

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER ACADEMIQUE**
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie Electrique
Spécialité : **Réseaux électriques**

Présenté par
Yacine FILALI
Hocine BRAHIMI

Thème

**Caractérisation des paramètres inductifs
d'une ligne aérienne avec la méthode
des éléments finis**

Mémoire soutenu publiquement le 25 / 06 / 2015 devant le jury composé de :

M Mohand-Tahar BELASSEL
MCA, UMMTO, Président

M Youcef BOUTORA
MCA, UMMTO, Encadreur

M Mustapha MOUDOUD
MCA, UMMTO, Examineur

M Djaffar BOUGUEDAD
MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier notre promoteur Mr Y.BOUTORA pour avoir accepté de diriger ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants du département de l'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions à nos familles et tous les amis (es).

Enfin, nous tenons à remercier également les membres du jury qui feront l'honneur de juger notre travail.

DEDICACES

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :

A mes chers parents

A mes sœurs

A mes frères

A toute les amis

Hocine

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :

A mes très chers parents qui m'ont soutenu de mieux qu'ils peuvent

A tous mes frères et sœurs.

A toute la famille et a tous mes cousins et cousine et tous les amis

YACINE

Introduction générale01

Chapitre I : les lignes de transport et de distribution de l'énergie électrique

Introduction02

I.1. Historique02

I.2. Types de lignes de transports et de distributions03

I.2.1. Lignes de distribution BT03

I.2.2. Lignes de distribution MT04

I.2.3. Lignes de transport HT.....04

I.2.4. Lignes de transport THT04

I.3. Les Matériaux les plus utilisés pour les conducteurs des lignes électriques04

I.3.1. Cuivre04

I.3.2. Aluminium05

I.3.3. Alliage d'aluminium05

I.3.4. Acie galvanisé06

I.4. Description des lignes aériennes06

I.4.1. pylônes06

I.4.2. conducteurs	07
I.4.3. Isolateurs	08
I.4.4. câbles de garde	08
I.4.5. signalisation	08
I.5. Conception des lignes électriques aériennes	09
I.5.1. Armement	09
I.5.1.a. Armement en triangle	09
I.5.1.b. Armement en nappe (horizontal)	09
I.5.1.c. Armement en drapeau	10
I.6. Sécurité des lignes de transport et de distribution d'énergie électrique	10
I.7. Modèle généraux des lignes électriques	11
I.8. Avantages et inconvénients des lignes aériennes	13
Conclusion	14

Chapitre II. Formules de calcul analytique des paramètres inductifs des lignes aériennes

Introduction	15
II.1. Inductance linéique	15
II.2. Calcul de l'inductance propre	16
II.2.1. Cas unifilaire	16

II.2.2.Cas monophasé	19
II.2.3. cas triphasée équilibré	21
II.3. calcul de l'Inductance mutuelle	23
II.3.1.Cas monophasé	23
II.3.2.Cas triphasé	23
Conclusion.....	24

Chapitre III. Présentation de la méthode des éléments finis et le logiciel femm

Introduction	26
III.1.présentation de la méthode des éléments finis	26
III.2.Principe de la méthode des éléments finis	27
III.3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	27
III.3.1.Les avantages	27
III.3.2. Les inconvénients	27
III.4. Présentation de logiciel libre femm	28
III.5.Les différentes étapes de réalisation d'une structure à l'aide de FEMM	28
III.5.1.Definition du type de problème	28
III.5.2. Géométrie	29

III.6.Les conditions aux limites	30
III.6.1.Conditions aux limites de type Neumann	31
III.6.2.Conditions aux limites de type Dirichlet	31
III.6.3.Conditions aux limites Mixtes (Neumann-Dirichlet)	31
III.7.Milieux	32
III.8.Le Maillage	32
III.9.Language de programmation LUA	33
Conclusion	33

Chapitre IV : Application et validation des résultats obtenus

Introduction	34
IV.1. Nomenclature	34
IV.2.Cas unifilaire	35
IV.2.1.Interprétation des résultats obtenus dans le cas unifilaire	39
IV.3.Cas monophasé	40
IV.3.1.Interprétation des résultats obtenus dans le cas monophasé	42
IV.3.2.Les résultats de l'inductance mutuelle obtenus dans le système monophasé	43
IV.3.3.Interprétation des résultats de l'inductance mutuelle obtenus dans le cas monophasé	44
IV.4.Cas triphasé équilibré en triangle	44

IV.4.1. Interprétation des résultats obtenus dans le cas triphasé équilibré	46
IV.4.2. Résultats de calcul de l'inductance mutuelle obtenue dans le cas triphasé	48
IV.4.3. Interprétation des résultats de l'inductance mutuelle obtenus dans le cas triphasé équilibré	48
Conclusion	48
Conclusion générale	49

Introduction générale

La production de l'énergie électrique se fait au niveau des centrales électriques, celles-ci sont souvent éloignées des lieux de consommation, d'où la nécessité de mettre en œuvre un réseau de lignes électriques qui assurera le transport de cette énergie.

Le transport ou l'acheminement de l'énergie électrique de différentes catégories de consommateurs (hôpital, entreprise, ménages et écoles....etc.) nécessite ce qu'on appelle des réseaux de transport et de distribution par câbles électriques qui sont suspendus au-dessus du sol à l'aide de pylônes ou enterrés sous terre dans des conduits. Ils sont parfois tirés sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres. Ces infrastructures assurant la liaison entre la fonction production et la fonction distribution qui ne sont autres que les lignes aériennes ou les câbles souterrains possèdent des caractéristiques qui dépendent de la longueur.

A cet effet, il est impératif de faire appel aux paramètres linéiques d'une ligne et qui sont les inductances, les capacités, les résistances relatifs a une longueur très faible notée dl divisés par cette distance dl , c'est pourquoi, une telle appellation autrement dit paramètres par unité de longueur.

Dans notre travail, nous nous intéressons à la détermination des paramètres inductifs avec deux méthodes : la méthode des éléments finis avec le logiciel FEMM et une méthode analytique. Avant d'aborder l'expression de chacun de ces paramètres inductifs, on va citer les différentes manières dont sont disposés les conducteurs des lignes unifilaire, monophasés et triphasés même si on traite souvent une phase pour mettre en évidence certains mécanismes physiques.

Notre mémoire sera structuré sur quatre chapitres présentés comme suit:

- Le premier chapitre portera sur la description et la conception des lignes aériennes de transport et distribution de l'énergie électrique.
- Le deuxième chapitre portera sur la méthode de calcul analytique des paramètres inductifs des lignes aériennes.
- Le troisième chapitre: la présentation de la méthode des éléments fins et le logiciel FEMM
- Quatrième chapitre : application et validation des résultats

Et on termine par une conclusion générale.

*Chapitre I : Les lignes de transport et de distribution
d'énergie électrique*

Introduction :

Une ligne aérienne est une autoroute de l'énergie. Elle permet de transporter sur de grandes distances de grandes quantités d'énergie, elle doit être un ouvrage de technologie simple, fiable et rapide à étudier et à réaliser. Elle doit s'accommoder aux contraintes du tracé et d'un accès facile pour l'exploitation [1].

Habituellement, le transport de l'énergie électrique ne suscite pas le même intérêt que sa production et son utilisation, de sorte qu'on a souvent tendance à négliger l'étude de ce sujet important [1]. Pourtant, les investissements humains et matériels affectés au transport dépassent largement les investissements consacrés au secteur de la production. Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doit satisfaire aux exigences suivantes :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations ne dépassent pas les 10% de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas les 0.1hz.
- Fournir l'énergie a un prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
- Veiller à la protection de l'environnement.

I.1. Historique :

Le 14 juillet 1729, la première transmission d'impulsion électrique sur une longue distance a été fait par le physicien STEPHEN GRAY qui a utilisé des cordes de chanvre humide suspendus par des fils de soie (l'importance des conducteurs métalliques n'était pas appréciée à l'époque). Il voulait prouver la possibilité de transférer de l'électricité par ce moyen [3].

- La première déclinaison pratique en sera la télégraphie.
- En 1882, la première transmission à haute tension se fait entre Munich et Bad brook.
- En 1891, le premier usage de courant alternatif triphasé sur les lignes aériennes se fait à l'occasion du salon international de l'électricité à Francfort, entre Lauffen et Francfort.
- En 1912, la première ligne à haute tension (110 kV) entre en service.
- En 1923, pour la première fois, c'est une tension de 220 kV qui est appliquée à la ligne.

Chapitre I : Les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique

- En 1957, la première ligne de 380 kV entre en service (entre une station de transformation et Rommerskirchen en Allemagne). Dans la même année, la ligne aérienne traversant le détroit de MESSINE a été mise en service en Italie.
- Dès 1967 en Russie, et aussi aux Etats-Unis et au Canada, des lignes à haute tension de 765 kV sont construites.
- En 1982, des lignes sont construites en union soviétique, entre Elektrostal (près de Moscou) et la centrale électrique d'Ekibastouz (Kazakhstan) alimenté par un courant alternatif triphasé à 1200 kV.
- En 2003, la construction de la plus grande ligne à haute tension débuté en chine (en :YangtzeRiverCrossing).
- En 2009 (le 06 janvier), la State Grid Corporation of China active sa première ligne à 1000 kV. La tension maximale de service est égale à 1100 kV. L'inde prévoit un fort développement de son réseau 800 kV, et vers 2013-2014, la mise en service d'un réseau 1200 kV.

I.2 Types de lignes de transports et de distributions :

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

1. Puissance active à transporter
2. Distance de transport
3. Coût
4. Esthétique, encombrement et facilité d'installation

Nous distinguons quatre types de lignes :

II.2.1. Lignes de distribution BT :

Ce sont les lignes et la filerie installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes...etc. Le tableau électrique d'entrée constitue la source, et les lignes sont habituellement des câbles ou des barres omnibus fonctionnant à des tensions inférieures à 600 V. Dans certaines régions métropolitaines, on utilise un réseau maillé comprenant une grille de câbles souterrains fonctionnant à 600 V ou moins. Ce réseau maillé assure un service impeccable, car le bris d'un ou même de plusieurs câbles n'interrompt pas la distribution de courant aux clients. Cependant, aujourd'hui, on préfère employer un réseau de distribution radial à moyenne tension dans les grandes villes [4].

Chapitre I : Les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique

II.2.2. Lignes de distribution MT :

Ce sont des lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité. Leur tension est comprise entre 2,4 kV et 69 kV [4].

II.2.3. Lignes de transport HT :

Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de générations. Elles sont constituées de fils aériens ou de câbles souterrains fonctionnant à des tensions généralement inférieures à 230 kV. Dans cette catégorie, on trouve aussi les lignes servant à échanger de l'énergie entre deux grands réseaux et à augmenter la stabilité de l'ensemble [4].

II.2.4. Lignes de transport THT : ce sont les lignes qui relient les centrales hydrauliques éloignées aux centres d'utilisation. On les place dans une catégorie distincte à cause de leurs propriétés spéciales. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV. Les lignes à courant continu à haute tension sont également incluses dans ce groupe [4].

I.3. Les Matériaux les plus utilisés pour les conducteurs des lignes électriques :

Les matériaux conducteurs les plus couramment utilisés pour les lignes électriques sont le cuivre, l'aluminium, alliage aluminium, l'aluminium à âme d'acier, l'acier galvanisé et le cuivre au cadmium. Les conducteurs électriques d'une ligne peuvent être [1] :

- Pleins
- à brins multiples constitué d'un même métal
- à brins multiples constitué d'un deux métal différents
- avec un vide à l'intérieur

I.3.1. Cuivre

Est un matériau idéal pour les lignes aériennes en raison de sa haute conduction électrique et de sa grande résistance à la traction. Il est toujours utilisé dans la forme étirée dure comme toron. Le cuivre a une grande densité de courant avec une capacité de transport de courant de cuivre par unité de section assez grande.

Il n'y a guère de doute que le cuivre est un matériau idéal pour la transmission et la distribution de l'énergie électrique. Toutefois, en raison de son coût élevé et de la non-

Chapitre I : Les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique

disponibilité, il est rarement utilisé puisque actuellement la tendance est à utiliser de l'aluminium [1].

I.3.2.Aluminium

L'aluminium n'est pas cher et plus léger par rapport au cuivre, mais sa conductivité et sa résistance à la traction sont réduites. La comparaison relative des deux matériaux est explicitée ci- dessous :

- L'aluminium est souvent utilisé dans le transport d'électricité de grande puissance lorsque la section du câble et sa longueur élimine le cuivre, à cause de sa masse spécifique plus élevée. Il est quasiment exclusivement utilisé en âmes à brin multiples, du fait des sections en jeux et de sa relative rigidité. Sa relative facilité de casse lors de torsions et de manipulation le rend indésirable en milieu domestique.
- Il est utilisé à la place de cuivre dès que la contrainte poids devient importante : aéronautique, conquête, spatiale...etc.
- La densité de l'aluminium (2.71g/dm^3) est inférieure à celle de cuivre (8.9g/dm^3) ; par conséquent, un conducteur en aluminium possède presque un tiers de poids équivalent d'un conducteur en cuivre. Pour cette raison, les structures portantes de l'aluminium ne doivent pas être réalisées de manière aussi forte que celle du conducteur de cuivre. L'aluminium est léger et est de nature à subir de plus grandes variations, de plus grandes traverses sont requises.

Compte tenu des propriétés combinées de coût, de conductivité, de résistance à la traction, de poids, ... etc. l'aluminium a un avantage certain sur le cuivre, raison pour laquelle il est largement utilisé en tant que matériau conducteur. Il est particulièrement rentable d'utiliser l'aluminium pour la transmission à courant fort ou la taille du conducteur est large [1,3].

I.3.3.Alliage d'aluminium

Il a été développé des alliages d'aluminium réalisant un compromis intéressant entre une résistivité électrique suffisamment faible et une résistance mécanique acceptable de manière à pouvoir fabriquer des câbles dépourvus d'âme d'acier [1].

I.3.4. Acier galvanisé

L'acier a une très haute résistance à la traction, par conséquent, les conducteurs en acier galvanisé peuvent être utilisés pour de très longues durées ou pour des sections de ligne courtes exposées aux contraintes anormalement élevées dues aux conditions climatiques. Ils ont été trouvés très appropriés dans les zones rurales où le coût minimal est la principale considération. En raison de la mauvaise conductivité et de la forte résistance de l'acier, ces conducteurs ne sont pas adaptés pour la transmission de grande puissance sur une longue distance [1].

I.4. Description des lignes aériennes :

Une ligne de transport se compose de supports (pylônes), conducteurs, et d'isolateurs.

I.4.1. pylônes :

Pour les lignes aériennes, des pylônes, généralement réalisés en treillis d'acier, supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles ; ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolé) pour en limiter le poids et le coût.

L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés, tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager) [3].



Figure (I.1) : un pylône des lignes électriques.

I.4.2.conducteurs :

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs, généralement sous forme triphasée, avec au moins trois conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de deux à quatre) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes et d'augmenter la puissance pouvant transiter.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés et sont remplacés, en général, par des conducteurs en alliage d'aluminium, ou en combinaison aluminium-acier pour les câbles plus anciens. Ce sont des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant.

Les conducteurs de haute tension sont aériens ou souterrains (et parfois sous-marins). 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 électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum sur les conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, ...etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transmission, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. La position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ électromagnétique [3].

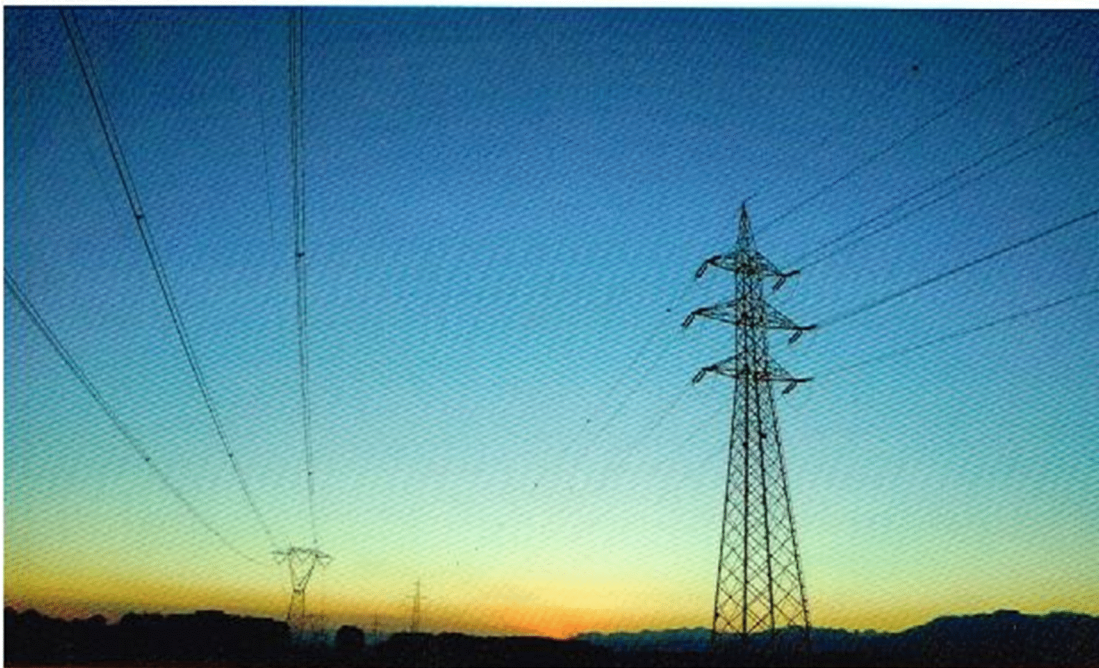


Figure (I.2) : lignes à haute tension

I.4.3. Isolateurs :

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former les chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Sur une ligne 400 kV, les chaînes d'isolateurs comportent 19 assiettes. On peut alors deviner la tension des lignes en multipliant le nombre d'isolateurs par 20 kV environ [4].

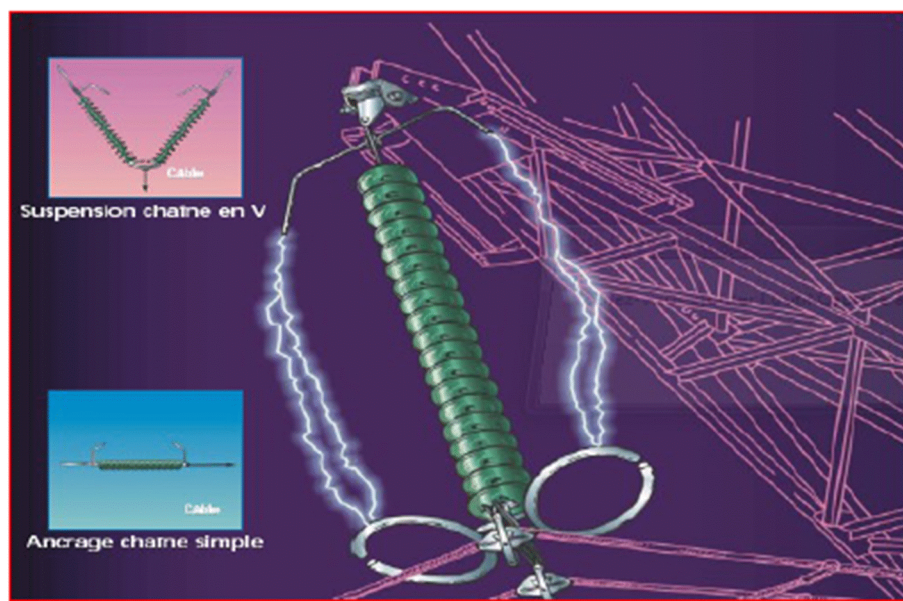


Figure (I.3) : une chaîne d'isolateur

I.4.4. câbles de garde :

Sont des conducteurs non isolés disposés au sommet des pylônes de la ligne. Ces conducteurs, appelés câbles de garde, servent à capter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tension de la ligne. Ils ne portent aucun courant ; pour cette raison, ils sont ordinairement en acier. On les relie solidement à la terre à chaque pylône [4].

I.4.5. signalisation :

Afin d'éviter les impacts d'aéronefs, les lignes sont signalées par des balise diurnes (boules) ou nocturnes (dispositifs lumineux), aux abords des aéroports et aérodromes. La partie supérieure du fût du pylône est peinte en rouge et blanc. D'autres dispositifs sont utilisés pour

Chapitre I : Les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique

la protection avifaune dans les zones sensibles (couloirs de migration en particulier), comme des spirales de couleurs qui, outre l'aspect visuel, sifflent sous l'effet du vent ou encore des silhouettes de rapaces placés en tête de pylône qui provoquent par reflexe une élévation du vol pour échapper au supposé prédateur [3].

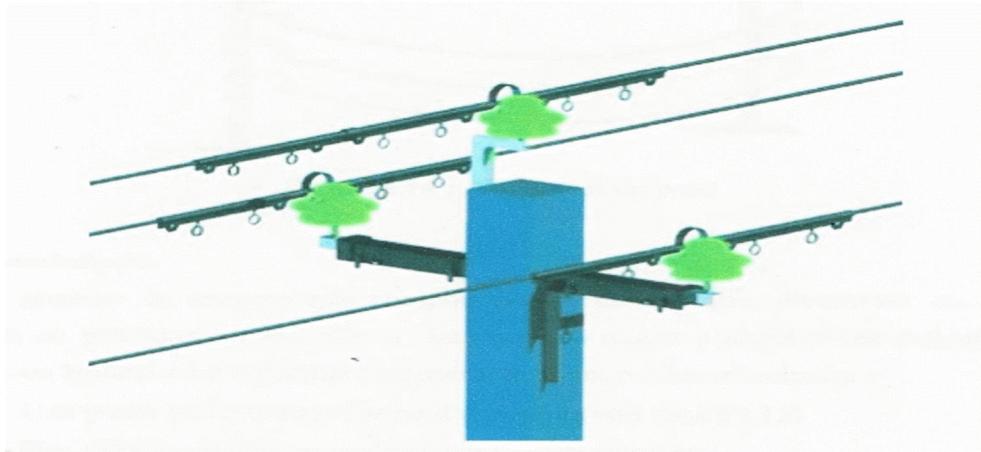
I.5. Conception des lignes électriques aériennes :

I.5.1. Armement :

On appelle armement d'une ligne électrique l'ensemble des accessoires (tête du support, ferrures et isolateurs) nécessaires au support d'une ligne électrique en haut d'un pylône. Il doit être tel que les conducteurs ne puissent se toucher entre eux ou entrer en contact avec le sol dans l'espace compris entre deux supports consécutifs que l'on appelle « portée » [1]. On distingue quatre types d'armement, à savoir :

I.5.1.b. Armement en triangle :

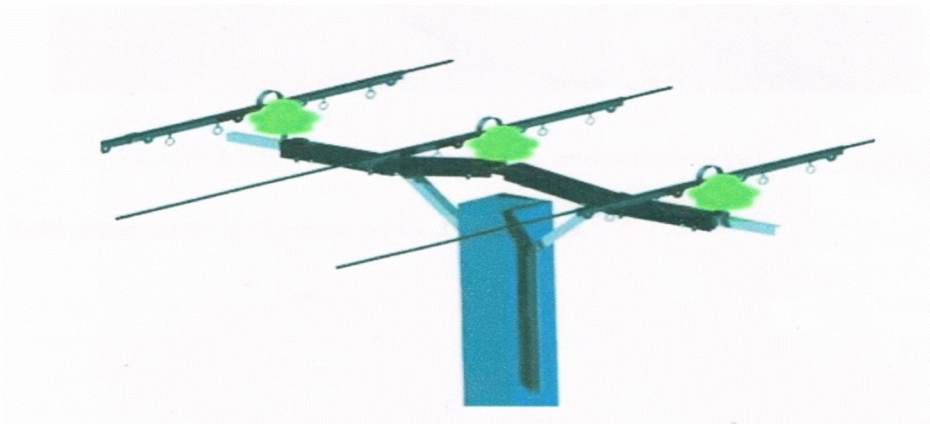
Conducteurs situés aux sommets d'un triangle isocèle à la base verticale. Très souvent en triangle équilatéral [1], tel que employé pour les lignes (HT) et surtout celles à très haute tension (THT), voir figure (I.5).



Figure(I.5) : Armement en triangle

I.5.1.c. Armement en nappe (horizontal) :

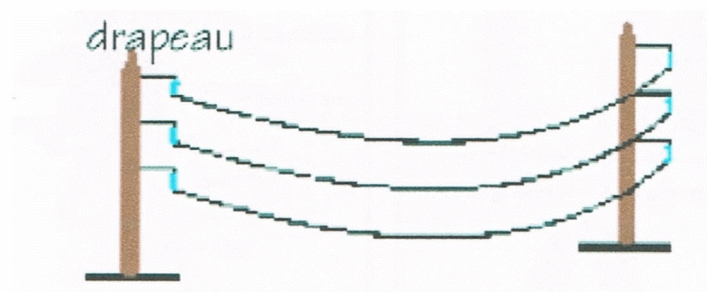
Les points d'attaches des conducteurs sur les isolateurs sont sur la même droite horizontale, voir la figure (I.6) [1].



Figure(I.6) : armement en nappe (horizontal)

I.1.d'Armement en drapeau :

Les conducteurs sont situés les uns sur les autres particulièrement employé pour les lignes basses tension, voir la figure (I.7) [1].



Figure(I.7) : armement en drapeau

I.6. Sécurité des lignes de transport et de distribution d'énergie électrique :

➤ Le système de protection :

A l'instar des alternateurs, des transformateurs et des lignes, d'autres dispositifs existent, pour assurer, non seulement un fonctionnement normal, mais aussi, la protection des équipements et du personnel d'exploitation du réseau. Cela englobe, les

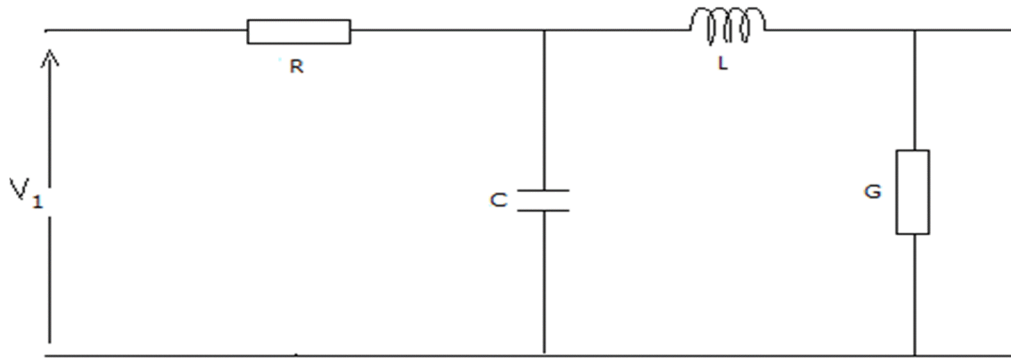
transformateurs de mesures, les disjoncteurs, les interrupteurs, les sectionneurs, les fusibles, les éclateurs et sont directement reliés au réseau. Ces dispositifs permettent d'interrompre volontairement, la fourniture d'énergie électrique, mais aussi, à tout moment la surveillance automatiquement d'une quelconque perturbation (défaut). Les équipements de contrôle associés à ces dispositifs ainsi que les relais de protection sont installés dans les salles de contrôle [2].

➤ **Le centre de contrôle ou dispatching :**

Pour un fonctionnement fiable et économique d'un réseau d'énergie électrique, il est indispensable de surveiller, contrôler le réseau dans sa globalité à partir d'un centre de contrôle ou centre de conduit ou encours dispatching. Les dispatchings modernes sont des centres de contrôle de l'énergie. Ces derniers sont équipés d'ordinateurs traitant en temps réel les signaux provenant d'un dispositif d'acquisition de données. Ces ordinateurs effectuent leurs traitements de données selon une structure hiérarchique permettant de coordonner, et de répondre, à différentes exigences, liées aussi bien au fonctionnement normal du réseau, qu'aux situations d'urgence. Ils alertent les opérateurs, dès que toute situation anormale de fonctionnement est décelée, leur permettant ainsi évaluer l'évènement, et de prendre les mesures adéquates, en agissant par l'intermédiaire de leur console sur les éléments du réseau et ainsi remédiera cette situation. Des outils de simulation ainsi qu'un ensemble de logiciels écrits dans un langage de haut niveau sont implémentés pour assurer un fonctionnement efficace et un contrôle fiable de réseau [2].

I.7.Modèle généraux des lignes électriques :

Les lignes électriques possèdent des propriétés électriques communes malgré leur diversité. En effet, une ligne possède une résistance, une conductance, une réactance inductive et une réactance capacitive [1]. Ces impédances sont réparties uniformément sur toute la longueur de la ligne si bien qu'on peut représenter la ligne par une série de section R, L, C identiques comme on peut le voir sur la figure(I.8). Pour un régime équilibré on utilise l'un des schémas équivalents monophasé montré sur la figure (I.9, I.10).



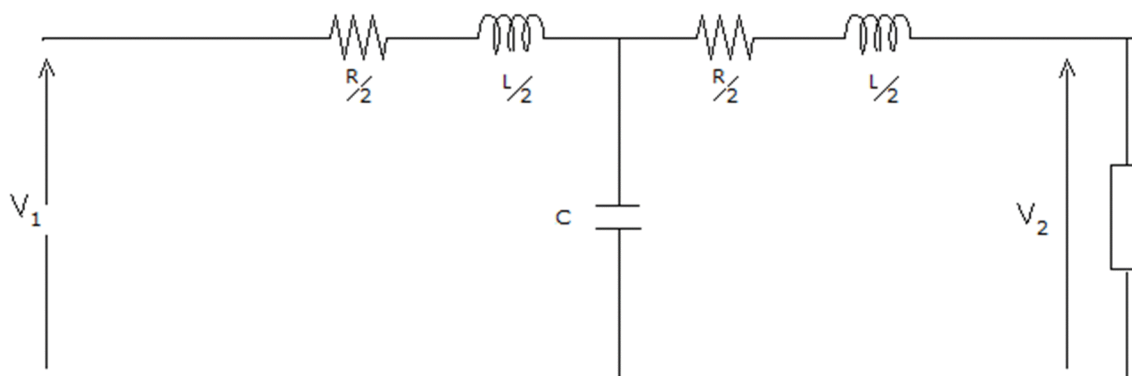
Figure(I.8) : schéma équivalent d'une ligne électrique

r : résistance longitudinale par unité de longueur.

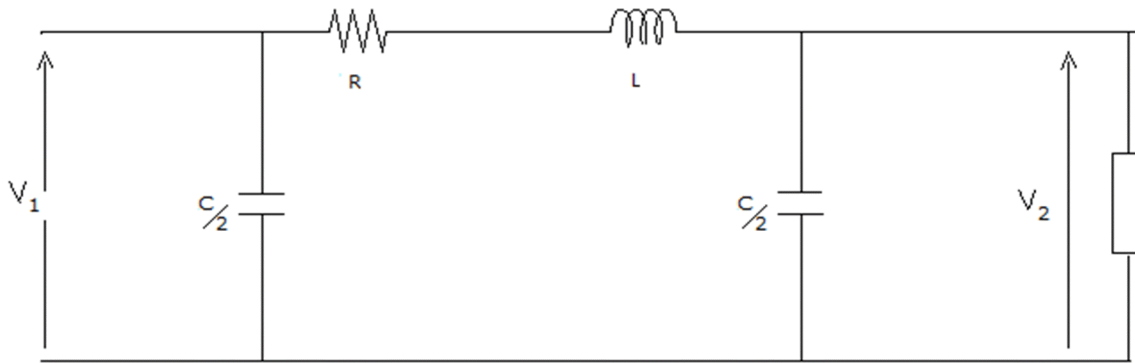
l : inductance longitudinale par unité de longueur.

c : capacité transversale par unité de longueur.

g : conductance transversale par unité de longueur.



Figure(I.9) : schéma équivalent monophasé forme T



Figure(I.10) : schéma équivalent monophasé forme π

I.8. Avantages et inconvénients des lignes aériennes :

Le tableau ci-après résume brièvement les avantages et les inconvénients des lignes Aériennes [5,6].

	Avantages	inconvénients
Lignes aériennes	<ul style="list-style-type: none"> -Frais de construction et d'entretien acceptable. - surveillance facile. - détection des défauts. - défauts souvent fugitifs. - peuvent être réparés très rapidement en cas d'accident. 	<ul style="list-style-type: none"> - sont exposées aux surtensions d'origine atmosphérique; - leur installation donne lieu a de difficiles discussions avec les propriétaires des terrains surplombés ; - sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication; - dangers pour l'aviation et en cas de rupture de conducteurs ;

Tableau(I.1) : avantages et inconvénients des lignes aériennes

Conclusion

Dans ce chapitre consacré aux lignes aériennes de transport d'énergie électrique, nous avons établi les différentes composantes nécessaires au transport de l'énergie électrique. Comme on a aussi étudié les propriétés électriques des lignes aériennes de transport. Chaque phase d'une ligne peut être représentée par un circuit équivalent comprenant une résistance et une inductance série et par deux capacités shunt.

***Chapitre II : Formules de calcul analytique des paramètres
inductifs des lignes aériennes***

Introduction

Les lignes aériennes assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances, et sont des systèmes à constantes réparties, c'est-à-dire que les grandeurs physiques (résistance, inductance et capacité) sont réparties sur toute la longueur de la ligne et ne sont donc pas localisées [1].

Dans ce qui suit, nous allons établir le calcul de la grandeur caractéristique qu'est l'inductance. On note l'équation du flux $\phi = LI$, où L est l'inductance du conducteur qui est toujours positive, ne dépendant que de la géométrie du conducteur et s'exprimant en Henry (H).

Nomenclature :

- L : inductance de la ligne (H/km) ;
- μ : perméabilité magnétique du conducteur ;
- r : le rayon du conducteur (m) ;
- d_m : distance moyenne géométrique entre phase (m) ;
- J : densité du courant ;
- λ : le flux magnétique total ;
- ϕ : le flux magnétique ;
- B : l'induction magnétique ;
- H : le champ magnétique ;
- w : l'énergie magnétique emmagasinée dans les lignes du champ ;
- I : le courant électrique ;
- d : distance entre phase;
- M : inductance mutuelle ;
- r : Le rayon du conducteur

II.1. Inductance linéique :

Une inductance (supposée linéique) est toujours le quotient entre le flux magnétique embrassé par la boucle conductrice et le courant qui la parcourt [1]. Chaque tronçon de ligne électrique est aussi soumis à un champ magnétique variable créée par le courant circulant dans les tronçons voisins. Il est donc le siège de phénomènes d'induction caractérisé par l'inductance (L). Cette dernière dépend des éléments suivant :

- Le rayon de conducteur ;
- Le type de matériau du conducteur à utiliser (magnétique ou non magnétique) ;
- La distance entre les phases de la ligne ;
- Le nombre de conducteurs par phase de la ligne ;
- Le nombre de conducteurs sur les supports ;

Nous avons deux types d'inductances :

- L'inductance propre (ou self-inductance) d'un conducteur électrique parcouru par un courant qui est définie, a un instant donné, comme étant le rapport entre les valeurs du flux induit par le courant et ce courant lui-même.
- L'inductance mutuelle se manifeste par l'interaction entre les conducteurs de phase entre les conducteurs des différents ternes et tous les conducteurs parcourus par un courant tel que le fil de garde et le retour par la terre [1].

Pour le développement de modèles de lignes de transport, on détermine l'inductance d'un câble de longueur infinie. Le flux total englobe :

- Le flux interne.
- Le flux externe.

II.2. Calcul de l'inductance propre :

II.2.1. Cas unifilaire :

Le champ H en un point M situé dans le conducteur ($OM=x$) est donné par le théorème d'Ampère [2, 11, 12,18].

$$B=\mu H \quad \lambda=LI \quad (II.1)$$

$$\int_0^{2\pi x} H_x dl = I_x \quad H.2\pi x=I_x \quad (II.2)$$

➤ Inductance interne :

x : distance entre le centre du conducteur et le point M.

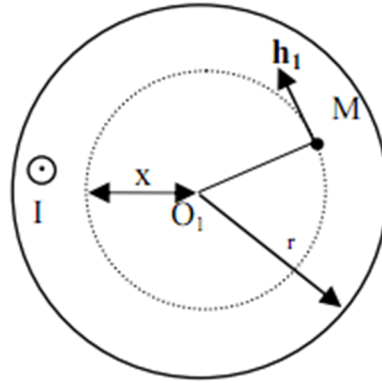


Figure II.1 : câble unifilaire

$$j = j_1 = \frac{I_1}{s_1} = \frac{I}{s} \quad (\text{II.3})$$

$$j_1 = \frac{I_1}{s_1} = \frac{I_1}{\pi x^2} \quad s_1 = \pi x^2 \quad (\text{II.4})$$

$$I_1 = \frac{I \pi x^2}{\pi r^2} = \frac{I x^2}{r^2} \quad s = \pi r^2 \quad (\text{II.5})$$

$$H \cdot 2\pi x = I_1 \quad H = \frac{I_1}{2\pi x} = \frac{I x}{2\pi r^2} \quad (\text{II.6})$$

$$B = \mu_0 H \quad B = \frac{I \mu_0 x}{2\pi r^2} \quad (\text{II.7})$$

$$\lambda = LI$$

$$d\phi_x = B_x dx = \frac{I x \mu_0}{2\pi r^2} dx \quad (\text{II.8})$$

Seule la fraction $\frac{\pi x^2}{\pi r^2}$ est entourée par le flux

$$d\lambda_x = \frac{x^2}{r^2} d\phi_x = \frac{I \mu_0}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx \quad (\text{II.9})$$

$$\lambda_x = \frac{\mu_0 I r^4}{8\pi r^4} = \frac{\mu_0 I}{8\pi} \quad (\text{II.10})$$

L'énergie emmagasinée dans un conducteur cylindrique élémentaire d'épaisseur d_x et de longueur unitaire est alors exprimée à partir de la relation:

$$W_i = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \varnothing I = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi} \quad \lambda = \varnothing = LI \quad (\text{II.11})$$

$$W_i = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi} \quad (\text{II.12})$$

A partir de l'expression de l'énergie électromagnétique emmagasinée (W_i) dans un tronçon de longueur unitaire d'un conducteur seul, on obtient son inductance interne :

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (\text{II.13})$$

➤ **Inductance externe :**

$$d\lambda_x = d\varnothing_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx \quad (\text{II.14})$$

Entre deux points D_1 et D_2 :

$$\lambda_x = \varnothing_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{D_1}^{D_2} \frac{1}{x} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (\text{II.15})$$

Donc l'expression de l'inductance externe est donnée par:

$$W_{ext} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \varnothing I = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (\text{II.16})$$

$$L_{ext} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.17})$$

L'énergie magnétique emmagasinée dans les lignes du champ est :

$$W = W_i + W_{ext} \quad (\text{II.20})$$

$$W = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi} + \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)\right) \quad (\text{II.21})$$

A partir de l'expression de l'énergie magnétique (W) on obtient l'inductance du conducteur :

$$L = \frac{2W_T}{I^2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \right) \quad (\text{II.22})$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \right) \quad (\text{H/m}) \quad (\text{II.23})$$

D_1 : Le rayon du conducteur

D_2 : La distance d'un point par rapport à le rayon du conducteur

II.2.2. Cas monophasé :

➤ Inductance interne :

Pour l'inductance interne pour un seul conducteur est la même avec le cas unifilaire qui s'écrit par la relation suivante :

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.24})$$

➤ Inductance externe :

Le théorème d'ampère permet d'exprimer les champs magnétique H_1 et H_2 , créés par les deux conducteurs en un point M d'abscisse $OM=x$ figure (II.2) à l'aide des relations (II.25) et (II.26).

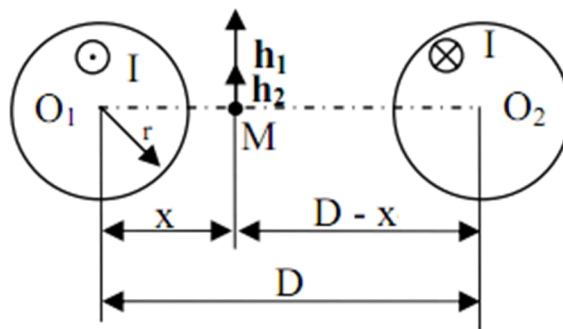


Figure (II.2) : notation pour le calcul de l'inductance externe L_e , d'une ligne monophasée

$$H_1 \cdot 2\pi x = I \quad (\text{II.25})$$

$$H_2 \cdot 2\pi(D - x) = I \quad (\text{II.26})$$

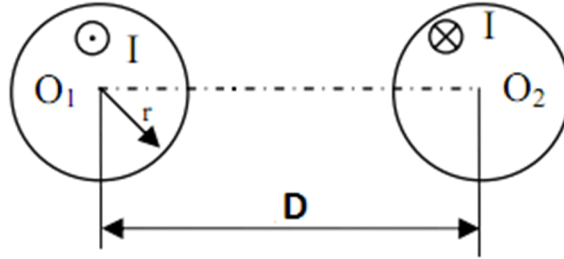


Figure (II.3) : liaison monophasée

$$B_1 = \mu_0 H_1 \quad B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (\text{II.27})$$

$$B_2 = \mu_0 H_2 \quad B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(D-x)} \quad (\text{II.28})$$

$$d\lambda_{e1} = d\phi_{e1} = B_1 dx \quad d\lambda_{e2} = d\phi_{e2} = B_2 dx \quad (\text{II.29})$$

D'où le flux total :

$$\phi_e = \int_r^{D-r} d\phi_{e1} + \int_r^{D-r} d\phi_{e2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\int_r^{D-r} \frac{1}{x} dx + \int_r^{D-r} \frac{1}{D-x} dx \right] \quad (\text{II.30})$$

Soit :

$$\phi_e = \frac{\mu_0 I}{\pi} \ln\left(\frac{D-r}{r}\right) \quad (\text{II.31})$$

D'où :

$$W_e = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} I \phi_e \quad \lambda_e = \phi_e = LI \quad (\text{II.32})$$

$$W_e = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln \frac{D-r}{r} \quad L_e = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{D-r}{r} \quad (\text{II.33})$$

Dans le cas où $r \ll D$, cette expression devient

$$W_e = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln \frac{D}{r} \quad L_e = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{D}{r} \quad (\text{II.34})$$

L'inductance externe pour chaque conducteur est :

$$L_{e1} = L_{e2} = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{D}{r} \quad (\text{II.35})$$

D : La distance entre les conducteurs

➤ **Inductance du conducteur :**

$$W_{i1} = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi} \quad (\text{II.36})$$

$$W_{e1} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{D}{r} \quad (\text{II.37})$$

$$W = W_{i1} + W_{e1} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right] \quad (\text{II.38})$$

D'où

L'inductance du conducteur est :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \quad (\text{II.39})$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{1}{r_1'} \right) + \ln D \right) \quad r_1' = r e^{(-\frac{1}{4})} \quad (\text{II.40})$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{r_1'} \right) \quad [\text{H/m}] \quad (\text{II.41})$$

II.2.3. Cas triphasé équilibré :

Pour un système triphasé équilibré, nous avons :

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (\text{II.42})$$

D'où

$$\lambda_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_a \ln \left(\frac{1}{r_1'} \right) + I_b \ln \left(\frac{1}{D} \right) + I_c \ln \left(\frac{1}{D} \right) \right) \quad (\text{II.43})$$

$$r_1' = r e^{(-\frac{1}{4})}$$

$$\lambda_a = \frac{\mu_0}{2\pi} (I_a \ln \left(\frac{D}{r_1'} \right)) \quad (\text{II.44})$$

$$\lambda_a = \lambda_b = \lambda_c \quad (\text{II.45})$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} (\ln \left(\frac{1}{r_1'} \right) + \ln D) \quad (\text{II.46})$$

L'inductance du conducteur est :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{r_1'} \right) \text{ [H/m]} \quad (\text{II.47})$$

Remarque : l'inductance d'un conducteur dans le cas monophasé et la même avec l'inductance d'un conducteur dans le cas triphasé équilibré

➤ **Liaison triphasé équilibré en triangle :**

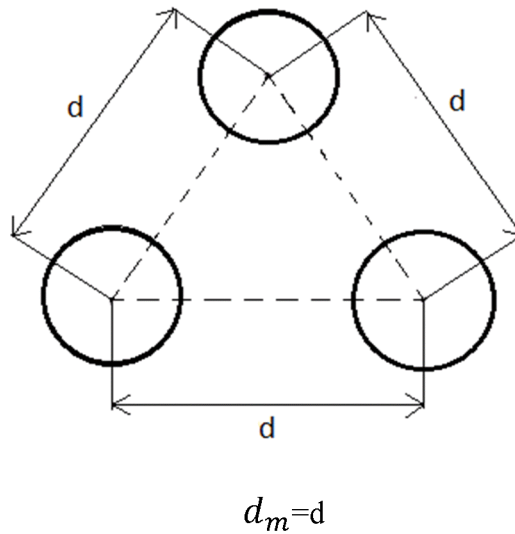


Figure (II.4): Liaison triphasée équilibrée en triangle

Dans un système triphasé équilibré en triangle l'inductance du conducteur est déterminée comme suite :

$$d = d_m$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{d}{r_1'} \right) \text{ (H/m)} \quad (\text{II.48})$$

II.3. Calcul de l'inductance mutuelle :

Pour calculer l'inductance mutuelle, nous avons utilisé la méthode basée sur l'énergie emmagasinée à travers le champ magnétique.

II.3.1. Cas monophasé :

Dans ce cas, deux solutions du champ magnétique créé uniquement par les courants dans les conducteurs sont nécessaires [15]. Celle où le conducteur (a) est parcouru par le courant I_a , et celle où les deux conducteurs (a) et (b) sont parcourus respectivement par les courants I_a et I_b .

Ainsi, les énergies du champ magnétiques W_{es1} et W_{es2} correspondant aux deux solutions du champ sont évaluées.

Dans le premier cas, l'expression de l'énergie magnétique, W_{es1} s'écrit :

$$W_{es1} = \frac{1}{2} [L_{aa} \cdot I_a^2] \quad (\text{II.49})$$

Dans le second cas, l'expression de l'énergie magnétique, W_{es2} s'écrit :

$$W_{es2} = \frac{1}{2} [L_{aa} \cdot I_a^2 + M_{ab} \cdot I_a I_b + M_{ba} \cdot I_b I_a + L_{bb} \cdot I_b^2] \quad (\text{II.50})$$

Avec:

L_{aa} et L_{bb} sont respectivement les inductances propres des deux conducteurs (a) et (b)

M_{ab} et M_{ba} sont respectivement les inductances mutuelles entre les deux conducteurs (a) et (b)

Sachant que les conducteurs sont identiques et qu'ils sont parcourus par le même courant I ,

$$M_{ab} = M_{ba} = M, L_{aa} = L_{bb} = L \text{ et } I_a = I_b = I$$

On remplace dans (II.50) ; on peut alors écrire :

$$W_{es2} = 2 \cdot W_{es1} + 2 \cdot M I^2 \quad (\text{II.51})$$

L'inductance mutuelle M entre deux conducteurs est alors évaluée par l'expression suivante:

$$M = \frac{W_{es2} - 2 \cdot W_{es1}}{2 I^2} \quad (\text{II.52})$$

II.3.2. Cas triphasé équilibré :

Dans ce cas, deux solutions du champ magnétique créé uniquement par les courants dans les conducteurs sont nécessaires [14.15]. Celle où le conducteur (a) est parcouru par le courant I_a , et celle où les trois conducteurs (a), (b) et (c) sont parcourus respectivement par les courants I_a , I_b et I_c .

Ainsi, les énergies du champ magnétiques W_{es1} et W_{es2} correspondant aux deux solutions du champ sont évaluées.

Dans le premier cas, l'expression de l'énergie magnétique, W_{es1} s'écrit :

$$W_{es1} = \frac{1}{2} [L_{aa} \cdot I_a^2]$$

Dans le second cas, l'expression de l'énergie magnétique W_{es2} s'écrit :

$$W_{es2} = \frac{1}{2} [L_{aa} \cdot I_a^2 + L_{bb} \cdot I_b^2 + L_{cc} \cdot I_c^2 + M_{ab} \cdot I_a I_b + M_{ba} \cdot I_b I_a + M_{ac} \cdot I_a I_c + M_{ca} \cdot I_c I_a + M_{bc} \cdot I_b I_c + M_{cb} \cdot I_c I_b] \quad (\text{II.53})$$

Avec:

L_{aa} , L_{bb} et L_{cc} sont respectivement les inductances propres des deux conducteurs (a), (b) et (c).

M_{ab} , M_{ba} , M_{ac} , M_{ca} , M_{bc} et M_{cb} sont respectivement les inductances mutuelles entre les trois conducteurs (a) et (b) et (c)

Sachant que les conducteurs sont identiques et qu'ils sont parcourus par le même courant I ,

Alors :

$$M_{ab} = M_{ba} = M_{ac} = M_{ca} = M_{bc} = M_{cb} = M, L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \text{ et } I_a = I_b = I_c = I$$

On remplace dans (II.53) ; on peut écrire :

$$W_{es2} = 3 \cdot W_{es1} + 6 \cdot M I^2$$

L'inductance mutuelle M entre conducteurs est donc évaluée par l'expression suivante:

$$M = \frac{W_{es2} - 3W_{es1}}{6I^2} [\text{H/m}] \quad (\text{II.54})$$

Conclusion

Au cours de chapitre, nous avons exposé les formules analytiques pour le calcul des inductances d'une ligne aérienne, pour les différents cas monophasé et triphasé, Liaison en triangle.

*Chapitre III : Présentation de La méthode des
éléments finis et le logiciel femm*

Introduction

La méthode des éléments finis est une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles et de leurs conditions aux limites. Cette méthode a été utilisée initialement pour la résolution des problèmes dans le domaine de la mécanique de la rupture et calcul de structures.

La méthode a été utilisée dans le domaine du calcul de champ électromagnétique pour la première fois vers 1970 par P.P SILVESTER et M.V.K CHARI.

Dans la plupart des cas, elle s'intègre à des logiciels C.A.O. Cette partie constitue un avantage de taille pour le concepteur de systèmes physiques [7].

III.1.présentation de la méthode des éléments finis :

Pour résoudre un problème par cette méthode par des étapes suivantes [8] :

- On pose un problème physique traduit sous forme d'équations aux dérivées partielles à satisfaire en tout point d'un domaine V , avec des conditions aux limites sur le bord V , nécessaires et suffisantes pour que la solution soit unique.
- On construit une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : c'est la formulation du problème.
- On divise le domaine V en sous domaines V_e : c'est le maillage, les sous domaines étant appelés mailles.
- On choisit la famille des champs locaux c'est-à-dire à la fois la position des nœuds dans les sous domaines et les polynômes (ou autres fonctions) qui définissent le champ local en fonction des valeurs aux nœuds. La maille complétée par ces informations est alors appelée élément.
- On ramène le problème à un problème discret : c'est la discrétisation. En effet, toute solution approchée est complètement déterminée par les valeurs aux nœuds des éléments. Il suffit donc de trouver la valeur à attribuer aux nœuds pour décrire une solution approchée.
- On résout le problème discret : c'est la résolution.
- On peut alors construire la solution approchée à partir des valeurs trouvées aux nœuds et on déduit d'autres grandeurs : c'est le post-traitement.

Chapitre III : Présentation de La méthode des éléments finis et le logiciel femm

- On visualise et on exploite la solution pour juger de sa qualité numérique et juger si elle satisfait le critère du cahier de charge : c'est l'exploitation des résultats.

III.2.Principe de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément finis est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonction de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être importantes.

La solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer que la méthode ainsi écrite converge, c'est-à-dire que l'erreur tend vers zéro si la finesse de maillage tend vers aussi vers zéro [9].

III.3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis :

III.3.1.Les avantages :

- Adaptation aux géométries complexes [8]
- Prise en compte des non linéarités
- Temps de calcul relativement avantageux

III.3.2. Les inconvénients :

- Mise en œuvre relativement difficile [8].
- prise en considération des domaines infinis

- présence de singularités dans le domaine d'étude

III.4. Présentation de logiciel libre femm :

Le logiciel FEMM : « finite element method magnetics » est un logiciel libre et gratuit, disponible sur le réseau internet, c'est un freeware développé par DAVID MEEKER, qui a aussi écrit et publié ce logiciel. Ce dernier est devenu un outil très utilisé par les chercheurs. La méthode qu'il utilise est celle des éléments finis. Ce logiciel permet la résolution des problèmes de type magnétique, électrostatique... etc.

Le logiciel FEMM est composé de trois modules essentiels : un module d'édition qui permet de définir le type de problème, de tracer la géométrie, de définir les différents milieux, ainsi que les termes source et les conditions aux limites, de mailler la structure proposée (préprocesseur). Un deuxième module permet de résoudre le problème (processeur).

Et un troisième qui permet d'exploiter les résultats du calcul (post processeur) [14].

III.5. Les différentes étapes de réalisation d'une structure à l'aide de FEMM :

III.5.1. Définition du type de problème :

Les types de problèmes traités par le logiciel sont :

- plan d'étude : plan cartésien (x, y) ou axisymétrique (r, Θ)
- unité de mesure métrique (mm, cm, m, mils, μm)
- fréquence de travail : $f=50\text{Hz}$ réseau normal, $f=0$ en magnétostatique
- Epaisseur de la structure (longueur selon l'axe Oz)

Ceux-ci sont définis en allant au menu problème [14]. Une fenêtre de dialogue apparaît et les champs adéquats sont remplis. (Figure III.1).

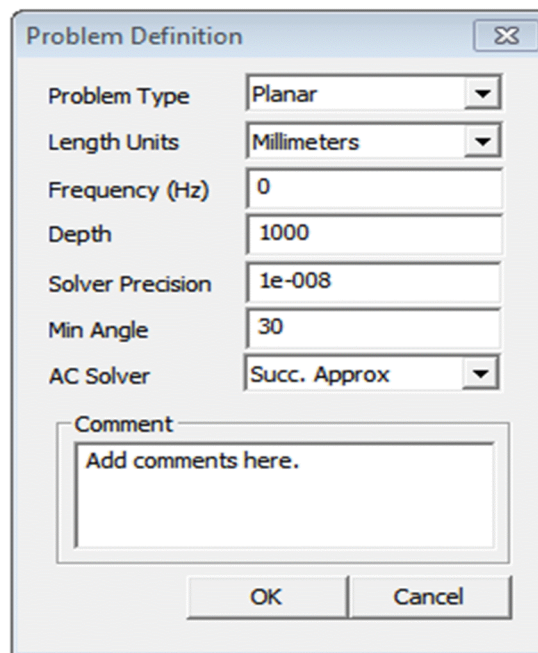


Figure (III.1): définition de problème

III.5.2. Géométrie :

Pour tracer la géométrie à étudier, on utilise ce qu'on appelle des icônes en modes dessin, qui sont représentés sur la figure suivante :



Figure (III.2): les modes dessin

La figure (III.2) représenté cinq modes, qui sont respectivement, le mode point, segment, arc, milieux, groupe de modes, les quatre premiers modes suffisent pour définir la géométrie à étudier [9].

➤ **Le mode point** : c'est le premier mode qu'on utilise pour commencer a étudier la géométrie, il sert à placer les nœuds de liaison des segments et des arcs. Il Ya deux façon de placer les nœuds :

Soit en cliquant sur le curseur gauche de la souris, ce procédé est aléatoire et peu précis ; soit pressant la touche tabulation, cela fait apparaitre une boite de dialogue ou il suffit d'insérer les coordonnées du point désiré.

Chapitre III : Présentation de La méthode des éléments finis et le logiciel femm

Pour supprimer un point, il suffit d'un clic droit sur le point pour le sélectionner (un objet sélectionné prend toujours la couleur rouge) et de le supprimer par la touche suppr.

A noter que le mode point est actif par défaut [9].

- **Le mode segment** : ce mode sert à dessiner un segment, une fois que les nœuds sont placés, il suffit de désigner le début et la fin du segment par un clic gauche de la souris, la procédure de sélection et d'effacement sont les mêmes que les points [9].
- **Le mode arc** : ce mode sert à dessiner un arc entre deux points déjà existants. Il s'applique exactement comme le mode segment [9].
- **Le mode milieu** : ce mode sert à définir les propriétés des milieux utilisés, par exemple pour choisir un point du milieu air, on clique avec le bouton gauche sur un point. Un point « none » apparaît. On sélectionne ce point puis on appuie sur la barre espace, une boîte de dialogue apparaît. Dans la case block type on choisit « air » puis on clique sur ok. Cette répétition se répétera pour le nombre de milieux utilisés [9].
- **Le mode groupe d'objet** : on désignera dans ce qui suit un objet comme étant soit un nœud, soit un arc soit un milieu. Il sert à regrouper plusieurs objets pour faciliter les différentes manipulations [9].

III.6. Les conditions aux limites :

Une condition aux limites est une contrainte sur les valeurs que prennent les solutions des équations aux dérivées ordinaires et des équations aux dérivées partielles sur les frontières du domaine d'étude.

Les conditions imposées au temps $t=0$ sont appelées conditions initiales [7].

Les plus courantes sont les conditions de potentiel imposé (Dirichlet) et la condition de symétrie (NEUMANN).

On sélectionne le menu Properties puis Boundary et Add properties [7], les paramètres à rentrer sont ceux de la figure (III.3).

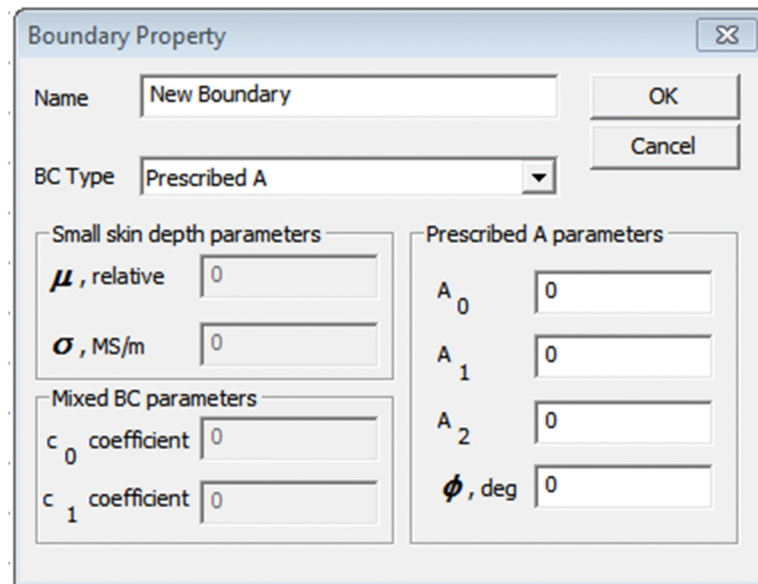


Figure (III.3): les conditions aux limites

III.6.1. Conditions aux limite de type Neumann :

Cette condition nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine étudié. Elle apparait sur les plans de symétrie [7].

$$\frac{\partial A}{\partial n} = g_0$$

III.6.2. Conditions aux limites de type Dirichlet :

Cette condition nous renseigne sur la valeur de l'inconnue sur la frontière du domaine de résolution [7].

$$A = g_0$$

A : La fonction inconnue.

g_0 : Une constante.

III.6.3. Conditions aux limites Mixte (Neumann-Dirichlet) :

C'est la combinaison de deux types de condition aux limites, elle s'exprime de la manière suivant [7] :

$$\alpha A + \beta \frac{\partial A}{\partial n} = g$$

Chapitre III : Présentation de La méthode des éléments finis et le logiciel femm

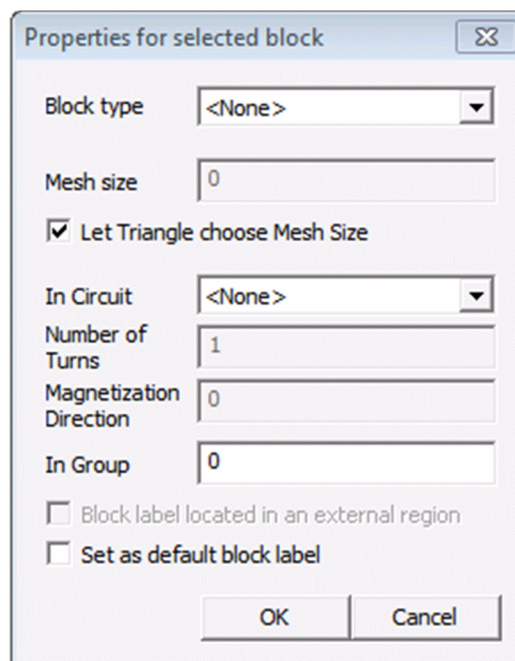
g : Valeur de l'inconnue sur la frontière

α, β : Coefficients définis sur le domaine d'étude

A : La fonction inconnue

III.7. Milieux :

On définit un milieu avec des différents matériaux comme dans notre travail on a utilisé l'air et le cuivre,



Figure(III.4) : le bloc propriété

III.8. Le Maillage :

En premier lieu, on choisit un ensemble de n points sur le domaine V qui sert à définir la géométrie, puis nous subdivisons le domaine V en sous domaines V_e en forme relativement simple et chaque élément du sous domaine V_e doit être définie analytiquement de manière unique en fonction des coordonnées des nœuds géométrique qui appartient à cette élément, c'est-à-dire qu'ils sont situés sur le domaine V et sur la frontière. Notons que deux éléments distincts ne peuvent avoir en commun que des frontières communes, les frontières entre élément peuvent être des points, des courbes ou des surfaces, et l'ensemble de tous les éléments V_e doit constituer le domaine V .

Chapitre III : Présentation de La méthode des éléments finis et le logiciel femm

L'élément utilisé par femm est l'élément linéaire triangulaire à trois nœuds à 2D.

III.9.Langage de programmation LUA :

Le langage LUA est également intégré dans le pré et le post-processeur. Il suffit d'écrire un programme ou donner des instructions dans la console LUA pour commander les étapes de calculs. Toute modification sur le domaine d'étude, analyses ou exploitations des résultats peut être effectuée de manière automatique par un programme en LUA sans l'intervention manuelle de l'utilisateur.

Pour résoudre un problème donné sous l'environnement FEMM, nous effectuons les opérations suivantes :

- Définir le problème (unité, épaisseur, précision, angle minimal).
- Tracer la structure géométrique.
- Ajouter les propriétés des matériaux qui constituent la structure d'étude.
- Ajouter le courant qui passe dans le conducteur.
- Ajouter des « blocs label » dont les quels nous affectons les différentes propriétés.
- Ajouter des conditions aux limites et puis affecter.
- Mailler la structure après l'avoir enregistrée.
- Résoudre le problème.
- Visualiser les résultats.

Le maillage de la structure avec FEMM se fait automatiquement en utilisant des éléments triangulaires [9].

Conclusion

Le logiciel FEMM4.2 est un outil relativement efficace pour la détermination des champs dans l'espace. Il représente un outil de choix pour le travail que nous voulons réaliser, à savoir calculer les paramètres inductifs de lignes de transport de l'énergie.

Il présente aussi une plateforme de programmation, puisqu'il peut intégrer des programmes écrits en langage lua, se servant de fonctionnalités propres à femm. Cela permet de réaliser des calculs en boucle, chose qu'on ne peut faire avec femm seul.

*Chapitre IV : Application et validation des
Résultats Obtenus*

Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les étapes nécessaires qui précèdent la résolution d'un problème magnétique par la méthode des éléments finis, avec le logiciel FEMM. Dans ce chapitre, nous donnons les résultats obtenus par la méthode analytique et aussi par la méthode des éléments finis pour le calcul de l'inductance pour différentes dispositions de ligne électrique aérienne (unifilaire, monophasée et triphasé) à partir de l'énergie magnétique emmagasiné dans le conducteur. Enfin, on fera l'interprétation et la comparaison des résultats obtenus avec ces deux méthodes.

Notre étude est faite sur trois cas différents de la structure de ligne électrique aérienne.

IV.1. Nomenclature :

R : la distance entre le rayon du conducteur et un point situé à l'extérieur du conducteur en [cm]. (Dans le cas de femm, il s'agit du contour externe)

D : la distance entre les centres des deux conducteurs (cm).

W_{es1} : L'énergie magnétique emmagasinée dans tout le domaine d'étude (énergie totale) créée par un seul conducteur en (J).

W_{es2} : L'énergie magnétique créée par la somme des conducteurs en (J).

W_a : L'énergie magnétique trouvée analytiquement (J).

W_f : L'énergie magnétique trouvée avec FEMM en (J).

L : l'inductance du conducteur en (H/m).

X : la réactance inductive du conducteur en (Ω/m).

M : l'inductance mutuelle entre les conducteurs en (H/m).

IV.2.Cas unifilaire :

Notre étude faite sur une ligne électrique aérienne qui est représentée par un conducteur en cuivre, sur une longueur de 1m (unitaire), un rayon constant ($r=0.5$ cm) et avec un courant d'alimentation unitaire (égal à 1A). La structure du câble étudié en 2D est présentée sur la figure (IV.1) [11].

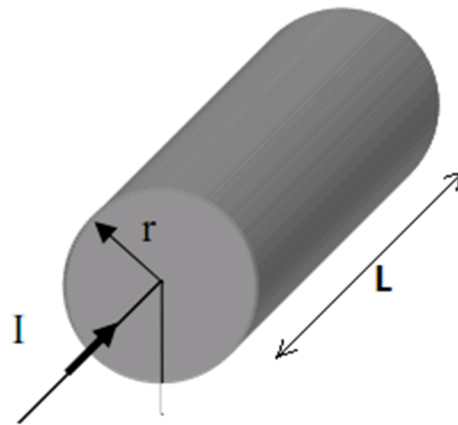


Figure IV.1 : Structure du câble étudiée

Avec le logiciel FEMM, l'opération du maillage est très simple, car elle se fait automatiquement. Après avoir enregistré la structure déjà construite dans la partie préprocesseur, on exécute le programme auxiliaire de triangulation, triangle.exe. Le maillage de la structure étudiée pour le cas unifilaire est représenté sur la figure (IV.2).

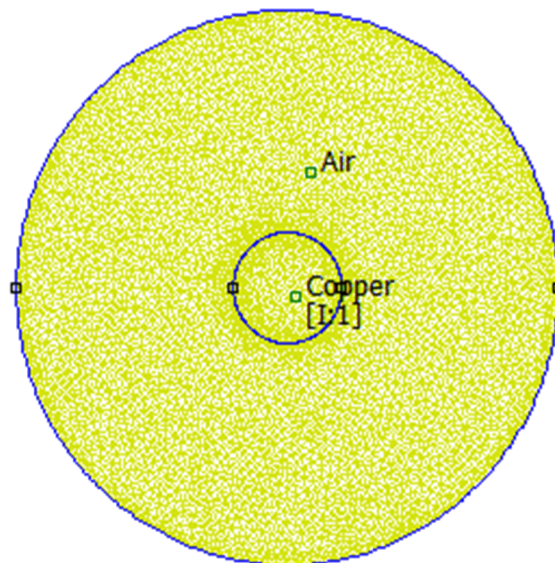


Figure IV.2: Maillage de la structure étudiée

Nous avons introduit la condition de Dirichlet sur un contour externe et la définition des milieux (air et le cuivre) et avec l'exécution, FEMM montre la figure (IV.3) suivante :

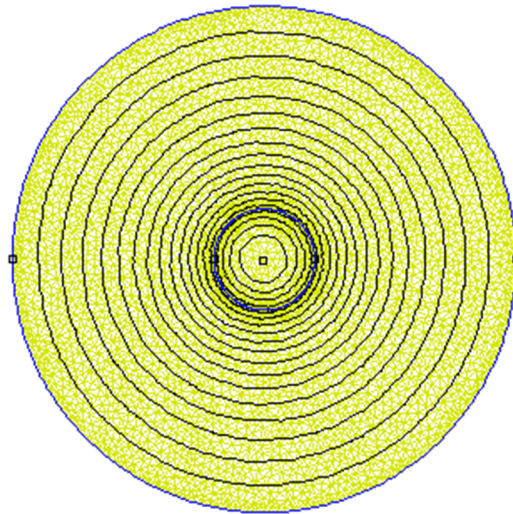


Figure (IV.3) : Les lignes de champs créés par un seul conducteur.

L'énergie magnétique dans tout le domaine d'étude créé par le conducteur est déterminée grâce au logiciel femm.

$$W_{es1} = \frac{1}{2} LI^2 \quad [\text{J}] \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{L'inductance est : } L = \frac{2 \cdot w}{i^2} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Et la réactance inductive : } X = 2\pi f * L [\Omega/\text{m}] \quad (\text{IV.3})$$

Les valeurs numériques et analytiques sont données dans le tableau suivant :

Les différents graphes $W = f(R)$, $L = f(R)$ et $X = f(R)$ sont donnés par les figures IV.4, IV.5 et IV.6.

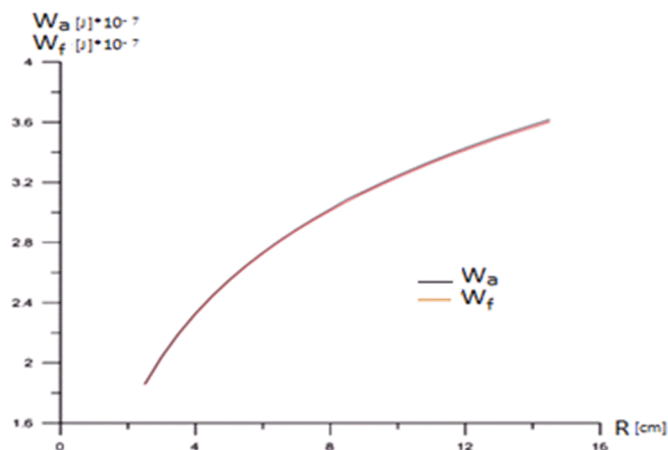


Figure IV.4. Variation de l'énergie totale dans le domaine en fonction de R.

R [cm]	W_{es1} [$J \cdot 10^{-7}$]*		L [$H \cdot 10^{-5}/km$]		X [Ω/km]	
	femm	analyt	femm	analyt	femm	analyt
2.5	1.85688	1.85943	3.71377	3.71887	0.011667	0.0116772
3	2.03844	2.04175	4.07689	4.68351	0.012807	0.0128222
3.5	2.19206	2.19591	4.38413	4.39582	0.013773	0.0137903
4	2.32498	2.32944	4.64996	4.65888	0.014608	0.0146288
4.5	2.44206	2.44722	4.88412	4.89444	0.015343	0.0153685
5	2.54697	2.55258	5.09394	5.10517	0.016002	0.0160302
5.5	2.64151	2.64789	5.28303	5.29579	0.016597	0.0166287
6	2.72827	2.73490	5.45654	5.46981	0.017142	0.0171752
6.5	2.80728	2.81494	5.61457	5.62989	0.017638	0.0175778
7	2.88120	2.88905	5.76240	5.77811	0.018102	0.0181432
7.5	2.94891	2.95805	5.89783	5.91610	0.018528	0.0185765
8	3.01256	3.02258	6.02512	6.04517	0.018928	0.0189818
8.5	3.07358	3.08832	6.14717	6.16642	0.019311	0.0193625
9	3.13045	3.14037	6.26090	6.28074	0.019669	0.0197215
9.5	3.18261	3.19443	6.36523	6.38887	0.019996	0.0200510
10	3.23369	3.24573	6.46739	6.49146	0.020317	0.0203831
10.5	3.28170	3.29452	6.56340	6.58904	0.020619	0.0206896
11	3.32924	3.34104	6.65849	6.68208	0.020918	0.0209817
11.5	3.37360	3.38549	6.74720	6.77098	0.021196	0.0212609
12	3.41457	3.42805	6.82914	6.85610	0.021454	0.0215281
12.5	3.45515	3.4688	6.91031	6.93775	0.021709	0.0217845
13	3.49466	3.5080	6.98933	7.01619	0.021957	0.0220308
13.5	3.53162	3.5458	7.06324	7.09167	0.022189	0.0222678
14	3.56697	3.5822	7.13394	7.16440	0.022411	0.0224962
14.5	3.60300	3.6172	7.20601	7.23455	0.022638	0.0227166

Tableau(IV.1) : les valeurs numériques de l'énergie totale, de l'inductance et de la réactance inductive du conducteur comparées (femm – analytique).

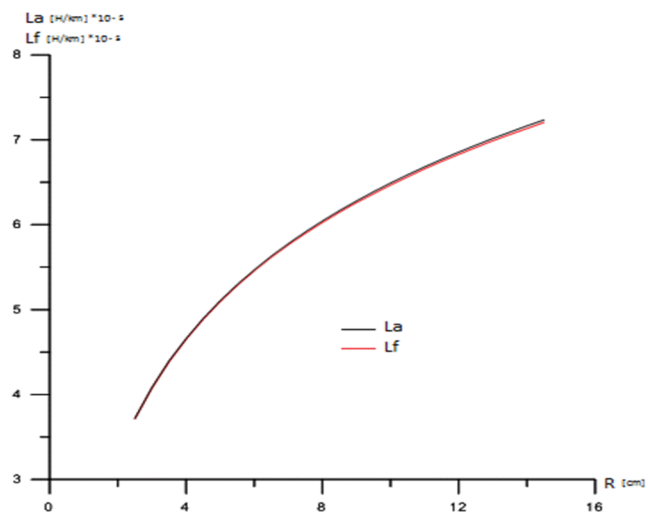


Figure. IV.5. Valeurs de l'inductance du conducteur dans le domaine en fonction de R.

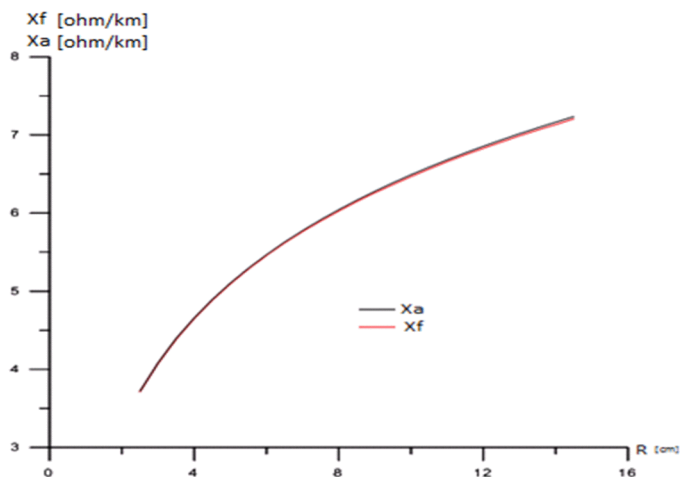


Figure. IV.6. Valeurs de la réactance inductive du conducteur en fonction de R.

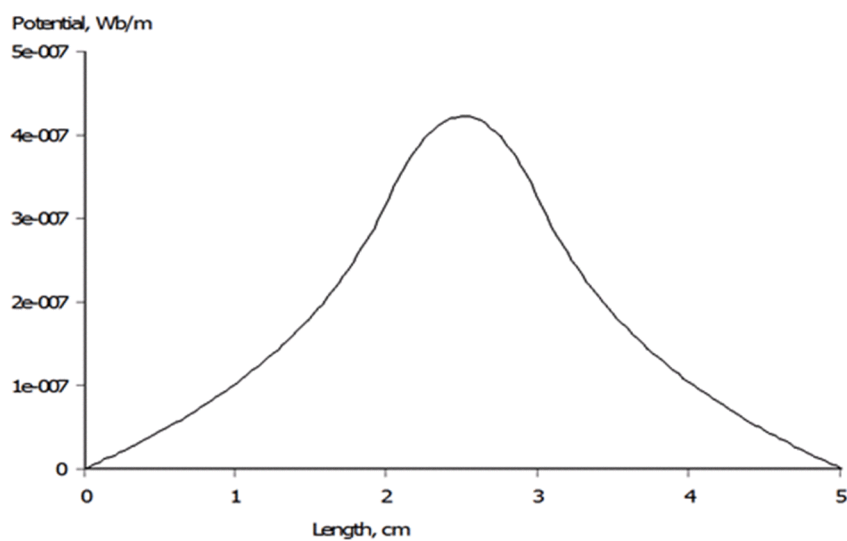


Figure. (IV.7) : Le potentiel du conducteur dans le cas unifilaire

*Chapitre IV : Application et validation des
Résultats Obtenus*

Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les étapes nécessaires qui précèdent la résolution d'un problème magnétique par la méthode des éléments finis, avec le logiciel FEMM. Dans ce chapitre, nous donnons les résultats obtenus par la méthode analytique et aussi par la méthode des éléments finis pour le calcul de l'inductance pour différentes dispositions de ligne électrique aérienne (unifilaire, monophasée et triphasé) à partir de l'énergie magnétique emmagasiné dans le conducteur. Enfin, on fera l'interprétation et la comparaison des résultats obtenus avec ces deux méthodes.

Notre étude est faite sur trois cas différents de la structure de ligne électrique aérienne.

IV.1. Nomenclature :

R : la distance entre le rayon du conducteur et un point situé à l'extérieur du conducteur en [cm]. (Dans le cas de femm, il s'agit du contour externe)

D : la distance entre les centres des deux conducteurs (cm).

W_{es1} : L'énergie magnétique emmagasinée dans tout le domaine d'étude (énergie totale) créée par un seul conducteur en (J).

W_{es2} : L'énergie magnétique créée par la somme des conducteurs en (J).

W_a : L'énergie magnétique trouvée analytiquement (J).

W_f : L'énergie magnétique trouvée avec FEMM en (J).

L : l'inductance du conducteur en (H/m).

X : la réactance inductive du conducteur en (Ω /m).

M : l'inductance mutuelle entre les conducteurs en (H/m).

IV.2.Cas unifilaire :

Notre étude faite sur une ligne électrique aérienne qui est représentée par un conducteur en cuivre, sur une longueur de 1m (unitaire), un rayon constant ($r=0.5$ cm) et avec un courant d'alimentation unitaire (égal à 1A). La structure du câble étudié en 2D est présentée sur la figure (IV.1) [11].

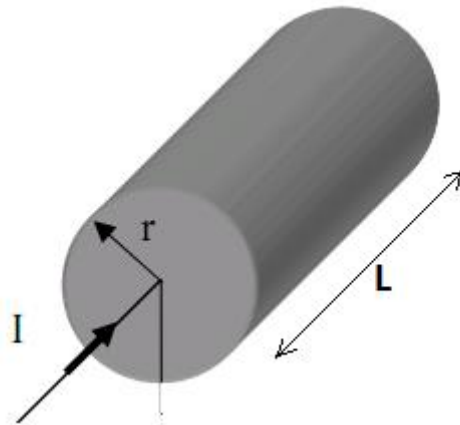


Figure IV.1 : Structure du câble étudiée

Avec le logiciel FEMM, l'opération du maillage est très simple, car elle se fait automatiquement. Après avoir enregistré la structure déjà construite dans la partie préprocesseur, on exécute le programme auxiliaire de triangulation, triangle.exe. Le maillage de la structure étudiée pour le cas unifilaire est représenté sur la figure (IV.2).

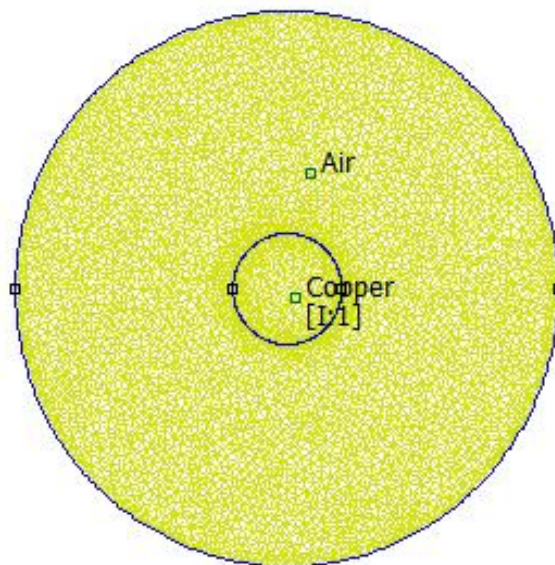


Figure IV.2: Maillage de la structure étudiée

Nous avons introduit la condition de Dirichlet sur un contour externe et la définition des milieux (air et le cuivre) et avec l'exécution, FEMM montre la figure (IV.3) suivante :

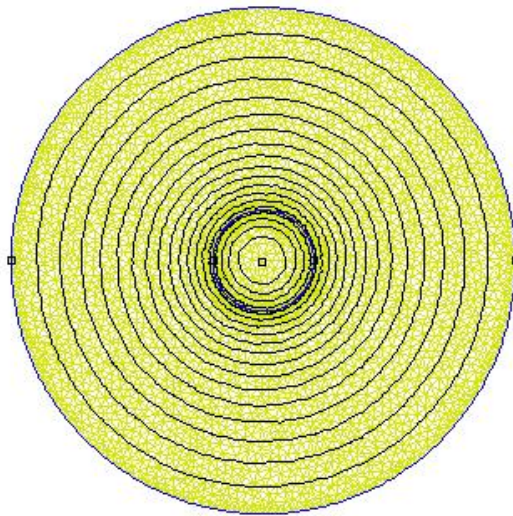


Figure (IV.3) : Les lignes de champs créés par un seul conducteur.

L'énergie magnétique dans tout le domaine d'étude créé par le conducteur est déterminée grâce au logiciel femm.

$$W_{es1} = \frac{1}{2} LI^2 \quad [\text{J}] \quad (\text{IV.1})$$

L'inductance est : $L = \frac{2 \cdot w}{I^2} \quad [\text{H/m}] \quad (\text{IV.2})$

Et la réactance inductive : $X = 2\pi f * L \quad [/ \text{m}] \quad (\text{IV.3})$

Les valeurs numériques et analytiques sont données dans le tableau suivant :

Les différents graphes $W = f(R)$, $L = f(R)$ et $X = f(R)$ sont donnés par les figures IV.4, IV.5 et IV.6.

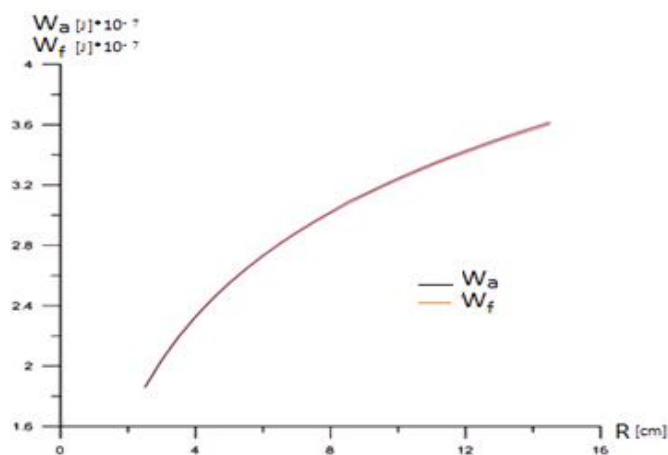


Figure IV.4. Variation de l'énergie totale dans le domaine en fonction de R.

R [cm]	W_{es1} [J. 10^{-7}]*		L [H* 10^{-5} /km]		X [/km]	
	femm	analyt	femm	analyt	femm	analyt
2.5	1.85688	1.85943	3.71377	3.71887	0.011667	0.0116772
3	2.03844	2.04175	4.07689	4.68351	0.012807	0.0128222
3.5	2.19206	2.19591	4.38413	4.39582	0.013773	0.0137903
4	2.32498	2.32944	4.64996	4.65888	0.014608	0.0146288
4.5	2.44206	2.44722	4.88412	4.89444	0.015343	0.0153685
5	2.54697	2.55258	5.09394	5.10517	0.016002	0.0160302
5.5	2.64151	2.64789	5.28303	5.29579	0.016597	0.0166287
6	2.72827	2.73490	5.45654	5.46981	0.017142	0.0171752
6.5	2.80728	2.81494	5.61457	5.62989	0.017638	0.0175778
7	2.88120	2.88905	5.76240	5.77811	0.018102	0.0181432
7.5	2.94891	2.95805	5.89783	5.91610	0.018528	0.0185765
8	3.01256	3.02258	6.02512	6.04517	0.018928	0.0189818
8.5	3.07358	3.08832	6.14717	6.16642	0.019311	0.0193625
9	3.13045	3.14037	6.26090	6.28074	0.019669	0.0197215
9.5	3.18261	3.19443	6.36523	6.38887	0.019996	0.0200510
10	3.23369	3.24573	6.46739	6.49146	0.020317	0.0203831
10.5	3.28170	3.29452	6.56340	6.58904	0.020619	0.0206896
11	3.32924	3.34104	6.65849	6.68208	0.020918	0.0209817
11.5	3.37360	3.38549	6.74720	6.77098	0.021196	0.0212609
12	3.41457	3.42805	6.82914	6.85610	0.021454	0.0215281
12.5	3.45515	3.4688	6.91031	6.93775	0.021709	0.0217845
13	3.49466	3.5080	6.98933	7.01619	0.021957	0.0220308
13.5	3.53162	3.5458	7.06324	7.09167	0.022189	0.0222678
14	3.56697	3.5822	7.13394	7.16440	0.022411	0.0224962
14.5	3.60300	3.6172	7.20601	7.23455	0.022638	0.0227166

Tableau(IV.1) : les valeurs numériques de l'énergie totale, de l'inductance et de la réactance inductive du conducteur comparées (femm – analytique).

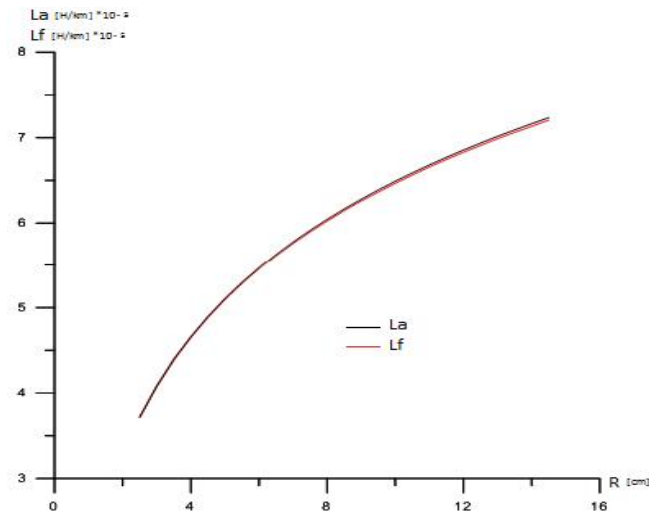


Figure. IV.5. Valeurs de l'inductance du conducteur dans le domaine en fonction de R.

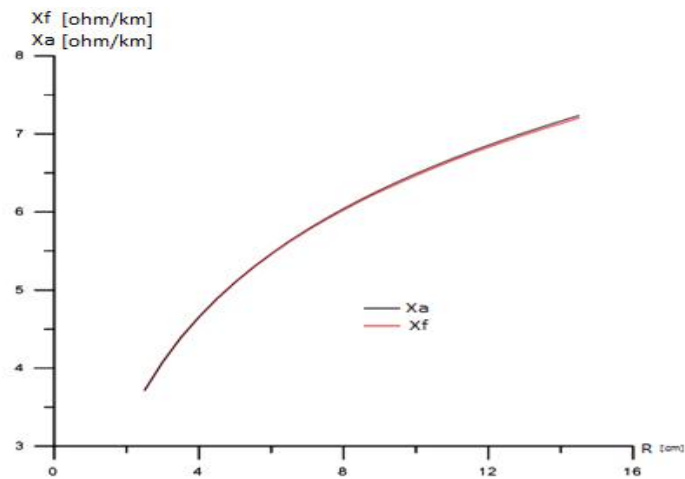


Figure. IV.6. Valeurs de la réactance inductive du conducteur en fonction de R.

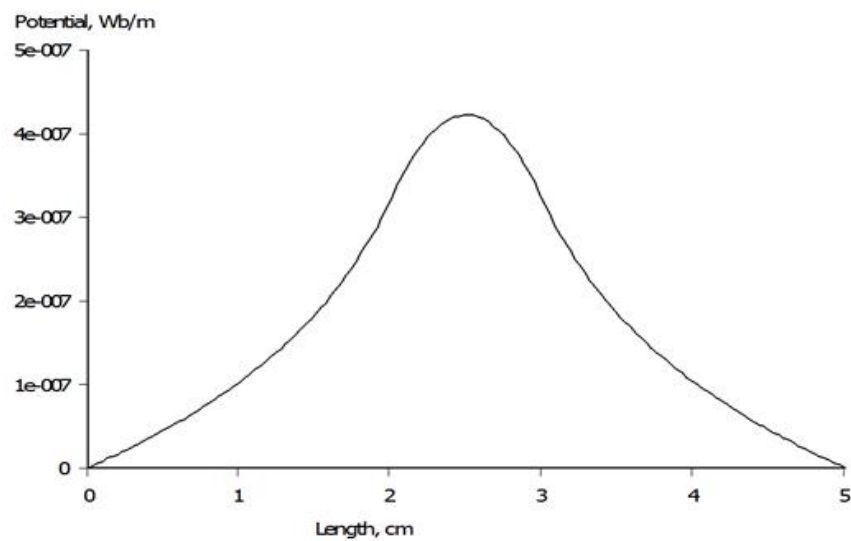


Figure. (IV.7) : Le potentiel du conducteur dans le cas unifilaire

IV.2.1. Interprétation des résultats obtenus dans le cas unifilaire :

Les résultats obtenus à partir de la simulation avec le logiciel FEMM, et ceux obtenus avec la méthode analytique sont illustrés dans le tableau (IV.1).

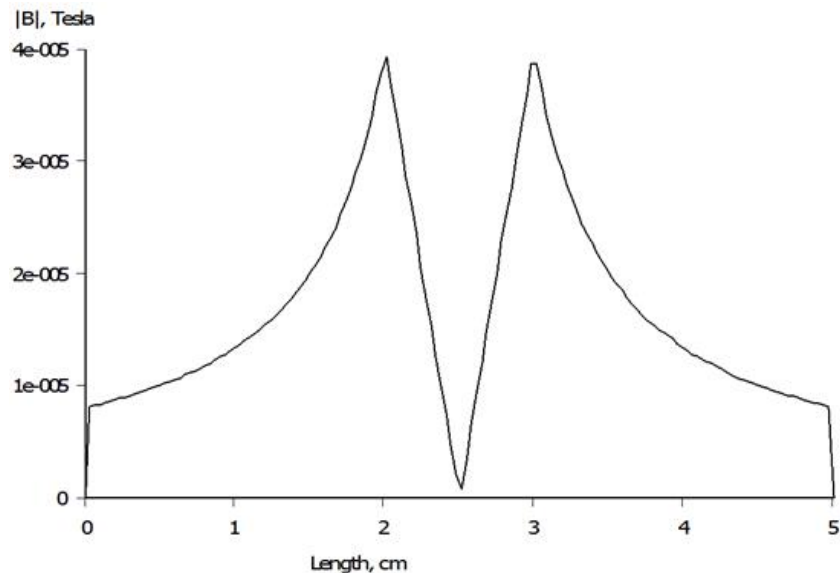


Figure. (IV.8) : l'induction magnétique du conducteur dans le cas unifilaire

Les courbes de la figure (IV.4), montrent l'évolution de l'énergie magnétique emmagasinée dans les lignes du champ, en fonction de la distance (R). Notons que, plus cette distance est grande plus l'énergie augmente.

Les courbes de la figure (IV.5), présentent l'évolution de l'inductance du conducteur en fonction de la distance (R). On remarque que, plus la distance est grande plus l'inductance est importante.

Les courbes de la figure (IV.6) présentent l'évolution de la réactance inductive du conducteur en fonction de la distance (R). On constate que, plus la distance augmente plus la réactance est importante.

Les courbes de la figure (IV.7, IV.8), présentent le potentiel et l'induction magnétique dans le domaine étudié. On remarque que le potentiel est maximum au centre du conducteur et diminué tout vers zéro à l'extrémité de la surface sur laquelle on a imposé les conditions aux limites. L'induction magnétique est maximale aux extrémités du conducteur et nulle au centre de ce dernier.

A partir des courbes (IV.4) à (IV.6), on remarque que les courbes des résultats trouvés avec la méthode analytique sont confondues avec ceux trouvés avec FEMM.

IV.3.Cas monophasé :

Dans ce cas, la ligne électrique est composée de deux conducteurs parallèles et de longueur 1m, les deux conducteurs ont un rayon constant ($r=0.5$ cm) et la distance entre leurs centres est la variable D en cm, chaque conducteur étant parcouru par un courant de 1A.

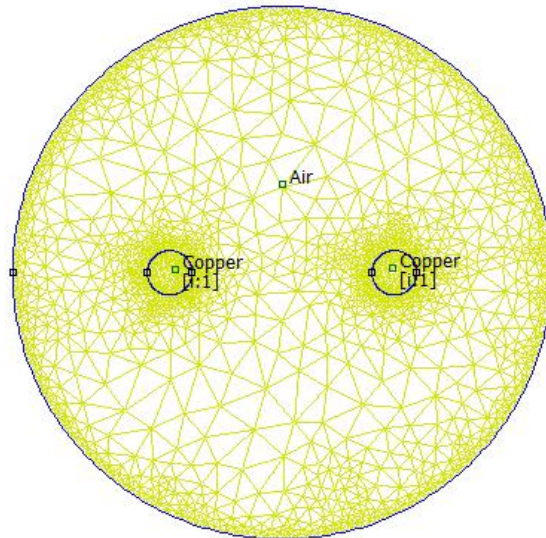
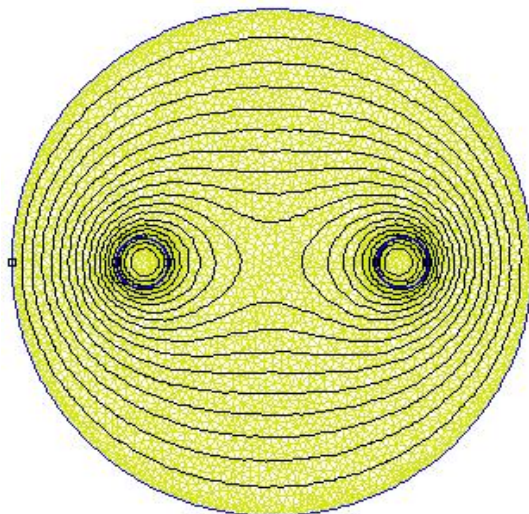


Figure (IV.9) : le maillage de la structure étudiée

La structure étudiée est présentée en figure(IV.9). Pour visualiser les lignes du champ généré par les deux conducteurs, nous avons intégré la condition de Dirichlet et la définition des milieux (air et le cuivre), et après la simulation FEMM présente la figure (IV.10) suivante.



Figure(IV.10) : les lignes du flux créées par les deux conducteurs en cuivre

Après la simulation, on détermine l'énergie magnétique emmagasinée dans les lignes du champ créé par les conducteurs quand ils sont alimentés avec un courant de 1A, ce qui nous permet de déterminer les valeurs de l'inductance et la réactance inductive des conducteurs, à partir des équations (IV.1), (IV.2) et (IV.3). Les valeurs numériques et analytiques sont données dans le tableau (IV.1)

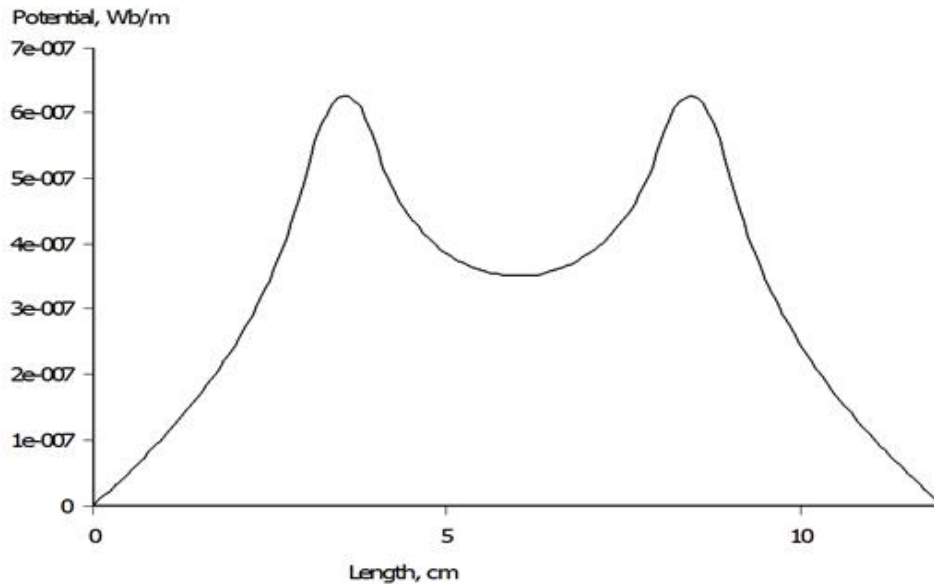


Figure. (IV.11) : Le potentiel du conducteur dans le cas monophasé

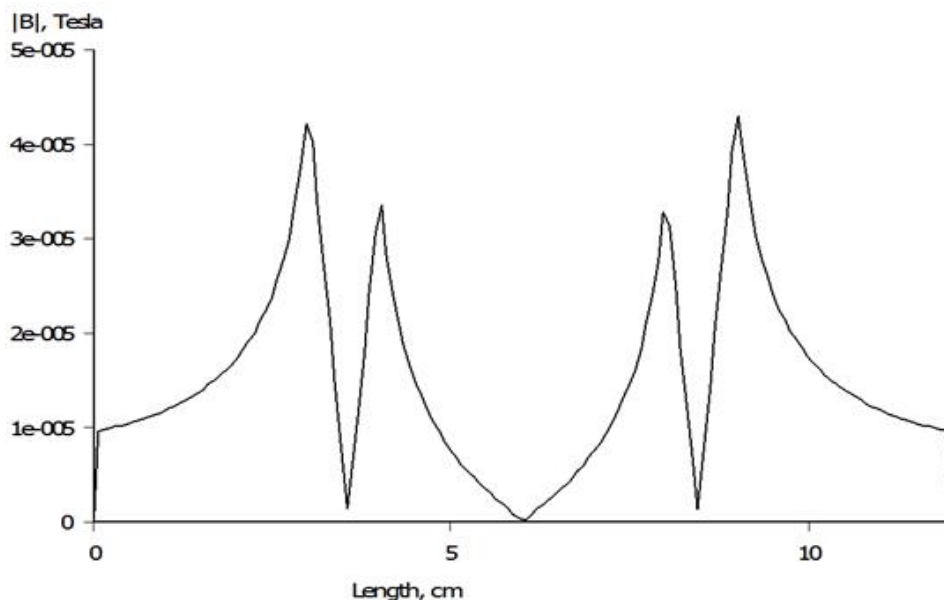


Figure. (IV.12) : L'induction magnétique du conducteur dans le cas monophasé

IV.3.1. Interprétation des résultats obtenus dans le cas monophasé :

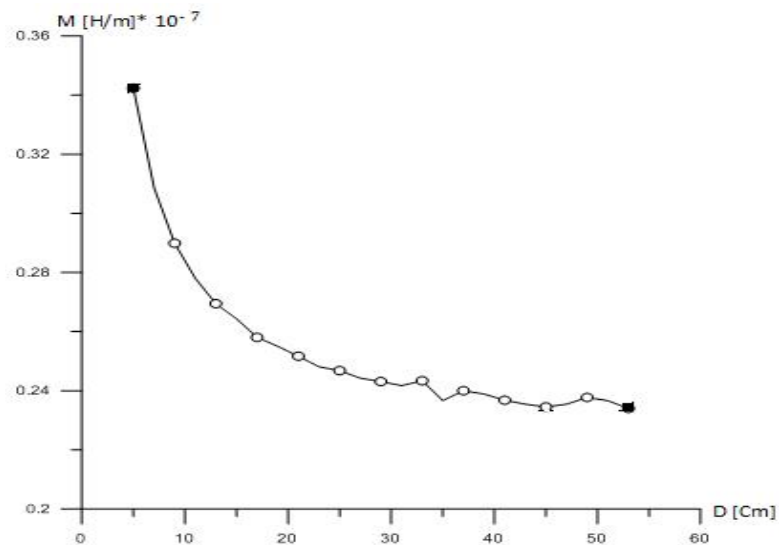
Les courbes de la figure (IV.11, IV.12), présentent respectivement le potentiel et l'induction magnétique dans le domaine d'un cas monophasé. On remarque que le potentiel est maximum

aux centres des conducteurs et diminué ton vers zéro a l'extrémité de la surface sur laquelle on a imposé les conditions aux limites. Pour l'induction magnétique est maximum à l'extrémité des conducteurs et nul aux centre de ces derniers.

IV.3.2.Résultats pour l'inductance mutuelle obtenus dans le système monophasé :

D [cm]	W_{es2} [J]* 10^{-7}	W_{es1} [J]* 10^{-7}	M [H/m]* 10^{-7}
5	5.759268	2.537282	0.342352
7	6.219778	2.801212	0.308677
9	6.595776	3.007962	0.289926
11	6.911036	3.177489	0.278029
13	7.185704	3.323414	0.269438
15	7.427655	3.449488	0.264339
17	7.642280	3.563097	0.258043
19	7.838309	3.664155	0.254999
21	8.011825	3.754241	0.251671
23	8.172631	3.838194	0.248121
25	8.323052	3.914747	0.246779
27	8.464479	3.987975	0.244264
29	8.588773	4.051291	0.243095
31	8.713808	4.115159	0.241745
33	8.827546	4.170385	0.243388
35	8.934999	4.230834	0.236665
37	9.040232	4.280114	0.240002
39	9.137070	4.329650	0.238885
41	9.231552	4.378983	0.236793
43	9.313960	4.421539	0.235441
45	9.397708	4.459839	0.234515
47	9.476119	4.502609	0.235450
49	9.558892	4.541720	0.237726
51	9.635339	4.580998	0.236671
53	9.708498	4.620251	0.233998

Tableau IV.2. Valeurs de l'inductance en fonction de D



Figure(IV.13): l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction de la distance D [Cm]

Pour le calcul de la mutuelle entre conducteurs, nous avons procédé au calcul séparé des énergies produites successivement par un et deux conducteurs, puis, nous avons appliqué les équations (II.49) à (II.50) pour déterminer la valeur de la mutuelle inductance.

Les résultats sont donnés en tableau (IV.2).

IV.3.3. Interprétation les résultats de l'inductance mutuelle obtenus dans le cas monophasé:

La courbe de la figure (IV.13) présente l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction de la distance entre les centres des deux conducteurs pour le cas monophasé. Notons que, plus la distance augmente plus l'inductance mutuelle diminue.

IV.4. Cas triphasé équilibré en triangle :

Dans ce cas, la ligne électrique étudiée est composée de trois conducteurs symétriques disposés en triangle équilatéral, chaque côté ayant une longueur de 1m, les trois conducteurs ont un rayon constant ($r=0.5$ cm) et la distance entre leurs centres (D), chaque conducteur est parcouru par un courant de 1A.

Après exécution du programme lua, pour une ligne triphasée équilibrée le maillage de la structure étudiée se fait automatiquement Comme il est montré par la figure(IV.14)

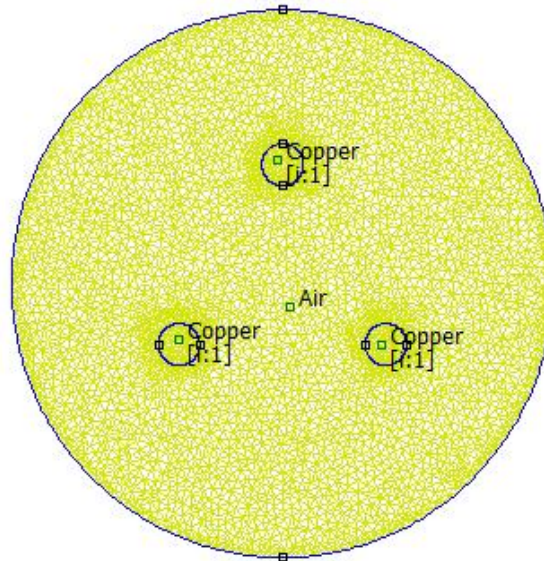
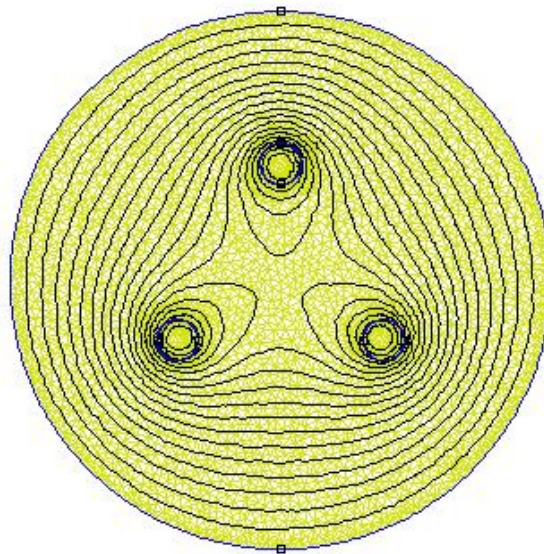


Figure (IV.14) : le maillage de la structure étudiée

Et pour visualiser les lignes de flux générées par les trois conducteurs nous avons intégré la condition de Dirichlet et la définition des milieux (air et le cuivre), et après la simulation FEMM présente la figure (IV.15) suivante.



Figure(IV.15) : les lignes du flux créées par les trois conducteurs en cuivre

Après simulation, on détermine l'énergie magnétique emmagasinée dans les lignes du champ créée par le conducteur quand on alimente juste un seul et aussi par les trois conducteurs quand on les alimente par le même courant, ce qui nous permet de déterminer les valeurs de l'inductance et la réactance inductive du conducteur, à partir des équations (1) à (3)

Les valeurs numériques et analytiques sont données dans le tableau (IV.1)

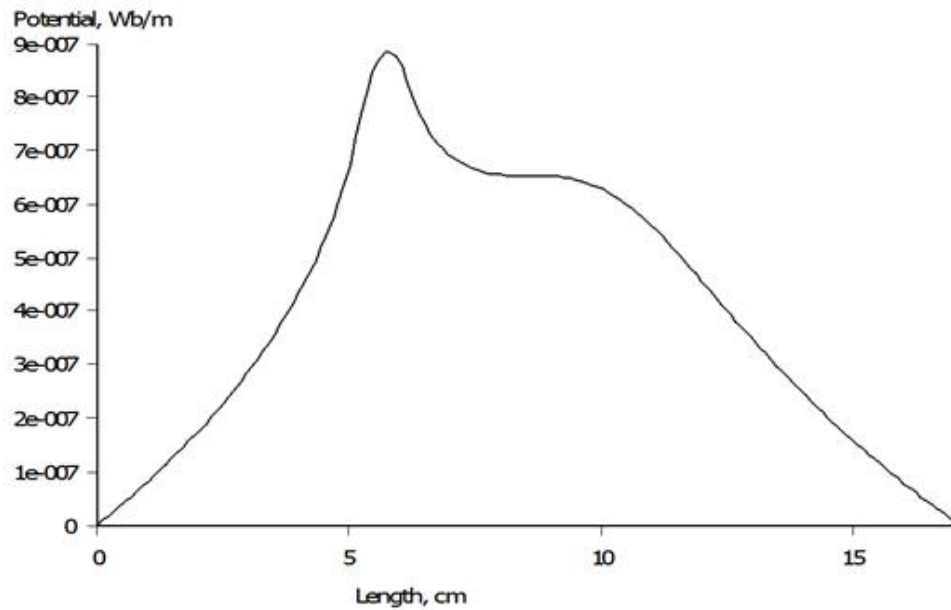


Figure. (IV.16) : L e potentiel du conducteur dans le cas triphasé

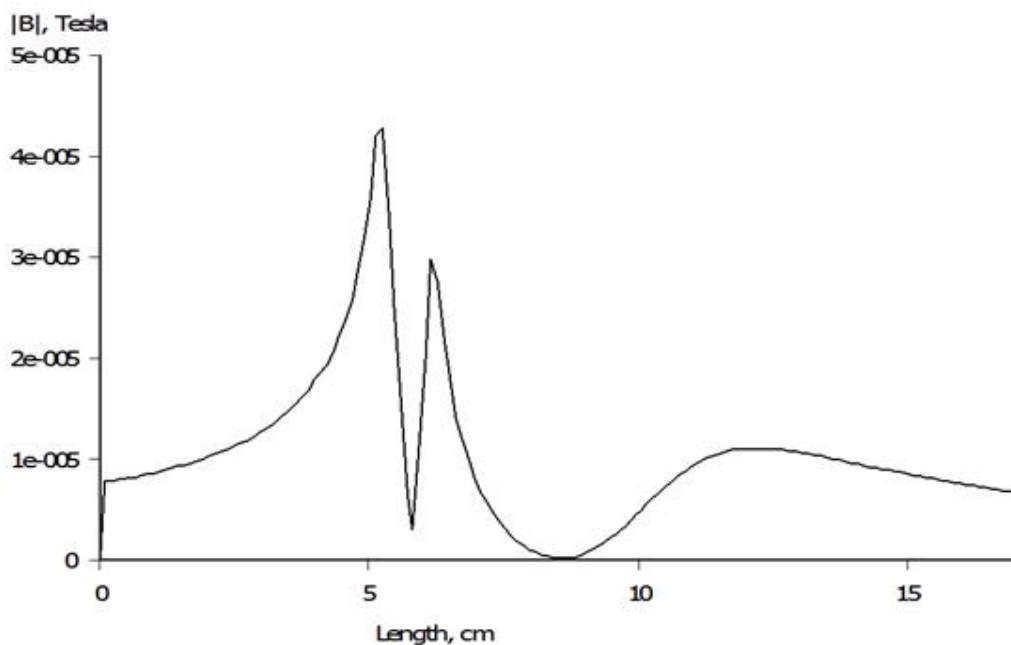


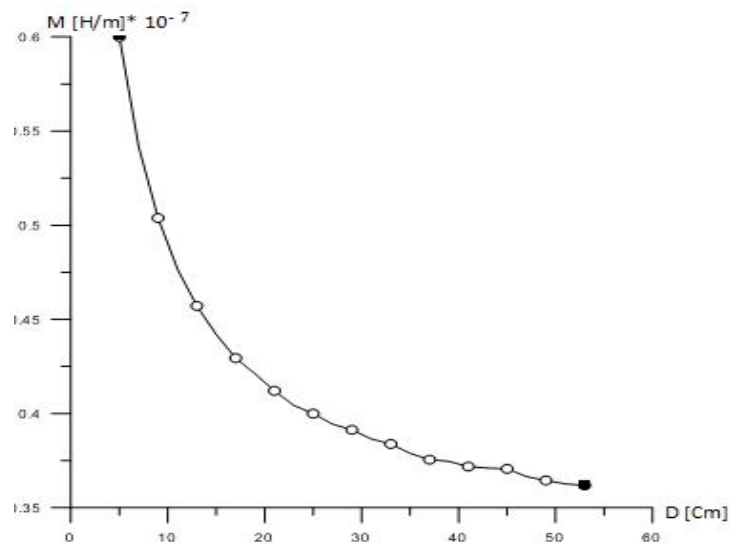
Figure. (IV.17) : L'induction magnétique du conducteur dans le cas triphasé

IV.4.1. Interprétation des résultats obtenus dans le cas triphasé équilibré :

Les courbes de la figure (IV.16) et (IV.17), montrent respectivement le potentiel et l'induction magnétique dans le domaine d'étude. On remarque que le potentiel est maximum aux centres des conducteurs et diminue pour tendre vers zéro à l'extrémité de la surface sur laquelle on a imposé les conditions aux limites. L'induction magnétique est maximale à l'extrémité des conducteurs et nulle aux centres de ces derniers.

D [cm]	$W_{es2}[\text{J}] * 10^{-6}$	$W_{es1} [\text{J}] * 10^{-7}$	M [H/m] * 10^{-7}
5	1.2473697	2.957949	0.599975
7	1.26961683	3.148541	0.541757
9	1.29379524	3.304928	0.503861
11	1.31796368	3.439867	0.476672
13	1.34097031	3.555552	0.45717
15	1.36302825	3.659403	0.441998
17	1.38381545	3.753773	0.429472
19	1.40293380	3.834185	0.421130
21	1.42183238	3.915301	0.41207
23	1.43908079	3.988294	0.404320
25	1.45517175	4.050611	0.399980
27	1.47066527	4.113484	0.394366
29	1.48713708	4.174422	0.391350
31	1.50057786	4.228848	0.386539
33	1.51476807	4.281504	0.383861
35	1.52752285	4.334746	0.378880
37	1.53873614	4.378056	0.375532
39	1.55173258	4.423099	0.374671
41	1.56312009	4.466707	0.371846
43	1.57476135	4.507092	0.371056
45	1.58496131	4.541919	0.370642
47	1.59605899	4.587090	0.366553
49	1.60550111	4.622682	0.364494
51	1.61581669	4.660731	0.362662
53	1.62475341	4.692042	0.361901

Tableau(IV.3) : les valeurs des énergies magnétiques, et les inductances mutuelles des conducteurs avec FEMM.



Figure(IV.18): l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction de la distance D [Cm]

IV.4.2.Résultats de calcul de l'inductance mutuelle obtenus dans le cas triphasé équilibré :

Pour le calcul de la mutuelle entre conducteurs, nous avons procédé au calcul séparé des énergies produites successivement par un et trois conducteurs, puis, nous avons appliqué les équations (II.49) à (II.53) pour déterminer la valeur de la mutuelle inductance.

Les résultats sont donnés en tableau (IV.3).

IV.4.3.Interprétation des résultats de l'inductance mutuelle obtenus dans le cas triphasé équilibré :

La courbe de la figure (IV.18) présente l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction de la distance entre les centres des deux conducteurs pour le cas triphasé. Notons que, plus la distance augmente plus l'inductance mutuelle diminue.

Conclusion

L'utilisation de deux méthodes de calcul, à savoir le calcul numérique via un logiciel éléments finis (femm) et le calcul analytique nous ont permis de déterminer avec une certaine précision l'inductance, la réactance inductive et l'inductance mutuelle du conducteur pour différentes dispositions de la ligne. Nous avons constaté que les deux méthodes donnent des résultats très proches, ce qui nous conforte dans la justesse de ces calculs. À partir de plusieurs calculs, on conclue également que la variation de la distance entre les conducteurs dans les systèmes équilibrés influe sur les paramètres inductifs des lignes.

Conclusion générale

Le but de notre travail a été de déterminer les paramètres inductifs des différents types de ligne aérienne en utilisant deux méthodes : une méthode analytique, et une méthode numérique qui est la méthode des éléments finis via un logiciel libre, FEMM. Cela nous a permis de nous initier à la programmation Lua et ainsi d'avoir des résultats paramétrés, avec comme paramètre la distance inter-conducteurs.

Pour commencer, nous avons exposé avec force démonstration les équations avec lesquelles nous avons effectué les calculs analytiques. Puis, nous nous sommes familiarisés avec l'outil femm et sa plateforme de programmation lua. C'est ainsi que nous avons réalisé un programme lua intégrant les fonctionnalités de femm afin d'effectuer des calculs paramétrés.

Notre premier objectif, a été de déterminer les paramètres inductifs de la ligne aérienne à savoir les inductances propres, mutuelles et la réactance inductive qui sont déterminées à partir de l'énergie magnétique emmagasinée dans le domaine d'étude (air environnant et conducteurs).

Pour avoir l'évolution de l'énergie magnétique en fonction de la distance entre les conducteurs, nous avons effectué plusieurs essais qui nous permettent d'observer cette variation sur les figures des courbes.

D'après les résultats obtenus avec les deux méthodes, nous remarquons qu'il ya une forte concordance entre ces deux méthodes. L'inductance mutuelle diminue fortement avec l'augmentation de la distance inter-conducteur. De plus, il est à signaler que le rayon des conducteurs n'influe sur les paramètres inductifs des lignes.

Enfin, nous espérons que ce travail puisse être approfondi en calculant les paramètres capacitifs et résistifs de la ligne, construire directement les modèles des lignes à partir de leur disposition et de leur géométrie, et servir de référence pour d'autres travaux afin de bien comprendre les méthodes de calcul des paramètres d'une ligne aérienne.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] B.FAIZ « contribution et dimensionnement des lignes électriques de transport de l'électricité », mémoire de master UMMTO, 2014.
- [2] M.BOUDOUR et A. HELLAL « Réseaux électriques »» Editions pages bleues, 2011
- [3] F. P. Miller, A. F. Vandome, J. M C Brewster (Ed.) « Câble électriques à haute tension » Alphascript publishing
- [4] T.WILDI, G.SYBILE « électrotechnique » 4ème édition de boeck, 2004
- [5] P-A CHAMOREL « énergie électriques », école d'ingénieurs de CANTON DE VAUD, département E+I, 1997
- [6] S.CHIBANE« calcul de la coupure de la ligne DTF 220 KV JIJEL- AIN M'LLA au poste haute tension de EL MILIA »mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2012
- [7] L. BELHIMER, A. GHANEM « Etude et réalisation d'un dispositif de lévitation magnétique » mémoire master UMMTO ,2013
- [8] H.CHABANE, M. RACELMA « Etude d'une machine linéaire asynchrone en utilisant la méthode des éléments finis »mémoire ingénieur UMMTO, 2011
- [9] A.BASSAID, A. BOUZOUAR, M. SEGHIR « modélisation des contraintes thermiques d'un moteur asynchrone à cage sous FEMM »mémoire d'ingénieur UMMTO ,2011
- [10] D. MEEKER www.Femm.forster-miller.net « finite element method magnetics, version 4.2-user's Manual »
- [11] Y. WEENS « modélisation des câbles d'énergie soumis aux contraintes générées par les convertisseurs électronique de puissance » thèse doctorat. Université des sciences et technologie de Lille, 2006
- [12] P. LAGONOTTE « les lignes et les câbles » cours en fichier PDF, université de Poitiers
- [13] B.DELCI, Y.BOUNOUA, B.AIT YALA « Détermination des paramètres inductifs par voies numérique et expérimentale d'une machine synchrone à pôles lisses 150VA » mémoire ingénieur UMMTO 2011/2012

- [14] Y.BOUTORA « calcul numérique des champs électromagnétiques» cours UMMTO 2014/2015 (non édité)
- [15] B.BOUKAIS « Contribution à la modélisation des systèmes couples machines a aimants permanents (BDCM-PMSM) » Thèse de doctorat UMMTO, 2012
- [16] B.CHARBAL, M.BELBAY « Amélioration d'un réseau aérien basse tension du village AIT IZID (SOUK ELTENINE) »mémoire DEUA ETH UMMTO, 2008
- [17] N.OUERK « La ligne de transport d'énergie » cours de réseaux électriques (UE5) UMMTO 2014/2015 (non édité)
- [18]M. ZAOUIA (les équations de MAXWELL) Cours d'électromagnétisme UMMTO, 2013/2014 (non édité)
- [19] MAMADOU. KANE « Modèles analytiques originaux pour la détermination des paramètres linéiques des lignes et câble multifilaire parcourus par des signaux large bande » thèse de doctorat. L'école centrale de LYON, juin 1994

Annexe

Programme lua complet pour la construction géométrique d'une ligne unifilaire

```

--définition du problème
newdocument(0)
showconsole()
clearconsole()
mi_probdef(0,"centimeters","planar",1e-8,100,30)
--geometrie
-- diamètre du conducteur d et contour externe dext
for i=5,30 do
Dext =i
d=1
mi_addnode(-d/2,0)
mi_addnode(d/2,0)
mi_addarc(-d/2,0,d/2,0,180,1)
mi_addarc(d/2,0,-d/2,0,180,1)
mi_addnode(-Dext/2,0)
mi_addnode(Dext/2,0)
mi_addarc(-Dext/2,0,Dext/2,0,180,1)
mi_addarc(Dext/2,0,-Dext/2,0,180,1)
--milieux
mi_addcircprop("I+", 1, 1)
mi_addmaterial("air",1,1,0)
mi_addmaterial("cuivre",1,1,0)
mi_addblocklabel(d/2+0.1,0)
mi_selectlabel(d/2+0.1,0)
mi_setblockprop("air",1,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(d/3,0)
mi_selectlabel(d/3,0)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"I+")
mi_clearselected("arc")
--conditions aux limites
-- mi_selectarcsegment(d/3,0,1/2,3)
mi_selectarcsegment(0,Dext)
mi_selectarcsegment(0,-Dext)
mi_setarcsegmentprop(1, "dirichlet", 0, 0)
mi_addboundprop("dirichlet", 0,0, 0,0,0, 0, 0,0, 0)
mi_clearselected()
--sauvegarde document
mi_saveas("param.fem")
mi_createmesh()
mi_analyze(0)
mi_loadsolution()
mo_selectblock(0,d/2+0.1)
We=mo_blockintegral(2)
mo_clearblock()
mo_selectblock(0,d/2-0.1)
Wi=mo_blockintegral(2)
WT=We+Wi
mo_clearblock()
L=2*WT
pi=3.1415653815
X=pi*100*L
print(i,We,Wi,WT,L,X)
mi_selectnode(-Dext/2,0)

```

```

mi_selectnode(Dext/2,0)
mi_deleteselectednodes()
end
mi_zoomnatural()

```

Programme lua complet pour la construction géométrique d'une ligne monophasée

```

newdocument(0)
showconsole()
clearconsole()
mi_probdef(0,"centimeters","planar",1e-8,100,30)
--geometrie
for i=2,26 do
d=i
mi_addnode(d,0)
mi_addnode(d+1,0)
mi_addarc(d,0,d+1,0,180,1)
mi_addarc(d+1,0,d,0,180,1)
mi_addnode(-d,0)
mi_addnode(-d-1,0)
mi_addarc(-d,0,-d-1,0,180,1)
mi_addarc(-d-1,0,-d,0,180,1)
mi_addnode(0,2*d+2)
mi_addnode(0,-2*d-2)
mi_addarc(0,2*d+6,0,-2*d-2,180,1)
mi_addarc(0,-2*d-6,0,2*d+2,180,1)
--milieux
mi_addcircprop("I+", 1, 1)
mi_addmaterial("air",1,1,0)
mi_addmaterial("cuivre",1,1,0)
mi_addblocklabel(-d,d)
mi_selectlabel(-d,d)
mi_setblockprop("air",1,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(d+0.2,0)
mi_selectlabel(d+0.2,0)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"I+")
mi_clearselected("arc")
mi_addblocklabel(-d-0.2,0)
mi_selectlabel(-d-0.2,0)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"I+")
mi_clearselected("arc")
--conditions aux limites
mi_selectarcsegment(2*d+2,0)
mi_selectarcsegment(-2*d-2,0)
mi_setarcsegmentprop(1, "dirichlet", 0, 0)
mi_addboundprop("dirichlet", 0,0, 0,0,0, 0, 0,0, 0)
mi_clearselected()
--sauvegarde document
mi_saveas("param.fem")
mi_createmesh()
mi_analyze(0)
mi_loadsolution()
mo_selectblock(d,d)
We=mo_blockintegral(2)
mo_clearblock()

```

```

mo_selectblock(d+0.4,0)
Wi1=mo_blockintegral(2)
mo_clearblock()
mo_selectblock(-d-0.4,0)
Wi2=mo_blockintegral(2)
mo_clearblock()
WT=Wi1+Wi2+We
L=2*WT
pi=3.1415653815
X=pi*100*L*100
mo_clearblock()
print(i,WT,We,Wi1,Wi2,L,X)
mi_selectnode(0,2*d+2)
mi_selectnode(0,-2*d-2)
mi_selectnode(d,0)
mi_selectnode(d+1,0)
mi_selectnode(-d,0)
mi_selectnode(-d-1,0)
mi_deleteselectednodes()
mi_selectlabel(d+0.2,0)
mi_selectlabel(-d-0.2,0)
mi_selectlabel(-d,d)
mi_deleteselectedlabels()
end
mi_zoomnatural()

```

Programme lua complet pour la construction géométrique d'une ligne triphasée équilibrée

```

--définition du problème
newdocument(0)
showconsole()
clearconsole()
mi_probdef(0,"centimeters","planar",1e-8,100,30)
--geometrie
for i=2,26 do
d=i
mi_addnode(d,0)
mi_addnode(d+1,0)
mi_addarc(d,0,d+1,0,180,1)
mi_addarc(d+1,0,d,0,180,1)
mi_addnode(-d,0)
mi_addnode(-d-1,0)
mi_addarc(-d,0,-d-1,0,180,1)
mi_addarc(-d-1,0,-d,0,180,1)
mi_addnode(0,d+1.8)
mi_addnode(0,d+2.8)
mi_addarc(0,d+1.8,0,d+2.8,180,1)
mi_addarc(0,d+2.8,0,d+1.8,180,1)
mi_addnode(0,2*d+6)
mi_addnode(0,-2*d-3.1)
mi_addarc(0,2*d+6,0,-2*d-3.1,180,1)
mi_addarc(0,-2*d-3.1,0,2*d+6,180,1)
--milieux
mi_addcircprop("I+", 1, 1)
mi_addmaterial("air",1,1,0)
mi_addmaterial("cuivre",1,1,0)

```

```
mi_addblocklabel(0,0)
mi_selectlabel(0,0)
mi_setblockprop("air",1,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(d+0.1,0)
mi_selectlabel(d+0.1,0)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"I+")
mi_clearselected("arc")
mi_addblocklabel(-d-0.1,0)
mi_selectlabel(-d-0.1,0)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"I+")
mi_clearselected("arc")
mi_addblocklabel(0,d+2)
mi_selectlabel(0,d+2)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"I+")
mi_clearselected("arc")
--conditions aux limites
mi_selectarcsegment(2*d+6,0)
mi_selectarcsegment(-2*d-3.1,0)
mi_setarcsegmentprop(1, "dirichlet", 0, 0)
mi_addboundprop("dirichlet", 0,0, 0,0,0, 0, 0,0, 0)
mi_clearselected()
--sauvegarde document
mi_saveas("param.fem")
mi_createmesh()
mi_analyze(0)
mi_loadsolution()
mo_clearblock()
mo_selectblock(0,d+7)
We=mo_blockintegral(2)
mo_clearblock()
mo_selectblock(d+0.2,0)
Wi1=mo_blockintegral(2)
mo_clearblock()
mo_selectblock(-d-0.2,0)
Wi2=mo_blockintegral(2)
mo_clearblock()
mo_selectblock(0,d+2)
Wi3=mo_blockintegral(2)
WT=Wi1+Wi2+Wi3+We
L=2*WT
pi=3.1415653815
X=pi*100*L*1000
mo_clearblock()
print(i,WT,We,Wi1,Wi2,Wi3,L,X)
mi_selectnode(0,2*d+6)
mi_selectnode(0,-2*d-3.1)
mi_selectnode(d,0)
mi_selectnode(d+1,0)
mi_selectnode(-d,0)
mi_selectnode(-d-1,0)
mi_selectnode(0,d+1.8)
mi_selectnode(0,d+2.8)
mi_deleteselectednodes()
mi_selectlabel(d+0.1,0)
```

```
mi_selectlabel(-d-0.1,0)
mi_selectlabel(0,d+2)
mi_deleteselectedlabels()
end
mi_zoomnatural()
```