

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

SMAHI Walid

SLIMANI Ahmed

Thème:

Simulation d'une agression rayonnée d'un câble électrique

Soutenu publiquement

Le : 25/06/2018

Devant le jury :

M^f Bouchala Tarik

MCA

Président

UKM Ouargla

M^f Ayad Ahmed Nour El Islam

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

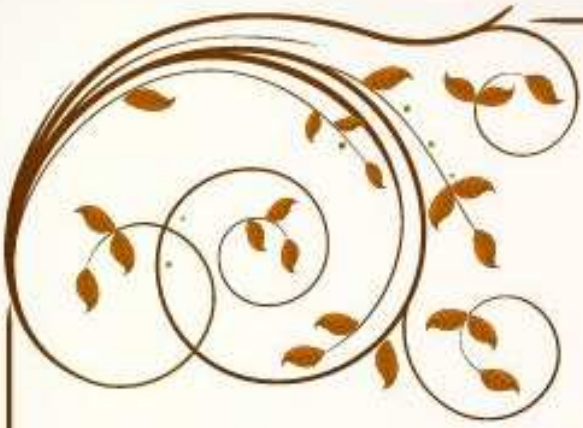
M^{adame} Naceur Sonia

MCA

Examinatrice

UKM Ouargla

Année universitaire 2017/2018



Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

Pour nos pères et mères en général

Pour nos frères et nos sœurs

Pour tout les membres de nos familles

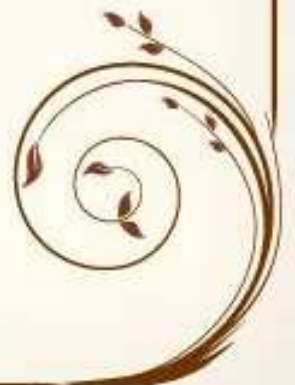
Pour nos très chers amis

A tous les étudiants de électrotechniques

*A tous les enseignants du département génie
électrique*

*A tous les travailleurs de l' université Kasdi
Merbah*

Ahmed & Walid



REMERCIEMENTS

*D'abord, nous remercions **ALLAH** le tout puissant qui nous éclairé nos chemin et qui nous a donné la force pour accomplir ce travail.*

En tout premier lieu, nous remercie vivement mes mères et mes pères qui ont nous donné tous les outils et les conditions de succès. Stimulation et de confiance et de soins et des dépenses, durant les dix-huit années d'études (2001-2018).

*Nous tenons à remercier vivement **Mr. AYAD AHMED NOUR EL ISLAM** notre Rapporteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.*

*Nous remercions affectueusement, le comité de jury Madame **NACEUR** Sonia, Monsieur **BOUCHALA** Tarik d'avoir accepté l'évaluation de la qualité de ce mémoire.*

Nous remercions aussi tous mes enseignants de l'université Kasdi Merbah, pour tous les efforts déployés et pour les informations et la formation.

*Nous voudrions remercier spécialement **Mr. TAIBI DJAMEL**, chercheur à l'université d'Ouargla, de cette mémoire, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et sa qualité humaine.*

Nous remercions tous les collègues de la promotion 2013

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Liste des figures

Liste des Tableau

Liste des Acronymes et Symboles

Introduction Générale.....1

Chapitre I : Les perturbations électromagnétiques induites dans les câbles électriques

I.1.Introduction3

I.2.Historique..... 3

I.3.Définition de la compatibilité électromagnétique3

I.4.Les différents aspects de la C.E.M.....3

I.5.Définition d'une perturbation électromagnétique.....4

I.5.1.Origine des émissions électromagnétique5

I.5.2.Les sources de perturbations électromagnétiques :7

I.5.3.Modes de transmission des perturbations électromagnétiques.....7

I.5.3.1.Vecteurs de propagation7

I.5.3.1.1.Les couplages par conduction8

I.5.3.1.2.Les couplages par rayonnement : 9

a) Couplage inductif.....9

b) Couplage capacitif.....9

c)Couplage champ à fil.....10

I.6.Les ondes électromagnétiques.....:11

I.6.1.Les ondes électriques:11

I.6.2.Les ondes magnétiques:12

I.6.3.Les caractéristiques fondamentales des ondes.....12

I.7.Les lignes de transmission13

I.8.Les différents types de câbles électriques.....14

I.9.Conclusion.....16

Chapitre II : Modélisation et simulation des câbles électriques

II.1 Introduction17

II.2 Calcul du champ électromagnétique17

II.2.1. Equations de Maxwell17

a-Propriétés magnétiques18

b-Caractéristiques diélectrique.....18

c- Relations de continuité entre deux milieux différents19

d- Conditions de passage	19
II.3 Modèles électromagnétiques	20
II.3.1 Modèle Electrostatique :	20
II.3.2 Modèle magnétostatique.	21
II.3.2.1 Modèle magnétostatique scalaire.	21
II.3.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle.	21
II.3.3.3 Formulation en termes de potentiel vecteur	21
II.4 Déclaration des conditions aux limites	23
II.5 Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles	23
II.5.1 Méthode des Différences Finis (MDF) :	24
II.5.2 Méthode des intégrales de frontières (MIF) :	24
II.5.3 Méthode des Volumes Finis (MVF) :	25
II.5.4 Méthode des Eléments Finis (MEF) :	25
a- Fonction d'approximation.....	27
b- Formulation Intégrale	27
II.6 Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL	27
II.6.2 Processus de simulation par le logiciel COMSOL	28
II.6.3 Structure du programme	29
A) Bloc d'entrée (Préprocesseur)	29
B) Bloc de résolution (Processeur)	30
C) Bloc de sortie (Poste processeur)	30
II.8 Conclusion.....	31

Chapitre III : Simulation des lignes de transmission

III.1 Introduction	32
III.2 Représentation des lignes de transmission électriques :	32
III.3 Résultats de simulation du champ électromagnétique des lignes électriques :	32
III.3.1 Les géométries et la distribution du champ magnétique des lignes électriques	32
III.3.3 Mesure du champ magnétique près des lignes de transmission aérienne :	34
III.3.4 Présence d'un défaut de court circuit dans les lignes électriques	37
III.3.5 Calcul du champ électrique près des lignes de transmission aérienne :	41
III.3.6 Présence d'un défaut de surtension dans les lignes électriques	43
III.8 Conclusion.....	47

Chapitre IV : Agression électromagnétique d'un câble alimentant une machine électrique

IV.1.Introduction.....	47
IV.2.Présentation de la machine asynchrone triphasée en Matlab Simulink.....	47

IV.3.Modèle de la machine asynchrone alimentée en courant.....	47
IV.4.Transformation triphasé – diphasé.....	48
IV.4.1.Les transformations de Clarke et Concordia.....	48
IV.4.2.La transformation de Park.....	49
IV.5.Simulation.....	50
IV.5.1.Résultats de simulation.....	51
➤Fonctionnement normal du moteur sans agression magnétique	51
➤Les différentes formes d’ondes induites dans le câble électrique	52
➤Visualisation des résultats de simulation pour les agressions magnétiques.....	54
IV.6 Conclusion.....	57
Conclusion Générale.....	58
Références	
Annexes	

Chapitre I les perturbations électromagnétiques induites dans les câbles électriques

Figure I.1 : Transfert de perturbation entre la source et le récepteur.....	04
Figure I.2 : Perturbation électromagnétique	04
Figure I.3 : Propagation d'une onde en mode transverse électromagnétique (TEM).....	05
Figure I.4 : Origine des émissions électromagnétiques.....	06
Figure I.5 : Le transfert de l'énergie électromagnétique.....	08
Figure I.6: Emission en champ Electrique.....	09
Figure I.7: Emission en champ magnétique.....	09
Figure I.8:Couplage inductif.....	10
Figure I.9 : Couplage capacitif.....	10
Figure I.10 : Couplage champ a fil.....	10
Figure I.11 : Couplage en champ proche.....	10
Figure I.12 : Récapitulatif des différents modes de couplage.....	11
Figure I.13 : Les ondes électriques entre les câbles.....	12
Figure I.14 : Les ondes magnétiques entre les câbles.....	12
Figure I.15: Silhouette des familles des supports de lignes aériennes.....	13
Figure I.16 : Les lignes aériennes.....	14
Figure I.17 : les câbles électriques aériens.....	15
Figure I.18 : Représentation des câbles électriques sous terrains.....	16

Chapitre II modélisation et simulation des câbles électrique

Figure. II.1 : Interface entre deux milieux différents.....	19
Figure II.2 : Maillage type différences finies.....	24
Figure II.3 : Méthode des Volumes Finis.....	25
Figure II.4 : Discrétisation du domaine d'étude (maillage).....	26
Figure II.5 : Câble électrique BT avec le maillage dans le logiciel Comsol.....	28
Figure II.6 : Présentation du logiciel COMSOL Multiphasiques.....	29
Figure II.7 : Différents blocs du programme.....	29

Chapitre III simulation des lignes de transmission

Figure III .1 : Le champ magnétique autour et dans les phases.....	33
Figure III.2 : La distribution du champ magnétique au dessous des lignes de transmission.....	34

Figure III.3 : Mesure du champ magnétique près des lignes aérienne.....	36
Figure III.4 Présence d'un défaut de court circuit dans une phase.....	38
Figure III.5 : Calcul du champ magnétique pour le cas d'un court circuit dans une phase.....	40
Figure III.6 : Champ électrique près des lignes de transmission aérienne.....	42
Figure III.7 : calcul du champ électrique près des lignes de transmission aérienne en surtension...	45

Chapitre IV Agression électromagnétique d'un câble alimentant

une machine électrique

Figure IV.1 : La machine asynchrone triphasée alimentée en courant.....	47
Figure IV.2 : Changement des repères.....	49
Figure IV.3 : La source d'alimentation sinusoïdale triphasée.....	50
Figure IV.4: Schéma de la MAS alimentée en courant sous SIMULINK.....	50
Figure IV.5: Schéma bloc de la transformation de Park sous SIMULINK.....	51
Figure IV.6 : Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé.....	52
Figure IV.7 : Agression d'un câble électrique par onde magnétique.....	53
Figure IV.8 : Les différentes formes d'ondes des courants induits.....	54
Figure IV.9 : Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé agressé par une onde sinusoïdale....	54
Figure IV.10 : Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé agressé par une onde répétitive....	55
Figure IV.11 : Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé agressé par une onde aléatoire.....	56

Liste de tableau

Chapitre I les perturbations électromagnétiques induites dans les câbles électriques

Tableau I.1 : Classification des perturbations suivant le domaine fréquentiel.....	06
--	----

Chapitre III simulation des lignes transmission

Tableau III .1 : Caractéristiques géométriques des lignes de transmission aérienne.....	32
---	----

Tableau III.2 : Les caractéristiques des courants de C-C du réseau électrique.....	37
--	----

Tableau III.3 : Les valeurs des surtensions pour chaque niveau de tension.....	43
--	----

Tableau III.4 Mesure du champ électromagnétique pour les lignes électriques.....	45
--	----

Liste des Acronymes et Symboles

CEM Compatibilité électromagnétiques

MDF la méthode des différences finies

MEF la méthode des éléments finis

MVF la méthode des volumes finis

MIF la méthode des intégrales de frontières

MCC la méthode des circuits couplés

Introduction Générale

Introduction Générale

Les lignes de transmission sont un lien vital dans le réseau électrique pour la transmission de l'énergie, soit en lignes souterraines ou des lignes aérienne. La présence des perturbations et des défauts dans les lignes électriques génèrent un champ électromagnétique très important dans la zone proche des lignes électriques, il peut causer des interférences électromagnétiques avec d'autres objets proches des lignes. Les phénomènes transitoires issus des lignes ; court-circuit, foudre, les opérations de manœuvres se propage d'une partie du système d'alimentation à une autre au travers des conducteurs.

Une très bonne modélisation des caractéristiques électromagnétiques des lignes électriques dépend de plusieurs paramètres comme : les caractéristiques des câbles électriques (conductivité, forme du fil, section transversale, etc.), la hauteur des lignes, les caractéristiques géométriques et structurelles des pylônes, la fréquence des signaux perturbateurs, et de la distance entre les conducteurs et de l'environnement immergé (air, sol, eau, etc.)

L'objectif principal du travail est la simulation des propriétés électromagnétiques autour des lignes électriques aériennes en deux états sans et avec des défauts transitoires. Cette simulation va être faite à travers la méthode des éléments finis (MEF) pour résoudre le problème de différentes géométries. Ainsi que de voir l'influence de la présence des perturbations conduites dans un câble alimentant un moteur électrique

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit l'état de l'art sur la compatibilité électromagnétique et les perturbations conduites et rayonnées ainsi que sur les ondes électromagnétiques. Nous avons défini quelque type des câbles électriques aériens et sous terrains et leurs caractéristiques.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des notions fondamentales et les équations d'électromagnétisme ainsi que les méthodes numériques pour la modélisation et la simulation des caractéristiques électromagnétiques dans et autour des câbles et des lignes électriques.

Le troisième chapitre fait l'objet de la représentation des résultats de simulation des différentes géométries des lignes électriques aériennes, le champ électromagnétique autour et au dessous d'elles, ainsi que l'influence de la présence des défauts transitoires de court circuit et de surtension dans une phase sur l'intensité et la distribution du champ électromagnétiques.

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude de la propagation d'une perturbation électromagnétique avec un intérêt particulier d'agresser un moteur électrique asynchrone. Ces ondes rayonnées induites à travers les câbles deviennent ondes conduites et donne des conséquences sur les paramètres électromagnétique et mécanique du moteur.

Chapitre I

Les perturbations électromagnétiques induites dans les câbles électriques

I.1. Introduction :

Tout système électrique est soumis à des perturbations électromagnétiques franchissant d'une manière non intentionnelle leurs frontières. Il existe des perturbations d'origines naturelles et des perturbations dues à l'activité humaine, pour limiter ou éliminer ces interférences électromagnétiques on doit étudier la compatibilité électromagnétique entre les différents systèmes et appareils.

I.2. Historique

Les perturbations électromagnétiques, ont été observées lors des premières applications de l'électricité. En effet, les premiers télégraphes, 1850 environ, ont déjà été victimes des problèmes de diaphonie qui peuvent naître des phénomènes découplage entre deux lignes voisines.

Durant les débuts de l'électrification du chemin de fer, vers 1910, on a remarqué l'existence d'interférences entre les lignes de transport d'énergie et les lignes de télécommunication. Les fils téléphoniques, longeant les voies de chemin de fer, ont dû être remplacés par des câbles blindés pour minimiser les effets de couplage.

Dans le passé, les Interférences Electro Magnétiques (IEM) ont provoqué de nombreux accidents. Citons parmi les plus spectaculaires, la destruction du destroyer britannique HMS Sheffield par un missile Exocet en 1982, lors de la guerre des îles Malouines (Falkland) qui s'est déroulée entre l'Argentine et la Grande Bretagne [1,2].

I.3. Définition de la compatibilité électromagnétique :

Selon le vocabulaire électrotechnique international VEI 161-01-07, la CEM est la capacité d'un dispositif électronique, d'un équipement ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement (électromagnétique) sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables dans cet environnement.

Un appareil électrique génère toujours un niveau de perturbation électromagnétique émis, il devra présenter un certain seuil d'immunité intrinsèque. L'émission devra être inférieure à un seuil prédéfini et supporté un niveau minimum de perturbations [4].

Objectif d'étudier les problèmes de cohabitation électromagnétique entre les systèmes. Elle a pour vocation de :

- Etudier les transferts d'énergie non intentionnels.
- trouver des solutions pour limiter les perturbations électromagnétiques émises.
- Accroître l'immunité des systèmes aux parasites [1,6].

I.4. Les différents aspects de la C.E.M

Lors de l'analyse d'une perturbation électromagnétique, on constate que le problème englobe trois éléments : une source de perturbation qui émet de l'énergie électromagnétique, un canal de couplage au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage et enfin un récepteur qui capte cette énergie, la traite et la superpose à sa fonction normale.

Si les perturbations reçues par ce dernier sont trop élevées et provoquent des interférences, on parle alors de victime de ces perturbations. Ces trois éléments sont représentés ci-dessous en figure (I.1) [2].



Figure I.1 : Transfert de perturbation entre la source et le récepteur [2] .

I.5. Définition d'une perturbation électromagnétique

Les systèmes électriques et/ou électroniques ne sont pas isolés de leur environnement. De l'énergie électromagnétique peut franchir non intentionnellement leurs frontières soit pour y pénétrer, soit pour s'en échapper. Cette énergie parasite est appelée « perturbation électromagnétique ». La figure (I.2) donne exemple d'une perturbation électromagnétique qui commande un automate. [2]

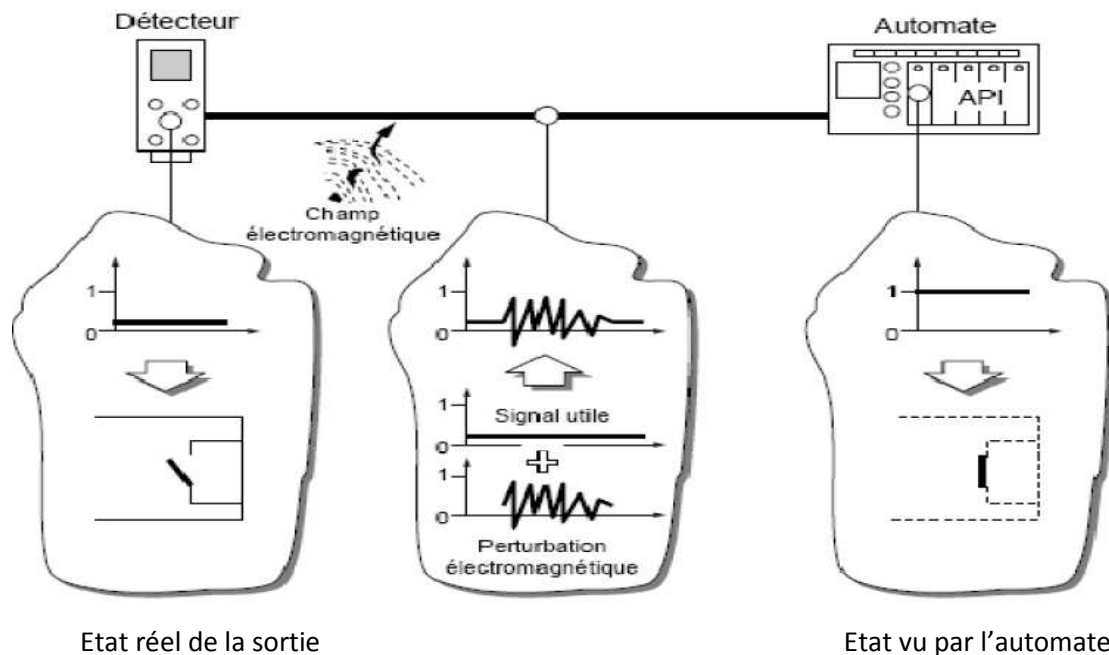
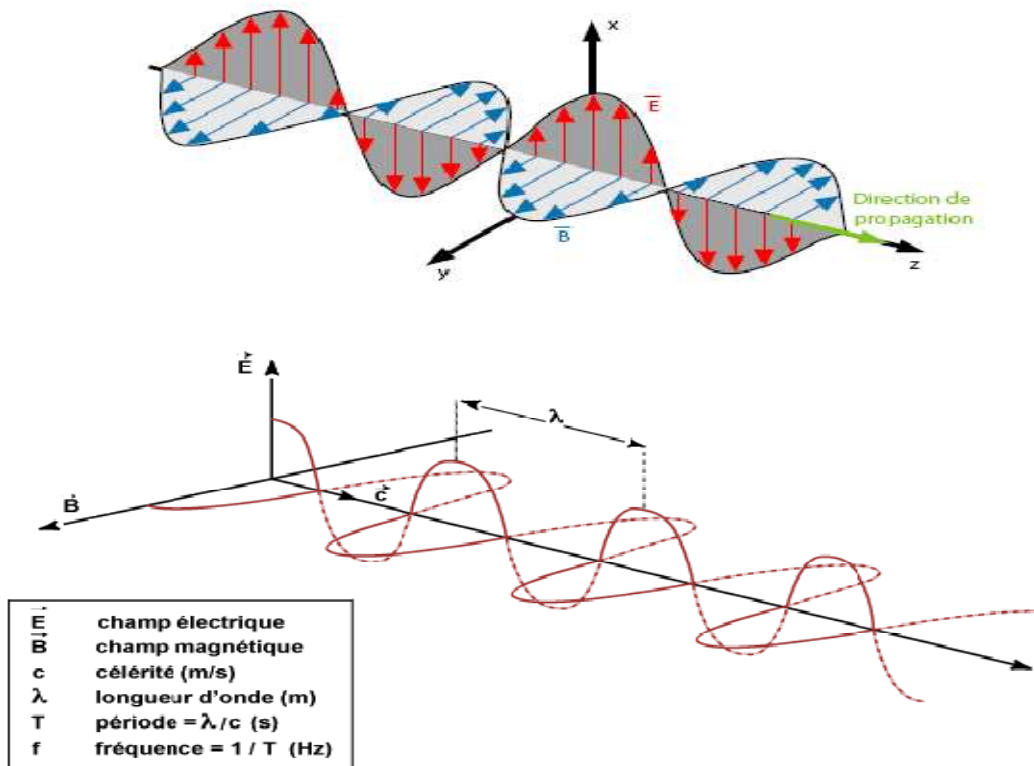
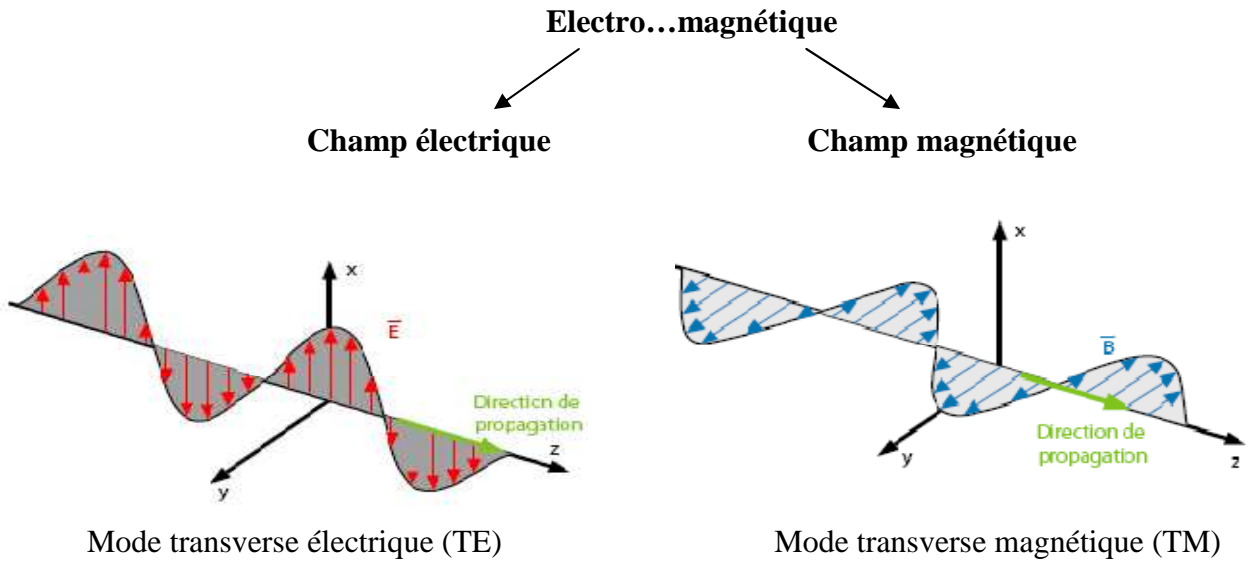


Figure I.2 : Perturbation électromagnétique [2]

Selon une directive européenne, une perturbation électromagnétique est définie comme : « tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, unité d'équipement ou système. Une perturbation électromagnétique peut être un bruit électromagnétique, un signal non désiré, ou une modification du milieu de propagation lui-même » [1,2]. De plus, comme le montre la figure (I.3), une perturbation électromagnétique, comme son nom l'indique est composée d'un champ électrique \vec{E} généré par une différence de

potentiel et d'un champ magnétique \vec{H} ayant pour origine la circulation d'un courant I dans un conducteur. La combinaison des deux champs, magnétique et électrique, donne naissance au champ électromagnétique.



2

Figure I.3 : Propagation d'une onde en mode transverse électromagnétique (TEM). [2,5]

I.5.1. Origine des émissions électromagnétiques

Les perturbations électromagnétiques sont de nature très variée et leur définition fait intervenir de nombreux critères. Elles peuvent être classées selon leurs fréquences, le support

de transmission et leur durée. Ces perturbations sont permanentes ou temporaires, alternatives ou impulsionnelles, basse ou haute fréquence. (Voir Tableaux I.1 et la figure I.4) [2, 4,9].

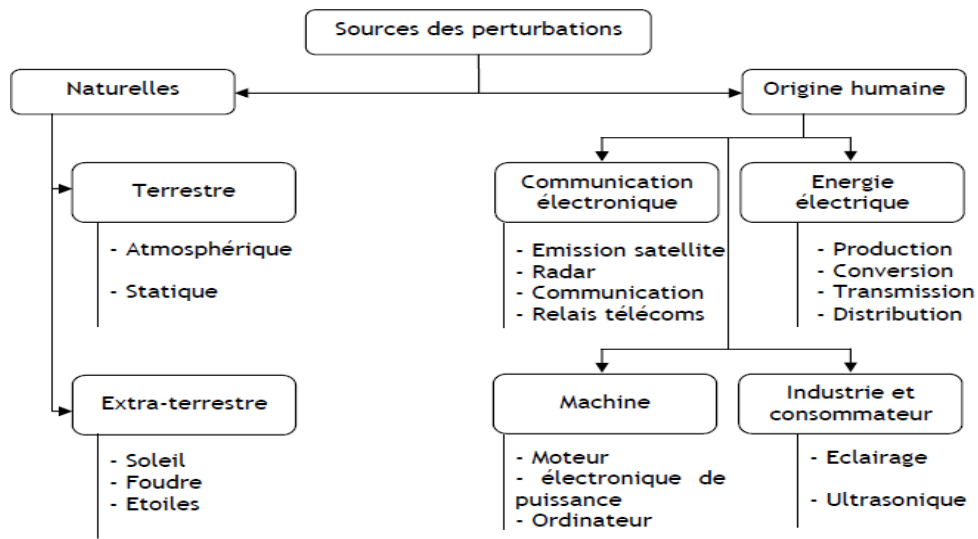


Figure I.4 : Origine des émissions électromagnétiques

Tableau I.1 : Classification des perturbations suivant le domaine fréquentiel

	Perturbations	
Plage de fréquence	Basse fréquence «BF»	Haute fréquence «HF»
Propagation	0 à 1 à 5 MHz. CONDUITE (câbles ...)	Fréquence ≥ 30 MHz RAYONNEE (air ...)
Durée	Souvent longue (quelques dizaines de ms)	Impulsions HF Le temps de montée de l'impulsion < 10 ns
Energie	l'énergie conduite peut être importante et se traduit par le dysfonctionnement voire la destruction des appareils interconnectés.	l'énergie rayonnée est généralement faible et se traduit par le dysfonctionnement des matériels environnants.

I.5.2. Les sources de perturbations électromagnétiques :

- **Les sources de perturbations électromagnétiques se divisent en deux catégories :**
 - les sources de perturbations d'origine naturelle, dont la foudre, les aurores boréales
 - les sources de perturbations liées à l'activité humaine [1,7].

- **Les sources permanentes :**
 - Emetteurs radio
 - Radars
 - Bruits des moteurs électriques
 - Communications fixes et mobiles
 - Ordinateurs, écrans, imprimantes
 - Redresseurs

- **Les sources transitoires :**
 - La foudre
 - Impulsion nucléaire d'origine orageuse
(NEMP : Nuclear Electromagnétique Pulse)
 - Défauts dans les lignes d'énergie
 - Interruption de courant (disjoncteurs)
 - Décharge électrostatique [5].

I.5.3. Modes de transmission des perturbations électromagnétiques

L'identification du mode de transmission des perturbations est l'élément essentiel à la bonne analyse des phénomènes de la «CEM».

I.5.3.1. Vecteurs de propagation

La transmission d'une perturbation, entre la source et le récepteur, fait intervenir un ou plusieurs phénomènes physiques, dont découlent différents modes de couplage. En effet celle-ci peut se faire, tant directement par rayonnement que, par conduction dans les câbles. Les couplages sont donc les modes d'action des perturbations «EM» sur les victimes.

D'autre part, tout équipement peut être selon les circonstances, *émetteur (agresseur)* ou *récepteur (victime)* des perturbations. Cela conduit à décomposer les essais et analyses en quatre catégories, que l'on trouve dans les normes de compatibilité. Chaque équipement ou système est alors caractérisé par deux grandeurs que sont l'émission et la susceptibilité. La figure (I.5) illustre les modes de transfert de l'énergie électromagnétique [8,12].

Le couplage d'une source à un récepteur ne peut se faire que de deux manières :

- ✓ *Soit par rayonnement, c'est le « couplage par rayonnement ».*
- ✓ *Soit par conduction, c'est le « couplage par conduction ».*

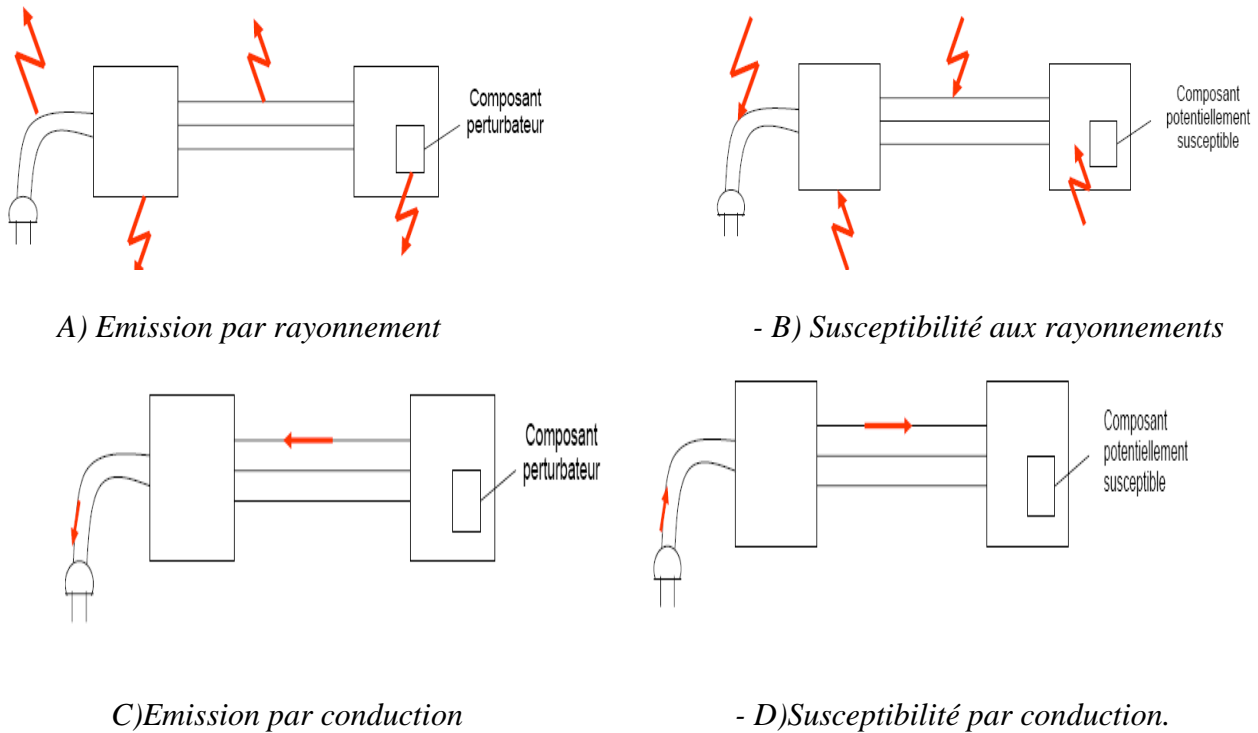


Figure I.5 : Le transfert de l'énergie électromagnétique [2 ,11]

On appelle alors :

- A) *Emission par rayonnement*: La mesure des champs EM rayonnés par l'équipement sous test.
- C) *Emission par conduction* : La mesure de la perturbation injectée dans le réseau.
- B) *Susceptibilité aux rayonnements*: La capacité de fonctionner en présence de champs E.M d'intensité donnée.
- D) *Susceptibilité à la conduction*: La capacité de fonctionner en présence de perturbations conduites. [2]

I.5.3.1.1. Les couplages par conduction

Les perturbations conduites sont véhiculées par un «conducteur» électrique et peuvent également être transmises en utilisant comme vecteur les connexions électriques entre différents équipements. C'est la propagation d'une tension ou d'un courant dans des conducteurs (fils reliant le signal, les commandes ou les alimentations).Elles peuvent donc être transmises par :

- Lignes d'alimentation internes, ou le réseau de distribution,
- câbles de contrôle
- câbles de transmission de données, bus, ...
- câbles de masses (PE - PEN ...),
- terre, les capacités parasites, ...

Les modes de couplage entre une source de perturbation et une victime peuvent aussi être classifiés selon la manière dont la perturbation est couplée à la victime, il existe deux modes de couplages : *mode différentiel* et *mode commun* [1, 2,3].

I.5.3.1.2. Les couplages par rayonnement :

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel et ou parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace (Figures I.6 et I.7).

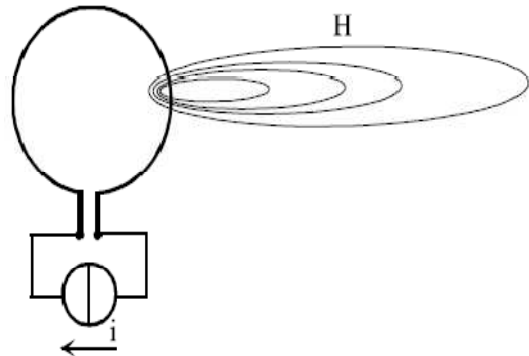
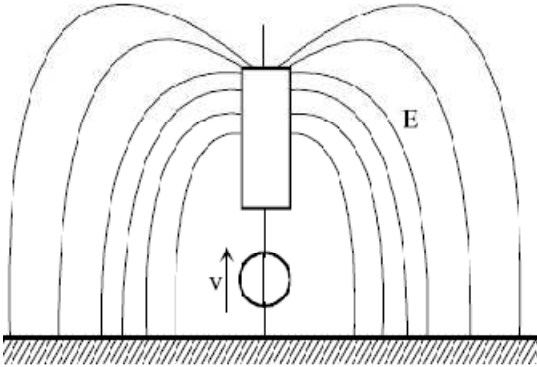


Figure I.6 : Emission en champ Electric **Figure I.7 :** Emission en champ magnétique

Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source. Les perturbations rayonnées sont véhiculées par le milieu ambiant (air ...); c'est une propagation d'un champ électromagnétique dans un milieu non conducteur (air ou autre type de matériau isolant) ou conducteur (blindage métallique).[1,2,10]

Selon la nature de la perturbation émise, les couplages d'une source à un récepteur pourront être de deux types :

- ✓ Soit inductif, c'est le « couplage inductif »;
- ✓ Soit capacitif, c'est le « couplage capacitif ».

a) Le couplage inductif

Un courant « I » circulant dans un conducteur électrique, crée un champ magnétique qui rayonne autour du conducteur. Il est évident que le courant circulant doit être élevé; il est principalement généré par les circuits de « puissances » (véhiculant de forts courants > 10 A). Toute boucle formée par un conducteur électrique de surface « S » et baignée dans un champ magnétique variable voit apparaître une tension « U » alternative à ses bornes (Figure I.8). [1]

b) Le couplage capacitif

Il existe toujours une capacité non nulle entre un circuit électrique (câble, composant ...) et un autre circuit proche (conducteur, masse ...). Une différence de potentiel variable entre ces deux circuits va générer la circulation d'un courant électrique de l'un vers l'autre à travers l'isolant (l'air ...) et former ainsi un condensateur appelé capacité parasite. Ce courant parasite est d'autant plus élevé que la fréquence de la tension aux bornes de la capacité parasite est élevée.

Si ces capacités parasites entre circuits sont totalement négligeables en 50 Hz, elles ont une importance considérable en haute fréquence «HF» et sont à l'origine de dysfonctionnements d'installations (Figure I.9). [1]

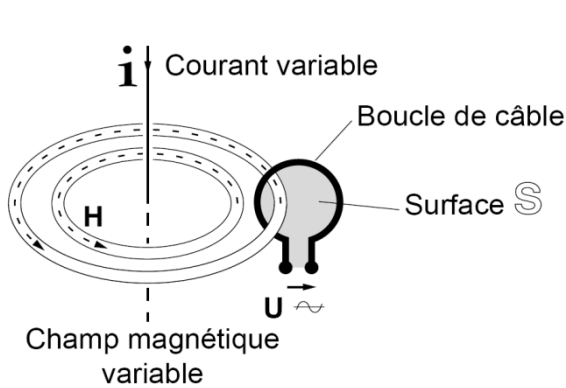


Figure I.8 couplage inductif

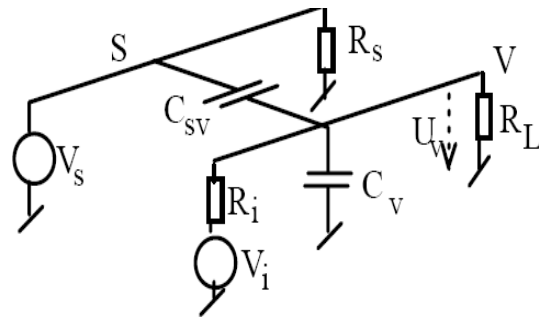


Figure I.9 couplage capacitif

La description du champ électromagnétique généré par un système est souvent difficile car chaque système contient en général plusieurs sources qui contribuent au rayonnement. Il peut y avoir un certain nombre de (petites) boucles de courant, dont chacune peut être assimilée à un dipôle magnétique.

D'autre part, il peut y avoir une contribution importante des courants en mode commun circulant dans les câbles de connexion. Ces derniers peuvent être assimilés à des dipôles électriques [13].

c) Couplage champ à fil

Il est aussi appelé couplage par "champ à câble". Lorsqu'un champ électrique variable illumine un conducteur, il s'y réfléchit comme la lumière sur un miroir. Cette réflexion s'accompagne de la génération d'un courant déplacé sur le conducteur victime (Figure I.10) [14].

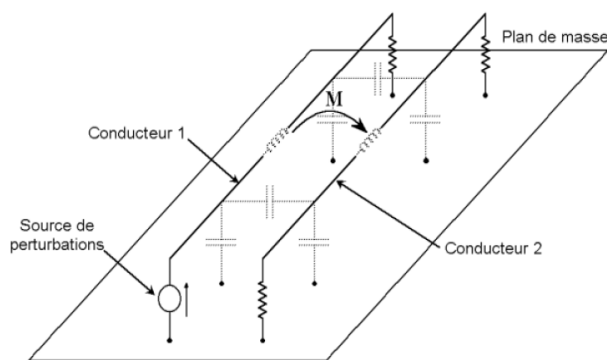


Figure I.10 : Couplage champ à fil

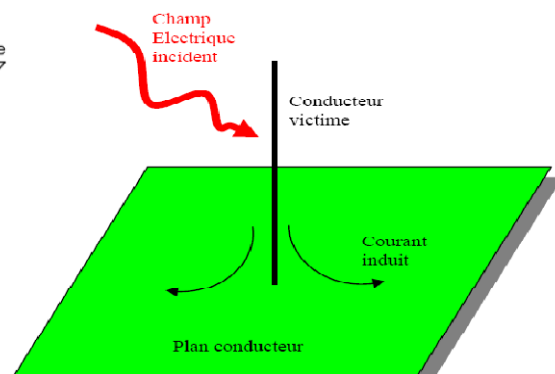


Figure I.11 : Couplage en champ proche.

Lorsqu'un champ électrique variable éclaire un conducteur, celui-ci sera parcouru par un courant de conduction. Un exemple simple est celui de l'antenne de radio d'automobile, antenne fouet, elle convertit le champ électrique émis par un émetteur de radiodiffusion, en signal électrique conduit qui sera ensuite traité par la radio voir la figure (I.11).

Il est à noter qu'il n'est pas nécessaire que le conducteur victime soit en circuit fermé pour qu'il y ait circulation du courant, les lignes de courant sont refermées par la capacité qui existe entre les extrémités du conducteur [2]. La figure (I.12) récapitule des différents modes de couplage existant.

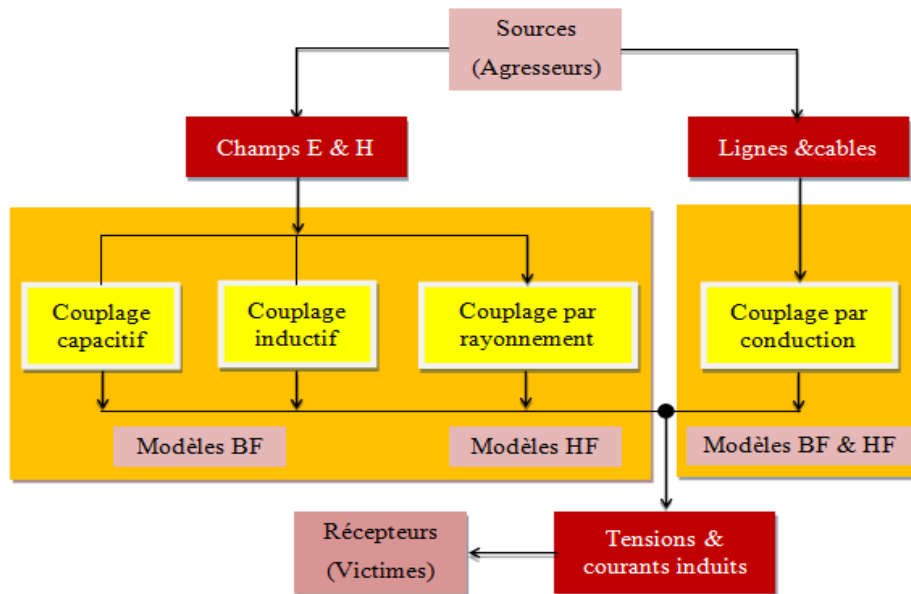


Figure I.12 : Récapitulatif des différents modes de couplage [2]

I.6. Les ondes électromagnétiques:

I.6.1. Les ondes électriques :

Le champ électrique est défini comme toute région de l'espace dans laquelle une charge est soumise à une force de Coulomb. Ils sont causés par la différence de potentiel (ou tension électrique toujours présente dans les circuits) voir la figure (I.13) [15,16] .

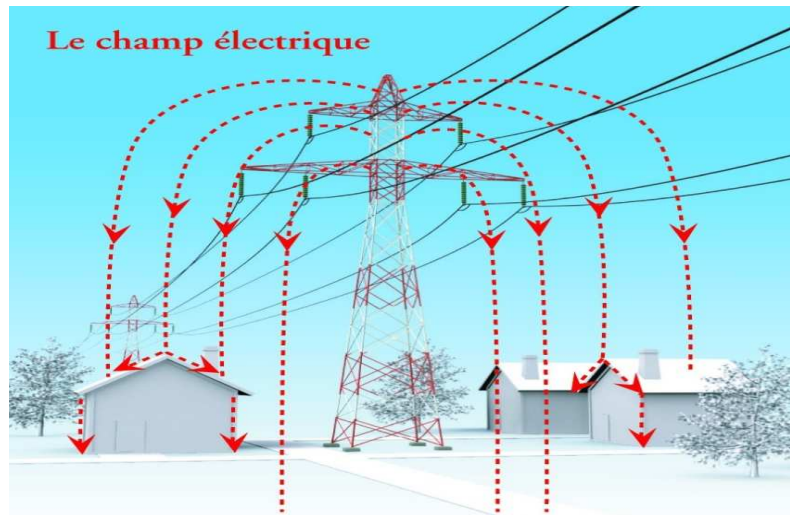


Figure I.13 : Les ondes électriques entre les câbles

I.6.2. Les ondes magnétiques :

Le champ magnétique est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel voir la figure (I.14), c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, définie en tout point de l'espace, permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques [17].

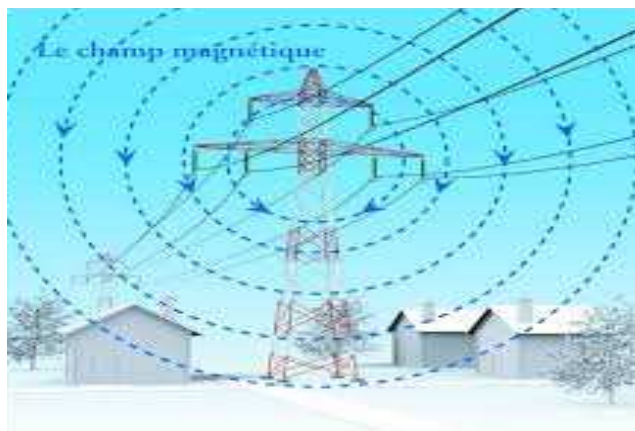


Figure I.14 : Les ondes magnétiques entre les câbles

I.6.3. Les caractéristiques fondamentales des ondes :

Les caractéristiques d'une onde nous permettent de la décrire et d'en expliquer la propagation, les ondes possèdent toutes des caractéristiques communes :

- leur façon de se propager
- l'amplitude
- la fréquence et la période
- la longueur d'onde
- la vitesse de propagation [18].

I.7. Les lignes de transmission :

Le calcul des paramètres électriques des lignes aériennes s'effectue à l'aide des caractéristiques géométriques et mécaniques des ouvrages de transport d'énergie électrique (niveau de tension, silhouette des pylônes, nature des conducteurs, distance d'isolement, distance entre conducteurs, hauteur moyenne des conducteurs au-dessus du sol...). Les figures (I.15 et I.16) donne leur dimensionnement.

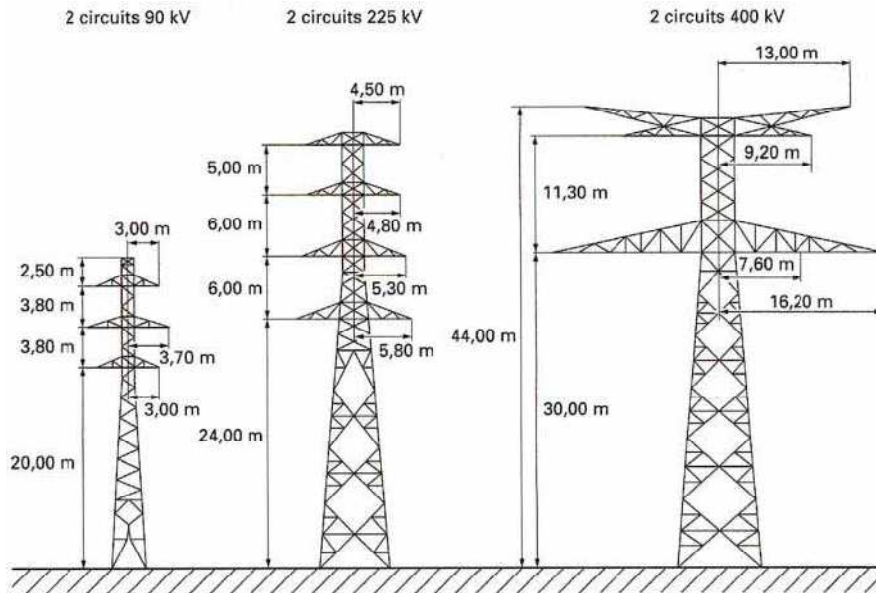


Figure 1.15 Silhouette des familles des supports de lignes aériennes [36].

Une ligne de transmission est une structure comprenant plusieurs conducteurs acheminant un signal électrique et dont la géométrie transversale est uniforme sur toute la longueur. Le mode de propagation dans une ligne de transmission est considéré quasi T.E.M (onde transverse électromagnétique) le long du câblage.

Les lignes aériennes sont composées de câbles conducteurs étant nus illustré dans la figure (I.19) (non isolés pour minimiser le poids et le coût), généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes : de bois, des pylônes en treillis d'acier de plus de 75 m de hauteur de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée [13].

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs en verre ou en céramique, ou en matériau synthétique, le nombre d'assiettes dépendra de la tension de la ligne. L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés, tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager) voir la figure (I.18).



Ligne THT



Ligne HT



Ligne MT



Ligne BT

Figure I.16 Les lignes aériennes.

I.8. Les différents types de câbles électriques:

Au niveau de l'étude de projet le choix entre des lignes électriques aériennes ou souterraines pour un réseau électrique dépend de plusieurs contraintes telles que la nature de la région, de l'exploitation et de la maintenance et des avantages et des inconvénients de chaque type.

-Les câbles aériens

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 par effet couronne et d'augmenter la puissance pouvant transiter. Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés.

On utilise en général 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 voir la figure (I.18), [19].



Structure des câbles

Câble THT 400 KV

câbles MT

câbles torsadés BT

Figure I.17 les câbles électriques aériens [33,34 ,39]

-Les câbles sous terrains

Les lignes souterraines sont utilisées en basse et moyenne tension, haute tension. Le domaine d'utilisation : le transport sous-marin, les sites protégés, alimentation de grandes villes, les zones à forte densité de population, mais elles sont plus coûteuses à l'installation voir la figure (I.18).

Les principaux composants des câbles souterrains sont :

- **Âme conductrice** est en cuivre ou en aluminium, elle est subdivisée en conducteurs toronnés pour avoir une flexibilité suffisante et une grande surface exposée à l'air pour le refroidissement et une grande conductivité.
- **Un diélectrique** destiné à isoler électriquement les conducteurs les uns des autres et du milieu extérieur. Le polychlorure de vinyle (PVC) a des propriétés mécaniques, thermiques et électriques suffisantes, il est utilisé pour des tensions inférieures à 400kV. L'épaisseur de l'isolation dépend de la tension nominale du câble et du champ électrique en régime permanent et transitoire admis au niveau des interfaces.
- **Écran semi-conducteur**: sert à assurer une bonne interface entre le conducteur et l'isolation, et entre l'isolation et l'écran métallique afin d'éviter les décharges partielles.
- **Un écran métallique extérieur** joue à la fois le rôle d'électrode de référence, de conducteur de retour dans les câbles monophasés et pour le courant homopolaire, de barrière d'étanchéité et, éventuellement, de protection mécanique. Cet écran est en plomb, en cuivre ou en aluminium.
- **Une gaine de protection extérieure en PVC** ou en polyéthylène pour assurer une protection de l'écran métallique vis-à-vis de la corrosion par les agents chimiques présents dans le sol et éviter le retour de courants vagabonds par l'écran métallique. [14]

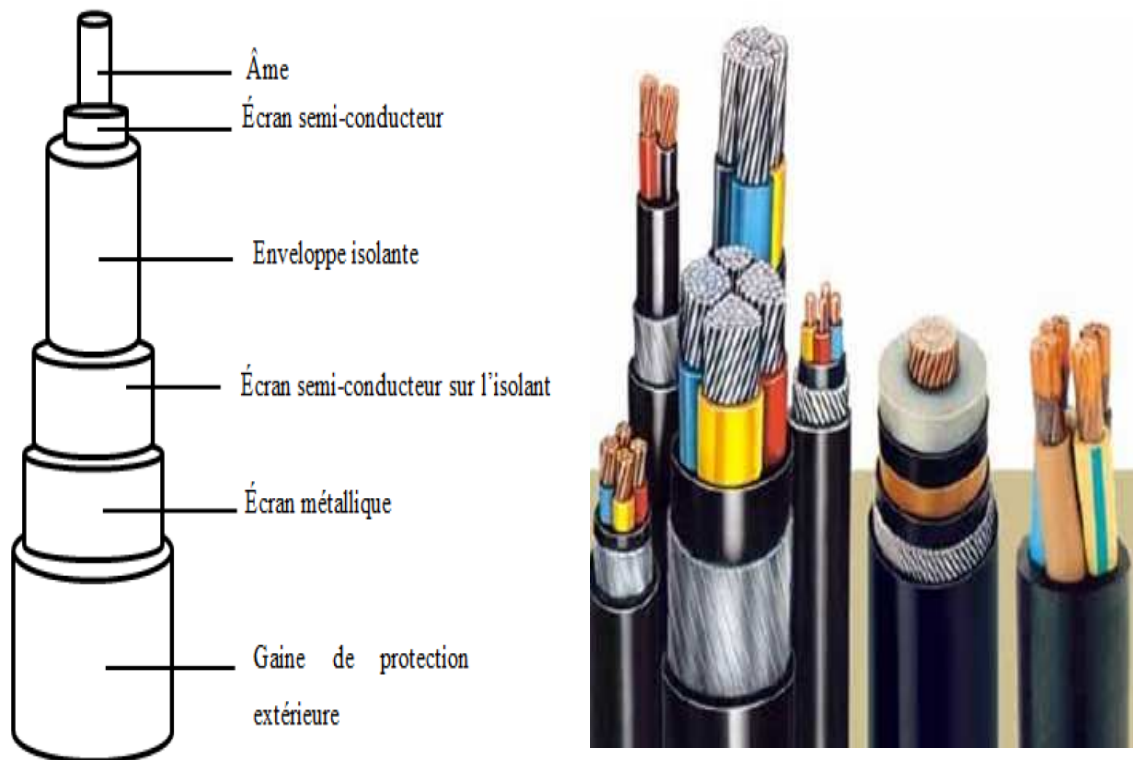


Figure I.18. Représentation des câbles électriques sous terrains [19]

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions essentielles à la compréhension du phénomène de compatibilité électromagnétique « CEM » et les différents types de propagation des perturbations électromagnétiques dans les câbles électriques. Nous avons défini et présenter les différents types de câbles électriques aériennes et sous terrains. Le prochain chapitre sera dédié à la modélisation et la simulation des différents câbles électriques.

Chapitre II

Modélisation et simulation des câbles électriques

II.1 Introduction

Pour la simulation de n'importe quel dispositif magnétique nous aurons besoin des caractéristiques électriques, magnétiques et géométriques des différents milieux, les calculs et la représentation du champ électromagnétique produit aux bornes d'un câble vont devenir très simple en utilisant les équations de Maxwell. L'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques des câbles électriques [20].

Dans notre deuxième chapitre on s'intéresse aux équations de Maxwell et aux modèles mathématiques des phénomènes électromagnétiques ainsi qu'une simple présentation des méthodes numériques de calculs du champ magnétique comme la méthode des éléments finis afin de visualiser et calculer la distribution des paramètres magnétiques autour et à proximité des lignes électriques l'état statique sans ou avec la présence des défauts dans les phases.

II.2 Calcul du champ électromagnétique

L'étude magnétique de n'importe quel dispositif électrique nécessite la connaissance des champs électromagnétiques \vec{B} et du \vec{H} dans chaque parties est très nécessaire pour accès au calcul donc des valeurs du flux, l'effet inductif ou capacitif etc., elles sont en fonction du champ et de l'induction magnétique. Le calcul du champ magnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles de Maxwell qui constituent le modèle de départ. [21]

II.2.1. Equations de Maxwell

James Maxwell (1831-1878), physicien écossais de talent exceptionnel, d'avoir unifié en 1865 ces deux théories de l'**électricité** et du **magnétisme** distinctes en une seule et unique dite « **Électromagnétisme** », cette théorie unifiée les quatre équations de Maxwell. La plupart des phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell qui doivent être adaptées au milieu à plusieurs domaines du dispositif à étudier [21]. Tout dispositif électromagnétique En tout point de l'espace obéit aux équations suivantes:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Loi de Maxwell-Gauss} \quad (\text{II-1})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell-Faraday} \quad (\text{II-2})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell-Ampère} \quad (\text{II-3})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du flux magnétique} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

\vec{E} : Champ électrique en (v/m)

\vec{B} : Induction magnétique en (T).

\vec{H} : Champ magnétique en (A/m).

\vec{J} : Densité de courant en (A/m²).

\vec{D} : Induction électrique en (C/m²).

ρ : Densité de charge volumique en (C/m³).

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m²).

A ces relations il faut rajouter les relations constitutives supplémentaires afin d'améliorer les équations de Maxwell en fonction des propriétés caractéristiques des milieux, qui s'écrivent sous les expressions suivantes :

- Propriétés magnétiques.
- Caractérisation diélectrique.

a-Propriétés magnétiques

Un milieu magnétique est caractérisé par les relations magnétiques, qui permettent d'exprimer l'induction magnétique en fonction du champ d'excitation pour les milieux isotropes on a :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}_r \quad \text{Relation magnétique} \quad (\text{II-5})$$

$$B = \mu H \quad \text{Induction du champ magnétique} \quad (\text{II-6})$$

Où

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \text{Pour un milieu magnétique} \quad (\text{II-7})$$

$\mu_r = 1$ pour un milieu amagnétique. μ_r perméabilité relative du milieu considéré
 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ perméabilité du vide (H/m) [26].

b-Caractéristiques diélectrique

Induction du champ électrique est donnée par :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad \text{Relation diélectrique} \quad (\text{II-8})$$

Où :

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ Avec ε_0 : Permittivité de l'air et ε_r : Permittivité relative du milieu considéré en (F/m).

Pour un milieu conducteur, la densité de courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Loi d'ohm}) \quad (\text{II-9})$$

Les densités des courants sont reliées entre eux par leurs milieux (conductivité électrique, perméabilité magnétique, etc.) à travers les équations exprimant les lois du comportement du milieu. L'expression détaillée des densités des courants sont données par:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II-10})$$

J_s : la densité de courant imposée dans l'inducteur et J_{ind} la densité du courant induit.

$$\vec{J}_{ind} = \sigma [\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}] \quad (\text{II-11})$$

Où σ la conductivité électrique en (S/m), v le vecteur vitesse en (m/s).

Le terme $\sigma \vec{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique \vec{E} et le terme $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement [21].

c- Relations de continuité entre deux milieux différents

Si le système est composé de deux milieux différents, Les champs électriques et magnétiques des différents milieux sont liés à l'interface par des relations de continuité afin de relier deux milieux de propriétés électromagnétiques différentes. Soient deux milieux M1 et M2. On appelle $(\vec{E}_1, \vec{B}_1, \vec{H}_1, \vec{D}_1)$:les différents champs de M1 et $(\vec{E}_2, \vec{B}_2, \vec{H}_2, \vec{D}_2)$:et de M2. Soit \vec{n}_{12} la normale unitaire à la frontière entre M1 et M2 dirigée de M1 vers M2 (Figure II.1).

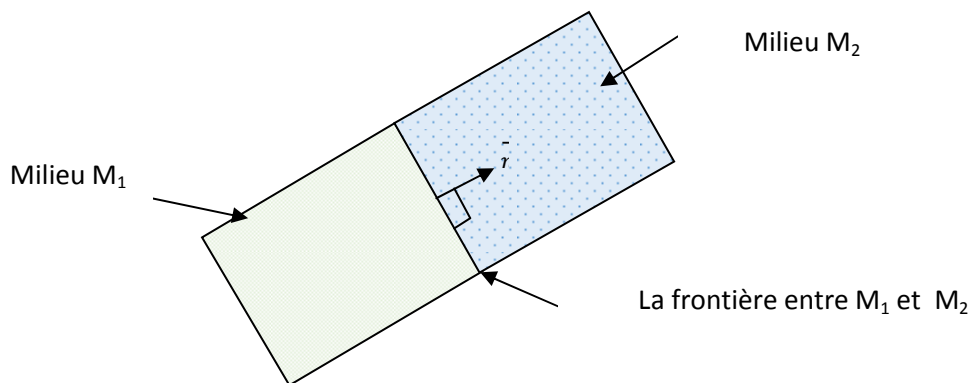


Figure. II-1 Interface entre deux milieux différents

Dans le cas général, un dispositif électrotechnique comporte des milieux différents (fer, air, aluminium, cuivre, ...etc.). Avant d'aborder la résolution du problème, il est nécessaire de connaître le comportement des champs électromagnétiques à travers l'interface entre deux milieux différents. En effet, la composante normale de l'induction B est continue au passage entre deux milieux différents [21,24].

d- Conditions de passage

La limite de séparation entre deux milieux de propriétés physiques différents notés 1 et 2, les conditions de passage (transmission) permettent alors d'exprimer les relations entre deux grandeurs sur ces frontières, les grandeurs électromagnétiques pourraient être discontinues. Ces conditions sont traduites par les équations du type :

La continuité de la composante normale de l'induction magnétique

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II-12})$$

La discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent.

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s \quad (\text{II-13})$$

La continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II-14})$$

Discontinuité de la composante normale du vecteur d'induction électrique D , en présence de charges superficielles ρ_s

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{II-15})$$

Ici \vec{n} est le vecteur normal à l'interface dirigé du milieu vers un autre, \vec{J}_s est la densité surfacique de courant à l'interface et ρ_s densité de charge électrique surfacique à l'interface.

D'après les équations précédentes, on constate qu'il y a une continuité des composantes respectivement normale de l'induction magnétique \vec{B} et tangentielle du champ électrique \vec{E} et une discontinuité des composantes respectivement tangentielle du champ magnétique \vec{H} et normale de l'induction électrique \vec{D} par la présence du courant et des charges surfaciques, à la traversée de la surface de séparation des deux milieux 1 et 2. Le système d'équations contient beaucoup d'inconnues et se prête donc mal à une résolution numérique [21,27].

II.3 Modèles électromagnétiques

La formulation mathématique des équations électromagnétiques à partir des équations de MAXWELL donne plusieurs modèles simplifiés comme :

- Modèle électrostatique.
- Modèle électrocinétique.
- Modèle magnétostatique.
- Modèle magnétodynamique [27].

II.3.1 Modèle Electrostatique :

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas de temps (régime stationnaire : cas de courant continu) de ce fait le champ magnétique créé ne varie pas dans le temps :

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II-16})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\begin{cases} \text{div} \vec{D} = \rho \\ \text{rot} \vec{E} = \vec{0} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

La relation nous permet de définir le champ électrique en fonction du potentiel scalaire électrique V , telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II-18})$$

Le modèle se résume alors à l'équation suivante :

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} V) + \rho = 0 \quad (\text{II-19})$$

II.3.2 Modèle magnétostatique.

Dans ce type le terme $\partial B / \partial t$ est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps.

II.3.2.1 Modèle magnétostatique scalaire.

Les courants électriques seront nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps. On obtient alors les relations :

Rot $H = 0$ Courants nuls

Div $B = 0$ Conservation du champ

$B = \mu H + Br$ la loi du milieu,

H : Dérive d'un potentiel scalaire magnétique Φ , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que : $H = -\operatorname{grad}(\Phi)$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\operatorname{Div}(\mu \operatorname{grad}(\Phi)) = \operatorname{Div} Br \quad (\text{II-20})$$

II.3.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle.

Ce modèle est caractérisé par des courants électriques non nuls. On a alors l'équation :

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J} + \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} Br\right) \quad (\text{II-21})$$

II.3.3.3 Formulation en termes de potentiel vecteur

Le potentiel vecteur magnétique \vec{A} permet de simplifier les calculs et de diminuer le nombre d'inconnus. Ces formulations sont bien connues et très utilisées dans le domaine du calcul du champ électromagnétique. La relation de la conservation du flux magnétique permet de définir une fonction vectorielle A appelée potentiel vecteur magnétique telle que :

$$\vec{B} = \operatorname{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II-22})$$

En effet, puisque le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire (f) est nul, d'où la nécessité d'imposer la condition de jauge afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous proposons d'utiliser la jauge de coulomb pour assurer l'unicité de la solution :

$$\operatorname{div}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{II-23})$$

la formule du modèle magnétostatique vectoriel:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J}_s \quad (\text{II-24})$$

-Le calcul du champ magnétique des lignes électriques

Lorsque le courant n'est pas conservé, nous obtenons une accumulation de charge. Donnée par $div J = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ dans le domaine temporel et $div J = -j\omega\rho$ dans le domaine fréquentiel. La combinaison avec la loi de Gauss $div D = \rho$ pour obtenir un ajustement de la loi de conservation du courant :

$$\begin{aligned} div(J + j\omega D) = 0 \text{ et } div\left(J + \frac{\partial D}{\partial t}\right) = 0 \text{ lors de l'utilisation du champ électrique:} \\ div\left(J + \frac{\varepsilon \partial E}{\partial t}\right) = 0 \end{aligned} \quad (II-25)$$

La deuxième partie de notre dérivation commence par la loi de maxwell -Ampères. Il y a une relation directe entre le champ magnétique H qui encercle un conducteur et le courant :

$$rot H = J' = J + j\omega D = \sigma E + j\omega\varepsilon E = (\sigma + j\omega\varepsilon)E \quad (II-26)$$

$$div(rot H) = div J' = div(J + j\omega D) = 0 \quad (II-27)$$

Nous avons maintenant appliqué la loi du gauss et la loi de maxwell Ampère.

$$rot H = rot(\mu^{-1}B) = J' = (\sigma + j\omega\varepsilon)E \quad (II-28)$$

Si nous substituons la nouvelle équation de $B = rot(A)$ en équation de Maxwell-Faraday d'induction électromagnétique $rot E = -j\omega B$ on obtient

$$rot E = -j\omega(rot A) = rot(-j\omega A) \quad (II-29)$$

La combinaison des équations précédentes donne :

$$rot(\mu^{-1}rot A) = (\sigma + j\omega\varepsilon)(-j\omega A) \quad (II-30)$$

Après remplacement on obtiendra la formule de l'équation différentielle partielle finale pour l'effet inductif pour la variable A en magnétostatique suivante :

$$-w^2\varepsilon A + j\omega\sigma A + rot(\mu^{-1}rot A) = 0 \quad (II-31)$$

-Le calcul du champ électrique des lignes électriques

La résolution du modèle en 2D par la loi de la conservation du courant dans le domaine fréquentiel électrostatique. Cela inclut les éléments suivants:

$$\begin{cases} E = -grad V \\ div D = \rho \\ div J = -j\omega\rho \end{cases} \quad (II-32)$$

La loi de Faraday s'évalue à zéro:

$$rot(E) = -j\omega B = 0 \quad (II-33)$$

Inclure le courant de déplacement dans la définition du courant, cela vous donne $\text{div } \mathbf{J}' = 0$ et $\mathbf{J}' = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D}$ pour la loi de conservation actuelle et la définition actuelle, respectivement. nous obtiendrons l'équation différentielle partielle 2D suivante pour la variable V :

$$-\text{div}((\sigma + j\omega\epsilon)\nabla V) = 0 \quad (\text{II-34})$$

L'interface « Electric Currents » utilise cette loi de conservation pour déterminer la valeur de V dans les domaines. Pour les limites de ce modèle, plusieurs conditions de Dirichlet sont utilisées. L'alimentation des trois phases est comme suite :

$$V_a = V_0 \quad V_b = V_0 e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad V_c = V_0 e^{+j\frac{2\pi}{3}},$$

II.4 Déclaration des conditions aux limites

Pour l'application des méthodes numériques (éléments finis) on distingue essentiellement deux types de conditions aux limites (conditions de Dirichlet et de Neumann).

Si le vecteur potentiel magnétique \mathbf{A} est constant sur la frontière, ce qui veut dire que l'induction magnétique \mathbf{B} est parallèle à ce contour qui présente alors une équipotential. On rencontre cette condition lorsqu'une partie ou tout le contour se trouve à une distance suffisamment éloignée des sources d'excitation, pour pouvoir négliger les valeurs du vecteur potentiel magnétique sur cette partie de la frontière par rapport aux valeurs de ce même potentiel à l'intérieur du domaine (c'est-à-dire on suppose que $(\mathbf{A} = 0)$). Cette condition est la condition du Dirichlet.

Dans le cas où on a la dérivée du vecteur potentiel magnétique \mathbf{A} par rapport au temps est différent de zéro, c'est-à-dire la condition aux limites de Neumann. Donc on spécifie les dérivées des valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières/limites du domaine.

II.5 Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles

Les méthodes de résolution des EDPs dans les milieux linéaires nous pouvons citer :

- la méthode des différences finies(MDF)
- la méthode des éléments finis(MEF)
- la méthode des volumes finis(MVF)
- la méthode des intégrales de frontières(MIF)
- la méthode des circuits couplés(MCC).

L'objectif d'utilisation des méthodes numériques de discrétisation à pour but de ramener la résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équation algébriques dont la solution conduit à la détermination des champs électromagnétiques et du déplacement.

II.5.1 Méthode des Différences Finis (MDF) :

Cette méthode est basée sur le théorème de Taylor avec un opérateur aux différences. Leur principe c'est de découper au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque point ou nœud de maillage, on obtiendra un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds de la grille.

Cette méthode est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences où chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue aux nœuds du domaine de résolution [27].

Considérons le domaine suivant:

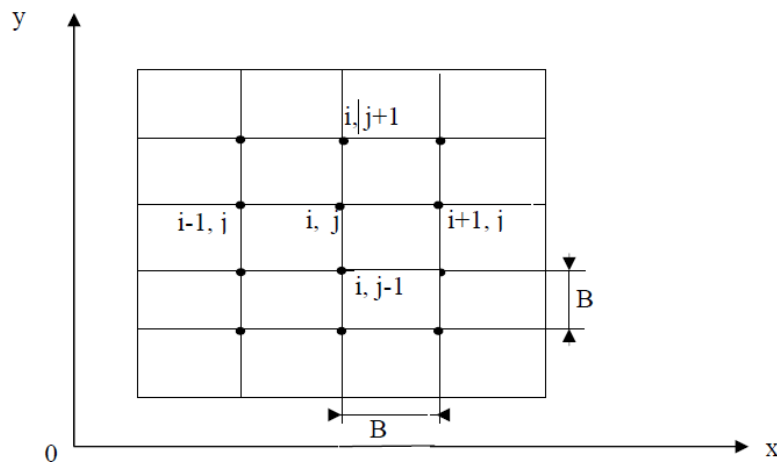


Figure II.2 Maillage type différences finies [27]

L'application d'un développement limité en séries de Taylor de la fonction à déterminer en chacun des nœuds du maillage, l'approximation des dérivées aux points (i, j)

La méthode des différences finies est très attrayante à cause de sa simplicité pour des problèmes de géométrie régulière, par contre très difficile pour les problèmes à géométrie complexe et des conditions aux limites quelconques.

II.5.2 Méthode des intégrales de frontières (MIF) :

La Méthode des intégrales de frontières permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. L'avantage du calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine à travers le théorème d'Ostrogradski-Green. Cette méthode est très utilisée pour les structure tridimensionnelle ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. L'inconvénient de cette méthode est augmentation du temps de calcul, donc le coût de calcul et de conduire à un système algébrique à une matrice pleine (pas de termes nuls).

II.5.3 Méthode des Volumes Finis (MVF) :

La Méthode des Volumes Finis se déduit de la MDF. Le domaine d'étude (Ω) est divisé en un nombre d'éléments finis à quatre nœuds, dans le cas bidimensionnel axisymétrique, un volume fini entoure chaque nœud principal.

L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection et puis intégrée dans chacun des volumes élémentaires du milieu.

Le calcul de l'intégrale d'un volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle,...etc.) entre deux nœuds consécutifs, et puis la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude.

Cette méthode existe depuis une vingtaine d'années elle est très utilisée en mécanique des fluides, sa solution est plus précise que celle fournie par la MDF. L'équation discrète obtenue exprime le principe de conservation de la fonction sur le volume de contrôle.

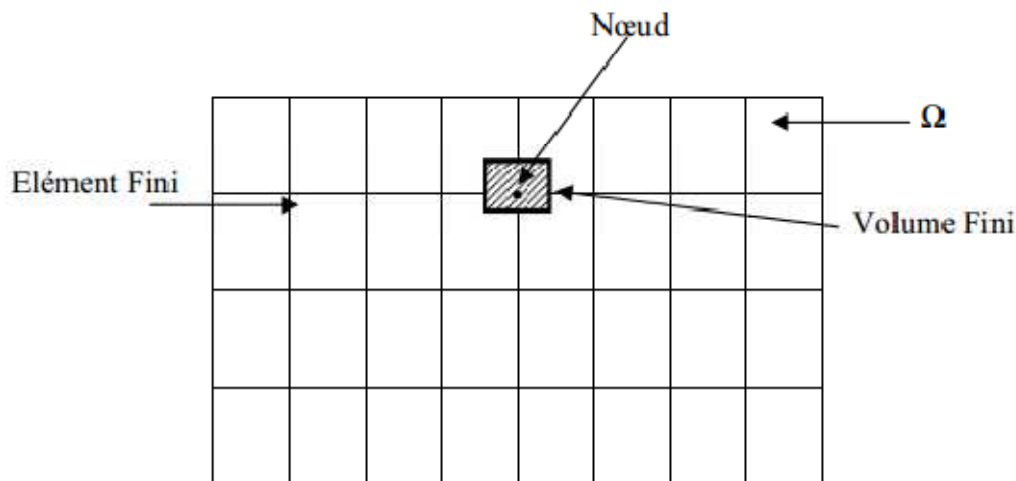


Figure II.3 Méthode des Volumes Finis

II.5.4 Méthode des Éléments Finis (MEF) :

La méthode des éléments finis est consacrée pour les géométries complexes et aux matériaux non linéaires. Elle subdivise le domaine d'étude en domaines élémentaires appelés éléments finis, voir la figure (II.3). L'inconnue de chaque élément est exprimée par des fonctions d'interpolation simples en fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. En tenant compte des conditions de continuité à l'interface et au passage entre les milieux.

Pour des structures bidimensionnelles, les éléments de maillage sont triangulaires, pour les problèmes tridimensionnels les éléments sont tétraédriques ou prismatique.

La méthode des éléments finis en 2D en se basant sur l'approche résidus pondérés qui ne tient pas compte de l'aspect énergétique du problème traité. La méthode consiste à dissocier le domaine étudié en éléments finis, et approcher l'inconnu dans chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de

premier ou deuxième degré. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnu sur les interfaces des éléments.

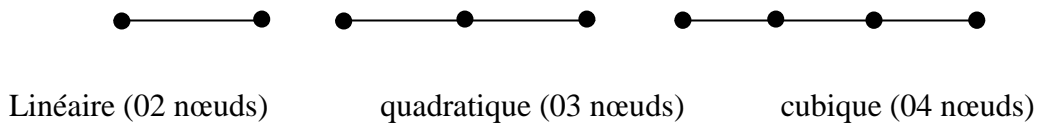
Le principe de la méthode des éléments finis est la transformation de l'équation aux dérivées partielles (EDP) qui régit le problème traité à un système d'équation algébrique dont la résolution permet de définir l'inconnu à un ensemble de points (nœuds) de la discrétisation. Consiste à découper la géométrie en un nombre fini du domaine (sous domaine).

Il existe différents types d'éléments :

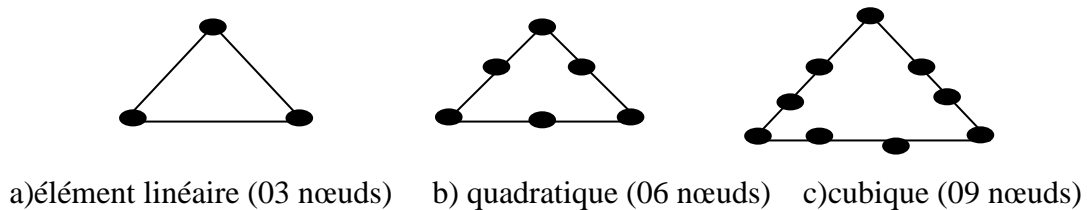
- élément linéique (1D).
- élément surfacique (2D).
- élément volumique (3D).

Pour notre cas le domaine d'étude, soit à deux dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Pour aboutir à une meilleur exactitude de la solution, on procède a raffiner le maillage.

-Problème à une dimension (élément droit) :



-Problème à deux dimensions (triangle ou quadrilatère)



Problème à trois dimensions

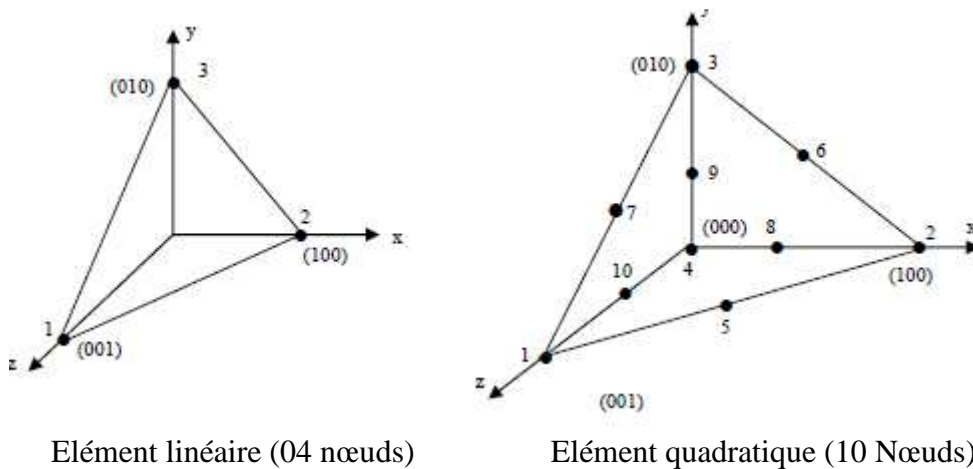


Figure II.4 Discrétisation du domaine d'étude (maillage)

a- Fonction d'approximation

Le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans un milieu peut être trouvée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), l'expression varie d'un type d'élément à un autre. Ces fonctions doivent garantir la continuité du potentiel aux interfaces de discrétisation. Généralement on utilise des fonctions polynomiales.

b- Formulation Intégrale

L'essentiel c'est d'avoir un système algébrique est la mise sous forme intégrale de l'équation EDP.

Comme avantage cette formulation nous permet d'avoir les expressions des éléments des différentes matrices et vecteurs du système algébrique élémentaire (dans un domaine).

La formulation intégrale peut être développée de deux manières:

- Variationnelle.
- Résidus pondérés.

b-1 Formulation Variationnelle

Elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre. Le principe de base de cette méthode Variationnelle exige la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système. Cette fonctionnelle est résolue à partir du principe de l'action hamiltonienne qui définit l'existence d'une fonctionnelle de type intégral donné par :

$$\mathfrak{S}(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (\text{II-55})$$

L : la fonction de Lagrange qui assemble entre les énergies cinétique et potentielle du système. Ainsi que Ω c'est le domaine d'étude.

II.6 Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL

Pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques des lignes électriques, il existe plusieurs facteurs qui influent sur ce phénomène tels que : la tension et l'intensité du courant électrique la nature des matériaux des câbles électriques, la distance entre les câbles...etc.

Dans le but d'expliquer le phénomène d'interaction magnétique entre les lignes de champ et le sol et la présence des défauts électriques sur les caractéristiques électromagnétiques du milieu, nous allons faire une simulation numérique avec la méthode des éléments finis [22,23].

Cette étude nécessite l'utilisation de deux logiciels suivants :

- COMSOL Multiphasiques 5.3.
- MATLAB 7.12.0.

II.6.1 Dessin et dimension de la géométrie du système

Cette étape consiste à représenter le modèle en deux dimensions dans une interface graphique (le domaine d'étude) du logiciel COMSOL pour le premier exemple on va dessiner la forme géométrique d'un câble électrique base tension en 2D qui contient :

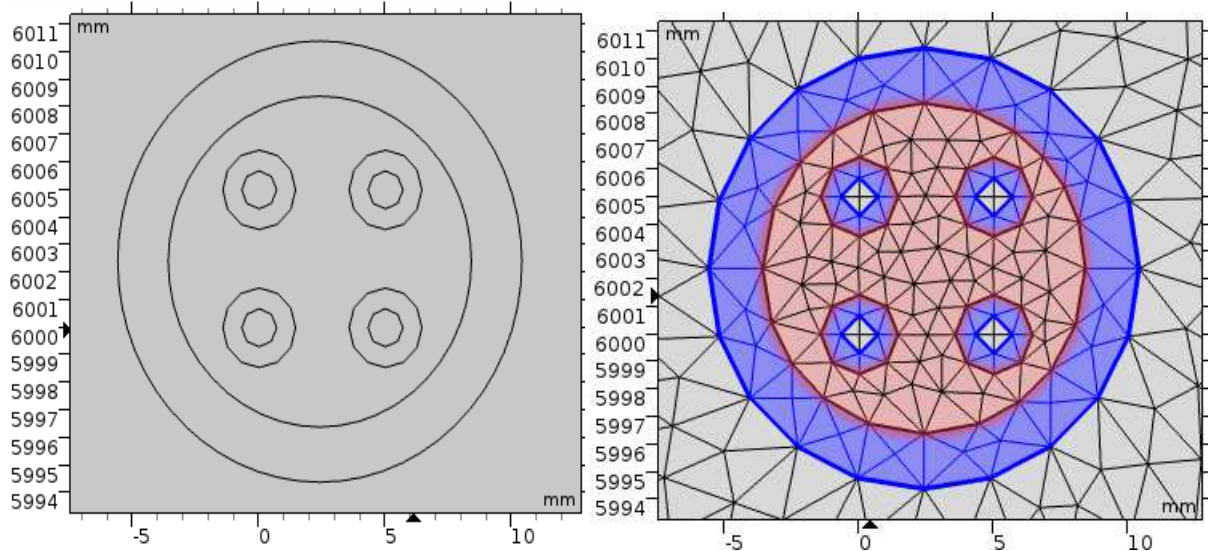
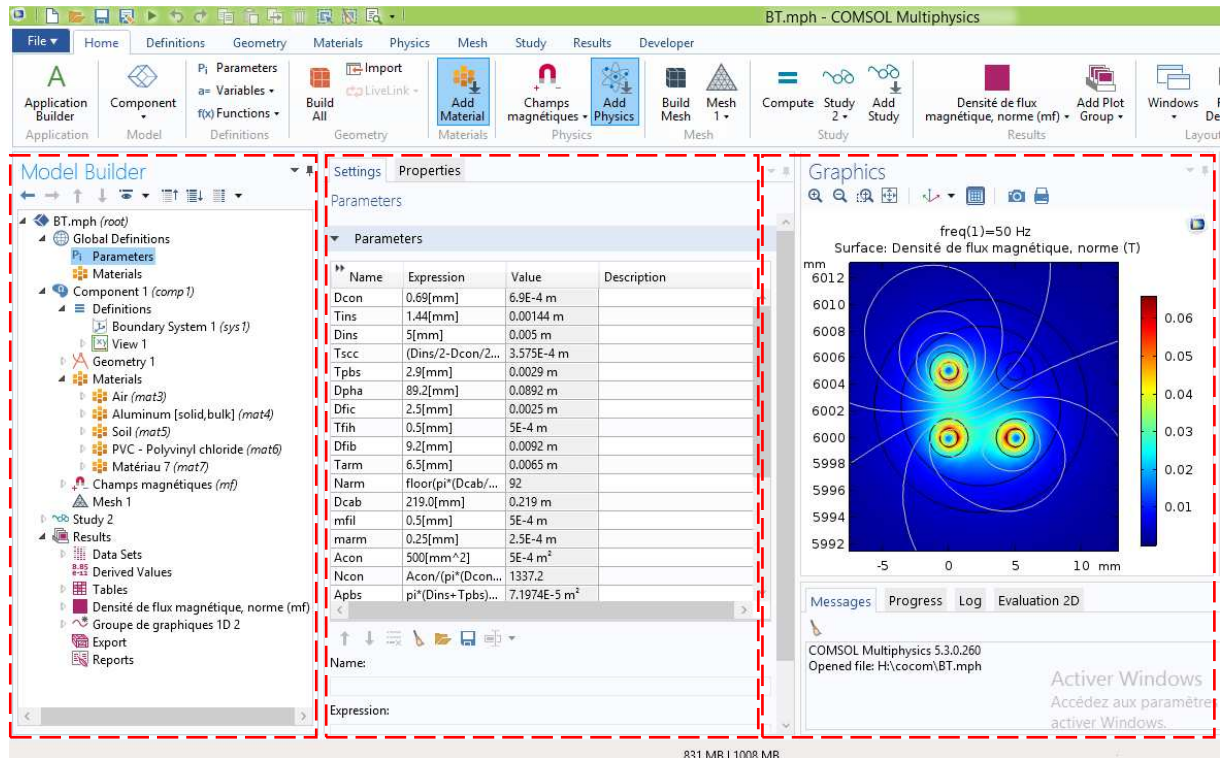


Figure II.5 Câble électrique BT avec le maillage dans le logiciel Comsol.

II.6.2 Processus de simulation par le logiciel COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphasiques, fondé sur la méthode des éléments finis permis d'effectuer le calcul du champ magnétique dans les deux domaines électrostatique et magnétostatique. La possibilité de savoir la valeur du champ magnétique à n'importe quel point du domaine, permettra une étude de manière exacte dans cette géométrie, et une bonne distribution du champ de n'importe qu'un système complexe avec la résolution des méthodes numériques qui peuvent apporter des solutions acceptables et simplifiées.

COMSOL Multiphasiques contient les différentes étapes du processus de simulation « définition de la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir le domaine physique d'étude, résolution et l'exportation des résultats » sont intégrées dans une interface graphique, représentée dans la figure II.6.



Construction physique déclaration des paramètres Géométrie a étudié

Figure II.6 : Présentation du logiciel COMSOL Multiphases

II.6.3 Structure du programme

En premier lieu, nous allons présenter la structure de notre programme qui est constituée de trois parties. En se basant sur les équations de Maxwell données au début, nous allons développer notre structure de simulation.

Le programme développé sous l’environnement COMSOL est structuré comme suit :

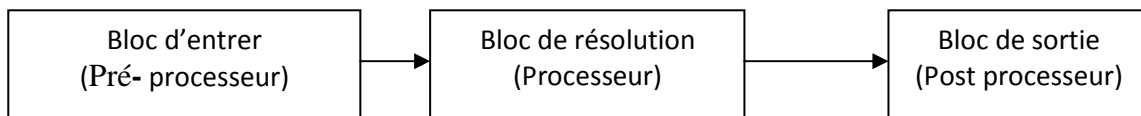


Figure II.7 Différents blocs du programme

A) Bloc d’entrée (Préprocesseur)

Dans ce bloc, on trouve les différentes données concernant la description de la géométrie des câbles électriques et des lignes de transmission THT ,HT MT, BT ainsi que la discrétisation, les différentes propriétés physiques, le calcul des coefficients des équations algébriques et les conditions aux limites.

Le bloc est constitué de trois parties : partie base de données, partie de maillage et partie d'affectation. Ces trois parties sont décrites comme suit :

A-1 Base de données

Cette partie est consacrée à la description de la géométrie du dispositif et englobe :

- Le nombre de régions du domaine d'étude.
- Les dimensions et la géométrie de chaque région.

A-2 Maillage

Le maillage est une discrétisation qui contient un nombre de nœuds, de triangles et d'éléments qui dépendent du système à étudier.

Les erreurs numériques inhérentes à la méthode des éléments finis sont le plus souvent dues au maillage [22].

A-3 Affectation

Cette partie est dédiée à l'introduction des propriétés physiques et électromagnétiques (Conductivité électrique, perméabilité magnétique) de chaque région selon le phénomène à étudier (thermique, magnétostatique, électrocinétique, magnétodynamique), en l'occurrence la densité de courant source.

L'espace de cette partie est utilisé pour le calcul de coefficients des équations algébriques à résoudre à partir des propriétés physiques de la partie précédente.

B) Bloc de résolution (Processeur)

Ce bloc est caractérisé par les équations algébriques discrétisées, par les méthodes de résolution telle que la méthode de Gauss ou Gauss Seidel. Les résultats du calcul permettent d'évaluer les composantes du vecteur potentiel magnétique, densité des courants induits, champ magnétique, etc.....

Après avoir calculé le vecteur potentiel magnétique \mathbf{A} , on peut déterminer les autres paramètres magnétiques le champ et l'induction magnétique à partir des équations développées bien avant.

C) Bloc de sortie (Poste processeur)

Ce bloc est destiné à l'affichage et la visualisation de toutes les grandeurs électromagnétiques, à savoir le vecteur potentiel magnétique, les lignes de champ magnétique.

Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique :

- sous forme numérique.
- sous forme graphique [23].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné les différentes équations aux dérivées partielles (EDP), nous avons cité les méthodes de résolution des équations EDP pour notre cas nous allons utiliser la méthode des éléments finis en 2D par l'exploitation du logiciel COMSOL pour la résolution. Bien sure après avoir spécifié certaines données telles que le domaine, les conditions aux limites, et le maillage de la géométrie. Après simulation les résultats peuvent être exportés même vers l'éditeur MATLAB. La modélisation numérique des lignes de champ autour des particules dans un dispositif de séparation électromagnétique nécessite impérativement l'utilisation d'un outil numérique de calcul comme le logiciel (COMSOL Multiphysics) qui donnera les gradeurs du champ magnétique dans chaque point du domaine d'étude.

Chapitre III

Simulation des lignes de transmission

III.1 Introduction

Pendant les dernières décennies, beaucoup de chercheurs dans le monde entier ont essayé d'analyser et d'étudier les caractéristiques magnétiques des lignes électriques ainsi que les interactions produites avec la matière organique qui indiquent les effets nocifs, et leurs risques sanitaires potentiels qui peuvent résulter de l'exposition humaine au champ électromagnétique.

Dans ce chapitre nous allons faire des simulations des lignes électriques avec la méthode des éléments finis afin de monter la distribution des lignes de champ électromagnétiques autour et près des lignes de transmission, ainsi qu'une évaluation de la pollution électromagnétique des câbles électriques dans deux cas : en présence et en absence des défauts.

III.2 Représentation des lignes de transmission électriques :

Les lignes de transmission électriques sont caractérisées par des formes géométriques et des dimensions différentes selon la puissance et les tensions véhiculées à travers ces câbles électriques. Le tableau III.1 représente les dimensions de chaque type de ligne électrique.

Tableau III.1: Caractéristiques géométriques des lignes de transmission aérienne [5,28,29].

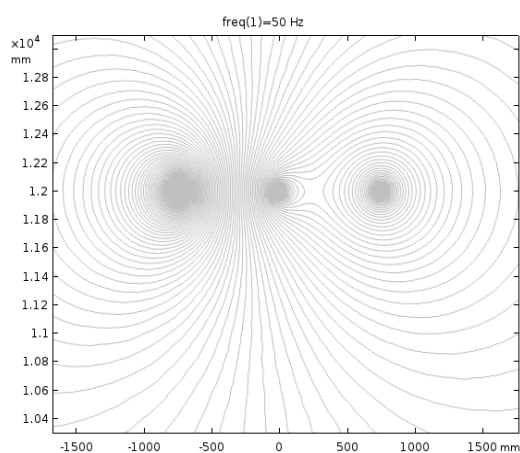
Lignes électriques	Très Haute Tension aérienne	Haute Tension aérienne	Moyenne Tension aérienne	Base Tension aérienne
La distance entre les phases et la terre [m]	30	20	12	6
Rayon de câble [m]	$13.4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	0.01	$0.69 \cdot 10^{-3}$
La distance entre les phases [m]	16.2	3.8	$75 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$
La tension [kV]	400	90	45	0.220
Le courant [A]	2500	2500	1250	130

III.3 Résultats de simulation du champ électromagnétique des lignes électriques :

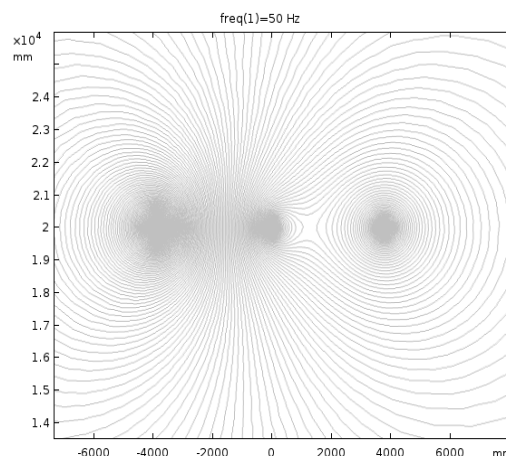
Concernant cette partie nous avons utilisé le module magnétostatique pour la modélisation des phénomènes magnétiques et le calcul du champ magnétique produit à proximité des lignes de transmission.

III.3.1 Les géométries et la distribution du champ magnétique des lignes électriques

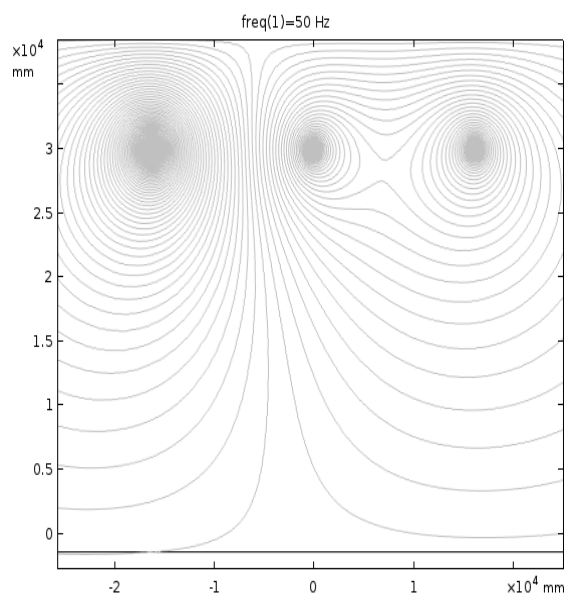
Les lignes électriques de transmission sont caractérisées par des distances entre chaque phase selon les normes internationales. Les figures (III.1) montrent les formes géométriques de chaque ligne électrique.



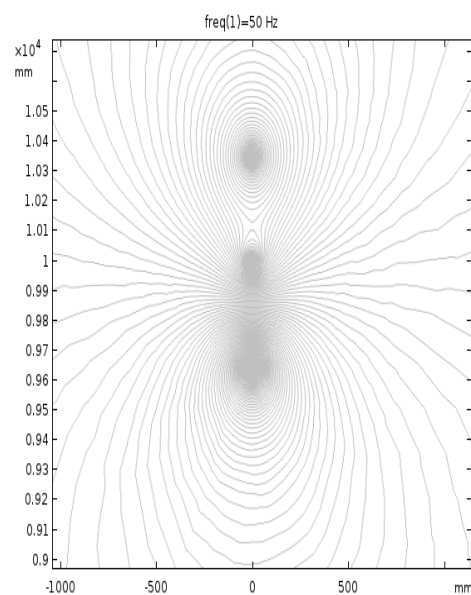
a - Ligne THT



b- Ligne HT



c- Ligne MT



d- Ligne BT

Figure III .1 Le champ magnétique autour et dans les phases

Les figures (III.2) représentent la distribution des lignes du champ magnétique à proximité ainsi que sous les lignes électriques. D'après ces résultats on peut constater que la distribution est très importante dans les lignes très haute tension et haute tension même dans la ligne moyenne tension à cause de la grande intensité du courant circulant dans les trois câbles de chaque ligne. Il existe toujours des interactions électromagnétiques entre les lignes électriques comme les deux effets inductif et capacitif cela est représenté par les lignes du champ entre les phases et même entre les phases et le sol, le sol représente le point zéro de la référence, [35].

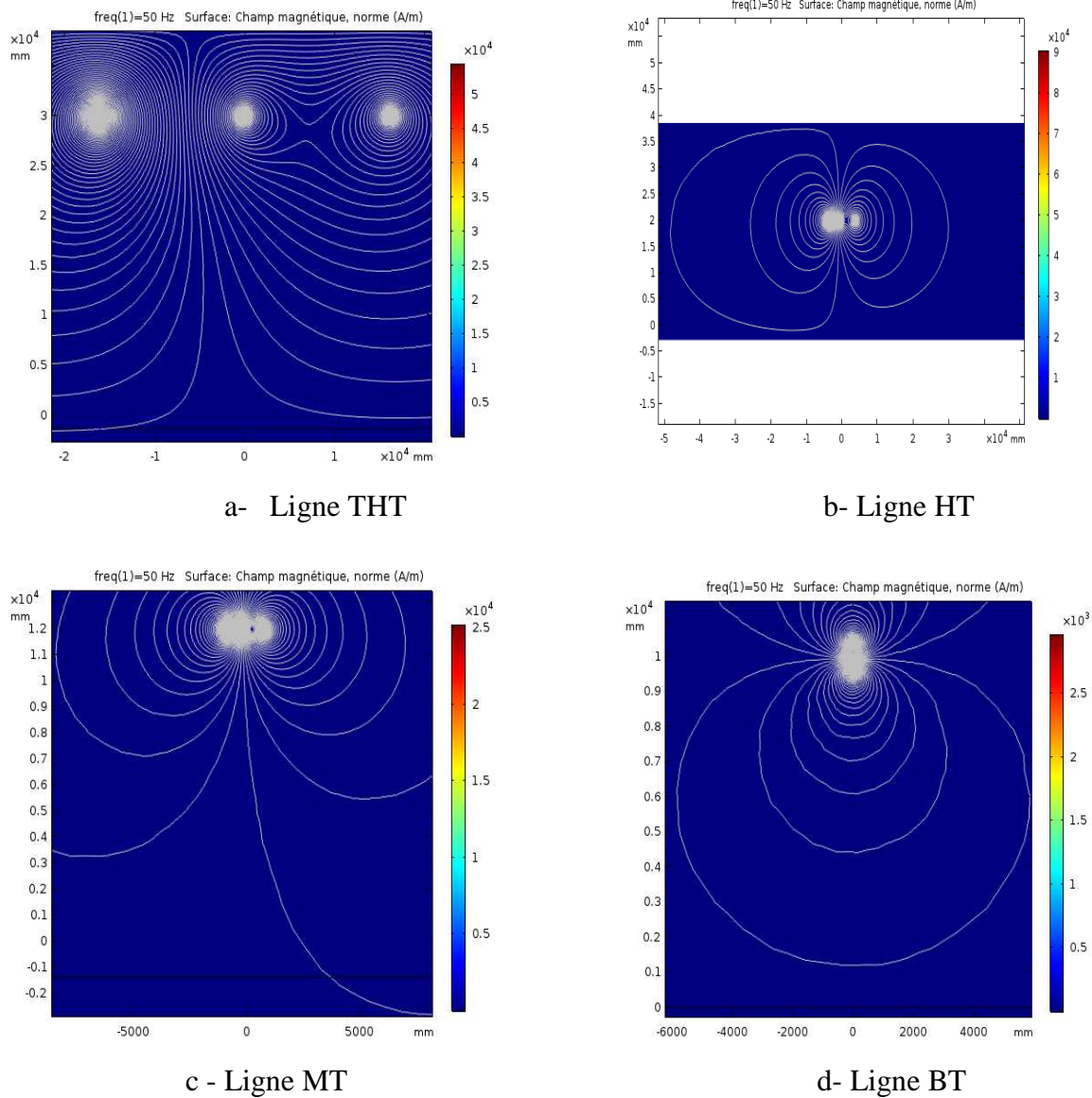
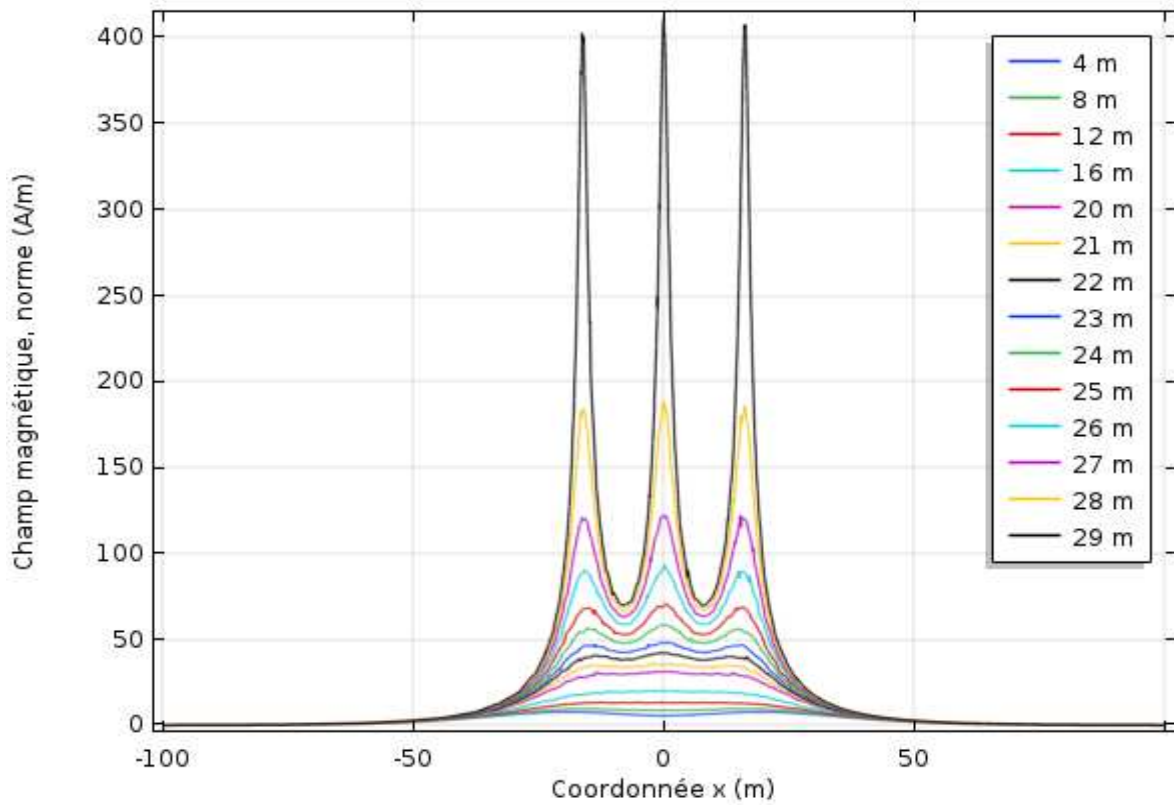


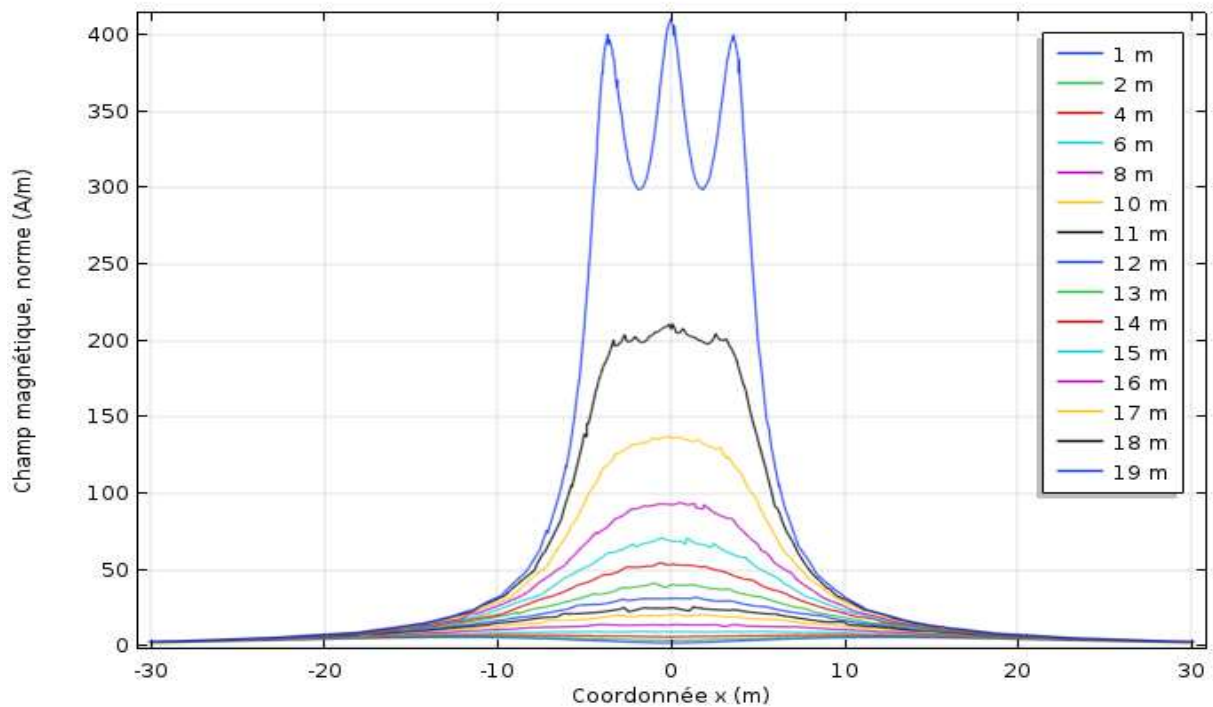
Figure III.2 La distribution du champ magnétique au dessous des lignes de transmission

III.3.3 Mesure du champ magnétique près des lignes de transmission aérienne :

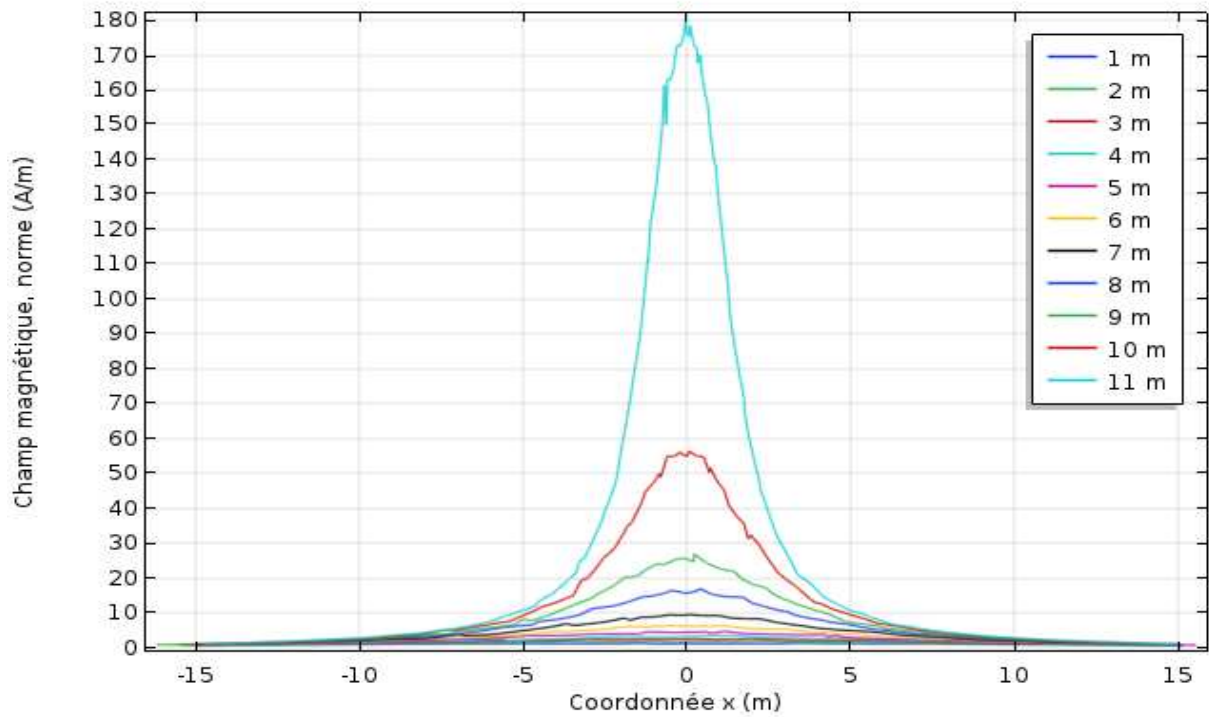
Les résultats de simulation montrent la distribution horizontale et verticale (selon les deux axes x et y) du champ magnétique à plusieurs niveaux au dessous des lignes électriques aériennes, voir la figure (III.3). Les mesures selon l'axe x sont faites par rapport au sol comme point de référence le zéro.



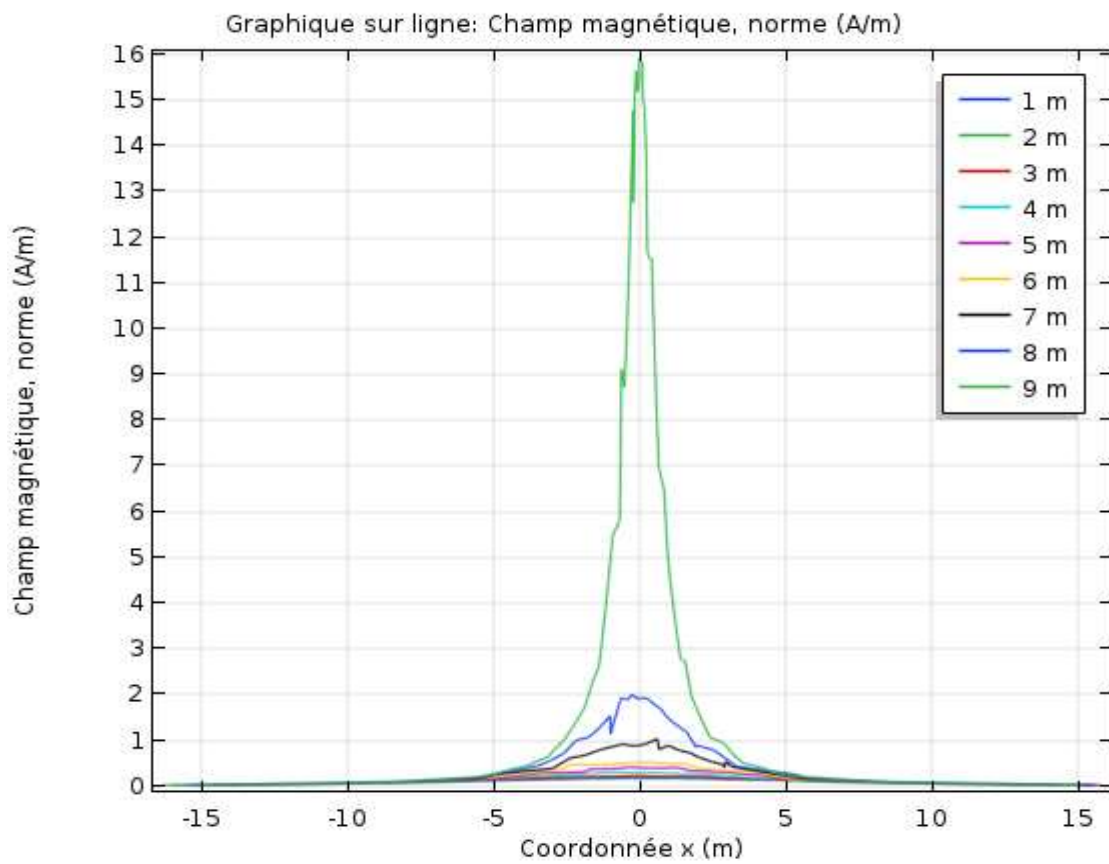
a- champ magnétique pour une ligne THT



b- champ magnétique pour une ligne HT



c- Champ magnétique pour une ligne MT



d- champ magnétique pour une ligne BT

Figure III.3 Mesure du champ magnétique près des lignes aérienne

Les résultats de la figure (III.3) montre l'allure du champ magnétique en fonction des distances la distribution champ magnétique à plusieurs niveaux par rapport au sol pour les lignes électriques aériennes (THT, HT, MT, BT), lorsqu'on s'éloigne des câbles électriques de chaque ligne de transmission le champ magnétique démunie et sera moins important dans les deux directions, on a trouvé des résultats de même forme comme les références suivantes [37,38].

III.3.4 Présence d'un défaut de court circuit dans les lignes électriques

-Courant de court circuit : la circulation d'un courant de court circuit dans une phase électrique donne naissance à un champ magnétique important (nous allons toujours considérer le défaut dans la seule phase qui se trouve à la position à gauche). Le tableau (III.2) résume les valeurs des courants de court circuit pour chaque type de ligne électrique.

Tableau III.2 : les caractéristiques des courants de C-C du réseau électrique, [30,31].

Les lignes électriques	THT	HT	MT	BT
I _{cc} (KA)	45	30	5	1.732

La figure (III.4) illustre la distribution du champ magnétique dans les phases en cas de court circuit dans la phase gauche. L'intensité du courant de court circuit de chaque type de lignes électriques est différentes pour cette raison on trouve un champ intense et très grand contrairement aux deux autres phases non affectée par le court circuit.

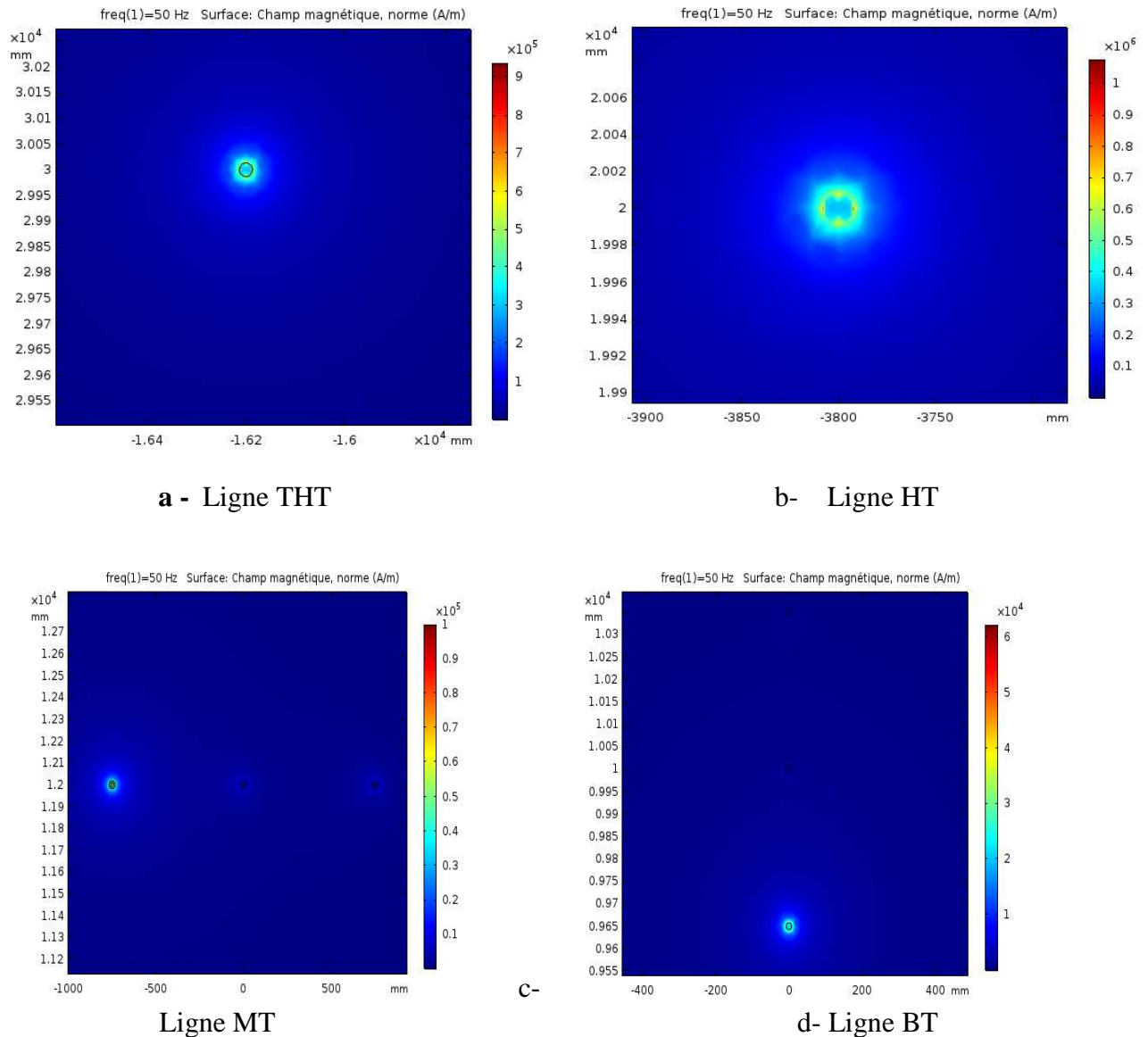
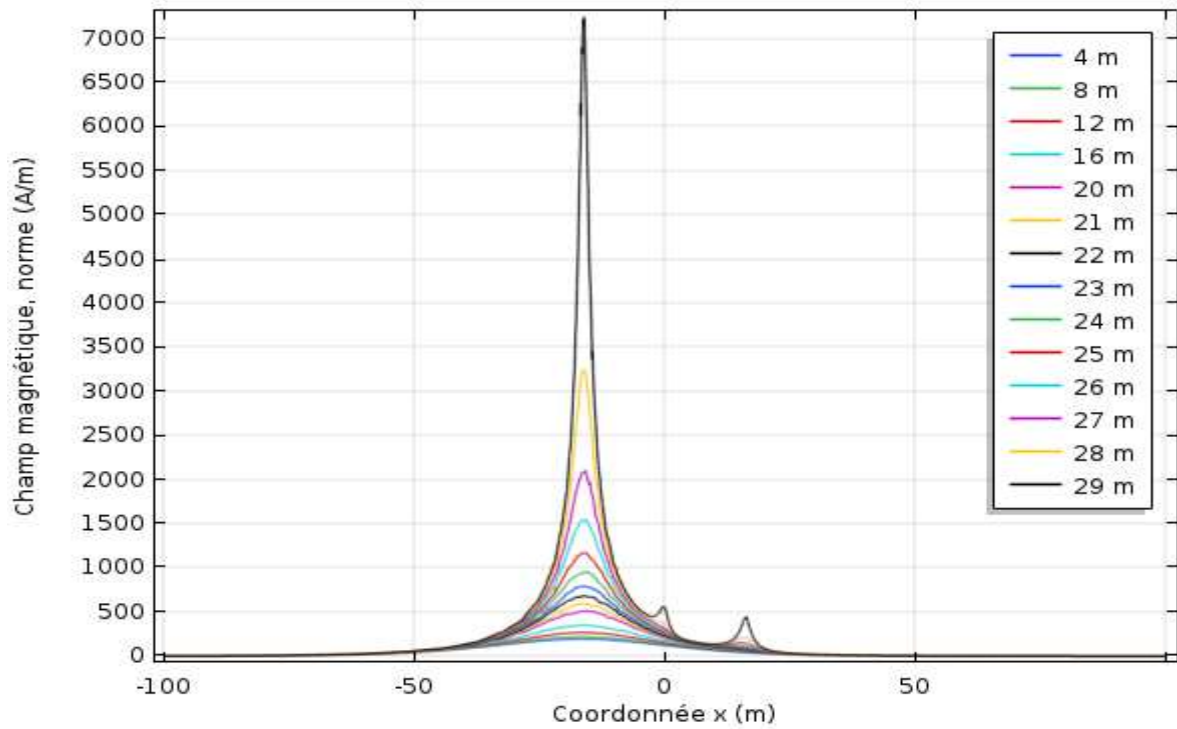


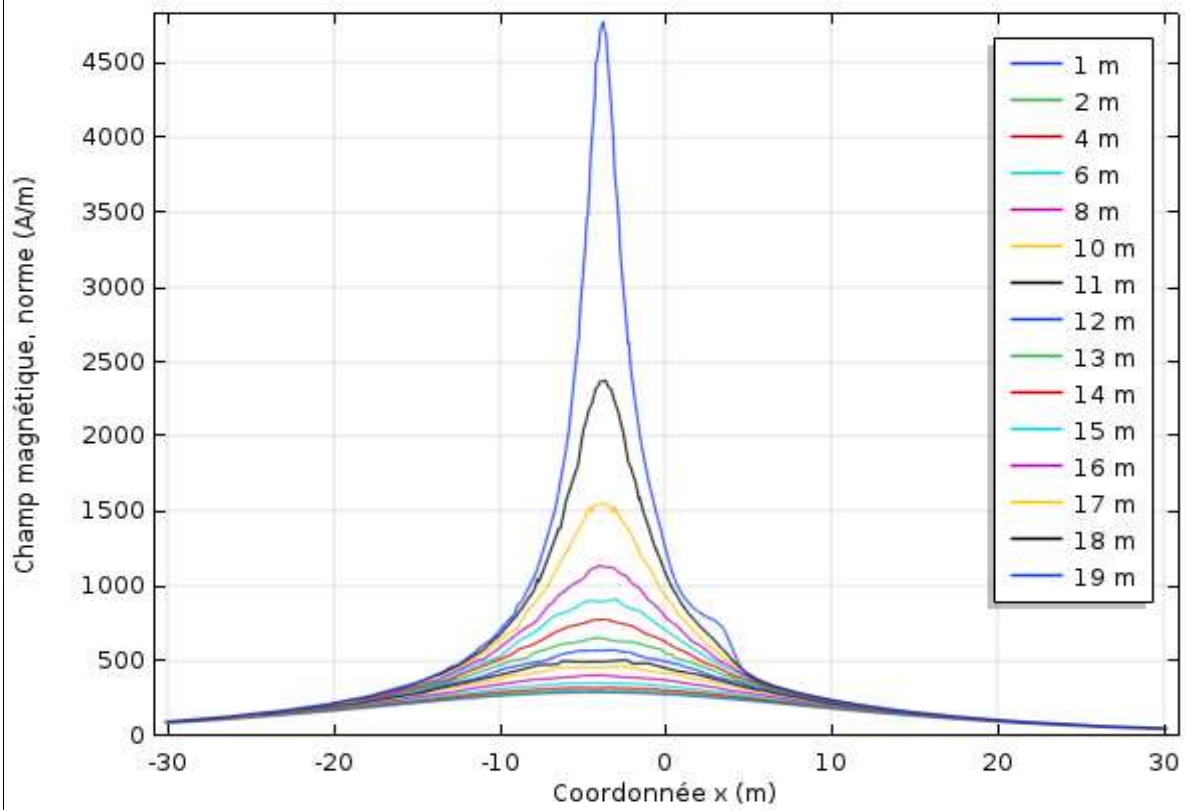
Figure III.4 Présence d'un défaut de court circuit dans une phase (la phase gauche)

La mesure du champ magnétique des lignes de transmission aérienne avec défaut de court circuit dans la phase à gauche pour les trois lignes THT ,HT,MT et la position en bas de la ligne BT (voir l' Annexe A): Les résultats de simulation des figures (III. 5) d'un cas de court circuit dans une phase montrent que la distribution du champ magnétique est très importante dans la phase affectée par le courant de défaut par rapport aux autres phases qui se trouvent en état sain.

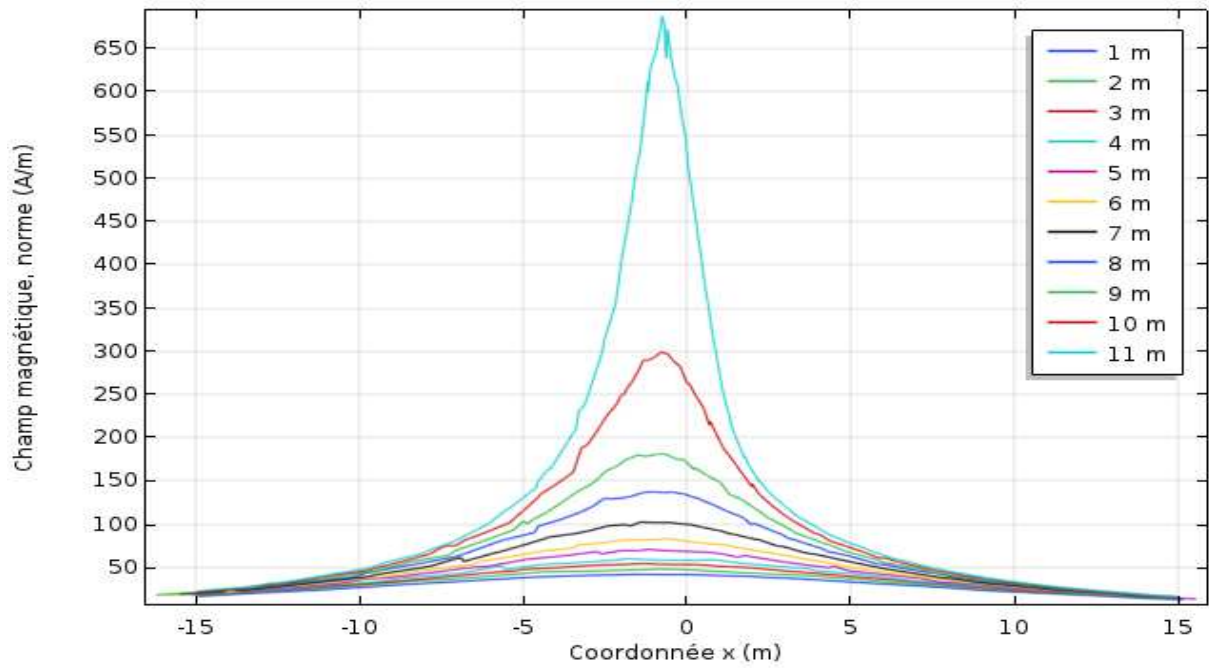
La présence d'un défaut de court circuit dans les quatre types de lignes électriques génère un champ magnétique de différentes valeurs à cause de la puissance transmise et le courant de court circuit pour chaque type de ligne électrique.



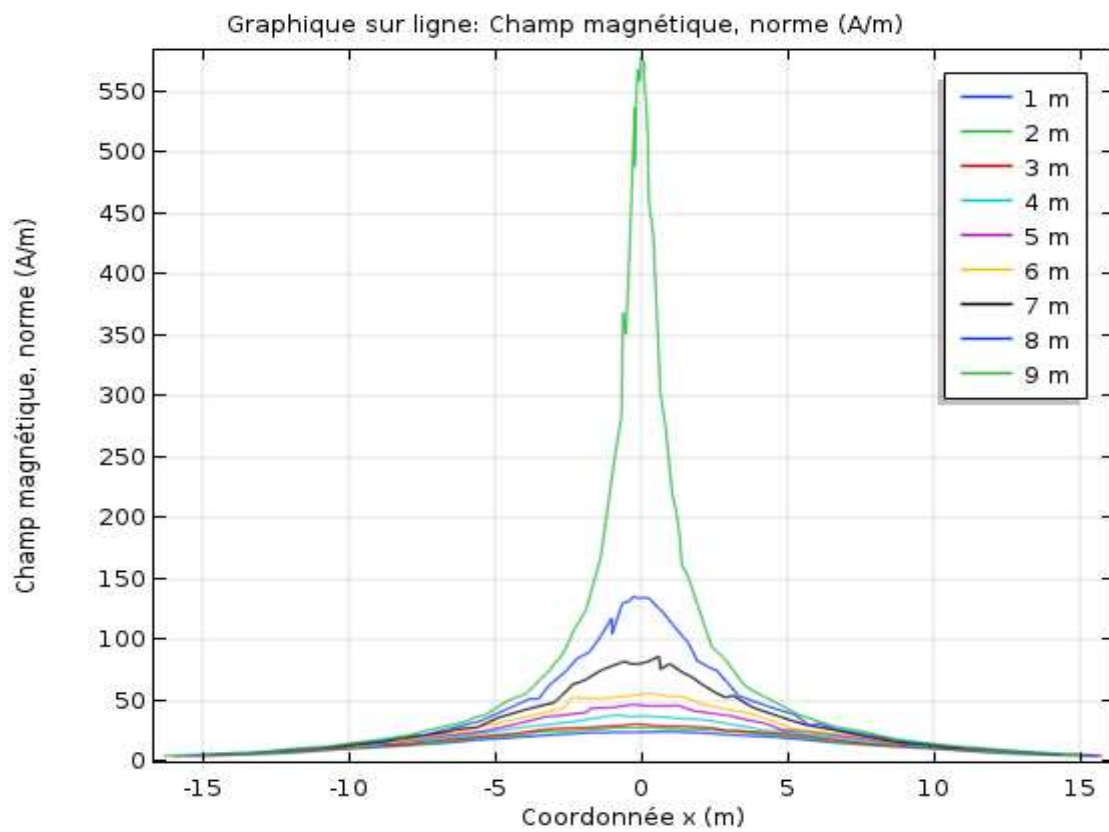
a- Ligne Très Haute Tension aérienne



b- Ligne Haute Tension aérienne



c- Ligne Moyenne Tension

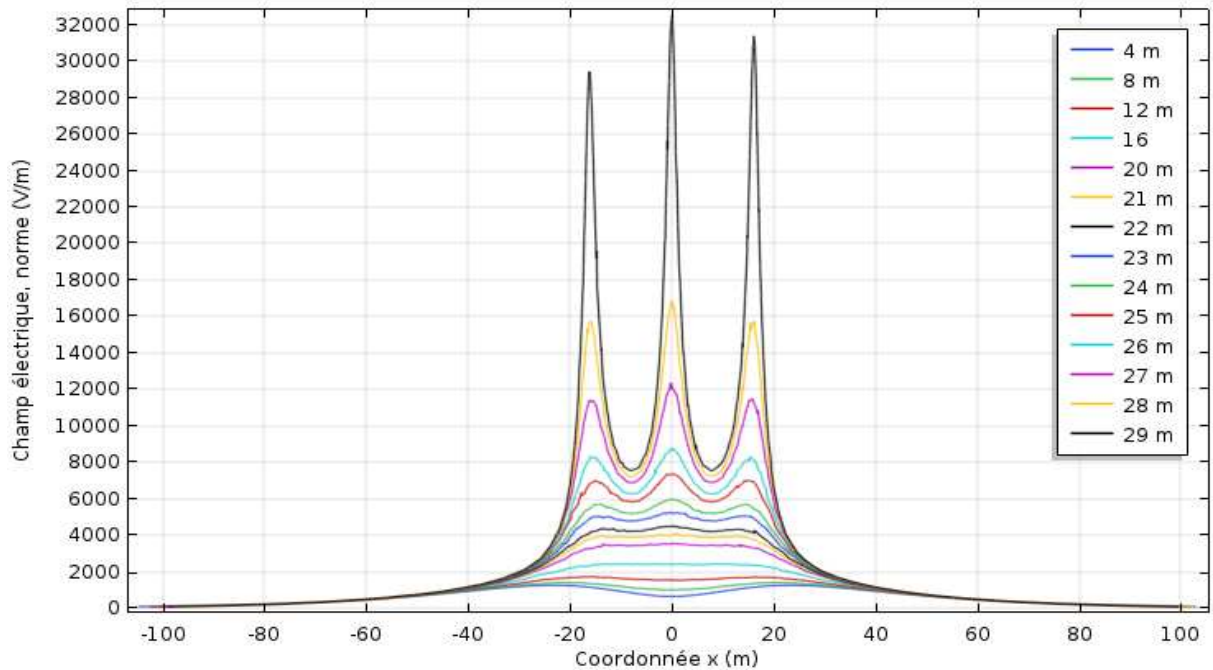


d- Ligne Base Tension

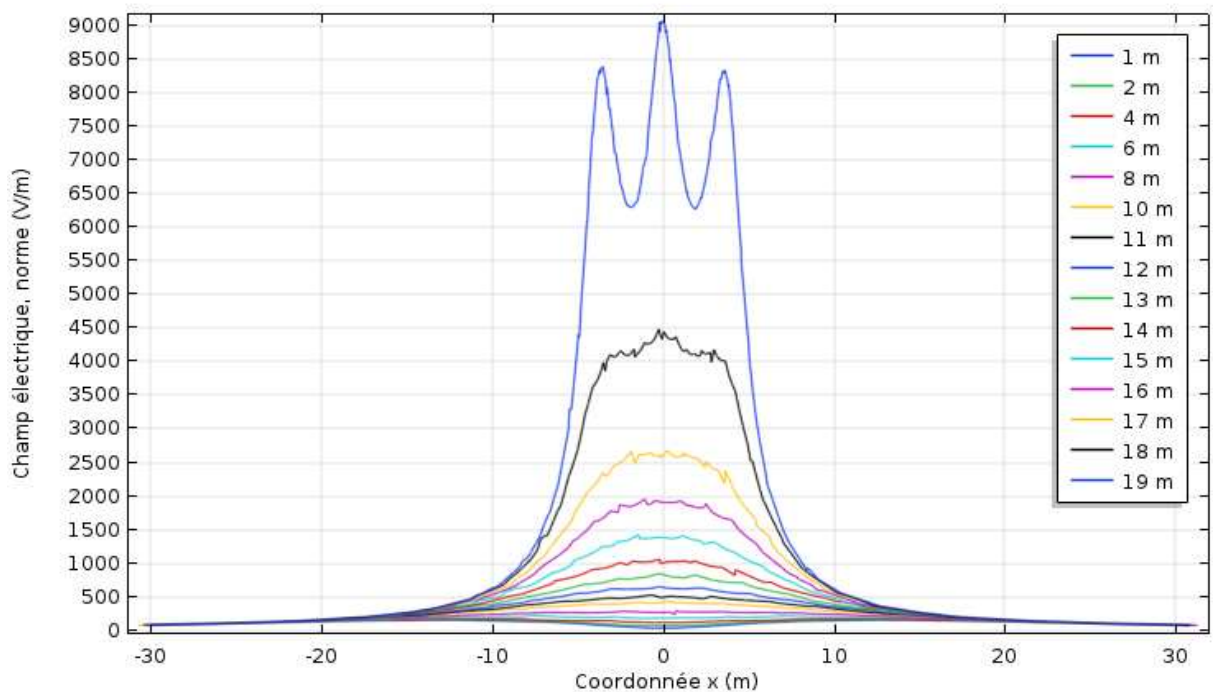
Figure III. 5 : Calcul du champ magnétique pour le cas d'un court circuit dans la phase gauche

III.3.5 Calcul du champ électrique près des lignes de transmission aérienne :

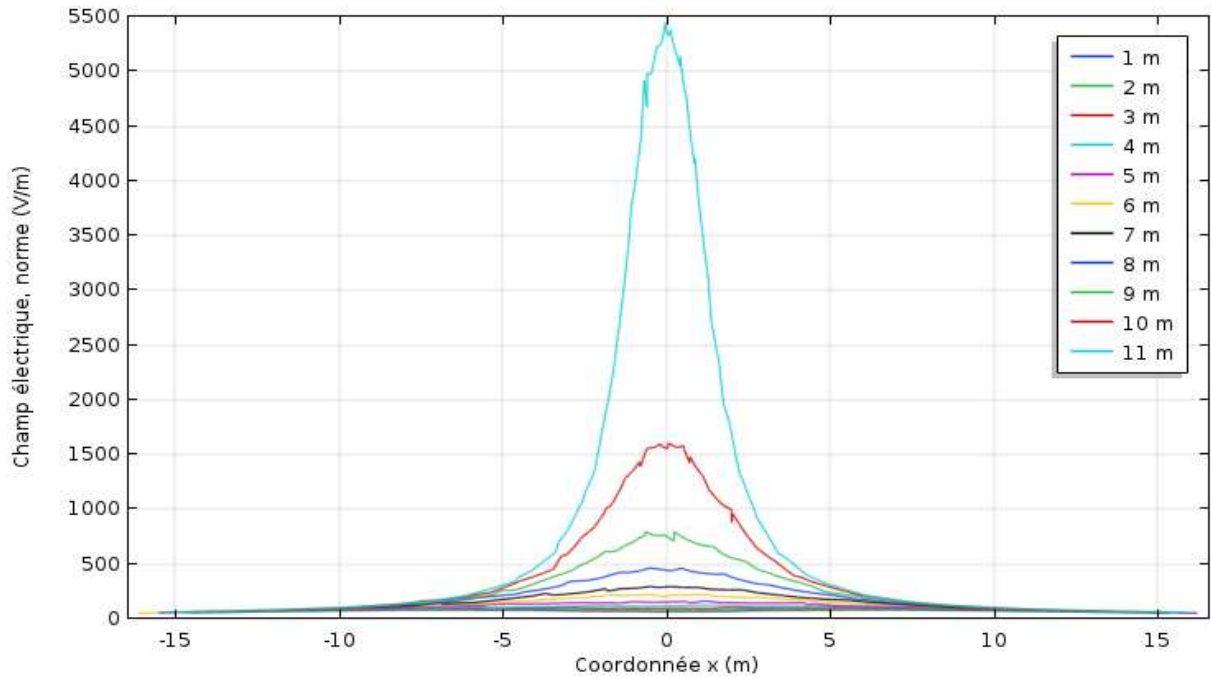
La représentation du champ électrique produit à proximité des lignes de transmission nécessite l'utilisation du module électrostatique pour la modélisation et la simulation du champ électrique. Les résultats de simulation montrent la distribution du champ électrique à plusieurs niveaux au dessous des lignes électriques aériennes.



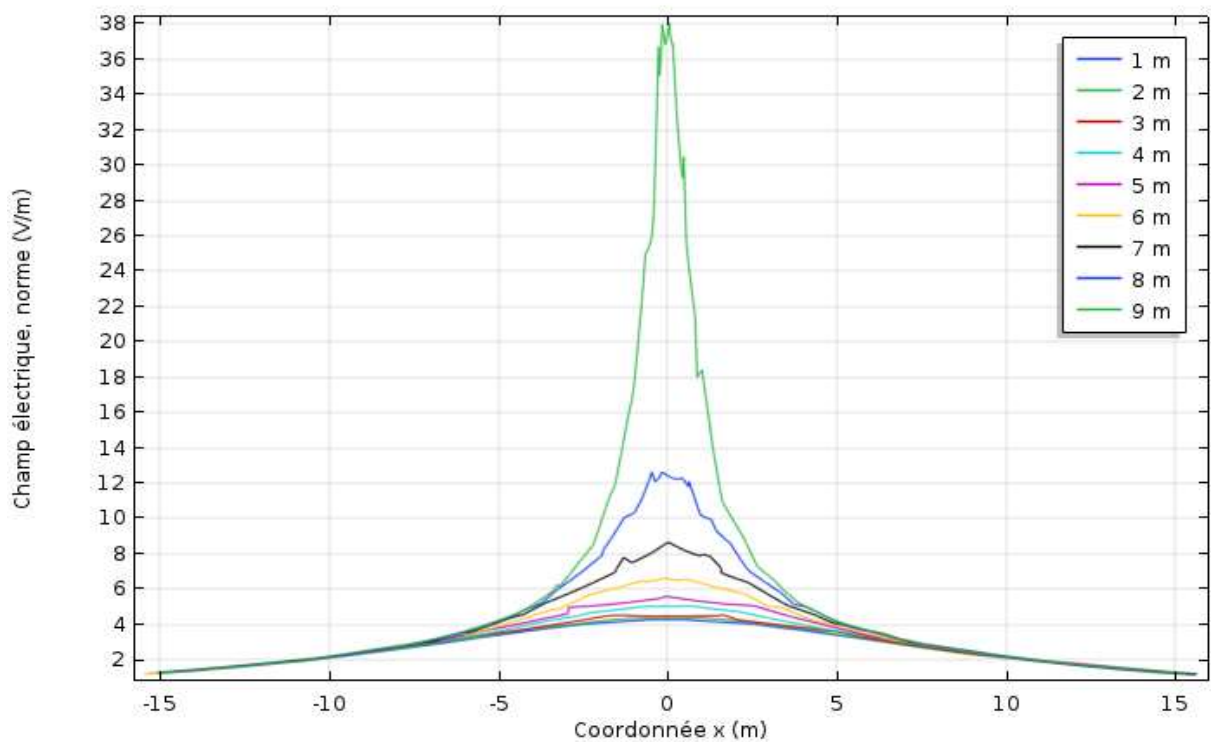
a- Ligne Très Haute Tension aérienne



b- Ligne Haute Tension aérienne



c- Ligne Moyenne Tension aérienne



d- Ligne Base Tension aérienne

Figure III.6 : Champ électrique près des lignes de transmission aérienne

Les résultats de la figure (III.6) montrent le calcul du champ électrique à plusieurs niveaux sous et a proximité des lignes électriques aériennes ; THT, HT, MT, BT en fonction des distances x, y. Le champ électrique augmente et atteint un maximum près des trois câbles électriques, près et aux dessous de la ligne.

Lorsqu'on s'éloigne selon l'axe x une distance $x = \pm 100$ m, il existe des faibles valeurs du champ électrique THT pour la ligne.

Le champ électrique de la ligne haute tension a été calculé à des distances longitudinales jusqu'à $x = 30$ m à plusieurs niveaux au-dessus du sol ($y = 1$ m à 19 m). Où l'intensité actuelle était grande sous les lignes électriques, puis il commence à se décroître en fonction de la distance.

Pour les lignes électriques MT et BT l'intensité du champ électrique atteint les valeurs maximales sous les câbles et décroît rapidement en fonction des distances latérales et longitudinales (x, y).

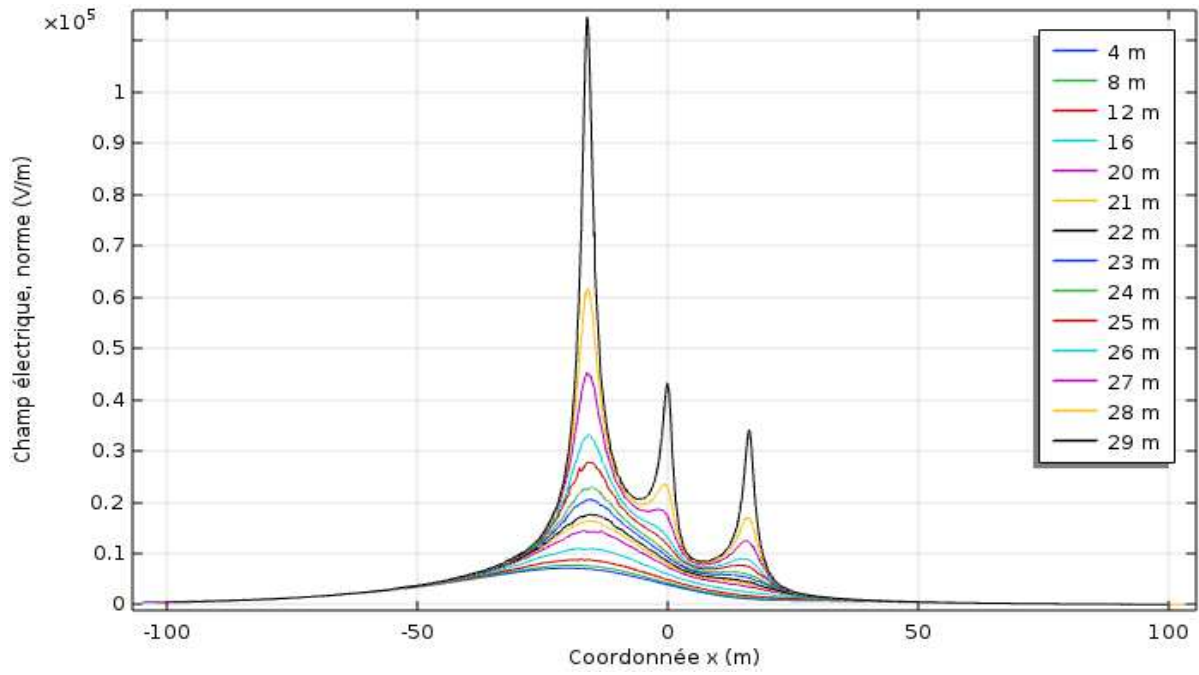
III.3.6 Présence d'un défaut de surtension dans les lignes électriques

-Surtension : la circulation d'une surtension dans une phase électrique donne naissance à un champ électrique important. Le tableau (III.3) résume les valeurs des surtensions pour chaque type de ligne électrique.

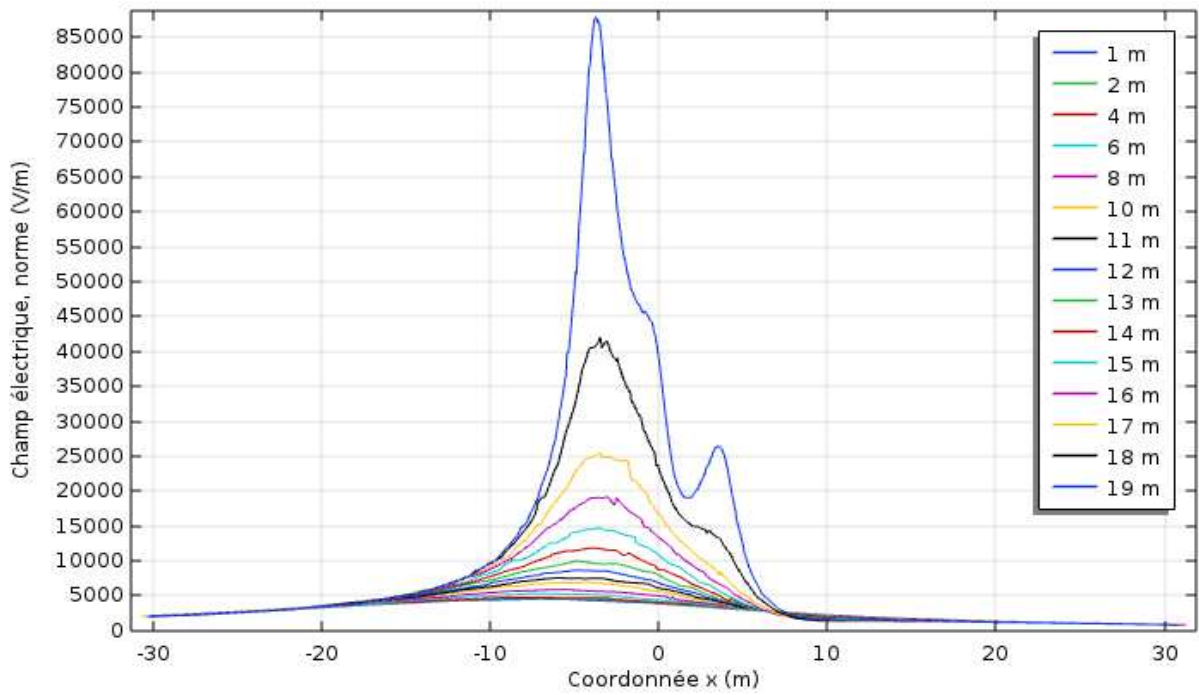
Tableau III.3 : les valeurs des surtensions pour chaque niveau de tension. [28,32]

Les lignes électriques	THT	HT	MT	BT
U(KV)	980	430	125	10

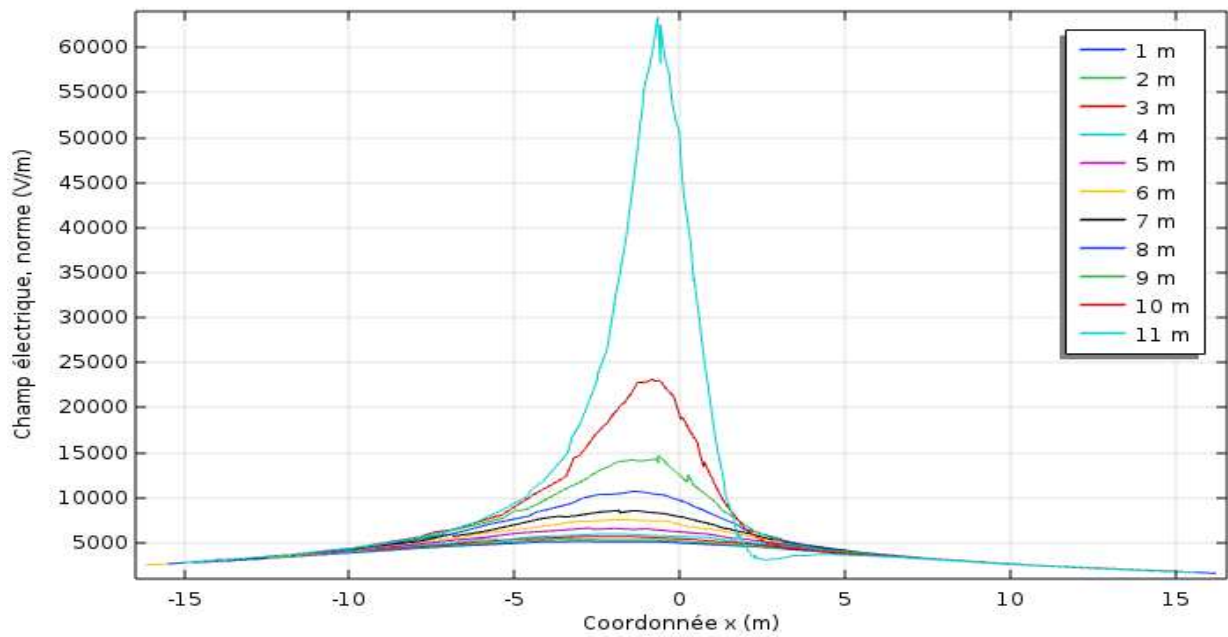
La figure (III.7) donne les mesures du champ électrique du deuxième cas du défaut électrique des lignes de transmission aérienne avec défaut de surtension : Les résultats de simulation de surtension dans une phase montrent que la distribution du champ électrique est très forte dans la phase affectée par la surtension de défaut contrairement aux autres phases. Nous constatons que le champ électrique devient très important à côté de la ligne en état de défaut de surtension (selon les deux coordonnées x et y) (voir l'Annexe A).



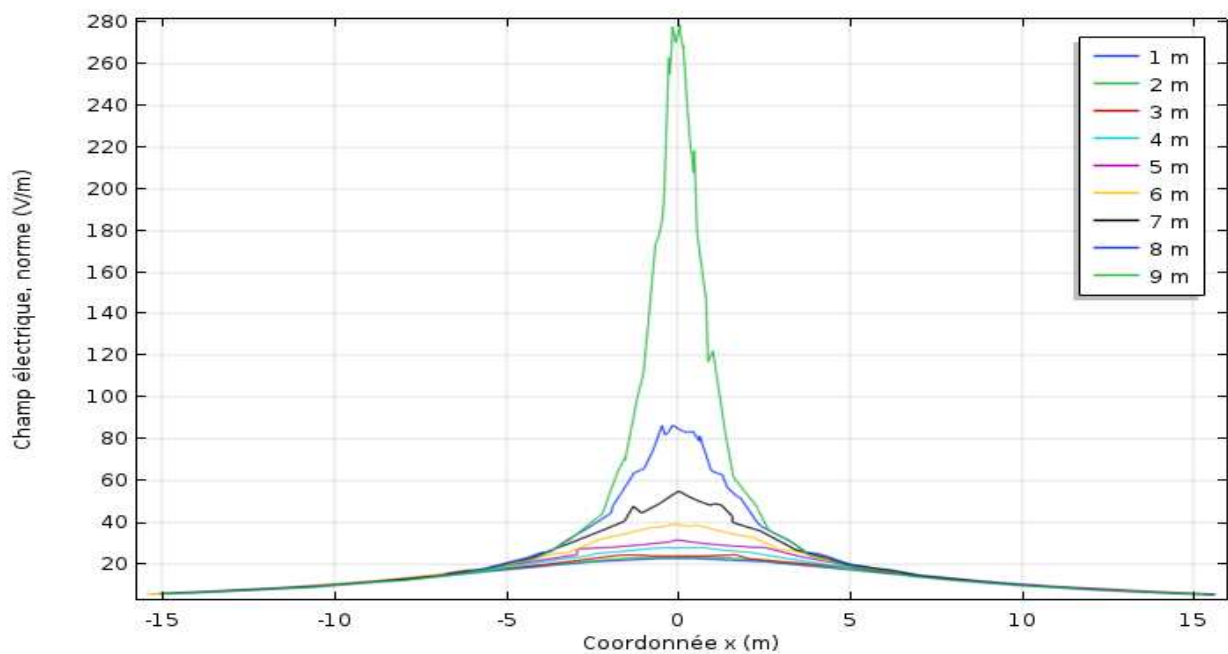
a- ligne très haute tension



b- ligne haute tension



c- Ligne moyenne tension aérienne



a- Ligne base tension aérienne

Figure III.7 : calcul du champ électrique près des lignes de transmission aérienne en surtension

Le tableau III.4 illustre la variation du champ électrique et magnétique pour chaque ligne dans les trois cas :

1. L'état sain sans défaut,
2. En défaut en court circuit
3. En défaut de surtension.

Tableau III.4 Mesure du champ électromagnétique pour les lignes électriques

Distance	E max (V/m)		B max (A/m)	
Ligne THT				
Y (m)	Sain	Défaut CC	Sain	Défaut Surtension
4	660	7000	5.62	193
12	1550	8831.6	13.08	266
20	3538.43	14243	31.14	514
24	5968.26	22580	58.37	957
26	8651.7	33080	91.8	1545
28	16850	61800	188.20	3240
	32500	$1.148 \cdot 10^5$	410	7232
Ligne HT				
Y(m)	Sain	Défaut CC	Sain	Défaut Surtension
1	91	4300	290	290
4	295.8	4675.6	322	322
8	675.69	5628.5	405	405
12	1604.55	8546.5	574	574
16	4770.25	19065	1105	1105
18	11215	41310	2335	2335
19	22692	87319	4750	4750
Ligne MT				
Y (m)	Sain	Défaut CC	Sain	Défaut Surtension
1	90	5126.4	13.8	53
4	162.2	5981.6	19.4	59
6	287.6	7565.4	27.2	83
8	620	10508	45.1	137
9	1055	14054	58.9	181
10	2180	23155	95.1	298
11	7629	63393	183.7	687.5
Ligne BT				
Y (m)	Sain	Défaut CC	Sain	Défaut Surtension
2	4.37	23.28	0.2	27
5	9.59	31.5	0.41	47
7	8.66	54.7	0.53	80
8	12.6	86.6	2.05	136
9	38.03	278.7	16	554

Le tableau III.4 illustre la variation du champ électromagnétique pour les quatre lignes électriques dans les trois cas. Le changement des amplitudes est traduit par la variation des courants et des tensions de phase pour chaque cas, cela entrainera un champ électromagnétique très intense et important exercé dans les zones proches et sous les lignes électriques de transmission de l'énergie électrique.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé numériquement à l'aide du logiciel de COMSOL Multiphysics la distribution du champ électromagnétique des lignes de transmission électriques aériennes : THT HT MT BT pour une fréquence de 50 hertz. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode des éléments finis montrent les intensités du champ électromagnétique à n'importe quel endroit près des lignes de transmission.

Dans le futur nous voulons faire des études concernant les interactions magnétiques entre les lignes de transmission et les objets comme des véhicules et des barrières (les animaux et les agents de maintenances de l'électricité en point de vu santé), environnement et compatibilité électromagnétique

Chapitre IV

*Agression électromagnétique
d'un câble alimentant une
machine électrique*

IV.1. Introduction

Le Moteur asynchrone (MAS) est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Ce moteur est caractérisé par l'absence de contacts électriques glissants, une structure simple, robuste et facile à construire.

On peut le relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse synchrone. Il est utilisable pour des entraînements à vitesse bien définie ou variable.

Pour la simulation du fonctionnement ou la commande de la machine asynchrone en régime transitoire et permanent il faut choisir un modèle simple afin de traduire fidèlement son fonctionnement. Les recherches actuellement ont pour but de remplacer les Machines à Courant Continu (MCC) par des MAS dans le domaine variateur industriel [40].

IV.2. Présentation de la machine asynchrone triphasée en Matlab Simulink

Le modèle étudié sous Matlab Simulink est composé de :

- Une source d'alimentation sinusoïdale triphasée de la machine.
- La machine asynchrone alimentée en courant, voir l'annexe B.
- La charge d'entraînement (le couple résistant) Voir la figure (IV.1)

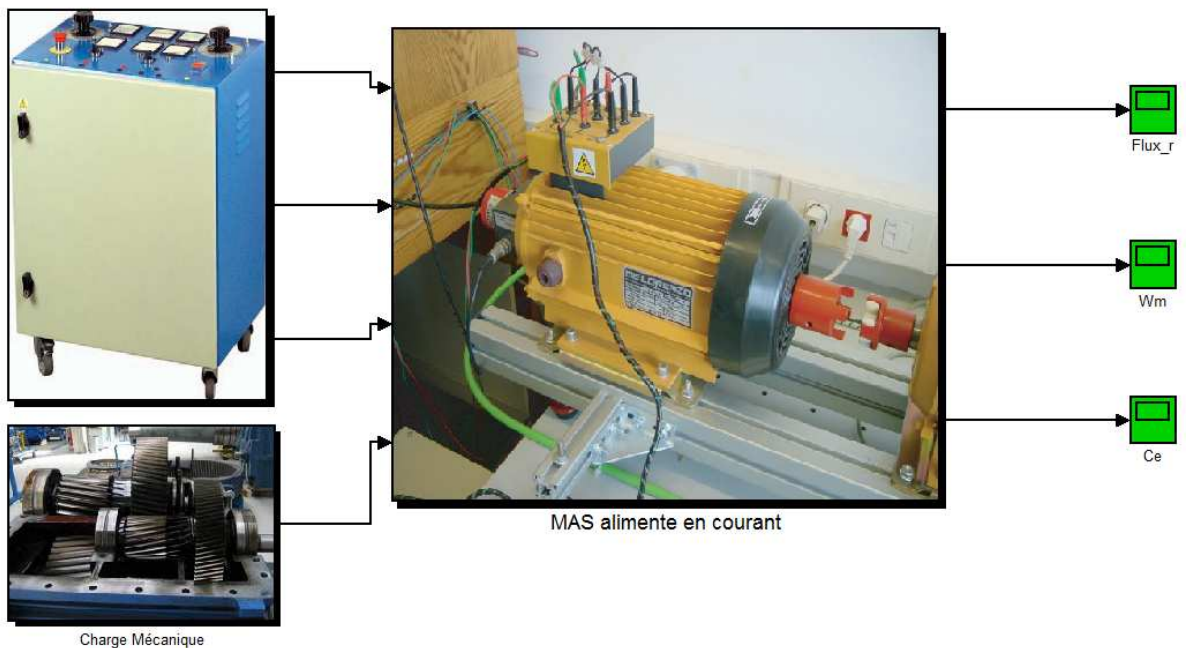


Figure IV.1 la machine asynchrone triphasée alimentée en courant [40]

IV.3. Modèle de la machine asynchrone alimentée en courant

Pour une machine asynchrone triphasée alimentée en courant, son modèle représentatif est défini par l'équation d'état ci dessous.

$$\dot{X} = A X + B I \tag{IV-1}$$

La dynamique des courants statoriques est négligeable devant la dynamique des flux rotoriques. Les courants statoriques (I_{ds} , I_{qs}) et la vitesse de glissement ω_{sr} sont considérés comme variables de commande, le couple résistant C_r comme perturbation. En considérant le vecteur d'état $\mathbf{X} = (\phi_{dr} \ \phi_{qr})^T$ et après un réarrangement des équations rotoriques, nous obtenons :

Avec :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega_r) \\ -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{M}{T_r} & 0 \\ 0 & \frac{M}{T_r} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix}$$

A ces équations électriques, nous devons associer l'équation mécanique pour obtenir le modèle complet du système :

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} I_{qs} - \phi_{qr} I_{ds}) \quad (\text{IV-2})$$

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = (C_e - C_r - f_r \Omega_r) / J \quad (\text{IV-3})$$

Avec :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} \quad (\text{IV-4})$$

IV.4. Transformation triphasé - diphasé

On choisi alors de transformer les grandeurs statoriques et les grandeurs rotoriques vers un repère commun dit dq et ceci à l'aide de deux transformations dans le plan qui sont des rotations.

IV.4.1. Les transformations de Clarke et Concordia

Le but de l'utilisation de ces transformations est de passer d'un système triphasé abc vers un système diphasé $\alpha\beta$ ou inversement. Il existe principalement deux transformations Clarke et Concordia :

La transformation de Clarke conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple (on dit multiplier par un coefficient $3/2$) [40].

Tandis que celle de Concordia, qui est normée, elle conserve la puissance mais pas les amplitudes.

Transformation de Concordia	Transformation de Clarke
passer d'un système triphasé abc vers un système diphasé $\alpha\beta$	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{c-à-d} \quad [x_{\alpha\beta}] = T_{23} [x_{abc}]$ avec $T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{c-à-d} \quad [x_{\alpha\beta}] = C_{23} [x_{abc}]$ avec $C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

Où : X peut-être un courant, une tension ou un flux.

Le choix de matrice de passage non normée (Clarke) est bien pratique en commande où l'on traite des grandeurs dq (I_{ds} , I_{qs} que l'on verra par la suite)[40].

IV.4.2. La transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq . Le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe par rapport au repère abc , par contre le repère dq est mobile (voir figure IV.2). Il forme avec le repère fixe $\alpha\beta$ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park (θ) [40].

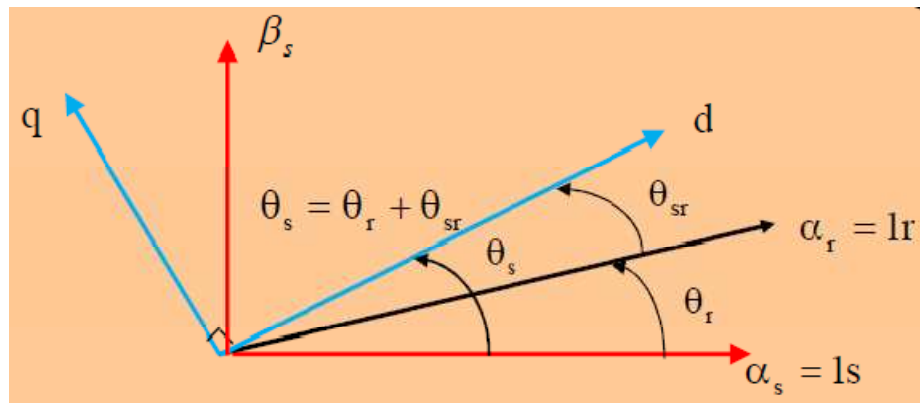


Figure IV.2 Changement des repères.

Le passage des composantes $\alpha\beta$ aux composantes dq est donné par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix}$$

La transformation inverse (dq au $\alpha\beta$) est :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}$$

Nous choisissons de fixer le repère dq au champ tournant ($\theta = \theta_s$), Notons $\omega_s = \dot{\theta} = \frac{d\theta_s}{dt}$ que nous appellerons pulsation statorique [40].

IV.5. Simulation

La source d'alimentation sinusoïdale triphasée de la machine. Voir la figure(IV.3)

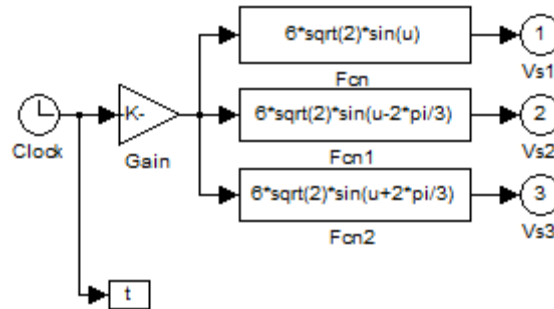


Figure IV.3 la source d'alimentation sinusoïdale triphasée.

Développement du modèle de la machine asynchrone en utilisant la transformation de Laplace, puis établir ce modèle dans Simulink à l'aide des fonctions de transfert (transfer F_{cn}) (voir figure IV.4).

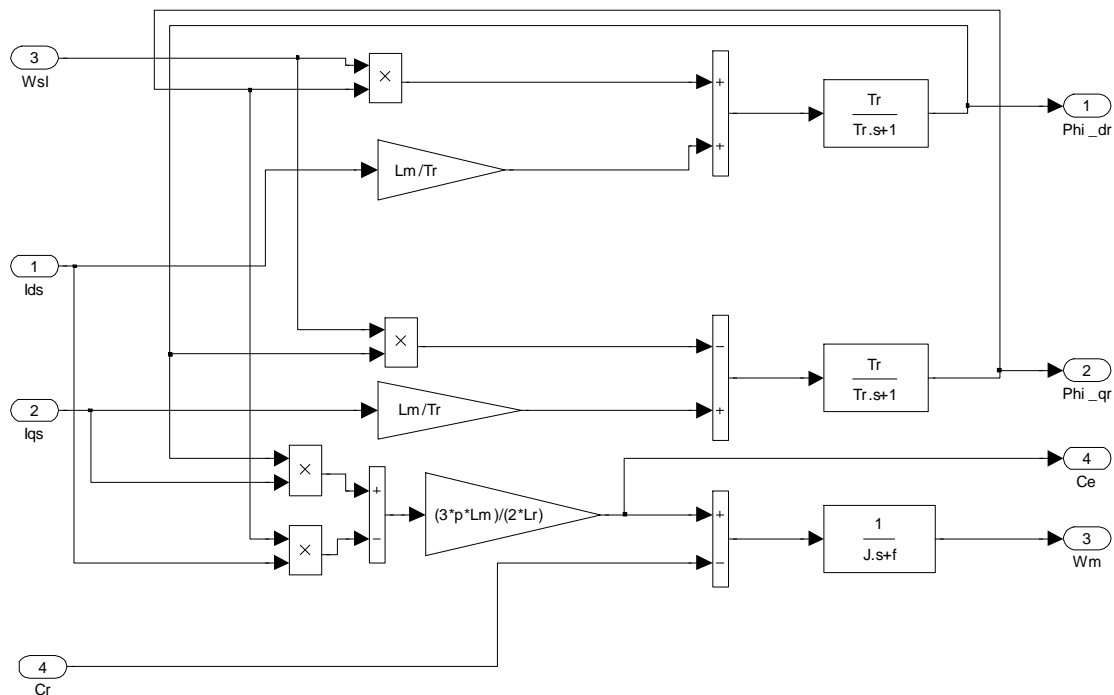


Figure IV.4: Schéma de la MAS alimentée en courant sous SIMULINK [40].

De la même manière, développer le modèle de la transformation de Park ($abc-\alpha\beta-dq$), puis établir son modèle dans Simulink à l'aide des fonctions de transfert (Transfer Fcn + Mux) (voir figure IV.5).

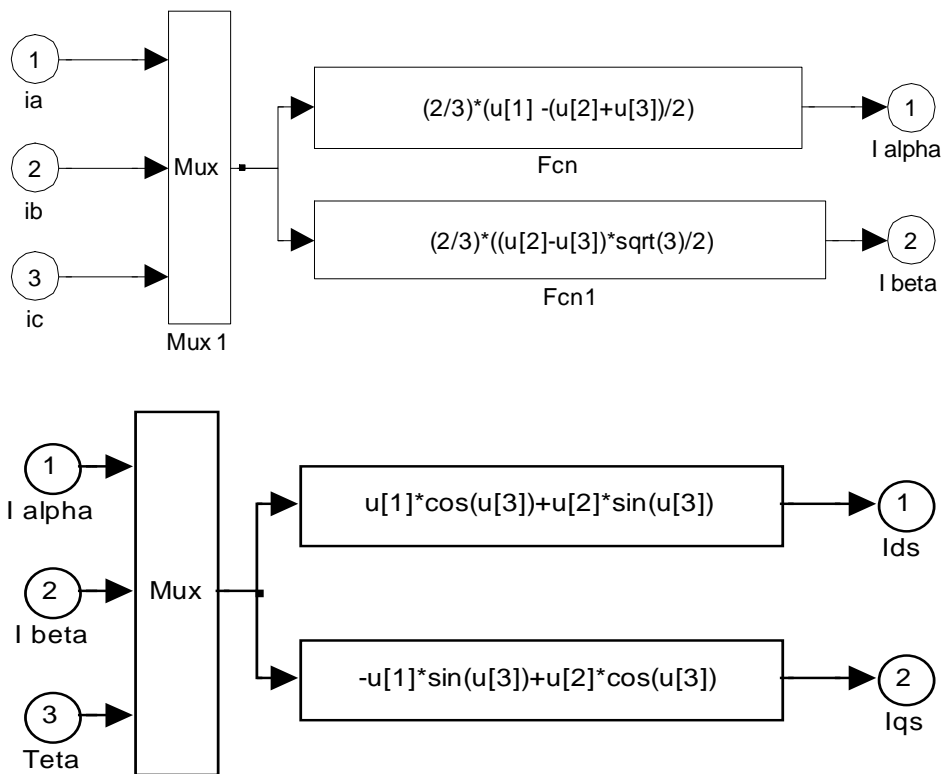
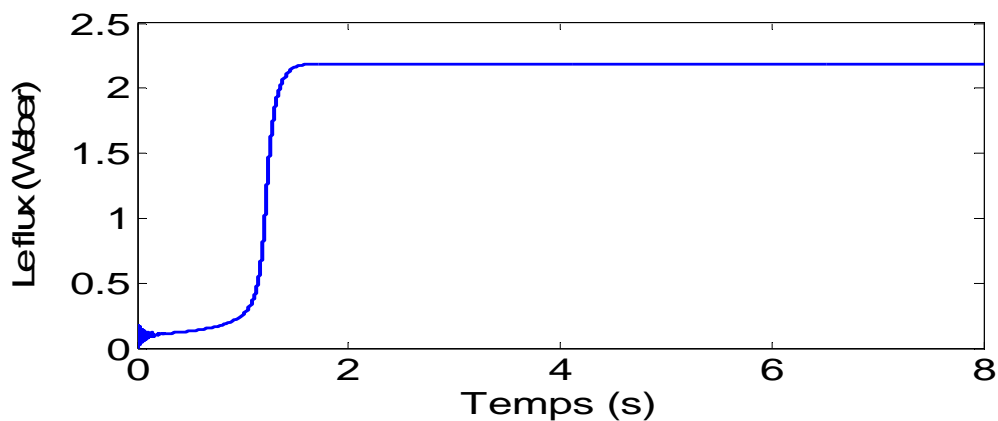


Figure IV.5 Schéma bloc de la transformation de Park sous SIMULINK [40].

IV.5.1. Résultats de simulation

➤ **Fonctionnement normal du moteur sans agression magnétique :**

La machine asynchrone triphasée est caractérisée par une phase de démarrage transitoire au début, puis une phase de fonctionnement stable permanente voir la figure (IV.6).



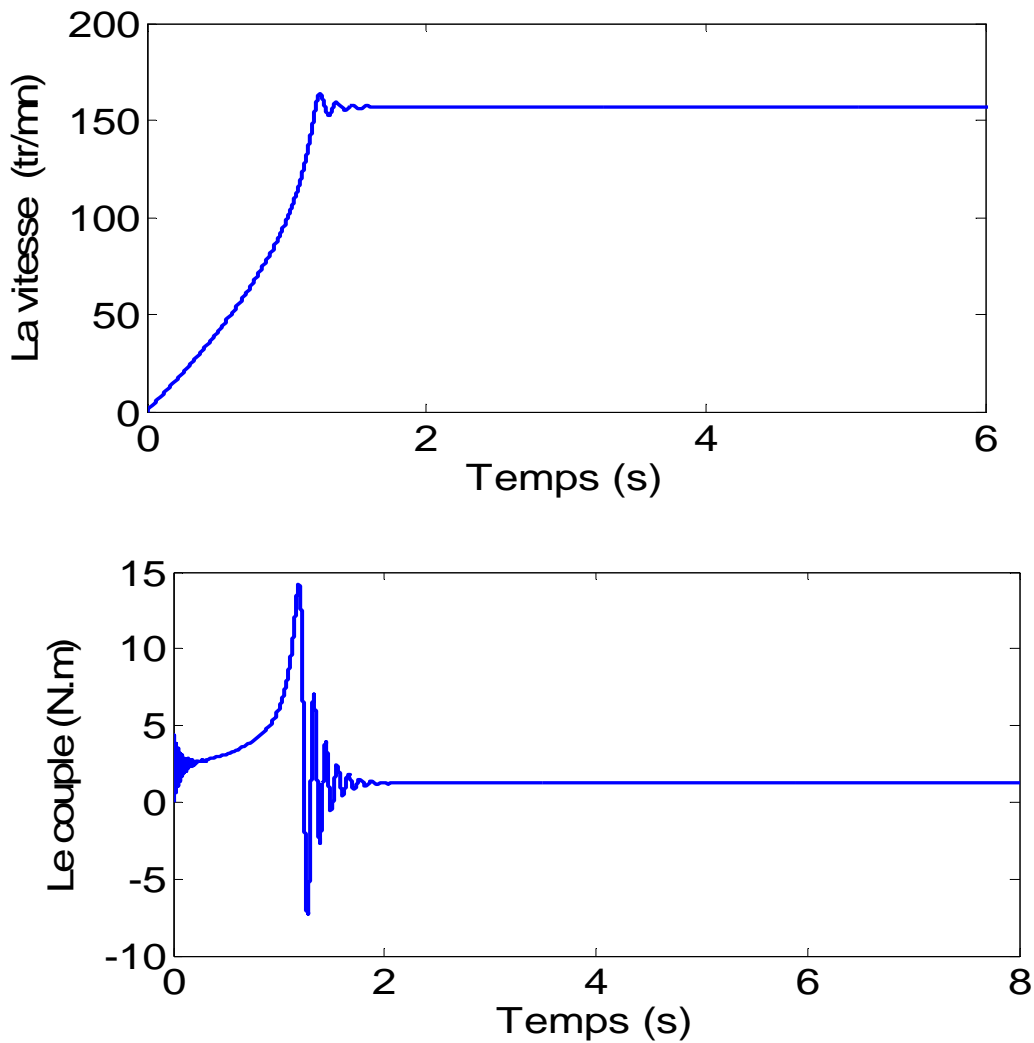


Figure IV.6 Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé.

➤ **Les différentes formes d'ondes induites dans le câble électrique :**

Il existe deux types de propagations des perturbations électromagnétiques rayonnées ou conduites. Pour notre cas nous allons supposer une source électromagnétique comme une source de perturbation qui va générer une onde induite sous forme d'un courant additif dans un câble électrique (le chemin de propagation de la perturbation).

Ce câble électrique va la transmettre à un moteur électrique (la victime) cela va générer sûrement des perturbations et d'autres conséquences sur le fonctionnement du moteur.

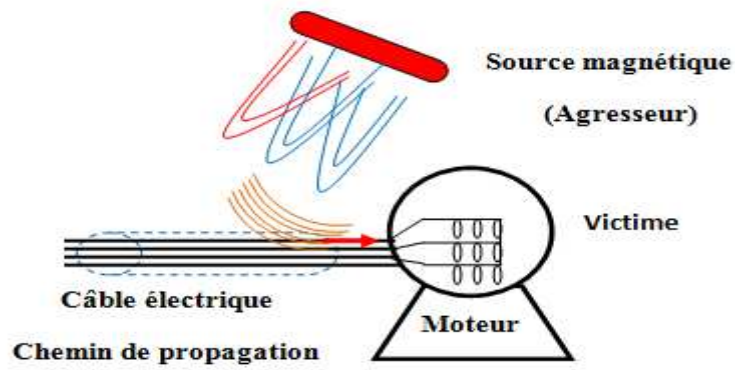


Figure IV.7 agression d'un câble électrique par onde magnétique.

Les signaux de différentes formes induites dans les câbles électriques peuvent avoir plusieurs amplitudes, formes et des périodes de présence différentes ainsi que des fréquences variables:

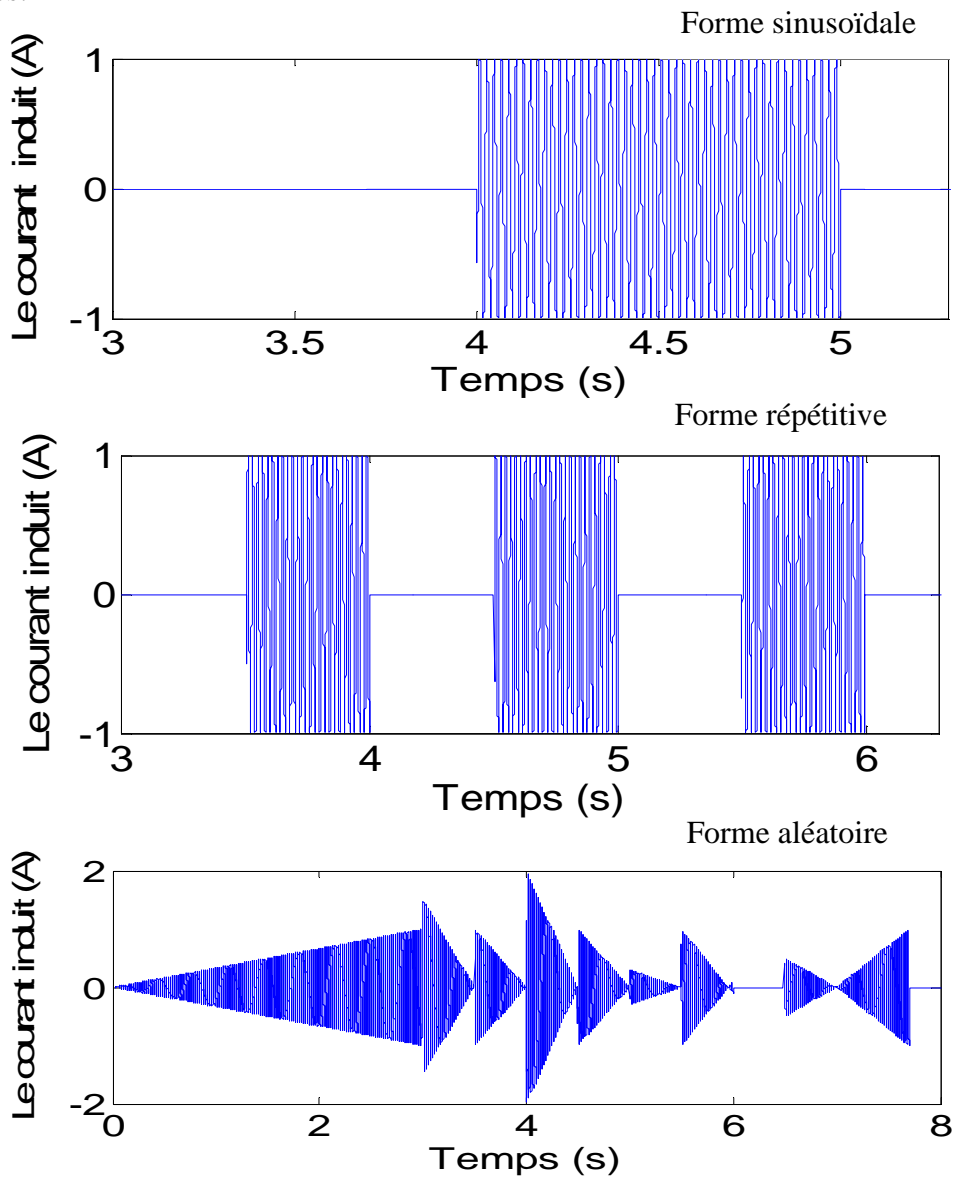


Figure IV.8 les différentes formes d'ondes des courants induits.

➤ **Visualisation des résultats de simulation pour les agressions magnétiques**

A- **Forme sinusoïdale**

La présence d'une onde sinusoïdale de courant additif donne des conséquences importantes telles que les fluctuations, le couple, la vitesse et une variation du flux généré.

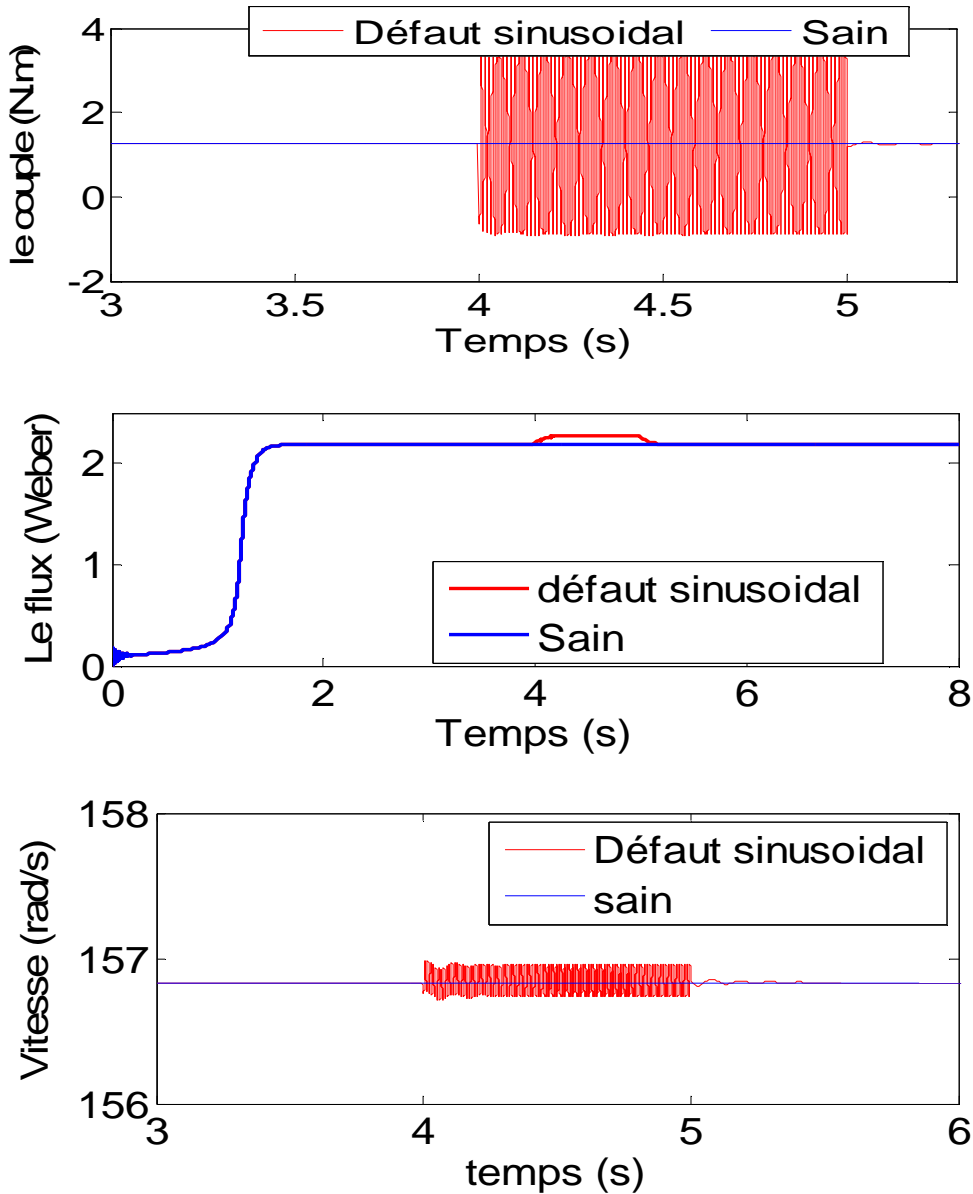


Figure IV.9 Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé agressé par une onde sinusoïdale.

B- **Forme répétitive**

La machine asynchrone triphasée est agressée par des ondes répétitives dans la phase permanente voir la figure (IV.10). Les résultats de simulations montrent l'influence de chaque variation du courant induit sur les paramètres électriques magnétiques et mécaniques de la

machine.

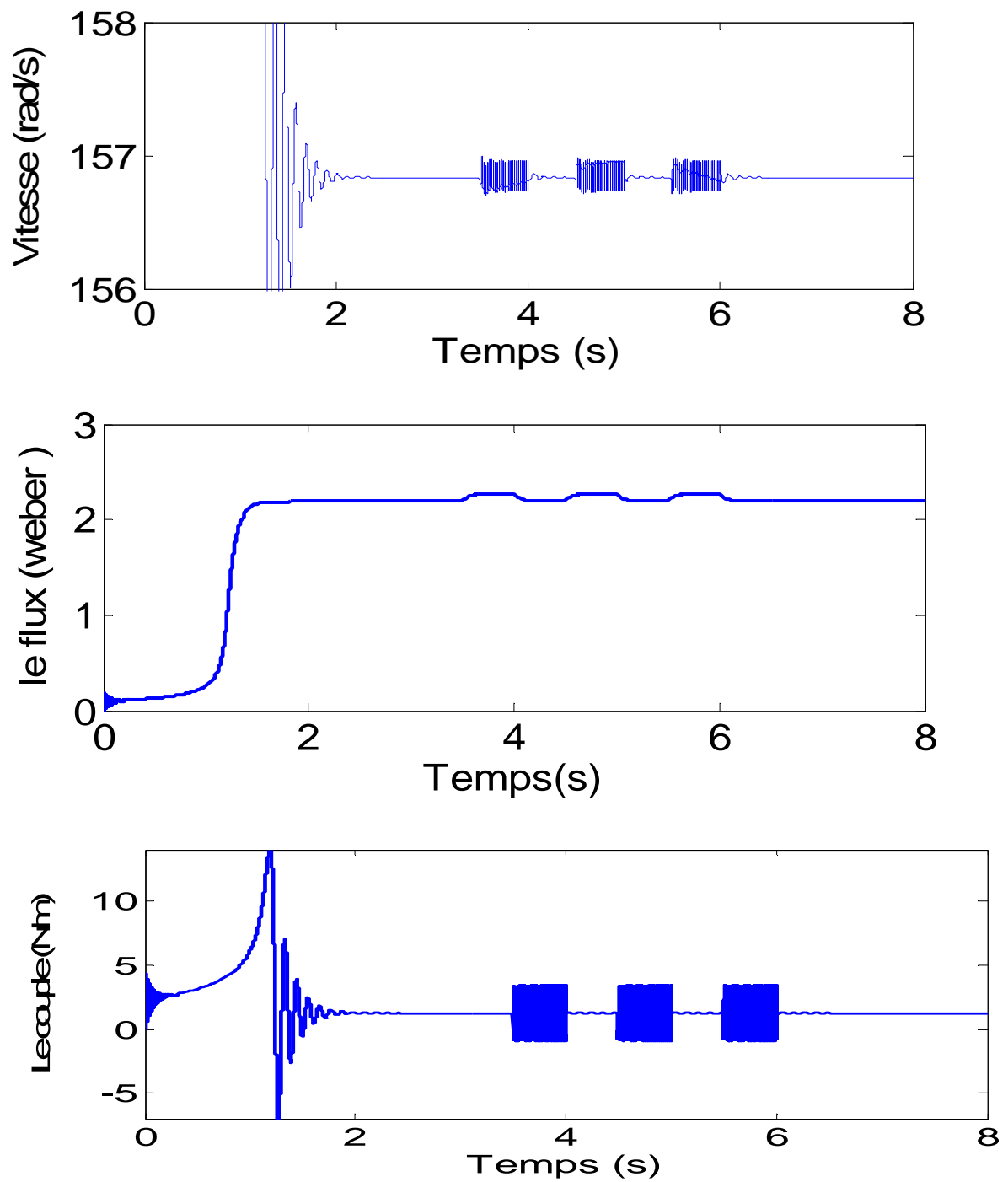


Figure IV.10 Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé agressé par une onde répétitive.

C- Forme aléatoire

La présence des ondes induites de forme non définie, causera un changement de forme des paramètres de la machine comme est représenté dans la figure (IV.11). Ces variations dépendront de chaque variation du courant d'alimentation de chaque phase. Cela explique la relation proportionnelle entre les phénomènes électromagnétiques et mécaniques du système.

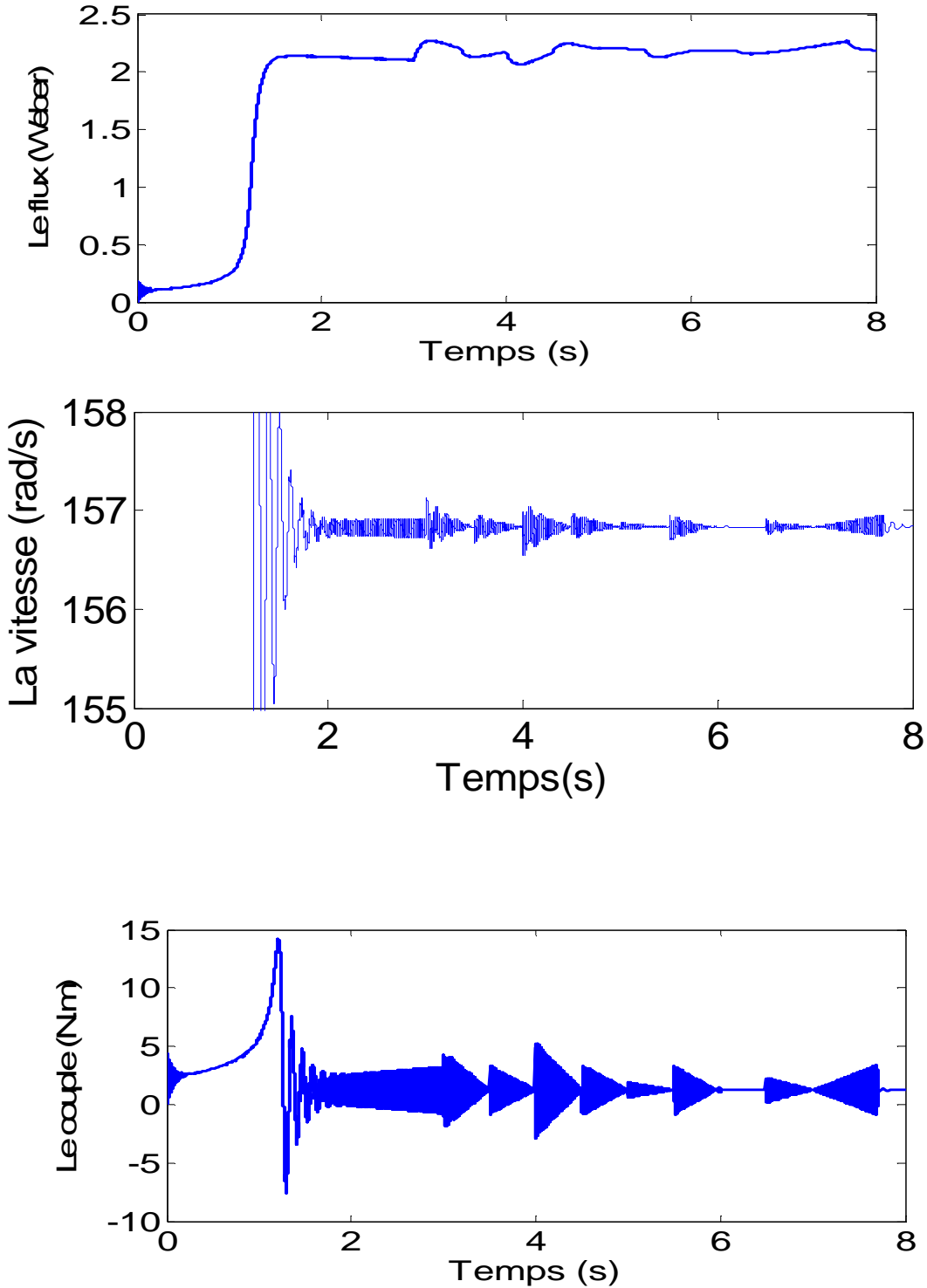


Figure IV.11 Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé agressé par une onde aléatoire

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu des agressions pour des différentes formes d'ondes magnétiques induites dans un câble électrique, ce câble va transmettre ces ondes sous formes des courants électriques caractérisés par une amplitude, fréquence, durée et formes différentes. L'influence de ces perturbations se voit clairement dans les variations du couple, la vitesse et le flux par des fluctuations et des vibrations et un bruit on réalité même un déplacement du moteur. Il existe plusieurs solutions dans la compatibilité électromagnétique pour éliminer ces perturbations comme le blindage des câbles ...etc.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les effets des champs électromagnétiques de basse fréquence, et la compatibilité électromagnétique constituent un axe de recherche fondamental très important. Pour cette raison il existe des normes internationales pour les distances entre les agglomérations urbaines régionales et le réseau électrique, car il y a une pollution électromagnétique sur l'environnement, la santé des êtres humains, interférences électromagnétiques.

L'objectif principal de ce mémoire est de montrer la distribution du champ électromagnétique au voisinage des lignes électriques aériennes de différentes géométries dans l'état sain et transitoire.

De ce fait, une simulation numérique avec le logiciel COMSOL Multiphysics à élément finie nous a offert la possibilité d'évaluer tous les paramètres physiques et magnétiques (l'intensité du champ magnétique et électrique des lignes électriques à des différentes distances selon x et y)

La simulation des lignes électriques a montré l'influence de l'intensité du courant de ligne et la tension de phase et la géométrie de chaque type (THT, HT, MT, BT) sur la distribution et l'intensité de champ des lignes électriques.

On a terminé notre travail par une simulation d'une agression magnétique induite dans un câble électrique alimentant un moteur, la transmission de cette onde magnétique a montré l'influence sur les variations des paramètres électromagnétiques et mécaniques.

La forme d'onde de perturbations induites influe sur les variations de la vitesse et surtout le couple du moteur à travers des ondulations et des fluctuations.

Perspectives :

Dans le cadre de ce mémoire nous avons présenté des simulations électromagnétiques peuvent être utilisée pour le contrôle de la pollution électromagnétique et le diagnostique des interférences électromagnétiques au voisinage des lignes électriques.

Faire des études de simulations pour minimiser ou éliminer ces perturbations à travers les boucles passives au dessous des lignes et des écrans.

Faire des mesures et des études sur des agressions existant par les lignes électriques en Algérie.

Caractérisation des lignes électriques haute tension comme sources de perturbations électromagnétiques des implants médicaux.

Comparaison des résultats de simulation et expérimentale avec les normes internationales

Développement d'une coopération scientifique et partenariat avec des industriels (l'opérateur du domaine de l'énergie électrique) et des associations de santé pour le respect des normes en Algérie.

Références :

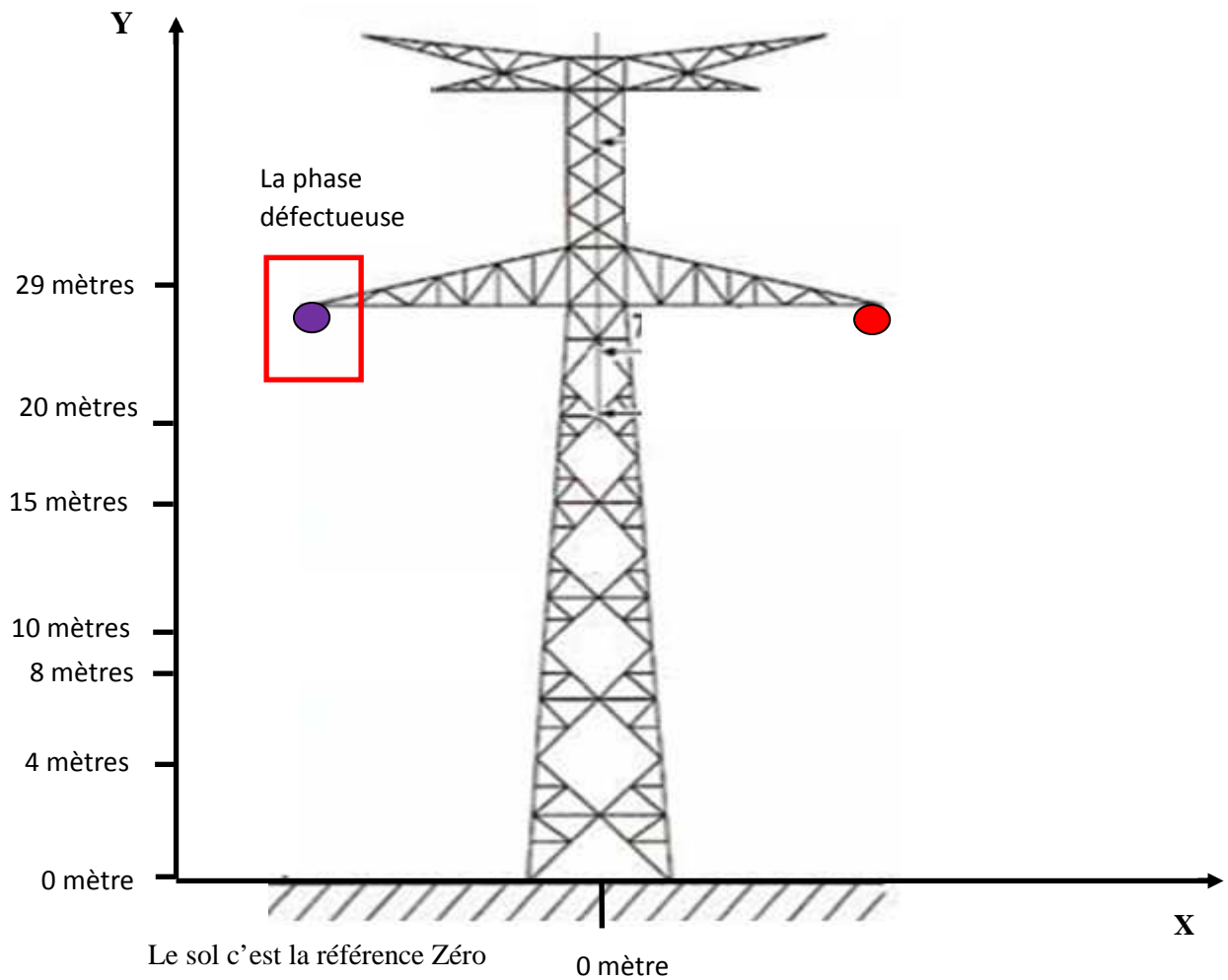
- [1] A. Charoy, Groupe Schneider « La Compatibilité Electromagnétique Phénomènes Enjeux » Revue de l'Electricité et de l'Electronique, France, 1995.
- [2] Ayad A.N.E.I «Etude et analyse des interférences électromagnétiques (cem) dans les procédés a décharges électriques »magister université de sidi bel abbes Algérie 2011.
- [3] Maurice Lardellier, « CEM - couplages des perturbations » Ecole Supérieure De Plasturgie, Lyon, Juin 2001.
- [4] F. Rachidi, « Introduction à la Compatibilité Electromagnétique – CEM », Notes de cours, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL-DE-LRE CH-1015, Lausanne, Été 2003,
- [5] Slimani Halima, « Comportement et calcul du champ électromagnétique Engendré à proximité de lignes d'énergie transportant des signaux HF », Mémoire de Magister, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, Novembre 2010.
- [6] Abdallah Darkawi « La Compatibilité Électromagnétique (CEM) » cour - École d'ingénieur paris. France 2016
- [7] Adil El Abbazi « Etude et réalisation d'une nouvelle cellule TEM à support rotatif pour des mesures CEM des circuits intégrés : Application du modèle ICEM. Micro et nanotechnologies/ Microélectronique » thèse - INSA de Rennes, 2006. Français
- [8] Maxime moreau « Modélisation haute fréquence des convertisseurs d'énergie et Application à l'étude des émissions conduites vers le réseau » thèse - école centrale de Lille, 2009.
- [9] Fahd Hassoun « Etude de l'émission électromagnétique générée par une transmission haut débit sur un réseau de type XDSL ou PLC » thèse - Université Blaise Pascal France - 2006
- [10] Fabrice caignet «La compatibilité électromagnétique CEM » - cour. 2010
- [11] Sanaa zanguï « Détermination et modélisation du couplage en champ proche magnétique entre systèmes complexes » thèse - Université de Lyon, 2011.
- [12] Jacques delaballe « La CEM : la compatibilité électromagnétique » thèse Université de Limoges en 1980 - Cahier technique n° 149
- [13] Maurice Bellanger « les antennes Théorie, conception et application » thèse- Paris, France. 2009.
- [14] Liénard Alfred « Champ électrique et magnétique produit par une charge électrique » cour, www.al.lu/physics/deuxieme/mousset/champ_electrique. 1898.
- [15] Albert Einstein « le champ magnétique » cour (for-ge.blogspot.com/2015/05/le-champ-magnetique.html) 2015 .

- [16] Mathis legay, Julien marro, Aymeric rannou « Les effets des ondes électromagnétiques sur les êtres » Lycée Félix le Dantec, France 2015
- [17] Thierry debu « Lignes aériennes Paramètres électriques » Cahier technique - France 2003
- [18] M. christian kert « rapport sur l'apport de nouvelles technologies dans l'enfouissement des lignes électriques à haute et très haute tension » rapport - décembre 2001
- [19] Nabila Yalaoui « Calcul de la matrice d'impédance linéique du système ligne-câble avec la méthode des éléments finis » université de Montréal canada 2017.
- [20] Ayad A.N.E.I « Etude et Réalisation d'un séparateur à induction électromagnétique » thèse université de sidi bel abbes Algérie 2017.
- [21] Ayad A.N.E.I "Etude et modélisation d'un capteur à Courant de Foucault pour le contrôle non destructif " ingénieur 2009 université de sidi bel abbes Algérie.
- [22] Tamer Bécherrawy «Électromagnétisme : équations de Maxwell propagation et émission » UNIMARC | BibTeX | RIS2012
- [23] Theory for the Magnetic Fields, No Currents Interface User's Guide magnetostatic equation AC/DC Module May 2012 COMSOL 4.3pdf www.comsol.com.
- [24] Ryma Delimi "méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique application aux paliers magnétiques " magister Université Mentouri – Constantine Algérie 2008.
- [25] Theory for the Magnetic Fields, Submarine Cable 4 - Inductive Effects & capacitive AC/DC Module 2018 COMSOL 4.3pdf www.comsol.com.
- [26] Sonia Naceur "Contribution à la modélisation numérique d'une pompe MHD en tenant compte de la nature des matériaux des électrodes et du fluide" université de Batna mémoire de magister en électrotechnique 2007
- [27] Hocini Farid "association de la commande pour l'étude par éléments finis des phénomènes magnéto élastiques et vibratoires dans les systèmes électrotechniques" thèse de doctorat université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou 2013.
- [28] Thierry debu « Lignes aériennes. Paramètres électriques », Fish technique, Centre d'équipement du réseau de transport (CERT) d'Électricité de France
- [29] «Transport et distribution de l'énergie», Document ressource, Baccalauréat sciences et techniques de l'industrie et du développement durable.
- [30] Ohanessian.H, et al. « Caractérisation de la stabilité d'un élément piézoélectrique du type PZT sous compression uniaxiale rapide. » Revue de physique appliquée 1983
- [31] Salah, M. belkhiri et L. A. M. I. N. E. Miloud, « Etude et modélisation des courants de cour-circuit dans les réseaux MT / BT. » M'sila 2015-2016

- [32] Roland Calvas, « Les perturbations électriques en BT», Cahier technique n°141, Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectricité de Grenoble 2002.
- [33] Bellaredj Amina et Gaouar Youcef «Conception et simulation d'une ligne aérienne de transport électrique 220KV » Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen ,Algérie 2016.
- [34] Vanilli Sandra Tefeguim « Etude de la construction d'une ligne électrique haute tension 90kv pa-wona » master en ingénierie Officiel de l'Institut International de l'Eau et de l'Environnement France 2014
- [35] B. Ali Rachedi, A. Babouri, F.Berrouk. « A Study of Electromagnetic Field Generated by High Voltage Lines Using Comsol Multiphysics» Department of electrical engineering Université 8 Mai 1945 Algérie 2014.
- [36] Thierry DEBU « Lignes aériennes Paramètres électriques » D 4 435 technique de l'ingénieur 2000.
- [37] R. Djekidel, D. Mahi, A. Ameer, A. Ouchar Et M. Hadjadj « Calcul et atténuation du champ magnétique d'une ligne aérienne HT au moyen d'une boucle passive » acta electrotehnica Volume 54, Number 2, 2013.
- [38] A. Azoulay Etude du champ magnétique (induction magnétique) à proximité de la ligne 400 Kv Avelin-Gavrelle rapport technique de l'association Radio et Compatibilité Electromagnétique Mars 2014.
- [39] Mr. Mekhloufi Med Abdelatif « modelisation, simulation et analyse des regimes de fonctionnement et des conditions d'exploitation des longues lignes de transport d'energie electrique a extra haute tension (e.h.v) 400 kv et plus » universite des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf ustomb algérie 2013 .
- [40] Youcef Djeriri « Modélisation de la MAS alimentée par un onduleur triphasé à deux niveaux de tension commandé par la technique MLI sinus-triangle » tp N°04 travaux pratique université djilali liabes sidi bel abbes algérie 2015.

Annexe A

Les positions des mesures du champ électromagnétique



Les câbles électriques ● ●

La phase du défaut ●

Schéma des distances de mesure du champ au voisinage des lignes électriques selon X et Y

Annexe B

Caractéristiques de la Machine Asynchrone triphasée

La puissance: $P=1.5\text{kw}$;

La tension: $U=380/220\text{V}$;

La fréquence: $f=50\text{Hz}$;

Le courant: $I=3/6\text{A}$;

La vitesse de rotation: $N=1550\text{ tr/mn}$;

Nombre de paires de pôles: $p=2$;

La résistance statorique: $R_s=4.85\Omega$;

La résistance rotorique: $R_r=3.81\Omega$;

L'inductance statorique: $L_s=0.274\text{H}$;

L'inductance rotorique: $L_r=0.274\text{H}$;

L'inductance mutuelle: $L_m=0.258\text{H}$;

Le moment d'inertie: $J=0.031\text{kg.m}^2$;

Le coefficient de frottement: $f_t=0.0114\text{N.m/rd/s}$.

Résumé : Dans ce travail nous avons simulé le champ électromagnétique autour et au voisinage des différentes lignes électriques aériennes sans et en présence des défauts transitoires. Ainsi qu'une simulation des perturbations induites dans un câble proche d'une source de perturbation électromagnétiques en fonction de plusieurs paramètres l'intensité la forme la durée et voir leurs conséquence sur le fonctionnement d'un moteur électrique.

Mot clé : méthode des éléments finis, COMSOL, Câble, perturbation, ligne de transmission.

Abstract: In this work we simulated the electromagnetic field around and in the vicinity of different air electric lines without and in the presence of the transitory defects. As well as a simulation of the disturbances induced in a cable close to a source of disturbance electromagnetic according to several parameters intensity the form duration and to see their consequence on operation of an electrical motor.

Keyword: finite element method, COMSOL, Cable, disturbance, line of transmission.

الخلاصة: في هذا العمل ، قمنا بمحاكاة المجال الكهرومغناطيسي حول خطوط الطاقة الكهربائية المختلفة بدون و في وجود أخطاء عابرة. بالإضافة إلى محاكاة الاضطرابات الناجمة في كابل قريب من مصدر اضطراب كهرومغناطيسي كدالة لعدة عوامل ، و الكثافة التي تتشكل في مدة زمنية ورؤية نتائجها على تشغيل محرك كهربائي.

الكلمة الرئيسية: طريقة العناصر المحدودة ، كمصول ، الكبل ، تشويش ، خط النقل .