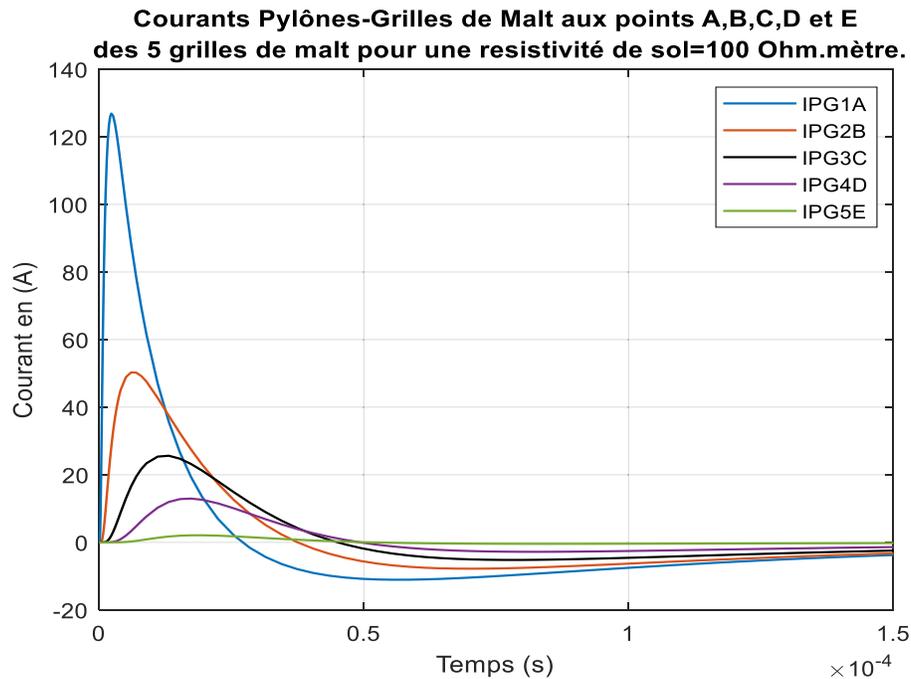


Figure 46: Courant pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

La figure 46 ci-dessus illustre les formes d'onde des courants sur les cinq points de l'ensemble pylône-grilles de malt interconnectés pour une résistivité de sol $\rho=100 \Omega.m$. L'amplitude maximale du courant sur l'ensemble pylône-grilles 1 est 128A en $10\mu s$ et s'atténue à zéro ampère en $1.5 \times 10^{-4} s$. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les pylônes s'éloignent du point d'impact. De plus, en variant la résistivité de sol ($\rho=100, 300$ et $600 \Omega.m$) les allures restent les mêmes seules les amplitudes qui diminuent lorsque la résistivité du sol augmente pour les figures 49 et 52.

Ci-dessous les formes d'onde des impédances sur l'ensemble pylône-grilles.

5.4.3. Impédances sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

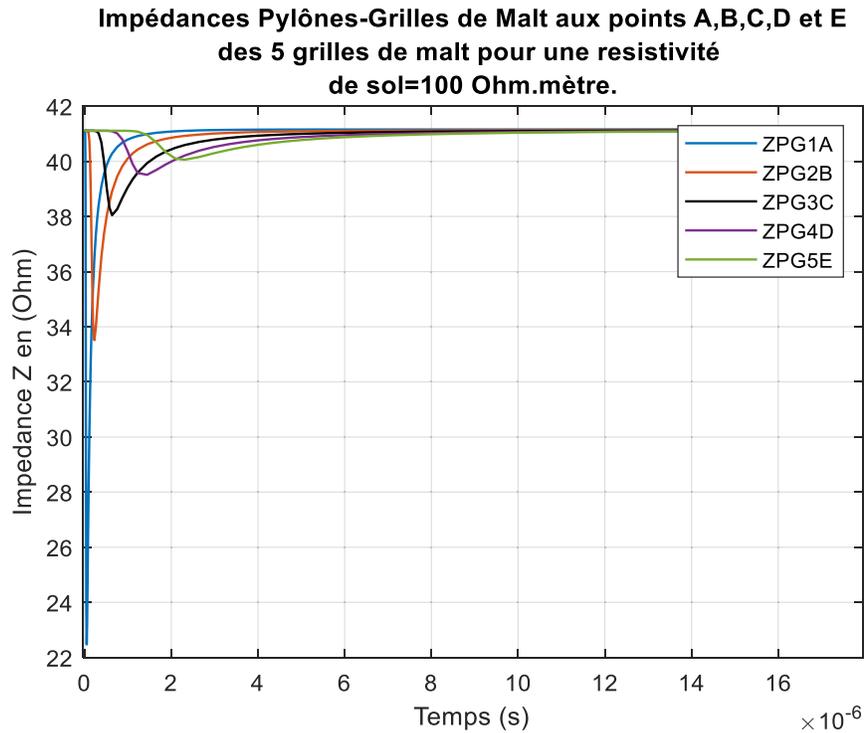


Figure 47: Impédances pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=100 \Omega.m$.

Les impédances observées sur les différents points de l'ensemble pylône-grilles de malt ont dans l'ensemble un pic pratiquement égal (41.8Ω) à environ $10\mu s$. Cependant leurs oscillations sont différentes et varient en fonction de la distance qui les sépare du point d'impact. Mais finissent par se converger et être linéaire dans le temps. De plus, en variant la résistivité de sol ($\rho=100, 300$ et $600\Omega.m$), leur amplitude augmente mais les allures restent les mêmes pour les figures 50 et 53.

5.4.4. Tensions sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

Pour une résistivité de sol $\rho=300 \Omega.m$, nous simulons dans le temps l'évolution des Tensions, courants et impédances après impact de coup de foudre traversant le pylône électrique jusqu'aux points A, B, C, D et E sur les grilles de malt.

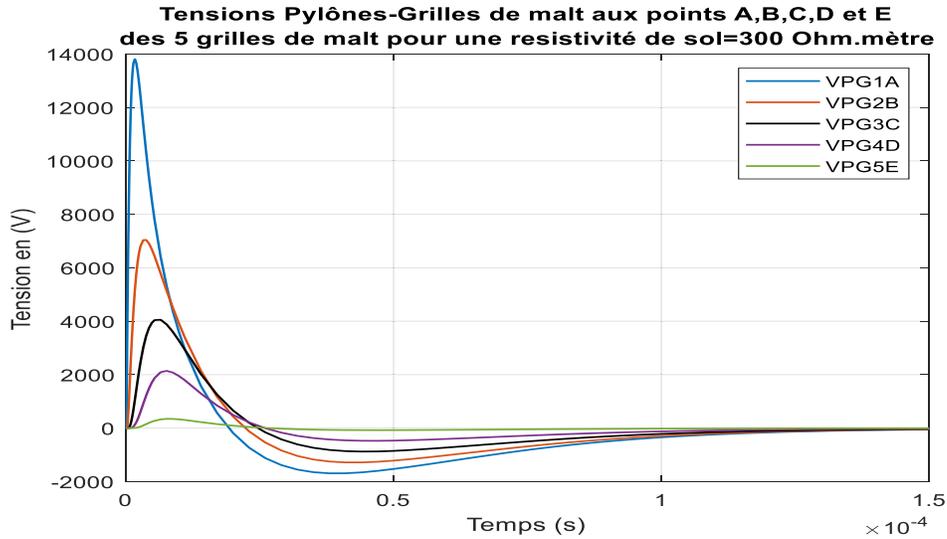


Figure 48: Tensions pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

Sur la figure 48 ci-dessus, nous observons les tensions sur l'ensemble pylône-grilles de malt après un impact de courant de foudre de 12.5 KA et pour une résistivité de sol $\rho=300 \Omega.m$. Nous observons une amplitude de l'ordre 13.8 KV en environ $10\mu s$ et qui s'atténue à zéro Volt à environ $1.5 \times 10^{-4} s$ sur l'ensemble pylône-grilles de malt 1 où a lieu l'impact. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les pylônes s'éloignent du point d'impact.

5.4.5. Courants sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

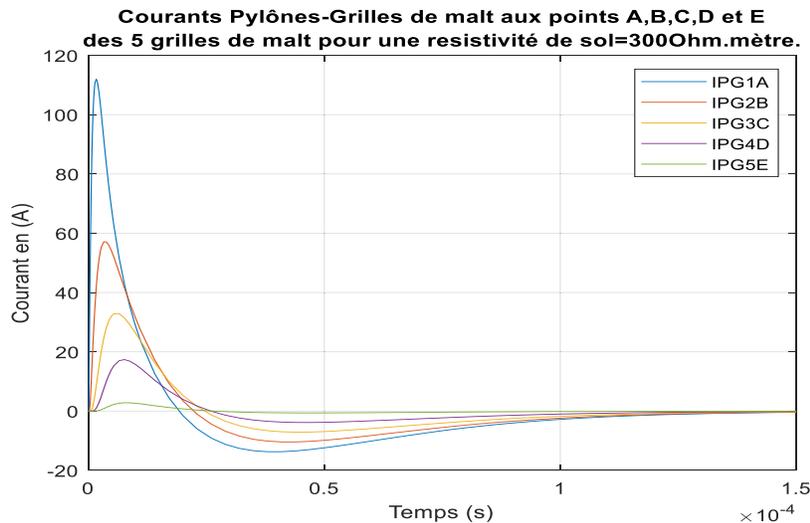


Figure 49: Courants pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

Ci-dessous les formes d'onde des impédances sur l'ensemble pylône-grilles.

5.4.6. Impédances sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

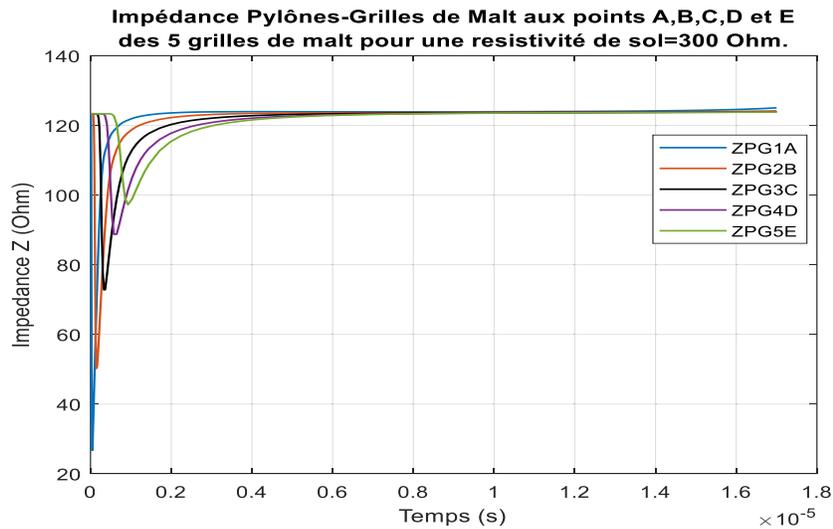


Figure 50: Impédances pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=300 \Omega.m$.

5.4.7. Tensions sur de foudre l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho = 600$.

Pour une résistivité de sol $\rho=600 \Omega.m$, nous simulons dans le temps l'évolution des Tensions, courants et impédances après impact de coup de foudre traversant le pylône électrique jusqu'aux points A, B, C, D et E sur les grilles de malt.

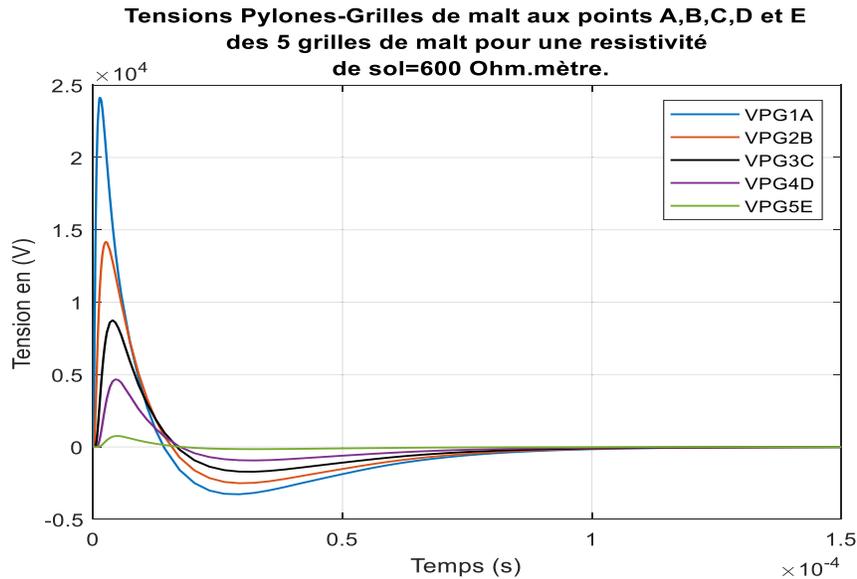


Figure 51: Tensions pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=600 \Omega.m$.

5.4.8. Courants sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho = 600$.

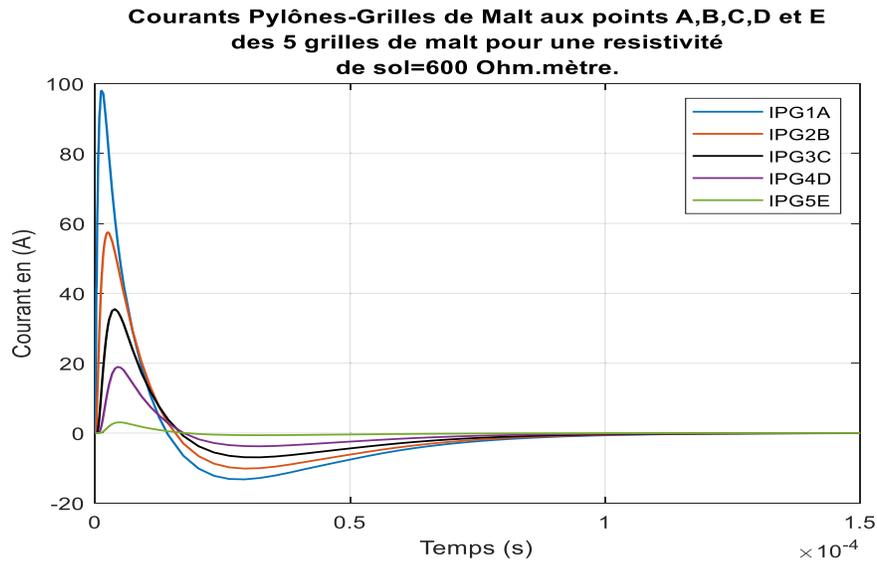


Figure 52: Courants pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=600 \Omega.m$.

Ci-dessous les formes d'onde des impédances sur l'ensemble pylône-grilles.

5.4.9. Impédances sur l'ensemble Pylône-Grille de malt pour $\rho = 600$.

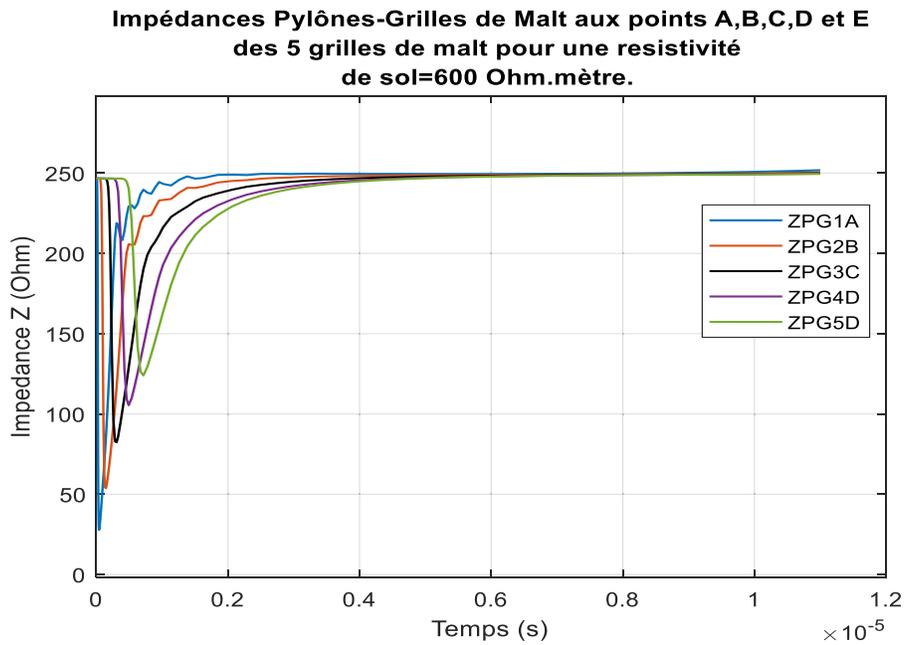


Figure 53: Impédances pylône-grilles de malt aux points A, B, C, D et E des 5 grilles de malt pour $\rho=600 \Omega.m$.

5.5.Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble grille de malt-pipeline

Les grille de malt étant interconnecté entre elle, un courant de foudre de 12.5KA est injecté sur une grille avec une résistivité du sol allant de 100 à 600 Ω .m. La grille est située à 700m de du conduit pipeline. Les tensions, courants et impédances sont observé sur le long du pipeline comme illustré sur les figures suivantes. La longueur du pipeline est considérée comme une portion d'une ligne de transmission.

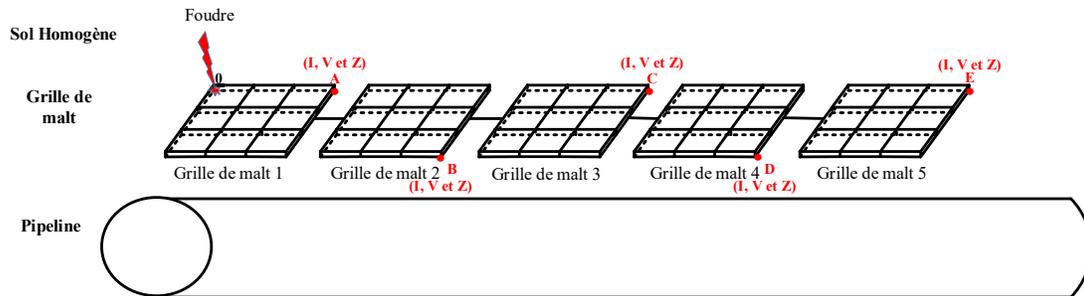


Figure 54: Ensemble Grille de malt-Pipeline

5.5.1. Tensions sur l'ensemble Grille de malt-Pipeline.

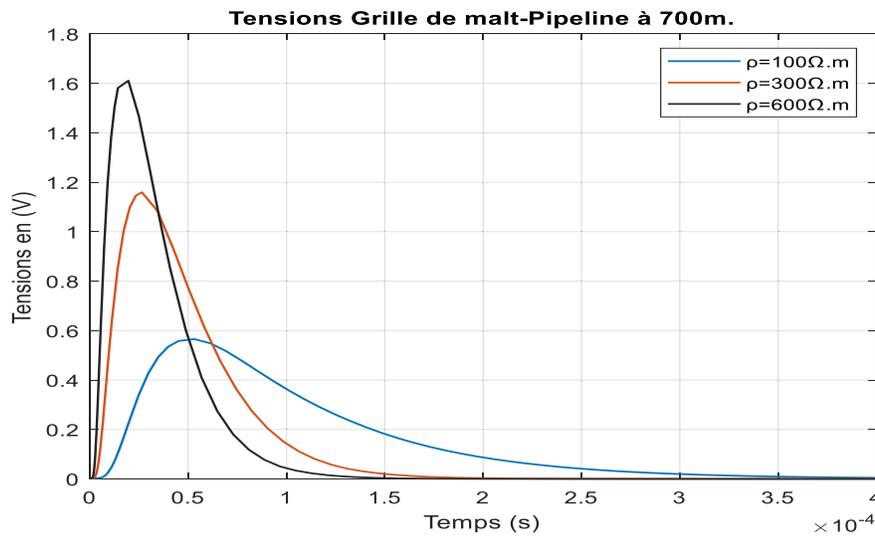


Figure 55: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Grilles de malt-Pipeline situé à 700.

Sur la figure 55 ci-dessus, nous observons les tensions sur l'ensemble grilles de malt-pipeline après un impact de courant de foudre de 12.5KA sur la grille de malt et pour une résistivité de sol $\rho=600 \Omega$.m. Nous observons une amplitude de l'ordre 1.6 V en environ 12 μ s et qui s'atténue à zéro Volt à environ 4×10^{-4} s sur le pipeline. En variant la résistivité

du sol (de 100 à 600 $\Omega.m$), les amplitudes des tensions diminuent au fur et à mesure que la résistivité du sol de la grille de malt diminue et que revêtement du pipeline change.

5.5.2. Courants sur l'ensemble Grille de malt-Pipeline.

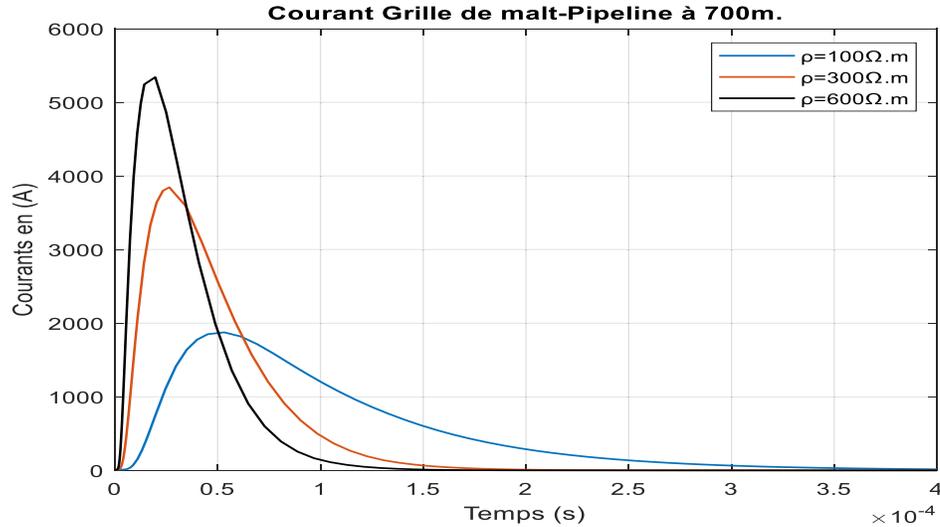


Figure 56: Courants sur le pipeline de l'ensemble Grilles de malt-Pipeline situé à 700.

La figures 56 ci-dessus illustre les formes d'onde des courants sur l'ensemble grilles de malt-pipeline pour les résistivités de sol variant de 100 à 600 $\Omega.m$. L'amplitude maximale du courant sur l'ensemble grilles de malt-pipeline pour $\rho=600\Omega.m$ est 5.2KA en 12 μs et s'atténue à zéro ampère en 4×10^{-4} s. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les résistivités de sol diminuent.

Ci-dessous les formes d'onde des impédances sur l'ensemble grilles de mal-pipeline.

5.6.Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble pylône-grille de malt-pipeline.

Les 5 pylônes étant connecté chacun à une grille de malt et les grilles interconnecté entre elles et un pipeline situé 700m au voisinage des grilles de malt. Un curant de foudre de 12,5 KA est injecté au sommet du pylône 1. Les résistivités de sol des grilles de malt et du pipeline varient de 100 à 600 $\Omega.m$. Nous observons dans le temps le comportement dynamique des tensions, courants et impédances sont observés interagissant sur le pipeline par couplage électromagnétique.

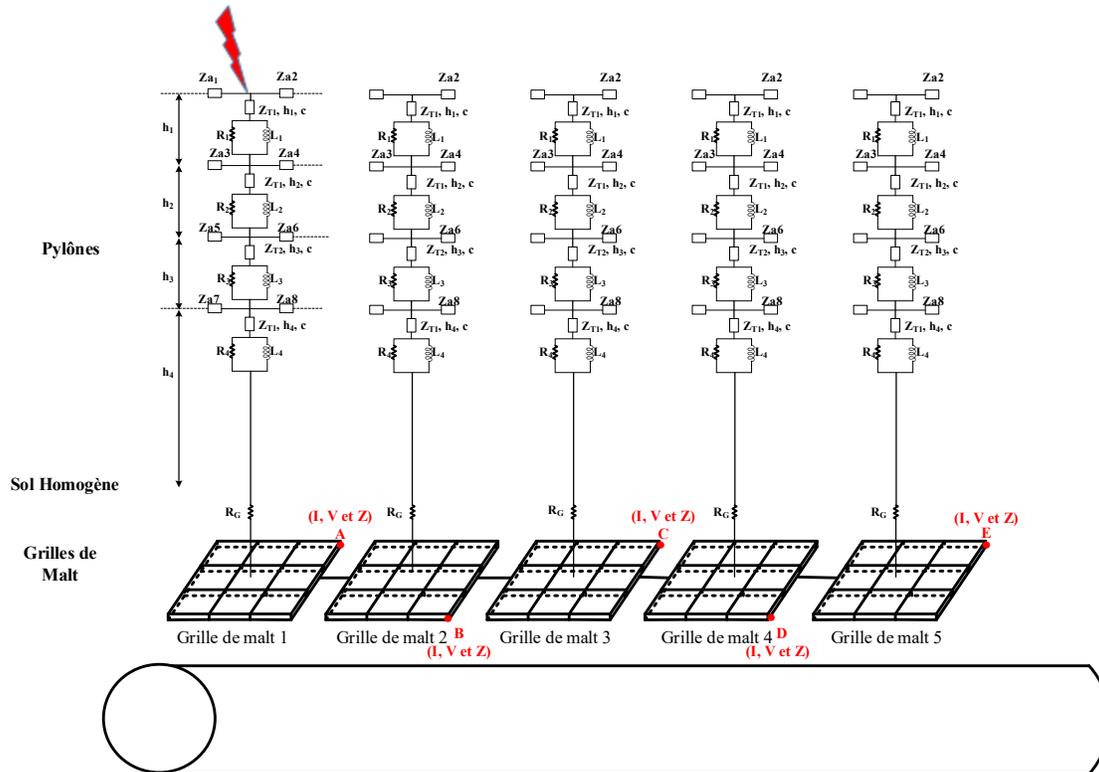


Figure 57: Ensemble Pylône-Grille de Malt-Pipeline.

5.6.1. Tensions ensemble Pylône-Grille de Malt-Pipeline.

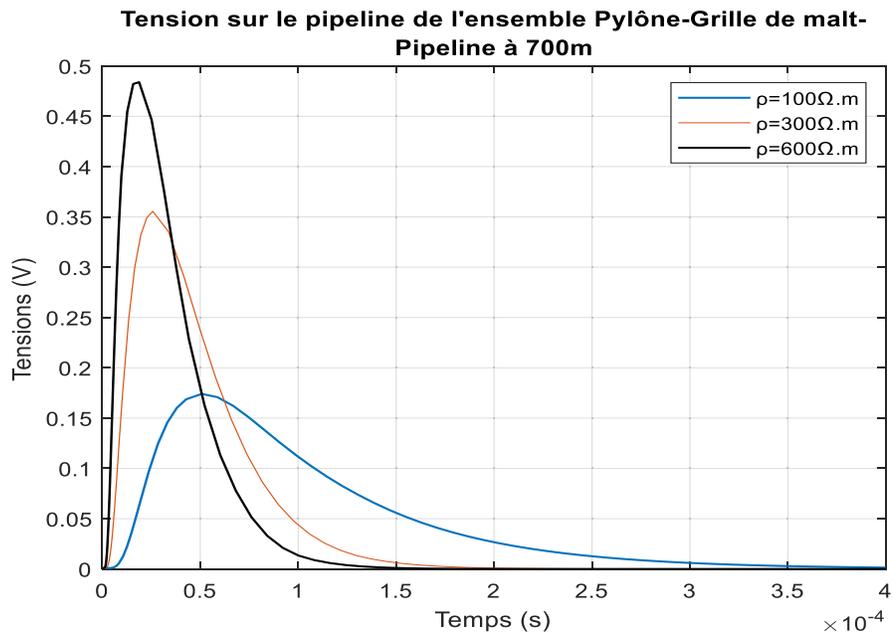


Figure 58: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Pylône-Grille de malt- pipeline situé à 700m.

La tension arrivant sur le pipeline est observée à partir du point E sur la grille de malt. Pour une résistivité de sol $\rho=600 \Omega.m$, nous observons une amplitude de l'ordre 0.48 V en environ $12\mu s$ et qui s'atténue à zéro Volt à environ 4×10^{-4} s sur le pipeline. En variant la résistivité du sol (de 100 à 600 $\Omega.m$), les amplitudes des tensions diminuent au fur et à mesure que la résistivité du sol de la grille de malt diminue et que revêtement du pipeline change.

5.6.2. Courants sur ensemble Pylône-Grille de Malt-Pipeline

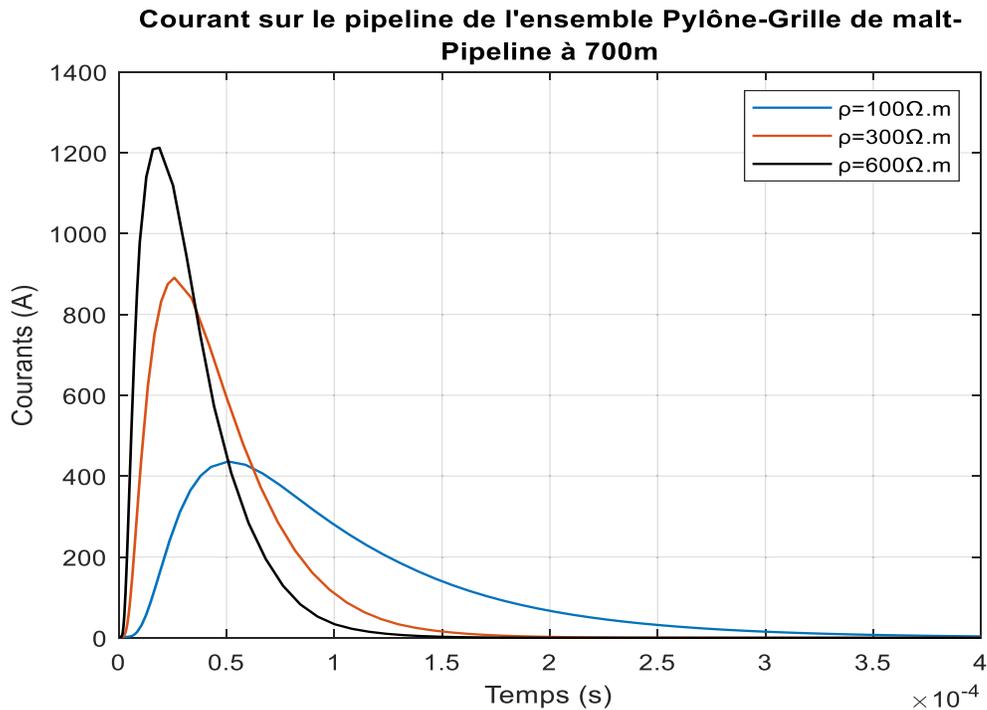


Figure 59: Courants sur le pipeline de l'ensemble Pylône-Grille de malt-pipeline situé à 700m.

Les formes d'onde des courants sur l'ensemble grilles de malt-pipeline pour différentes résistivités (100, 300 et 600 $\Omega.m$). L'amplitude maximale du courant sur l'ensemble grilles de malt-pipeline pour $\rho=600 \Omega.m$ est 1.2KA en $12\mu s$ et s'atténue à zéro ampère en 4×10^{-4} s. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les résistivités de sol diminuent.

Ci-dessous les formes d'onde des impédances sur l'ensemble grilles de mal-pipeline.

5.6.3. Tension à l'intérieur du Pipeline.

Pour un pipeline au voisinage de l'ensemble Pylône-Grille de malt 1 où une tension 24KV est observé avec $\rho=100 \Omega.m$ et pour une variation de la résistance du revêtement du

pipeline (R_c) égale à 0, 6250, 28600 et 106000 $\Omega.m^2$, les tensions observées à l'intérieur du pipeline sont données sur la figure suivante :

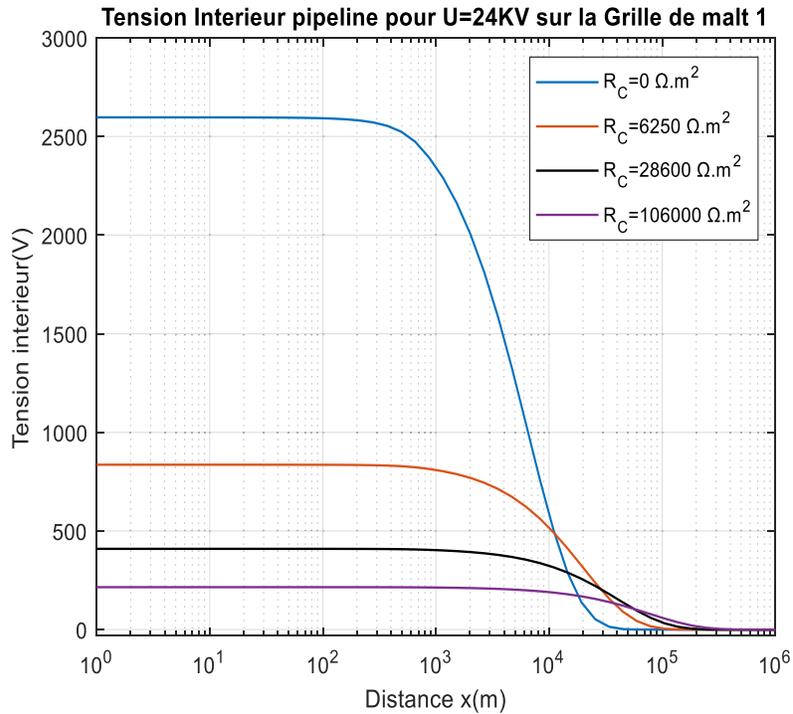


Figure 60: Tension intérieure du pipeline situé à 700m de la grille de malt.

Les tensions à l'intérieur du pipeline varient en fonction de la résistance du revêtement du pipeline pour une distance donnée. Leurs amplitudes maximales diminuent lorsque la résistance du revêtement augmente. Pour une distance de 10m entre le pipeline et l'ensemble pylône grille de malt1, nous observons 2.6KV pour $R_c = 0 \Omega.m^2$.

La figure suivante nous illustre les tensions à l'extérieur du pipeline bien évidemment en variant la résistance du revêtement du pipeline.

5.6.4. Tension extérieure du pipeline.

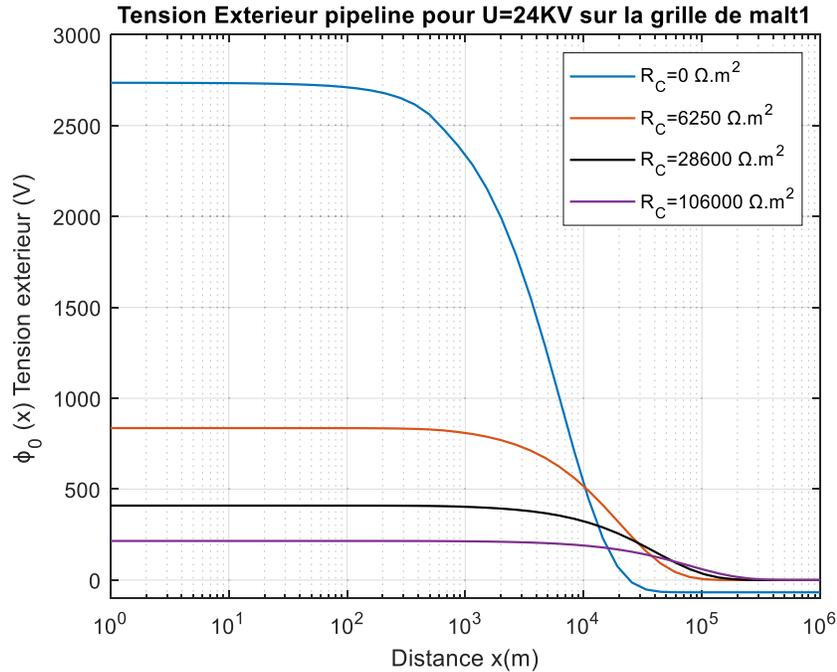


Figure 61: Tension extérieur du pipeline.

Les tensions à l'extérieur du pipeline varient également en fonction de la résistance du revêtement du pipeline pour une distance donnée. Leurs amplitudes maximales diminuent lorsque la résistance du revêtement augmente. Pour une distance de 700m entre le pipeline et l'ensemble pylône grille de malt1, nous observons environ 2.75KV pour $R_c = 0 \Omega \cdot m^2$.

La figure 61 représente la tension sur la surface du pipeline à partir du point A sur la grille en tenant compte de la distribution de potentielle à l'intérieur du pipeline (figure 60) et de la chute de tension sur le pipeline.

5.6.5. Courant de retour dans le pipeline.

Les courants dans le pipeline situé à 700m de la grille pour différentes variations de résistance du revêtement du pipeline est représenté sur la figure ci-dessous.

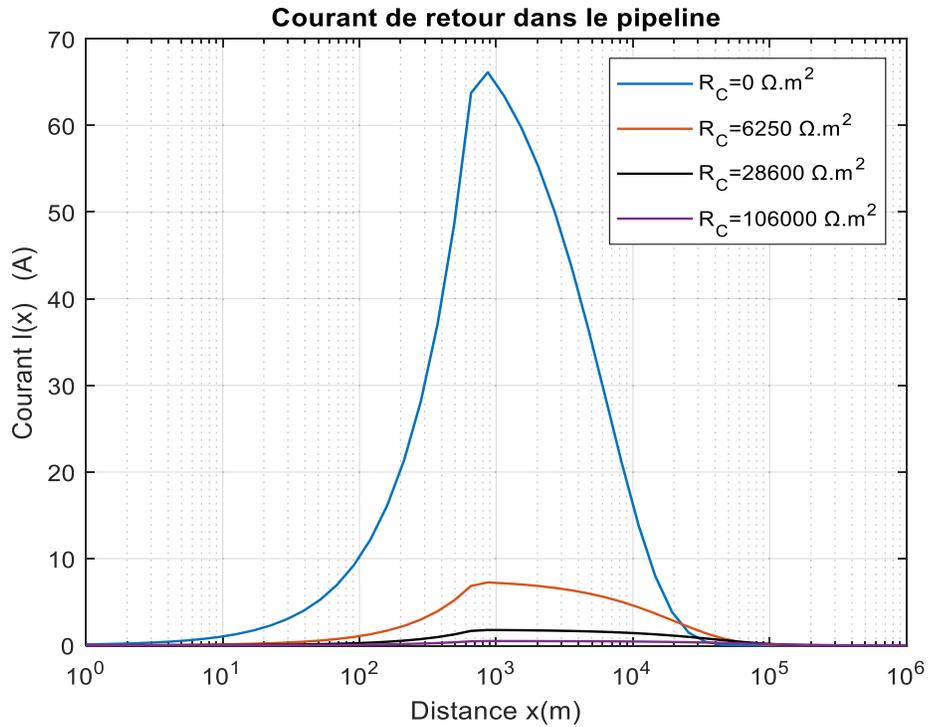


Figure 62: Courant de retour dans pipeline situé à 700m de la grille de malt

Le courant de retour dans le pipeline prend en compte le champ électrique, la résistivité du sol et la résistance du revêtement du pipeline. La variation de la résistance du revêtement du pipeline varie la forme d'onde du courant de retour dans le pipeline. Ce courant atteint une amplitude de 66A pour 2.8Km de longueur du pipeline.

Sur la figure suivante est représenté la variation de la densité de courant de fuite ans le pipeline se situant à 700m de la grille de malt.

5.6.6. Densité de courant de fuite pénétrant le pipeline.

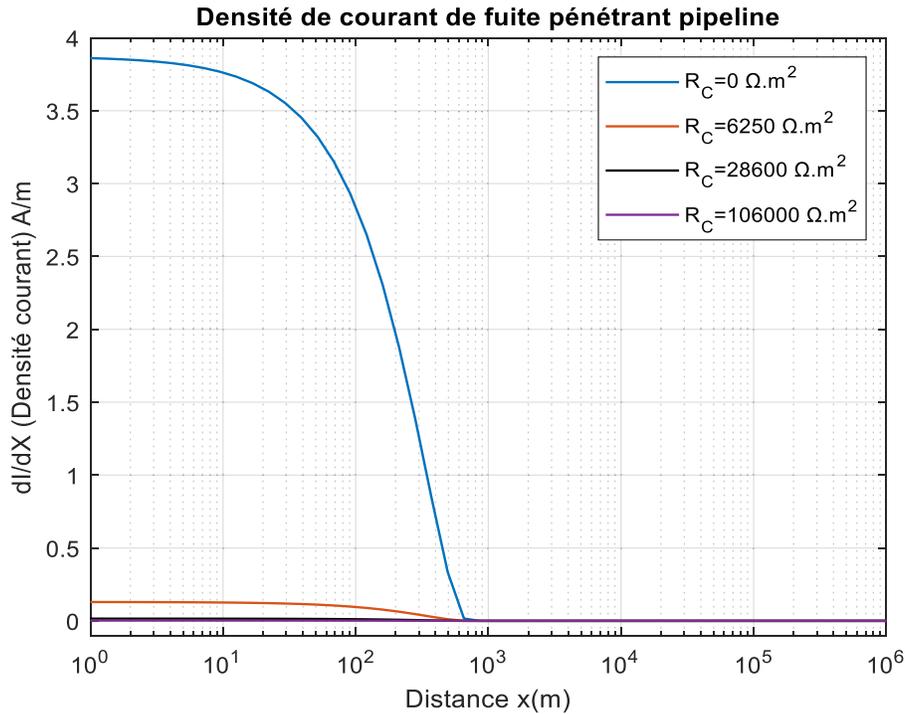


Figure 63: Densité de courant de fuite pénétrant dans le pipeline.

Les densités du courant de fuite pénétrant le pipeline illustré ci-dessus sont données bien évidemment en fonction de la résistance du revêtement du pipeline et de la résistivité du sol. Plus la résistance du revêtement est grande, moins est l'amplitude de la densité de courant de fuite. À zéro $\Omega.m^2$, nous observons 3.80A/m à 700m. À partir de 10^3 m environs, le courant de fuite est pratiquement nul dans le pipeline.

5.7.Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble pylône-grille de malt-Pipeline (Pipeline de Forme Rx, Lx, Cx et Gx)

La forme du modèle du circuit électrique du pipeline (modèle Rx, Lx, Cx et Gx) composé d'une résistance Rx, d'un inductance Lx, d'un condensateur Cx et d'une conductance Gx (figure 64) ainsi que les forme d'onde de tension et de courant lors d'un impact de coup de foudre sont simulées sur les figures 65 et 66.

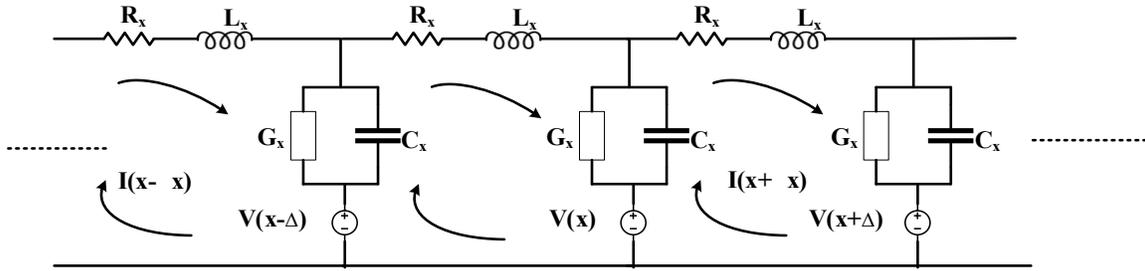


Figure 64: Elément électrique du pipeline de la forme R_x , L_x , C_x et G_x .

$$R_x = \frac{\rho}{\pi} A \quad (5.1)$$

$$L_x = \frac{\mu_0}{2\pi} A \quad (5.2)$$

$$C_x = \frac{\pi\epsilon}{A} \quad (5.3)$$

$$G_x = \frac{1}{R} \quad (5.4)$$

$$A = \left[\ln \left(\frac{1.123}{\Gamma[r^2 + 4d^2]} \right) \right]^{-1} \quad (5.5)$$

5.7.1. Tensions pipeline de modèle R_x , L_x , C_x et G_x .

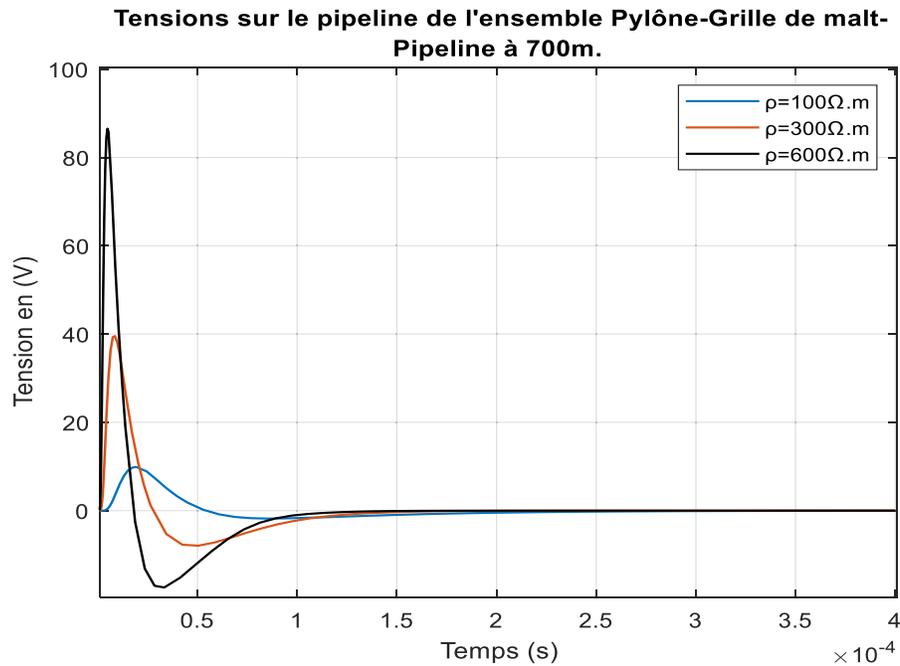


Figure 65: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle R_x , L_x , C_x et G_x .

Pour le modèle (R_x , L_x , C_x et G_x), les tensions sur l'ensemble pylône-grilles de malt-pipeline après un impact de courant de foudre sur le pylône sont observées sur la figure ci-dessus. Pour une résistivité de sol $\rho=600 \Omega.m$, nous observons une amplitude de l'ordre 88 V en environ $12\mu s$ et qui s'atténue à zéro Volt à environ 2.5×10^{-4} s sur le pipeline. En variant la résistivité du sol, les amplitudes des tensions diminuent au fur et à mesure que la résistivité du sol de la grille de malt et du pipeline diminue pour une même résistance de revêtement du pipeline. Cette forme du circuit présente les chutes de tension au niveau des condensateurs qui à un moment se court-circuite tout au long du circuit.

5.7.2. Courants pipeline de modèle R_x , L_x , C_x et G_x .

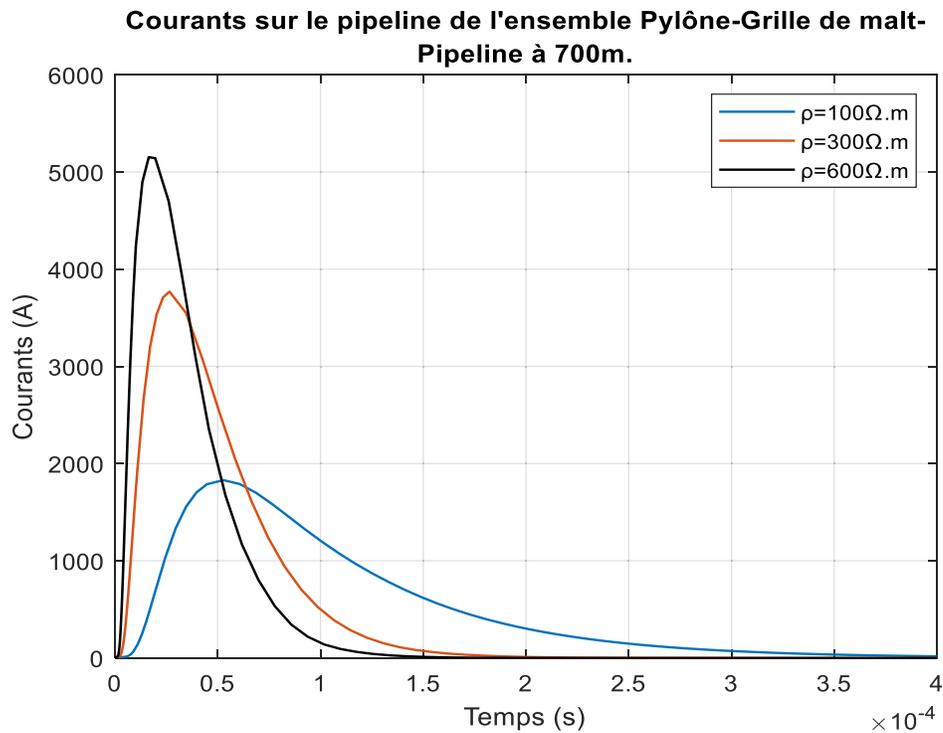


Figure 66: Courants sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle R_x , L_x , C_x et G_x .

Les formes d'onde des courants sur l'ensemble pylône-grilles de malt-pipeline d'un modèle R_x L_x C_x G_x de ligne de transmission sont données ci-dessus. L'amplitude maximale du courant sur l'ensemble grilles de malt-pipeline pour $\rho=600 \Omega.m$ est 5.3KA en $12\mu s$ et s'atténue à zéro ampère en 4×10^{-4} s. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les résistivités de sol diminuent.

5.8. Simulation de l'impact de foudre sur l'ensemble pylône-grille de malt-Pipeline (Pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$)

La forme du modèle du circuit électrique du pipeline (modèle $R_c R_x L_x C_x$) composé d'une résistance de revêtement R_c , d'une résistance R_x , d'une inductance L_x et d'un condensateur C_x (figure 68) ainsi que les forme d'onde des tensions et courants lors d'un impact de coup de foudre sont simulées. La résistance du revêtement R_c ($R_c=6250 \Omega.m^2$) est également pris en compte dans les simulations. La forme du circuit est donnée par Bhumkittipich, K., B et al (2013), nous avons développé les formules en se conformant aux paramètres de pipeline comme une portion d'une ligne de transmission.

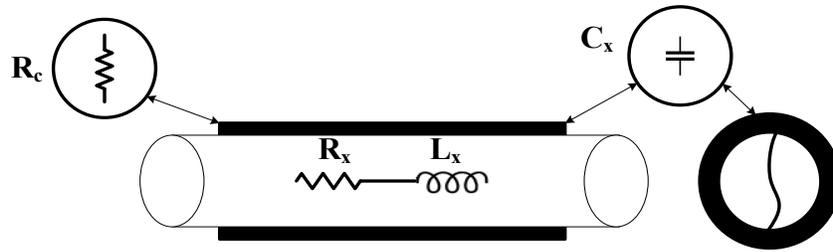


Figure 67: Elément électrique du pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$ [19].

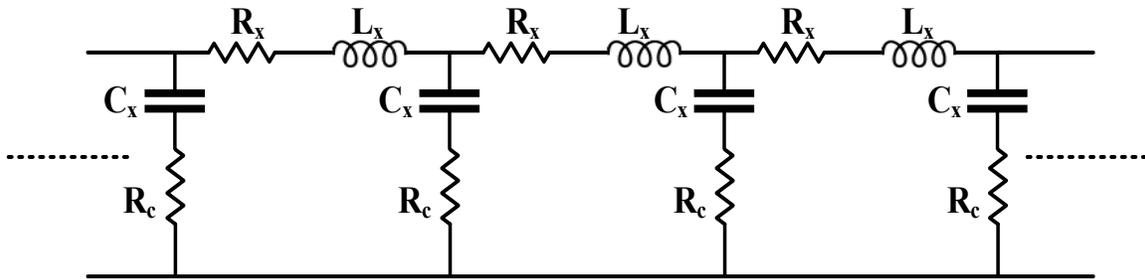


Figure 68: Circuit électrique pipeline modèle $R_c R_x L_x C_x$.

$$R_x = \frac{\rho}{\pi} A \quad (5.6)$$

$$L_x = \frac{\mu_0}{2\pi} A \quad (5.7)$$

$$C_x = \frac{\pi \varepsilon}{A} \quad (5.8)$$

$$A = \left[\ln \left(\frac{1.123}{\Gamma [r^2 + 4d^2]} \right) \right]^{-1} \quad (5.9)$$

5.8.1. Tensions pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$.

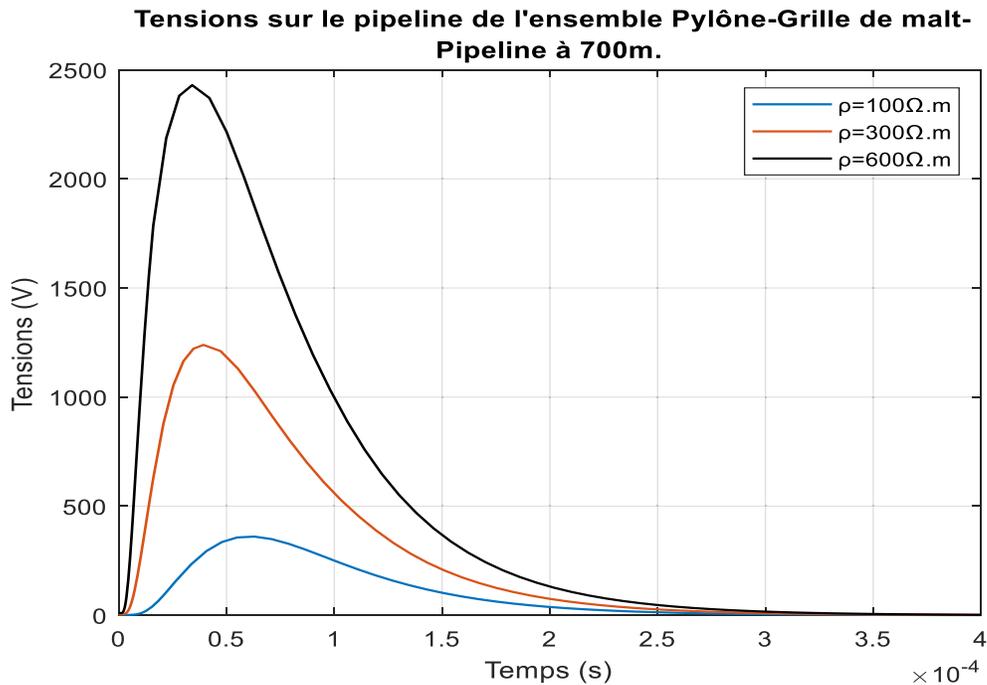


Figure 69: Tensions sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$.

Sur la figure ci-dessus est observée pour le modèle de ligne de transmission $R_c R_x L_x C_x$, la variation des ondes des tensions sur l'ensemble pylône-grilles de malt-pipeline après un impact de courant de foudre sur le pylône 1. Pour une résistivité de sol $\rho=600 \Omega.m$, nous observons une amplitude de l'ordre 2.4 KV en environ $12\mu s$ et qui s'atténue à zéro Volt à environ $4 \times 10^{-4} s$ sur le pipeline. En variant la résistivité du sol (100, 300 et 600 $\Omega.m$), les amplitudes des tensions diminuent au fur et à mesure que la résistivité du sol de la grille de malt diminue.

5.8.2. Courants pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$.

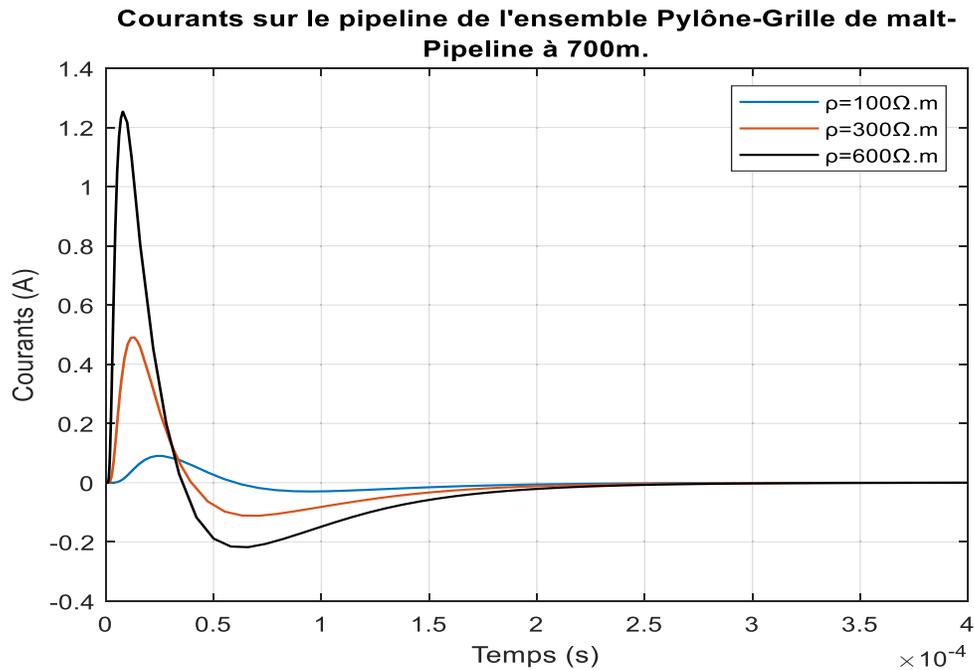


Figure 70: Courants sur le pipeline de l'ensemble Pylône-grille de malt-Pipeline de modèle $R_c R_x L_x C_x$.

Ci-dessus est illustré les formes d'onde des courants sur l'ensemble pylône-grilles de malt-pipeline pour les résistivités de sol variant de 100 à 600 $\Omega.m$. L'amplitude maximale du courant sur l'ensemble grilles de malt-pipeline pour $\rho=600 \Omega.m$ est 1.25KA en 12 μs et s'atténue à zéro ampère en 4×10^{-4} s. Ces amplitudes diminuent au fur et à mesure que les résistivités de sol diminuent.

5.9. Conclusion

Ce chapitre est dédié à la validation des modèles mathématiques par simulation numérique des tensions, courants et impédances d'un impact de coup de foudre sur cinq pylônes connectés chacun à une grille de malt interconnecté et au voisinage de pipeline. La variation de la résistivité du sol de 100,300 et 600 $\Omega.m$ détermine les variations des amplitudes des tensions, courants et impédances. Plus la résistivité du sol est grande plus grande est l'amplitude des tensions, courants et impédances. De plus, l'amplitude du courant de foudre diminue au fur et à mesure qu'il traverse les composant résistifs, inductifs et capacitifs des différents tronçons du pylône, de la grille de malt et du pipeline. Trois configurations de modèles de ligne de transmission du pipeline ont été simulé pour valider

les résultats en conformité avec ceux rencontrés dans la littérature. La forme $R_x L_x C_x G_x$ présente les chutes de tension au niveau des condensateurs qui à un moment se court-circuitent tout au long du circuit. La différence entre le modèle $R_x L_x C_x G_x$ et le modèle $R_c R_x L_x C_x$ est bien évidemment basée sur la forme du circuit et le comportement des composants électriques qui influence les amplitudes des tensions et des courants. Néanmoins les allures restent toujours les mêmes. De plus, le modèle $R_x L_x C_x G_x$ présente des tensions plus sécuritaires (88V pour 600 $\Omega.m$) par rapport au modèle $R_c R_x L_x C_x$.

6. Conclusion générale

Ce travail centré sur le thème « Modélisation et simulation sous l'effet de la foudre des pylônes connectés aux grilles de malt et au voisinage d'un Pipeline » a pris en compte diverses champs de recherches. Une étude détaillée en supposant certaines conditions, à savoir le type de sol où est enfoui la grille de malt et le pipeline est homogène. Une généralité sur le mécanisme d'agression de la foudre sur les pylônes électriques, la grille de malt et le pipeline lors d'un impact direct (thermoélectrique) et indirect (électromagnétique) a été faite dans son ensemble. Contrairement au cas de l'impact direct, le coup de foudre indirect ne touche pas directement le réseau. Dans ces conditions, le couplage du champ électromagnétique rayonné par l'arc en retour avec le réseau génère des courants et tensions induits sur les différents conducteurs filaires. Ensuite, un bon choix de système de protection adéquat pour limiter le dégât que causerait la foudre a été suggéré. De plus pour la protection des personnes intervenant sur le pipeline, la vérification permanente de l'isolant de revêtement est indispensable. Pour l'ensemble du système, les éléments influençant le comportement de l'onde de foudre dans le sous système pylône-grille de malt et pipeline ont été énumérés pour prédire le chemin de propagation et caractériser chaque élément dans la simulation. En outre, une modélisation des différentes approches rencontrées dans la littérature a été faite. L'approche particulière a été bien évidemment portée sur le modèle de ligne de transmission et celle par circuit. Dans l'ensemble, nous avons considéré cinq pylônes connectés chacun à une grille de malt et tous interconnectés par un contrepoids puis au voisinage de conduit pipeline souterrain. La longueur du pipeline est considérée dans tous les modèles comme une portion d'une ligne de transmission. Les amplitudes des tensions, courants et impédances sont proportionnelles à la variation de la résistivité du sol. De plus, l'amplitude du courant de foudre diminue au

fur et à mesure qu'il traverse les composant résistifs, inductifs et capacitifs des différents tronçons du pylône, de la grille de malt et du pipeline. Pour la protection du pipeline (Perforation, la corrosion) les valeurs des tensions ne doivent pas dépasser les valeurs des appareils de protection selon la norme BS60950.

7.Perspectives

- ❑ La prise en compte d'un sol multicouche pour la grille de malt et le pipeline peut être nécessaire pour être encore très proche de la réalité et visualiser le comportement de la foudre.
- ❑ La considération d'une longueur infinie ou extrêmement grande du conduit pipeline sera aussi nécessaire pour la visualisation de l'onde de foudre tout au long de celui-ci.

8. Bibliographie

1. Alam, M.A. and H. Ahmad. *Some features lightning Ground Flashes in Malaysia*. in *National Technical Seminar, KL*. 1996.
2. Boufenneche, L., et al., *Impact d'une Onde de Foudre sur un Pylône Electrique*. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES.
3. Ishii, M. and Y. Baba, *Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997. **12**(1): p. 483-488.
4. WANG, C.-j., et al., *Present and Development of Lightning Protection for HV Transmission Lines and Substations [J]*. Insulators and Surge Arresters, 2010. **3**: p. 35-46.
5. Bermudez, J.L., et al. *A reduced-scale model to evaluate the response of tall towers hit by lightning*. in *Proc. Int. Symp. Power Quality (SICEL)*. 2001.
6. Mezoued, S., et al. *Illumination d'un réseau de lignes ou de câbles par une onde de foudre Modélisation par des générateurs de courant*. in *Annales des télécommunications*. 2006. Springer.
7. Woo, J., et al. *The analysis results of lightning over voltages by EMTP for lightning protection design of 500 kV substation*. in *IPST International Conference on Power Systems Transients*. 2005.
8. Viola, F., P. Romano, and R. Miceli, *Finite-difference time-domain simulation of towers cascade under lightning surge conditions*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015. **51**(6): p. 4917-4923.
9. Boufenneche, L., et al. *Interaction between lightning discharge and electrical tower*. in *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2010. IEEE.
10. Gao, C., et al. *Computation of power line tower lightning surge impedance using the electromagnetic field method*. in *2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2006. IEEE.
11. Nicolopoulou, E., et al. *Comparison of circuit models for the simulation of soil ionization*. in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2012. IEEE.
12. Grcev, L.D. and F.E. Menter, *Transient electromagnetic fields near large earthing systems*. IEEE Transactions on Magnetics, 1996. **32**(3): p. 1525-1528.
13. Lagace, P., et al., *Computer aided evaluation of pipeline current near toroidal HVDC ground electrodes*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989. **4**(1): p. 216-222.
14. Frazier, M., et al., *Transmission line, railroad and pipeline common corridor study*. IEEE transactions on power delivery, 1986. **1**(3): p. 294-300.
15. Ismail, H.M., *Effect of oil pipelines existing in an HVTL corridor on the electric-field distribution*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007. **22**(4): p. 2466-2472.
16. Li, Y., F. Dawalibi, and J. Ma. *Electromagnetic interference caused by a power system network on a neighboring pipeline*. in *Proceedings of the American Power Conference*. 2000. Illinois Institute of Technology; 1999.
17. Xie, H.-C., G.-Z. Zhang, and X.-W. Zhang. *Study of electromagnetic impact on buried metallic pipelines due to lightning strike on UHV AC double-circuit tower*. in *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2010. IEEE.
18. Caulker, D., H. Ahmad, and M.M. Ali. *Effect of lightning induced voltages on gas pipelines using ATP-EMTP program*. in *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*. 2008. IEEE.
19. Bhumkittipich, K., B. Topradith, and T. Suwanasri, *Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum Pipeline System*. Energy Procedia, 2013. **34**: p. 148-158.
20. Orville, R.E., *Lightning ground flash density in the contiguous United States-1989*. Monthly Weather Review, 1991. **119**(2): p. 573-577.
21. *Formation de nuage d'orage*, in https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enCA794CA794&ei=ug_uXLjkDuOG5

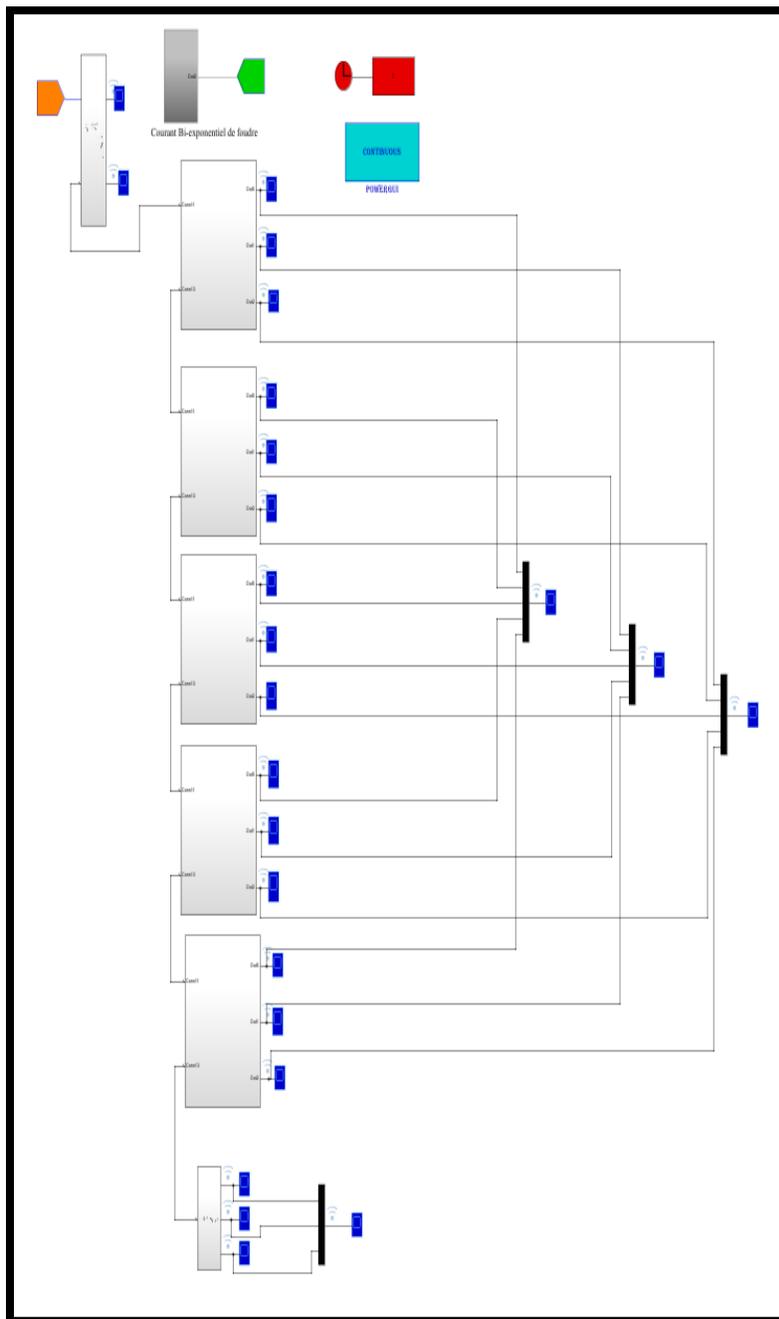
- wLns6n4DA&q=formation+de+nuage+orageux+de+foudre&oq=formation+de+nuage+orageux+de+foudre&gs_l=psy-ab.3...20375.30746..31779...0.0..0.83.2158.29.....0...1..gws-wiz.....0i71j0i7i30j0i8i7i30j0i7i5i30j0i5i30j0i8i30j0i30.YQjk4JoZe-k. 2019. p. Google.
22. wordpress, *Formation de la foudre et ses caracterisques*. 2007.
 23. 3e, f., *surtension attention, les orage arrivent*. 2016.
 24. Rachidi, F., et al., *Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001. **43**(3): p. 356-367.
 25. Williams, E., M. Weber, and R. Orville, *The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989. **94**(D11): p. 13213-13220.
 26. Liu, Y., M. Zitnik, and R. Thottappillil, *An improved transmission-line model of grounding system*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001. **43**(3): p. 348-355.
 27. Salgado, L., et al. *Transient Analysis of Grounding Systems under Lightning Strikes Considering Soil Ionization*. in *2010 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2010. IEEE.
 28. Djamel, I., F.H. Slaoui, and S. Georges. *Analysis of the Transient Behavior of Grounding Systems with Consideration of Soil Ionization*. in *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. 2018. IEEE.
 29. Quickel, G. and J. Beavers, *Pipeline failure results from lightning strike: act of mother nature?* Journal of Failure Analysis and Prevention, 2011. **11**(3): p. 227-232.
 30. da Cunha, S.B., *A review of quantitative risk assessment of onshore pipelines*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016. **44**: p. 282-298.
 31. Davis, P., et al., *Performance of European cross-country oil pipelines*. Statistical summary of reported spillages, 2006. **54**.
 32. Cunha, S.B. *Comparison and analysis of pipeline failure statistics*. in *2012 9th International Pipeline Conference*. 2013. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
 33. *paratonnere pour pylone*, in <https://www.google.com/search>. 2019.
 34. Rakov, V.A. and M.A. Uman, *Lightning: physics and effects*. 2003: Cambridge University Press.
 35. IEEEStd80, A., *IEEE guide for safety in AC substation grounding*. 1998, New York: Institute of Electrical and Electronics, Inc.
 36. Grcev, L., *Modeling of grounding electrodes under lightning currents*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009. **51**(3): p. 559-571.
 37. Glushakow, B., *Effective lightning protection for wind turbine generators*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007. **22**(1): p. 214-222.
 38. 60364-1, I., *Low voltage electrical installations. Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions*. 2005.
 39. Commission, I.E., *Protection against lightning, Part 1: General principles*. IEC 62305-1, 2004.
 40. against lightning-Part, P., 3: *Physical damage to structures and life hazard*. International Electro-technical Commission. IEC, 2010: p. 62305-3.
 41. Commission, I.E., *Protection against lightning-Part4: Electrical and electronic systems within structures*. IEC 62305-4, Ed. 1, 2003.
 42. Bouquegneau, C., *A critical view on the lightning protection international standard*. Journal of electrostatics, 2007. **65**(5-6): p. 395-399.
 43. Amicucci, G.L., F. Fiamingo, and T. Kisielewicz. *Risk assessment of photovoltaic installations, due to lightning, according to IEC 62305*. in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2012. IEEE.
-

44. Bouquegneau, C., P. Lecomte, and L. Remmerie. *RISK Multilingual, a complete software to calculate the Lightning Risk for Structures*. in *Proc. of the IX SIPDA, Foz de Iguaçu (Brazil)*. 2007.
45. Geiges, K., *Electric Shock Hazard Analysis [includes discussion]*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1956. **75**(3): p. 1329-1331.
46. Dalziel, C.F. and F.P. Massoglia, *Let-go currents and voltages*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, 1956. **75**(2): p. 49-56.
47. Arav, M., *Protection contre la Corrosion: maintenance préventive—cas des grands chantiers*. Journées techniques-CEFRACOR, France,(25-26 novembre 1997). **41**.
48. Lu, D., et al. *Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead AC transmission line*. in *2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*. 2012. IEEE.
49. Guo, X., et al., *A Non-Uniform Transmission Line Model of the±1100 kV UHV Tower*. Energies, 2019. **12**(3): p. 445.
50. slaoui, F., *Grand reseaux et mise à la terre*. 2018: p. 13.
51. T, W., *Electrontechnique*. Les presses de l'université de Laval 1992. (2e éd), **789-790**.
52. <http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1330.aspx>. *Type de sol*. consulté le 20/09/2019.
53. Dawalibi, F. and C. Blattner, *Earth resistivity measurement interpretation techniques*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984(2): p. 374-382.
54. Bashi, M., N.F., et Radzima, *Cathodic Protection System", National power and Energy conference*. IEEE, 2003. **Bangui, Malasysia**.
55. training, F. http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm. consulté le 03/10/2019 à 00:45.
56. Hélie, M. *Matériaux métalliques : Phénomènes de corrosions*. <http://www.cefracor.org/htm/publica.htm> 2019 [cited 2019 23/09/2019].
57. Guerrieri, S., et al., *On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents*. IEEE Transactions on Power delivery, 1998. **13**(4): p. 1543-1555.
58. Yang, G., et al., *Evaluation of lightning current from magnetic field based on deconvolution method*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017. **60**(3): p. 679-684.
59. Uman, M.A. and D.K. McLain, *Lightning return stroke current from magnetic and radiation field measurements*. Journal of Geophysical Research, 1970. **75**(27): p. 5143-5147.
60. Thottappillil, R., et al., *Extension of the Diendorfer-Uman lightning return stroke model to the case of a variable upward return stroke speed and a variable downward discharge current speed*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1991. **96**(D9): p. 17143-17150.
61. Baba, Y. and V.A. Rakov, *On the use of lumped sources in lightning return stroke models*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005. **110**(D3).
62. Zhang, Y., W. Sima, and Z. Zhang, *Summary of the study of tower models for lightning protection analysis*. Gaodianya Jishu/ High Voltage Engineering, 2006. **32**(7): p. 93-97.
63. Hara, T. and O. Yamamoto, *Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis*. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996. **143**(3): p. 283-289.
64. Mo, F., Y. Chen, and J. Ruan, *Study on transmission tower models and their lightning performance calculation*. Power System Technology, 2004. **28**(21): p. 80-84.

65. YANG, Q., et al., *Lightning Back-Flashover Performance of the Yun-Guang UHV DC Transmission Lines [J]*. High Voltage Engineering, 2008. **7**.
66. Dwight, H., *Calculation of resistances to ground*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1936. **55**(12): p. 1319-1328.
67. Martinez-Velasco, J.A., *Power system transients: parameter determination*. 2017: CRC press.
68. Moreno, P., et al., *Nonuniform transmission tower model for lightning transient studies*. IEEE transactions on power delivery, 2004. **19**(2): p. 490-496.
69. Naredo, J.L., et al. *Frequency independent representation of transmission lines for transient analysis through the method of characteristics*. in *Proceedings. Joint International Power Conference Athens Power Tech*. 1993. IEEE.
70. Ishii, M., et al., *Multistory transmission tower model for lightning surge analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991. **6**(3): p. 1327-1335.
71. Yamada, T., et al., *Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis*. IEEE transactions on power delivery, 1995. **10**(1): p. 393-402.
72. Huangfu, Y., et al., *Modeling and insulation performance analysis of composite transmission line tower under lightning overvoltage*. IEEE Transactions on Magnetics, 2015. **51**(3): p. 1-4.
73. Paul, C.R., *Analysis of multiconductor transmission lines*. 2007: John Wiley & Sons.
74. Zeng, R., et al., *Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization*. IEEE Transactions on power delivery, 2008. **23**(2): p. 667-675.
75. Meliopoulis, A.S., *Power system grounding and transients: an introduction*. 2017: Routledge.
76. Sunde, E.D., *Earth conduction effects in transmission systems*. 1949: Dover Publications Inc.

9. Annexes

Annexe 1 : Grille de malt-Pipeline



Annexe 2 : Pylône-Grille de malt-Pipeline

