

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electriques

Filière :Electrotechnique

Option :Réseau Electrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**L'étude de l'effet inductif d'un
câble sous-marin à haute
tension**

Présenté par :
BARI Zineb
ABID Achouak

Devant le jury composé de :

Mr. REZIG Mohammed

MCB

Président

Mr. KHENE Mohammed Lotfi

MCA

Encadreur

Mr. BENALIA Khaled

MCB

Examineur

Année universitaire : 2019 / 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Option : Réseau Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

L'étude de l'effet inductif d'un câble sous-marin à haute tension

Présenté par :

BARI Zineb

ABID Achouak

Avis favorable de l'encadreur :

Mr. KHENE Mohammed Lotfi

Signature

Avis favorable du Président du Jury :

Mr. REZIG Mohammed

Signature

Cachet et signature

Dédicace

*À la chérie de mon cœur ma chère
Mère pour ses sacrifices, qui ont toujours
été la raison de mon succès*

*À la lumière de ma vie mon père, qui m'a
toujours fourni tout ce que j'ai besoin pour
réussir, et continue jusqu'à ce moment,*

*À mes très chères sœur et frères a ma
grand-mère*

et mon cher oncle et mes chères tantes,

À ma famille et tous mes amis

Je dédie ce modeste travail

Zineb Bari

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents ma mère et mon père

*Pour leur patience, leur amour, leur
soutien et leur encouragement*

A mes frère et sœurs

A mes amies et mes Camarades

A toute ma famille

*Sans oublier tous les professeurs que soit de
la première,*

*Moyen, du secondaire ou de l'enseignement
supérieur.*

Abid Achouak

Remerciements

Merci d'abord et avant tout à dieu tout puissant qui nous a donné la force et le volonté dans toutes nos années d'étude pour atteindre ce jour

Nous remercions nos parents pour leurs efforts et les encourageons pour nous sinon, nous ne serions pas ici

Merci et reconnaissance à notre encadreur Mr KHEN Mohammed Lotfi, qui nous a aidés à préparer ce mémoire

Merci à tous ceux qui ont été la cause de notre succès, merci beaucoup à nos chers professeurs et chers amis aux camarades de classe pour leur soutien financier et moral à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce que nous sommes maintenant

Merci, merci beaucoup

Résumé :

Le but de ce travail de recherche est d'étudier l'effet inductif dans un câble sous-marin à haute tension en particulier le câble XLPE dont l'objectif de calculer les pertes dans ce câble. Dans ce contexte, nous avons proposé trois applications, pour la première application, les phases sont excitées par une bobine de courant. Dans la deuxième application, l'effet de la torsion de l'armure est inclus dans le modèle du câble. Pour la troisième application, les caractéristiques de bobine de courant sont réglées sur multi tours homogénéisé pour exciter les phases.

ملخص:

الهدف من هذا العمل البحثي هو دراسة التأثير الحثي في كابل بحري عالي الجهد من نوع كابل الألمنيوم المحمي بالموصل المعزول بالبولي إيثيلين المتقاطع وذلك بحساب الضياعات في هذا الكابل من خلال ثلاثة تطبيقات تتلخص في ما يلي :

- الطريقة الأولى، إثارة الأطوار بملف تيار.
- الطريقة الثانية ، تم تضمين تأثير التواء الدروع في نموذج الكابل.
- الطريقة الثالثة، يتم تعيين خصائص ملف التيار على عدة دورات متجانسة لتنشيط الأطوار.

Symboles

Symboles

\vec{H} : Vecteur champ magnétique [A/m].

\vec{E} : Vecteur champ électrique [V/m].

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T].

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m^2].

ρ : Densité volumique de la charge électrique [C/m^2].

\vec{J} : Densité de courant (A/m^2).

: Permittivité diélectrique [F/m].

: Conductivité électrique [S/m].

U : Le potentiel électrique scalaire du champ électromagnétique.

V : Reluctivité magnétique [m/ H].

\vec{Br} : Induction magnétique rémanente rémanent en cas aimant permanent.

μr : Perméabilité relative du matériau.

μo : Perméabilité du vide.

(\vec{Hp}) : Solution particulière obtenue en imposant des conditions aux limites données.

(\vec{Hc}) : Le champ magnétique du à aimant permanent s'il existe dans le dispositif.

: Le potentiel scalaire magnétique.

Br : Induction magnétique rémanente en cas aimant permanent.

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique.

\vec{n} : La normale (exprime la nullité ou la constance de la dérivée normale à la frontière).

Liste des abréviations:

MDF: La méthode des différences finies.

MVF: La méthode des volumes finis

MCC: La méthode de circuits couplés (MCC)

MIF: La méthode intégrale de frontière

MEF: La méthode des éléments finis

Liste des figures

Liste des figures

Figure 01 : Schéma de raccordement d'un parc éolien posé (en haut) et flottant (en bas) en mer (RTE 2018)	05
Figure 02 : Représentation moléculaire du polyéthylène	07
Figure 03 : Représentation moléculaire du XLPE	07
Figure 04 : construction de câble XLPE	08
Figure II.1 : Domaine d'étude	17
Figure II.2 : Problème général magnétodynamique	17
Figure III.1 : Maillage du domaine d'étude	22
Figure. III.2 : Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis	24
Figure.III.3 : COMSOL Multiphysics version 5.3	27
Figure.III.4 : Fenêtre de démarrage du logiciel	28
Figure.III.5 : option permet de définir pas à pas les modalités du problème	28
Figure.III.6 : Un modèle spatial en 2D	28
Figure.III.7 : Les dimensions de l'espace en Comsol Multiphysics	29
Figure.III.8 : les choix du modèle physique	29
Figure.III.9 : Les types d'étude	30
Figure.III.10 : Ajout de paramètres au modèle	30
Figure.III.11 : Paramètres de modèle	31
Figure.III.12 : Différents matériaux utilisés	31
Figure.III.13 : principe de code numérique COMSOL	32
Figure IV.2 : La géométrie du câble	36
Figure IV.3.1.1.a : Norme de densité de flux magnétique	36
Figure IV.3.1.1.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	36
Figure IV.3.1.1.c : Densité de courant hors plan (mf)	37
Figure IV.3.1.1.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	37
Figure IV.3.1.1.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	37
Figure IV.3.1.1.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	37
Figure IV.3.1.2.a : Norme de densité de flux magnétique	38
Figure IV.3.1.2.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	38
Figure IV.3.1.2.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	39
Figure IV.3.1.2.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	39
Figure IV.3.1.2.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	39
Figure IV.3.1.2.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	39

Figure IV.3.1.4.a : Norme de densité de flux magnétique	41
Figure IV.3.1.4.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	41
Figure IV.3.1.4.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	41
Figure IV.3.1.4.d : Densité de perte volumétrique électromagnétique	41
Figure IV.3.1.4.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	42
Figure IV.3.1.4.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	42
Figure IV.3.1.5.a : Norme de densité de flux magnétique	43
Figure IV.3.1.5.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	43
Figure IV.3.1.5.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	43
Figure IV.3.1.5.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	43
Figure IV.3.1.5.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	44
Figure IV.3.1.5.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	44
Figure IV.3.2.1.a : Norme de densité de flux magnétique	45
Figure IV.3.2.1.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	45
Figure IV.3.2.1.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	46
Figure IV.3.2.1.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	46
Figure IV.3.2.1.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	46
Figure IV.3.2.1.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	46
Figure IV.3.2.2.a : Norme de densité de flux magnétique	47
Figure IV.3.2.2.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	47
Figure IV.3.2.2.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	48
Figure IV.3.2.2.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	48
Figure IV.3.2.2.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	48
Figure IV.3.2.2.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	48
Figure IV.3.2.3.a : Norme de densité de flux magnétique	49
Figure IV.3.2.3.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	49
Figure IV.3.2.3.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	50
Figure IV.3.2.3.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	50
Figure IV.3.2.3.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	50
Figure IV.3.2.3.f : Densité de courant, composante z ($A / m ^ 3$)	50
Figure IV.3.2.4.a : Norme de densité de flux magnétique	51
Figure IV.3.2.4.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	51
Figure IV.3.2.4.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	52
Figure IV.3.2.4.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	52

Figure IV.3.2.4.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	52
Figure IV.3.2.4.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	52
Figure IV.3.3.1.a : Norme de densité de flux magnétique	54
Figure IV.3.3.1.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	54
Figure IV.3.3.1.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	54
Figure IV.3.3.1.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	54
Figure IV.3.3.1.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	55
Figure IV.3.3.1.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	55
Figure IV.3.3.2.a : Norme de densité de flux magnétique	56
Figure IV.3.3.2.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	56
Figure IV.3.3.2.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	56
Figure IV.3.3.2.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	56
Figure IV.3.3.2.e : Norme de densité de flux magnétique	57
Figure IV.3.3.2.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	57
Figure IV.3.3.3.a : Norme de densité de flux magnétique	58
Figure IV.3.3.3.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	58
Figure IV.3.3.3.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	58
Figure IV.3.3.3.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	58
Figure IV.3.3.3.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	59
Figure IV.3.3.3.f : Densité de courant, composante z ($A / m ^ 3$)	59
Figure IV.3.3.4.a : Norme de densité de flux magnétique	60
Figure IV.3.3.4.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)	60
Figure IV.3.3.4.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)	60
Figure IV.3.3.4.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique	60
Figure IV.3.3.4.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)	61
Figure IV.3.3.4.f : Densité de courant, composante z (A/m^3)	61

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau IV.2 : Les paramètres du câble	34
Tableau IV.3.1.1.a : Les pertes d'armure	37
Tableau IV.3.1.1.b : Les pertes d'écran	38
Tableau IV.3.1.1.c : Les pertes de phase	38
Tableau IV.3.1.1.d : Les résistances des phases	38
Tableau IV.3.1.1.e : Les inductances des phases	38
Tableau IV.3.1.2.a : Les pertes d'armure	39
Tableau IV.3.1.2.b : Les pertes d'écran	40
Tableau IV.3.1.2.c : Les pertes de phase	40
Tableau IV.3.1.2.d : Les résistances des phases	40
Tableau IV.3.1.2.e : Les inductances des phases	40
Tableau IV.3.1.4.a : Les pertes d'armure	42
Tableau IV.3.1.4.b : Les pertes d'écran	42
Tableau IV.3.1.4.c : Les pertes de phase	42
Tableau IV.3.1.4.d : Les résistances des phases	42
Tableau IV.3.1.4.e : Les inductances des phases	43
Tableau IV.3.1.5.a : Les pertes d'armure	44
Tableau IV.3.1.5.b : Les pertes d'écran	44
Tableau IV.3.1.5.c : Les pertes de phase	44
Tableau IV.3.1.5.d : Les résistances des phases	44
Tableau IV.3.1.5.e : Les inductances des phases	45
Tableau IV.3.2.1.a : Les pertes d'armure	46
Tableau IV.3.2.1.b : Les pertes d'écran	46
Tableau IV.3.2.1.c : Les pertes de phase	47
Tableau IV.3.2.1.d : Les résistances des phases	47
Tableau IV.3.2.1.e : Les inductances des phases	47
Tableau IV.3.2.2.a : Les pertes d'armure	48
Tableau IV.3.2.2.b : Les pertes d'écran	48
Tableau IV.3.2.2.c : Les pertes de phase	49
Tableau IV.3.2.2.d : Les résistances des phases	49
Tableau IV.3.2.2.e : Les inductances des phases	49
Tableau IV.3.2.3.a : Les pertes d'armure	50
Tableau IV.3.2.3.b : Les pertes d'écran	50

Tableau IV.3.2.3.c : les pertes de phase	51
Tableau IV.3.2.3.d : Les résistances des phases	51
Tableau IV.3.2.3.e : Les inductances des phases	51
Tableau IV.3.2.4.a : Les pertes d'armure	52
Tableau IV.3.2.4.b : Les pertes d'écran	52
Tableau IV.3.2.4.c : pertes de phase	53
Tableau IV.3.2.4.d : Les résistances des phases	53
Tableau IV.3.2.4.e : Les inductances des phases	53
Tableau IV.3.3.1.a : Les pertes d'armure	55
Tableau IV.3.3.1.b : Les pertes d'écran	55
Tableau IV.3.3.1.c : pertes de phase	55
Tableau IV.3.3.1.d : Les résistances des phases	55
Tableau IV.3.3.1.e : Les inductances des phases	55
Tableau IV.3.3.2.a : Les pertes d'armure	57
Tableau IV.3.3.2.b : Les pertes d'écran	57
Tableau IV.3.3.2.c : Les pertes de phase	57
Tableau IV.3.3.2.d : Les résistances des phases	57
Tableau IV.3.3.2.e : Les inductances des phases	57
Tableau IV.3.3.3.a : Les pertes d'armure	59
Tableau IV.3.3.3.b : Les pertes d'écran	59
Tableau IV.3.3.3.c : Les pertes de phase	59
Tableau IV.3.3.3.d : Les résistances des phases	59
Tableau IV.3.3.3.e : Les inductances des phases	59
Tableau IV.3.3.4.a : Les pertes d'armure	61
Tableau IV.3.3.4.b : Les pertes d'écran	61
Tableau IV.3.3.4.c : Les pertes de phase	61
Tableau IV.3.3.4.d : Les résistances des phases	61
Tableau IV.3.3.4.e : Les inductances des phases	61

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------	----

Chapitre I Les câbles sous-marins

I.1. Histoire	04
I.2. Introduction	04
I.3. Problèmes des câbles	05
I.4. Les câbles XLPE électriques	06
I.4.1. Qu'est que le XLPE ?	06
I.4.2. Définition de câble XLPE	07
I.4.3. Caractéristiques de câble XLPE	08
I.4.4. Les avantages des câbles XLPE	09
I.4.5. Les inconvénients des câbles XLPE	09
II.5. Le câble XLPE et la haute tension	10
I.6. Conclusion	10

Chapitre II Les phénomènes électromagnétiques

II.1. Introduction	12
II.2. Les modèles mathématiques de l'électromagnétisme	12
II.2.1. Equations générales de Maxwell	12
II.2.2. Formulation des équations électromagnétiques	13
II.2.2.1. Modèle électrostatique	13
II.2.2.2. Modèle électrocinétique	14
II.2.2.3. Modèle magnétostatique	14
II.2.2.3.1. Modèle magnétostatique scalaire	15
II.2.2.3.2. Modèle magnétostatique vectoriel	16
II.2.2.4. Modèle magnétodynamiques	16
II.4. Classification physique des E.D.P	19
II.5. Condition aux limites	19
II.5.1. Condition de type Dirichlet	19
II.5.2. Condition de type Newman	19
II.6. Conclusion	19

Chapitre III Méthodes numériques et logiciel COMSOL-Multiphysics

III. 1. Introduction	21
III.2. Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles	21

III.2.1. La méthode des différences finies (MDF)	21
III.2.2. La méthode des volumes finis(MVF)	21
III.2.3. La méthode partial de élément de Circuit complet	22
III.2.4. La méthode de circuits couplés (MCC)	22
III.2.5. La méthode intégrale de frontière (MIF)	22
III.3. La méthode des éléments finis	23
III.3.1. Introduction	23
III.3.2. Définition	23
III.3. 3. Avantage de la méthode des éléments finis	25
III.4. Logiciel COMSOL Multiphysics	26
III.4.1. Présentation de COMSOL Multiphysics	26
III.4.2. Étapes de résolution par COMSOL Multiphysics	27
III.5. Conclusion	32

Chapitre IV Simulation et resultants

IV.1. Introduction	34
IV.2. Description du problème	34
IV.3. Résultats de simulation	36
IV.3.1. Câble sous-marin avec des phases excitées par une bobine de courant	36
IV.3.1.1. Sigma de cuivre = $5.96 * 10^7$ et $f = 50$ Hz	36
IV.3.1.1.1. Les pertes électriques	36
IV.3.1.2. Sigma de cuivre = $5.96 * 10^7$ et $f = 60$ Hz	38
IV.3.1.2.1. Les pertes électriques	39
IV.3.1.3. Interprétation	40
IV.3.1.4. Sigma d'aluminium = $3.77 * 10^7$ et $f = 50$ Hz	41
IV.3.1.4.1. Les pertes électriques	42
IV.3.1.5. Sigma d'aluminium = $3.77 * 10^7$ et $f = 60$ Hz	43
IV.3.1.5.1. Les pertes électriques	44
IV.3.1.5.2. Interprétation	45
IV.3.2. Câble sous-marin avec la torsion de l'armure	45
IV.3.2.1. Sigma de cuivre = $5.96 * 10^7$ et $f = 50$ Hz	45
IV.3.2.1.1. Les pertes électriques	46
IV.3.2.2. Sigma de cuivre = $5.96 * 10^7$ et $f = 60$ Hz	47
IV.3.2.2.1. Les pertes électriques	48
IV.3.2.2.2. Interprétation	49

IV.3.2.3. Sigma d'aluminium = $3.77 * 10^7$ et $f = 50$ Hz	49
IV.3.2.3.1. Les pertes électriques	50
IV.3.2.4. Sigma d'aluminium = $3.77 * 10^7$ et $f = 60$ Hz	51
IV.3.2.4.1. Les pertes électriques	52
IV.3.2.4.2. Interprétation	53
IV.3.3. Câble sous-marin avec des Multi-tours homogénéisé dans les bobines	54
IV.3.3.1. Sigma de cuivre = $5.96 * 10^7$ et $f = 50$ Hz	54
IV.3.3.1.1. Les pertes électriques	55
IV.3.3.2. Sigma de cuivre = $5.96 * 10^7$ et $f = 60$ Hz	56
IV.3.3.2.1. Les pertes électriques	57
IV.3.3.2.2. Interprétation	58
IV.3.3.3. Sigma d'aluminium = $3.77 * 10^7$ et $f = 50$ Hz	58
IV.3.3.3.1. Les pertes électriques	59
IV.3.3.4. Sigma d'aluminium = $3.77 * 10^7$ et $f = 60$ Hz	60
IV.3.3.4.1. Les pertes électriques	61
IV.3.3.4.2. Interprétation	62
IV.4. Conclusion	62
Conclusion générale	64
Bibliographie	66

Introduction générale

Introduction générale

Les précurseurs des câbles électriques haute tension sont les câbles télégraphiques. Les premières liaisons souterraines de transmission d'énergie électrique sont des systèmes primaires peu performants, ne permettant pas d'excéder quelques dizaines de volts.

En 1879, l'invention de la presse à plomb par l'ingénieur Suisse Borel permet de mouler une gaine de plomb directement sur les conducteurs isolés aux fibres de jute et supprime en partie les problèmes d'absorption d'humidité en rendant le câble étanche.

Le polyéthylène est mis au point en 1938 en Angleterre. À partir de la seconde guerre mondiale, diverses sortes de caoutchouc synthétique et de polyéthylène sont utilisées pour l'isolation des câbles. Des câbles à 63 kV en polyéthylène basse densité ont été mis en service dans les années 1960. Le polyéthylène haut densité est utilisé 10 ans plus tard, leur température de fonctionnement peut être plus élevée.

Les polyéthylènes réticulés sont eux mis au point dans les années 1950. En outre, la première ligne haute tension à courant continu a été construite en 1954 à Gotland et a utilisé un câble électrique pour relier l'île au continent. Dans les années 1990, un câble en polyéthylène à faible densité d'une tension de 500 kV a été utilisé avec succès en France. Depuis leur fort développement dans les années 1970. Les câbles XLPE se sont imposés dans quasiment toutes les applications. Ils ont été utilisés pour la première fois de manière sous-marine en 1973.

Les câbles XLPE sont appelés à atteindre des tensions supérieures dans un futur proche, tout en étant capables de supporter les inversions de polarité des stations HVDC-LCC.

Les autres avantages du câble XLPE excellentes propriétés électriques et physiques ; capacité de transporter de grands courants ; facilité d'installation ; sans limitation de hauteur et sans entretien ; aucune gaine métallique requise ; utilisation pour éviter les risques environnementaux importants à long terme associés à des fuites fuites.

Les câbles sous-marins aussi utilisés pour acheminer l'électricité produite dans les parcs éoliens en mer (« parcs *offshore* »), ainsi que l'alimentation électrique des plateformes pétrolières. Ces câbles permettent de transporter l'énergie (courant alternatif ou continu) sous des tensions comprises entre 30 kV et plus de 400 kV ; ils comportent généralement une ou plusieurs fibres optiques permettant la transmission simultanée d'informations d'exploitation (parcs éoliens) ou de télécommunications. Les câbles récents permettent de transporter une grande quantité d'énergie.

L'étude des pertes dans ces câbles est nécessaire à la mise au point d'applications dans le domaine de l'électrotechnique. De nombreux travaux ont déjà porté sur le calcul de ces pertes. Pour pouvoir correctement dimensionner les appareillages, il est indispensable d'être en mesure

d'estimer le plus précisément possible les pertes AC dans les câbles sous-marins. La simulation numérique est un outil de choix pour arriver à cette fin, car elle permet de minimiser les coûts de développement des prototypes ainsi que leur nombre. Les outils de calcul numérique s'avèrent aussi essentiels dans la conception et l'optimisation des dispositifs électrotechniques. L'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel commercial s'est avérée être une des meilleures solutions.

Pour notre part nous avons travaillé sur les pertes en régime variable dans un câble sous-marin à haute tension.

Dans cette optique, le sujet de ce mémoire consiste à une modélisation des phénomènes magnétodynamiques dans un câble sous-marin XLPE parcouru par un courant. Nous avons retenu la méthode des éléments finis du fait de son adéquation avec le problème posé et la disponibilité d'un logiciel commercial (COMSOL Multiphysics version 5.3).

Le but de notre travail est d'étudier l'influence de l'effet inductif d'un câble sous –marin XLPE à haute tension. Dans ce contexte, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques au problème magnétodynamique étudié dans les câbles sous-marins.

Ainsi notre travail sera organisé de la manière suivante:

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les câbles sous-marins en général et les câbles XLPE en particulier, qui est le type de câble que nous avons adopté dans notre étude.
- Le deuxième chapitre sera consacré les formulations mathématiques ainsi que les différents modèles basés des équations aux dérivées partielles régissant les phénomènes électromagnétique.
- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles. On suite, nous avons donné une introduction sur logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles du problème étudié.
- Le quatrième chapitre sera consacré aux divers résultats de simulation obtenus par le logiciel COMSOL.

Enfin, une conclusion générale résumant notre travail

Chapitre I

Les câbles sous-marins

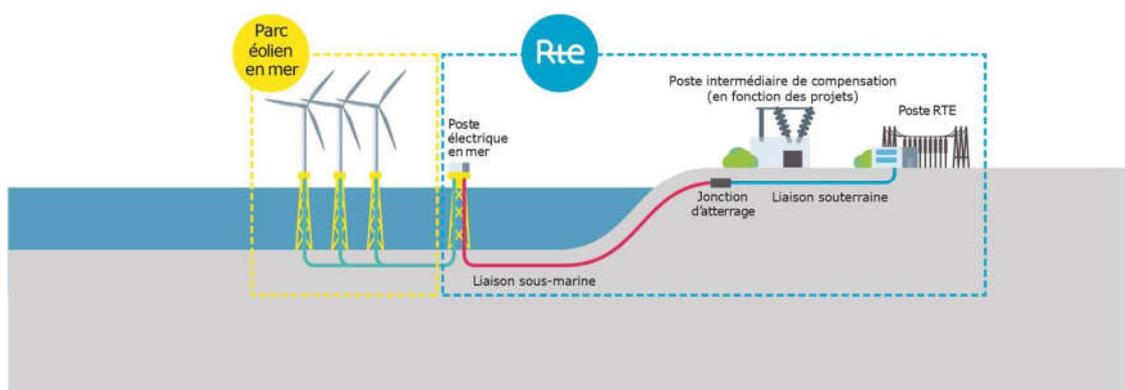
I.1. Histoire:

En 2002, il a ouvert une ligne de sous-marine haute tension en courant continu (HVDC) entre Galatina (Lecce) et Aetos (Grèce) (HVDC Italie-Grèce). Dans les années qui ont suivi deux câbles sont posés en Italie, y compris la Sardaigne et la Lazio et entre la Sicile et la Calabre, de Terna, société qui, depuis 2005, les activités de transport d'électricité sont déléguées. Ceci est la ligne électrique de 1000 MW dans le monde le plus long (SAPEI) inauguré en 2011, et la plus longue courant alternatif de ligne électrique dans le monde (Sorgente-Rizziconi), inauguré en 2016. [1]

I.2. Introduction :

Avec le développement des parcs éoliens off-shore et les nouvelles liaisons transfrontalières avec des îles anglo-saxonnes.

Les liaisons sous-marines sont souvent au cœur de projets importants. Le principe est de dérouler un câble au fond de la mer et de le mettre en souterrain, quand cela est possible pour le protéger et assurer la sécurité. Cette technique, privilégiée par RTE s'appelle l'ensouillage. Cependant la nature des fonds sous-marins peut nécessiter le recours à d'autres techniques de protection des câbles : l'enrochement ou la coquille en acier par exemple. Chaque liaison électrique sous-marine sera ensuite raccordée à un câble souterrain, qui chemine jusqu'au poste électrique de raccordement au réseau de transport, le plus proche. Cette connexion entre la partie sous-marine et terrestre s'appelle la jonction d'atterrage. Quel que soit le type de littoral, sableux ou rocheux, le câble THT est déposé sur le sol puis recouvert afin d'être protégé. [2]



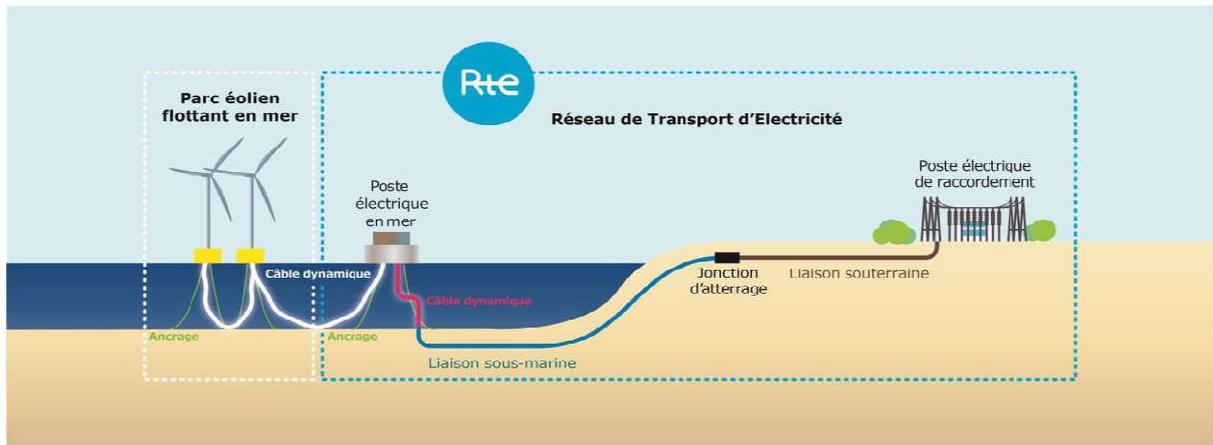


Figure 01 : Schéma de raccordement d'un parc éolien posé (en haut) et flottant (en bas) en mer (RTE 2018). [6]

Les exigences fonctionnelles d'une liaison sous-marine présentent certaines caractéristiques, notamment :

- Tenir des contraintes mécaniques importantes pendant la pose et l'exploitation,
- Garder une totale intégrité dans le temps face aux phénomènes de dégradation sous-marine (corrosion, agressions externes, houle, mouvements sédimentaires...). [2]

I.3. Problèmes des câbles:

Les principaux problèmes liés aux câbles sous-marins, ainsi que l'électricité dans la nature (atténuation et distorsion le signal) sont mécaniques dans la nature. Les câbles doivent en effet être protégés par les ancres des bateaux, des filets de pêche, mais aussi par les animaux marins qui peuvent mordre ou percer l'isolation. Pour cette raison, la partie terminale des lignes à proximité des côtes a une armure plus élevée, typiquement constitué par une ou plusieurs couches de treillis solide. La partie destinée à reposer sur le fond marin a une section transversale plus petite, mais un certain degré d'acier de blindage. [1]

Une autre question à prendre en compte lors de la conception de grands câbles de profondeur, est représenté par pression l'eau, qui augmente à environ 10 MP en nsylvanie (100 atmosphères) Par kilomètre. Le matériau isolant est comprimé en fait par ces pressions énormes, ce qui provoque la diminution de la section du câble et la modification d'impédance ligne. [1]

Selon un rapport de l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE), vous avez besoin d'étudier des alternatives au réseau de câbles sous-marins en tant que données qui alimentent la société contemporaine, y compris les transactions financières et la communication sur Internet. [1]

La sécurité de ce réseau est à risque et si quelque chose va mal, vous risquez de l'apocalypse économique. La raison est simple: dans les passer beaucoup d'informations importantes « tubes ». Le revers de leur grande capacité, donc le fait que constituent un goulot d'étranglement au risque: en Décembre 2008, le câble cassé en Méditerranée a arrêté les communications entre l'Europe, le Moyen-Orient et en Asie du Sud-Est depuis plus de 24 heures.[1]

Ils peuvent également se produire le sabotage humain lié à terrorisme et la piraterie, mais aussi des phénomènes naturels (par exemple. les catastrophes naturelles) ou accessoire. Les points de densité plus élevée sont: la détroit Luzon au sud de Taiwan, la Détroit de Malacca et mer rouge. En Janvier 2008, rupture des câbles sous-marins a des liens bloqués entre l'Europe et les États-Unis, d'une part, l'Egypte, l'Inde et d'autres pays du golfe Persique[11]. En remontant le temps, en Décembre 2006, un tremblement de terre au large de la côte sud de la Taiwan il a ralenti le trafic téléphonique et Internet dans une grande partie de l'Asie orientale. [1]

Les conséquences d'un tel événement aussi et surtout économique et traumatisant. Steve Malphrus de la Réserve fédérale des États-Unis a écrit: «Lorsque le réseau de communication chute, ne sont pas que les services financiers ralentissent à un arrêt Crumble ». Ainsi, divers hall et « think tank » Ils travaillent déjà à promouvoir ce qu'on pourrait appeler un ouvrage public méga à l'échelle planétaire. Il y a des intérêts stratégiques (qui contrôlent le réseau?) Et des intérêts économiques forts en jeu: ce qu'il en coûtera une « sauvegarde backbone globale »? [1]

I.4. Les câbles XLPE électriques:

I.4.1. Qu'est que le XLPE ?

XLPE est une désignation abrégée de «réticulépolyéthylène ». Le polyéthylène à une molécule linéaire structure comme indiqué dans A. Molécules de polyéthylène non-liés chimiquement comme indiqué en B se déforment facilement à haute température, tandis que les

molécules XLPE liées dans un réseau tridimensionnel comme montré en C et D, ont une forte résistance à la déformation même à haute Température. [3]

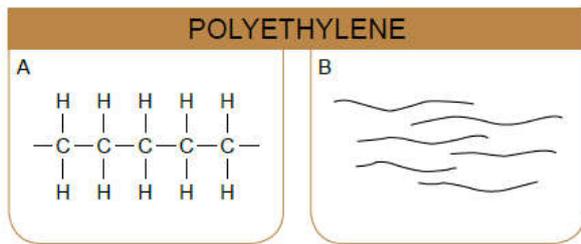


Figure 02 : Représentation moléculaire du polyéthylène [3]

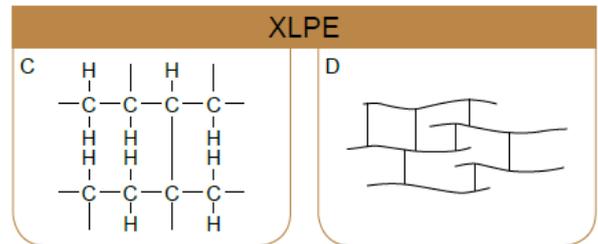


Figure 03 : Représentation moléculaire du XLPE [3]

Le polyéthylène réticulé est produit à partir de polyéthylène sous haute pression avec organique peroxydes comme additifs. L'application de Chaleur et la pression est utilisée pour effectuer la réticulation. Cette provoque la liaison des chaînes moléculaires individuelles avec une un autre qui à son tour fait changer le matériau d'un thermoplastique à un matériau élastique.[3]

Un avantage important du XLPE comme isolant Pour câbles moyenne et haute tension est leur faible diélectrique perte. Le facteur de perte diélectrique est d'environ une décimale puissance inférieure à celle des câbles isolés au papier et environ deux puissances décimales inférieures à celle du PVC isolé câbles. Étant donné que la constante diélectrique est également plus favorable, la capacité mutuelle de XLPE câbles est également plus bas, réduisant ainsi la charge courants et courants de fuite à la terre dans les réseaux sans la mise à la terre rigide en étoile. [3]

I.4.2.Définition de câble XLPE :

Un câble XLPE signifie un câble blindé conducteur en aluminium isolé par polyéthylène réticulé. Dans le câble XLPE, le conducteur en aluminium toronné est d'abord blindé sous la forme d'une extrusion semi-conductrice qui fournit une surface de conducteur lisse et empêche la formation de cavités à la surface du conducteur lorsque le câble est soumis à la flexion. Le conducteur blindé est isolé avec un composé XLPE extrudé. L'isolant est en outre tamisé avec une couche de matériau semi-conducteur non métallique et sur lequel un écran métallique non magnétique sous forme de ruban de cuivre ou d'aluminium est appliqué. Dans le cas de câbles multiconducteurs, les noyaux sont posés avec une charge appropriée dans les interstices et

enveloppés de bandes en PVC ou de PVC extrudé. Pour la protection mécanique, un blindage non magnétique en fil d'aluminium / bande / ruban pour les câbles à âme unique et un blindage en fil d'acier pour les câbles multiconducteurs sont fournis sur la gaine intérieure. une couche de PVC / PE est extrudée en tant que gaine extérieure généralement de couleur arrière pour empêcher la pénétration d'humidité. [4]



Figure 04: construction de câble XLPE. [7]

I.4.3. Caractéristiques de câble XLPE:

La caractéristique spatiale de l'isolation XLPE est que les longues chaînes moléculaires de polyéthylène sont réticulées les unes aux autres au moyen d'un processus similaire à la vulcanisation du caoutchouc et formant ainsi une structure de réseau tridimensionnelle à forte liaison. Le polyéthylène pur est un matériau thermoplastique, c'est-à-dire qu'il devient doux et plastique au chauffage et dur au refroidissement. Le polyéthylène pur est converti en XLPE thermodurcissable, c'est-à-dire qu'il durcit de manière permanente lorsqu'il est chauffé. Grâce au processus de réticulation, l'isolation en polyéthylène du câble est rendue thermiquement stable et le point de fusion est également considérablement augmenté. Le câble isolé XLPE a donc une meilleure résistivité à la déformation thermique pour sa propriété de tolérance thermique plus élevée. En raison de ses excellentes propriétés thermiques, la capacité de charge actuelle du câble XLPE est supérieure à celle du câble conventionnel. L'isolation XLPE a une rigidité diélectrique plus élevée que d'autres diélectriques conventionnels utilisés pour les câbles, ce qui entraîne une faible perte diélectrique. [4]

I.4.4. Les avantages des câbles XLPE:

- **Excellentes propriétés électriques et physiques :**

Le câble XLPE constitue le meilleur câble pour les lignes de transmission et de distribution en raison de son excellente qualité électrique et physique Propriétés.

- **Capacité de transporter de grands courants :**

L'excellente résistance à la déformation thermique et l'excellente propriété de vieillissement du câble XLPE lui permettent de transporter de grands courants dans des conditions normales (90 °C), d'urgence (130 °C) ou de court-circuit (250 °C).

- **Facilité d'installation :**

Le câble XLPE résiste à la flexion de rayon plus petit et est plus léger, permettant une installation facile et fiable. De plus, les méthodes d'épissage et de terminaison pour les câbles XLPE sont plus simples par rapport à d'autres types de câbles.

- **Sans limitation de hauteur et sans entretien :**

Le câble XLPE peut être installé n'importe où sans considération particulière du profil d'itinéraire (limitations de hauteur) car il ne contient pas d'huile et est donc exempt de défaillances dues à la migration d'huile dans les câbles remplis d'huile.

- **Aucune gaine métallique requise :**

Le câble XLPE ne nécessite généralement pas de gaine métallique. Il est ainsi exempt des défaillances propres aux gaines métalliques câble, comme la corrosion et la fatigue.[3]

I.4.5. Les inconvénients des câbles XLPE:

Parmi les inconvénients des câbles XLPE, nous citons :

- Performances d'adhérence à la chaleur. Dans le traitement de température nominale sur les fils utilisant des fils, facile à provoquer les fils entre une adhérence mutuelle, grave peut provoquer une isolation de casser la peau pour former un court-circuit.
- Une faible résistance à la chaleur. À une température supérieure à 200 °C, l'isolation des fils mous change anormalement, une collision de force externe mène facilement le fil à travers un court-circuit.
- Isolation de classe de température 150 °C XLPE, ne pas halogène et peut passer l'expérience de combustion de spécification UL1581 VW-1, et maintenir d'excellentes

propriétés mécaniques et électriques, technologie de fabrication, il y a encore quelques goulots d'étranglement, coût élevé.

- Ce type de matériau est un fil machine isolé dans l'aspect de la ligne de connexion de l'équipement électrique électronique, n'a pas été la norme nationale. [5]

II.5.Le câble XLPE et la haute tension:

Le câble XLPE est conçu pour une application haute tension et très haute tension jusqu'à 132 kV. Ce câble peut être utilisé pour de longs parcours de câbles en transmission haute tension où les pertes diélectriques jouent un rôle majeur. Ce câble peut être facilement utilisé en raison de son poids plus léger que tout autre câble haute tension. Comme il n'y a aucun cas de migration d'huile de l'isolation, il peut être installé sans aucune hésitation pour des parcours inclinés ou verticaux. L'isolation XLPE est très résistante à l'humidité pour laquelle aucune précaution particulière n'est nécessaire au moment du jointage et de la terminaison. L'assemblage d'un câble XLPE nécessite moins de temps que celui de tout autre câble conventionnel de qualité similaire. Ces câbles peuvent être utilisés en toute sécurité sur toutes les dispositions vibrantes comme les ponts. Ces câbles ont la meilleure résistance à la salinité de l'eau dans le sol, les produits chimiques, les huiles et les fours corrosifs. Ceux-ci sont exempts de risques d'incendie.

Ces câbles ne sont pas sujets aux pannes en raison des caractéristiques de vieillissement et ont une durée de vie plus longue.[4]

I.6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté, des généralités sur les câbles sous-marins en particulier les câbles XLPE en vue d'étudier leur effet inductif à haute tension. Le chapitre suivant sera consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques

Chapitre II

Les phénomènes électromagnétiques

II.1. Introduction:

La description d'un problème physique est souvent réalisée à l'aide d'un modèle mathématique c'est-à-dire sur la base d'une mise en équations. Ce modèle résulte d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Dans le cas des problèmes électromagnétique, les équations de bases décrivant les grandeurs électriques et magnétiques sont constituées par les équations de MAXWELL et des lois de comportement, la résolution directe de ce système, comprenant des équations différentielles, n'est généralement pas possible.

Ces dernières permettent de prendre en compte les caractéristiques physiques des matériaux. Une fois, le modèle mathématique obtenu, il faut être capable de l'exploiter, c'est-à-dire de calculer les différentes grandeurs physiques.

Ce chapitre est consacré à la modélisation des phénomènes électromagnétique dans un système magnétodynamique.[11]

II.2 Les modèles mathématiques de l'électromagnétisme:

Il y a un peu moins de deux cents ans, maxwell réunit les lois expérimentales trouvées par ses prédécesseurs faraday, Ampère et Gauss en les mettant en forme et en les exprimant sous forme différentielle. Ces équations mathématiques sont fondamentales, elles sont à l'origine de la théorie de la relativité restreinte et de la physique quantique. Elles constituent la base de l'électromagnétisme.

II.2.1 Equations générales de Maxwell:

Les équations de maxwell font apparaitre différentes variables d'état suivant chaque type de problème électromagnétiques, différentes formulations ou une combinaison de plusieurs d'entre elles permettent de résoudre le problème électromagnétique, Ainsi de nombreuses formulations ont déjà été développées en deux ou trois dimensions. [12]

Elles peuvent s'écrire en termes de potentiels scalaires, de potentiels vecteurs ou de champs de nature électrique ou magnétique. Ces phénomènes électromagnétiques variables dans le temps et dans l'espace sont régis par les quatre équations locales de maxwell qui s'écrivent quel que soit [12]:

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{Lois d'Ampère}) \quad (\text{II. 1})$$

$$\overrightarrow{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Lois de la conservation}) \quad (\text{II. 2})$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lois de Faraday}) \quad (\text{II. 3})$$

$$\overrightarrow{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{Théorème de Gauss}) \quad (\text{II. 4})$$

Tel que :

\vec{H} : Vecteur champ magnétique [A/m].

\vec{E} : Vecteur champ électrique [V/m].

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T].

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m²]

ρ : Densité volumique de la charge électrique [C/m³]

\vec{j} : Densité de courant (A/m²)

II.2.2 Formulation des équations électromagnétiques:

Les équations de propagation électromagnétiques, peuvent être formulées de différentes manières suivant les hypothèses auxquelles elles sont soumises, et ne sont par conséquent pas strictement équivalentes en termes d'approximation. On distingue en générale les formulations[12].

Intégrale et différentielle des équations de maxwell exprimées dans le domaine temporel ou spectral à chacune de ces représentations correspondent une technique particulière de résolution [13].

On retiendra malgré tout, que plus qu'un problème de terminologie auquel tout cela peut se ramener, l'idée directrice est de résoudre les valeurs de champs électromagnétiques en temps et en espace.

II.2.2.1 Modèle électrostatique :

Concernent tous les dispositifs stationnaires ou le domaine étudié est constitué de matériaux conducteurs et les grandeurs électriques sont indépendantes du temps. [10]

Il décrit tous les dispositifs dans lequel le champ électrique \vec{E} est produit par des charges qui ne varient pas dans le temps (régime stationnaire). Ce modèle est régi par les équations suivantes:

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = 0 ; \text{Car } \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\text{div}\vec{D} = \rho$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} ; \epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r ;$$

ϵ : Permittivité diélectrique [F/m]

La relation : $\overrightarrow{rot}\vec{E} = 0$ permet de définir une fonction auxiliaire U appelée potentiel scalaire électrique, tel que : $\vec{E} = -\overrightarrow{grad} U$

Ce modèle se ramène alors à l'équation suivante:

$$\text{div}(\epsilon \overrightarrow{grad} U) = 0$$

U: est le potentiel électrique scalaire du champ électromagnétique

Remarque:

La source du champ électrostatique est constituée par des charges fixes dans le référentiel d'étude. [12]

II.2.2.2 Modèle électrocinétique:

Ce modèle est utilisable lorsque l'on veut étudier la répartition du courant électrique de conduction dans des câbles isolés soumis à des différences de potentiel continues [15]. Il est régi par les équations :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = 0$$

$$Div \vec{J} = 0$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} ;$$

: conductivité électrique [S/m]

La relation: $\overrightarrow{rot} \vec{E} = 0$; implique qu'il existe encore un potentiel électrique scalaire U (tension électrique), tel que :

Le modèle se ramène alors à :

$$div(\sigma \overrightarrow{grad} U) = 0$$

$$div(-\sigma(\overrightarrow{grad}) \vec{V}) = 0 \quad (II.18)$$

V : Reluctivité magnétique [m/ H] [15]

La résolution numérique de ce genre d'équations est bien maîtrisée ; cela est dû particulièrement à la simplicité de la détermination des conditions aux limites.[11]

II.2.2.3 Modèle magnétostatique:

Lorsque les paramètres des dispositifs sont stationnaires dans l'espace et invariants dans le temps, nous avons affaire à un modèle magnétostatique.

Deux types de formulations sont à considérer : le modèle scalaire et le modèle vectoriel.

Dans ce modèle, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ de l'équation (II.3) est nul, les champs électrique et magnétique découplés. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps.

Dans le cas de ce modèle, deux sortes de formes, peuvent l'exprimer. Il s'agit de :

Remarquons ici que :

La relation $\vec{B} = \mu \vec{H}$ ne comporte pas le terme $\overrightarrow{B}r = 0$ puisqu'il n'existe pas d'aimant dans notre dispositif ; [10]

La relation $div(\vec{B} = 0)$ permet et de définir un potentiel vecteur magnétique \vec{A} telque

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}\vec{A}$$

\vec{B} : Induction magnétique rémanente rémanent en cas aimant permanent

Pour analyse en 2D, \vec{A} ne comporte d'une seule composantes(\vec{Az}), et (\vec{J}) comporte la

$\vec{B} = \mu \vec{H}$ Composante (\vec{Jz}) . Les deux entités peuvent être considérées comme scalaires ce qui simplifie le problème. [10]

A partir de $\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{J}$ et $\vec{B} = \mu\vec{H}$ nous aurons :

$$\overrightarrow{rot}\left(\frac{1}{\mu}\right) = J$$

$\mu_0 : 4\pi 10^{-7}$;

μ_r : Perméabilité relative du matériau

μ_0 : Perméabilité du vide

En 2D, $div\vec{A} = 0$ est implicitement vérifie

En 3D, on consiste la formulation de potentiel scalaire magnétique. Le champ magnétique contient trois composantes : $\vec{H} = (\vec{Hp}) + (\vec{Hc}) + div\vec{\Phi}$

Ou Φ est le potentiel scalaire magnétique, (\vec{Hp}) est une solution particulière obtenue en imposant des conditions aux limites données, et (\vec{Hc}) est le champ magnétique du à aimant permanent s'il existe dans le dispositif (il est nul dans notre cas). [10]

II.2.2.3.1 Modèle magnétostatique scalaire :

Dans ce modèle, on suppose que les courants électriques soient nuls dans la pièce à étudier, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps [15]. D'après les équations (II.1) et (II.2), on obtient :

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = 0 \text{ Car le Courants nuls}$$

$$Div\vec{D} = 0 \text{ Car le Induction conservative (conservation du champ)}$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié, ou bien par l'effet d'aimants permanents pour lesquels on a la loi du milieu [12]

\vec{H} Dérive d'un potentiel scalaire magnétique Φ , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que :

$$\vec{H} = -\overrightarrow{grad}\Phi$$

: est le potentiel scalaire magnétique ; $\Phi = B \cdot S$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} \Phi) = \operatorname{div} \vec{B}_{re}$$

II.2.2.3.2 Modèle magnétostatique vectoriel:

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps le terme $\frac{d\vec{B}}{dt}$ est alors nul et les champs électriques et magnétique B sont découplés, par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls [15]

Ce modèle est très répandue surtout dans les logiciels commercialisés et comme application aux machines statique tournantes.

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Il vient alors que :

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned}$$

Avec la loi du milieu :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_{re} ;$$

B_{re} : induction magnétique rémanente en cas aimant permanent

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

La relation $\operatorname{div} \vec{B} = 0$, permet de définir une fonction vectoriel appelée potentiel vecteur magnétique, tel que [15] :

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} ; \quad \vec{A} : \text{Un potentiel vecteur magnétique}$$

D'où le système d'équations :

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} \right) = \vec{j} + \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \vec{B}_{re} \right)$$

II.2.2.4 Modèle magnétodynamiques:

La magnétodynamique consiste en l'étude des phénomènes magnétiques et électriques en régime dynamique, en négligeant toutefois les courants de déplacement $\frac{d\vec{B}}{dt}$ c'est-à-dire sous l'hypothèse de l'électrotechnique. Les champs électromagnétiques sont alors variables, soit par variation de courants d'excitation, soit par mouvement d'une partie de la géométrie.

Les problèmes liés au calcul des courants induit peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du matériau conducteur C et d'une source de courant J_s variable dans le

temps (Figure II.1). Ces trois objets forment le domaine de calcul de frontière Γ . Il s'agit de calculer sous l'excitation du courant J_s la distribution du champ magnétique en tout point du domaine d'étude Ω et de la densité de courant J dans le domaine câble C [11]

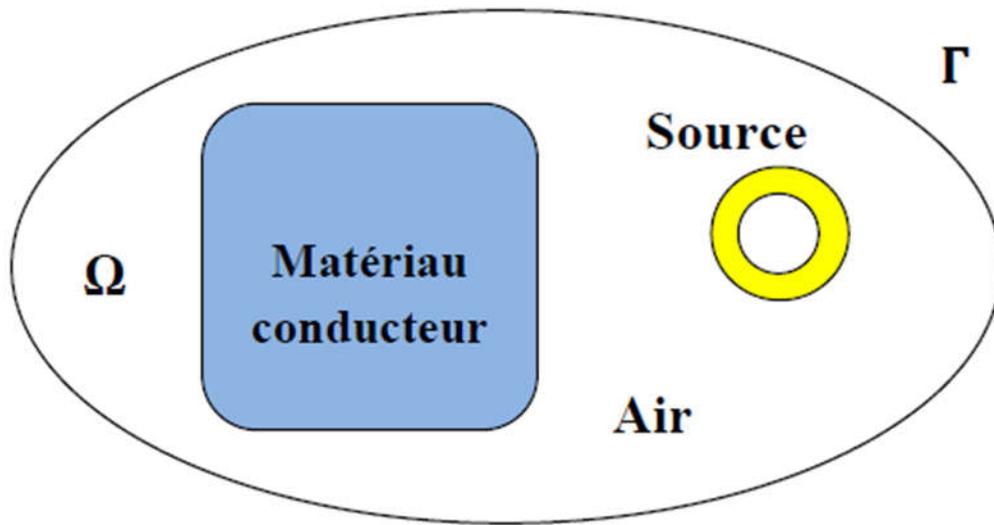


Figure II.1 : Domaine d'étude. [11]

Et Typiquement de autre part, un problème magnétodynamique est composé des parties suivantes (Figure II.2):

- Des inducteurs dans lesquelles circulent de courants variables en fonction du temps et dans lesquelles aucun courant de Foucault n'est supposé se développer.
- Des régions composées des matériaux magnétiques saturables ou non saturables qui sont supposées isolantes.
- Des conducteurs où peuvent circuler des courants induits une boîte d'air englobant.

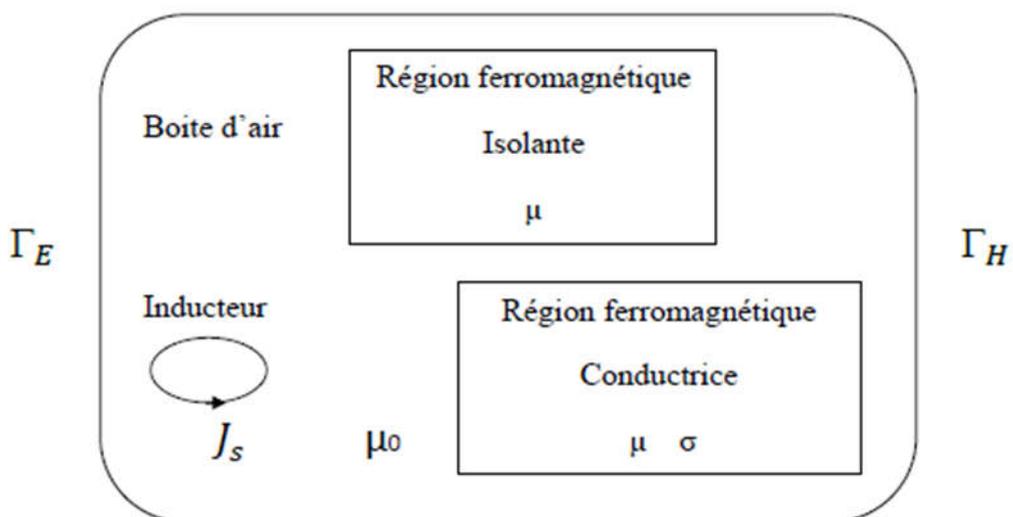


Figure II.2 : Problème général magnétodynamique [11]

Pour l'étude des dispositifs à paramètres magnétiques dépendants du temps et prouvent être sujet à un mouvement. [10]

Alors, ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps. C'est à dire que le terme qui représente la variation temporelle de vecteur d'induction magnétique est non nul, ainsi, les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants de Foucault. [11]

Ecrivons les deux équations de Maxwell qui se présentent sans terme source :

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

$$(\overrightarrow{\text{rot}})\vec{E} = \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right)$$

La deuxième équation indique qu'est un champ de rotationnel. Ceci implique qu'il existe un

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \text{ (II.8)}$$

Le potentiel vecteur joue un rôle primordiale, où la connaissance de implique la connaissance de tous les autres grandeurs physiques.

Nous avons alors :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Sachant que $\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}$, On obtient donc :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = -\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{\text{rot}} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0}$$

Ceci nous permet de constater que le champ $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est un champ conservatif, il vient alors que

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad } U$$

soit :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } U \quad \text{(II.9)}$$

U est le potentiel électrique scalaire du champ électromagnétique ; on remarque qu'en régime variable, l'expression de dépend à la fois de U [11] .

A partir de l'équation (II.2) et de l'équation (II.7) nous avons :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu}\vec{B}\right) = \vec{J}$$

A partir des équations (II.3), (II.8), et de l'équation (II.9), nous avons :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu}\text{rot}\vec{A} + \rho \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \text{grad}U - \frac{\partial D}{\partial t} - \rho (\vartheta \wedge \text{rot}\vec{A})\right) = \vec{J}_{exc} \quad (\text{II. 10})$$

II.4 Classification physique des E.D.P :

Des nombreux phénomènes physiques se rangent dans l'une des classes suivantes :

- Les problèmes d'équilibre étudient l'état stationnaire d'un phénomène (champ, chaleur, etc ...) dans un domaine borné ou non, il gouvernés par des E.D.P elliptique
- Les problèmes de valeurs propres sont en générale des extensions des problèmes d'équilibre dans lequel les valeurs critiques de certains paramètres doivent être déterminées. C'est le cas par exemple de la résonance des circuits électriques.
- Les problèmes d'évolution étudient l'évolution avec le temps d'un phénomène (champ, chaleur, vibration, etc ...) à partir d'un état initial. [28]

II.5. Condition aux limites:

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites :

II.5.1 Condition de type Dirichlet :

La fonction inconnue doit être spécifiée sur les limites :

$$\vec{A} = 0 \text{ (Condition de Dirichlet homogène)}$$

$$\vec{A} \neq 0 \text{ (Condition de Dirichlet non homogène)}$$

II.5.2 Condition de type Newman :

Elle exprime la variation de la fonction inconnue à une surface :

$$\frac{(\partial \vec{A})}{\partial t} = 0 \text{ (Condition de Newman homogène)}$$

$$\frac{(\partial \vec{A})}{\partial t} \neq 0 \text{ (Condition de Newman non homogène)}$$

\vec{n} : est la normale (exprime la nullité ou la constance de la dérivée normale à la frontière [12])

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté, les formulations mathématiques ainsi que les différents modèles basés des équations aux dérivées partielles [28]. Régissant les phénomènes électromagnétiques [13].

La résolution des équations électromagnétiques par la méthode des éléments finis on utilisant le logiciel COMSOL-Multiphysics sera l'objet du prochain chapitre. [12]

Chapitre III

Méthodes numériques
et logiciel COMSOL-
Multiphysics

III. 1. Introduction:

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution du système d'équations aux dérivées partielles 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 de champs électromagnétique et les pertes.[29]

Dans ce contexte, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques au problème magnétodynamique dans un câble sous-marin. [15]

III.2. Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles :

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques caractérisant les problèmes physiques, lorsqu'il s'agit de calculer des effets dont les causes (densité du courant (tension), densité de la puissance dissipée) sont connues à l'avance. Ces méthodes sont : [28]

- Les méthodes analytiques,
- Les méthodes numériques

Ces méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différenciant points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation. Parmi ces méthodes, nous citons la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, la méthode des intégrales de frontières et la méthode des circuits couplés,...etc. [31]

III.2.1. La méthode des différences finies (MDF) :

La MDF consiste à transformer par un développement en série de Taylor l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences [21]. Elle très attrayante par sa simplicité quand il s'agit des problèmes à géométrie régulière. Par contre, elle est très difficile à généraliser aux problèmes géométries complexe et des conditions aux limites quelconques. De nos jours elle est remplacée par la méthode des éléments finis dans presque toutes les applications en Ingénierie. [20]

III.2.2. La méthode des volumes finis(MVF) :

La méthode des volumes finis peut être vue comme étant une variante de la méthode de collocation par sous – domaines. Le domaine l'étude (Ω) est divisé en un nombre d'éléments.

Chaque élément contient quatre nœuds du maillage. Un volume fini entoure chaque nœud du maillage. L'équation aux dérivées partielles (EDP) est intégrée dans chacun des volumes élémentaires. Par calculer l'intégrale sur ces volumes élémentaires, la fonction inconnue présentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs.[21]

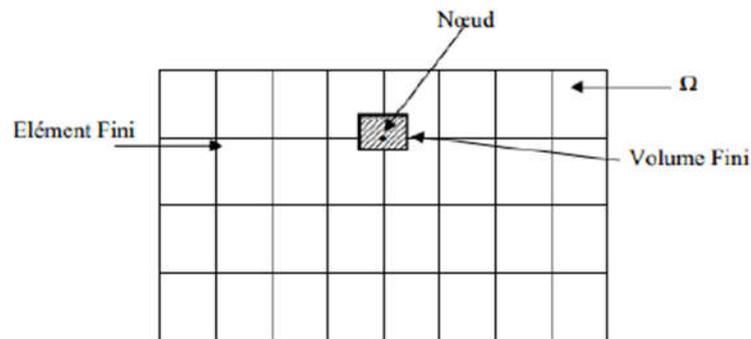


Figure III.1 : Maillage du domaine d'étude.[28]

III.2.3. La méthode partial d'élément de Circuit complet:

La méthode basée sur la formulation intégrale des équations de Maxwell est proche de la méthode des moments, a été développée par Ruehli dans des années 1970 (Ruehli, 1974). Le principe de cette méthode consiste à diviser un conducteur massif parcouru par un courant non uniforme en un assemblage de brins conducteurs suffisamment fins pour que le courant de chacun puisse être considéré comme uniformément reparté sur sa section.[22]

III.2.4. La méthode de circuits couplés (MCC) :

La MCC permet de fournir la solution d'une EDP par une expression intégrale du type loi de BIOT et SAVARD. Dans ce cas, on associe à la forme intégrale de la solution, une subdivision de l'inducteur en spires élémentaires. En appliquant les lois de KIRCHOFF à ces circuits élémentaires, on aboutit à un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des densités du courant. La MCC peut être couplée à une méthode numérique de discrétisation type MEF ou MDF de la charge.[27]

III.2.5. La méthode intégrale de frontière (MIF)

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. Ainsi, le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème d'Ostrogorski- Green. Cette méthode peut être intéressante pour l'étude de structure

tridimensionnelle ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. Cependant, cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système algébrique à matrice pleine (pas de termes nuls). Ceci augmente le temps utilisateur, donc le coût de calcul. [19] Lorsque la (MIF) est couplée à la (MEF) qui discrétise les régions actives, la méthode mixte se révèle efficace pour la modélisation des problèmes électromagnétiques. [27].

III.3.La méthode des éléments finis:

III.3.1.Introduction:

Historiquement les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1940-1960. [chapire3houssem]. En 1970, Silvester et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés à l'adaptation de cette méthode de résolution des problèmes elliptiques à l'Electrotechnique. La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques.

De plus, un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques. La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées.

En analyse numérique la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustique, etc). En mathématique, il s'agit de remplacer un problème compliqué pour lequel a priori on ne connaît pas solution par un problème plus simple que l'on sait résoudre [27].

Donc la méthode des éléments finis est une technique récente à caractère pluridisciplinaire, car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base : la mécanique des structures, l'analyse numérique et l'informatique appliquée. [26]

III.3.2.Définition:

C'est une méthode d'approximation par sous domaines, donc avant toute application il faut diviser le domaine à étudier en éléments chaque élément est défini géométriquement par un

nombre de nœuds bien déterminer qui constituent en général ses sommets. Donc La méthode des éléments finis est plus générale car elle est mieux adaptée aux géométries complexes et aux matériaux non linéaires. La méthode de résolution par éléments finis permet de calculer des grandeurs physiques pour tous les points d'une structure donnée. Pour obtenir un résultat sur un domaine continu, il est nécessaire de discrétiser le volume ou la surface d'étude par un maillage, en la subdivisant en sous éléments : les éléments finis. Tous ces éléments sont interconnectés entre eux par des points particuliers appelés des nœuds.

Les solutions sont calculées uniquement pour chaque nœud, et l'approximation de la solution finale est interpolée dans chaque élément en partant des résultats obtenus pour les nœuds les délimitant. On ramène ainsi le problème d'un milieu continu à un ensemble de problèmes discrets contenant un nombre fini d'inconnues, elle permet ainsi de transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques. Le problème est alors exprimé sous forme matriciel [karadaal]. A l'une ou à l'autre des deux méthodes, on associe une subdivision du domaine d'étude, en éléments simples, appelés éléments finis, comme il est indiqué sur la figure (III.2), et à approximer la fonction inconnue sur chaque élément par des fonctions d'interpolation sont interconnectés entre eux par des points particuliers appelés des nœuds.

Les solutions sont calculées uniquement pour chaque nœud, et l'approximation de la solution finale est interpolée dans chaque élément en partant des résultats obtenus pour les nœuds les délimitant. On ramène ainsi le problème d'un milieu continu à un ensemble de problèmes discrets contenant un nombre fini d'inconnues, elle permet ainsi de transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques. Le problème est alors exprimé sous forme matriciel [10].

A l'une ou à l'autre des deux méthodes, on associe une subdivision du domaine d'étude, en éléments simples, appelés éléments finis, comme il est indiqué sur la figure (III.2), et à approximer la fonction inconnue sur chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de degré un, ou deux [19]

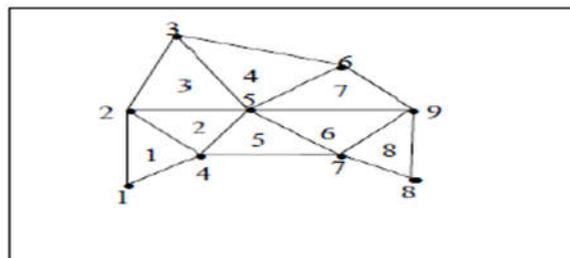


Figure. III.2 : Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis [19]

Cette méthode est constitué de : [19]

1-la méthode des résidus pondérés,

2-la méthode variationnelle.

Les différentes formulations de la méthode des éléments finis:

Formulation en déplacement : c'est une formulation selon lesquelles l'approximation est faite sur le champ de déplacements de façon l'intégrabilité du champ de déformations soit assurée à l'intérieur de élément. L'élément est « cinétiquement admissible ».

Formulation hybride : c'est une formulation, le plus souvent on définit la solution en termes d'approximation, d'un part du champ de contraintes interne en équilibre, d'autre part de déplacement sur la frontière d'élément

Formulation équilibre : c'est une formulation lesquelles d'approximations se fait de champ de tension de façon aux les équations l'équilibre soit satisfait à intérieurs de chaque élément.

Formulation mixte : dans celle-ci, on définit la solution en termes d'approximation de deux ou plusieurs champs indépendants, généralement, le champ des déplacements et celui des contraintes, tendues à tout élément ; en générale cette formulation conserve les paramètres inconnus de tout le champ comme DDL ; sa mise au point peut être longue et couteuse ; elle peut toutefois être d'excellente qualité.

Formulation en déformations : c'est une formulation les quelles d'approximations se fait de champ de déformations de façon telle que les équations de compatibilité et équilibre soient satisfaites à l'intérieur de élément. Le champ de déplacement est déduit du champ de déformations qui est continu et différentiable. Ce modèle est sur compatible [11]

Parmi les Logiciels utilisant éléments finis on peut citer :

- ABAQUS
- ANSYS
- CAST3M
- ASTER
- COMSOL-MULTIPHYSICS
- Cosmos Works
- Dytran
- Euro Plexus
- Flux2D/ 3D

III.3.3.Avantage de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis offre plusieurs avantages :

- On peut représenter un grand nombre de formes de structures à l'aide du modèle analytique générale commun
- On peut accepter des lois complexes de propriétés intrinsèques des matériaux si on compare aux possibilités des méthodes classiques de résolution, offrent plus vestes perspectives en analyse non linéaire.
- La faculté de définir des maillages très irréguliers et depuis l'origine est l'un des grands avantages de la méthode des éléments finis [24]
- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues [25]
- La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui pour résoudre effectivement ces méthodes très générales qui applique à la majorité des problèmes rencontrés dans les pratiques :
- Problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaire ou non linéaire, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.[25]

Les Inconvénients de la méthode des éléments finis sont :

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude. [25]

III.4. Logiciel COMSOL Multiphysics :

III.4.1.Présentation de COMSOL Multiphysics:

COMSOL-Multiphysics, anciennement appelé FEMLab, est un logiciel de simulation qui permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles partielles en utilisant la méthode des éléments finis en une, deux et trois dimensions. Il peut relever les défis du domaine de l'électromagnétisme, l'élasticité dynamique des fluides et la dynamique des gaz. COMSOL Multiphysics permet également de résoudre le problème comme une formulation mathématique (sous la forme d'équations) et physiques (le choix des modèles physiques, tels que les processus de diffusion). Dans le mode dit physique, on peut aussi utiliser les équations prédéfinies pour la majorité des phénomènes qui ont lieu dans les sciences et la technologie, tels que le transfert de chaleur et d'électricité, la théorie de l'élasticité, la propagation des ondes de diffusion, l'écoulement du fluide... [14]

Dans notre travail nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics version 5.3a elle se distingue, entre autres, par le support généralisé pour les fichiers de géométrie au format Para-

solide, une nouvelle interface bidirectionnelle et des moteurs de calcul plus rapides par rapport aux versions précédentes. L'exécution des modèles d'écoulement de grande taille dans Multiphysics 5.3 est par exemple trois fois plus rapide que dans la version précédente et les simulations temporelles sont jusqu'à quatre fois plus rapides avec le nouveau solveur temporel. On trouve également désormais un meilleur plus avancé. De front qui assure la création de maillages 2D et 3D de qualité...



Figure.III.3: COMSOL Multiphysics version 5.3 [29]

III.4.2. Étapes de résolution par COMSOL Multiphysics:

- **L'interface graphique de COMSOL :**

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui que permettra de spécifier le ou les modèles physique qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables propres à ce modèle. (Figure.III.4) [29]

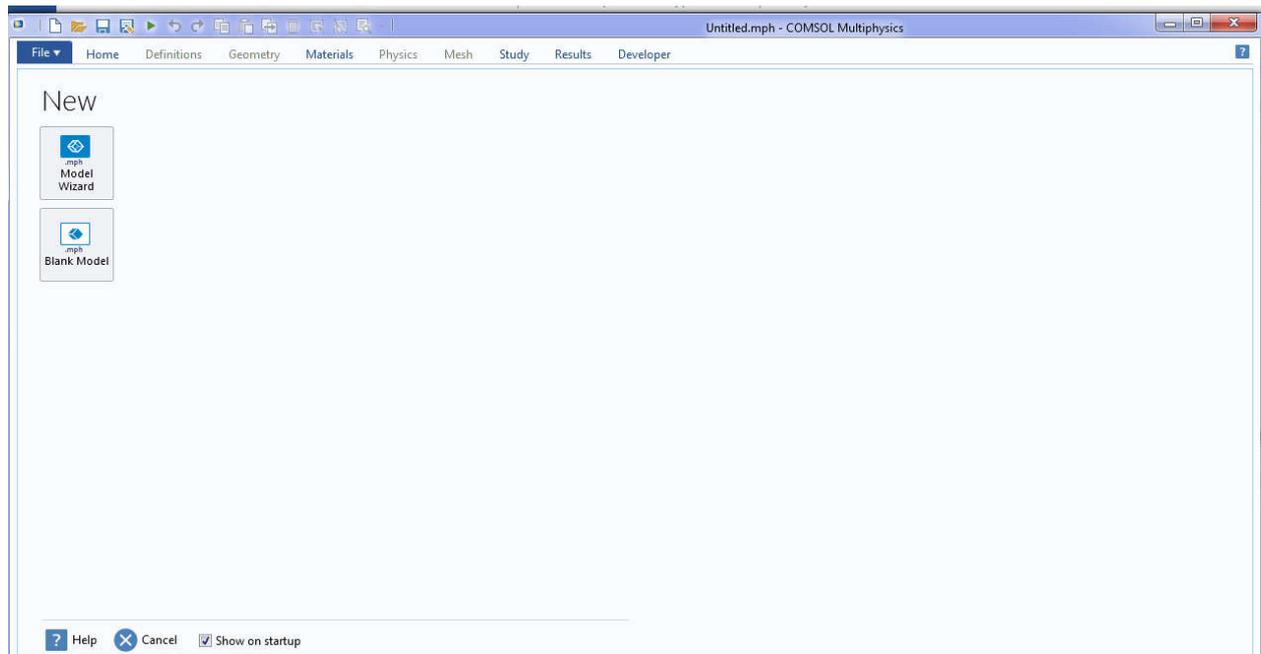


Figure.III.4: Fenêtre de démarrage du logiciel [29]

- **Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, sélectionnez Model Wizard.** Cette option permet de définir pas à pas les modalités du problème [19]

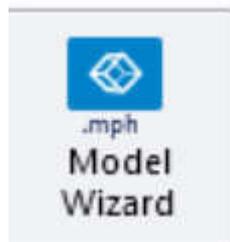


Figure.III.5: option permet de définir pas à pas les modalités du problème [19]

- **Choisissez ensuite un modèle spatial en 2D [19]**

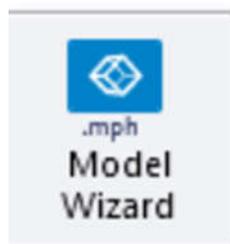


Figure.III.6: Un modèle spatial en 2D. [19]

- **Choix du modèle :**

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module magnétodynamique dans le navigateur de modèle. Nous étudions un problème en 2D [19]

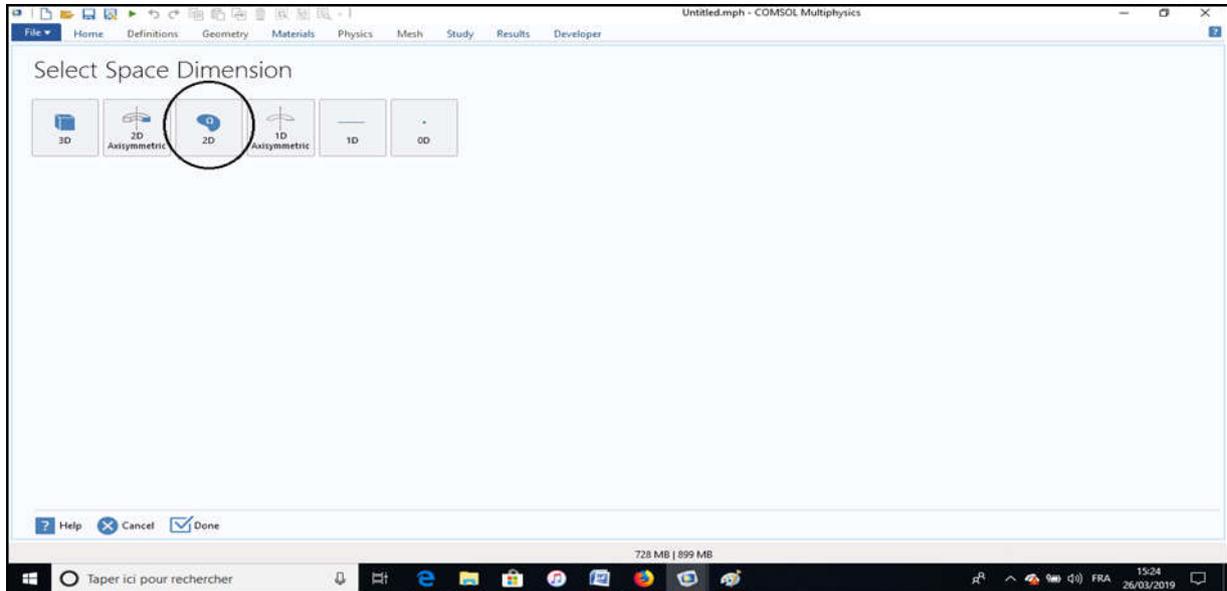


Figure.III.7 : Les dimensions de l'espace en Comsol Multiphysics [29]

- **Choix du modèle physique :**

Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle *magnétique Field (mf)* dans la catégorie *AC\DC*. Cliquez sur *Add* puis sur « *Study* »

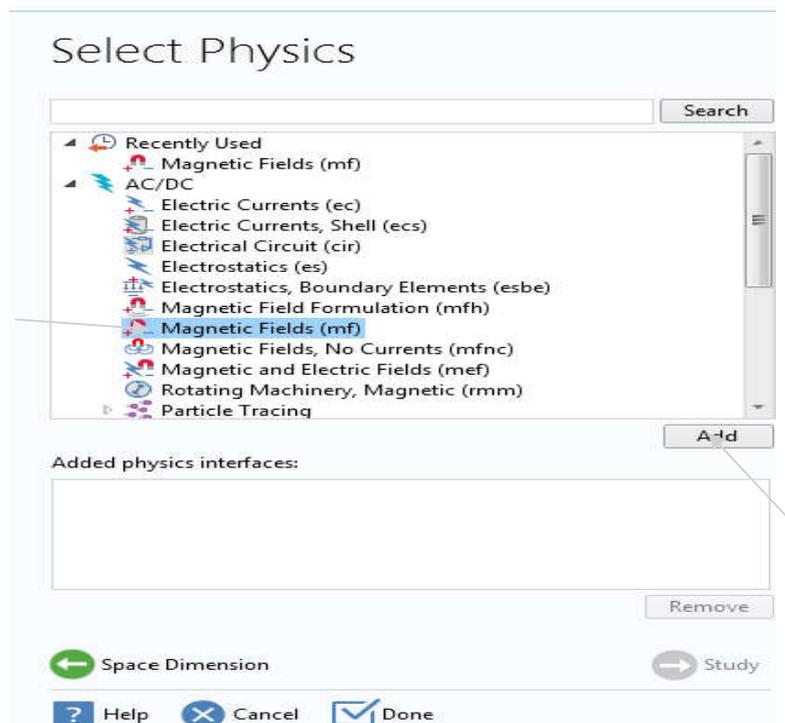


Figure.III.8 : les choix du modèle physique [29]

- **Le type d'étude :**

Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous « *Preset Studies* », choisissez le cas d'étude en régime permanent (*frequency Domaine*), puis cliquez sur « *Done* » [19]

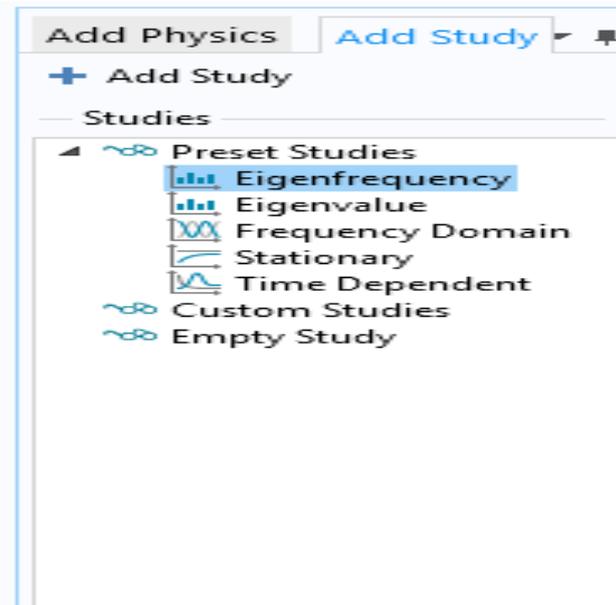


Figure.III.9 : Les types d'étude [29]

- **Définition des paramètres globaux et création de la géométrie :**

Dans le Modèle « *Builder* », faites apparaître le menu contextuel (clic droit de la source) de *Global Définitions* et cliquez sur *Paramètres* lorsque vous définissez une nouvelle variable, il est possible et fortement conseillé de lui associer une unité doit être mise entre crochets.

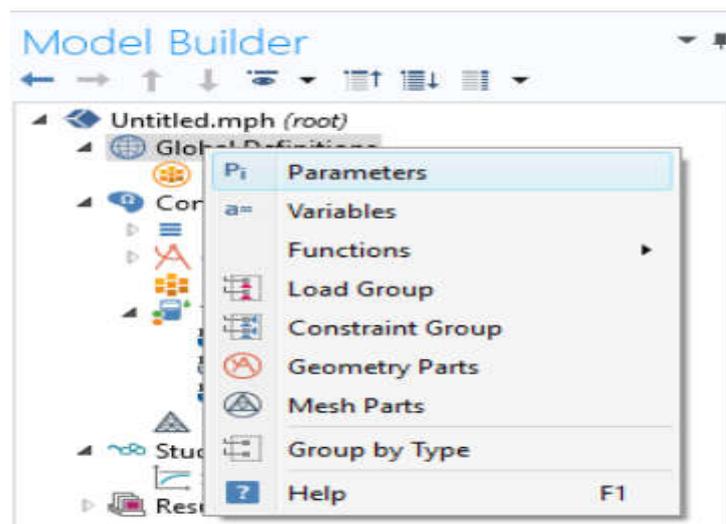


Figure.III.10 : Ajout de paramètres au modèle. [19]

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
Dpha	89.2[mm]	0.0892 m	Diameter over phase (Ph...
Dfic	2.5[mm]	0.0025 m	Diameter of fiber optic c...
Tfih	0.5[mm]	5E-4 m	Steel helix thickness (Fiber)
Dfib	9.2[mm]	0.0092 m	Diameter over fiber optic...
Tarm	6.5[mm]	0.0065 m	Aarmor thickness (Cable)
Narm	$\text{floor}(\pi*(D_{cab}/2+D_{pha}*(1/\text{sq}...$	92	Number of armor wires (...)
Dcab	219.0[mm]	0.219 m	Outer diameter of cable (...)
mfil	0.5[mm]	5E-4 m	Filler margin (Cable)
marm	0.25[mm]	2.5E-4 m	Aarmor margin (Cable)
Acon	500[mm^2]	5E-4 m ²	Cross section of conduct...
Ncon	$A_{con}/(\pi*(D_{con}/2)^2)$	0.92742	Conductor packing densi...
Apbs	$\pi*(D_{ins}+T_{pbs})*T_{pbs}$	7.334E-4 m ²	Cross section of lead she...
Lsec1	1/3	0.33333	Relative length x-bnd sec...
Lsec2	1-Lsec1-Lsec3	0.33333	Relative length x-bnd sec...
Lsec3	1/3	0.33333	Relative length x-bnd sec...
Lcab	10[km]	10000 m	Total length of cable (Ca...
Scab	1e5	1E5	Geometry scale factor (C...
f0	50[Hz]	50 Hz	Operating frequency
V0	220[kV]/sqrt(3)	1.2702E5 V	Phase to ground voltage...
I0	655[A]*sqrt(2)	926.31 A	Rated current (Amplitude)
Scon	5.96e7[S/m]	5.96E7 S/m	Conductor conductivity,...
Spbs	4.55e6[S/m]	4.55E6 S/m	Lead sheath conductivity...
Rcon	1/Acon/Scon	3.3557E-5 Ω/m	Conductor DC resistance...
Rpbs	1/Apbs/Spbs	2.9967E-4 Ω/m	Lead DC resistance per p...
Exlpe	2.5	2.5	XLPE relative permittivity,...
Cpha	$2*\pi*\epsilon_{0_const}*Exlpe/Io...$	1.3897E-10 F/m	Capacitance per phase (A...

Figure.III.11: Paramètres de modèle [19]

- **Affectation des propriétés du matériau :**

Pour ajouter le matériau, cliquer droit sur le sous-menu *Matériel dispensable* dans *Component 1*. Sélectionnez *Add Matériel*, une nouvelle fenêtre apparaît à droite pour choisir parmi une liste de matériaux

Material Overview	
Material	Selection
Air (mat1)	Domains 3, 5, 8–9, 12–13, 16–17, 20–21, 24–25, 2...
Sandy soil, saturated (mat2)	Domains 1, 219
Water, liquid (mat3)	Domain 2
Polyethylene (mat4)	Domains 220–221
Polypropylene (mat5)	Domains 44–45, 52, 55, 222, 240, 243–244
Semi-conductive compound (mat6)	Domains 68–71, 80–81, 90–95, 104–105, 114–115...
Cross-linked polyethylene (XLPE) (mat7)	Domains 232–233, 248
Silica glass (mat8)	Domain 227
Copper (mat9)	Domains 235–236, 253
Pb - Lead (mat10)	Domains 230–231, 247
High-strength alloy steel (mat11)	Domains 4, 6–7, 10–11, 14–15, 18–19, 22–23, 26–...

Figure.III.12: Différents matériaux utilisés [19]

- **Maillage :**

Cliquez sur *Mesh* et choisissez comme taille de maillage *Finer*, laissez le maillage défini en tant que *Physicscontrolled mesh*. Cliquez sur *Build All*.

- **Simulation et traitement des résultats la simulation :**

Pour effectuer la simulation cliquez sur *Study* dans le *Model Builder* puis sur. COMSOL se chargera de choisir les paramètres du solveur en fonction des modèles physiques choisis. Si vous désirez changer les paramètres de solveur, ces derniers sont accessibles à partir de l'anglet *study*, mais cela n'est pas nécessaire dans le cadre de ce tutoriel [19]

Donc généralement les étapes de résolution par COMSOL Multiphysics dans la figure III.13 Pour chaque modéliser les modèles.

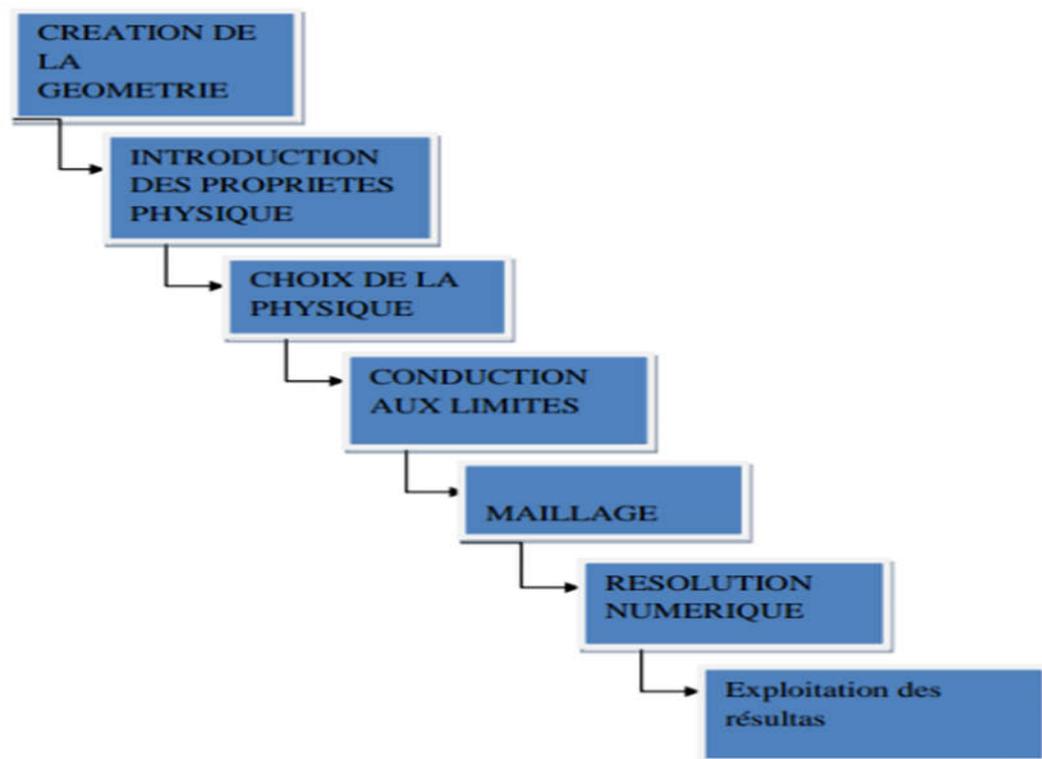


Figure.III.13 : principe de code numérique COMSOL [17]

III.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de résolution les équations aux dérivées partielles. On suite, nous donnons une introduction sur logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles du problème étudié. Par ailleurs, le prochain chapitre sera consacré, à la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans un câble sous-marin à haute tension dont l'objectif d'étudier l'effet inductif dans ce câble. Les résultats de simulation obtenus par le logiciel COMSOL Multiphysics seront largement présentés.

Chapitre IV

Simulation et résultats

IV.1 Introduction :

Ce chapitre a pour objectif de modéliser le comportement électromagnétique d'un câble sous-marin XLPE. Les résultats de simulations à caractère électrique et magnétique seront largement présentés. Ces résultats sont obtenus à partir du logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristique au problème traiter. Dans ce contexte, nous avons proposé trois applications pour modéliser le câble sous-marin. La première avec des phases excitées par une bobine de courant, Pour tenter de réduire les pertes, l'effet de la torsion de l'armure est inclus dans le modèle du câble au moyen d'un groupe de bobine concernant la deuxième application. Dans la troisième application, les caractéristiques de bobine de courant sont réglées sur multi tours homogénéisé pour exciter les phases.

IV.2 Description du problème:

Le problème que nous allons étudier consiste à la résolution des équations du modèle magnétodynamique dans un câble sous-marin XLPE. Les paramètres de ce câble sont donnés dans le tableau IV.1 et la géométrie est illustrée dans la figure IV.1.

Nom	Expression	Valeur	Description
Dcon	26.2[mm]	0.0262 m	Diamètre du conducteur (phase)
Tins	24.0[mm]	0.024 m	Épaisseur d'isolation (phase)
Dins	77.6[mm]	0.0776 m	Diamètre sur isolation (phase)
Tscc	$(Dins/2-Dcon/2-Tins)/2$	8.5^E-4 m	Épaisseur du composé semi-conducteur (phase)
Tpbs	2.9[mm]	0.0029 m	Épaisseur de la gaine de plomb (phase)
Dpha	89.2[mm]	0.0892 m	Diamètre sur phase (phase)
Dfic	2.5[mm]	0.0025 m	Diamètre du noyau de fibre optique (fibre)
Tfih	0.5[mm]	5^E-4 m	Épaisseur de l'hélice en acier (fibre)
Dfib	9.2[mm]	0.0092 m	Diamètre sur câble à fibre optique (fibre)
Tarm	6.5[mm]	0.0065 m	Épaisseur de l'armure (câble)
Narm	$\text{floor}(\pi*(Dcab/2+Dpha*(1/\text{sqrt}(3)+1/2)) / (Tarm+2*marm))$	92	Nombre de fils d'armure (câble)
Dcab	219.0[mm]	0.219 m	Diamètre extérieur du câble (câble)
mfil	0.5[mm]	5^E-4	Marge de remplissage (câble)

marm	0.25[mm]	2.5^E-4 m	Marge d'armure (câble)
Acon	500[mm^2]	5^E-4 m ²	Coupe transversale du conducteur (phase)
Nson	$Acon/(pi*(Dcon/2)^2)$	0.92742	Densité d'emballage du conducteur (phase)
Apbs	$pi*(Dins+Tpbs)*Tpbs$	7.334^E-4 m ²	Coupe transversale de la gaine de plomb (phase)
Lsec1	1/3	0.33333	Longueur relative x-bnd section 1 (Câble)
Lsec2	1-Lsec1-Lsec3	0.33333	Longueur relative x-bnd section 2 (Câble)
Lsec3	1/3	0.33333	Longueur relative x-bnd section 3 (Câble)
Lcab	10[km]	10000 m	Longueur totale du câble (câble)
Scab	1e5	1^E5	Facteur d'échelle de la géométrie (câble)
F0	50[Hz]	50 Hz	Fréquence de fonctionnement
V0	220[kV]/sqrt(3)	1.2702^E5 V	Tension phase-terre (amplitude)
I0	655[A]*sqrt(2)	926.31 A	Courant nominal (amplitude)
Scon	3.77e7[S/m]	3.77^E7 S/m	Conductivité du conducteur, 20 ° C (phase)
Spbs	4.55e6[S/m]	4.55^E6 S/m	Conductivité de la gaine de plomb, 20 ° C (phase)
Rcon	1/Acon/Scon	5.305^E-5 Ω/m	Résistance CC du conducteur par phase, 20 ° C (analytique)
Rpbs	1/Apbs/Spbs	2.9967^E-4 Ω/m	Résistance CC du plomb par phase, 20 ° C (analytique)
Exlpe	2.5	2.5	Permittivité relative XLPE, d'après CEI 60287 (phase)
Cpha	$2*pi*epsilon0_const*Exlpe/log((Dins/2-Tsec)/(Dcon/2+Tsec))$	1.3897^E-10 F/m	Capacité par phase (analytique)
Icpha	$2*pi*f0*Cpha*V0$	0.0055455 A/m	Courant de charge par phase (analytique)

Tableau IV.1 : Les paramètres du câble

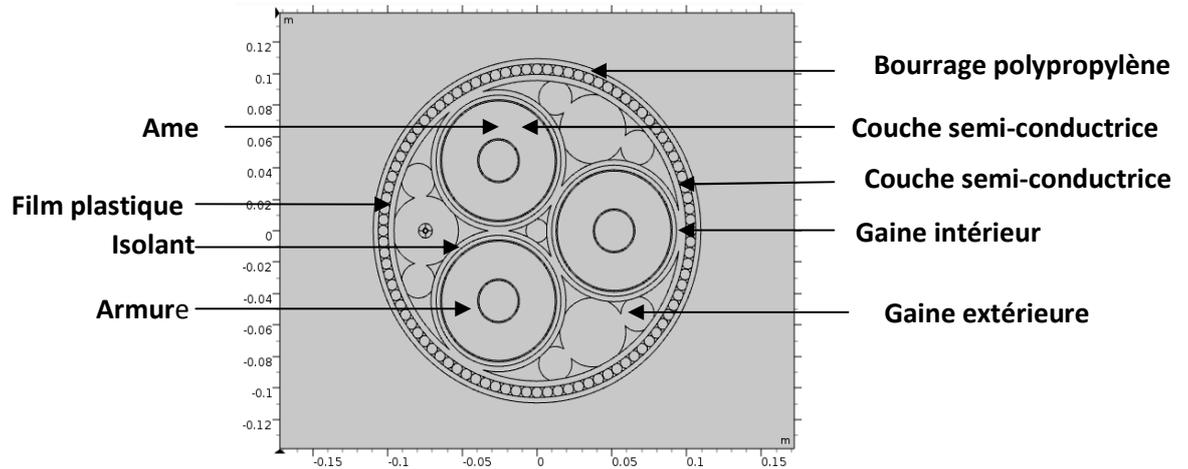


Figure IV.1 : La géométrie du câble

IV.3 Résultats de simulation :

Dans notre étude, nous proposons d’étudier trois modèles de câble sous-marin à haute tension. Afin de montrer l’influence de ces modèles sur la répartition du champ magnétique et les pertes dans ce câble. Pour chaque modèle, nous avons considéré deux matériaux de construction ; câble en cuivre et en aluminium avec deux fréquences de fonctionnement 50 et 60 Hz.

IV.3.1 Câble sous-marin avec des phases excitées par une bobine de courant :

IV.3.1.1 Sigma de cuivre = $5.96 \cdot 10^7$ et $f = 50$ Hz :

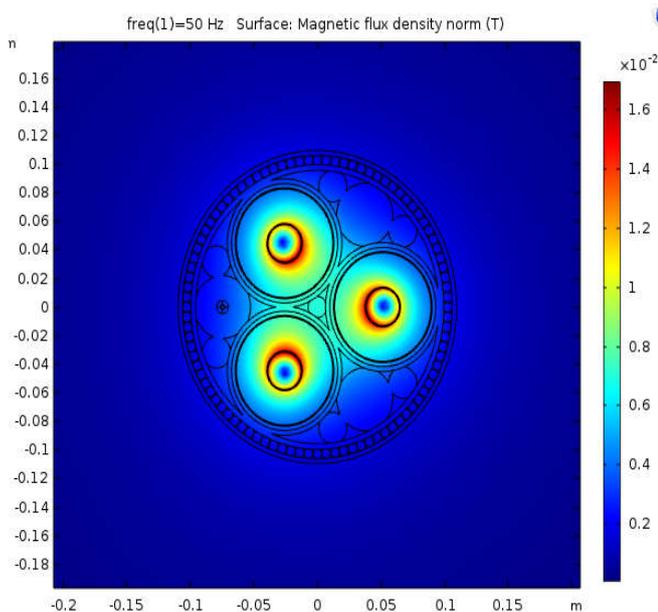


Figure IV.3.1.1.a : Norme de densité de flux magnétique

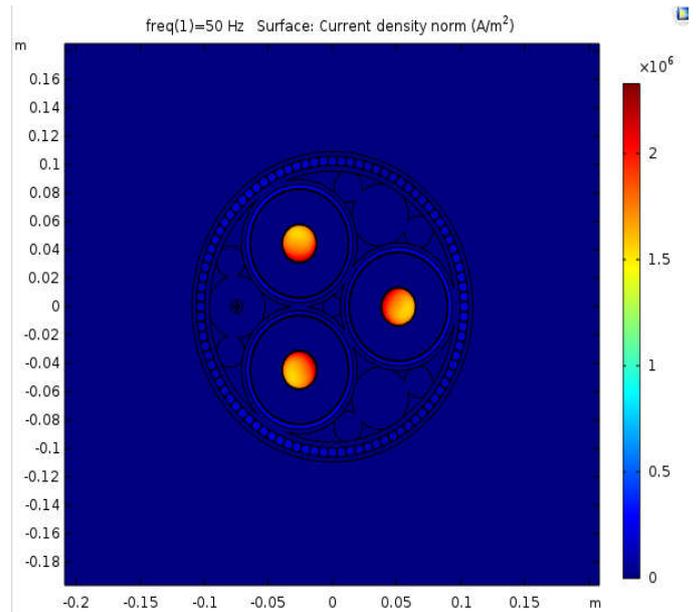


Figure IV.3.1.1.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)

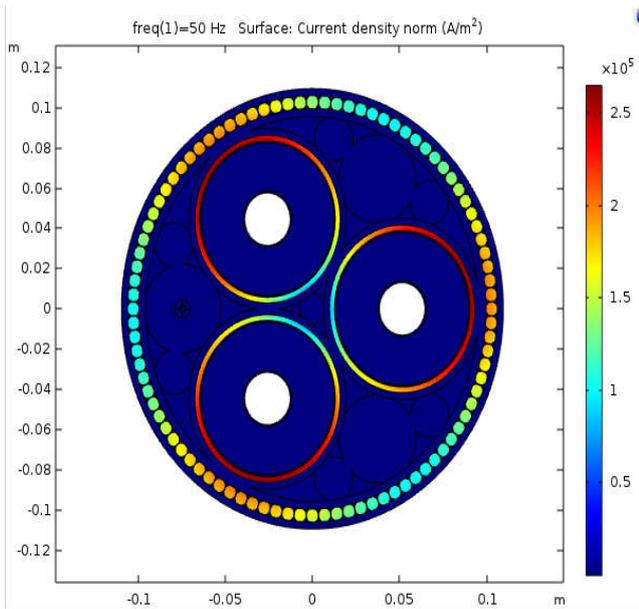


Figure IV.3.1.1.c : Densité de courant hors plan (mf)

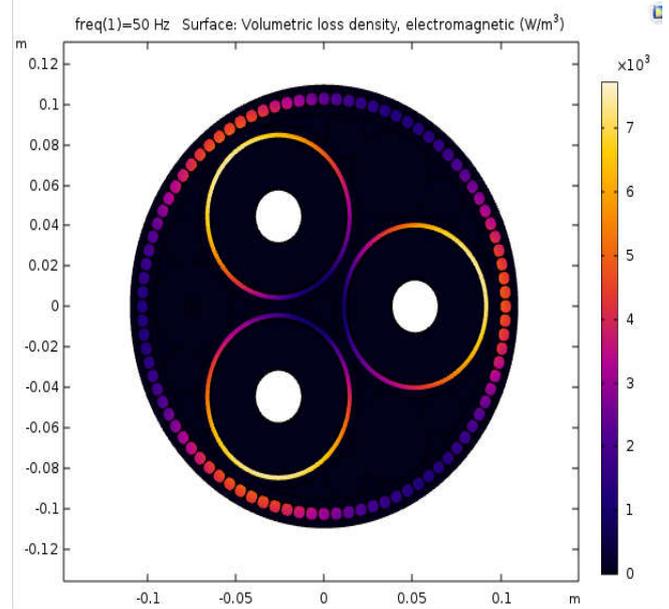


Figure IV.3.1.1.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

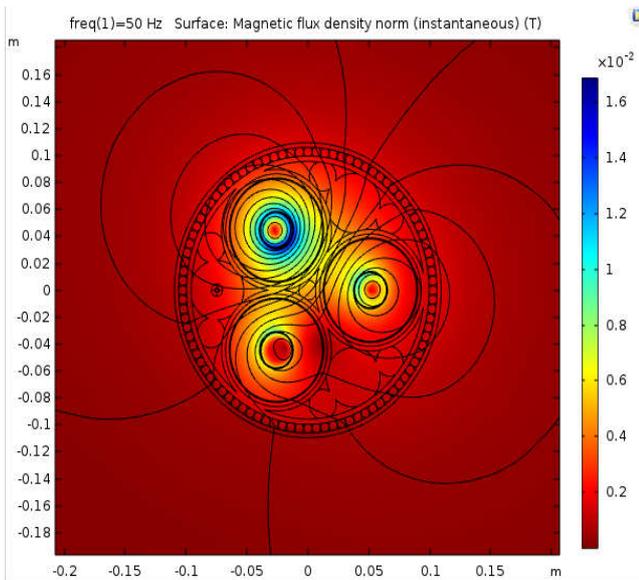


Figure IV.3.1.1.e: Norme de densité de flux magnétique (instantané)

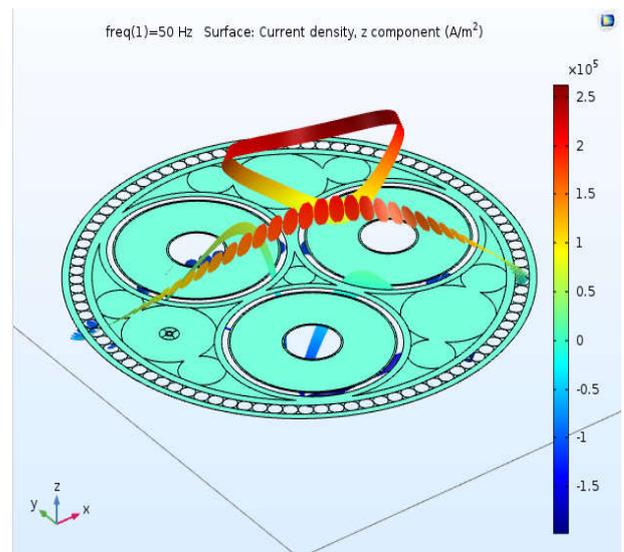


Figure IV.3.1.1.f: Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.1.1.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
50	9667.4

Tableau IV.3.1.1.a: Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
50	10044

Tableau IV.3.1.1.b: Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
50	46803

Tableau IV.3.1.1.c: Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
50	51.710	51.693	51.653	33.557

Tableau IV.3. 1.1.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
50	0.40104	0.40114	0.40104

Tableau IV.3.1.1.e : Les inductances des phases

IV.3.1.2 Sigma de cuivre = $5.96 \cdot 10^7$ et $f = 60$ Hz :

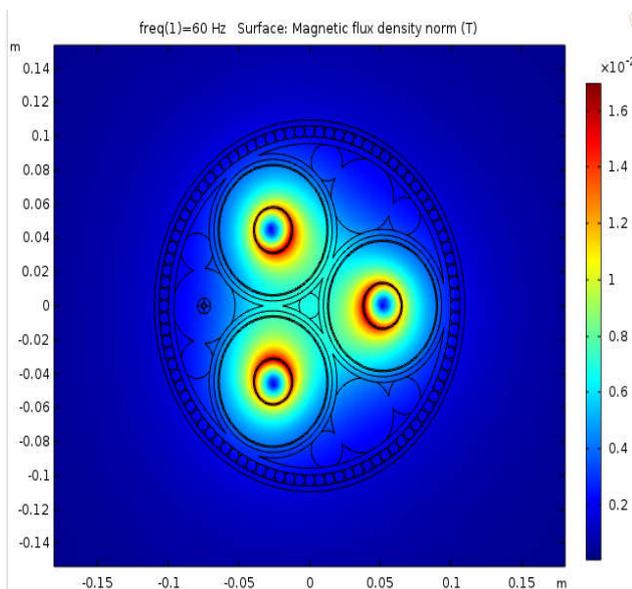


Figure IV.3.1.2.a : Norme de densité de flux magnétique

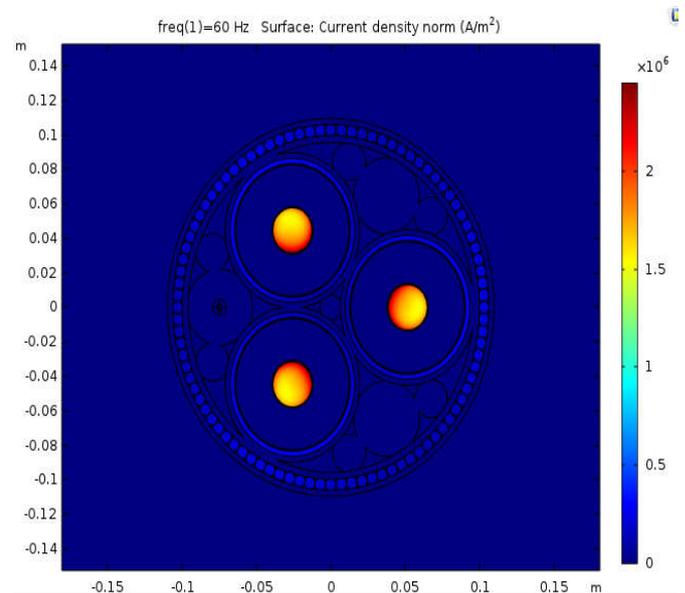


Figure IV.3.1.2.b : Norme de densité actuelle (A/m²)

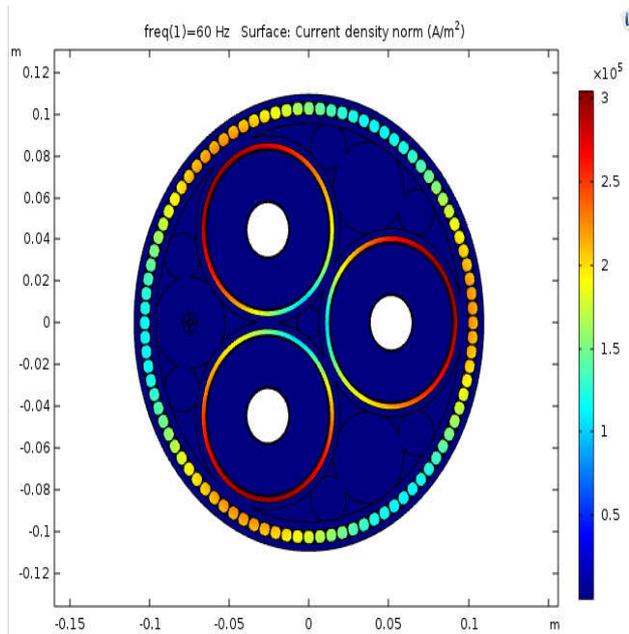


Figure IV.3.1.2.c : Norme de densité actuelle (A/m²)

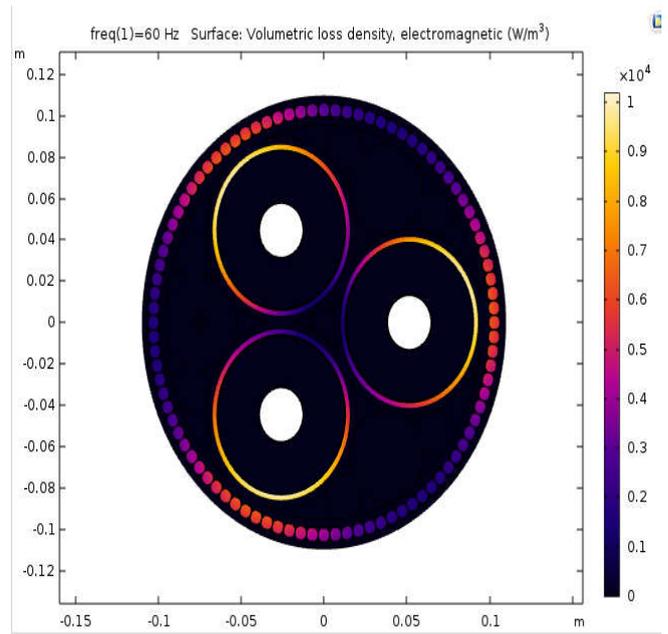


Figure IV.3.1.2.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

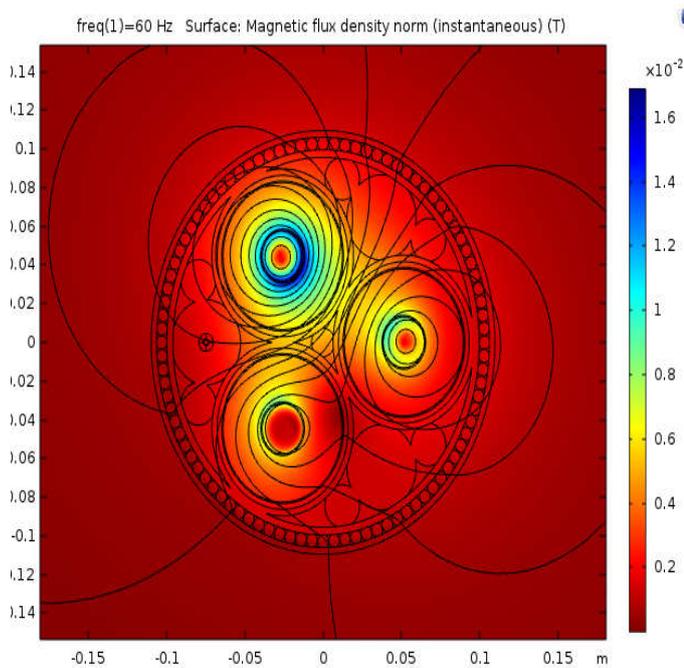


Figure IV.3.1.2.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

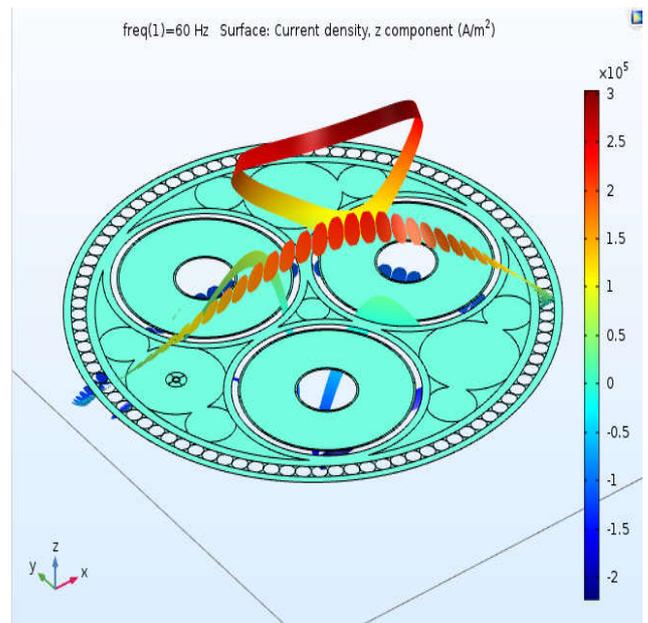


Figure IV.3.1.2.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.1.2.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
60	12523

Tableau IV.3.1.2.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
60	13247

Tableau IV.3.1.2.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
60	48118

Tableau IV.3.1.2.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
60	57.444	57.428	57.378	33.557

Tableau IV.3.1.2.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
60	0.39233	0.39243	0.39236

Tableau IV.3.1.2.e : Les inductances des phases

IV.3.1.3 Interprétation:

En remarque que lorsqu'on a augmenté la fréquence les pertes d'armure, d'écran et des phases sont augmenté et les résistances de 3 phases aussi mais les inductances des phases sont diminué. La résistance des phases reste le même que veut dire elle n'pas influencé par la fréquence.

En conséquence, de forts courants de Foucault commencent à circuler dans les écrans et l'armure. Cette configuration est en fait la même que le collage solide; le choix privilégié pour les systèmes de câbles sous-marins

IV.3.1.4 Sigma d'aluminium = $3.77 \cdot 10^7$ et $f = 50$ Hz :

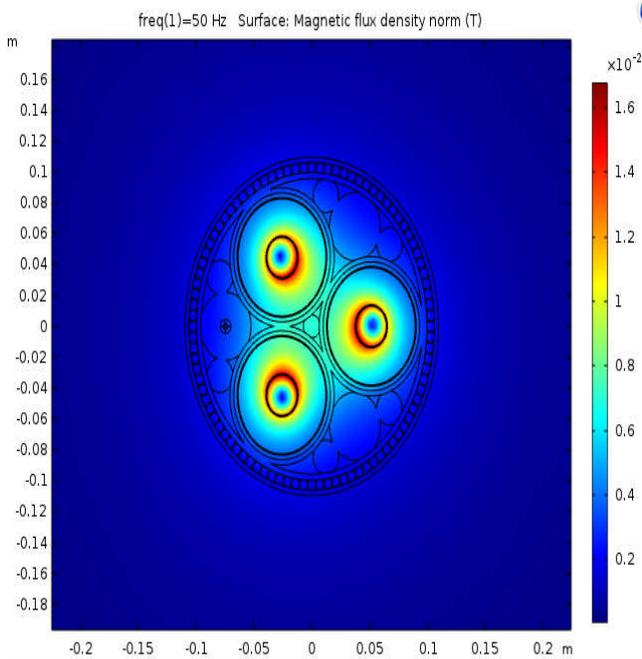


Figure IV.3.1.4.a : Norme de densité de flux magnétique

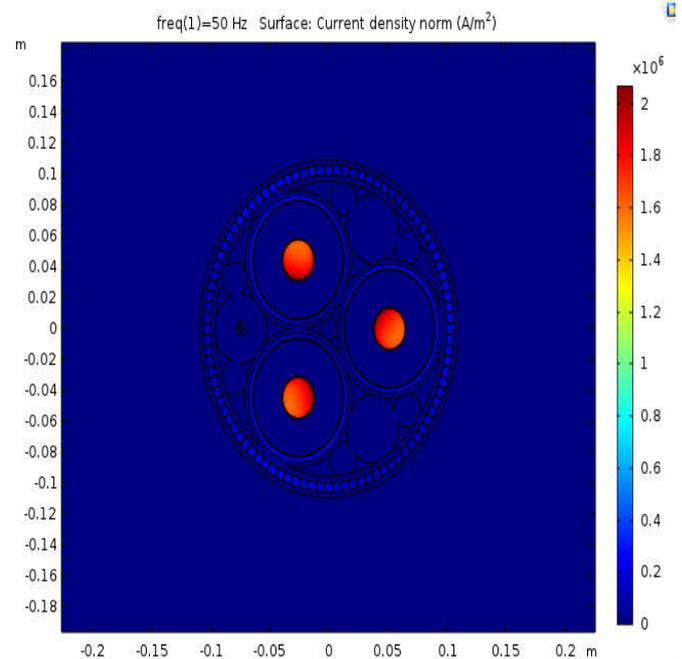


Figure IV.3.1.4.b : Norme de densité actuelle (A/m²)

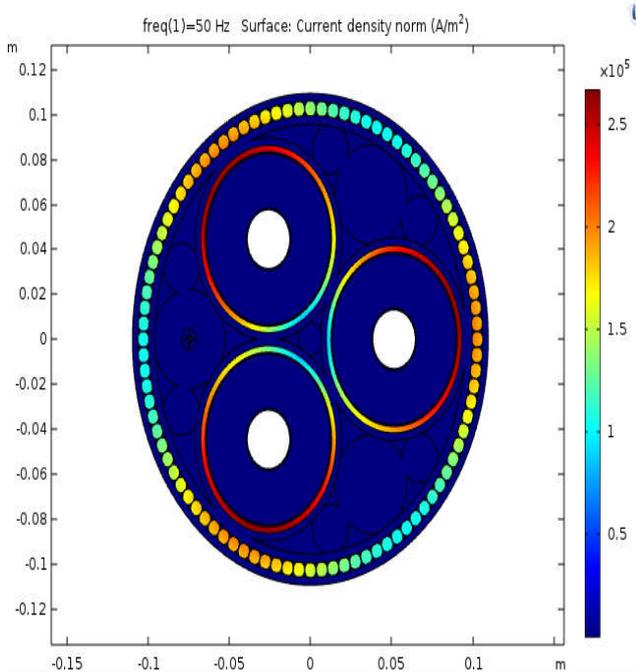


Figure IV.3.1.4.c : Norme de densité actuelle (A/m²)

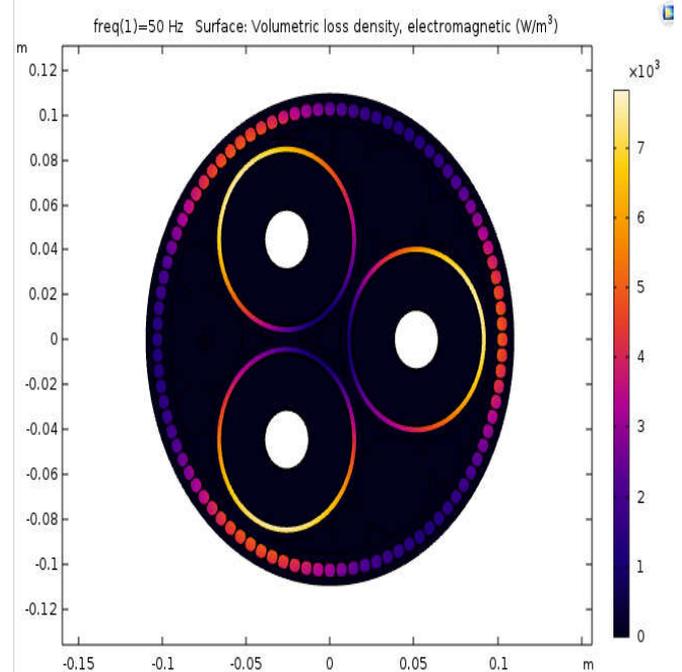


Figure IV.3.1.4.d : Densité de perte volumétrique électromagnétique

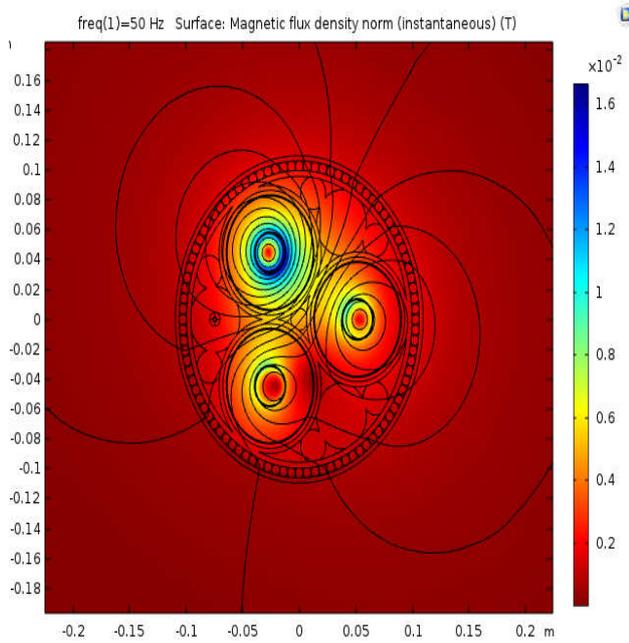


Figure IV.3.1.4.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

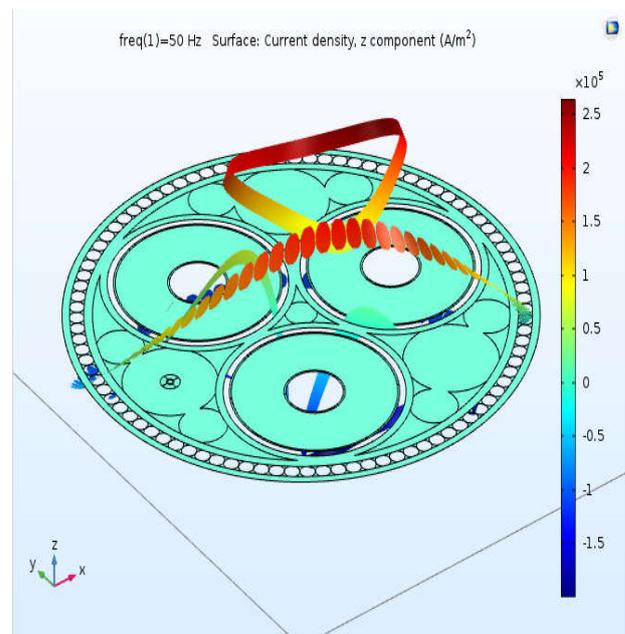


Figure IV.3.1.4.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.1.4.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
50	9798.6

Tableau IV.3.1.4.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
50	10157

Tableau IV.3.1.4.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
50	70710

Tableau IV.3.1.4.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
50	70.475	70.458	70.418	53.050

Tableau IV.3.1.4.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
50	0.40261	0.40271	0.40261

Tableau IV.3.1.4.e : Les inductances des phases

IV.3.1.5 Sigma d'aluminium = $3.77 \cdot 10^7$ et $f = 60$ Hz :

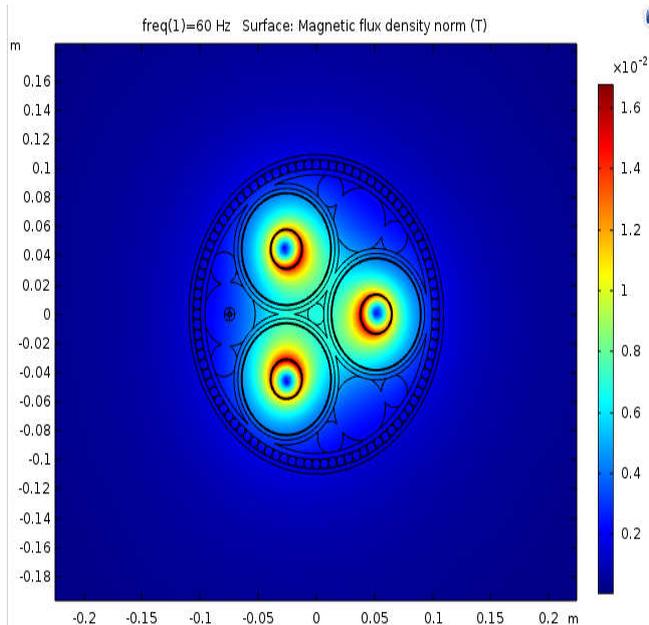


Figure IV.3.1.5.a : Norme de densité de flux magnétique

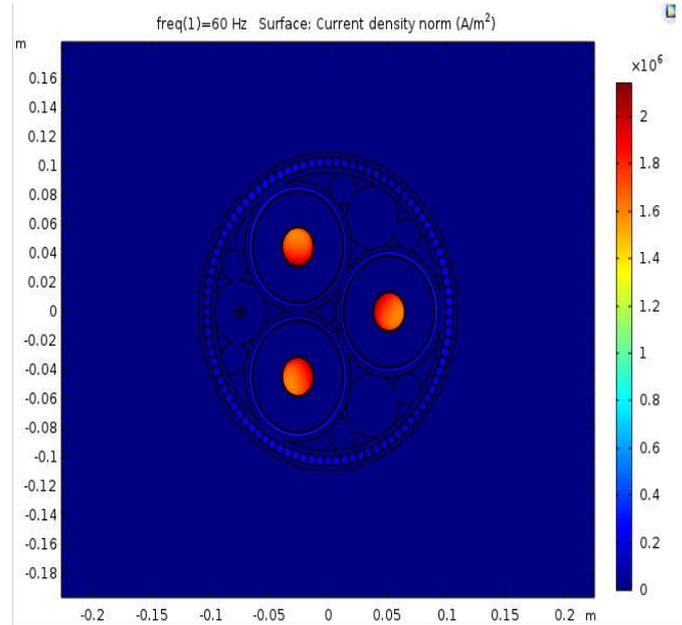


Figure IV.3.1.5.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)

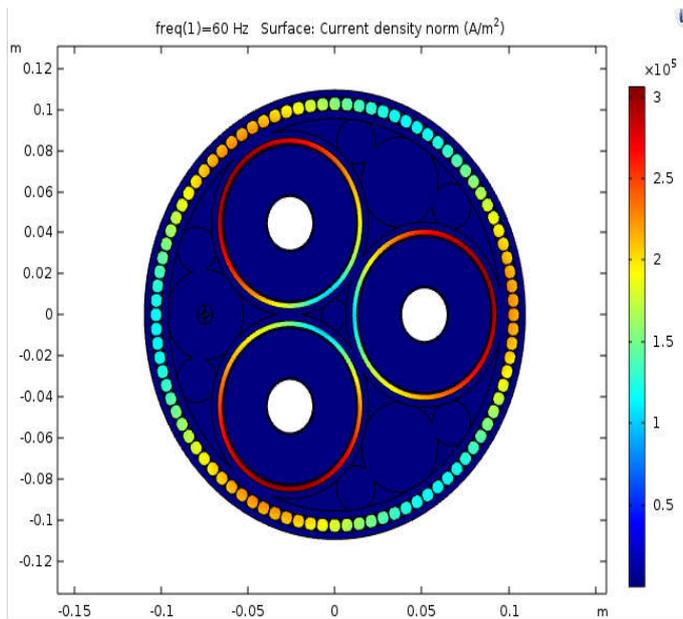


Figure IV.3.1.5.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)

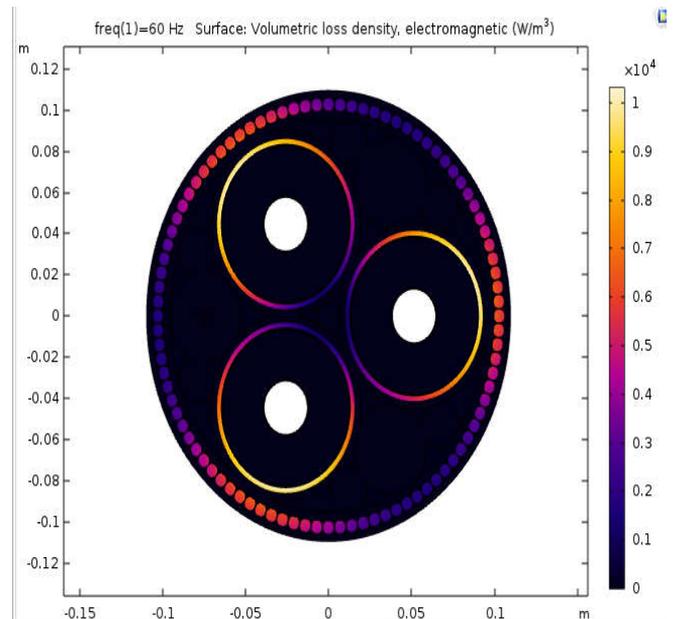


Figure IV.3.1.5.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

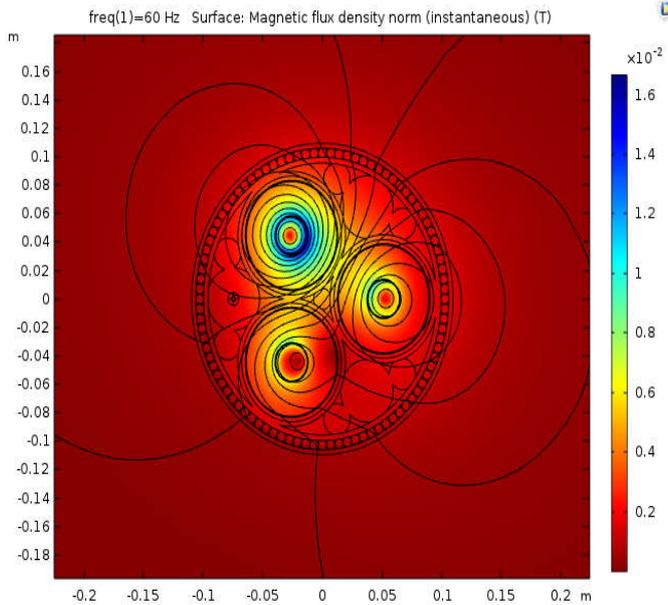


Figure IV.3.1.5.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

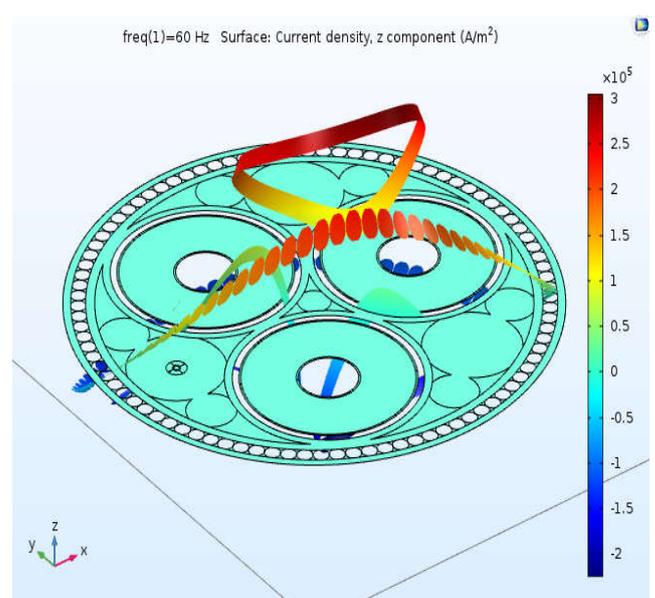


Figure IV.3.1.5.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.1.5.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
60	12701

Tableau IV.3.1.5.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
60	13402

Tableau IV.3.1.5.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
60	71650

Tableau IV.3.1.5.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
60	75.987	75.971	75.919	53.050

Tableau IV.3.1.5.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
60	0.39419	0.39429	0.39422

Tableau IV.3.1.5.e : Les inductances des phases

IV.3.1.5.2 Interprétation:

En cas d'aluminium les pertes d'armure, d'écran et des phases augmentent lorsque la fréquence est augmentée de 50 à 60. La même chose pour les résistances des phases mais l'induction des 3 phases est diminué.

Nous constatons aussi que, il y a des forts courants de Foucault commencent à circuler dans les écrans et l'armure.

IV.3.2 Câble sous-marin avec la torsion de l'armure:

IV.3.2.1 Sigma de cuivre = $5.96 \cdot 10^7$ et $f = 50$ Hz :

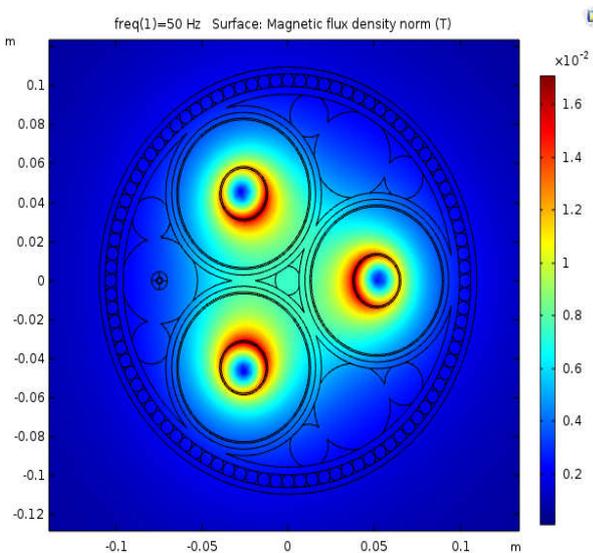


Figure IV.3.2.1.a : Norme de densité de flux magnétique

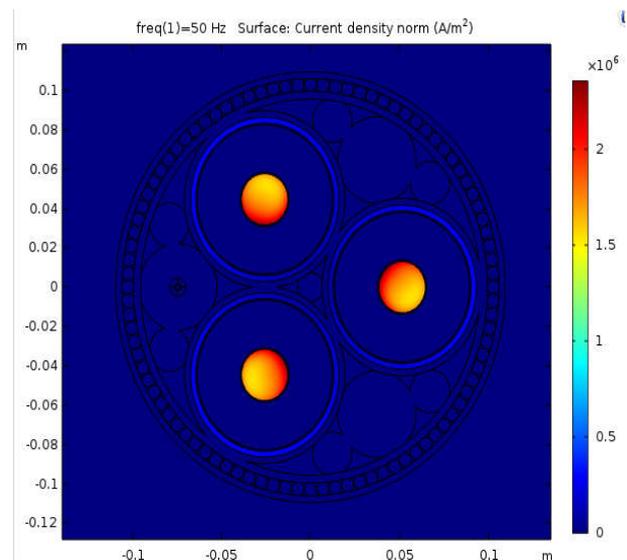


Figure IV.3.2.1.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)

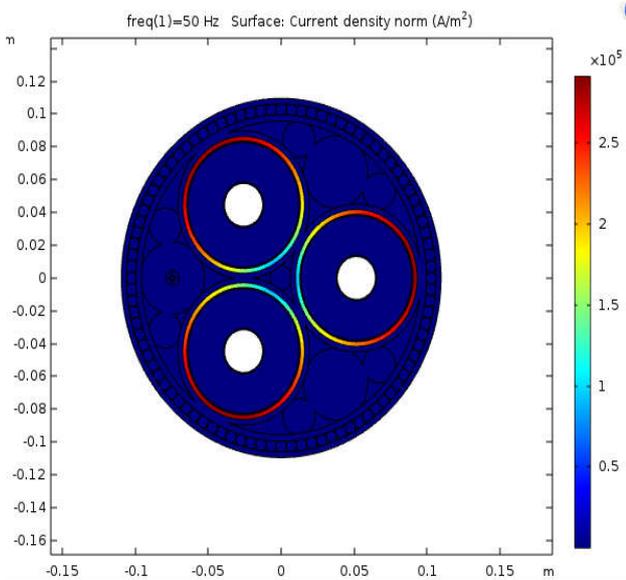


Figure IV.3.2.1.c : Norme de densité actuelle (A/m²)

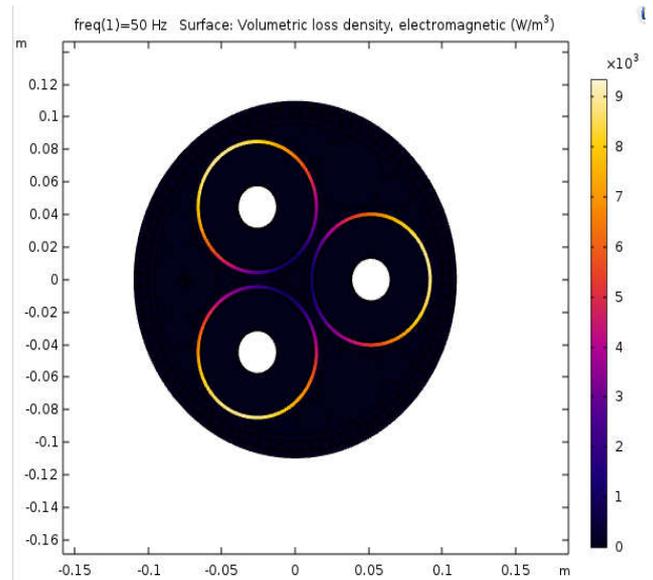


Figure IV.3.2.1.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

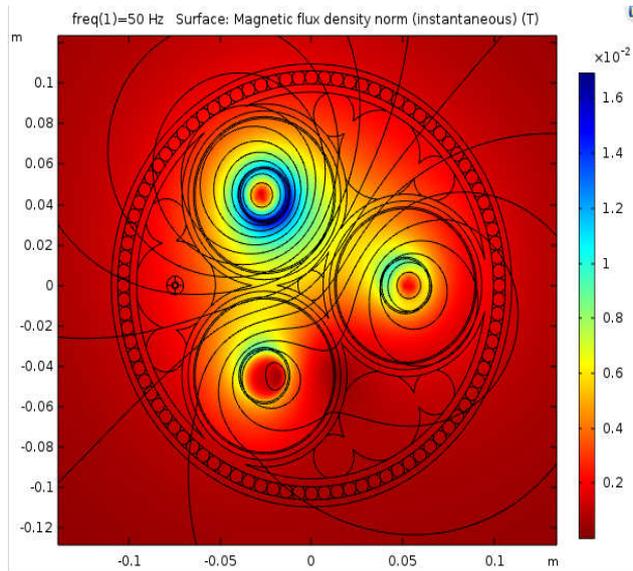


Figure IV.3.2.1.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

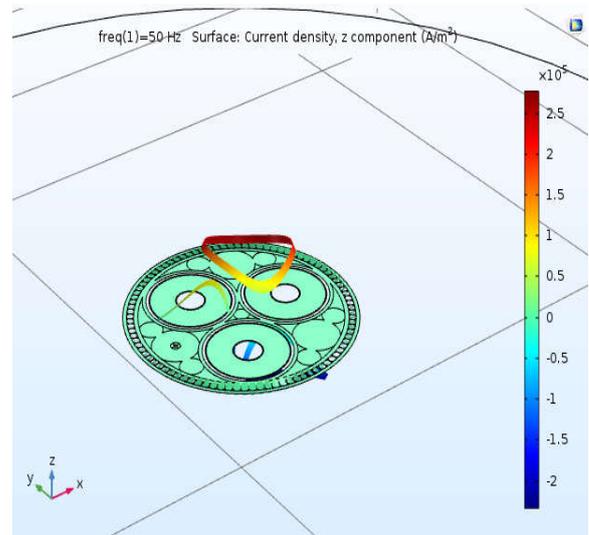


Figure IV.3.2.1.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.2.1.1 Les pertes électriques

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
50	8.8201

Tableau IV.3.2.1.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
50	12147

Tableau IV.3.2.1.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
50	46963

Tableau IV.3.2.1.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
50	45.970	45.946	45.909	33.557

Tableau IV.3.2.1.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
50	0.42054	0.42063	0.42048

Tableau IV.3.2.1.e : Les inductances des phases

IV.3.2.2 Sigma de cuivre = $5.96 \cdot 10^7$ et $f = 60$ Hz :

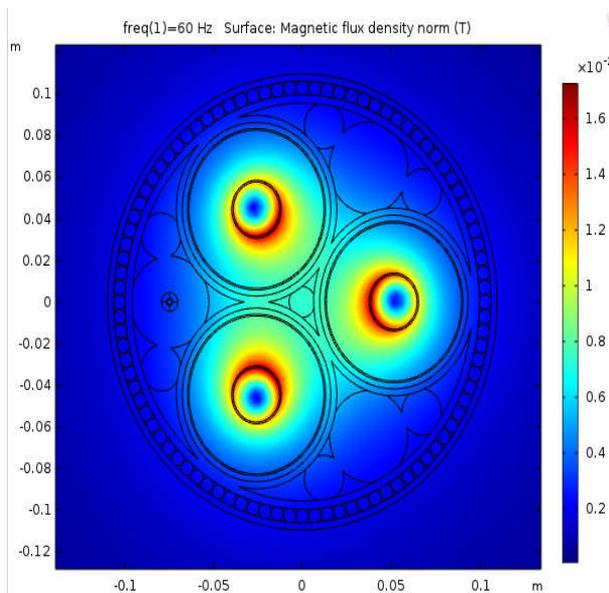


Figure IV.3.2.2.a : Norme de densité de flux magnétique

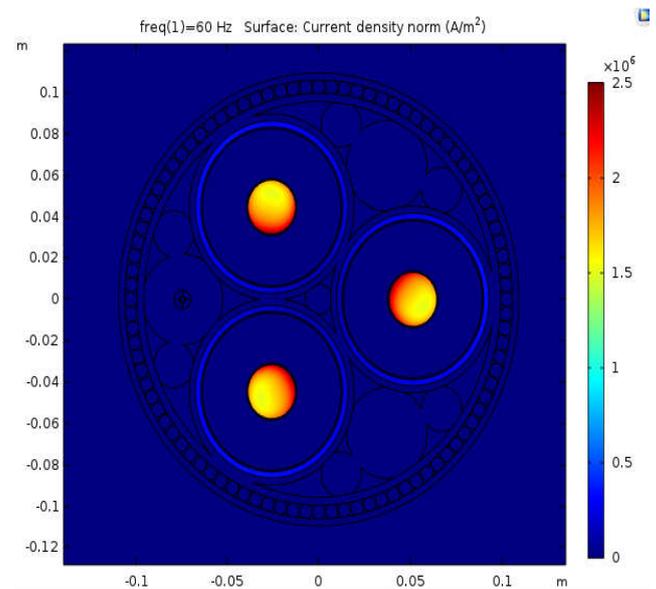


Figure IV.3.2.2.b : Norme de densité actuelle (A/m²)

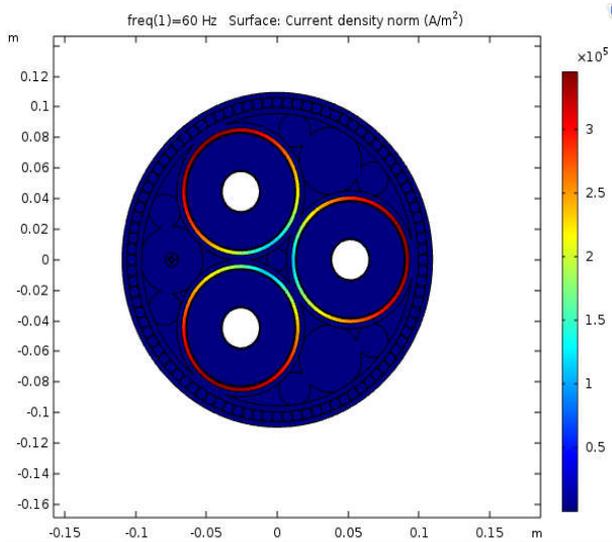


Figure IV.3.2.2.c : Norme de densité actuelle (A/m²)

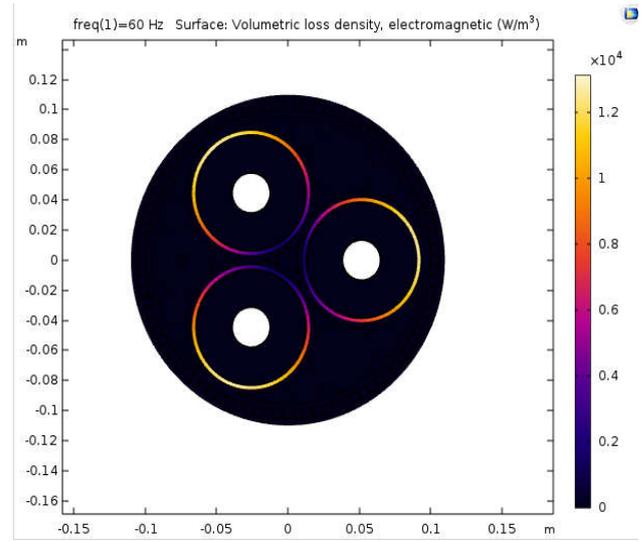


Figure IV.3.2.2.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

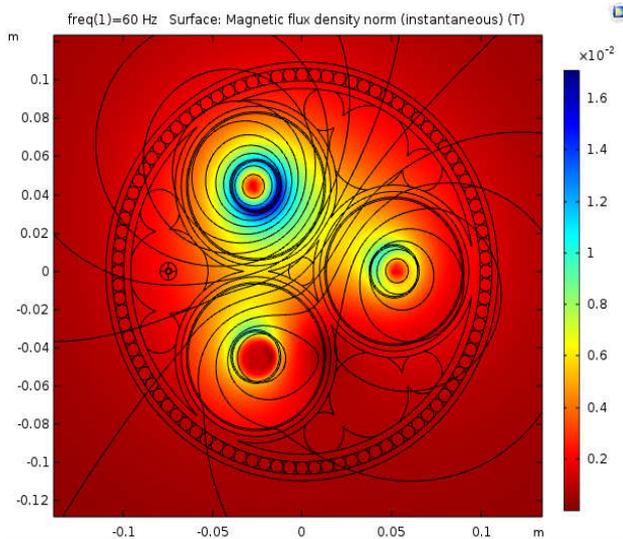


Figure IV.3.2.2.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

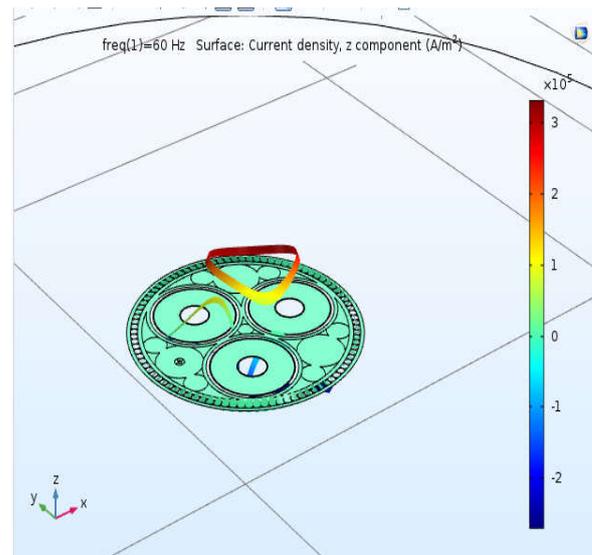


Figure IV.3.2.2.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.2.2.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
60	12.374

Tableau IV.3.2.2.a: Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
60	17033

Tableau IV.3.2.2.b: Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
60	48377

Tableau IV.3.2.2.c: Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
60	50.876	50.852	50.800	33.557

Tableau IV.3.2.2.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
60	0.41670	0.41679	0.41665

Tableau IV.3.2.2.e : Les inductances des phases

IV.3.2.2.2 Interprétation:

Par comparaison avec le premier cas, les pertes sont diminuées avec une très petite valeur par rapport aux valeurs des pertes de premier cas mais ils sont influencés par la fréquence. L'augmentation de cette dernière conduite à l'augmentation des pertes. Les résistances des phases sont augmentées aussi mais les inductances sont diminuées. Donc, on peut dire que la torsion de l'armure dans le câble sous-marin a provoqué une diminution des pertes.

IV.3.2.3 Sigma d'aluminium = $3.77 \cdot 10^7$ et $f = 50$ Hz :

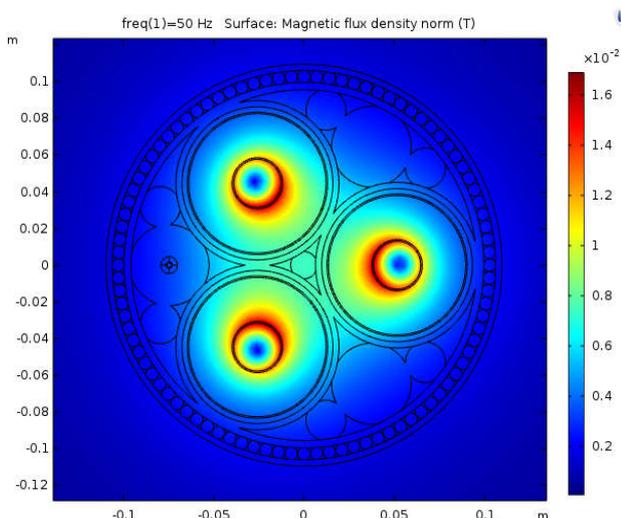


Figure IV.3.2.3.a : Norme de densité de flux magnétique

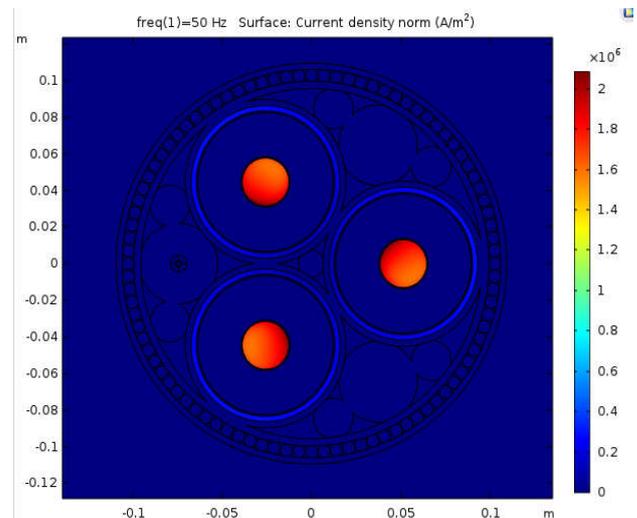


Figure IV.3.2.3.b : Norme de densité actuelle (A/m²)

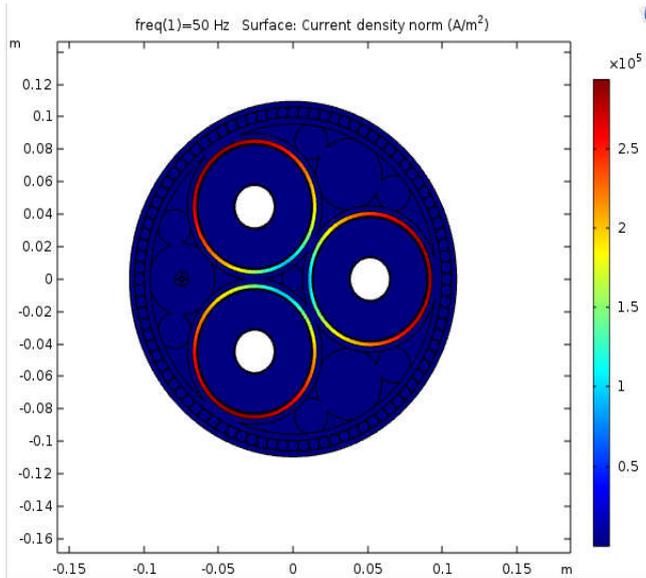


Figure IV.3.2.3.c : Norme de densité actuelle (A/m²)

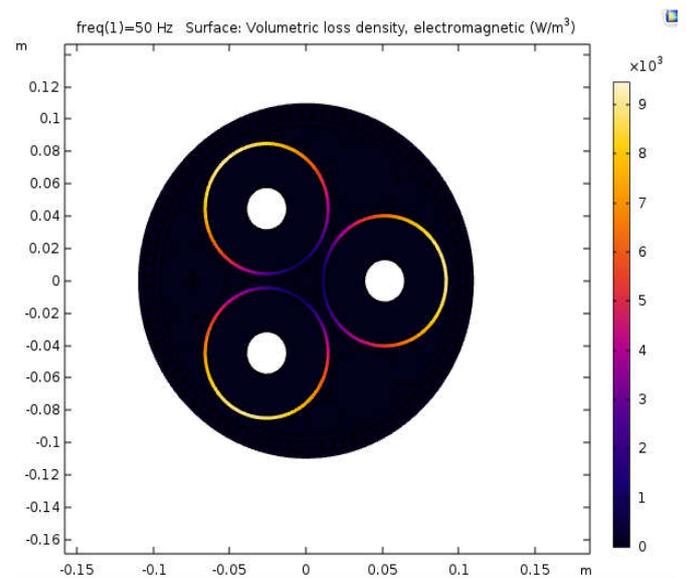


Figure IV.3.2.3.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

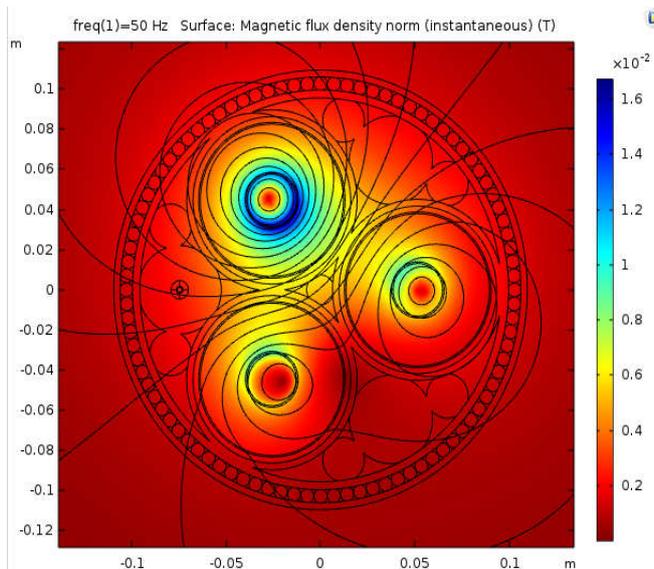


Figure IV.3.2.3.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

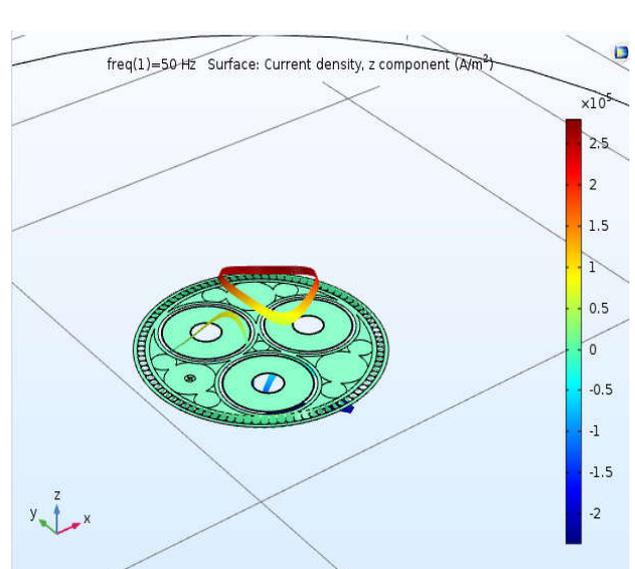


Figure IV.3.2.3.f : Densité de courant, composante z (A / m ³)

IV.3.2.3 .1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
50	8.9295

Tableau IV.3.2.3.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
50	12294

Tableau IV.3.2.3.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
50	70832

Tableau IV.3.2.3.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
50	64.630	64.605	64.569	53.050

Tableau IV.3.2.3.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
50	0.42231	0.42240	0.42224

Tableau IV.3.2.3.e : Les inductances des phases

IV.3.2.4 Sigma d'aluminium = $3.77 \cdot 10^7$ et $f = 60$ Hz :

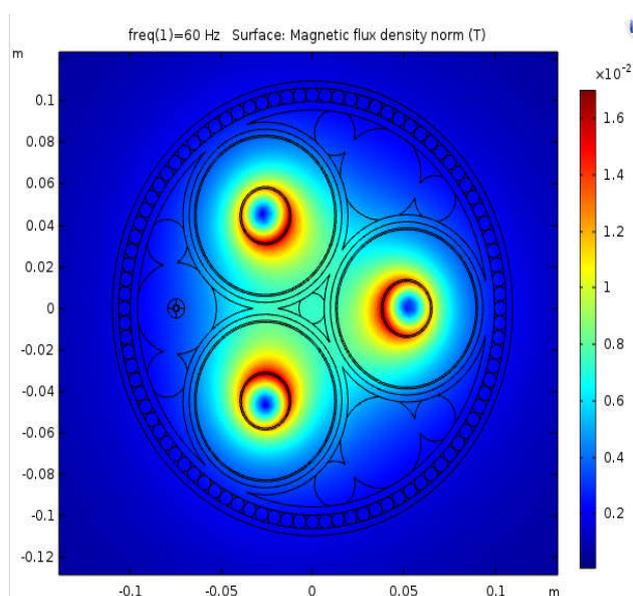


Figure IV.3.2.4.a : Norme de densité de flux magnétique

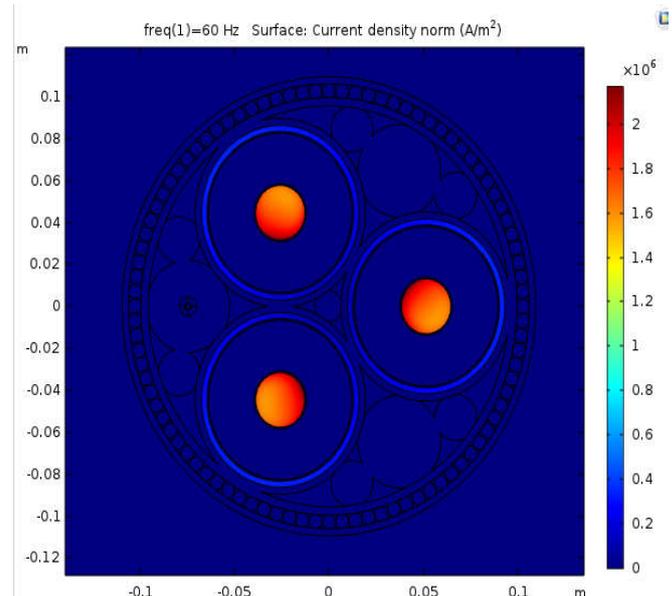


Figure IV.3.2.4.b : Norme de densité actuelle (A/m²)

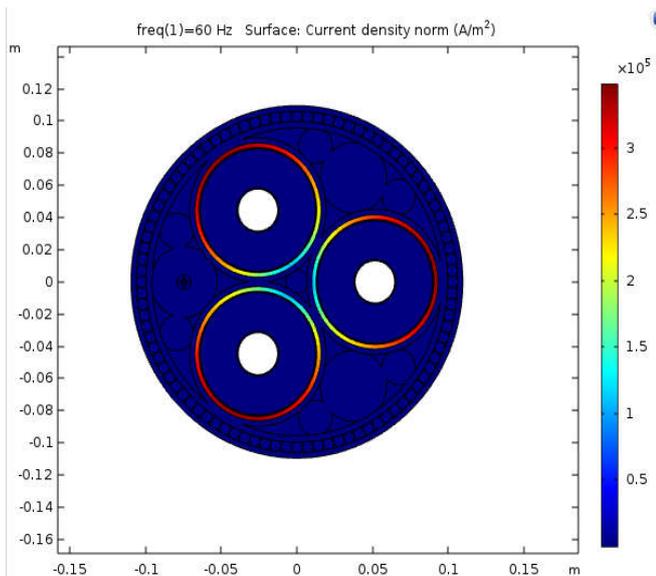


Figure IV.3.2.4.c : Norme de densité actuelle (A/m²)

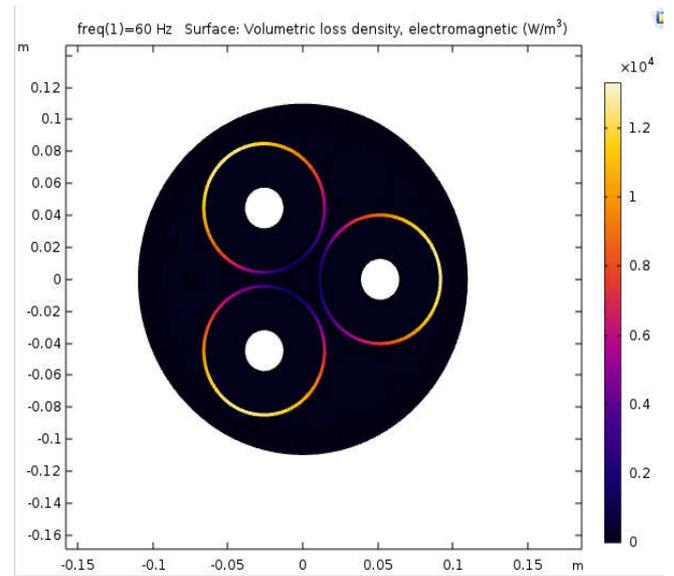


Figure IV.3.2.4.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

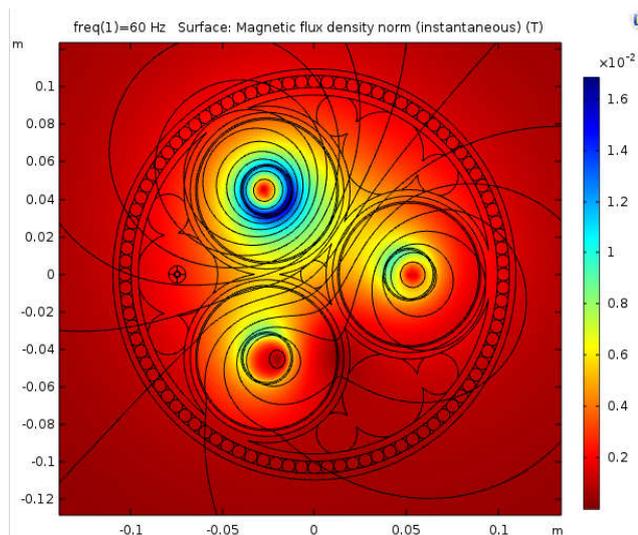


Figure IV.3.2.4.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

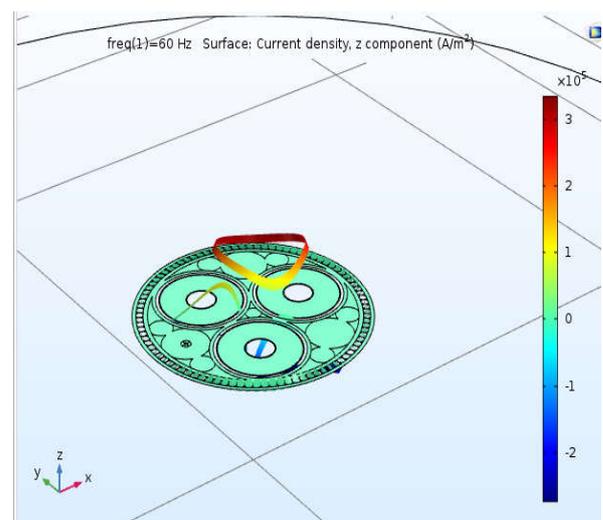


Figure IV.3.2.4.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.2.4.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
60	12.551

Tableau IV.3.2.4.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
60	17270

Tableau IV.3.2.4.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
60	71860

Tableau IV.3.2.4.c : pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
60	69.306	69.282	69.229	53.050

Tableau IV.3.2.4.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
60	0.41891	0.41901	0.41886

Tableau IV.3.2.4.e : Les inductances des phases

IV.3.2.4.2 Interprétation :

Nous constatons aussi les mêmes remarques obtenus précédemment pour le cas de cuivre, il y a une petite diminution des pertes dans la deuxième application par rapport à la première application. Les pertes sont influencées par la fréquence, elle augmente avec l'augmentation de la fréquence. Les résistances des phases augmentent à cause d'augmentation de la fréquence mais les inductances sont diminuées.

IV.3.3 Câble sous-marin avec des Multi-tours homogénéisé dans les bobines :

IV.3.3.1 Sigma de cuivre = $5.96 \cdot 10^7$ et $f = 50$ Hz :

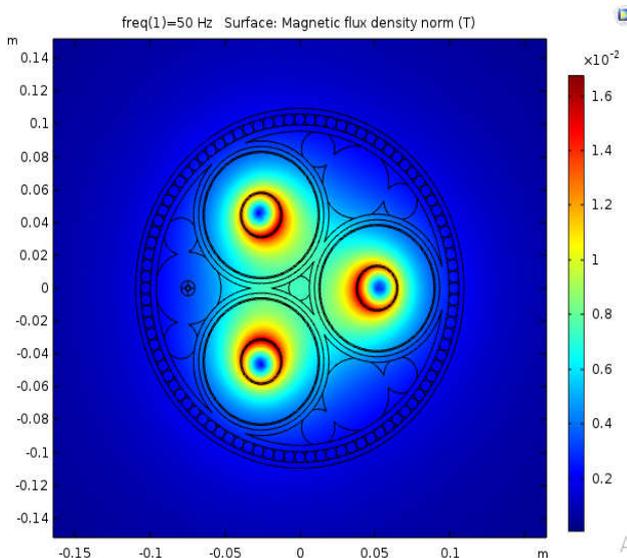


Figure IV.3.3.1.a : Norme de densité de flux magnétique

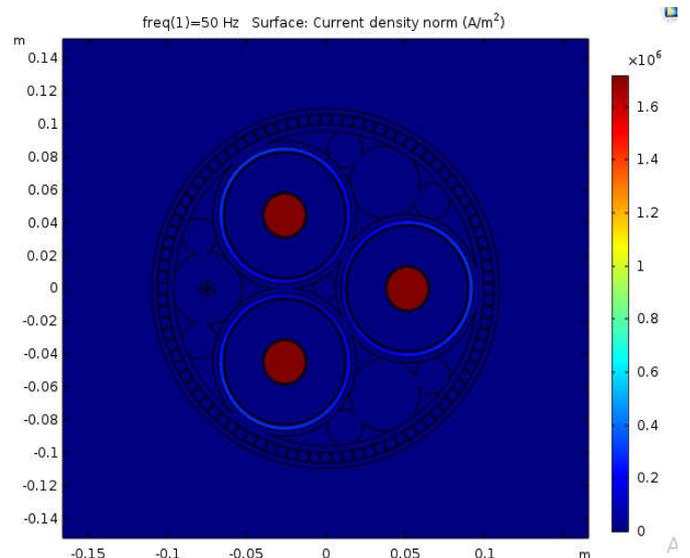


Figure IV.3.3.1.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)

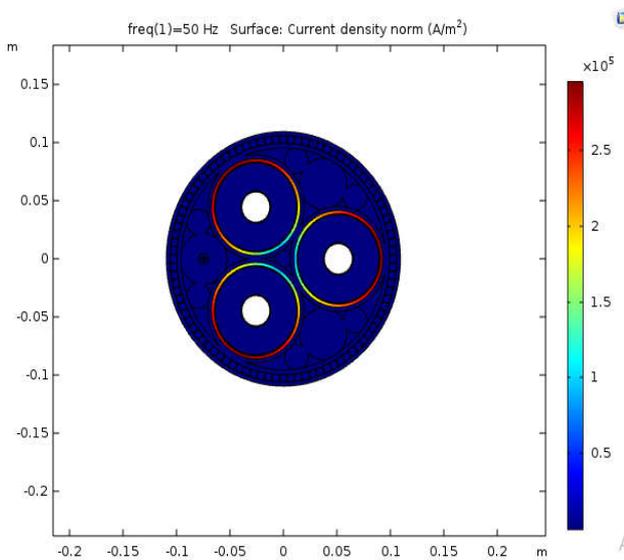


Figure IV.3.3.1.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)

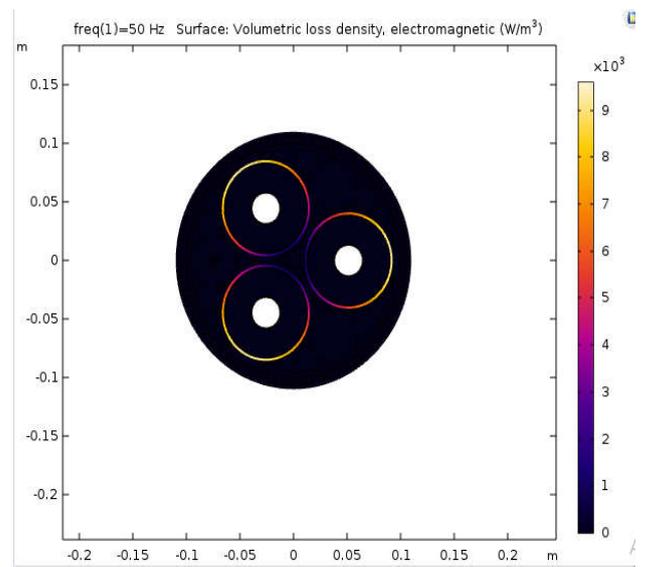


Figure IV.3.3.1.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

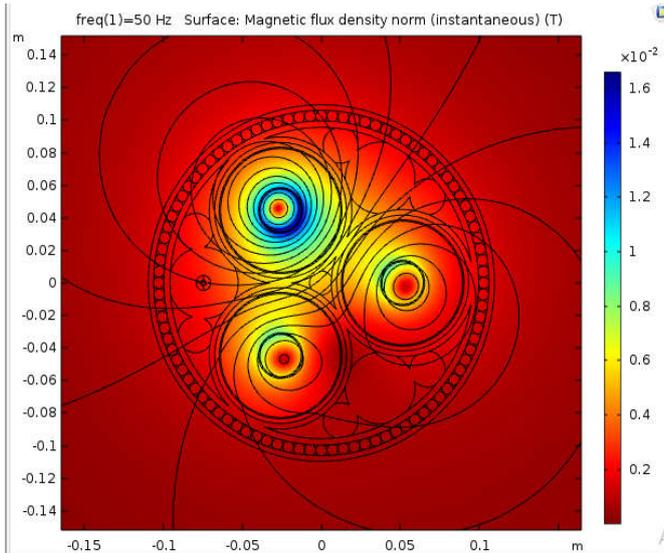


Figure IV.3.3.1.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

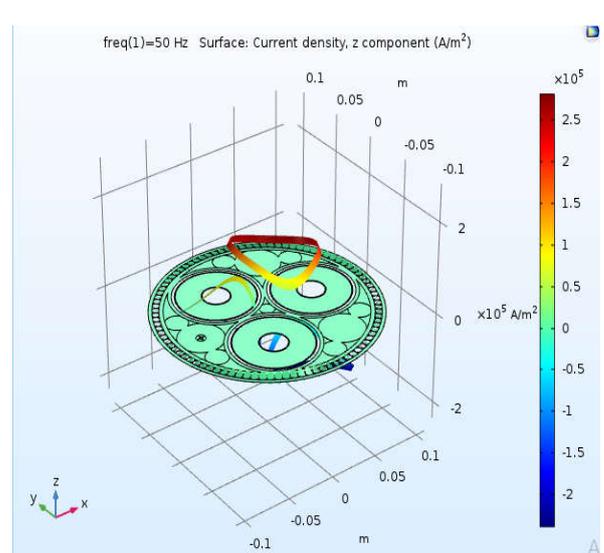


Figure IV.3.3.1.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.3.1.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
50	9.0706

Tableau IV.3.3.1.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
50	12491

Tableau IV.3.3.1.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
50	43190

Tableau IV.3.3.1.c : pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
50	43.307	43.282	43.246	33.557

Tableau IV.3.3.1.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
50	0.42427	0.42436	0.42420

Tableau IV.3.3.1.e : Les inductances des phases

IV.3.3.2 Sigma de cuivre = $5.96 \cdot 10^7$ et $f = 60$ Hz :

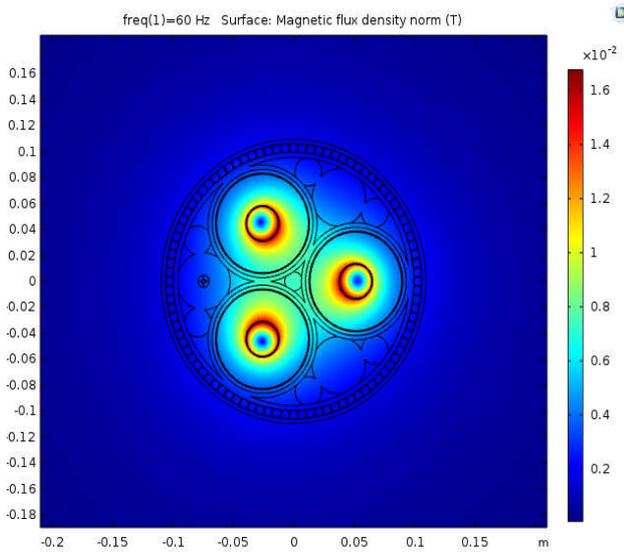


Figure IV.3.3.2.a : Norme de densité de flux magnétique

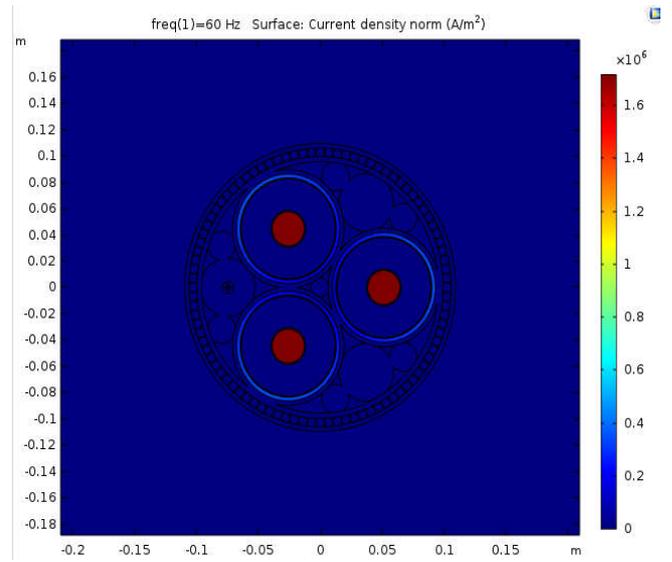


Figure IV.3.3.2.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)

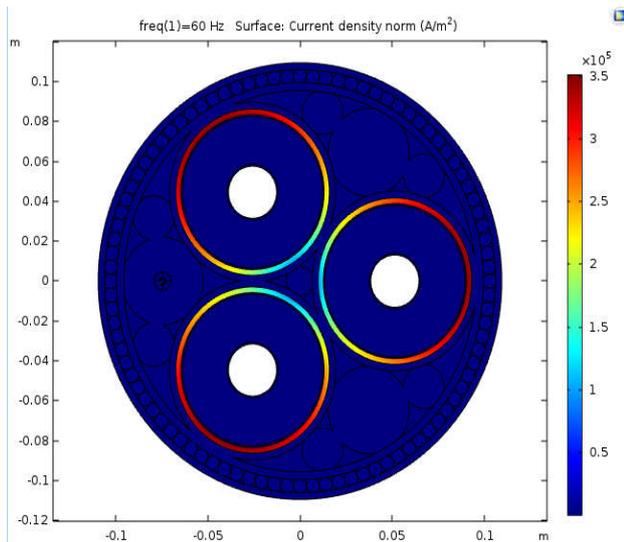


Figure IV.3.3.2.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)

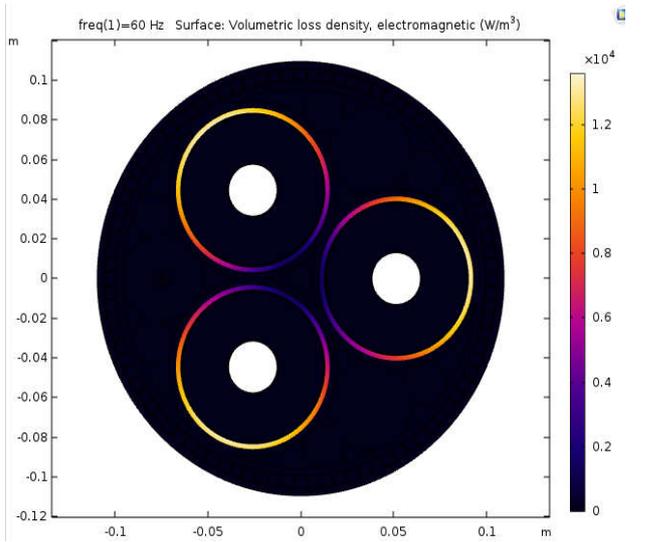


Figure IV.3.3.2.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

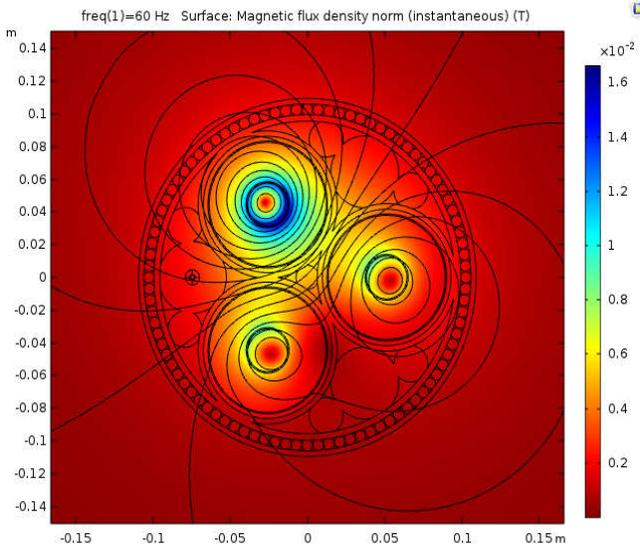


Figure IV.3.3.2.e : Norme de densité de flux magnétique

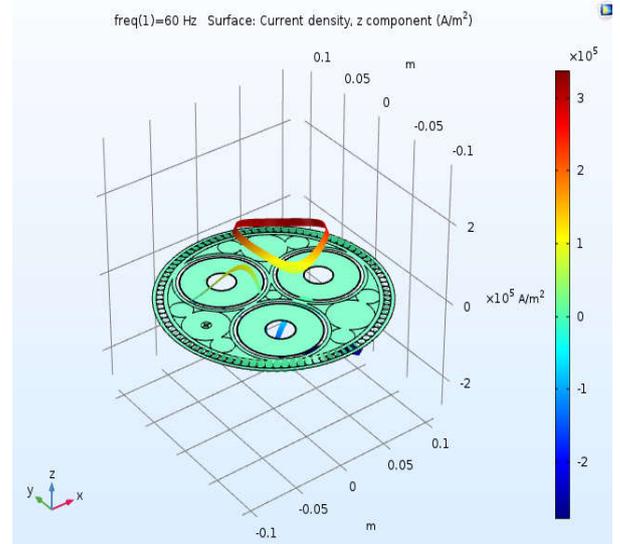


Figure IV.3.3.2.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.3.2 .1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
60	12.815

Tableau IV.3.3.2.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
60	17636

Tableau IV.3.3.2.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
60	43190

Tableau IV.3.3.2.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
60	47.317	47.292	47.239	33.557

Tableau IV.3.3.2.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
60	0.42152	0.42161	0.42146

Tableau IV.3.3.2.e : Les inductances des phases

IV.3.3.2 Interprétation :

Nous remarquons que les pertes sont un peu supérieures à ceux obtenus dans les deux applications précédentes. Les pertes sont toujours influencées par la fréquence, ils augmentent avec l'augmentation de la fréquence, les résistances aussi augmenté et les inductances sont diminuées.

IV.3.3.3 Sigma d'aluminium = $3.77 \cdot 10^7$ et $f = 50$ Hz :

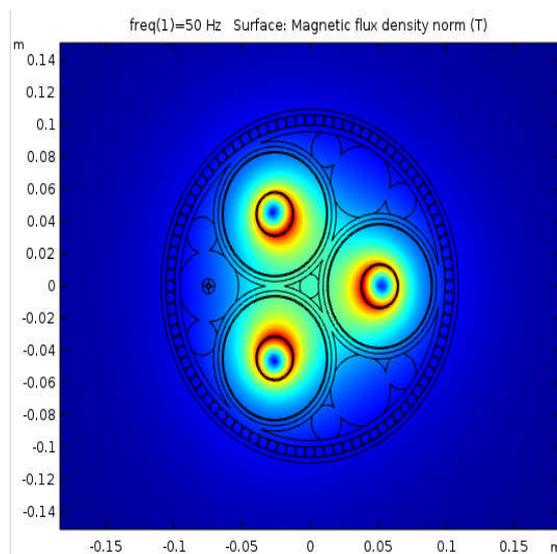


Figure IV.3.3.3.a : Norme de densité de flux magnétique

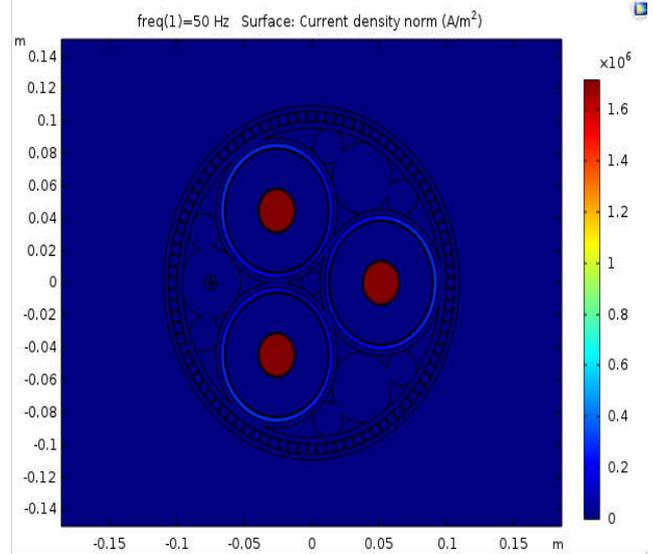


Figure IV.3.3.3.b : Norme de densité actuelle (A/m^2)

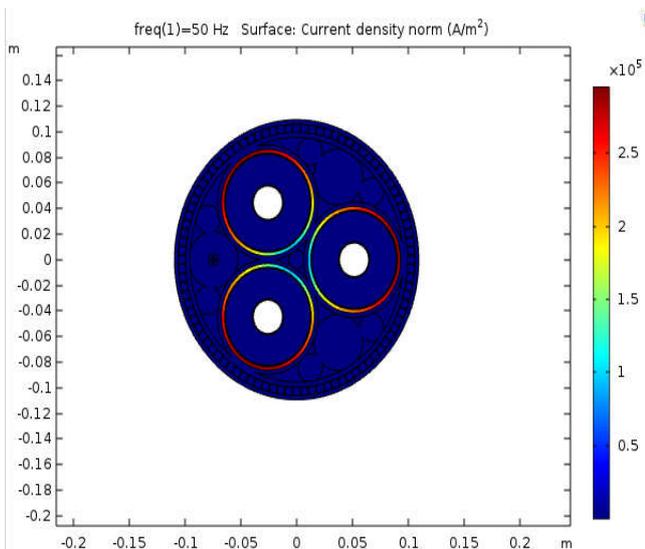


Figure IV.3.3.3.c : Norme de densité actuelle (A/m^2)

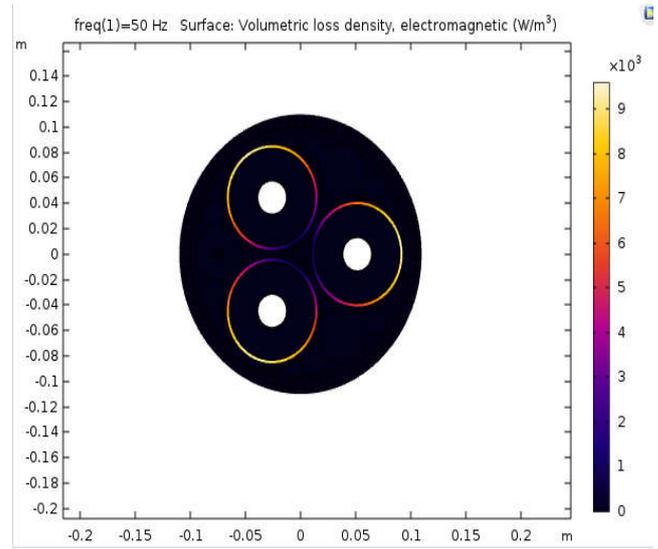


Figure IV.3.3.3.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

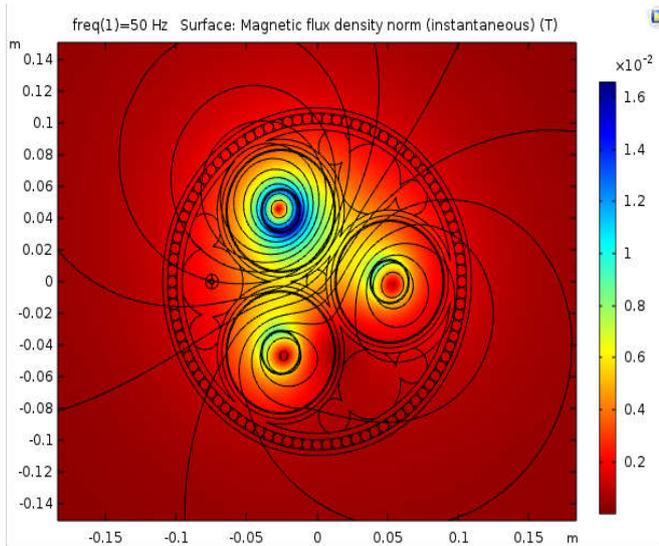


Figure IV.3.3.3.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

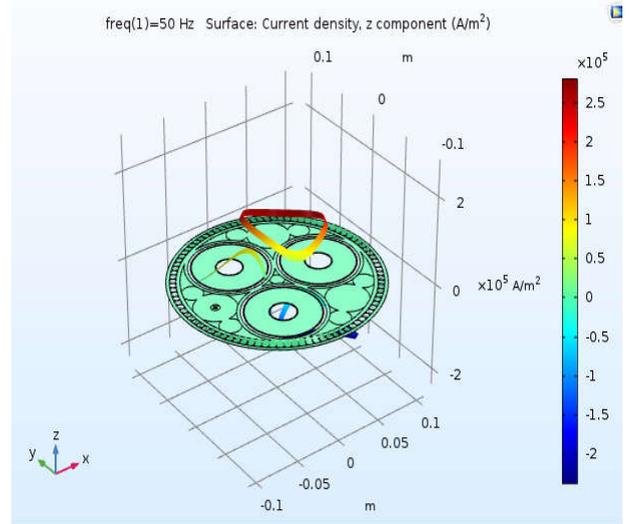


Figure IV.3.3.3.f : Densité de courant, composante z (A / m ^ 3)

IV.3.3.3.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
50	9.0706

Tableau IV.3.3.3.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
50	12491

Tableau IV.3.3.3.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
50	68280

Tableau IV.3.3.3.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
50	62.800	62.775	62.739	53.050

Tableau IV.3.3.3.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
50	0.42427	0.42436	0.42420

Tableau IV.3.3.3.e : Les inductances des phases

IV.3.3.4 Sigma d'aluminium = $3.77 \cdot 10^7$ et $f = 60$ Hz :

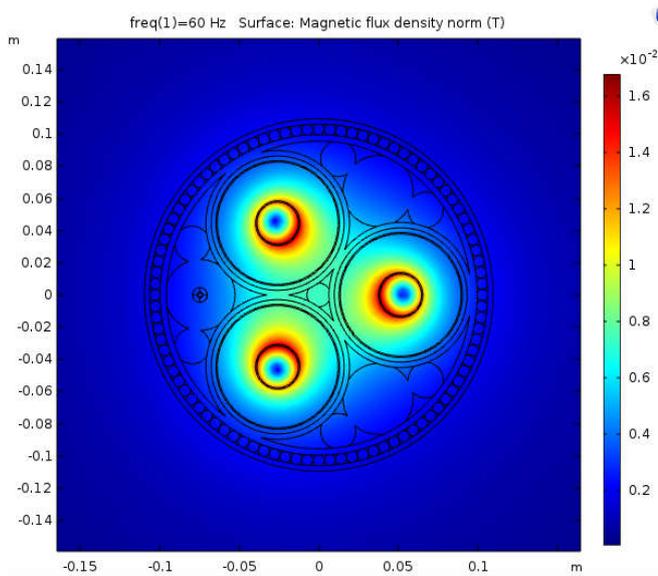


Figure IV.3.3.4.a : Norme de densité de flux magnétique

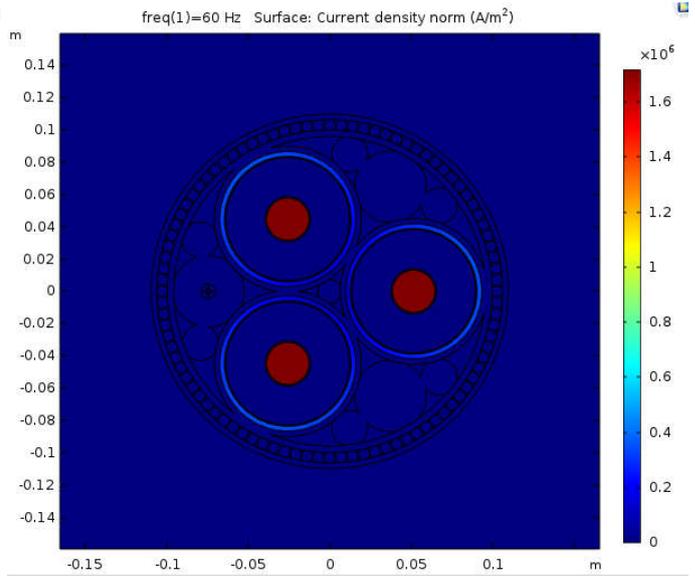


Figure IV.3.3.4.b : Norme de densité actuelle (A/m²)

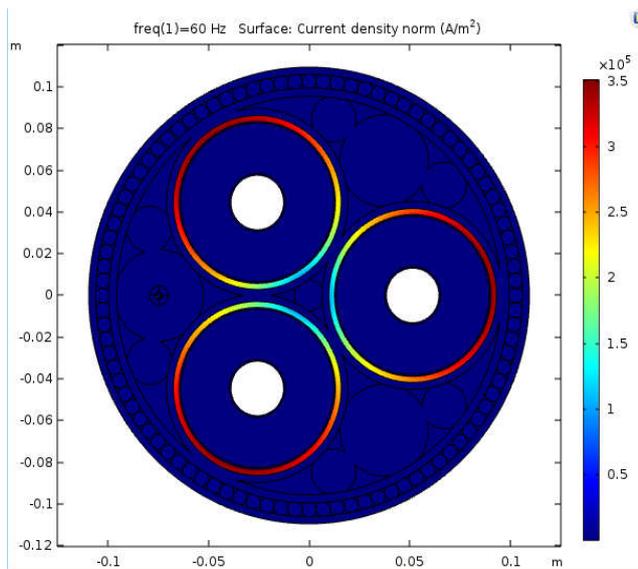


Figure IV.3.3.4.c : Norme de densité actuelle (A/m²)

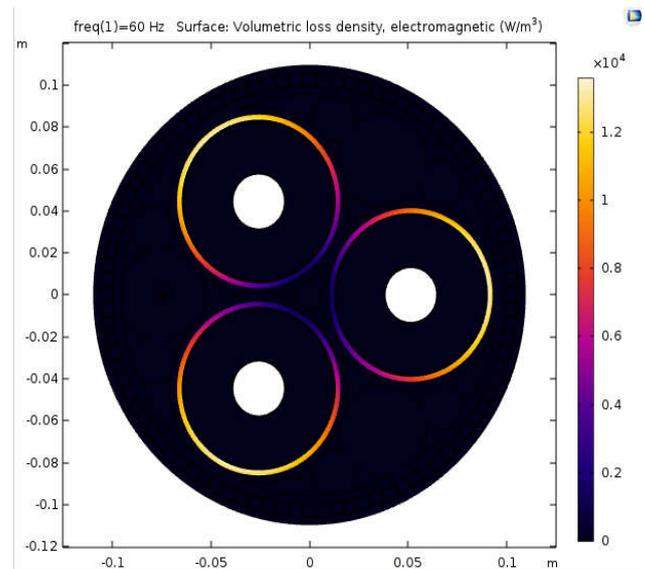


Figure IV.3.3.4.d : Densité de perte volumétrique, électromagnétique

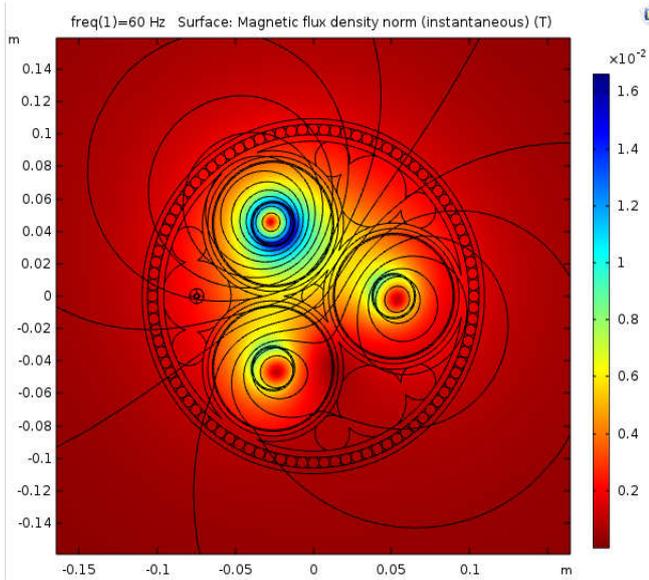


Figure IV.3.3.4.e : Norme de densité de flux magnétique (instantané)

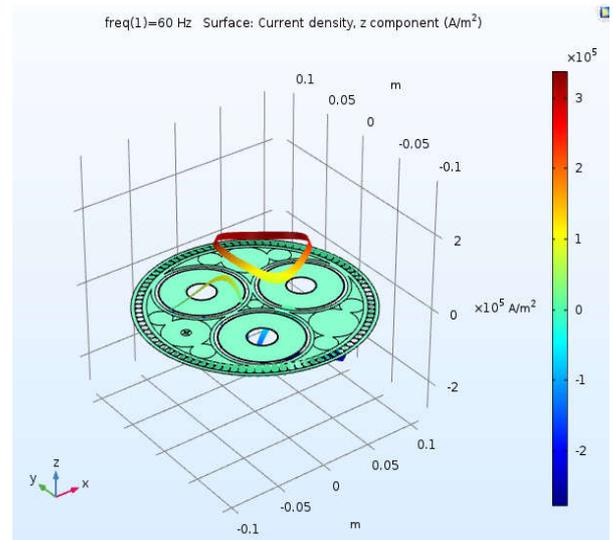


Figure IV.3.3.4.f : Densité de courant, composante z (A/m³)

IV.3.3.4.1 Les pertes électriques :

Fréquence (Hz)	Les pertes d'armure (W/km)
60	12.815

Tableau IV.3.3.4.a : Les pertes d'armure

Fréquence (Hz)	Les pertes d'écran (W/km)
60	17636

Tableau IV.3.3.4.b : Les pertes d'écran

Fréquence (Hz)	Les pertes de phase (W/km)
60	68280

Tableau IV.3.3.4.c : Les pertes de phase

Fréquence (Hz)	Résistance de CA de phase 1 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 2 (mΩ/km)	Résistance de CA de phase 3 (mΩ/km)	Résistance de CC, 20°(Analytique) (mΩ/km)
60	66.811	66.786	66.733	53.050

Tableau IV.3.3.4.d : Les résistances des phases

Fréquence (Hz)	Inductance de phase 1 (mH/km)	Inductance de phase 2 (mH/km)	Inductance de phase 3 (mH/km)
60	0.42152	0.42161	0.42146

Tableau IV.3.3.4.e : Les inductances des phases

IV.3.3.4.2 Interprétation :

Nous constatons aussi que, les pertes obtenus dans ce cas sont supérieures par rapport aux cas précédents. Les résistances de câble sont augmentées et les inductances des phases sont diminuées.

Par conséquent on conclut que :

- Les pertes sont proportionnelles à la fréquence.
- Les inductances sont disproportionnelles à la fréquence.
- Le cuivre est plus conducteur que l'aluminium parce que les pertes dans le cuivre sont toujours inférieures aux pertes dans l'aluminium.

IV.4 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans un câble sous-marin XLPE à haute tension pour trois applications proposées. Ces résultats sont obtenus par le logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis. Notre résultat de simulation montre qu'il y a plusieurs paramètres influencés sur les pertes telles que la conductivité, les pertes et la torsion d'armure de câble.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail consiste à étudier l'effet inductif dans un câble sous-marin à haute tension en particulier le câble XLPE dont l'objectif de calculer les pertes dans ce câble. L'utilisation de ces câbles pour le transport de courant, nous a incités à étudier plus particulièrement les pertes en champ propre, avec un courant sinusoïdal. Dans ce contexte, nous avons proposé trois applications pour modéliser et calculer les pertes dans le câble sous-marin XLPE par l'utilisation de la formulation magnétodynamique. La première avec des phases excitées par une bobine de courant. Dans la deuxième, l'effet de la torsion de l'armure est inclus dans le modèle du câble. Pour la troisième application, les caractéristiques de bobine de courant sont réglées sur multi tours homogénéisé pour exciter les phases.

L'ensemble de notre rapport se situe dans :

- La modélisation des phénomènes électromagnétiques dans le câble sous-marin à haute tension par les équations de Maxwell.
- Les différents résultats obtenus par le logiciel COMSOL Multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis pour les trois cas étudié du câble XLPE.
- La comparaison entre les pertes obtenues dans le câble XLPE pour les trois applications proposées.

D'après les résultats obtenus, on a remarqué que les pertes est proportionnelle à la fréquence, les inductances sont disproportionnelles à la fréquence. En conséquence, de forts courants de Foucault commencent à circuler dans les écrans et l'armure. Cette configuration est en fait la même que le collage solide; le choix privilégié pour les systèmes de câbles sous-marins. Pour tenter de réduire les pertes, l'effet de la torsion de l'armure est inclus dans le modèle du câble au moyen d'un groupe de bobine concernant la deuxième application.

En perspective, et enfin d'obtenir une vision entière sur la modélisation des câbles sous-marins, il serait intéressant de :

- Etudier l'effet capacitif dans le câble sous-marin à haute tension,
- Etudier l'effet thermique dans le câble sous-marin à haute tension.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] <http://boowiki.info/art/electrique/cable-sous-marin.html#Generalit.C3.A0>
- [2] <https://www.rte-france.com/fr/article/quand-l-energie-electrique-passe-sous-la-mer>
- [3] <https://www.scribd.com/document/373264185/UC-XLPE-Catalogue-pdf>
- [4] <http://www.electricalunits.com/XLPE-cable-and-advantages-over-conventional-cables/>
- [5] <http://www.xlpecables.net/Product-knowledge/Advantages-disadvantages-xlpe-cable.html>
- [6] Carlier antoine • vogel camille • alemany juliette ‘synthese des connaissances sur les impacts des cables electriques sous-marins: phases de travaux et d’exploitation’’ 27/03/2019
- [7] www.cic-cables.com
- [8] [Saker balckacem, " calculer des forces Electromagnétiques dans les secteurs Electrique" Mémoire Magister en électromécanique Manière, université du l’Arbi Tébessa – Tébessa, Novembre 2011].
- [9] [Margo Chevert, RP & Assistante Marketing, "COMSOL Dévoile ses Développements Récents en Simulation Multiphysique et Conception d'Applis à la Conférence COMSOL 2016", conférence, 17 octobre 2016].
- [10] [Thèse de doctorat d’universités des sciences et la technologie d’Oran Mohamed boudiaf, KADA BEL Ghitri NAOUEL, « contribution a la modélisation par la méthode des réseaux de RELUCTANCES (MMR) d’une Machine A RELUCTANCE VARIABLE », 2014/2015]
- [11] [Thèses .univ-biskra .dz" chapitre 2 Méthode des éléments finis et Modélisation des plaques "].
- [12] [[Mémoire master, "Modélisation d’une machine asynchrone par logiciel COMSOL - Multiphysics", houssem, université mohamed khaidar- Biskra]
- [13] [Mémoire master," Modélisation d’une machine synchrone à aimant permanent par le logiciel COMSOL-Multiphysics», Rachid, université mohamed khaidar- Biskra]
- [14] [DEBOUB ILYAS, « Eude des dimensionnement d’une machine supra conductrice », mémoire de mastère, université de Mohamed khaidar –biskra]
- [15] [DEBOUBILYAS, « Eude des dimensionnement d’une machine supra conductrice », mémoire de mastère, université de Mohamed khaidar –biskra, 01 juin 2017]
- [16] [[M. ADEL. Kara, "contribution à l’étude d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué, mémoire de magister, université de Sétif 1 UFAS(Algérie), Décembre 2013]

Bibliographie

- [17] [Laidaoui Rym, "modélisation et simulation d'un processus à changement de phase Liquide – Solide", Mémoire de master 2, université BaDji Mokhtar –Annaba, 2016/2017].
- [18] [Thèse de doctorat de l'université du Maine, Abdenour boufermel, «modélisation numérique des phénomènes non linéaires acoustiques en fluide thermo visqueux : application à l'étude des écoulements redressés et des transferts thermiques en résonateurs", 2010].
- [19] [Seif, «Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL -Multiphysics», Mémoire de mastère, université de Mohamed khaider –biskra]
- [20] [Meziani Nedjma, " contribution de l'approche en Déformation Dans La Modélisation des structures A contour circulaire», Mémoire Magister en génie civil, université mohamed khaider- Biskra, 2006].
- [21] [Mémoire master, "Etude numérique d'une conversion naturelle en 2D par la méthode de volumes finis, Salmi somia, Université Mohamed BOUDIAFDE M'sila, 2017/2018].
- [22] [Duc Quang NGUYEN, "Développent d'un outil d'investigation pour le diagnostic des phénomènes hautes fréquences dans des câbles électriques ", Thèse de doctorat en ingénierie, université Paris Tech, l'école nationale supérieure d'Arts et matières spécialité *génie électrique*, Novembre 2013
- [23] [Nadine SAAD, "caractérisation par ondes acoustique des surfaces fonctionnalisées», Thèse de doctorat en ingénierie, université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, septembre 2012]
- [24] www.<Thesis.univ-biskra.dz> « chapitre 2 Méthode des éléments finis et modélisation des plaques 2-1) Méthode des éléments finis : 2-1-1) Généralités.PDF
- [25] [Abdallah ZINE, " détermination du champ de la température dans une cavité pleine en utilisant la méthode mixte Volumes finis _ éléments finis «, mémoire magister en physique, université de Ouargla, 28/10/ 2004]
- [26] [Thèse de doctorat de université institut national des sciences appliquées de Lyon, école doctorale ; mécanique, énergétique, génie civil acoustique, Julien Rétoré, « méthodes éléments finis étendus en espace et en temps : Application A La propagation dynamique des fissures >, Années 2005]
- [27] [NGUYEN Thi Thug Tang, TRINH Thi Huyen, < Eléments finis : du classique au Iso géométrique », mémoire de mastère, université de Nice – Sophia Antipolis, 2011/2012]
- [28] ["Méthode des éléments finis", cours offert à L'université Abderrahmane Mira _Bejaia, Docteur en sciences de l'université A. Mira, Bejaia, Algérie, Docteur en Génie civil Paris-Est, Marne – là – vallée, Fr, 2005-2014]

Bibliographie

- [29] [Mémoire master, "Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL - Multiphysics", houssein, université mohamed khaidar- Biskra]
- [30] [DEBOUB ILYAS, « Eude des dimensionnement d'une machine supra conductrice », mémoire de mastère, université de Mohamed khaidar –biskra]
- [31] [Mémoire master," Modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent par le logiciel COMSOL-Multiphysics», Rachid, université mohamed khaidar- Biskra]