

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° :/2024

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Electrotechnique

SPECIALITE : Réseau Electrique

Thème

**Analyse Des Surtensions Transitoires Dans Les Lignes De
Transmission Non-Parallèles**

Présenté par :

Boukhari Wail Abdelkrim

Zine Mahmoud

Encadré par :

Dr. Khelifi Bochra

Date De Soutenance : 30/06/2024

Jury de Soutenance

Président : Mellit Mohamed

Grade : Pr.

Univ MSB Jijel

Encadreur : Khelifi Bochra

Grade : M. C. B.

Univ MSB Jijel

Examineur : Mekhlouf Chouki

Grade : M. C. B.

Univ MSB Jijel

Promotion : 2023 /2024

Résumé

Dans ce projet de fin d'études, l'étude se concentre sur l'interaction électromagnétique entre deux lignes monofilaires non parallèles. L'électricité est essentielle à notre vie quotidienne, mais les infrastructures électriques sont vulnérables aux surtensions, notamment celles causées par la foudre, pouvant endommager gravement les équipements et l'isolement des lignes de transmission. L'expansion des réseaux électriques a conduit à des lignes de transport proches les unes des autres, créant des défis pour la conception et la gestion du réseau, notamment en termes d'interférences électromagnétiques et de courants induits entre lignes voisines ou câbles enterrés.

Mots clé : Électricité, Surtensions, Foudre, Réseaux électriques, Lignes de transmission.

Abstract

In this thesis project, the focus is on the electromagnetic interaction between two non-parallel monofilament lines. Electricity is essential to our daily lives, but electrical infrastructures are vulnerable to surges, especially those caused by lightning, which can severely damage equipment and the insulation of transmission lines. The expansion of electrical networks has led to closely spaced transmission lines, posing challenges for network design and management, particularly in terms of electromagnetic interference and induced currents between adjacent lines or buried cables.

Keywords: Electricity, Surges, Lightning, Electrical Networks, Transmission Lines.

المخلص

في هذا مشروع نهاية الدراسات، يركز البحث على التفاعل الكهرومغناطيسي بين خطين أحاديين غير متوازيين. الكهرباء أساسية لحياتنا اليومية، ولكن البنية التحتية الكهربائية عرضة للتيارات الزائدة، خاصة تلك التي تسببها الصواعق، مما يمكن أن يتسبب في تلف شديد للمعدات وعزل خطوط النقل. توسع الشبكات الكهربائية أدى إلى اقتراب خطوط النقل من بعضها البعض، مما يخلق تحديات في تصميم وإدارة الشبكة، خاصة فيما يتعلق بالتداخلات الكهرومغناطيسية والتيارات المستحثة بين الخطوط المجاورة أو الكوابل المدفونة.

الكلمات المفتاحية : كهرباء، تيارات زائدة، صواعق، شبكات كهربائية، خطوط نقل.

Remerciements...

Nous tenons à remercier en premier lieu Dieu le tout puissant de nous avoir donné le souffle et l'aptitude et la santé et la volonté pour mener à terme ce travail

C'est avec un grand plaisir que nous réservons ces lignes en signe de gratitude et reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail

*Nous remercions particulier à notre encadreur Mme **KHELIFI BOUCHRA** pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité et pour le temps qu'elle ma consacré durant nous préparation de ce mémoire*

*Nous remercions Mme **KAUCHE SANA**, Docteur à l'université de Jijel, pour ces conseils*

Nous remercions vont pour tous toute la promotion 2023/2024, Réseau Electrique.

Dédicace....

A MES CHERS PARENTS

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis lon enfance et
j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours*

*Puis dieu, le très Haut, vous accorder, vous santé, bonheur et longue vie et faire en sorte
que jamais je ne vous déçoive*

A LA MEMOIRE DE MES GRANDS PARENTS

*J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que dieu ait votre âme dans sa sainte
miséricorde*

A MES CHERS ET ADORABLE FRERES ET SŒURS

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance
je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous
protégé et vous gardes*

A MES CHERS TANTES

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération
pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être*

Zine Mahmoud

Dédicace....

A MES CHERS PARENTS

À mon père, Boukhari Rabah, pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et sa patience infinie. Ta sagesse et ton dévouement ont été une source constante de motivation et d'inspiration tout au long de mon parcours académique.

À ma mère, Boukhari Malika, pour son amour inconditionnel, sa compréhension et ses encouragements constants. Ta bienveillance et ta confiance en moi ont été les piliers sur lesquels j'ai construit ma réussite.

Merci pour votre amour, votre soutien et vos sacrifices. Ce travail est le fruit de vos efforts autant que des miens. Je vous en suis éternellement reconnaissant.

A MES CHERS ET ADORABLE FRERES ET SŒURS

Je vous exprime toute mon affection fraternelle et ma gratitude. Que votre vie soit remplie de bonheur et couronnée de succès. Que Dieu, le Tout-Puissant, veille sur vous et vous protège toujours.

Boukhari Wail Abdelkrim

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

I. Introduction.	3
II. Structure d'un réseau électrique.....	3
II.1 La production.....	4
II.2 Transport d'énergie électrique.....	5
II.3 Distribution.	6
III. Topologies des réseaux électriques.	6
III.1 Réseau maillé.....	6
III.2 Réseau bouclé.....	6
III.3 Réseau radial.....	6
III.4 Réseau arborescent.....	7
IV. Constitution du réseau.....	7
IV.1. Poste Electrique.....	7
IV.2. Les lignes électriques.....	13
IV.2.1 Types de lignes.....	14
V. Les surtensions.....	21
V.1. Définition.....	21
V.2. Origine des surtensions.....	21
V.2.1 Surtension d'origine interne.....	21
V.2.1.1 Surtensions de manœuvres.....	22
V.2.1.2 Surtension due à la coupure d'un courant inductif.....	23
V.2.1.3 Surtension due à la coupure d'un courant capacitif.....	23
V.2.1.4 Surtension provoquée par un défaut d'isolement.....	24
V.2.1.5 Surtensions par ferro-résonance.....	24
V.2.1.6 Surtension temporaire due à l'alimentation d'une ligne ouverte	

(effet Ferranti).....	24
V.2.2 Surtension d'origine externe: Surtension de foudre.....	25
V.3. Effets des surtensions.....	27
VI. Coordination de l'isolement dans une installation électrique.....	28
VI.1 Différents isolements et types d'isolation.....	28
VII. Etat de l'art.....	30
Références Bibliographiques.....	31

Chapitre II : MODELISATION DES LIGNES DE TRANSMISSION NON PARALLELES

I. Introduction	33
II. Ligne de transmission uniforme.....	33
III. Les lignes de transmission non uniforme.	34
III.1 Cas des lignes de transmission non parallèle au-dessus d'un sol parfaitement conducteur	35
III.2 Cas des lignes de transmission non parallèle au-dessus d'un sol de conductivité finie.....	40
III.3 Cas d'une ligne de transmission aérienne et un câble simplement isolé enterré Non parallèles.....	44
IV. Expressions analytiques pour une étude directement en temporel.....	47
V. Equation exprimée par FDTD.....	50
Références Bibliographiques.....	55

Chapitre III : APPLICATIONS

I. Introduction.	58
II. Paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles....	58
II.1. Validation des paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles pour un sol parfaitement conducteur.....	58
II.2. Les paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles pour un sol de conductivité finie.....	61

II.3. Les paramètres linéiques d'un système de lignes de transmission non parallèles constitué d'un conducteur aérien et d'un câble enterré.	62
III. Analyses des régimes transitoires.....	65
III.1 Analyse de l'interaction électromagnétique entre deux conducteurs aériens.....	65
III.2 Analyse de l'interaction électromagnétique entre un conducteur aérien et un câble enterré.....	69
IV. Conclusion	73
Références Bibliographiques.....	74
Conclusion Générale.....	75

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité fait partie intégrante de notre vie. Cette dépendance impose aux entreprises de production et de transport de l'énergie électrique un service permanent, surtout en ce qui concerne les infrastructures stratégiques. Une interruption de l'alimentation peut leur causer des dégâts irréversibles. Les ouvrages de transport d'énergie électrique (ligne, câble et poste de transformation) peuvent être assujettis à des surtensions de toute nature, ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolement des lignes de transmission et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique. Les chercheurs dans le domaine ont été toujours confrontés à la foudre qui est un phénomène perturbateur important sur la gamme de puissance et tous les niveaux de tension. Les surtensions de foudre sont les plus difficiles et les plus contraignantes que subissent le réseau électrique.

Avec l'expansion des réseaux électriques et en raison des contraintes spatiales, les lignes de transport se trouvant à proximité les unes des autres sont devenues inévitables.

Lorsque des lignes de transmission électrique se croisent spatialement, cela peut poser plusieurs contraintes et défis pour la conception et la gestion du réseau électrique.

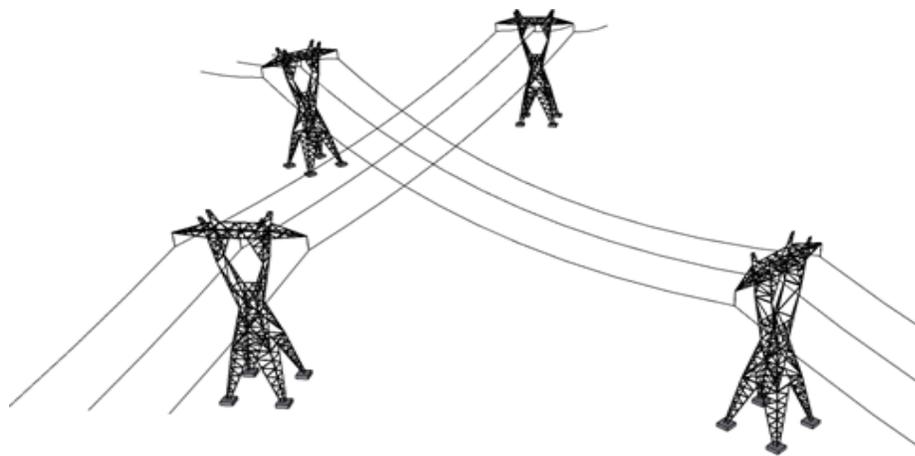


Figure : Croisement entre deux lignes de transmission

Les surtensions transitoires sur une ligne de transmission peuvent créer des interférences électromagnétiques et des courants induits sur les autres lignes voisines ou sur les câbles enterrés à proximité.

Le travail, présenté dans le cadre de ce projet de fin d'études, consiste à l'étude de l'interaction électromagnétique entre deux lignes monofilaires non parallèles.

Nous proposons une modélisation qui nous permettent la prise en compte directe du couplage électromagnétique entre l'émetteur (ligne aérienne) soumis à une surtension externe (impact direct d'un coup de foudre) et le récepteur (ligne aérienne ou un câble enterré).

Afin de bien mener cette étude, nous avons structuré notre travail en trois chapitres : Le premier chapitre donne une idée générale sur l'organisation d'un réseau de transport d'énergie électrique et les équipements qui le constituent. Ensuite nous avons exposé les différentes surtensions qui peuvent perturber le bon fonctionnement des réseaux électriques où on a précisé leurs origines et leurs effets sur ces derniers.

Dans le second chapitre nous exposons les différentes expressions de l'impédance et l'admittance des lignes de transmission non parallèles et nous présentons par la suite la résolution des équations des lignes en utilisant la technique du « Vector Fitting », de la convolution récursive et de la méthode numérique dite FDTD.

Enfin, nous proposons au dernier chapitre des validations et quelques applications pour montrer l'intérêt, les avantages et les possibilités offertes par ce modèle pour l'analyse des perturbations électromagnétiques transitoires dans les lignes de transmission non parallèle. Nous terminons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES
RESEAUX ELECTRIQUES

I. Introduction

Ce travail de master est consacré à l'identification des perturbations électromagnétiques dans le réseau électrique. Nous nous intéressons particulièrement à l'analyse des perturbations transitoires dans les lignes de transmissions non parallèles.

Dans ce premier chapitre, nous introduisons très brièvement quelques notions propres au réseau électrique (sa structure, matériels utilisés dans les réseaux électriques...) Ensuite, nous rappelons les différents types de surtensions, leurs causes et leurs effets sur les systèmes électriques.

II. Structure d'un réseau électrique

Les réseaux électriques sont les infrastructures qui permettent d'acheminer l'énergie électrique des installations de production jusqu'aux installations de consommation. Généralement les réseaux utilisent le courant alternatif triphasé sinusoïdal à la fréquence de 50 Hz. Le réseau électrique est exploité à différents niveaux de tension et organisé en fonction de ces derniers.

Le réseau électrique peut être constitué en quatre parties essentielles :

- La production d'énergie électrique.
- Le transport et la répartition.
- La distribution.
- La consommation.

Un schéma simplifié du réseau électrique global et de ses sous-systèmes est illustré dans la figure I.1.

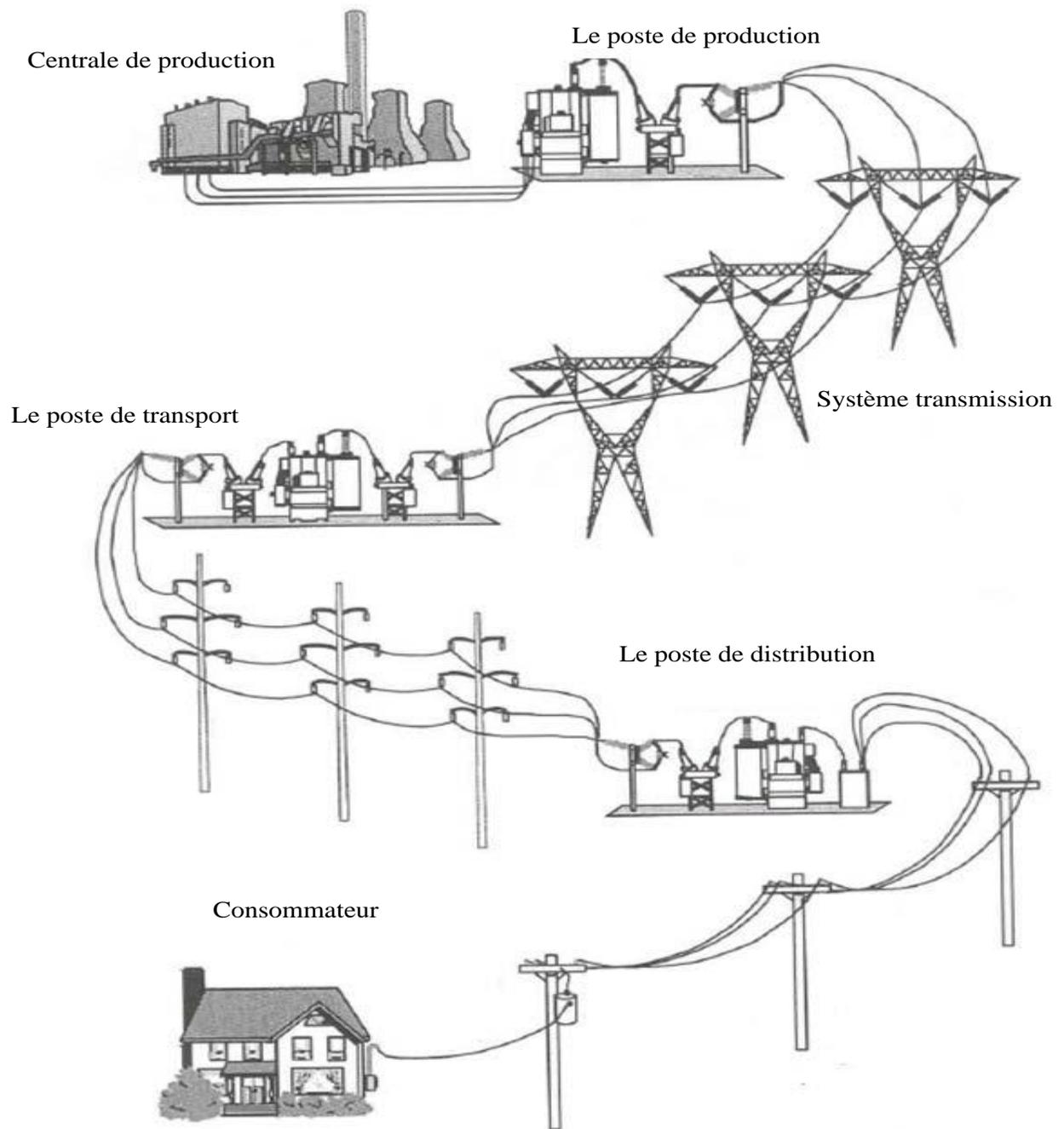


Figure I.1. Structure générale d'un réseau électrique [I.1].

II.1 La production

La production d'électricité est assurée par les centrales de production, qui constituent l'élément fondamental de l'organisation des moyens de production énergétique. Ces centrales peuvent regrouper sur un même site plusieurs unités de production, appelées tranches, souvent de même technologie et puissance. Chaque unité de production est

composée d'une turbine ou d'un moteur, associé à un alternateur pour générer de l'énergie électrique à courant alternatif [I.2]. La plupart des turbines sont actionnées par la vapeur produite dans une chaudière alimentée par divers combustibles tels que le charbon, le gaz naturel ou le nucléaire. D'autres centrales utilisent des sources non-thermiques comme les barrages hydroélectriques ou les éoliennes pour entraîner les turbines. Les générateurs produisent des tensions entre phases allant de 11 à 30 KV.

Les centrales de production sont classées selon leur technologie, c'est-à-dire selon leurs sources d'énergie primaire. On distingue ainsi les centrales thermiques à flamme, les centrales nucléaires, les centrales hydrauliques et les centrales éoliennes [I.2].

II.2 Transport d'énergie électrique

L'électricité est acheminée depuis les centres de production vers les zones de consommation à travers un vaste réseau de lignes électriques s'étendant sur des milliers de kilomètres [I.3]. Ce réseau comprend deux principales composantes : le réseau de grand transport et d'interconnexion, et les réseaux de répartition.

Le réseau de grand transport et d'interconnexion relie les centres de production aux zones de consommation, et facilite également les échanges d'électricité entre différents pays. En favorisant le secours mutuel entre les nations, il renforce la sécurité des systèmes électriques à l'échelle européenne. Sa structure maillée garantit la continuité de l'alimentation en cas de défaillance d'une liaison et permet d'optimiser l'utilisation des différentes sources de production, en appelant en priorité les moins coûteuses pour la production de base et en ajustant les moyens de production en fonction des besoins [I.3].

Les réseaux de répartition sont chargés de distribuer l'énergie sur des distances plus courtes. Ils fonctionnent à des tensions plus basses, généralement en très haute tension (225 kV) et haute tension (90 kV et 63 kV). Ces réseaux, comparables aux routes nationales dans le réseau routier, ont pour objectif principal de transporter l'électricité du réseau de transport vers les principaux centres de consommation. Ces centres peuvent être soit du domaine public, avec l'accès au réseau de distribution à haute tension, soit du domaine privé, avec un accès direct pour les gros consommateurs livrés à haute tension [I.4].

II.3 Distribution

Les réseaux de distribution acheminent l'électricité depuis le réseau de répartition ou de transport vers les clients résidentiels et les petites industries. Les tensions varient entre 230V et 400V pour la basse tension, et de 4kV à 45kV pour la moyenne tension. La structure des réseaux de distribution est principalement radiale, bien que certains pays disposent de configurations maillées permettant une exploitation en boucle fermée [I.5].

III. Topologies des réseaux électriques

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : le niveau de fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrés sur la figure I.2.

III.1 Réseau maillé

L'utilisation de cet arrangement particulier est largement adoptée dans les réseaux de transport. Les postes d'interconnexion établissent des connexions entre chaque centre de production via des lignes haute tension (THT), entraînant la formation d'un réseau maillé. Si cette configuration améliore la fiabilité, elle nécessite une surveillance au niveau national, voire continental [I.6].

III.2 Réseau bouclé

Cette topologie est principalement utilisée dans les réseaux de répartition et de distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT, alimentés à partir du réseau THT, sont interconnectés pour former des boucles, augmentant ainsi la disponibilité. Toutefois, il est important de souligner que tous les réseaux MT ne sont pas nécessairement bouclés [I.6].

III.3 Réseau radial

Cette configuration est couramment utilisée dans la distribution MT et BT. Elle se compose d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT, qui sont à leur tour alimentés par un poste source HT ou MT. En moyenne tension, cette structure est souvent alimentée des deux côtés pour garantir la disponibilité [I.6].

III.4 Réseau arborescent

Ce schéma est largement adopté en milieu rural et parfois en milieu urbain où la sensibilité aux interruptions de charge est moindre. Il comprend un poste de répartition alimentant plusieurs postes de distribution (BT) via des dérivations à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT [I.6].

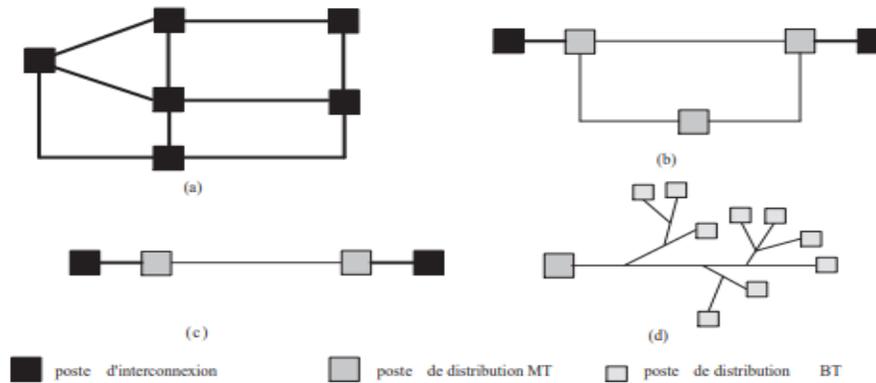


Figure I.2. Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b). Réseau bouclé, (c). Réseau radial, (d). Réseau arborescent.

IV. Constitution du réseau

Le réseau est composé de lignes aériennes, de câbles souterrains et de postes électriques, qui opèrent à différents niveaux de tension.

IV.1 Poste Electrique

Un poste électrique est un composant essentiel du réseau électrique, utilisé à la fois pour la transmission et la distribution de l'électricité. Il joue un rôle crucial dans l'élévation de la tension électrique pour la transmission à longue distance, ainsi que dans sa réduction pour répondre aux besoins de consommation des utilisateurs, qu'ils soient résidentiels ou industriels. Les postes électriques sont installés aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution, et sont également appelés sous-stations [I.7].

Selon la définition de la Commission Electrotechnique Internationale [I.8], un poste électrique est la « partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments et, éventuellement, des transformateurs ».



Figure I.3. Poste électrique.

Les postes électriques sont principalement chargés de trois fonctions essentielles [I.7] :

- Le raccordement d'un tier au réseau d'électricité (aussi bien consommateur que producteur) ;
- L'interconnexion entre les différentes lignes électriques (assurer la répartition de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste) ;
- La transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.

Il existe plusieurs types de postes électriques [I.7] :

- **Postes de sortie de centrale** : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau ;
- **Postes d'interconnexion** : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques ;
- **Postes élévateurs** : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur ;
- **Postes de distribution** : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

L'aspect des postes électriques varie fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'une enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent.

Les postes contiennent un certain nombre d'appareils électriques qui participent au bon fonctionnement du réseau : 1. Ligne électrique primaire 2. Câble de garde 3. Ligne électrique 4. Transformateur de tension 5. Sectionneur 6. Disjoncteur 7. Transformateur de courant 8. Parafoudre 9. Transformateur (de puissance) 10. Bâtiment secondaire 11. Clôture 12. Ligne électrique secondaire

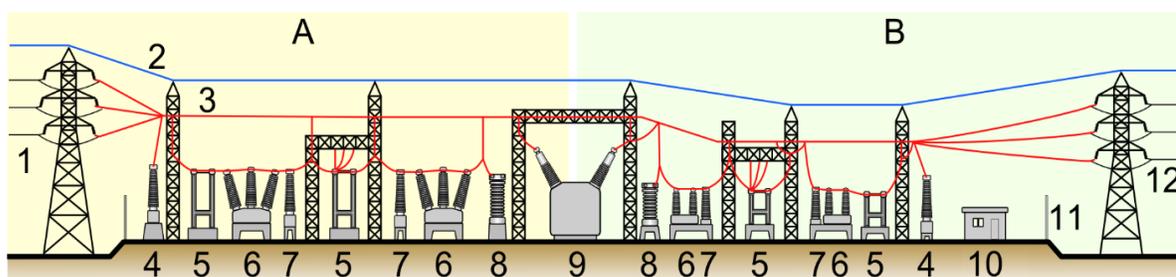


Figure I.4. Composants électriques dans un poste (A: côté primaire B: côté secondaire) [I.7].

- **Transformateurs de puissance** : Ils ajustent la tension électrique soit vers le haut, par exemple de 20 kV à 400 kV à la sortie des centrales, soit vers le bas, comme de 63 kV à 20 kV pour fournir de l'énergie aux réseaux de distribution.



Figure I.5. Transformateurs de puissance.

- **Transformateurs de mesure (courant et tension) :** Ces dispositifs sont employés afin de faciliter la mesure de la tension ou du courant lorsque ces grandeurs dépassent les capacités de mesure directe. Leur fonction consiste à transformer la tension ou le courant de manière proportionnelle et sans déphasage. Ils sont conçus pour fournir l'alimentation nécessaire à des équipements tels que des appareils de mesure, des compteurs, des relais et d'autres dispositifs analogues.



(a) Transformateur de courant (b) Transformateur de tension

Figure I.6. Transformateurs de mesure.

- **Disjoncteurs :** Les disjoncteurs assurent la protection du réseau en prévenant d'éventuelles surcharges provoquées par des courants de défaut, tels que ceux causés par la foudre ou les amorçages avec des branches d'arbre. Ils accomplissent cela en mettant sous ou hors tension des segments spécifiques du circuit.



Figure I.7. Disjoncteurs.

- **Sectionneurs** : Ils sont chargés d'effectuer la coupure visible d'un circuit électrique et de diriger le courant à l'intérieur du poste.



Figure. I.8. Sectionneurs.

- **Jeux de barres** : En distribution électrique, un jeu de barres se réfère à un conducteur en cuivre ou en aluminium qui transporte l'électricité à l'intérieur d'un tableau électrique, d'un appareillage électrique ou d'un poste électrique. Ces jeux de barres sont généralement constitués de barres plates ou de tubes, et sont reconnus comme des conducteurs à faible impédance permettant de connecter plusieurs circuits électriques à différents points.



Figure.I.9. Jeux de barres.

- **Isolateurs** : Les isolateurs assurent une isolation électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Ils sont disposés en chaîne, dont la longueur varie en fonction du niveau de tension: environ 6 isolateurs sont nécessaires pour 63 kV, 9 pour 90 kV, 12 pour 225 kV et 19 pour une très haute tension de 400 kV. En plus de leur rôle électrique, la chaîne

d'isolateurs offre une résistance mécanique, devant supporter les contraintes exercées par les conducteurs sous l'effet du vent, de la neige ou du givre.

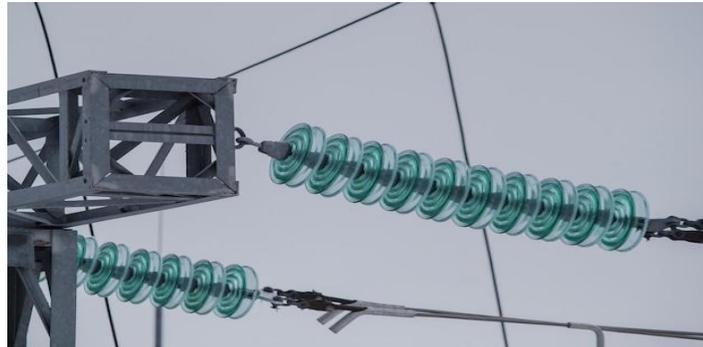


Figure I.10. Isolateurs.

En plus de leur rôle de transformation, les postes facilitent la connexion entre les divers réseaux électriques, permettant ainsi le transfert efficace de l'énergie des sites de production vers les points de consommation. De plus, équipés d'un appareillage électrique avancé, les postes sont capables de détecter et de résoudre rapidement les incidents tels que les courts-circuits, souvent en moins d'une seconde, qu'ils se produisent sur les lignes ou à l'intérieur du poste lui-même.

- **Parafoudres** : Les parafoudres sont conçus pour limiter les surtensions qui affectent les transformateurs, les instruments et les équipements électriques, causées par la foudre et les opérations de commutation. La partie supérieure du parafoudre est connectée à l'un des fils de la ligne à protéger, tandis que la partie inférieure est reliée à la terre via une mise à la terre à faible résistance, généralement inférieure à un ohm.



Figure I.11. Parafoudre

- **Eclateurs** : L'éclateur est un dispositif rudimentaire composé de deux électrodes, dont l'une est connectée au conducteur à protéger et l'autre à la terre. Placé dans le réseau, l'éclateur crée un point vulnérable pour l'évacuation des surtensions vers la terre, assurant ainsi la protection du matériel.



Figure I.12. Eclateur

IV.2 Les lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolant et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les lignes électriques sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituées d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différents des pertes joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terna. Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre... etc...

Un pylône électrique peut supporter plusieurs ternes. Les pylônes sont soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Ils supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie [I.9].

Le genre ou le type de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants :

- ✓ Puissance active à transporter.

- ✓ Distance de transport.
- ✓ Cout.
- ✓ Esthétique, l'encombrement et la facilité d'installation.

Nous distinguons quatre types de ligne :

- **Lignes de distribution basse tension (BT)** : Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes. etc.
- **Lignes de distribution à moyenne tension (MT)** : ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.
- **Lignes de transport à haute tension (HT)** : ce sont les lignes qui relient les postes de transformation principaux aux centrales de génération.
- **Lignes de transport à très haute tension (THT)**: ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV.

IV.2.1 Types de lignes

Les deux types principaux de lignes sont les lignes aériennes et les câbles souterrains.

Dans les zones rurales et pour le transport à haute et très haute tension, on utilise normalement des lignes aériennes. Les réseaux urbains (à moyenne et basse tension) on utilise les câbles pour des raisons de sécurité et d'esthétique [I.10].

- **Les lignes aériennes**

Une ligne aérienne est un élément du réseau électrique destiné à transporter l'énergie électrique entre deux ou plusieurs de ses nœuds. La notion de ligne est générale, aussi bien dans son utilisation que dans sa construction. Elle est utilisée pour le transport, l'alimentation et la distribution de l'énergie électrique ; ainsi que pour l'interconnexion des réseaux régionaux et inter territoriaux. Par ligne aérienne (ou en câble) on sous-entend une installation qui intègre dans sa construction un ensemble de composants.

En effet, une ligne aérienne est composée essentiellement par les éléments suivants :

- Le conducteur,
- L 'isolateur,

- Fil de garde (protection contre la foudre),
- Les pylônes et leur fondation,
- Autres éléments comme poteaux intermédiaires, moyens de fixation et de suspension, installation de protection contre la foudre.

✓ Les conducteurs

Les conducteurs des lignes aériennes à très haute tension sont toujours nus. On emploie presque exclusivement des câbles en cuivre et des câbles en aluminium avec âme en acier, ces derniers sont généralement les plus économiques. Pour le domaine de la THT, le mode d'utilisation des conducteurs est identifié selon des causes technico-économiques pour remédier à plusieurs phénomènes, qu'ils sont souvent rencontrés en vue le transport de l'énergie électrique, comme les pertes par effet couronne, les pertes réactives de la ligne, les pertes par effet Joules...etc.

Afin de réduire l'effet couronne par exemple, il est préférable d'utiliser la technologie des lignes en faisceau de conducteurs. Le faisceau est composé de 2, 3 ou 4 conducteurs (figure I.12). Parmi les effets de l'utilisation des faisceaux, l'augmentation de rayon équivalent de la phase et la réduction de l'intensité du champ électrique aux alentours du conducteur. « L'avantage le plus important de l'utilisation du faisceau de conducteurs est la réduction de la réactance de la ligne et des pertes par effet couronne » [I.11].

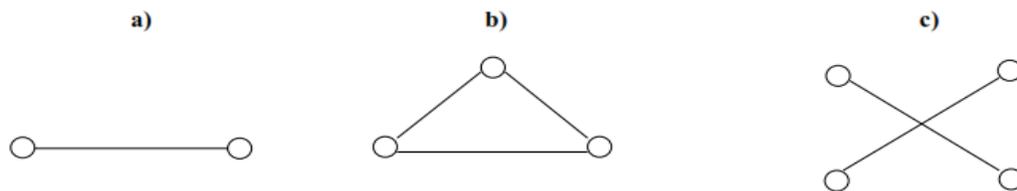


Figure I.13. Conducteur en faisceau.

Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques: température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur, hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc. Le choix de ces paramètres à une grande influence sur les coûts de

construction et d'entretien d'une ligne de transport, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité.

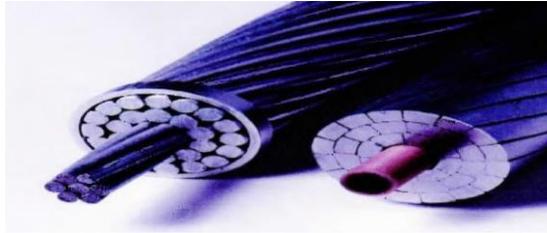


Figure I.14. Conducteur en brins toronnés.

✓ Isolateurs

Les isolateurs sont des éléments constitutifs de la ligne électrique fixé sur le pylône servent à supporter et à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et de la terre.

type de ligne	230/400 (420) kV	130/225 (245) kV	52/90 (100) kV	36/63 (72,5) kV	12/20 (24) kV	230/400 V
appellation	400 kV	225 kV	90 kV	63 kV	15 kV ou 20 kV	400 V
classification ²⁷	THT (HTB transport national)		HT (HTB transport régional)		MT (HTA distribution)	BT (consommation)
nombre d'isolateurs ²⁸	19	12 à 14	9	4 à 6	2 à 3	1
illustrations						

Figure I.15. Différents types d'isolateurs [I.12].

✓ Les câbles de gardes

Les câbles de garde, sont posés au sommet des pylônes en treillis. Ces câbles de gardes protègent les conducteurs d'électricité de la foudre.

Ils relient en outre les pylônes isolés les uns avec les autres et améliorent ainsi la mise à la terre globale de l'ensemble des lignes aériennes.

Malgré leur faible section, ils doivent présenter une sécurité mécanique équivalente à celle des conducteurs en cas de vent violent ou de surcharge de givre ou de neige.

✓ Les supports : poteaux et pylônes

Le rôle des supports (pylônes) est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs.

Selon les matériaux, on distingue les pylônes métalliques, en béton, et en bois. Pour les lignes aériennes haute tension (HT) et très haute tension (THT), des pylônes, habituellement construits en treillis d'acier, soutiennent et maintiennent les conducteurs à une distance adéquate du sol et des obstacles. Cette configuration assure la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant dépourvus d'isolation pour réduire leur poids et leur coût. Cependant, ils sont exposés aux intempéries, tels que les embruns salés, les tempêtes et le poids de la glace, ce qui peut les endommager.



(a) Poteau en bois

(b) Poteau en béton

(c) Pylône en acier

Figure I.16. Supports des lignes aériennes.

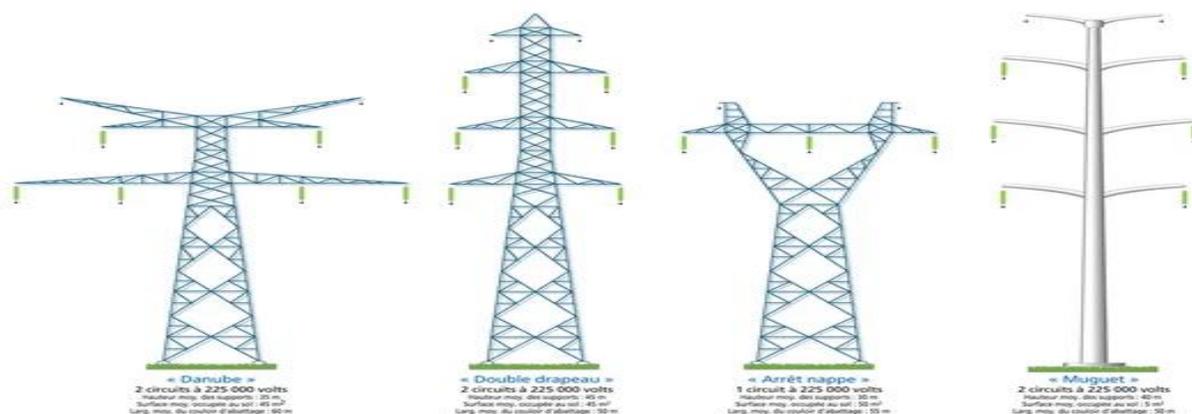


Figure I.17. Différentes configurations d'une ligne triphasée en présence du câble de garde
[I.13].

✓ Les câbles

Un câble électrique peut se définir comme étant constitué par un ou plusieurs conducteurs recouverts chacun de couches isolantes appropriées, l'ensemble étant revêtu d'une gaine de protection commune.

L'énergie électrique est transportée par des câbles qui sont mis en place de trois différentes façons, on trouve :

- Des câbles aériens,
- Des câbles souterrains,
- Des câbles sous-marins.

➤ Câbles aériens

Sont des câbles aériens munis d'une couche isolante et d'un couvercle de protection. Le câble aérien général est un câble unipolaire, dont la structure peut être divisée en structure de fil d'aluminium dur, structure de fil de cuivre dur, structure de fil d'alliage d'aluminium, structure de support d'âme en acier ou en alliage d'aluminium et structure tatouée autoportante à trois âmes (l'âme peut être un fil d'aluminium dur ou un fil de cuivre dur), etc.

➤ Câbles souterrains ou sous-marins

Les câbles isolés souterrains étaient principalement privilégiés, du moins jusqu'à quelques années auparavant, pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones urbaines densément peuplées, notamment aux abords ou à l'intérieur des grandes villes. Parfois, ils étaient également utilisés pour résoudre des problèmes locaux spécifiques, qu'ils soient d'ordre technique ou environnemental, pour lesquels l'installation de lignes aériennes était difficile voire impossible. Cependant, on constate une tendance croissante à l'utilisation des câbles souterrains même en moyenne tension (HTA), y compris dans

Un câble sous-marin est un câble de transport de l'énergie électrique sous la surface de l'eau. Ceux-ci sont appelés « sous-marins » car ils transportent généralement de l'énergie électrique sous l'eau salée (bras de l'océan, mers, détroits, etc.) mais il est également possible d'utiliser des câbles électriques sous-marins sous l'eau douce (grands lacs et rivières). L'importance des câbles électriques sous-marins n'a cessé de croître au cours des dernières décennies. L'avènement des énergies renouvelables offshore nécessite des câbles d'exportation provenant d'installations éoliennes, houlomotrices et marémotrices sont nécessaires pour amener l'énergie renouvelable à terre.

Les câbles unipolaires sont constitués de six parties concentriques, de l'intérieur vers l'extérieur: l'âme (1), l'écran semi-conducteur sur l'âme (2), l'enveloppe isolante (3), l'écran semi-conducteur sur l'enveloppe isolante (4), la nappe de fil et/ou l'écran métallique (5) et la gaine de protection extérieure (6).

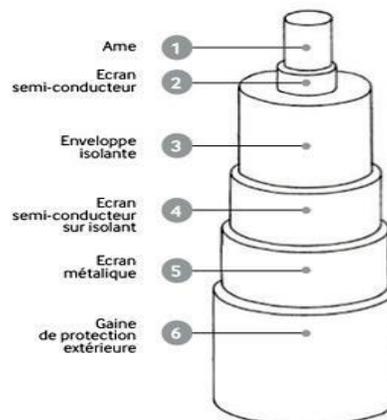
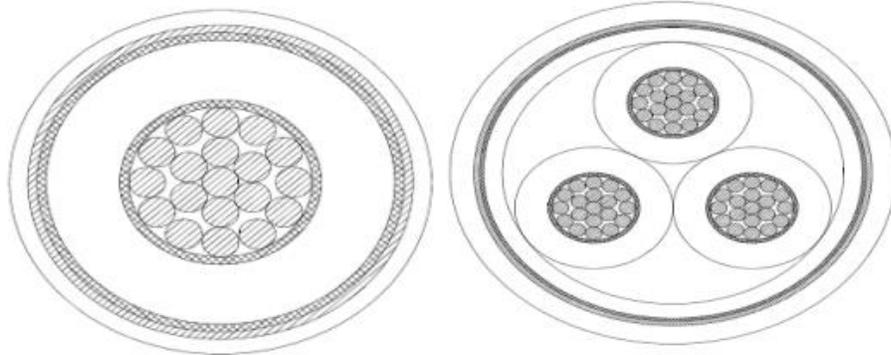


Figure I.18. Composants d'un câble unipolaire.

✓ Classification des câbles souterrains

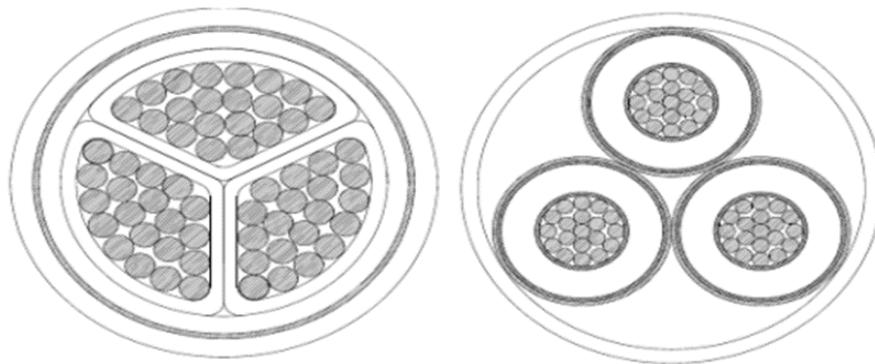
On peut Classifier les câbles électriques souterrains suivants plusieurs critères :

- ❖ Selon la nature des Phases (câble unipolaire ou tripolaire) (figure I.11 a et b).
- ❖ Selon la nature d'isolement (Câble synthétique ou à isolation par XLPE, isolation par papier imprégné).
- ❖ Selon la forme ou la structure (Conducteurs de forme circulaire, ou sectoraux) (figure I.11 c et d)



a) Câbles mono polaires

b) Conducteurs tripolaires à ceinture isolante



c) Forme sectorale tripolaires

d) Forme circulaire sectorale

Figure I.19. Conducteurs de différentes formes [I.14].

V. Les surtensions

V.1 Définition

On définit par phénomène transitoire, l'évolution des surtensions entre deux états de fonctionnement permanent. On qualifie de surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale **[I.15]**. Ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit. Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets. Les perturbations peuvent conduire à :

- ✓ Des interruptions courtes (réenclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes).
- ✓ Des interruptions longues (intervention pour changement d'isolants détruits, voire remplacement de matériel).

V.2 Origine des surtensions

Les surtensions peuvent avoir pour origine:

V.2.1 Surtension d'origine interne [I.16]

Des surtensions dites internes peuvent apparaître à la suite de phénomènes transitoires dans le réseau. Les causes en sont :

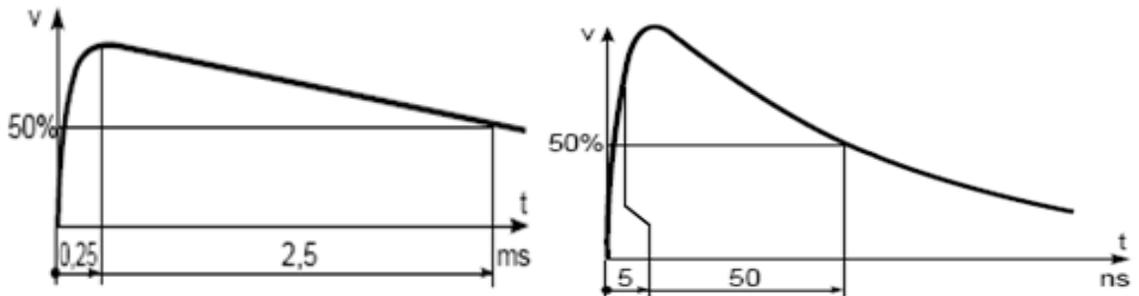
- ✓ Coupure ou enclenchement des circuits, dites surtensions de manœuvre ou surtensions de commutations.
- ✓ Surtension d'amorçage d'arc lors d'un court-circuit monophasé :
 - Amorçage entre enroulement (HT/BT) dans un transformateur.
 - Amorçage entre conducteurs haute tension et les masses du poste de transformation.
 - Amorçage entre canalisations qui se croisent ou sont fixées sur les mêmes supports, alimentées par des tensions différentes.
- ✓ Par ferro-résonance.
- ✓ Mise sous tensions des lignes.

- ✓ Enclenchement et déclenchement des charges.

Les surtensions ont des composantes à la fréquence du réseau et d'autres à des fréquences qui se situent entre 100Hz et 50 kHz.

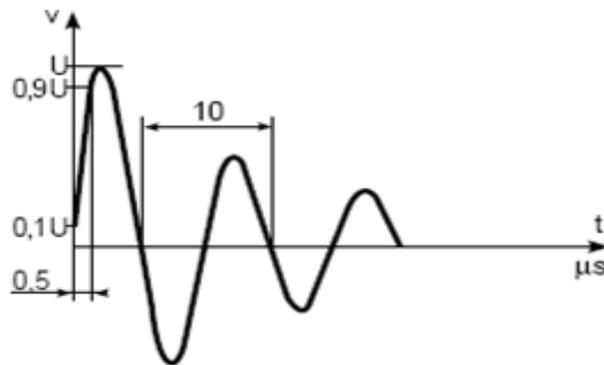
V.2.1.1 Surtensions de manœuvres.

Ce type de surtensions apparaît sur les réseaux électriques subissant des modifications rapides de leurs structures, ces surtensions se propagent en général sous forme d'ondes haute fréquence à amortissement rapide. L'étude statique des surtensions de manœuvre a conduit à la normalisation des ondes représentées sur la figure I.19



a) Onde 250/2500 μ s dite onde longue amortie.

b) Onde 5/50 ns dite onde impulsionnelle récurrente.



c) Onde 0,5 μ s/100 kHz dite onde sinusoïdale amortie.

Figure I.20. Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre.

V.2.1.2 Surtension due à la coupure d'un courant inductif [I.17]

Ces surtensions sont des impulsions de tension apparaissant lors de la commutation (ouverture et fermeture) de circuits comportant des éléments inductifs tels que inductances, enroulements de moteurs ou de transformateurs, ...etc.

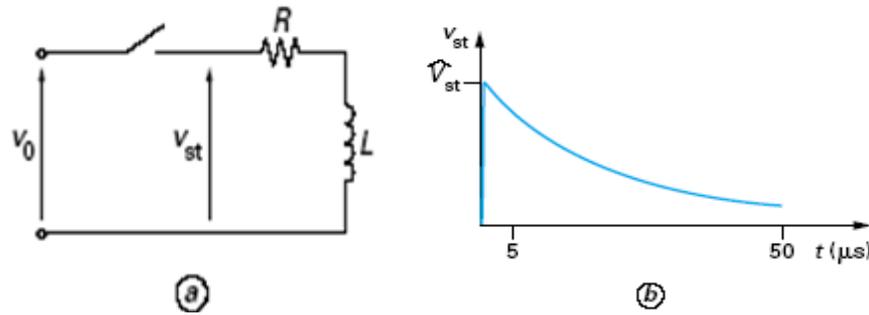


Figure I.21. Forme de décharge inductive due à la coupure d'un circuit avec une inductance.

V.2.1.3 Surtension due à la coupure d'un courant capacitif [I.16]

Les courants capacitifs ont principalement trois origines, les câbles à vide et les lignes aériennes longues, ainsi que les batteries de condensateurs. La coupure des courants capacitifs se fait en principe sans difficulté. En effet, lorsque l'appareil interrompt le courant, des surtensions importantes à fréquence élevée dues à des réamorçages peuvent avoir lieu et remettre en cause la coupure et l'intégrité des installations. De plus, la fermeture de l'appareil sur circuit capacitif génère des phénomènes particuliers.

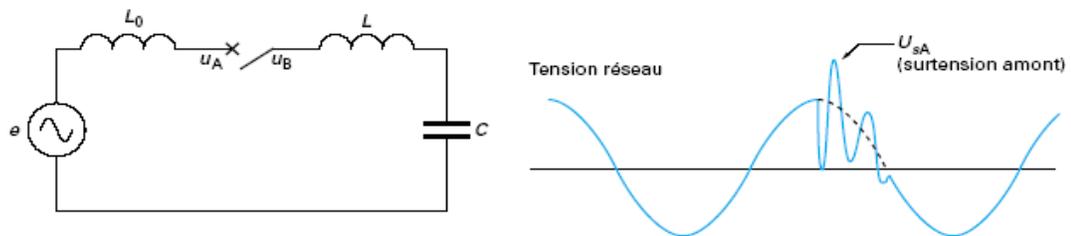


Figure I.22. Forme de la surtension lors du couplage au réseau d'une batterie de condensateurs.

V.2.1.4 Surtension provoquée par un défaut d'isolement

Ces surtensions prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre une phase et terre, dans le cas d'un réseau triphasé à neutre isolé de la terre la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport à la terre, à la tension composée $U = \sqrt{3}V$.

V.2.1.5 Surtensions par ferro-résonance

La ferrorésonance est un phénomène de résonance non linéaire qui peut affecter les réseaux de transport et de distribution de l'électricité. Elle désigne tous les phénomènes oscillatoires, le plus souvent périodiques, qui se manifestent dans un circuit électrique composé d'une part d'une ou de plusieurs inductances non linéaires (comportant des matériaux ferromagnétiques saturables) et d'autre part d'un réseau comprenant au moins une capacité alimentée par une ou plusieurs sources de tensions généralement sinusoïdales.

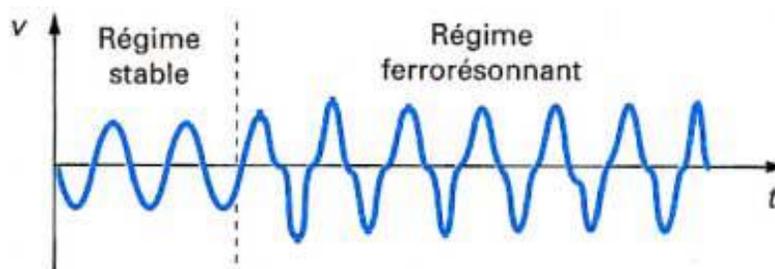


Figure I.23. Régime ferrorésonnant dans un poste en piquage sur un terne d'une ligne à double terne [I.18].

V.2.1.6 Surtension temporaire due à l'alimentation d'une ligne ouverte (effet Ferranti).

Les manœuvres de réseau qui engendrent les surtensions temporaires dues à l'effet Ferranti sont toutes celles qui conduisent une ligne à être ouverte à une extrémité alors que l'autre reste alimentée. On peut citer :

- **L'enclenchement ou le réenclenchement de ligne ouverte en extrémité** : c'est le cas à chaque enclenchement mais, en général, on connecte une charge très rapidement après.
- **La perte de charge** : cette situation se rencontre en réseau lorsque, à la suite d'un défaut ou d'une manœuvre intempestive, le disjoncteur d'une des extrémités de la ligne

ouvre en triphasé ; une telle situation peut d'ailleurs entraîner elle-même des surtensions temporaires, se cumulant à l'effet Ferranti.

V.2.2 Surtension d'origine externe: Surtension de foudre

La foudre est une décharge électrique violente d'origine atmosphérique qui se développe entre un nuage et la terre, en un ou plusieurs coups.

L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100kA et plus), Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolation des lignes de transmission et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique.

Donc la foudre est un phénomène électrique à haute fréquence qui produit des surtensions sur tous les éléments conducteurs et particulièrement sur les câblages et les équipements électriques.

Les éclairs produisent une énergie électrique impulsionnelle extrêmement importante :

- De plusieurs milliers d'ampères (et de plusieurs milliers de volts).
- De haute fréquence (de l'ordre du mégahertz).
- De courte durée (de la microseconde à la milliseconde).

La forme normalisée de l'onde de choc de foudre est représentée à la figure I.23.

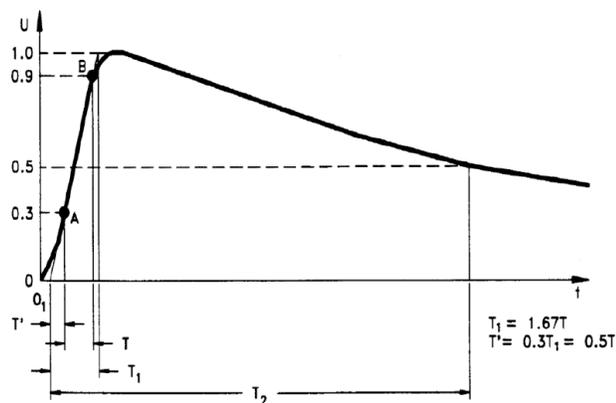


Figure I.24. Choc de foudre normalisé.

➤ **L'origine des surtensions de la foudre :**

- **La foudre sur les lignes aériennes :** En touchant une ligne, la foudre crée une onde de courant de plusieurs milliers d'Ampères qui provoque une surtension sur les appareils raccordés à la ligne.
- **La foudre sur la terre :** En touchant le sol, la foudre provoque une remontée de potentiel électrique de la terre qui entraîne des surtensions dans les câbles souterrains et les prises de terre.
- **La foudre par rayonnement :** Le champ électromagnétique créé par la foudre (plusieurs milliers de Volts par mètre à plus d'un kilomètre de son point d'impact) crée des surtensions sur les équipements électriques qui sont à plusieurs kilomètres autour du point de chute.

➤ **Types de coup de foudre**

- **Le coup de foudre direct**

La décharge frappe directement sur un ou plusieurs conducteurs de phase, elle se manifeste par injection dans le linge d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA, celle-ci peut faire fondre les conducteurs, en se propageant de part et d'autre de point d'impact et provoque une augmentation de la tension U donnée par la formule ci-dessous.

$$U(t) = z_c * I_f / 2$$

z_c : impédance caractéristique de la ligne considérée.

I_f : courant injecté.

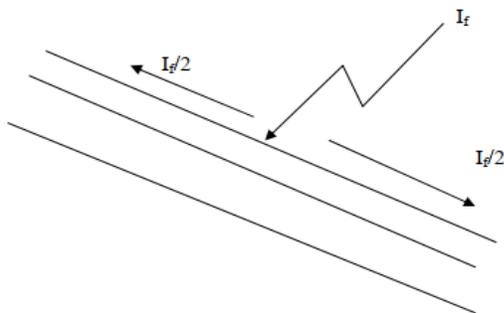


Figure I.25. Schéma d'un coup de foudre direct.

- **Le coup de foudre indirect**

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs kilomètres. La surtension correspondante peut atteindre des centaines de kV.

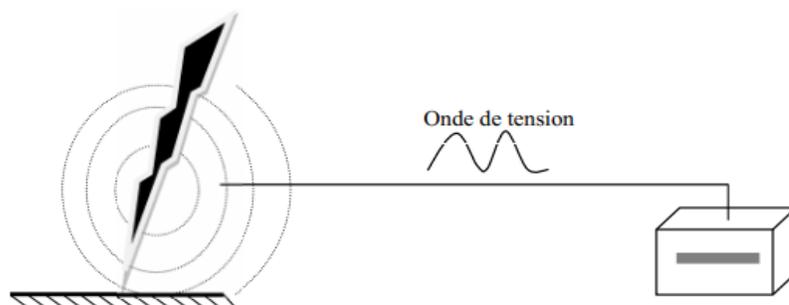


Figure I.26. Coup de foudre indirect.

V.3. Effets des surtensions

Les surtensions dans les réseaux électriques provoquent des dégradations du matériel, une baisse de la continuité de service et un danger pour la sécurité des personnes.

Les conséquences peuvent être très diverses suivant la nature des surtensions, leur amplitude et leur durée. Elles sont résumées dans ce qui suit :

- Claquage du diélectrique isolant des équipements dans le cas où la surtension dépasse leur tenue spécifiée.
- Dégradation du matériel par vieillissement, causé par des surtensions non destructives mais répétées.
- Perte de l'alimentation suite aux coupures longues causées par la destruction d'éléments du réseau
- Perturbation des circuits de contrôle- commande et de communication à courants faibles par conduction ou rayonnement électromagnétique.
- Contraintes électrodynamiques (destruction ou déformation de matériel) et thermiques (fusion d'éléments, incendie, explosion) causées essentiellement par les chocs de foudre.

- Danger pour l'homme et les animaux suite aux élévations de potentiel et à l'apparition des tensions de pas et de toucher.

VI. Coordination de l'isolement dans une installation électrique

La coordination de l'isolement d'une installation consiste à déterminer les caractéristiques d'isolement nécessaires aux divers constituants du réseau, en vue d'obtenir une tenue homogène aux tensions normales, ainsi qu'aux différentes surtensions, pour ensuite pouvoir choisir les matériels de l'installation et les dispositifs de protection. Son but final est de permettre une distribution de l'énergie électrique sûre et optimisée, qui permet de trouver le meilleur rapport économique entre les différents paramètres dépendant de cette coordination **[I.19]**:

- ✓ Coût de l'isolement du matériel
- ✓ Coût des protections contre les surtensions
- ✓ Coût des défaillances (perte de l'exploitation et destruction de matériel), tenant compte de leur probabilité d'occurrence.

S'affranchir des effets néfastes des surtensions suppose une première démarche : s'attaquer à leurs phénomènes générateurs, tâche qui n'est pas toujours simple. En effet si, à l'aide de techniques appropriées, les surtensions de manœuvre de l'appareillage peuvent être limitées, il est impossible d'agir sur la foudre.

Il est donc nécessaire de localiser le point de plus faible tenue par lequel s'écoulera le courant engendré par la surtension, et de doter tous les autres éléments du réseau d'un niveau de tenue diélectrique supérieur.

VI.1 Différents isolements et types d'isolation [I.19]

On appelle isolement d'un ouvrage ou d'un appareil électrique son aptitude à supporter la tension ou plus généralement, les contraintes électriques qui lui sont appliquées.

On appelle isolation l'élément matériel ou l'ensemble des dispositifs constructifs qui assurent cet isolement.

Sur un réseau électrique triphasé, quelle que soit la tension nominale, on distingue trois configurations d'isolement à considérer lors des études de coordination de l'isolement:

- ***L'isolement entre une des trois phases et le terre (isolement dit phase-terre)*** comprend tous les isolements entre les parties sous tension et celles mises à la terre; c'est par exemple isolement existant entre un conducteur de ligne aérienne et le pylône, ou bien encore entre une borne d'un transformateur et sa cuve.
- ***L'isolement entre deux des trois phases (isolement dit phase-phase)*** comprend tous les isolements entre les phases des réseaux triphasés; c'est par exemple l'isolement entre les phases d'un jeu de barres ou l'isolement entre les enroulements de même tension d'un transformateur triphasé.
- ***L'isolement entre deux parties d'un réseau ou entre deux réseaux (isolement dit longitudinal)*** comprend tous les isolements entre deux parties d'un réseau ou entre deux réseaux ; c'est par exemple l'isolement entre deux lignes de tensions différentes qui se croisent, ou bien l'isolement entre les enroulements de tensions différentes de la même phase d'un transformateur, ou bien encore l'isolement entre les bornes d'une même phase d'un sectionneur ou d'un disjoncteur ouvert.

Chacune de ces trois configurations d'isolement peut être constituée d'un ou des deux types d'isolation suivants :

- ***Isolation externe***, comme les chaînes d'isolateurs en verre ou plus simplement un conducteur de ligne par rapport à la terre: c'est une isolation non auto-régénératrice, c'est-à-dire qu'elle perd ses propriétés isolantes après une décharge disruptive (ou amorçage);
- ***Isolation interne***, comme l'isolation papier-huile d'un transformateur ou l'isolation au SF6, d'un disjoncteur : cette isolation est en général auto-régénératrice. C'est-à-dire qu'elle retrouve intégralement ses propriétés isolantes ou ne les retrouve pas intégralement après une décharge disruptive.

VII. Etat de l'art

Nous souhaitons modéliser l'interaction EM entre deux lignes de transmission non parallèles lors d'un impact direct d'une onde de foudre figure I.26.

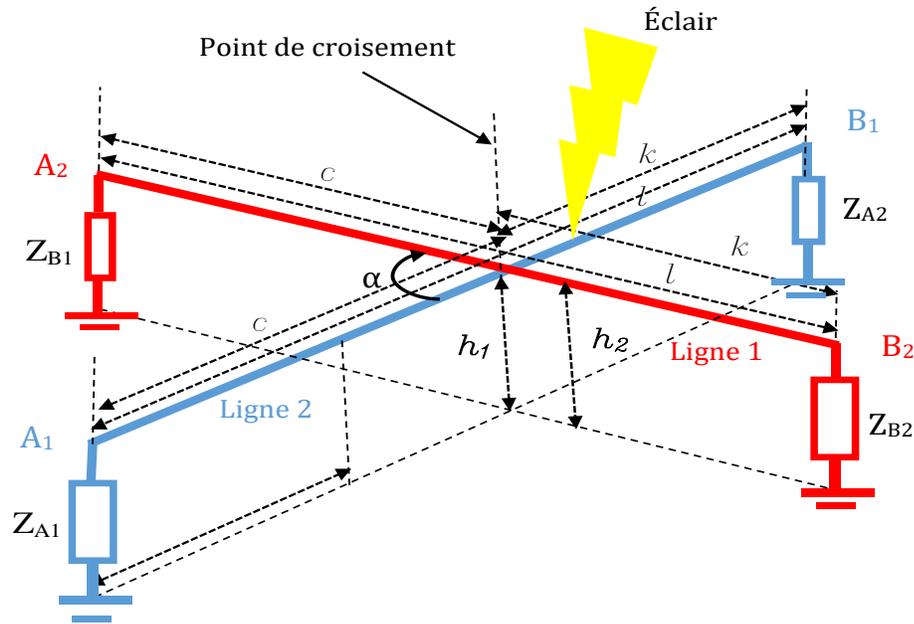


Figure I.27. L'interaction EM entre deux lignes de transmission non parallèles au cours d'un impact direct de la foudre.

Le but de ce travail est de traité le cas du croisement des lignes de transmission. Ce cas du croisement de conducteurs a déjà été abordé dans la littérature par des méthodes diverses [I.20], [I.21], [I.22].

Dans ce travail de mémoire de master, nous proposons de modéliser ce problème par les expressions déduites par M. Gunawardana [I.23] qui tiennent compte de la dépendance fréquentielle des paramètres linéiques avec la fréquence.

Références Bibliographiques

- [I.1] **RichardE. Brown**, « Electric Power distribution reliability », second Edition, 2009, Taylor & Francis Group, LLC, P.18.
- [I.2] **M. Saguan**, « Architectures de marché électrique, application au market design dur temps réel », thèse de doctorat en science économique, Université paris-sud 11- Avril 2007.
- [I.3] **J.Pierlot**, « Electricité, de la production à la distribution », organisation européenne pour la recherche nucléaire, France 15 janvier 2002.
- [I.4] **S. Bouri**, « Optimisation de la production et la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis », thèse de doctorat en science, Université sidi bel abbés 2007-2008.
- [I.5] **M. Garci**, « Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisé », thèse de doctorat, l'institut polytechnique de Grenoble 2008.
- [I.6] **Y. Ajraoui** « Chapitre 3 Topologies des réseaux électriques », Scribd. <https://www.scribd.com/document/629730835/Chapitre-3-Topologies-des-reseaux-electriques>.
- [I.7] [http://fr.wikipedia.org/wiki/poste électrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/poste_électrique).
- [I.8] Définition de « poste d'un réseau électrique », Électropédia, site de l'IEC (consulté le 26 mars 2019).
- [I.9] **N.Oudaifia** et **S.Sahraoui**, « Qualité de l'énergie électrique », mémoire de Master, Université de Guelma, 2018.
- [I.10] **C.Valentin**, « Les réseaux d'énergie électrique 1 ». Lavoisier. Paris .2006.
- [I.11] **T.Debu**, « Lignes aériennes, Paramètres électriques », Technique de l'Ingénieur, D4435, pp. 1-10, 1996.
- [I.12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_à_haute_tension

- [I.13] https://stock.adobe.com/dz/images/electricite-types-de-pylones-a-tres-haute-tension/25131728?prev_url=detail
- [I.14] **M. Zellagui** « câbles souterraines MT et BT », Mémoire fin d'étude Université Batna, 2018
- [I.15] **F. Girard** « Généralités sur la foudre et les surtensions », ADEE Electronic. Édition octobre 2008
- [I.16] **V. Crastan** « Les réseaux d'énergie électrique ». Tome 1.
- [I.17] **M. Graciet** et **J. Pinel** « Protection contre les perturbations », Techniques de l'Ingénieur, D5170.
- [I.18] **C. Kiény**, « Ferrorésonance dans les réseaux », Technique de l'Ingénieur, D4745, pp. 1-17, 1996.
- [I.19] **A. Sabot** et **J. Michaud**, « Lignes et postes : Choix et coordination des isolements », D4750, 1997.
- [I.20] **D.V. Giri**, **S. Chang** and **F.M. Tesche** "A coupling model for a pair of skewed transmission lines", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol EMC 22, pp 20-28 November 1980
- [I.21] **J.L. Young** and **J.R. Wait**, "Electromagnetic response of two crossing infinitely long thin wires", IEEE transactions on Antennas and Propagation, Vol. 39, N° 6, June 1991
- [I.22] **Y. Kami** and **R. Sato**, "Coupling model of crossing transmission lines", IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC 28, N° 4, Nov 1986.
- [I.23] **M. Gunawardana** and **B. Kordi**, « Time-domain coupling model for nonparallel frequency-dependent overhead multiconductor transmission lines above lossy ground », IEEE Transactions on power delivery, Vol. 37, No. 4, 2021.

Chapitre II

MODELISATION DES
LIGNES DE
TRANSMISSION NON
PARALLELES

I. Introduction

Dans ce chapitre, on présente une modélisation mathématique d'une ligne de transmission non uniforme plus précisément les lignes de transmission non parallèle. Le but est de modéliser l'interaction électromagnétique entre deux lignes de transmission monofilaire qui se croisent.

Nous commençons par une présentation des paramètres linéiques pour un sol parfaitement conducteur où les deux conducteurs sont aériens, ensuite nous exposons les termes des matrices impédance et admittance pour un sol de conductivité finie pour le cas de deux conducteurs aériens et un conducteur aérien en présence d'un câble simplement isolé enterré.

Nous complétons ce chapitre par la résolution des équations des lignes par FDTD en tenant compte de la dépendance des paramètres linéiques avec la fréquence.

II. Ligne de transmission uniforme

Le terme « ligne de transmission » s'adresse à des circuits électriques filiformes comprenant dans leur présentation la plus courante deux conducteurs. L'adjectif filiforme signifie que la distance entre les conducteurs reste très inférieure à la dimension longitudinale du circuit. De plus, par comparaison avec les circuits électriques usuels où la transition des signaux de l'entrée vers la sortie est supposée instantanée ; dans une ligne de transmission, on fait intervenir le temps de propagation des signaux, et consécutivement, des courants et tensions auxquels ils seront attachés [II.1].

L'illustration de la figure II.1 décrit un tronçon de ligne de transmission constituée de deux conducteurs identiques et parallèles de diamètre d . Les conducteurs espacés de la distance D possèdent pur dimension longitudinale commune l .

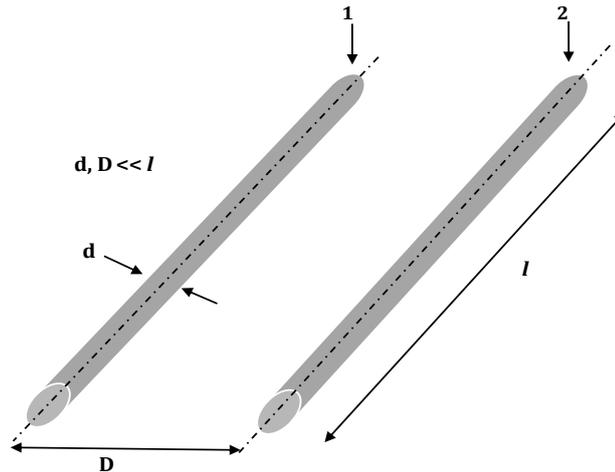


Figure II.1. Illustration d'un tronçon de ligne uniforme de dimension longitudinale l constitué de deux conducteurs parallèles de diamètres d identiques espacés de D .

Une **ligne uniforme** signifie que la distance D des conducteurs et leurs diamètres d , ou plus généralement, la géométrie transversale, demeurent invariants quelle que soit la position d'un observateur situé sur le tronçon l . Cette propriété peut être étendue à toute valeur de l [II.1].

Les équations des lignes de transmission multifilaire uniforme en fréquentiel sont données par:

$$\frac{\partial}{\partial z} [V(z, j\omega)] + [Z(j\omega)][I(z, j\omega)] = [0] \quad (\text{II. 1})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [I(z, j\omega)] + [Y(j\omega)][V(z, j\omega)] = [0] \quad (\text{II. 2})$$

Où : $[Z(j\omega)]$ matrice impédance linéique.

$[Y(j\omega)]$ matrice admittance linéique.

$[V(z, j\omega)]$ et $[I(z, j\omega)]$ les vecteurs des tensions et courants sur la ligne.

III. Les lignes de transmission non uniformes

Les lignes de transmission non-uniformes regroupent tout faisceau comportant une variation continue de distances entre les différents conducteurs le constituant ou entre ceux-ci et le conducteur de référence, ou une variation du diamètre des conducteurs. Cela se traduit par une variation, en fonction de la position des caractéristiques électriques du faisceau [II.2]. Ainsi, les équations des lignes de transmission non-uniformes sont données par:

$$\frac{\partial}{\partial z} [V(z, j\omega)] + [Z(z, j\omega)][I(z, j\omega)] = [0] \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [I(z, j\omega)] + [Y(z, j\omega)][V(z, j\omega)] = [0] \quad (\text{II.4})$$

Les matrices impédance $[Z(z, j\omega)]$ et admittance $[Y(z, j\omega)]$ linéiques sont notées ainsi parce que la valeur des coefficients de ces matrices varie éventuellement en fonction de la position.

III.1. Cas des lignes de transmission non parallèle au-dessus d'un sol parfaitement conducteur

Considérons deux lignes de transmission monofilaires qui se croisent en formant un angle α au-dessus d'un sol parfaitement conducteur (figure II.2).

Pour cette structure filaire et sous l'approximation du fil mince [II.3] le champ électrique diffracté E^s en un point d'observation sur le conducteur i peut être représenté en utilisant les potentiels vectoriels et scalaires [II.4]:

$$E^s = -j\omega A - \nabla\Phi \quad (\text{II.5})$$

Où, A et Φ sont respectivement le potentiel vectoriel magnétique et le potentiel scalaire électrique. Pour la géométrie représentée sur la figure II.2, nous pouvons écrire :

$$A_{zi}(z_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{l_i} g(z_i, z'_i) I_i(z'_i) dz'_i + \cos \alpha \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{l_j} g(z_i, z_j) I_j(z_j) dz_j \quad (\text{II.6})$$

$$\Phi(z_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{l_i} g(z_i, z'_i) \rho_i(z'_i) dz'_i + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{l_j} g(z_i, z_j) \rho_j(z_j) dz_j \quad (\text{II.7})$$

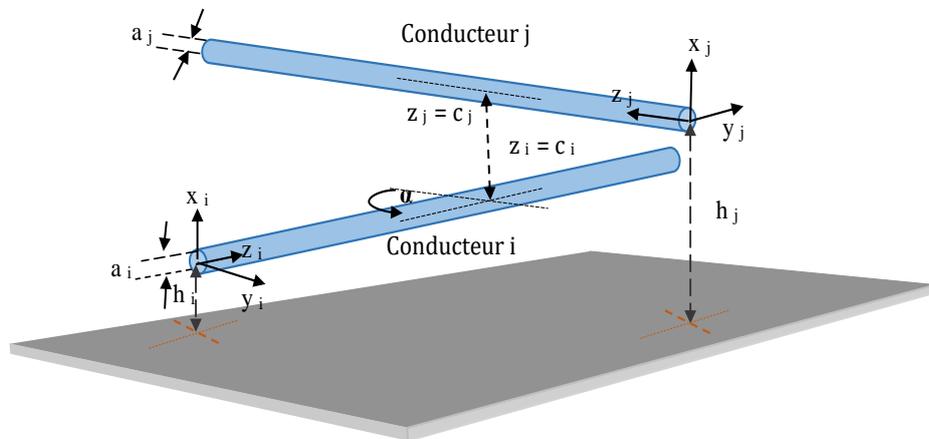


Figure II.2. Deux conducteurs qui se croisent en formant un angle α au-dessus d'un sol parfaitement conducteur.

Dans les équations (II.6 et II.7) l_i et l_j sont les longueurs des conducteurs i et j . I_i et I_j sont les courants et ρ_i et ρ_j sont les densités de charge électrique en un point z des conducteurs i et j , respectivement.

La fonction g est la fonction de Green liée à un champ diffracté généré par un conducteur parcouru par un courant, qui peut être obtenue en utilisant la méthode des images [II.5].

En supposant que le champ électrique diffracté est dans la direction transversale à la direction z et qu'il n'y a pas de champs incidents, on obtient [II.6].

$$\vec{e}_z \cdot \vec{E}^s = 0 \quad (\text{II.8})$$

En remplaçant l'équation (II.8) dans l'équation (II.5) on a:

$$\frac{d\Phi}{dz_i} = -j\omega A_{z_i} \quad (\text{II.9})$$

Sous l'approximation du fil mince, on peut supposer que la direction du courant est suivant l'axe z , ce qui donne :

$$A_x = A_y = 0 \quad (\text{II.10})$$

En absence du champ incident la tension totale est définie comme :

$$V(z_i) = - \int_0^{h_i} E_x^s dx \quad (\text{II.11})$$

Les deux équations (II.5) et (II.10) peuvent être utilisés pour réécrire l'équation (II.11) comme :

$$V(z_i) = \Phi(z_i) \quad (\text{II.12})$$

En substituant l'équation (II.12) dans l'équation (II.9) on obtient :

$$\frac{dV(z_i)}{dz_i} = -j\omega A_{z_i} \quad (\text{II.13})$$

En utilisant (II.13) et (II.6) on trouve une expression semblable à la première équation des lignes de transmission :

$$\begin{aligned} \frac{dV(z_i)}{dz_i} = & -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_0^{l_i} g(z_i, z'_i) I_i(z'_i) dz'_i \Big|_{x_i=h_i} \\ & - j\omega \frac{\mu}{4\pi} \cos(\alpha) \int_0^{l_j} g(z_i, z'_j, \alpha) I_j(z'_j) dz'_j \Big|_{x_i=h_i} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

De même, la densité de charge électrique ρ peut être exprimée en fonction du courant dans le conducteur en appliquant l'équation de conservation de la charge **[II.6]**:

$$\rho_i(z_i) = -\frac{1}{j\omega} \frac{dI_i(z_i)}{dz_i} \quad (\text{II.15})$$

L'équation (II.15) peut être remplacée dans l'équation (II.7) et réorganisée pour obtenir une deuxième expression semblable à la deuxième équation des lignes de transmission :

$$\begin{aligned} V(z_i) = & -\frac{1}{4\pi\epsilon} \int_0^{l_i} g(z_i, z'_i) \frac{1}{j\omega} \frac{dI_i(z'_i)}{dz'_i} dz'_i \Big|_{x_i=h_i} \\ & - \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_0^{l_j} g(z_i, z'_j, \alpha) \frac{1}{j\omega} \frac{dI_j(z'_j)}{dz'_j} dz'_j \Big|_{x_i=h_i} \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

En utilisant la méthode des images la fonction de Green est définie par:

$$g(z_i, z'_i) = \frac{e^{-j\beta\sqrt{(z'_i-z_i)^2+a_i^2}}}{\sqrt{(z'_i-z_i)^2+a_i^2}} - \frac{e^{-j\beta\sqrt{(z'_i-z_i)^2+(2h_i)^2}}}{\sqrt{(z'_i-z_i)^2+(2h_i)^2}} \quad (\text{II.17})$$

Et

$$g(z_i, z_j, \alpha) = \frac{e^{-j\beta R_s}}{R_s} - \frac{e^{-j\beta R_i}}{R_i} \quad (\text{II.18})$$

Avec où R_s et R_i sont définis en figure II.3.

$$R_s = \sqrt{\left((c_i - z_i) \sin \alpha\right)^2 + \left((c_j - z_j) + (c_i - z_i) \cos \alpha\right)^2 + (h_i - h_j)^2} \quad (\text{II. 19})$$

$$R_i = \sqrt{\left((c_i - z_i) \sin \alpha\right)^2 + \left((c_j - z_j) + (c_i - z_i) \cos \alpha\right)^2 + (h_i + h_j)^2} \quad (\text{II. 20})$$

β est la constante de phase définie par :

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \quad (\text{II. 21})$$

Les variables spatiales utilisées dans les fonctions de Green sont illustrées sur la figure II.3.

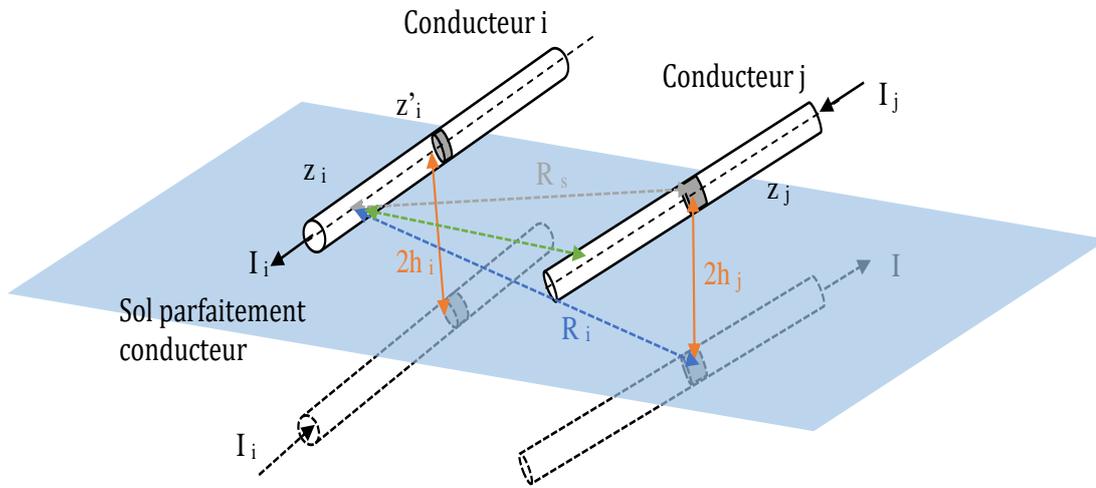


Figure II.3. Illustration graphique des variables spatiales utilisées dans les fonctions de Green.

Les termes intégraux dans les deux équations (II.14) et (II.16) n'ont pas de solutions analytiques et doivent donc être simplifiés avant d'être implémentés en temporel en utilisant la FDTD.

Pour le cas de lignes de transmission où la dimension transversale maximale de la structure h est très petite par rapport à la longueur d'onde minimale (c'est-à-dire $h \ll \lambda_{\min}$), les termes intégraux dans (II.14) et (II.16) peuvent être simplifiés comme suit **[II.6]** :

$$\int g(z, z') I(z') dz' = \int \left(\frac{e^{-j\beta R_s}}{R_s} - \frac{e^{-j\beta R_i}}{R_i} \right) I(z') dz' = \int \left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_i} \right) I(z') dz' \quad (\text{II. 22})$$

L'intégrale simplifiée dans l'équation (II.22) a une solution analytique qui nous permet d'écrire les équations (II.14) et (II.16) sous la forme **[II.7]** :

$$\frac{dV_i(z_i)}{dz_i} = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} [\xi_{ii}(z_i)I_i(z_i) + \cos \alpha \cdot \xi_{ij}(z_i)I_j(z_j)] \quad (\text{II. 23})$$

$$V_i(z_i) = -\frac{1}{j\omega 4\pi\epsilon_0} \left[\xi_{ii}(z_i) \frac{dI_i(z_i)}{dz_i} + \xi_{ij}(z_i) \frac{dI_j(z_j)}{dz_j} \right] \quad (\text{II. 24})$$

De même, les équations pour le conducteur j peuvent s'écrire :

$$\frac{dV_j(z_j)}{dz_j} = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} [\xi_{jj}(z_j)I_j(z_j) + \cos \alpha \cdot \xi_{ji}(z_i)I_i(z_i)] \quad (\text{II. 25})$$

$$V_j(z_j) = -\frac{1}{j\omega 4\pi\epsilon_0} \left[\xi_{jj}(z_j) \frac{dI_j(z_j)}{dz_j} + \xi_{ji}(z_j) \frac{dI_i(z_i)}{dz_i} \right] \quad (\text{II. 26})$$

Où $\xi(z)$ représente la solution analytique des intégrales [II.8].

$$\xi_{ii} = \sinh^{-1} \left(\frac{l_i - z_i}{a_i} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{-z_i}{a_i} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{l_i - z_i}{2h_i} \right) + \sinh^{-1} \left(\frac{-z_i}{2h_i} \right) \quad (\text{II. 27})$$

$$\begin{aligned} \xi_{ij} = \sinh^{-1} & \left(\frac{l_j - c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i - h_j)^2}} \right) \\ & - \sinh^{-1} \left(\frac{-c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i - h_j)^2}} \right) \\ & - \sinh^{-1} \left(\frac{l_j - c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i + h_j)^2}} \right) \\ & + \sinh^{-1} \left(\frac{-c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i + h_j)^2}} \right) \end{aligned} \quad (\text{II. 28})$$

Après réarrangement, les équations (II.23), (II.24), (II.25) et (II.26) peuvent être exprimés sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} [V(z, j\omega)] \\ [I(z, j\omega)] \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} [0] & [L(z)] \\ [C(z)] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V(z, j\omega)] \\ [I(z, j\omega)] \end{bmatrix} \quad (\text{II. 29})$$

Où $[L(z)]$ et $[C(z)]$ sont les matrices inductance et capacité constituées des termes ξ .

Puisque $[L(z)]$ et $[C(z)]$ sont indépendants de la fréquence, en temporel le système (II.29) est réécrit comme suit :

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} [V(z, t)] \\ [I(z, t)] \end{bmatrix} = -\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} [0] & [L(z)] \\ [C(z)] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V(z, t)] \\ [I(z, t)] \end{bmatrix} \quad (\text{II. 30})$$

Avec :

$$[L(z)] = \frac{\mu_0}{4\pi} \begin{bmatrix} \xi_{ii}(z) & \cos(\alpha) \xi_{ij}(z) \\ \cos(\alpha) \xi_{ji}(z) & \xi_{jj}(z, j\omega) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 31})$$

Et

$$[C(z)] = 4\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} \xi_{ii}(z) & \xi_{ij}(z) \\ \xi_{ji}(z) & \xi_{jj}(z) \end{bmatrix}^{-1} \quad (\text{II. 32})$$

III.2. Cas des lignes de transmission non parallèle au-dessus d'un sol de conductivité finie

Soit deux lignes de transmission monofilaire qui se croisent en formant un angle α au-dessus d'un sol de conductivité finie, comme le montre la figure II.4. Les paramètres du sol sont ϵ_g et σ_g , qui sont respectivement la permittivité et la conductivité du sol. Les matrices impédance et admittance sont déterminées à l'aide de la théorie du plan fictif complexe [II.9], comme le montre la figure II.5.

p : est la profondeur de pénétration complexe définie par :

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)}} \quad (\text{II. 33})$$

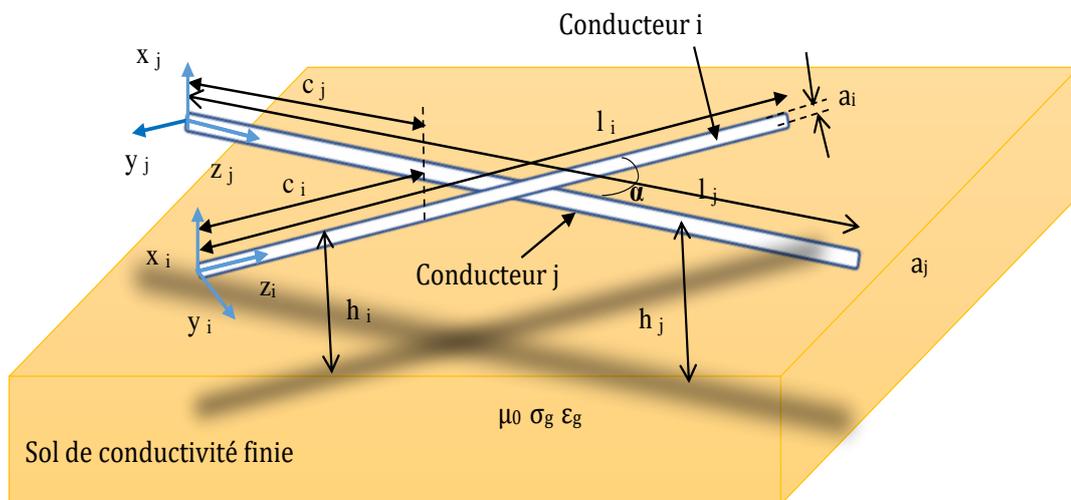


Figure II.4. Deux lignes de transmission monofilaire se croisant au-dessus d'un sol de conductivité finie

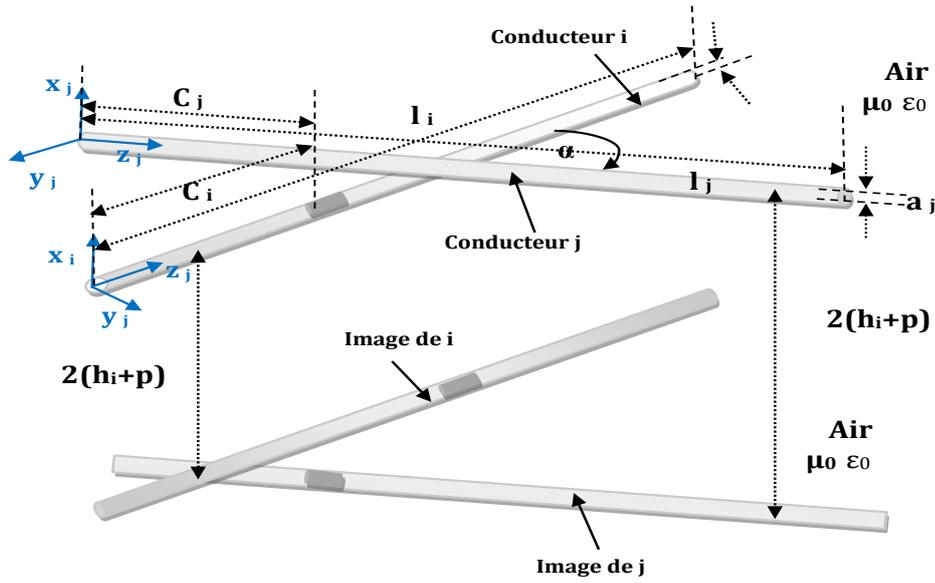


Figure II.5. La représentation par la méthode du plan fictif complexe.

Cependant, les fonctions du Green sont assez différentes du cas d'un sol parfaitement conducteur puisqu'elles dépendent de la fréquence. Dans [II.10], il est expliqué que pour un sol parfaitement conducteur (c'est-à-dire R_s et R_i réels), lorsque la dimension transversale maximale de la structure (h) est très petite par rapport à la plus petite longueur d'onde minimale (c'est-à-dire $h \ll \lambda_{\min}$), les termes exponentiels de (II.22) peuvent être approximés à l'unité. Pour un sol de conductivité finie, R_i dans (II.22) est complexe et dépendante de la fréquence.

En supposant que les termes exponentiels sont approximativement égaux à 1 et $h \ll \lambda_{\min}$, une solution analytique peut être obtenue pour les termes intégraux de (II.14) et (II.16) :

$$\int \left(\frac{e^{-j\beta R_s}}{R_s} - \frac{e^{-j\beta R_i}}{R_i} \right) I(z', j\omega) dz' = \int \left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_i} \right) I(z', j\omega) dz' = \xi(z, j\omega) \cdot I(z, j\omega) \quad (\text{II.34})$$

Où ξ est la solution analytique du terme intégral.

En tenant compte de l'approximation du fil mince, et pour le cas d'un sol de conductivité finie, les deux équations (II.14) et (II.16) peuvent être réorganisées pour obtenir les équations suivantes [II.7] :

$$\frac{dV_i(z_i, j\omega)}{dz_i} = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \left[\xi_{ii}(z_i, j\omega) I_i(z_i, j\omega) + \cos \alpha \cdot \xi_{ij}(z_i, j\omega) I_j(z_j, j\omega) \right] \quad (\text{II.35})$$

$$V_i(z_i, j\omega) = -\frac{1}{j\omega 4\pi\epsilon_0} \left[\xi'_{ii}(z_i) \frac{dI_i(z_i, j\omega)}{dz_i} + \xi'_{ij}(z_i) \frac{dI_j(z_j, j\omega)}{dz_j} \right] \quad (\text{II. 36})$$

Les expressions des solutions analytiques des intégrales dans les équations (II.14) et (II.16) pour un sol de conductivité finie sont définis comme suit [II.7]:

$$\begin{aligned} \xi_{ii} = & \ln(l_i + \sqrt{(l_i - z_i)^2 + a_i^2} - z_i \\ & - \ln\left(\sqrt{(l_i - z_i)^2 + a_i^2} - z_i\right) \\ & - \ln\left(l_i + \sqrt{(l_i - z_i)^2 + (2h_i + 2p)^2} - z_i\right) \\ & + \ln\left(\sqrt{(l_i - z_i)^2 + (2h_i + 2p)^2} - z_i\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 37})$$

$$\begin{aligned} \xi_{ij} = & \ln\left((l_j + \sqrt{[(l_j - c_j) + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + [(z_i - c_i) \sin \alpha]^2 + (h_i - h_j)^2} - c_j \right. \\ & \left. + (z_i - c_i) \cos \alpha\right) \\ & - \ln\left(\sqrt{[(l_j - c_j) + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + [(z_i - c_i) \sin \alpha]^2 + (h_i - h_j)^2} \right. \\ & \left. - c_j + (z_i - c_i) \cos \alpha\right) \\ & + \left(l_j + \sqrt{[l_j - c_j + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + [(z_i - c_i) \sin \alpha]^2 + H^2} - c_j \right. \\ & \left. + (z_i - c_i) \cos \alpha\right) \\ & + \ln\left(\sqrt{[(l_j - c_j) + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + H^2} - c_j \right. \\ & \left. + (z_i - c_i) \cos \alpha\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 38})$$

avec

$$H = h_i + h_j + 2p \quad (\text{II. 39})$$

$$\xi'_{ii} = \sinh^{-1}\left(\frac{l_i - z_i}{a_i}\right) - \sinh^{-1}\left(\frac{-z_i}{a_i}\right) - \sinh^{-1}\left(\frac{l_i - z_i}{2h_i}\right) + \sinh^{-1}\left(\frac{-z_i}{2h_i}\right) \quad (\text{II. 40})$$

$$\begin{aligned}
\xi'_{ij} = & \sinh^{-1} \left(\frac{l_j - c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i - h_j)^2}} \right) \\
& - \sinh^{-1} \left(\frac{-c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i - h_j)^2}} \right) \\
& - \sinh^{-1} \left(\frac{l_j - c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i + h_j)^2}} \right) \\
& + \sinh^{-1} \left(\frac{-c_j + (c_i - z_i) \cos \alpha}{\sqrt{((c_i - z_i) \sin(\alpha))^2 + (h_i + h_j)^2}} \right) \quad (\text{II. 41})
\end{aligned}$$

Des équations similaires peuvent être déduites pour le deuxième conducteur j et le système d'équations peut être réorganisé comme [II.7]:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} [V(z, j\omega)] \\ [I(z, j\omega)] \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [0] & [Z(z, j\omega)] \\ [Y(z, j\omega)] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V(z, j\omega)] \\ [I(z, j\omega)] \end{bmatrix} \quad (\text{II. 42})$$

Avec :

$$[Z(z, j\omega)] = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \begin{bmatrix} \xi_{ii}(z, j\omega) & \cos(\alpha) \xi_{ij}(z, j\omega) \\ \cos(\alpha) \xi_{ij}(z, j\omega) & \xi_{jj}(z, j\omega) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 43})$$

Et :

$$[Y(z, j\omega)] = 4\pi\epsilon_0 j\omega \begin{bmatrix} \xi'_{ii}(z) & \xi'_{ij}(z) \\ \xi'_{ji}(z) & \xi'_{jj}(z) \end{bmatrix}^{-1} \quad (\text{II. 44})$$

Finalement en temporel les équations des lignes deviennent :

$$\frac{\partial}{\partial z} [v(z, t)] + [z'(z, t)] \otimes [i(z, t)] = [0] \quad (\text{II. 45})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [i(z, t)] + [C(z)] \cdot \frac{\partial}{\partial t} [v(z, t)] = [0] \quad (\text{II. 46})$$

Avec \otimes le produit de convolution ;

$[z'(z, t)]$: transformée inverse de Fourier de $[Z(z, j\omega)]$;

III.3. Cas d'une ligne de transmission aérienne et un câble simplement isolé enterré non parallèles

Cette partie consiste à tenir compte uniquement de l'interaction magnétique (mutuelle magnétique) entre l'émetteur (conducteur aérien) et le récepteur qui est un câble enterré simplement isolé. En effet, vu la distance relativement importante entre la ligne aérienne et le câble enterré ainsi, le couplage capacitif se trouve généralement inhibé.

Le couplage entre le conducteur aérien et le câble enterré non parallèle est formulé en utilisant la théorie du champ diffracté [II.11] et la théorie plane fictif complexe [II.9].

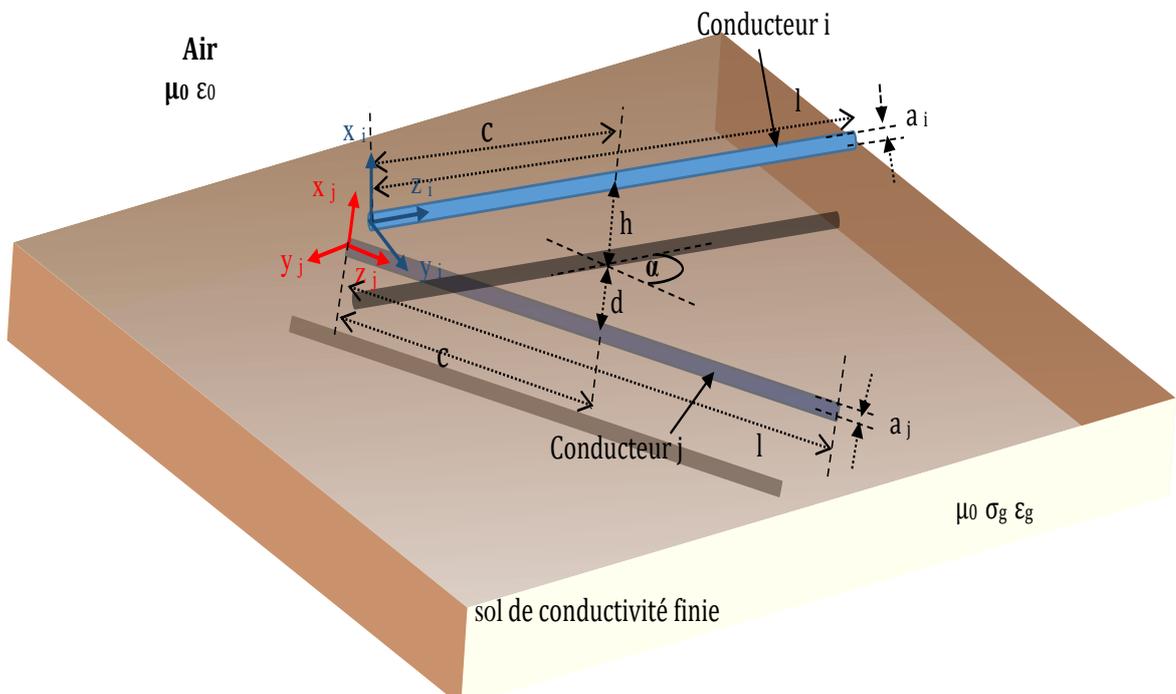


Figure II.6. Le croisement entre un conducteur aérien et un câble enterré pour un sol de conductivité finie

Les équations de ligne de transmission pour une structure filiforme non uniforme dans le domaine fréquentiel peuvent être écrites sous la forme [II.12] :

$$\frac{\partial}{\partial z} [V(z, j\omega)] + [Z(z, j\omega)][I(z, j\omega)] = [0] \quad (\text{II. 47})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [I(z, j\omega)] + [Y(z, j\omega)][V(z, j\omega)] = [0] \quad (\text{II. 48})$$

Où $[V(z, j\omega)]$ et $[I(z, j\omega)]$ sont les vecteurs de tension et de courant et $[Z(z, j\omega)]$ et $[Y(z, j\omega)]$ sont les matrices d'impédance et d'admittance pour chaque position z . Pour une structure filaire telle que représentée sur la figure II.6, où des conducteurs aériens et souterrains sont présents, les matrices impédance $[Z]$ et admittance $[Y]$ peuvent s'écrire sous la forme :

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ae} \\ Z_{ea} & Z_{ee} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 49})$$

Et :

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ae} \\ Y_{ea} & Y_{ee} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 50})$$

Où l'indice « a » représente le conducteur aérien, « e » représente le conducteur enterré et « ea » désigne le terme mutuel entre les deux conducteurs aérien et enterré.

Z_{aa} d'une ligne aérienne de longueur l_i en n'importe quel emplacement z peut être obtenu comme expliqué dans la section III.2 comme **[II.13]**:

$$Z_{aa} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \xi \quad (\text{II. 51})$$

Où,

$$\begin{aligned} \xi = & \ln \left(l_i + \sqrt{(l_i - z_i)^2 + a_i^2} - z_i \right) \\ & - \ln \left(\sqrt{(l_i - z_i)^2 + a_i^2} - z_i \right) \\ & - \ln \left(l_i + \sqrt{(l_i - z_i)^2 + (2h + 2p)^2} - z_i \right) \\ & + \ln \left(\sqrt{(l_i - z_i)^2 + (2h + 2p)^2} - z_i \right) \end{aligned} \quad (\text{II. 52})$$

Dans (II.52), p est la profondeur de pénétration complexe donnée par (II.33).

μ_0 , ϵ_g et σ_g représentent respectivement la perméabilité du vide, la permittivité et la conductivité du sol.

L'admittance propre Y_{aa} d'une ligne aérienne de longueur finie l_i peut être obtenue en utilisant **[II.13]**.

$$Y_{aa} = 4\pi\epsilon_0 j\omega \xi' \quad (\text{II. 53})$$

Où,

$$\xi' = \sinh^{-1} \left(\frac{l_i - z_i}{a_i} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{-z_i}{a_i} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{l_i - z_i}{2h_i} \right) + \sinh^{-1} \left(\frac{-z_i}{2h_i} \right) \quad (\text{II.54})$$

Selon la théorie du plan fictif [II.9] pour un conducteur aérien à hauteur h , le demi-espace sol est remplacé par de l'air et une image du conducteur est placée à une profondeur complexe de $h + 2p$. De même pour un conducteur enterré à une profondeur d'enfouissement d , le demi-espace d'air peut être remplacé par de le sol et une image du conducteur peut être placée à une hauteur complexe $d + 2p$ [II.9]. Par conséquent, en suivant la même procédure que pour les lignes aériennes [II.13], M. Gunawardana a déduit les expressions de l'impédance et l'admittance propre d'un conducteur enterré de longueur l_j [II.13]:

$$Z_{ee} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \chi \quad (\text{II.55})$$

$$Y_{ee} = j4\pi\omega \left(\varepsilon_0\varepsilon_g + \frac{\sigma_g}{j\omega} \right) \chi^{-1} \quad (\text{II.56})$$

Où,

$$\begin{aligned} \chi = & \ln \left(l_j + \sqrt{(l_j - z_j)^2 + a_j^2} - z_j \right) - \ln \left(l_j + \sqrt{(l_j - z_j)^2 + a_j^2} - z_j \right) \\ & - \ln \left(l_j + \sqrt{(l_j - z_j)^2 + (2d + 2p)^2} - z_j \right) \\ & + \ln \left(l_j + \sqrt{(l_j - z_j)^2 + (2d + 2p)^2} - z_j \right) \end{aligned} \quad (\text{II.57})$$

Si le conducteur enterré est simplement isolé, la capacité de gaine doit être ajoutée à l'admittance, et l'admittance totale est définie comme suit [II.14]:

$$Y_{ee,tot} = j\omega \frac{C_s Y_{ee}}{j\omega C_e + Y_{ee}} \quad (\text{II.58})$$

Où C_s est la capacité de la gaine d'isolation donnée par :

$$C_s = \frac{2\pi\varepsilon_s}{\ln \frac{b_j}{a_j}} \quad (\text{II.59})$$

Où ε_s , a_j et b_j sont respectivement la permittivité relative, le rayon intérieur et le rayon extérieur de la gaine isolante.

L'impédance mutuelle entre les deux conducteurs aériens et enterrés est définie par **[II.13]**:

$$\begin{aligned}
Z_{ae} = & \frac{j\omega\mu_0 \cos \alpha}{4\pi} \left[\ln \left(l_j + \sqrt{[(l_j - c_j) + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + [(z_i - c_i) \sin \alpha]^2 + (h + d)^2} \right. \right. \\
& \left. \left. - c_j + (z_i - c_i) \cos \alpha \right) \right. \\
& - \ln \left(\sqrt{[(l_j - c_j) + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + [(z_i - c_i) \sin \alpha]^2 + (h + d)^2} - c_j + (z_i - c_i) \cos \alpha \right) \\
& - \ln \left(l_j + \sqrt{[(l_j - c_j) + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + [(z_i - c_i) \sin \alpha]^2 + (h + d + 2p)^2} - c_j \right. \\
& \left. \left. + (z_i - c_i) \cos \alpha \right) \right. \\
& \left. + \ln \left(\sqrt{[(l_j - c_j) + (z_i - c_i) \cos \alpha]^2 + [(z_i - c_i) \sin \alpha]^2 + (h + d + 2p)^2} - c_j \right. \right. \\
& \left. \left. + (z_i - c_i) \cos \alpha \right) + \frac{4\bar{H}_{ij} \bar{H}_{ij}^2 - 3\bar{y}_{ij}^2}{3\gamma_g^3 \bar{R}_{ij}^6} \right] \quad (\text{II. 60})
\end{aligned}$$

Avec :

$$\bar{y}_{ij} = (c - z_i) \sin \alpha \quad (\text{II. 61})$$

Où \bar{H}_{ij} est donné par :

$$\bar{H}_{ij} = h + d + 2p \quad (\text{II. 62})$$

Et

$$\bar{R}_{ij} = \sqrt{\bar{H}_{ij}^2 + \bar{y}_{ij}^2} \quad (\text{II. 63})$$

L'admittance mutuelle entre les conducteurs aériens et enterrés Y_{ae} est nulle **[II.15]**.

IV. Expressions analytiques pour une étude directement en temporel

Dans cette section nous traitant le cas général ou le produit de convolution intervient dans les deux équations des lignes de transmission c'est-à-dire le cas de l'interaction entre une ligne aérienne et un câble enterré.

Le passage en temporel par transformée de Fourier n'est malheureusement pas possible car aucune expression analytique temporelle de $[Z(z, t)] = F^{-1}[Z(z, \omega)]$ n'est connue, de même pour $[Y(z, t)] = F^{-1}[Y(z, \omega)]$.

Les équations des lignes (II. 47), (II. 48), en temporel s'expriment comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial z} [v(z, t)] + [z'(z, t)] \otimes [i(z, t)] = [0] \quad (\text{II. 64})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [i(z, t)] + [y'(z, t)] \otimes [v(z, t)] = [0] \quad (\text{II. 65})$$

Avec \otimes le produit de convolution ;

$[z'(z, t)]$: transformée inverse de Fourier de $[Z(z, \omega)]$;

$[y'(z, t)]$: transformée inverse de Fourier de $[Y(z, \omega)]$;

Malheureusement, il n'existe aucune expression analytique pour $[z'(z, t)]$ et $[y'(z, t)]$; ceci rend impossible le calcul du produit de convolution qui apparaît dans les équations (II.64), (II.65)

Pour contourner cette difficulté, nous utilisons l'approche dite "vector fitting" **[II.16]** en fréquentiel.

En remplaçant $j\omega$ par s et en utilisant l'approche du vector fitting nous écrivons chaque élément (i,j) de la matrice impédance $[Z(z, j\omega)]$ et la matrice admittance $[Y(z, j\omega)]$ sous la forme **[II.17]** :

$$Z_{ij}(z, \omega) = R_{ij}(z) + \left(L_{ij}(z) + \left[\sum_{r=1}^{Nz} \frac{b_{rij}(z)}{s - a_{rij}(z)} \right] \right) s \quad (\text{II. 66})$$

$$Y_{ij}(z, \omega) = G_{ij}(z) + \left(C_{ij}(z) + \left[\sum_{r=1}^{Ny} \frac{b'_{r,ij}(z)}{s - a'_{r,ij}(z)} \right] \right) s \quad (\text{II. 67})$$

En remplaçant $[Z]$ et $[Y]$ ainsi transformées dans les équations (II.64), (II.65) et en procédant par transformation de Laplace nous obtenons une équation en temporel pour le conducteur i comme suit **[II.17]** :

$$\frac{dv_i(z, t)}{dz} + \sum_{j=1}^N R_{ij}(z) i_j(z, t) + \sum_{j=1}^N L_{ij}(z) \frac{di_j(z, t)}{dt} + \int_0^t \sum_{j=1}^N \left[\sum_{r=1}^{Nz} b_{r,ij}(z) e^{a_{r,ij}(z) \cdot (t-\tau)} \cdot i_j(z, t) \right] d\tau = 0 \quad (\text{II. 68})$$

$$\frac{di_i(z, t)}{dz} + \sum_{j=1}^N G_{ij}(z) v_j(z, t) + \sum_{j=1}^N C_{ij}(z) \frac{dv_j(z, t)}{dt} + \int_0^t \sum_{j=1}^N \left[\sum_{r=1}^{Ny} b'_{r,ij}(z) e^{a'_{r,ij}(z) \cdot (t-\tau)} \cdot v_j(z, t) \right] d\tau = 0 \quad (\text{II. 69})$$

Rappelant que la convolution d'une fonction exponentielle par une fonction arbitraire $f(t)$ (dans notre cas $f(t)$ est le dérivé du courant ou de la tension), peut être aisément calculée par un algorithme récursif :

$$cv_r(t) = \int_0^t f(t - \tau) b_r e^{a_r \tau} d\tau \quad (\text{II. 70})$$

$$cv_r(t - \Delta t) = \int_0^{t-\Delta t} f(t - \Delta t - \tau) b_r e^{a_r \tau} d\tau \quad (\text{II. 71})$$

L'équation (II.70) peut être écrite sous la forme :

$$cv_r(t) = \int_{\Delta t}^t f(t - \tau) b_r e^{a_r \tau} d\tau + \int_0^{\Delta t} f(t - \tau) b_r e^{a_r \tau} d\tau \quad (\text{II. 72})$$

En faisant un changement de variables $\tau = \tau' + \Delta t$, dans le premier terme du second membre de l'équation (II.72) et après simplification et changement de limites nous avons :

$$\int_{\Delta t}^t f(t - \tau) b_r e^{a_r \tau} d\tau = e^{a_r \Delta t} \int_0^{t-\Delta t} f(t - \Delta t - \tau') b_r e^{a_r \tau'} d\tau' \quad (\text{II. 73})$$

En comparant les équations (II.73) et (II.71) et remplaçant dans l'équation (II.72), nous avons l'équation (II.74):

$$cv_r(t) = e^{a_r \Delta t} cv_r(t - \Delta t) + \int_0^{\Delta t} f(t - \tau) b_r e^{a_r \tau} d\tau \quad (\text{II. 74})$$

En remplaçant dans les équations (II.68) et (II.69) on trouve les nouvelles équations des lignes:

$$\begin{aligned} \frac{dv_i(z, t)}{dx} + \sum_{j=1}^N R_{ij}(z) i_j(z, t) + \sum_{j=1}^N L_{ij}(z) \frac{di_j(z, t)}{dt} + \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^{Nz} e^{a_{r,ij}(z)\Delta t} C I_{r,ij}(z, t - \Delta t) \\ + \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^{Nz} \int_0^{\Delta t} b_{r,ij}(z) e^{a_{r,ij}(z)\tau} i_j(z, t - \tau) d\tau = 0 \end{aligned} \quad (\text{II. 75})$$

$$\begin{aligned} \frac{di_i(z, t)}{dz} + \sum_{j=1}^N G_{ij}(z) v_j(z, t) + \sum_{j=1}^N C_{ij}(z) \frac{dv_j(z, t)}{dt} + \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^{Ny} e^{a'_{r,ij}(z)\Delta t} C V_{r,ij}(z, t - \Delta t) \\ + \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^{Ny} \int_0^{\Delta t} b'_{r,ij} e^{a'_{r,ij}(z)\tau} v_j(z, t - \tau) d\tau = 0 \end{aligned} \quad (\text{II. 76})$$

V. Equation exprimée par FDTD

Nous utilisons la FDTD pour résoudre numériquement les équations (II.75), (II.76) et ainsi simuler la propagation des ondes dans le domaine temporel. Elle consiste à discrétiser le domaine spatio-temporel étudié en un maillage rectangulaire. Dans notre cas, il s'agit de la longueur de la ligne et la durée sur laquelle nous voulons simuler la propagation. Ceci est accompli en remplaçant les dérivées par des différences finies sur des pas de discrétisation fixés. On note Δz et Δt les pas de discrétisation spatial et temporel respectivement. Pour que notre approximation produise des résultats valables, le maillage doit être "assez" fin (relativement aux longueurs d'onde/fréquences des signaux injectés). Les conditions suivantes doivent être vérifiées :

$$\Delta z \ll \lambda_{\min} \quad (\text{II. 77})$$

$$\Delta t \ll \frac{1}{f_{\max}} \quad (\text{II. 78})$$

Où λ_{\min} est la plus petite longueur d'onde et f_{\max} la plus grande fréquence contenue dans le signal injecté. De plus, pour assurer la stabilité numérique du schéma, Δz et Δt doivent satisfaire la condition de stabilité **[II.12]**:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z}{v_{\max}} \quad (\text{II. 79})$$

Où v_{\max} est la vitesse de propagation maximale dans le câble ou la ligne. Cette condition peut être interprétée physiquement par le fait que le pas temporel ne doit pas être plus grand que le temps de propagation sur un pas spatial.

Dans la suite, on se donne les notations suivantes :

$$[v_k^n] \equiv [v[(k - 1)\Delta z, n\Delta t]] \tag{II. 80}$$

$$[i_k^n] \equiv \left[i \left[\left(k - \frac{1}{2} \right) \Delta z, \left(n + \frac{1}{2} \right) \Delta t \right] \right] \tag{II. 81}$$

Les indices n et k indiquent respectivement le temps et l'espace.

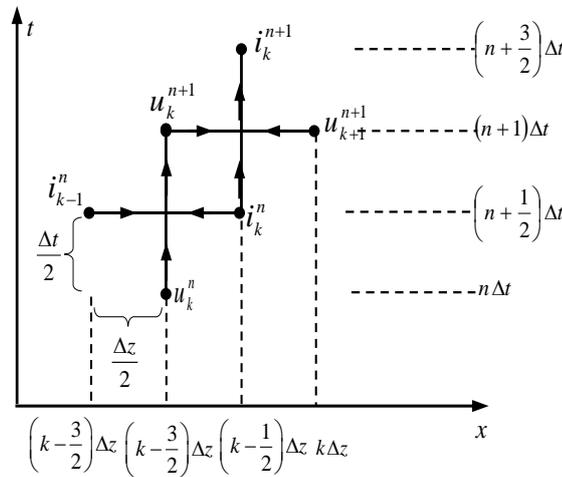


Figure II.7. Discrétisation spatiale et temporelle des tensions et courants.

Notons que la discrétisation spatio-temporelle alterne un nœud tension et un nœud courant séparé par $\Delta z/2$ dans l'espace et $\Delta t/2$ dans le temps ; les deux nœuds extrêmes sont des nœuds de tensions.

L'idée est d'approcher les dérivées spatiales et temporelles des différences finies à points centrés. Les équations aux dérivées partielles (II.75) et (II.76) deviennent alors des équations aux différences finies :

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{[G_k]}{2} + \frac{[C_k]}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,k}] \right) \cdot [v_k^{n+1}] = \\
& \left(-\frac{[G_k]}{2} + \frac{[C_k]}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,k}] - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,k}] [e^{a_{r,k}\Delta t}] \right) \cdot [v_k^n] \\
& - \left(\frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,k} e^{a'_{r,k}\Delta t}] \right) [v_k^{n-1}] - \sum_{r=1}^{Ny} [e^{a'_{r,k}\Delta t}] [CV_{rk}^n] - \frac{[i_k^n] - [i_{k-1}^n]}{\Delta z} \\
& \qquad \qquad \qquad k = 2, 3, \dots, kmax
\end{aligned} \tag{II.82}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{[R_k]}{2} + \frac{[L_k]}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Nz} [b_{r,k}] \right) \cdot [i_k^{n+1}] = \\
& \left(-\frac{[R_k]}{2} + \frac{[L_k]}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Nz} [b_{r,k}] - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Nz} [b_{r,k}] [e^{a_{r,k}\Delta t}] \right) \cdot [i_k^n] \\
& - \left(\frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Nz} [b_{r,k} e^{a_{r,k}\Delta t}] \right) [i_k^{n-1}] - \sum_{r=1}^{Nz} [e^{a_{r,k}\Delta t}] [CI_{rk}^n] - \frac{[v_{k+1}^{n+1}] - [v_k^{n+1}]}{\Delta z} \\
& \qquad \qquad \qquad k = 1, 3, \dots, kmax
\end{aligned} \tag{II.83}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
[CV_{rk}^{n+1}] &= [e^{a'_{r,k}\Delta t}] [CV_{rk}^n] + \frac{\Delta t}{4} b'_{r,k} [v_k^{n+1}] + [v_k^n] \\
& \quad + \frac{\Delta t}{4} [b'_{r,k}] [e^{a'_{r,k}\Delta t}] [v_k^n] + [v_k^{n-1}]
\end{aligned} \tag{II.84}$$

$$\begin{aligned}
[CI_{rk}^{n+1}] &= [e^{a_{r,k}\Delta t}] [CI_{rk}^n] + \frac{\Delta t}{4} b_{r,k} [i_k^{n+1}] + [i_k^n] \\
& \quad + \frac{\Delta t}{4} [b_{r,k}] [e^{a_{r,k}\Delta t}] [i_k^n] + [i_k^{n-1}]
\end{aligned} \tag{II.85}$$

A la première extrémité du système des lignes de transmission non parallèle, et pour une injection courant l'équation (II.82) est discrétisé comme suit **[II.18]**:

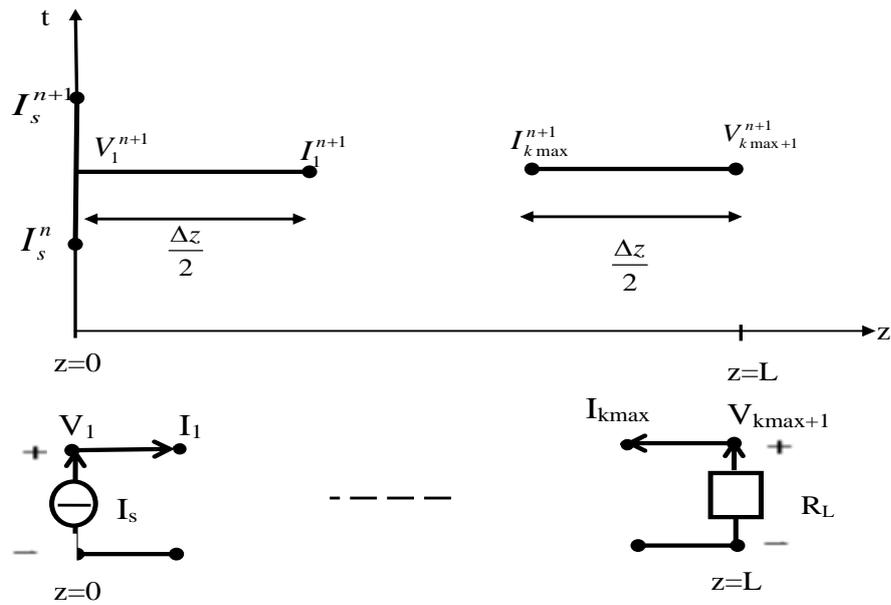


Figure II.8. Illustration de la discrétisation des équations des lignes aux extrémités [II.18].

- Pour $k=1$

$$\left(\frac{[C_1]}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,1}] \right) \cdot [v_1^{n+1}] = \left(\frac{[C_1]}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,1}] - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,1}] [e^{a'_{r,1} \Delta t}] \right) \cdot [v_1^n] - \left(\frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,1} e^{a'_{r,1} \Delta t}] \right) [v_1^{n-1}] - \sum_{r=1}^{Ny} [e^{a'_{r,1} \Delta t}] [C V_{r,1}^n] - \frac{2[i_1^n]}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta z} ([I_s^{n+1}] + [I_s^n]) \quad (II.86)$$

Où on a noté $[I_s]$ le courant délivrée par la source à l'extrémité $x = 0$ du système.

A la deuxième extrémité du système, et pour la terminaison résistive $[R_L]$, on remplace "k" par "kmax+1" dans l'équation (II.82).

- Pour $k=kmax+1$

L'équation (II.79) est caractérisée par $[i_{kmax+1}] = 0$, $[G_1] = \frac{1}{[R_L] \cdot \Delta z}$, et $\Delta z = \frac{\Delta z}{2}$ donc [II.12] :

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{[R_L]^{-1}}{2\Delta z} + \frac{[C_{kmax+1}]}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,kmax+1}] \right) \cdot [v_{kmax+1}^{n+1}] = \\
& \left(-\frac{[R_L]^{-1}}{2\Delta z} + \frac{[C_{kmax+1}]}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b_{r,kmax+1}] - \frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,kmax+1}] [e^{a'_{r,kmax+1}\Delta t}] \right) \cdot [v_{kmax+1}^n] \\
& - \left(\frac{\Delta t}{4} \sum_{r=1}^{Ny} [b'_{r,kmax+1}] e^{a'_{r,kmax+1}\Delta t} \right) [v_{kmax+1}^{n-1}] - \sum_{r=1}^{Ny} [e^{a'_{r,kmax+1}\Delta t}] [CV_{r,kmax+1}^n] - \frac{[i_{kmax}^n]}{\Delta z}
\end{aligned} \tag{II.87}$$

Où $kmax$ est le nombre de cellules spatiales.

Références Bibliographiques

- [II.1] **B.DÉMOULIN**, « Éléments sur la théorie des lignes de transmission», Technique de l'Ingénieur, D1322, pp. 1-32.
- [II.2] **P.BESNIER**, « Etude des couplages électromagnétiques sur des réseaux de lignes de transmission non uniformes à l'aide d'une approche topologique», thèse de doctorat en électronique, Université de Lille, 1993.
- [II.3] **S. Tkachenko, F. Rachidi, and J. Nitsch**, "Analytical characterization of a line bend," *7th International Conference on Computational and Experimental Methods in Electrical Engineering and Electromagnetics*, vol. 39, no. 1, pp. 599–608, 2004
- [II.4] **CIGRE**, "Brochure 543: Guideline for numerical electromagnetic analysis method and its application to surge phenomena, wg c4.501," *CIGRE*, June 2013.
- [II.5] **D. K. Cheng**, *Field and wave electromagnetics / David K. Cheng.*, ser. Addison-Wesley series in electrical engineering. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 1989.
- [II.6] **F. Rachidi and S. V. Tkachenko**, *Electromagnetic field interaction with transmission lines from classical theory to HF radiation effects*. WIT, 2008.
- [II.7] **M. Gunawardana and B. Kordi**, "Time-domain modeling of transmission line crossing using electromagnetic scattering theory," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 2, pp. 1020–1027, 2020.
- [II.8] **S. I. Abramowitz**, M., *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables (Partially Mathcad-enabled)*. U.S. Department of Commerce, NIST, 1972.
- [II.9] **P. R. Bannister**, "Applications of complex image theory," *Radio science*, vol. 21, no. 4, pp. 605–616, 1986.

- [II.10] **S. Tkatchenko, F. Rachidi, and M. Ianoz**, “Electromagnetic field coupling to a line of finite length: Theory and fast iterative solutions in frequency and time domains,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 4, pp. 509–518, 1995
- [II.11] “High-frequency electromagnetic coupling to transmission lines: electrodynamic correction to the tl approximation,” in *Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines: From Classical Theory to HF Radiation Effects*, **S. V. T. Farhad Rachidi, Ed. WITpress**, 2008, p. 128
- [II.12] **C. R. Paul**, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, 2nd Edition. Wiley IEEE Press, 2007
- [II.13] **M. Gunawardana, A. Ng, and B. Kordi**, “Time-domain coupling model for nonparallel frequency-dependent overhead multiconductor transmission lines above lossy ground,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1–1, 2021.
- [II.14] **N. Theethayi, R. Thottappillil, M. Paolone, C. A. Nucci, and F. Rachidi**, “External impedance and admittance of buried horizontal wires for transient studies using transmission line analysis,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, no. 3, pp. 751–761, 2007
- [II.15] **L. Qi, H. Yuan, L. Li, and X. Cui**, “Calculation of interference voltage on the nearby underground metal pipeline due to the grounding fault on overhead transmission lines,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 5, pp. 965–974, 2013.
- [II.16] **B. Gustavsen; A. Semlyen** « Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting », *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol.14, Issue: 3, July 1999.
- [II.17] **R. Araneo and S.Celozzi**, « Direct Time Domain Analysis of Transmission Lines Above a Lossy Ground». *IEE Proc. on Science and Measurement Technology*, Vol. 148(2), pp. 73–79, 2001.

- [II.18] **Orlandi and C. R. Paul**, "FDTD analysis of lossy, multiconductor transmission lines terminated in arbitrary loads," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 3, pp. 388-399, Aug. 1996.

Chapitre III

APPLICATIONS

I. Introduction

Ce dernier chapitre nous le consacrons aux applications. Nous commençons par une application des différentes expressions des paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles en utilisant les expressions décrites en chapitre II, ensuite nous proposons quelques applications qui concerne l'étude du comportement des lignes non parallèles lors de situations transitoires, telles que les l'impact direct d'une onde de foudre.

II.Paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles

Dans cette section, nous appliquons les différentes expressions présentées en chapitre II pour le calcul des paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles .

II.1. Validation des paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles pour un sol parfaitement conducteur

Pour cette validation nous traitons les cas d'un croisement entre deux lignes de transmission monofilaires aérienne de 500 kV et 230kV. Le rayon des deux conducteurs est 20mm. Les valeurs des paramètres géométriques sont données en figure III.1[III.1].

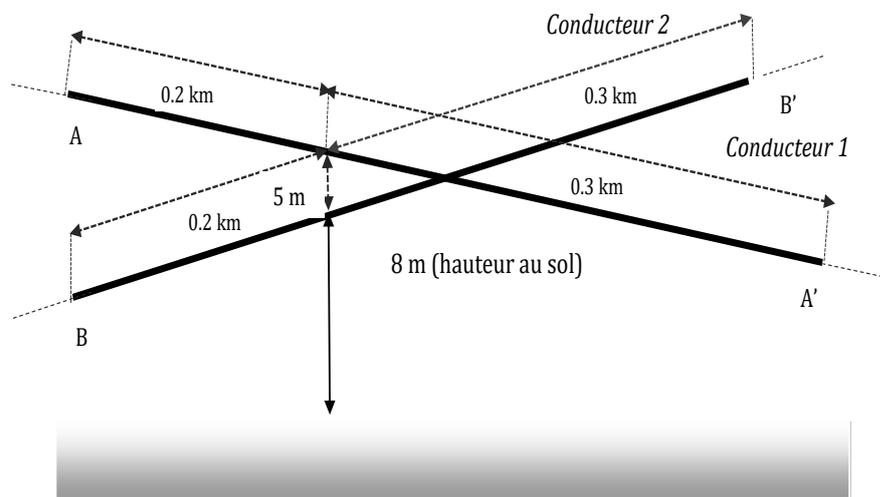


Figure III.1. Configuration étudiée

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à l'influence de l'angle du croisement α en le faisant varier entre 30° et 90° , l'évolution des paramètres linéiques en fonction de l'angle α est indiquée sur les figures III.2-III.5.

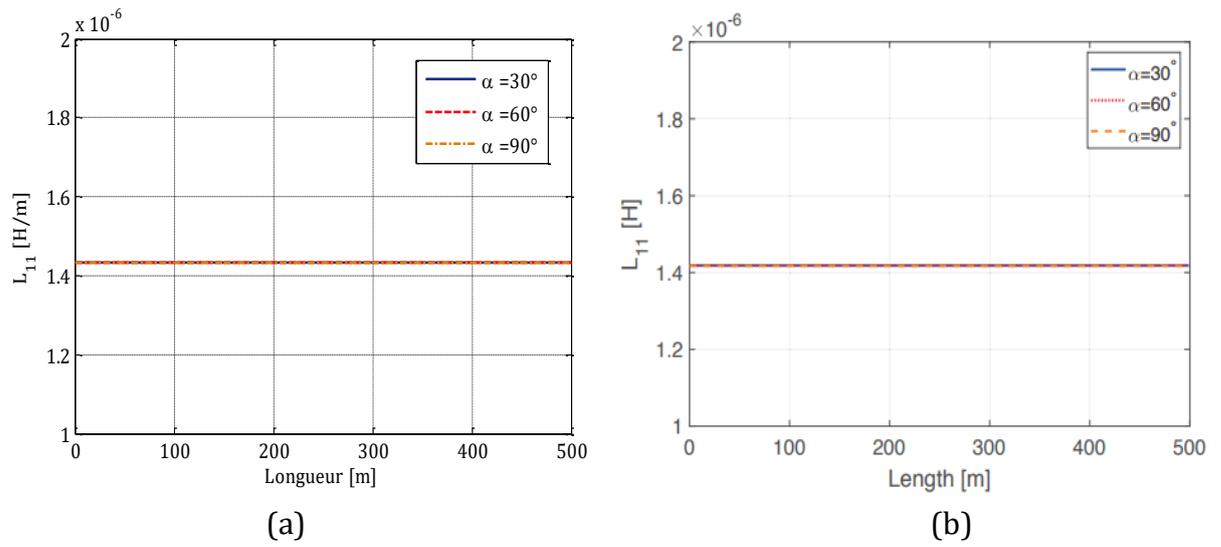


Figure III.2. L'inductance propre du conducteur 1, (a) notre résultat, (b) le résultat publié en [III.1]

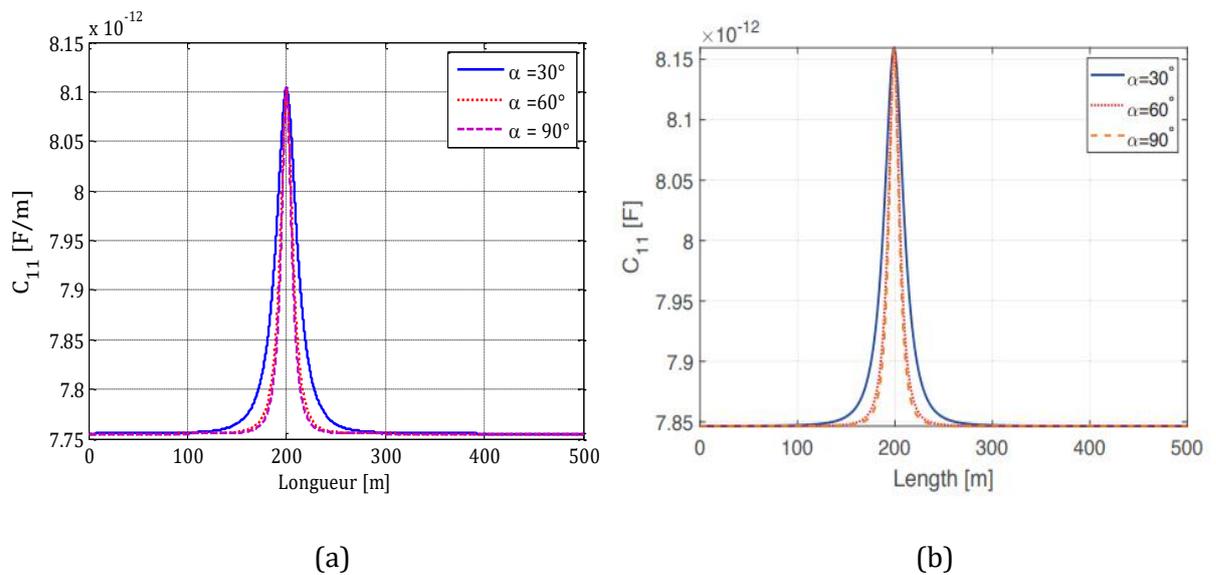


Figure III.3. La capacité propre du conducteur 1, (a) notre résultat, (b) le résultat publié en [III.1]

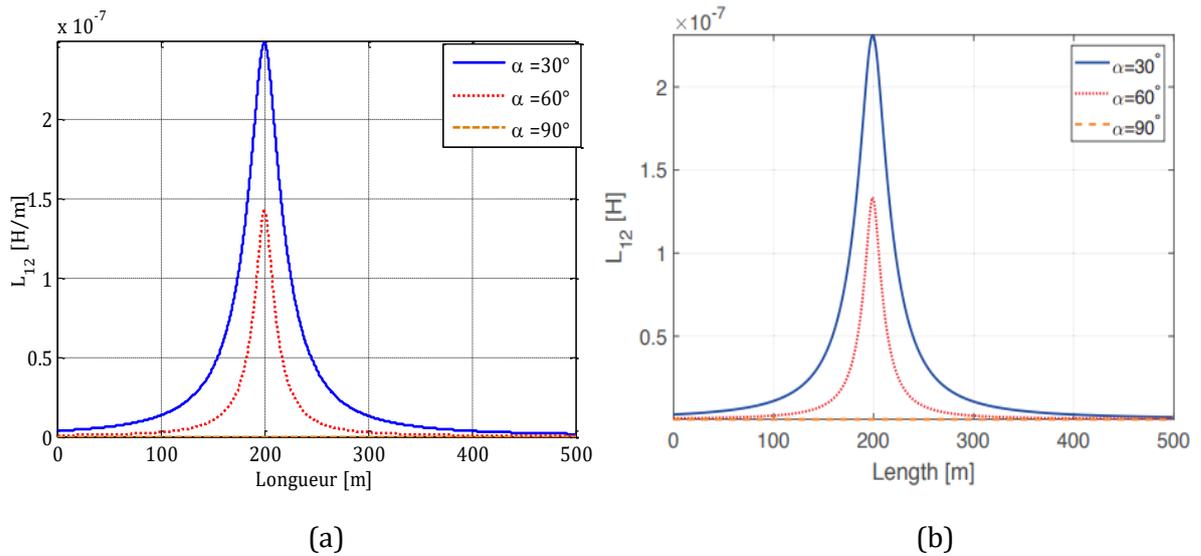


Figure III.4. L'inductance mutuelle entre les deux conducteurs, (a) notre résultat, (b) le résultat publié en [III.1]

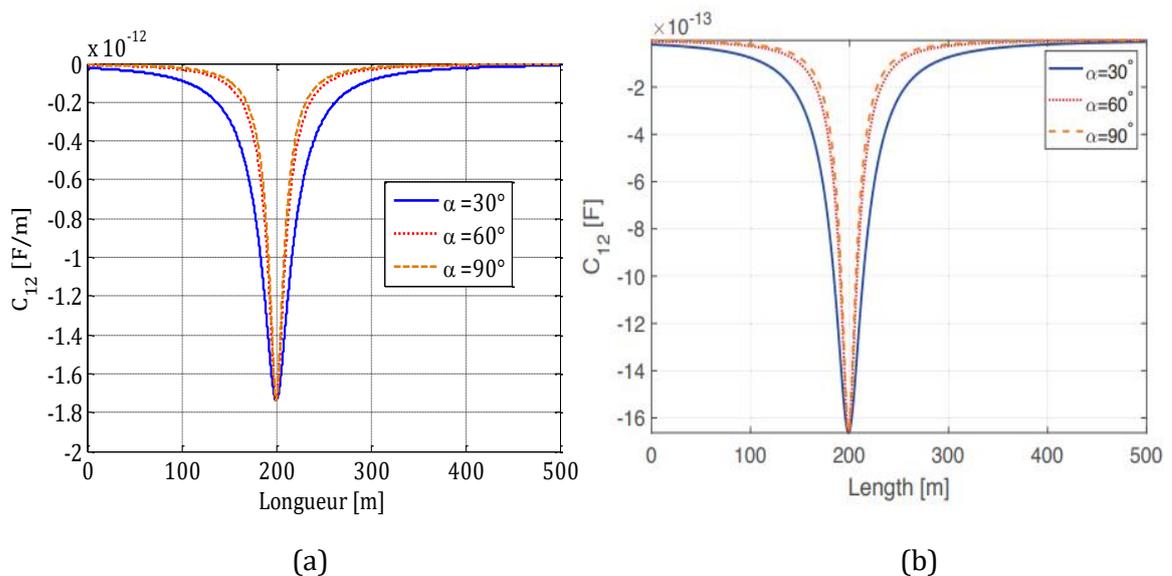


Figure III.5. La capacité mutuelle entre les deux conducteurs, (a) notre résultat, (b) le résultat publié en [III.1].

Les figures III.2, III.3, III.4 et III.5 représentent respectivement les variations de l'inductance propre L_{11} , la capacité propre C_{11} , l'inductance mutuelle L_{12} et la capacité mutuelle C_{12} en fonction de la position.

Comme expliqué dans le chapitre II, les paramètres linéiques variables dans l'espace en raison des non-uniformités des lignes de transmission.

Les résultats montrés en figures III.4 et III.5 montrent que les paramètres mutuels ont une valeur croissante dans les zones proches du croisement ou la distance entre les deux conducteurs est plus faible et donc le couplage est plus important.

Les résultats obtenus montrent aussi que le couplage devient de plus en plus important lorsque l'angle α du croisement diminue

II.2. Les paramètres linéiques des lignes de transmission non parallèles pour un sol de conductivité finie

Pour cette application nous traitons le cas d'un sol de conductivité finie $\sigma_g=0.01S/m$ pour la même configuration (figure III.1). L'angle du croisement $\alpha=30^\circ$.

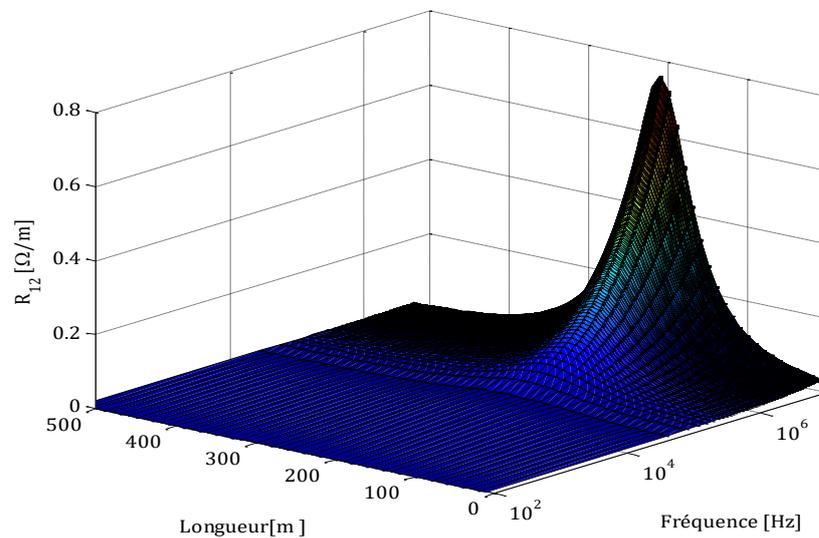


Figure III.6. La résistance mutuelle entre les deux conducteurs.

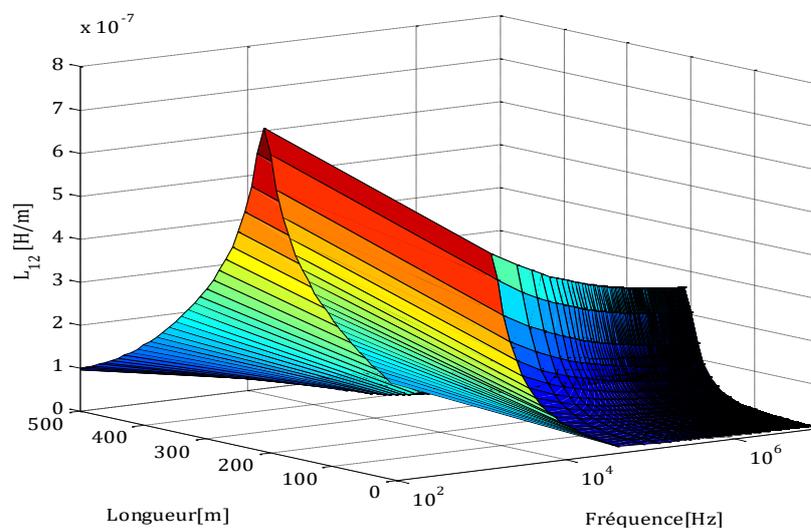


Figure III.7. L'inductance mutuelle entre les deux conducteurs.

Les figures III.6 et III.7 représentent respectivement la variation de la résistance et l'inductance mutuelle entre les deux conducteurs. On constate l'effet du croisement sur les paramètres linéiques, le couplage est plus important dans la zone proche du point de croisement. Aussi les paramètres linéiques sont fortement liés à la fréquence.

II.3. Les paramètres linéiques d'un système de lignes de transmission non parallèles constitué d'un conducteur aérien et d'un câble enterré

Dans cette section, nous appliquons les différentes expressions présentées en chapitre II pour le calcul des paramètres linéiques d'une ligne de transmission non parallèle constituée d'un conducteur aérien et d'un câble souterrain simplement isolé (figure III.8). Le câble contient une âme de rayon de 0.02m et un isolant d'épaisseur de 0.005m de permittivité relative de 2.5. Il est enterré à une profondeur de 1m dans le sol. Le conducteur aérien de longueur de 0.3km situé à une hauteur de 10m.

L'impédance et l'admittance totales du système ont été étudiées en fonction de la fréquence jusqu'à 10 MHz.

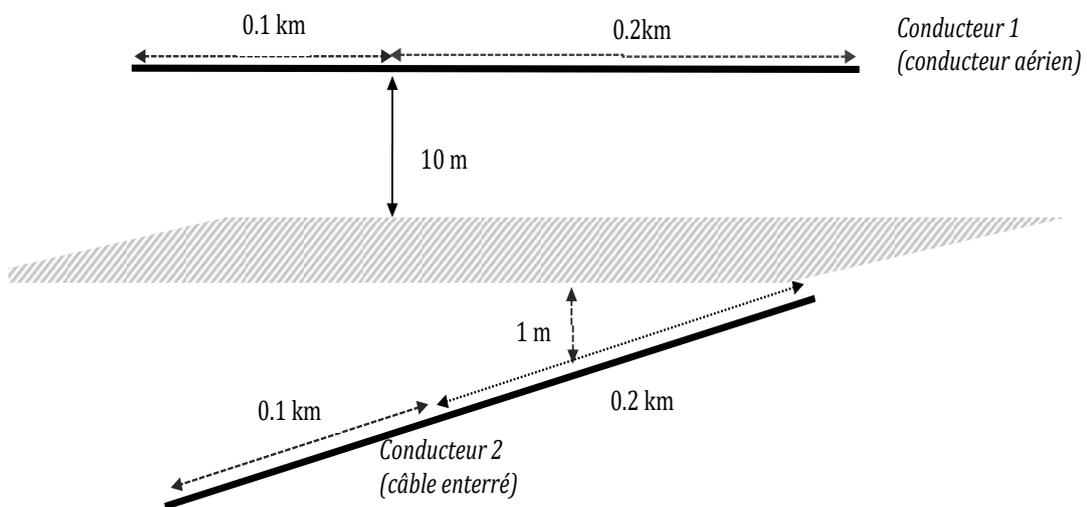


Figure III.8. Configuration du système

La résistance et la capacité mutuelles entre le conducteur aérien et le câble enterré sont calculées et représentées sur la figure III.9 et la figure III.10. Encore une fois, la dépendance fréquentielle et la variation en fonction de l'espace des paramètres ont été observées.

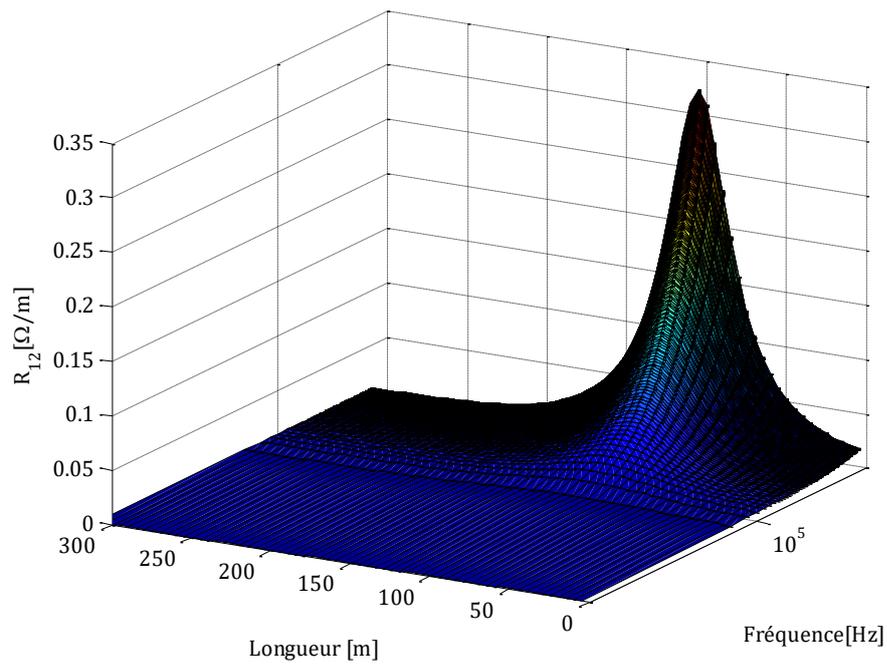


Figure III.9. La résistance mutuelle entre le conducteur aérien et le conducteur enterré.

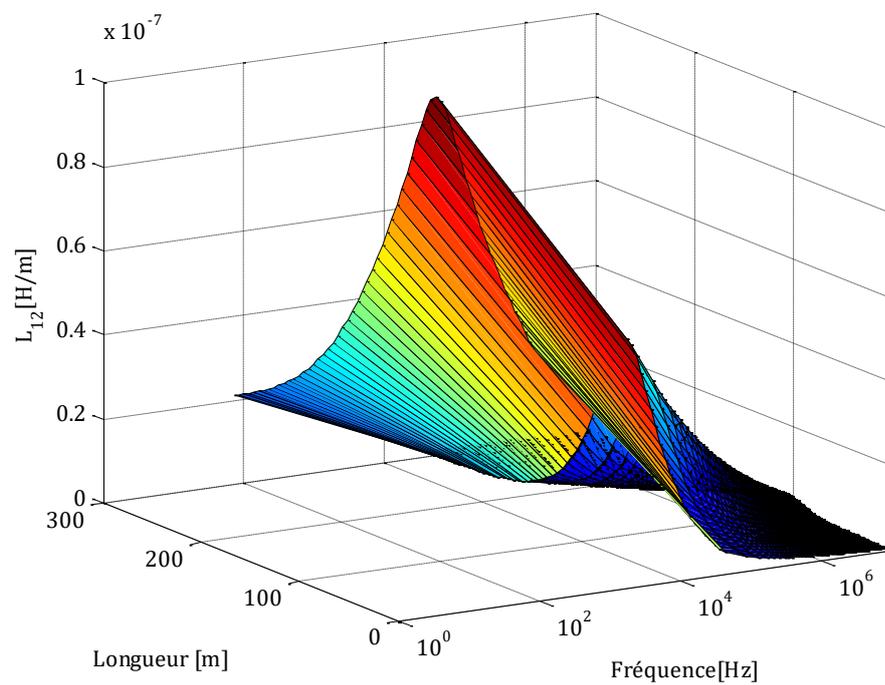


Figure III.10. L'inductance mutuelle entre le conducteur aérien et le conducteur enterré.

On calcule maintenant la matrice $[Y]$ comme détaillé en section III du chapitre II, les figures III.11 et III.12 montrent respectivement la variation de la conductance et la capacité du câble enterré en fonction de la fréquence.

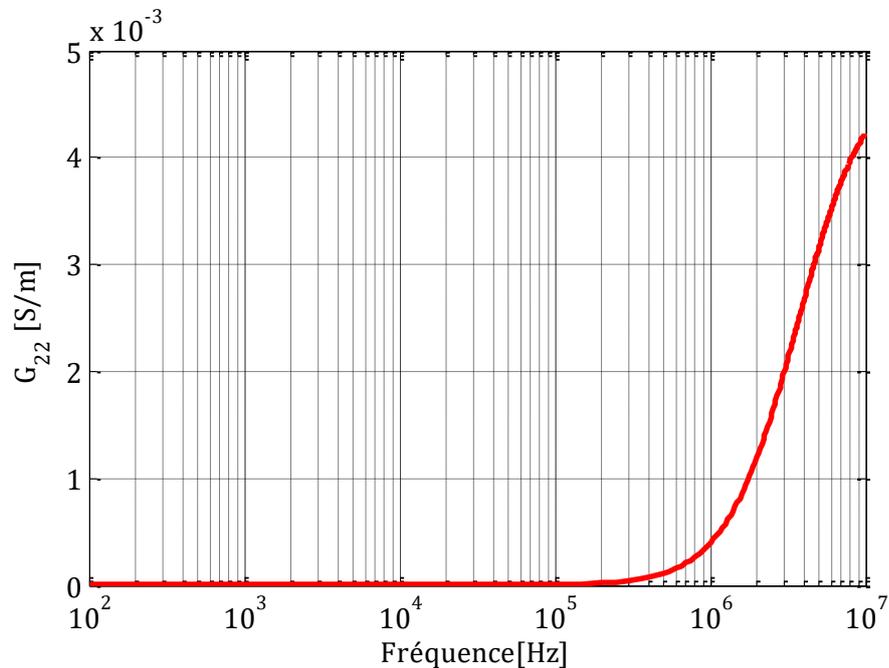


Figure III.11. La conductance propre du câble enterré (G_{22}).

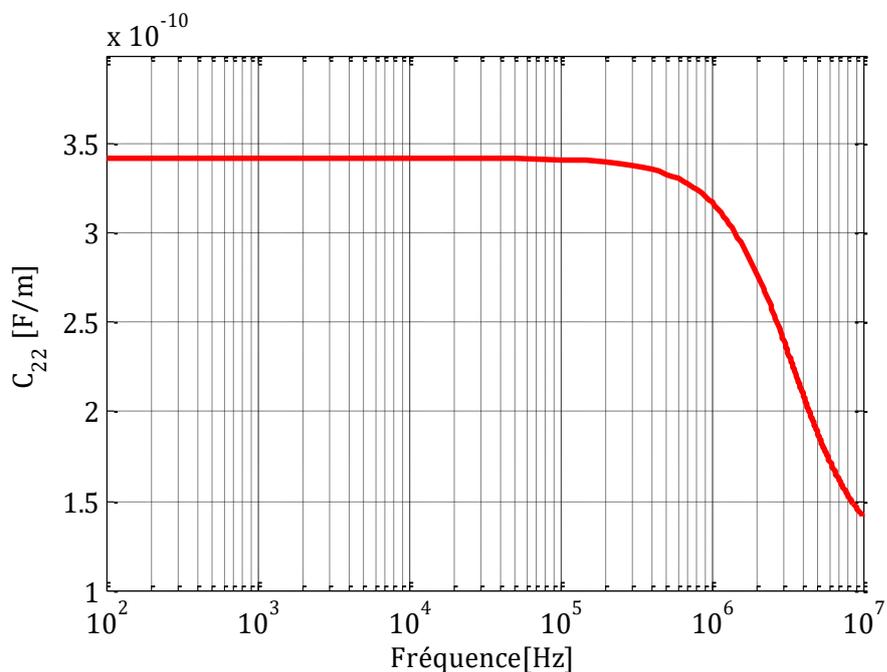


Figure III.12. La capacité propre du câble enterré (C_{22}).

La capacité reste constante pour des fréquences inférieures à 100 kHz ensuite elle diminue au fur et à mesure que la fréquence augmente. Pour la conductance elle reste

négligeable pour les fréquences inférieures à 100kHz ensuite elle augmente en haute fréquence.

III. Analyses des régimes transitoires

Il s'agit maintenant de réaliser des analyses transitoires afin d'analyser le comportement temporel du conducteur récepteur durant les transitoires.

III.1. Analyse de l'interaction électromagnétique entre deux conducteurs aériens

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats de la première application que nous avons réalisées, des courants induits sur une ligne de transmission (récepteur) lors de l'injection direct d'un générateur de courant type Heidler sur une deuxième ligne de transmission aérienne (émetteur), obtenus en appliquant le formalisme présenté en chapitre II.

Dans cette application nous considérons deux lignes de transmissions de longueur de 500m situées à des hauteurs de 8 m et 13 m respectivement, de rayons de 2cm, qui se croisent à une distance de 200m et forment un angle de 30°.

La source de courant injectée sur la première ligne de transmission est modélisée par une onde dite « 1,2/50 μs », signifiant que l'onde de choc atteint 90% du maximum à 1,2 μs et la moitié à 50 μs . Cette fonction est reproduite par les paramètres $\eta = 0,9496$, $\tau_1 = 2,2717 \mu\text{s}$ et $\tau_2 = 68,526 \mu\text{s}$, la valeur maximale $I_0 = 27\text{kA}$ (Figure III.14) [III.2].

Les deux lignes de transmission se terminent par leurs impédances caractéristiques. La conductivité du sol est supposée être infini, 0,01 S/m ou 0,001 S/m. La permittivité relative du sol est 10.

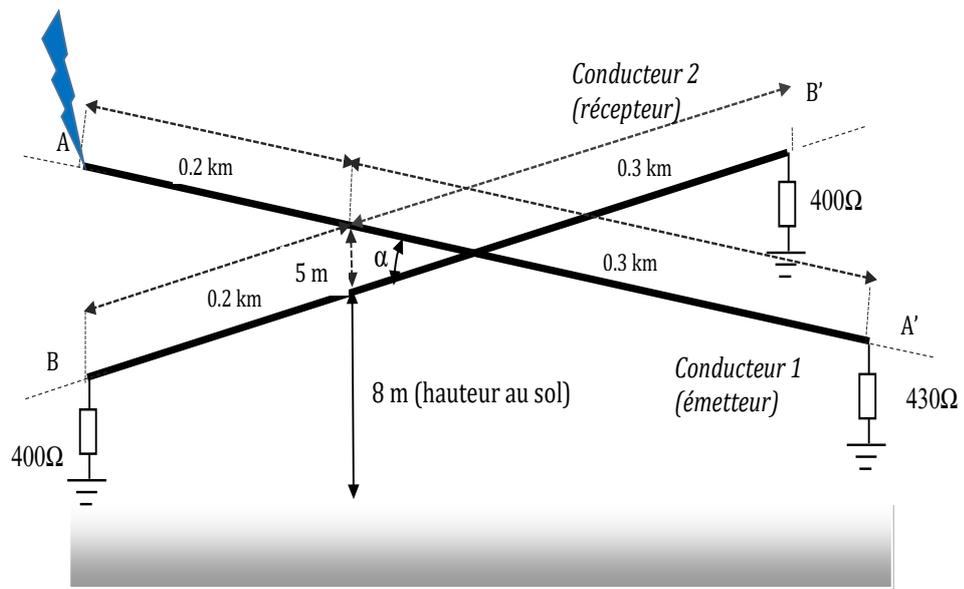


Figure III.13. Configuration du système

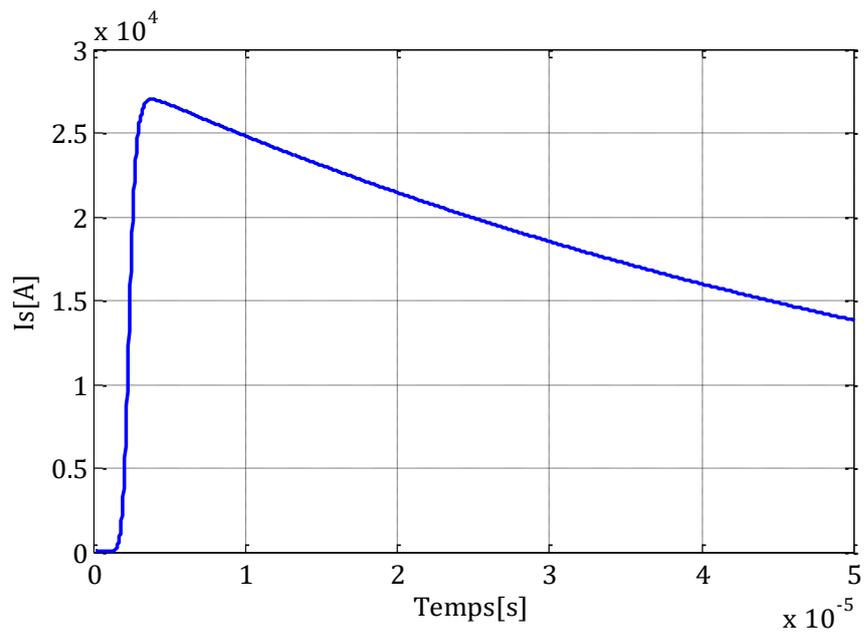


Figure III.14. Courant injecté

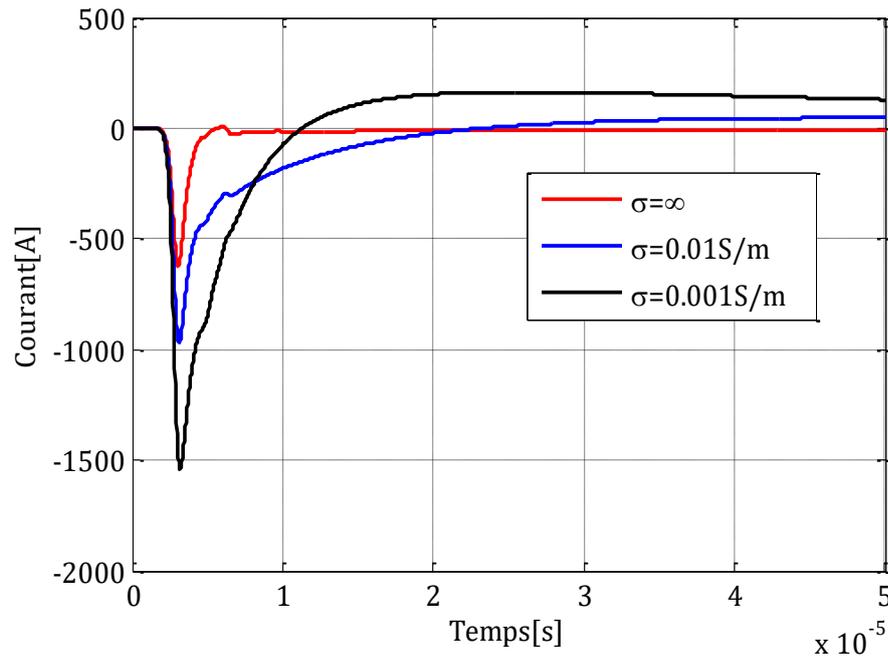


Figure III.15. Courant induit à l'extrémité B du deuxième conducteur

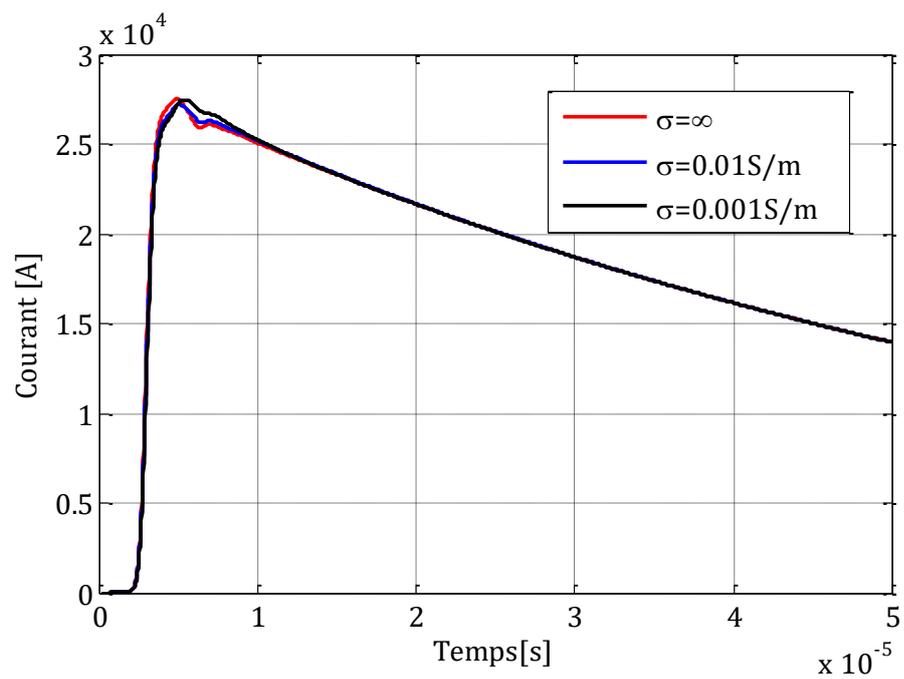


Figure III.16. Courant au point de croisement du premier conducteur

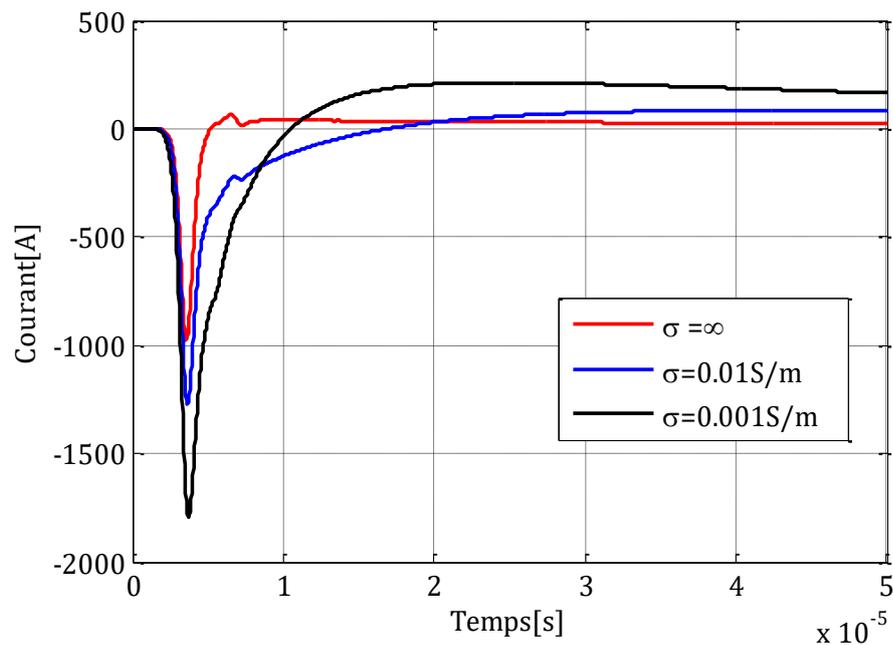


Figure III.17. Courant induit au point de croisement du deuxième conducteur.

Les figures III.15-III.17 illustrent l'effet de la résistivité du sol sur le courant induit, ou nous pouvons bien distinguer que l'amplitude du courant induit augmente quand la conductivité du sol diminue. Les résultats montrent aussi que les courants induits sont plus intenses au point de croisement.

➤ **Effet de l'angle du croisement α**

Cette application est consacrée à l'étude de l'effet de l'angle du croisement sur les courants induits.

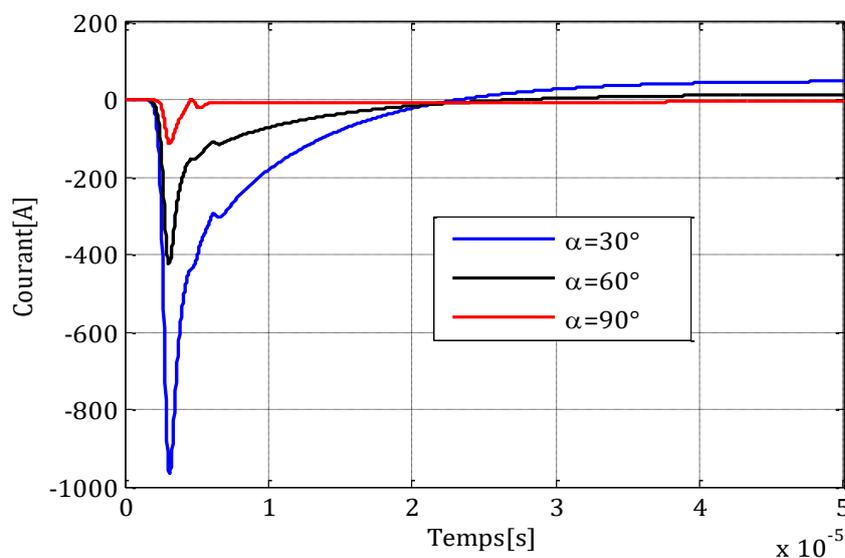


Figure III.18. Courant induit à l'extrémité B du deuxième conducteur.

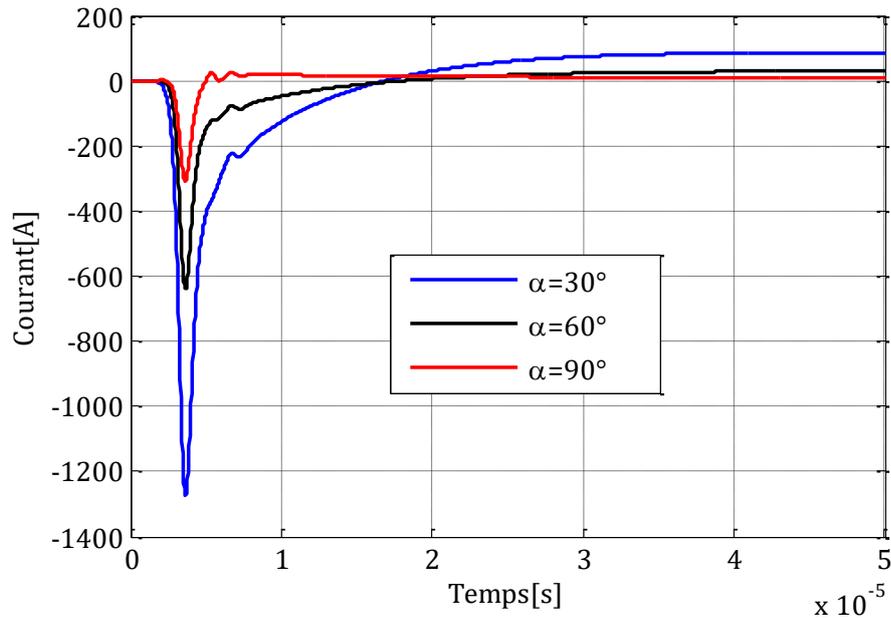


Figure III.19. Courant induit au point de croisement du deuxième conducteur

En figures III.18 et III.19 nous avons les résultats de calcul du courant induit dans le récepteur pour plusieurs valeurs de l'angle du croisement. Nous pouvons remarquer que la diminution de l'angle du croisement conduit à une augmentation de l'amplitude du courant induit, plus le récepteur sera proche à la source perturbatrice plus le champ électromagnétique sera plus intense et les courants induits seront plus intenses.

III.2. Analyse de l'interaction électromagnétique entre un conducteur aérien et un câble enterré

Pour cette application, nous traitons le cas d'un simple câble isolé (âme + isolant) enterré situé à proximité d'une ligne de transmission aérienne comme le montre la figure III.20. Ce câble est illuminé par l'onde électromagnétique émise par le conducteur aérien lors d'un impact direct d'une onde de foudre. Le conducteur aérien est de 300m de longueur, 10 m de hauteur avec un rayon de 20mm. La conductivité du sol est de 0.01S/m. Le conducteur aérien est alimenté par une source de tension type bi-exponentiel donc les paramètres $\alpha = 0.54\mu\text{s}^{-1}$ et $\beta = 8.73\mu\text{s}^{-1}$ avec une amplitude maximale de 1V (figure III.21). Le câble a une longueur de 300m, enfouie à une profondeur de 1m. Les deux extrémités (âme) du câble se terminent par une impédance caractéristique. Nous nous intéressons dans cette application aux surtensions induites.

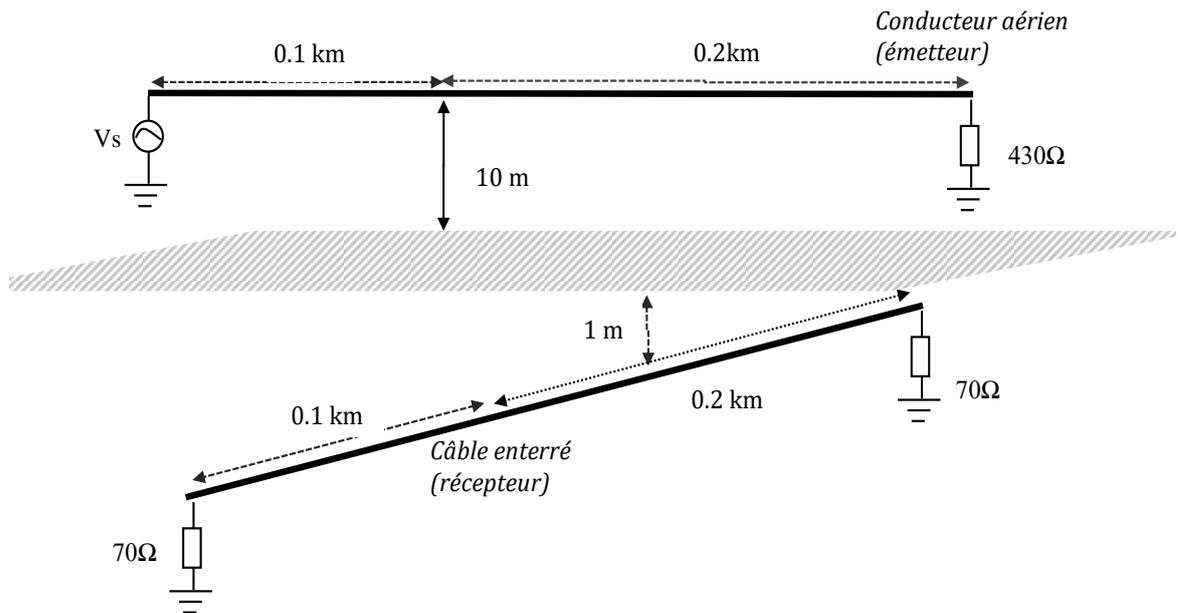


Figure III.20. Configuration étudiée

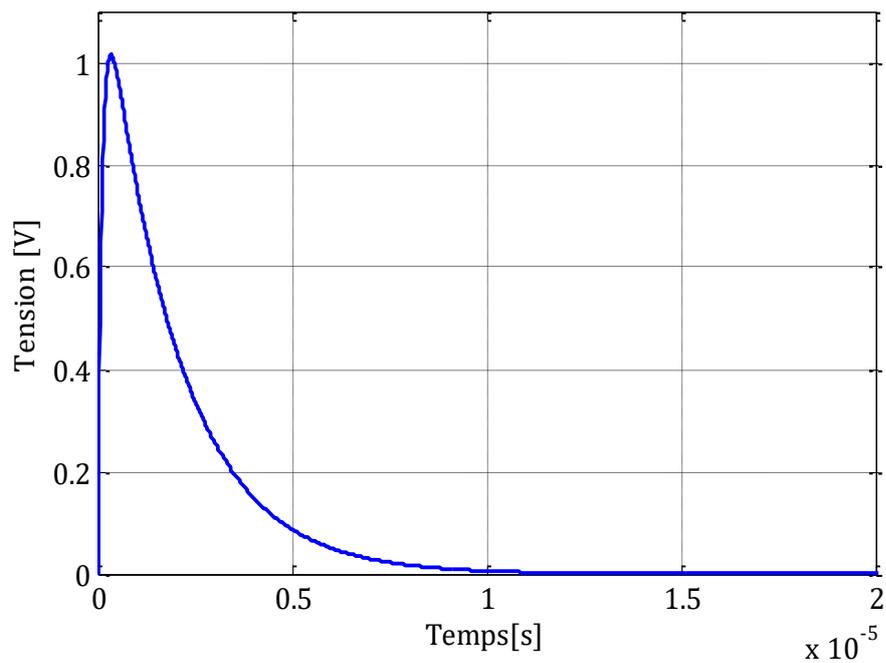


Figure III.21. Tension injectée.

En figure III.22 nous avons les résultats de calcul de la tension induite dans le récepteur (câble enterré) pour plusieurs valeurs de la conductivité du sol.

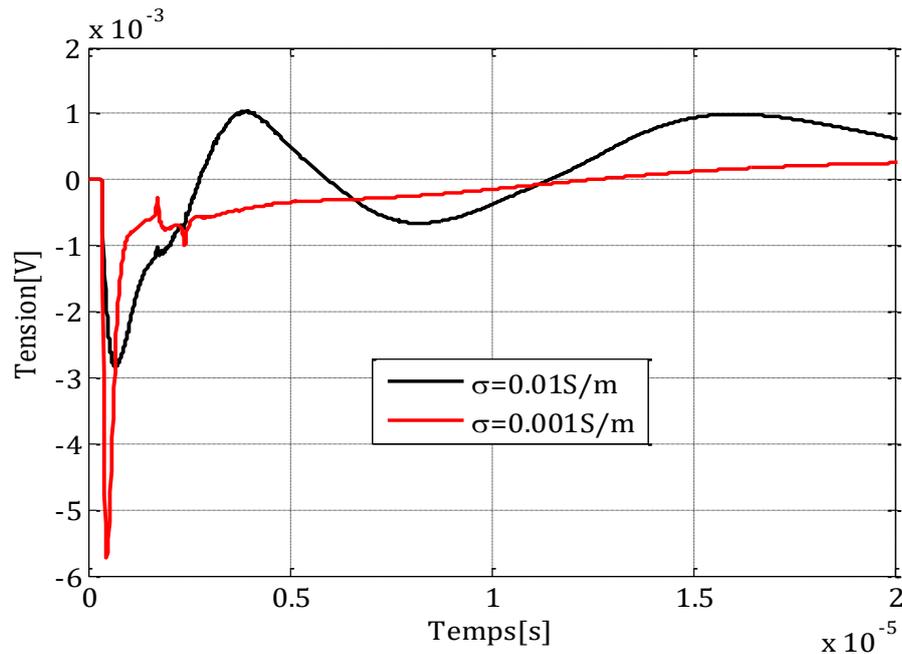


Figure III.22. Tension induite au point de croisement du câble enterré.

D'après les résultats obtenues on remarque que la tension induite augmente avec la diminution de la conductivité du sol.

➤ **Effet de l'angle du croisement**

Pour cette application nous considérons la même configuration de la figure III.20, avec une conductivité du sol égale à 0.01 S/m , mais en changeons l'angle du croisement α .

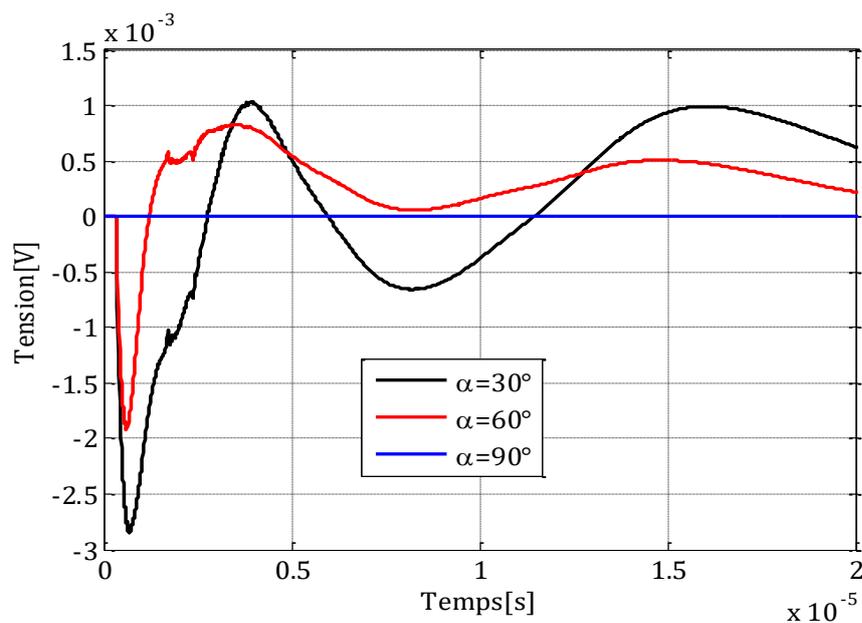


Figure III.23. Tension induite au point de croisement du câble enterré.

Les résultats montrés en figure II.23 montrent bien l'effet de l'angle du croisement sur l'amplitude de la tension induite dans un câble enterré simplement isolé.

➤ Effet de l'isolant

Pour cette application nous gardons la configuration en figure III.20, nous comparons les surtensions induites dans le câble enterré en présence et en absence de l'isolant.

Les résultats en figure III.24 pour la tension induite pour câble simplement isolé et une barre conductrice, montre bien l'effet de l'isolant; l'amplitude de la tension induite pour le câble simplement isolé (figure III.24) est bien supérieure à celle de la tension induite dans la barre conductrice de même rayon.

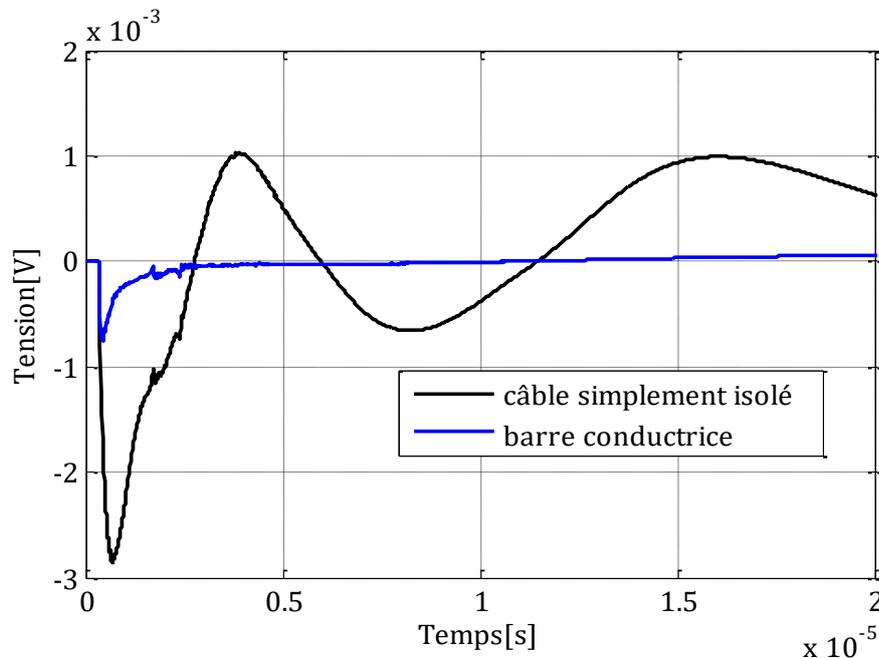


Figure III.24. Tension induite au point de croisement du câble enterré

➤ L'effet de la profondeur d'enfouissement

L'analyse de l'effet de la profondeur est particulièrement importante, car un câble (ou toute autre installation souterraine) n'est pas forcément à l'abri des ondes électromagnétiques par le simple fait qu'il soit enterré dans le sol.

Pour cette application, nous considérons deux profondeurs d'enfouissements " d " du câble, et nous analysons l'effet de cette dernière sur les tensions induites. Nous examinons les profondeurs suivantes :

$$d_1 = 0.5m$$

$$d_2 = 1m$$

La conductivité du sol est 0.01S/m, les données du système, les charges aux extrémités sont celles de la figure III.20.

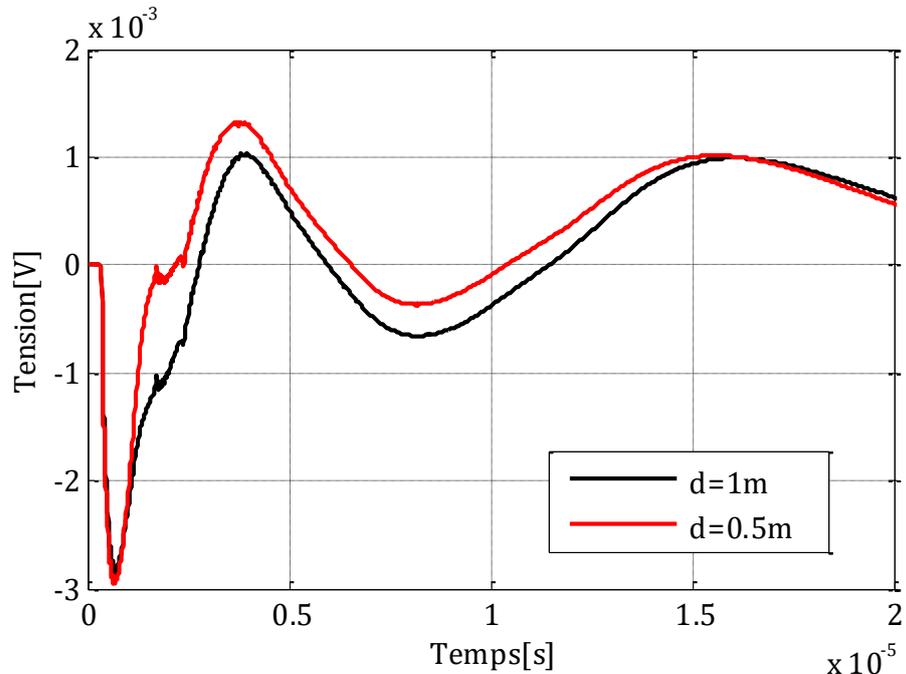


Figure III.25. Tension induite au point de croisement du câble enterré

En figure III.25, où nous avons la variation des tensions induites dans le câble enterré, nous constatons que la profondeur d'entassement n'a pas un effet appréciable sur les tensions induites.

IV. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à quelques applications qui nous ont permis d'analyser le comportement transitoire des lignes de transmission non parallèles, plus précisément les lignes de transmission qui se croisent et forment un angle, en réponse à une excitation électromagnétique due à l'impact direct d'une onde de foudre. Nous avons traité le cas où le conducteur récepteur soit aérien ou enterré.

Références Bibliographiques

- [III.1] **M. Gunawardana** and **B. Kordi**, "Time-Domain Modeling of Transmission Line Crossing Using Electromagnetic Scattering Theory," 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 1-1.
- [III.2] **D. Lovric**, **S. Vujevic**, and **T. Modric**, "On the estimation of Heidler function parameters for reproduction of various standardized and recorded lightning current waveshapes," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 23, no. 2, pp. 290–300, 2011.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les lignes de transmission jouent un rôle crucial dans la fourniture d'électricité fiable et économique aux consommateurs, en permettant le transport de l'énergie des sources de production vers les zones de consommation.

Les lignes de transmission peuvent être affectées par différents types de surtensions telles que la foudre ou les surtensions de manœuvres.

Les surtensions peuvent endommager les équipements électriques, réduire la fiabilité du système et entraîner des pannes coûteuses.

La modélisation correcte des lignes détermine la précision avec laquelle les formes d'ondes calculées appliquées à l'équipement électrique correspondent aux conditions réelles du système. D'où l'intérêt de calculer les paramètres dans une précision acceptable. Il existe quatre paramètres principaux pour la modélisation des lignes: la résistance longitudinale et l'inductance, capacitance transversale et conductance. La résistance et l'inductance sont plus sensibles à la variation de la fréquence.

L'application de câbles souterrains au voisinage d'une ligne aérienne dans les réseaux électriques aura un impact sur le comportement du système d'alimentation en tant que tel dans plusieurs aspects. Les réponses transitoires des câbles diffèrent considérablement des lignes aériennes ce qui a des répercussions sur le fonctionnement du système d'alimentation en termes de stabilité du réseau et de sécurité d'approvisionnement.

L'objectif principal de ce mémoire de master est d'analyser l'interaction électromagnétique entre les lignes de transmission non parallèles. Nous avons particulièrement consacré notre travail à l'analyse des surtensions et surintensité de foudre induites sur les systèmes de lignes de transmission qui se croisent.

Nous avons présenté les expressions des impédances et des admittances pour un système de lignes de transmission non parallèles déduites par M. Gunawardana[III.1] qui dépendent de la fréquence et de l'espace.

Nous avons mis en évidence l'effet de la résistivité du sol et l'angle du croisement sur les différents termes d'impédance et d'admittance. Les résultats ont montré que les termes mutuels des impédances et admittances ont une valeur croissante dans les zones proches du croisement ou la distance entre les deux conducteurs est plus faible et donc le couplage est plus important.

Les résultats ont montré aussi que les impédances et les admittances sont très affectées par la fréquence pour le cas d'un sol de conductivité finie.

Les applications dédiées au calcul des courants et tensions induits sur un conducteur aérien ou enterré suite à un impact direct d'une onde de foudre sur une ligne de transmission aérienne, montrent bien l'effet de l'angle du croisement sur les intensités des courants et tensions induits.

Une étude paramétrique pour le câble enterré a été faite. D'après les résultats obtenus nous avons constaté que les amplitudes des surtensions induites sont plus importantes pour des valeurs de conductivité du sol faibles. Aussi nous avons mis en évidence l'effet de l'isolant ou nous avons montré que les tensions induites sont plus faibles en absence de l'isolant.

En perspectives, il serait intéressant d'approfondir l'étude en traitant le cas de l'impact indirect de l'onde de foudre, et d'analyser le spectre fréquentiel des surtensions obtenues.