

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

*Présenté par*

**Cylia HAMDIDOUCHE**

**Celia LATTARI**

Thème

## **Modélisation par éléments finis (2D) du procédé de Transfert d'énergie électrique sans fil**

**Application a la recharge dynamique de batterie de voitures  
électriques**

*Mémoire soutenu publiquement le Mardi 25/06/ 2024 devant le jury composé de :*

**Me Nadia RADJA**

MCB, Université Mouloud Mammeri, Présidente

**M. M'hemed RACHEK**

Professeur, Université Mouloud Mammeri, Encadreur

**Me Salma CHERIF**

MAA, Université Mouloud Mammeri, Examinatrice

# Remerciements

**A**u nom d'Allah le plus grand merci lui revient de nous avoir guidés vers le droit chemin, et de nous avoir aidés tout au long de nos années d'études.

**T**oute notre gratitude et remerciements pour notre encadreur Mr. M'hemed RACHEK professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, d'avoir proposé ce thème fascinant, pour son expertise ainsi que tout le soutien et les conseils qu'il nous a fourni tout au long de ce travail.

**J**e remercie les membres de juré pour avoir accepté de jurer ce travail.

**E**nfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce projet de fin d'étude.

## Dédicace

Je dédie chaleureusement ce travail:

À la lumière de ma vie, mes chers parents, qui m'ont encouragé et accompagné tout au long de mon parcours scolaire et universitaire. Ce travail est le fruit de vos sacrifices.

À mon époux, qui m'a toujours donné la force et le soutien pour continuer mes études.

À ma belle princesse Arinas.

À mes chères sœurs Tinhinane, Lissia, Farah et à mon frère Yanis.

À ma belle-mère et toute la famille de mon mari.

À ma binôme ainsi à tous mes ami(e)s.

*Cylia*

Avec l'expression de ma reconnaissance, Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mon défunt père qui est parti trop tôt,

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, A ma chère Maman, pour ses sacrifices et encouragements tout au long de mon parcours scolaire et universitaire,

A mon cher frère

A ma très chère tante, pour ses précieux conseils et encouragements,

A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines pour leurs soutiens et encouragements

A toute ma famille maternelle et paternelle,

A tous mes ami(e)s, Ainsi ma binôme avec laquelle j'ai partagé ce travail.

*Celia*

# **Sommaire**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

<b>Introduction général .....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Etat de l'art sur le transfert d'énergie sans fil (sans contact)</b>	
I.1. Introduction .....	03
I.2. Historique .....	03
I.3. Principe du transfert d'énergie sans fil .....	06
I.4. Les techniques en champs proches pour le transfert d'énergie sans fil .....	07
I.4.1 Transfert par induction magnétique .....	07
I.4.2. Le couplage magnétique résonant.....	07
I.4.3. Transfert d'énergie par couplage capacitif.....	08
I.5. Les techniques en champs lointains pour le transfert d'énergie sans fil.....	09
I.5.1 Ondes radio et micro-ondes. ....	09
I.5.2. Faisceaux lasers .....	09
I.6. Comparaison des méthodes de transfert d'énergie sans fil.....	10
I.7. Applications de la technologie de transfert d'énergie sans fil.....	12
I.7.1. Domaine domestique .....	12
I.7.2. Domaine médical .....	13
I.7.3. Domaine militaire .....	14
I.7.4. Domaine spatial .....	14
I.7.5. Application industrielle du TESF .....	15
I.7.5.a. Chauffage par induction.....	15
I.7.5.b. Magnétoformage .....	16
I.7.6. Domaine du transport automobile .....	17
I.7.6.a. Intérêt de la recharge sans fil des batteries .....	17
I.7.6.b. Technologie des bobines émettrices et réceptrices .....	18
I.7.6.c. Recharge statique sans fil .....	19
I.7.6.d. Recharge dynamique sans fil .....	20
I.8. Avantages et inconvénients de transfert d'énergie sans fil.....	22
I.8.1.Avantages.....	22
I.8.2. Inconvénients .....	23
I.9. Conclusion .....	23
Références.....	24

**Chapitre II : Modélisation du TESH par induction électromagnétique**

II.1. Introduction .....	27
II.2. Formules de base de l'électromagnétisme .....	27
II.2.1. Equations de Maxwell .....	27
II.2.2. Relation constitutives des matériaux .....	28
II.2.3. Condition de passages .....	29
II.2.4. Conditions aux limites .....	29
II.3. Approches de modélisation du TESH .....	30
II.3.1. Principe de modèle analytique du TESH .....	30
II.3.2. Principe de modèle semi analytique .....	30
II.3.3. Principe de modèle numérique .....	31
II.4. Modèle d'équation aux dérivées partielles électromagnétique dédiée au TESH .....	31
II.4.1. Topologie du dispositif de base du TESH par induction électromagnétique .....	31
II.4.2. Modèle d'équation électromagnétique général .....	32
II.4.2.1 .Modèle électromagnétique statique .....	32
II.4.2.2. Modèle dynamique .....	32
II.4.3 .Modèle magnétodynamique du TESH .....	33
II.5. Calcul des inductances propres et mutuelles .....	35
II.6. Conclusion .....	37
Références .....	38

**Chapitre III : Formulation finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique  
du TESH.**

III.1. Introduction .....	39
III.2. Présentations de la méthode des éléments finis.....	39
III.2.1. La méthode des éléments finis .....	39
III.2.2. Principe.....	39
III.2.3. Types d'éléments finis.....	41
III.2.4. Discrétisation ou maillage .....	42
III.2.5. Approximation .....	42
III.2.6. Formulation intégrale des EDP .....	43
III.2.6.1. La Méthode variationnelle.....	43
III.2.6.2. Formulation résidus pondérés .....	44
III.2.6.3. Calcul de la fonction d'approximation .....	45
III.2.7. Assemblage des matrices élémentaires .....	46

III.2.8. Avantages et inconvénients de la MEF .....	47
III.2.8.1. Avantages .....	47
III.2.8.2 Inconvénients .....	47
III.3. Formulation éléments finis du modèle électromagnétique du TESH .....	47
III.3.1. Equations aux dérivées partielles 2D(r,z).....	47
III.3.2. Formulation éléments finis du modèle 2D(r,z) .....	49
III.4. Expressions de calcul des grandeurs électromagnétique globales .....	51
III.4.1. Calcul des flux magnétiques.....	51
III.4.2. Calcul de la force électromotrice. ....	51
III.4.3. Calcul des énergies électriques et magnétique .....	52
III.4.4. Calcul des inductances propres et mutuelles .....	52
III.5. Conclusion .....	54
Références.....	56
<b>Chapitre IV Simulation numériques de la recharge statique et dynamique sans fil de batteries de voiture électriques</b>	
IV.1. Introduction.....	57
IV.2. Présentation du système expérimental de TESH utilisé pour une recharge statique ..	57
IV.2.1. Dispositif (1) d'étude .....	57
IV.2.2. Mesure expérimentale de la mutuelle inductance .....	58
IV.2.3. Etude du modèle sous MATLAB .....	59
IV.3. Présentation du système d'étude de TESH pour la recharge de batteries de voitures électrique.....	62
IV.3.1. Dispositif (2) d'étude .....	62
IV.4. L'étude du modèle sous MATLAB.....	63
IV.4.1. Les caractéristiques du dispositif .....	63
IV.4.2. La définition de la géométrie .....	64
IV.4.3. Création du maillage .....	64
IV.5. TESH bobines spirales plates pour la recharge statique .....	65
IV.6. TESH bobines spirales plates multi-spires pour la dynamique .....	67
IV.6.1. Mutuelle inductance pour un entrefer constant et un désalignement variable ...	67
IV.6.2. Mutuelle inductance pour un entrefer constant et un déplacement de la bobine réceptrice .....	69
IV.7. Conclusion.....	71
Référencés.....	72
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>73</b>

<b>Figure I.1</b> : La bobine de Tesla .....	4
<b>Figure I.2</b> : La tour " Wardencllyffe" .....	4
<b>Figure I.3</b> : Schéma du principe du transfert d'énergie sans fil .....	6
<b>Figure I.4</b> : Schéma de système TESF par induction magnétique .....	7
<b>Figure I.5</b> :Exemple de schéma de système TESF par résonance magnétique .....	8
<b>Figure I.6</b> : Schéma du système TESF par couplage capacitif.....	8
<b>Figure I.7</b> : Schéma de principe d'un système de transmission de puissance par micro-ondes.....	9
<b>Figure I.8</b> : Avion alimenté par faisceaux lasers.....	10
<b>Figure I.9</b> : Recharge par induction des Smartphones .....	12
<b>Figure I.10</b> : Recharge sans fil des brosses à dents .....	12
<b>Figure I.11</b> : Stimulateur cardiaque sans fil .....	13
<b>Figure I.12</b> : Transmission d'énergie sans fil à partir d'« avions laser » étudié par la DARPA .....	14
<b>Figure I.13</b> : Fonctionnement d'une centrale orbitale.....	15
<b>Figure I.14</b> : Schéma de principe de chauffage par induction.....	16
<b>Figure I.15</b> : Procédé du magnétoformage .....	17
<b>Figure I.16</b> : Recharge de batterie pour véhicule électrique : Avec et sans câble.....	18
<b>Figure I.17</b> : Différentes formes de bobines .....	18
<b>Figure I.18</b> :Fil de Litz .....	19
<b>Figure I.19</b> : Recharge statique .....	20
<b>Figure I.20</b> : Une portion de route automatique.....	20
<b>Figure I.21</b> : Exemple d'une voiture électrique chargée par induction dynamique.....	21
<b>Figure I.22</b> : Différents types de pistes :(a) piste à émetteur segmenté, (b) piste à émetteur unique .....	22
<b>Figure II-1</b> : Topologie type du TESF par induction .....	28
<b>Figure II-2</b> : Conditions de passage du milieu 1 vers le milieu 2.....	29
<b>Figure II-3</b> : Schéma d'un coupleur magnétique .....	32
<b>Figure II.4</b> : Schéma d'un système de TESF montrant les $\Phi$ , I et B des bobines .....	36
<b>Figure III.1</b> : Concept de base de la méthode des éléments finis .....	40
<b>Figure III.2</b> : Structure d'analyse en utilisant l'approche numérique .....	41
<b>Figure III.3</b> : Types d'éléments finis .....	41
<b>Figure III.4</b> : Élément triangulaire type 2D (x, y) .....	45

<b>Figure III.5:</b> Schéma d'un système de TESF montrant les $\varphi$ , I et B des bobines.....	51
<b>Figure III.6 :</b> Schéma montre le potentiel vecteur magnétique au milieu des triangles ....	54
<b>Figure IV.1:</b> Bobines plates à écartement variable .....	57
<b>Figure IV.2 :</b> Expérience réalisée pour un entrefer variable et un désalignement nul .....	58
<b>Figure IV.3 :</b> Maillage du dispositif (1) de TESF .....	59
<b>Figure IV.4 :</b> Module du potentiel vecteur magnétique pour un entrefer inter-bobines de 20mm.....	60
<b>Figure IV.5 :</b> Vecteur module induction magnétique .....	60
<b>Figure IV.6 :</b> Mutuelle inductance entre bobines circulaire multi-spires avec la variation de l'entrefer .....	61
<b>Figure IV.7 :</b> Tension induite dans la bobine réceptrice .....	62
<b>Figure IV.8:</b> Deux bobines spirales circulaires multi-spires.....	62
<b>Figure IV.9:</b> Le fil AWG 8 utilisé dans le dispositif d'étude .....	63
<b>Figure IV.10:</b> La géométrie et les domaines d'étude.....	64
<b>Figure IV.11 :</b> le maillage des bobines plates spirales (13085 nœuds, 26090 triangles)...	64
<b>Figure IV.12:</b> Configuration 2D des bobines spirales plates avec un désalignement nul.....	65
<b>Figure IV.13:</b> L'induction magnétique du système étudié.....	65
<b>Figure IV.14:</b> Module du potentiel vecteur magnétique .....	66
<b>Figure IV.15:</b> Mutuelle inductance entre bobines circulaires multi-spire avec un désalignement nul.....	67
<b>Figure IV.16:</b> Mutuelle inductance entre deux bobines circulaires plates multi-spires pour entrefer constant et un désalignement variable .....	68
<b>Figure IV.17:</b> Module du potentiel vecteur magnétique .....	68
<b>Figure IV.18:</b> Induction magnétique pour un désalignement $=2.5$ et un entrefer fixe.....	69
<b>Figure IV.19:</b> Configuration géométrique du système TESF à bobines plates avec un entrefer constant et un déplacement de la bobine réceptrice .....	70
<b>Figure IV.20:</b> Mutuelle inductance à bobines plates avec un déplacement de la bobine réceptrice .....	70

<b>Tableau I.1</b> : Résumé des principales technologies de transfert d'énergie sans fil .....	11
<b>Tableau IV.1</b> : Paramètres des bobines émettrices et réceptrices .....	58
<b>Tableau IV.2</b> : Paramètres des bobines émettrices et réceptrices .....	63

## Résumé

Ce projet s'est focalisé sur les fondements de la modélisation électromagnétique dédiée à l'étude des systèmes de Transfert d'Energie Sans Fil (TESF) par induction magnétique dédié a la recharge statique/dynamique de batterie de voitures électriques. A partir des équations générales de Maxwell, les modèles magnétostatique et magnétodynamique harmonique d'Equations aux Dérivées Partielles (EDP) en coordonnées cylindriques 2D exprimées en potentiel vecteurs magnétique sont mis en œuvre. La Méthode des Eléments Finis (MEF) sous Matlab est utilisée pour la résolution numérique des (EDP) dans le cadre de géométries multi-spires des bobines émettrice et réceptrice, pour déterminer les grandeurs locales tel que le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, et la densité de courant induite, à partir desquels seront déduits les grandeurs électriques et magnétiques globales (flux magnétique, courant induit, inductances mutuelle, Force électromotrice induite (f.e.m) aussi bien pour la recharge statique ( variations verticale de l'entrefer) que pour la recharge dynamique (variation du désalignement horizontal latérale). La comparaison des résultats de calcul par la (MEF) et ceux expérimentaux fait ressortir une bonne concordance, permettant ainsi de valider les codes de calcul implémentés.

**Mots clés :** Transfert d'énergie sans fil (TESF), Modèles magnétostatique et magnétodynamique, inductance mutuelle, Méthode des Éléments Finis, charge statique et dynamique, bobines filaires spirales multi-spires.

## Abstract

This project focused on the foundations of electromagnetic modeling dedicated to the study of wireless Energy Transfer (WET) systems by magnetic induction dedicated to the static /dynamic charging of electric car batteries. From Maxwell's general equations, the magneto-static and harmonic magneto-dynamic models of Partial Differential Equations (PDE) in 2D cylindrical coordinates expressed in magnetic vector potential are implemented .The Finite Element Method (FEM) in MATLAB is used for the numerical resolution of (PDE) in the context of multi-turn geometries of the transmitting and receiving coils ,to determine local quantities such as the magnetic vector potential ,the magnetic induction ,and the induced current density ,from which the overall electrical and magnetic quantities will be deduced (magnetic flux, inducted current ,mutual inductances ,induced electromotive force both for static recharging (vertical variations of the air gap) and for dynamic recharge (variation of lateral horizontal misalignment ) The comparison of the calculation results by

the(FEM) and the experimental ones shows a good agreement ,thus making it possible to validate the calculation codes implemented .

**Keywords:** Wireless energy transfer, magneto-static and magneto- dynamic models, mutual inductance, Finite Elements Method (FEM), static and dynamic charging, pancake coils.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'évolution rapide de la technologie a ouvert de nouvelles perspectives pour la mobilité durable, les Véhicules Electriques (VE) sont au cœur de cette transition vers un avenir plus écologique. Les véhicules électriques alimentés par des batteries offrent une alternative prometteuse aux véhicules à combustion interne en raison de leur faible impact environnemental et leur performance améliorée.

Cependant, l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les utilisateurs VE est le processus de recharge des batteries. Les méthodes traditionnelles de recharge qui impliquent l'utilisation de câbles et de bornes de recharge peuvent être contraignantes et limitent la flexibilité d'utilisation des VE. Pour pallier à ces limites, l'idée d'une recharge sans fil à énergie.

Le transfert d'énergie sans fil (TESF) permet la transmission d'énergie électrique entre deux systèmes sans aucune connexion matérielle entre eux. Cette technique n'est pas une idée nouvelle. En effet début du 20ème siècle, Nikola Tesla avait déjà effectué une transmission d'électricité sans fil, En exploitant le phénomène l'induction électromagnétique. Il avait découvert que l'électricité pouvait être transmise à travers l'air mais aussi la terre. Au cours de ses recherches, il avait réussi à allumer des lampes à une distance moyenne [3].

La recharge sans fil pour les VE utilise des bobines réceptrices placées sous le véhicule et des bobines émettrices montées au sol. Il existe deux types de recharge sans contact : La recharge statique et la recharge dynamique. La recharge statique permet au véhicule de se recharger sans contact à l'arrêt, ce qui présente l'avantage de ne pas manipuler des câbles d'alimentation contrairement à une borne de recharge classique. Ce type de recharge permet donc un confort d'utilisation et l'amélioration de l'esthétique des voiries avec des bornes plus discrètes. Le deuxième type de recharge sans contact est la recharge « dynamique ». Le terme dynamique s'applique au véhicule qui se recharge en roulant. Ceci permet donc de le recharger sans être dans l'obligation de s'arrêter.

L'objet de notre travail concerne les principes de la modélisation électromagnétique qui serviront à l'étude d'un système de Transmission d'Energie Sans Fil dédié à la recharge dynamique de batterie de voiture électrique. La modélisation est conduite à travers la mise en Equations aux Dérivées Partielles (EDP) en coordonnées cylindriques 2D qui sont exprimées en potentiel vecteur magnétique en régime magnétostatique et magnétodynamique harmonique. La méthode des éléments finis sous MATLAB est utilisée pour la résolution

## Introduction générale

numérique des EDP. Le modèle numérique est appliqué à des bobines plates circulaires multi-spires formant des bobines que l'on discrétise géométriquement. La finalité étant d'étudier un processus de recharge dynamique de batterie en considérant une bobine réceptrice et plusieurs bobines émettrices. La grandeur principale d'investigation étant l'inductance mutuelle en faisant varier l'entrefer (distance entre bobines émettrices et réceptrices vertical) et la variation de désalignement axial (horizontale) des bobines.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres précédés d'une introduction général et clôturé par une conclusion générale.

Le premier chapitre consiste en une présenter d'un état succinct du TESH d'un bref historique et principe global du TESH, ses différentes technologies ainsi que les divers domaines d'applications.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude des différentes approches de modélisations électromagnétique (approche analytique/numérique) qui permettront la modélisation du système de TESH.

Le troisième chapitre présente les différentes modèles d'équation magnétostatique magnétodynamiques 2D qui régissent notre système. L'application de la méthode de résolution (Eléments finis) aux équations aux dérivées partielles en potentielle vecteur magnétique ainsi que les outils nécessaires pour l'application du modèle ainsi le calcul des différentes grandeurs globales ( $\Phi$ ,  $L$ ,  $M$ ): flux magnétique  $\varphi$ , inductance propre  $L$ , et mutuelle  $M$ .

Le quatrième et dernier chapitre clôturera l'étude avec une application du modèle d'un système de TESH, ou on a fait une application expérimentale sur la recharge statique et des simulations pour le calcul des mutuelles inductances pour des différentes valeurs d'entrefer et désalignement pour les recharges statiques et dynamiques sous environnement MATLAB, ainsi que la discussion des résultats obtenus.

Le mémoire s'achève avec une conclusion générale et des perspectives.

**Chapitre I**

**Etat de l'art des dispositifs du Transfert  
d'Energie sans fil "TESF"**

## **I. Introduction**

Le transfert d'énergie sans fil (TESF), ou encore le transfert d'énergie sans contact englobe diverses techniques permettant de transmettre de l'énergie électrique à distance sans connexion physique directe. En effet les domaines de la récupération et du transfert d'énergie suscitent actuellement un intérêt majeur au sein de la communauté de recherche. Ainsi, on observe une diversité d'applications exploitant ces systèmes : domestique, santé, militaire, transport, l'industrie automobile ou bien encore surveillance de phénomène environnementaux.

Le nombre d'appareils électriques embarqués exploités durant nos quotidien saugmente de manière constante depuis la fin de 20ème siècle, malgré la contrainte de la courte durée de vie des batteries /piles. Cela a induit une prolifération des chargeurs et câbles d'alimentation, restreignant ainsi la mobilité offerte par les appareils.

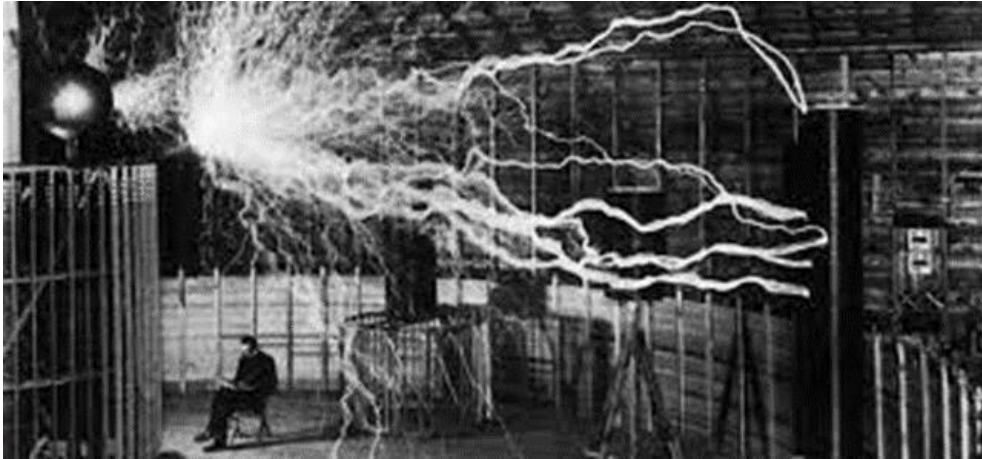
Beaucoup d'effort de recherche ont été dédiés à résoudre ce problème, et le transfert d'énergie sans fil est devenu une solution évidente pour y parvenir.

### **I.2. Historique**

Le transfert d'énergie sans fil trouve ses origines premières lorsque Hans Christian Oersted (1777-1851) découvre qu'un courant électrique circulant dans un conducteur métallique génère un champ magnétique autour de lui. Le comportement de ce champ magnétique fut ensuite modélisé par les lois d'Ampère, Biot -Savart et Faraday mais ses propriétés furent définitivement établies lorsque Maxwell (1831-1879) démontra comment les champs électrique et magnétique sont créés et se répartissent dans l'espace et le temps ainsi que l'action qu'ils ont les uns sur les autres, en relation avec les sources électrique et magnétique [1].

La relation entre l'électricité et le magnétisme fut établie et donnera ainsi naissance à l'électromagnétisme par la suite, Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) mettra en place en 1888 un système utilisant des bobines d'inductions connectées à un générateur alternatif pour transmettre de l'électricité a une bobine de réception située à une distance toute proche, permettant ainsi de confirmer l'existence du rayonnement électromagnétique [1][2].

La première expérience de transmission d'énergie sans fil montrée sur la (fig I.1) fut réalisée par le physicien Croate Nikola Tesla (1856-1943) à Colorado Springs, en 1889. Il s'intéressa spécialement au phénomène de résonance et essaya de l'appliquer à la TEF [3].



**Figure I.1:** La bobine de Tesla [3].

Il avait imaginé l'utilisation des ondes électromagnétiques pour acheminer l'électricité n'importe où dans le monde sans lignes. Il construisit une énorme bobine, résonnant à 150 KHz et alimentée avec une puissance de 300KW, en haut d'une tour. Cependant, ils n'existent malheureusement pas de résultats clairs sur la puissance rayonnée et sur celle reçue loin de la source. Les travaux de Tesla ne se sont arrêtés à Colorado Springs, au début du siècle dernier, Tesla construisit une tour de transmission (fig I.2) à Long Island (New-York) le projet fut abandonné peu avant sa finalisation à cause de problèmes financier [4].



**Figure I.2:** La tour " Wardencllyffe" [3].

Dans les années 1960, William C. Brown (1916-1999) a commencé à mener des expérimentations de transmission d'énergie sans fil avec des tubes micro-ondes. Il a été également le premier à développer en 1963 une antenne rectificatrice ou « rectenna » pour la réception des ondes électromagnétiques et leur conversion en tension continue (DC) [5].

En 1964 Brown réalise la conversion d'une énergie microondes en électricité par le biais d'une rectenna (antenne radiofréquence couplée à un redresseur de tension). Il alimenta ainsi un modèle d'hélicoptère électrique d'un poids de 2.3 kg pendant dix heures et volant jusqu'à une altitude de 15 m. Ceci démontra l'utilité du transfert d'énergie micro-ondes et lança ainsi plusieurs campagnes de recherches pour transmettre de fortes puissances sur de longues distances [2].

En 1969, Peter Glaser (1923-2014) présente le concept de SPS (Solar Power System). Ce projet pourrait présenter une alternative de problèmes énergétiques que connaît la planète, mais aussi comme source d'énergie propre et écologique. Le système issu de ce projet comporte un satellite en orbite géostationnaire qui capte l'énergie solaire, cette dernière est convertie en énergie microonde à 2.45 GHz et envoyée sur terre [4].

En 1975, l'expérimentation terrestre de Goldstone menée par Raytheon représente un tournant historique dans le domaine de la TEF. Elle a contribué de manière considérable à la validation du concept et à la crédibilité du projet SPS. Avec un système pilote, une puissance continue de 30 kW a été récupérée et un rendement global de 54% a été mesuré et certifié. La distance entre les antennes d'émission et de réception est de 1.6 km [4].

A partir des années 1980, les problématiques de TEF par micro –ondes ont suscité un réel intérêt au Japon, où des applications pratiques ont été démontrées en utilisant des technologies provenant des domaines de télécommunication et télédétection radar [7]

En 2007, la technologie Witricity développée par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) l'institut de recherche américain démontre qu'il est possible de réaliser un transfert d'énergie par induction magnétique de manière pratique et efficace en termes de rendement énergétique. En utilisant des antennes hélicoïdales, une puissance de 60 Watts fut transférée sur une distance de 2 m [2].

Dans une optique d'uniformisation de ces systèmes, et ainsi permettre une compatibilité entre eux, des consortiums voient le jour et des normes commencent à

apparaître. La première est la norme Qi proposée par le Wireless Power Consortium (WPC) en 2009, puis suivront la norme Rezence proposée par l'Alliance for Wireless Power (A4WP) et la norme Power Matter Alliance (PMA) réservée au continent Nord-Américain qui fusionneront ensemble en 2015. En effet, il est plus intéressant pour les industriels souhaitant toucher un maximum de consommateurs de commercialiser des systèmes compatibles entre eux plutôt que leurs propres systèmes propriétaires [2].

### I.3. Principe de transfert d'énergie sans fil

La transmission d'énergie électrique sans fil consiste à acheminer l'énergie d'un point à un autre sans l'utilisation de la matière conductrice. Le système de TESF comprend une bobine émettrice et l'autre réceptrice. Le circuit primaire est alimenté sous la tension alternative, un champ magnétique est créé par la circulation d'un courant alternatif dans la première bobine. Lorsque ce champ atteint la deuxième bobine, il induit une tension dans cette dernière. Cette tension permet d'alimenter ou recharger un appareil connecté à la bobine (fig I.3).

Ce phénomène électromagnétique présente deux différentes approches : la première est en champ proche qui peut utiliser les principes de l'induction magnétique, le couplage magnétique résonant ou bien le couplage capacitif tandis que la deuxième utilisera un champ électromagnétique radiofréquence, (lointain) plus ou moins directif [2].

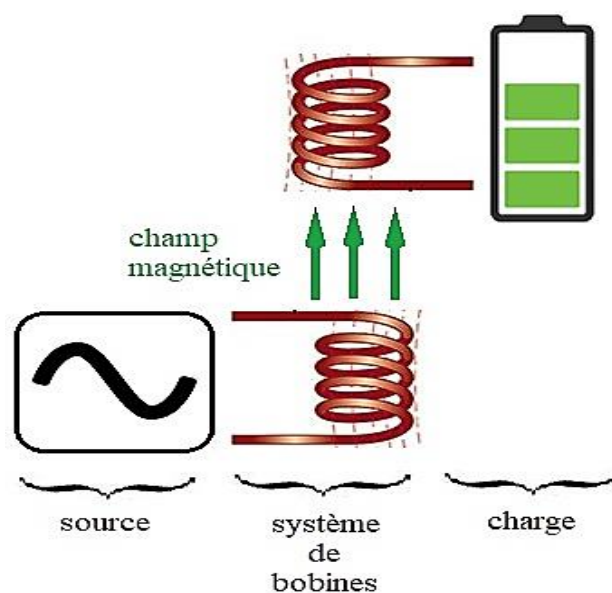


Figure I.3: Schéma de principe de la TESF.

## I.4. Les Techniques en champs proches pour le transfert d'énergie sans fil

### I.4.1. Transfert par induction magnétique

Cette technologie est basée sur le principe de l'induction électromagnétique entre deux bobines, expérimentée en 1831 par Michael Faraday. Une transmission d'énergie inductive apparaît lorsqu'une bobine primaire génère un fort champ magnétique variant à proximité d'une bobine secondaire (fig I.4). Ces deux bobines vont se coupler magnétiquement et ainsi échanger un flux magnétique, une tension va se créer au bornes de la deuxième bobine. Cette tension entrainera donc la circulation d'un courant à travers la bobine réceptrice qui servira à alimenter la batterie d'un appareil [7].

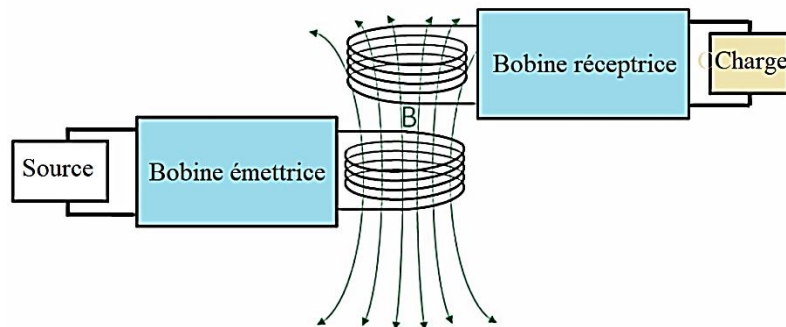


Figure I.4: Schéma de système TESH par induction magnétique [26].

### I.4.2. Le couplage magnétique résonant

La technique implique l'utilisation d'une bobine et d'un condensateur en tant que résonateur, ou l'énergie électrique est transmise par résonance électromagnétique entre la bobine de l'émetteur et celle du récepteur (fig I.5). En ajustant la fréquence de résonances des deux bobines avec précision, la transmission d'énergie peut s'effectuer sur de longues distances malgré un faible couplage magnétique entre elles [7]. Dans la plupart des systèmes inductifs modernes, on utilise un couplage inductif résonant qui augmente l'efficacité en employant des circuits résonants. Cette approche permet d'atteindre des rendements élevés sur des distances plus importantes que le couplage inductif non résonant. La technologie de résonance est largement intégrée dans les systèmes d'alimentation sans fil inductifs actuels.

Un avantage significatif sur le plan environnemental et économique de l'alimentation sans fil pour de petits appareils tels que les horloges, les radios, les lecteurs de musique et les télécommandes est sa capacité à réduire de manière significative les 6 milliards de piles jetées chaque année, qui représentent une importante source de déchets toxiques et de contamination des eaux souterraines [6].

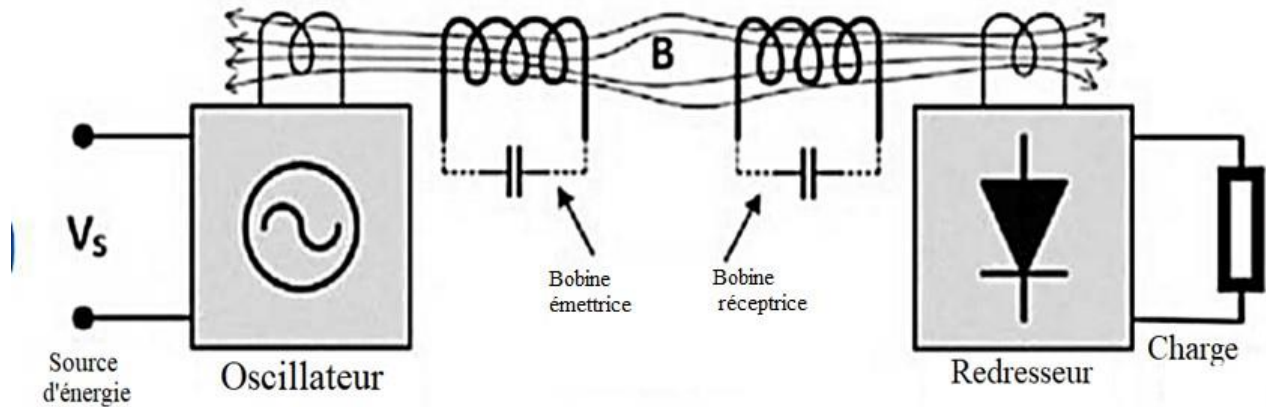


Figure I.5: Exemple de schéma de système TEF par résonance magnétique [27].

### I.4.3. Transfert d'énergie par couplage capacitif

Le principe du chargement capacitif est d'utiliser le champ électrique généré entre deux plaques électriquement conductrices, du côté émetteur et du côté récepteur pour transférer l'énergie (fig I. 6). Cette méthode n'utilise pas de bobines comme le cas des systèmes TEF de type magnétique. L'énergie est transmise via un champ électrique d'induction généré par le couplage de deux plaques. Le transfert d'énergie capacitif est utilisé dans les applications de petite taille (millimétriques ou micrométriques) telles que les applications biomédicales.

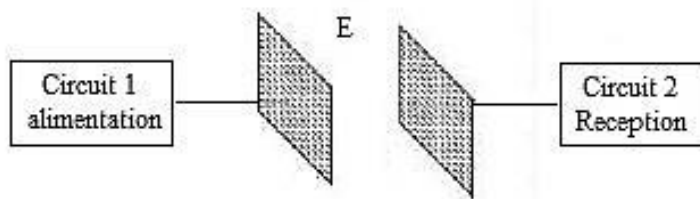


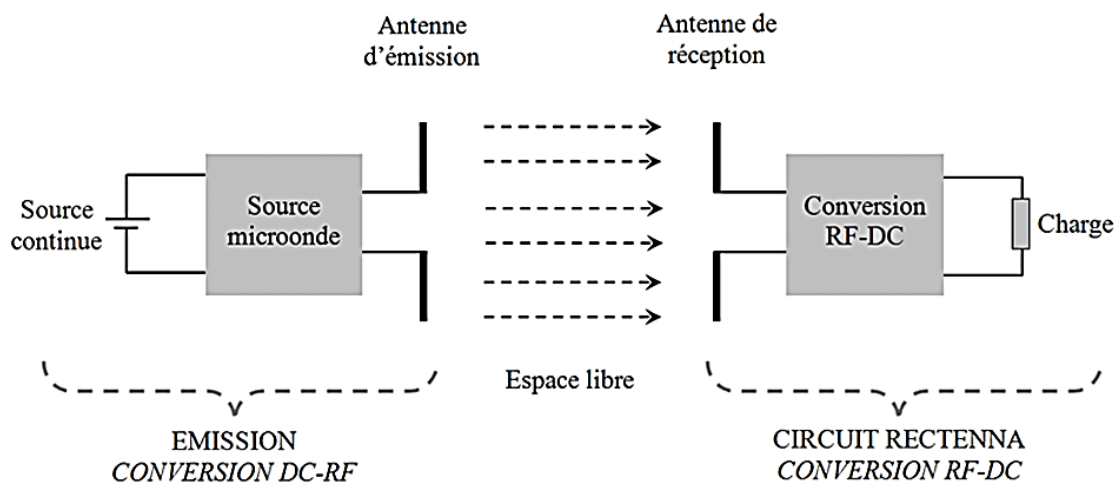
Figure I. 6 : Schéma du système TEF par couplage capacitif

## I.5. Les techniques en Champ lointain pour le transfert d'énergie sans fil

### I.5.1. TESH par micro –ondes

Le transfert d'énergie à longue distance par micro-ondes repose sur l'utilisation d'ondes électromagnétiques à des fréquences élevées, généralement de 300 MHz à 300 GHz. D'autres fréquences, telles que les infrarouges ou les rayons X, peuvent également être utilisées, mais leur application est limitée en raison des préoccupations de sécurité pour l'utilisateur. Ce système de transfert d'énergie se compose de trois éléments : l'émission d'une onde transportant l'énergie à transmettre, la propagation de cette onde, et la réception et la conversion de l'onde en courant électrique exploitable (fig I.7) [2].

En août 2021, des recherches publiées à l'université de Tsukuba (Japon) de puissance sans fil par ondes radiofréquences est très efficace pour alimenter les fusées lancées dans l'espace. Cette innovation permet d'alléger le poids des fusées, dont 90% de la masse est représentée par le carburant [9].



**Figure I. 7:** Schéma de principe d'un système de transmission de puissance par micro-ondes[4].

### I.5.2. TESH par faisceaux Lasers

Avec cette approche, dans un premier temps (émetteur), l'énergie est convertie en ondes électromagnétiques par laser et transmise de l'autre côté (récepteur). Dans la partie réceptrice, l'énergie reçue des faisceaux est à nouveau convertie en courant continu. Cette

méthode peut être utilisée sur de longues distances sans aucun bruit et avec un équipement réduit [10].

Une étude menée par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en 2003 a permis d'utiliser un faisceau laser pour alimenter à distance un modèle réduit d'avion. L'avion était équipé de cellules photovoltaïques qui collectaient l'énergie transmise par le laser (fig I.8) [11].

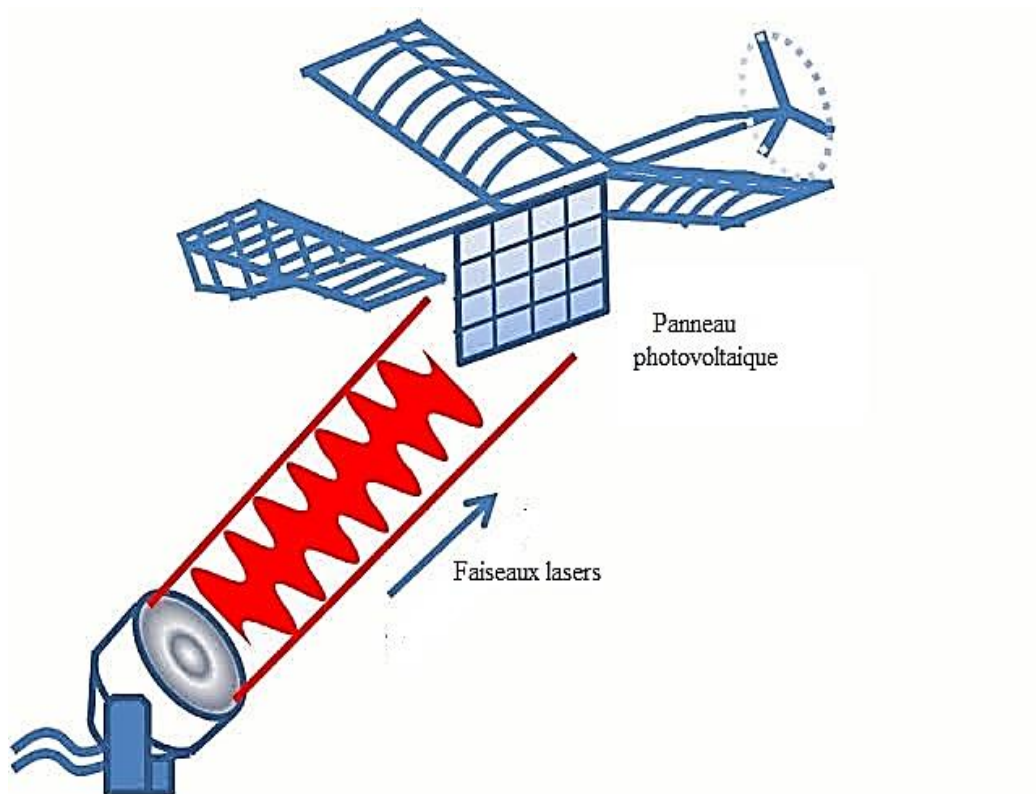


Figure I. 8 : Avion alimenté par faisceaux lasers [31]

## I.6. Comparaison des méthodes de transfert d'énergie sans fil

Les principales technologies de transfert d'énergie sans fil sont résumées par le tableau I.1 à travers leurs avantages et inconvénients :

<b>Technologies de (TESF)</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Distance de chargement</b>
<b>Couplage magnétique inductif</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complexité des systèmes faible</li> <li>- Interactions avec le corps humain faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distances de transmission faibles</li> <li>- Dégagement de chaleur</li> <li>- Nécessité pour les antennes Tx et Rx d'être alignées</li> </ul>	De quelques millimètres a quelques centimètres
<b>Couplage magnétique résonnant</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- possibilité de charger plusieurs Récepteurs en même temps</li> <li>- Efficacité énergétique élevée même si les antennes Tx et Rx ne sont pas alignée</li> <li>- complexité des systèmes Moyenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distances de transmission limitées</li> <li>- Niveau d'exposition potentiellement dangereux pour le corps humain</li> </ul>	De quelques centimètres a quelques mètres
<b>Rayonnement RF</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance transférées importantes</li> <li>- Possibilité d'être adapté avec les systèmes de télécommunication Rf</li> <li>- Distances de transmission Elevées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Niveau d'exposition potentiellement dangereux pour le corps humain</li> <li>- Nécessité pour les antennes Tx et Rx d'être alignées</li> </ul>	Plusieurs dizaines de mètres à plusieurs kilomètres

**Tableau I.1** : Résumé des principales technologies de transfert d'énergie sans fil [2].

## I.7. Application de la technologie de transfert d'énergie sans fil

### I.7.1. Domaine domestique

Le transfert d'énergie sans fil est largement utilisé pour la recharge sans fil des appareils électroniques tels que : Smartphones, tablettes, et brosse à dents comme est indiqué sur les (fig I.9) (fig I.10). Cette technologie offre une commodité accrue en permettant la recharge sans câbles avec des socles de recharge installés dans les endroits pratique de la maison [5].



Figure I. 9 : Recharge par induction des Smartphones [28].



Figure I. 10 : Recharge sans fil des brosses à dents [29].

Les appareils électroménagers tel que les mixeurs ou cuiseurs a riz peuvent être alimentés sans fil grâce à des émetteurs intégrés dans les plans de travail ou tables de cuisine, jusqu'à une distance de 10 cm. Ces émetteurs pourraient permettre d'associer la TESH à un appareil avec un système classique cuisson par induction [7].

### I.5.3. Domaine Médical

La recharge et le fonctionnement d'appareils et de dispositifs divers à distance représente un grand intérêt dans le domaine médical. Dans le cadre de l'alimentation de systèmes biomédicaux implantés à l'intérieur du corps humain tels que les pacemakers, neurostimulateurs et capteurs médicaux ; un changement de batteries requiert une intervention chirurgicale coûteuse, complexe, et potentiellement dangereuse (fig I.11).

Afin de remplacer les batteries pour l'alimentation de ces systèmes, une solution prometteuse consiste à transférer l'énergie sans fil à un récepteur placé dans le corps humain. Un circuit électronique connecté à ce récepteur permettra le conditionnement ainsi que le stockage de l'énergie électrique dans un condensateur ou dans une batterie rechargeable. Pour assurer un transfert sûr et efficace d'énergie à travers le corps humain, il est préférable d'utiliser des ondes magnétiques basse-fréquences. En effet un système de TESH basse-fréquence a été développé au laboratoire SYMME (Laboratoire Système et Matériaux pour la mécatronique, France). Ces projets cherchent à réduire les risques pour la santé et d'améliorer la qualité de vie de la personne concernée [13].



Figure I.11 : Stimulateur cardiaque sans fil [16].

### I.7.3. Domaine Militaire

Le secteur militaire s'est emparé de la technologie de transfert d'énergie sans fil, notamment développer une nouvelle manière de recharger les drones de combat. Actuellement, il y a un certain nombre de projets militaire en cours d'évaluation tels que les robots mobiles sans pilote et aussi dans les gilets du soldat au casque et du casque à lunette optique.

De plus La DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), l'agence américaine de défense travaille sur un programme appelé "Relais d'énergie sans fil optique persistant " visant à concevoir des émetteurs volants qui se déplacent dans le ciel pour accélérer le passage d'énergie à travers des faisceaux Laser. Cela permettrait à la création d'un « Internet énergétique sans fil » pour la transmission sans fil de l'énergie n'importe où, à la vitesse de la lumière [15].



**Figure I.12 :** Transmission d'énergie sans fil à partir d'avion laser étudié par la DARPA [15].

### I.7.4 : Domaine spatial

Face à la demande croissante en électricité à l'échelle mondiale, des ingénieurs américains ont envisagé la conception d'une centrale solaire en orbite. Ce concept implique l'envoi d'une station équipée de panneaux solaires pour générer de l'énergie et la transférer sur Terre via une transmission sans fil.

En 2023, une équipe de chercheurs du California Institute of Technology (Caltech) procède au lancement réussi d'un satellite conçu pour tester la faisabilité de capter l'énergie solaire dans l'espace (fig I.13). Le SSPD (Space Solar Power Demonstrator) a mis en œuvre le dispositif MAPLE pour à mener bien une mission expérimentale dont ils réussirent à transmettre environ 100 milliwatts d'énergie solaire captée par un satellite en orbite, avec une réception effective de 1 milliwatt sur Terre. Bien que des défis techniques restent à surmonter, cette première réussite est un pas important vers un avenir durable alimenté par l'énergie solaire spatiale [17].

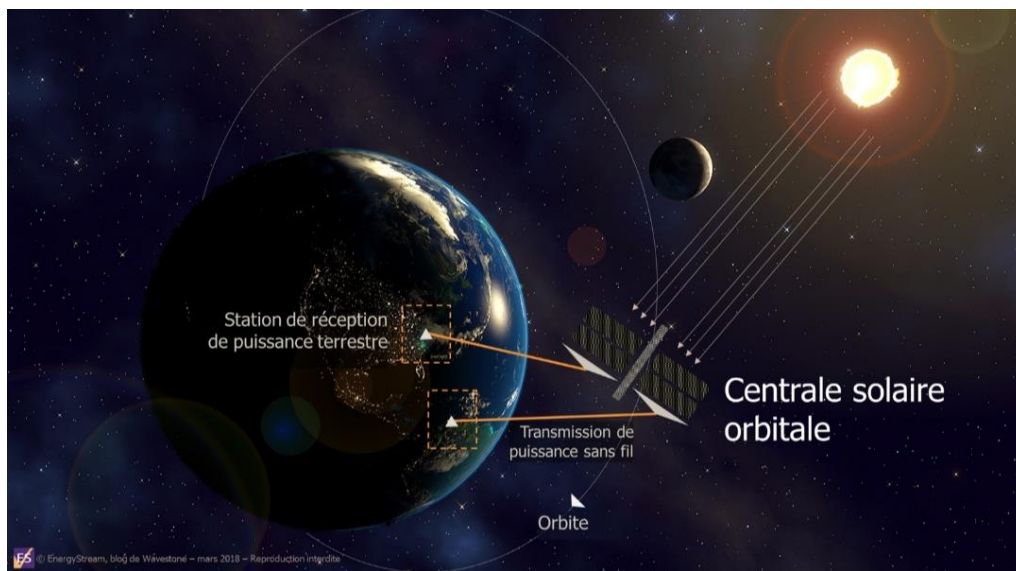


Figure I.13 : Fonctionnement d'une centrale orbitale [30].

## I.7.5. Applications industrielles du TESH

### I.7.5. a. Chauffage par induction

Le chauffage par induction est une méthode rapide et précise qui permet de chauffer en surface ou à cœur sans contact les métaux et d'autres matériaux conducteurs électriques. Cette technique montrée sur la (fig I.14) est une application directe de deux lois physiques la loi de Faraday-Lenz et l'effet Joule. Les courants induits de chauffage par effet Joule sont créés à l'intérieure de la même pièce à chauffer ou à fondre par induction électromagnétique. Il s'agit de courant de Foucault [18] [19].

Le chauffage par induction met en jeu trois phénomènes physiques successifs :

- Transfert d'énergie de l'inducteur au corps à chauffer par voie électromagnétique
- Transformation de l'énergie électrique en chaleur dans le corps de la pièce à chauffer par effet joule
- Transmission de la chaleur par conduction thermique dans la masse.

Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie, notamment pour le soudage, le brasage, la fusion, les traitements thermiques. C'est ce même procédé qui est utilisé pour les plaques à induction domestiques [20].

Les avantages du chauffage par induction :

- Montée en température rapide
- Chauffage précis, efficace et reproductible
- Chauffage sans danger puisque sans flamme
- Durée de vie de l'équipement prolongée grâce à la précision des zones chauffées [10].

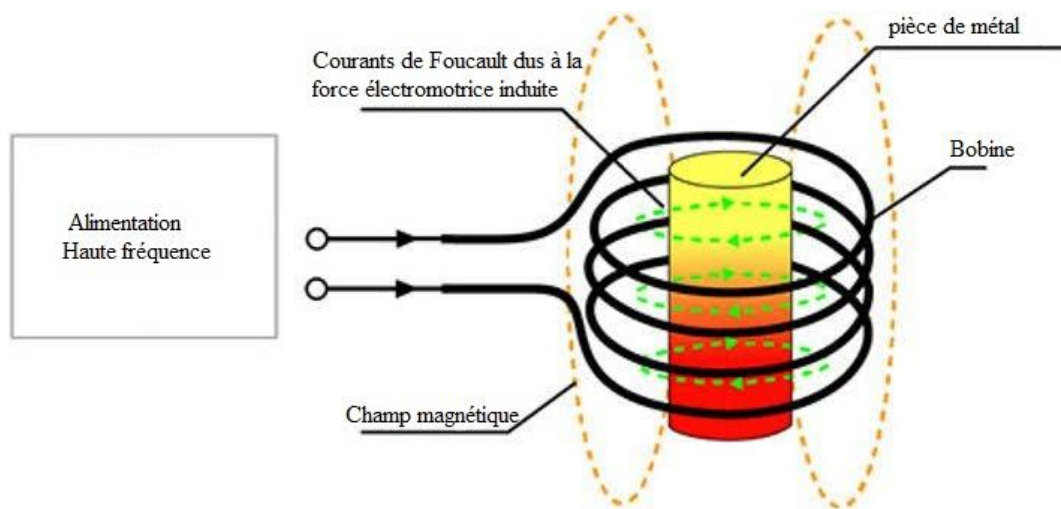


Figure I.14 : Schéma de principe de chauffage par induction [8].

### I.7.5. b. Magnétoformage

Le magnétoformage est un procédé de déformation à froid des métaux utilisant un champ magnétique. Il est principalement adapté aux métaux très conducteurs, en particulier sous forme tubulaire (figI.15). Lorsqu'un matériau conducteur est exposé à un champ magnétique variable, des courants induits se forment. Ces courants et le champ magnétique génèrent des forces magnétiques, similaire à l'interaction entre deux conducteurs parcourus

par des courants parallèles de sens opposés ou identiques, qui s'attirent où se repoussent. Le magnétoformage exploite ce principe pour sa mise en œuvre.

Les opérations habituellement réalisées par magnétoformage sont classifiées en trois groupes : Assemblage, Formage, Soudage [21].

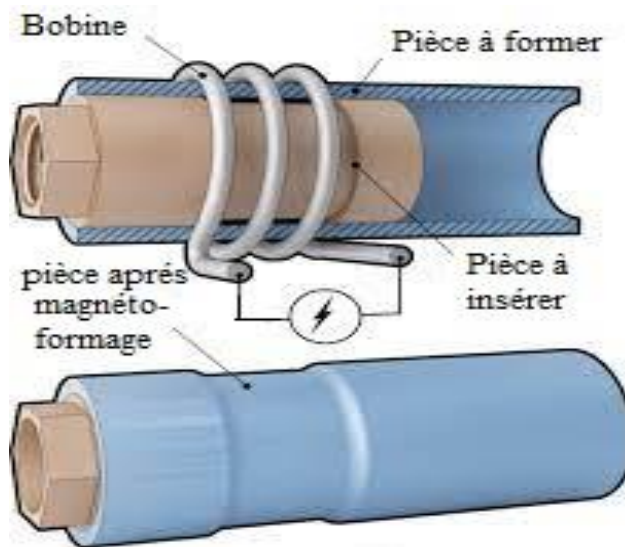
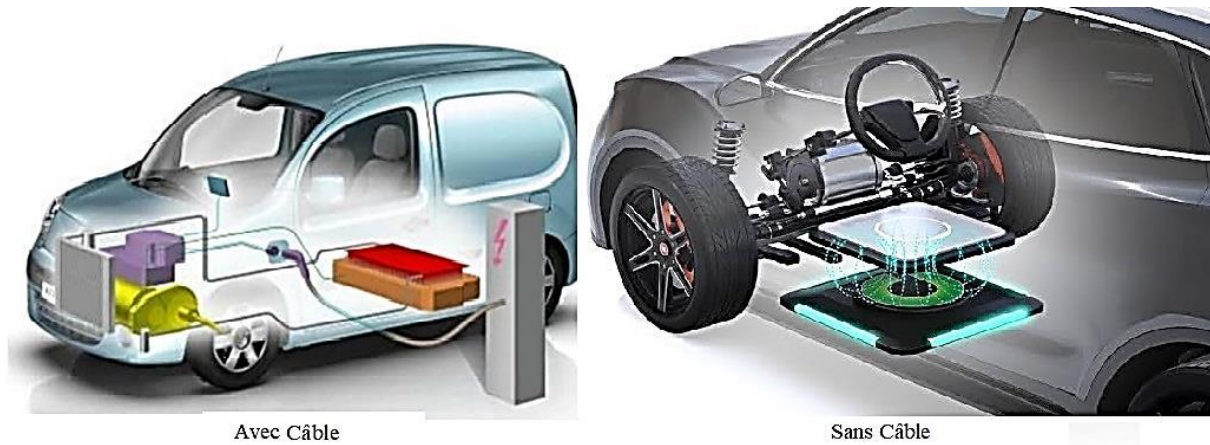


Figure I.15 : Procédé du magnétoformage [14]

## I.7.6. Domaine de transport automobile

### I.7.6.a. Intérêt de la recharge sans fil des batteries

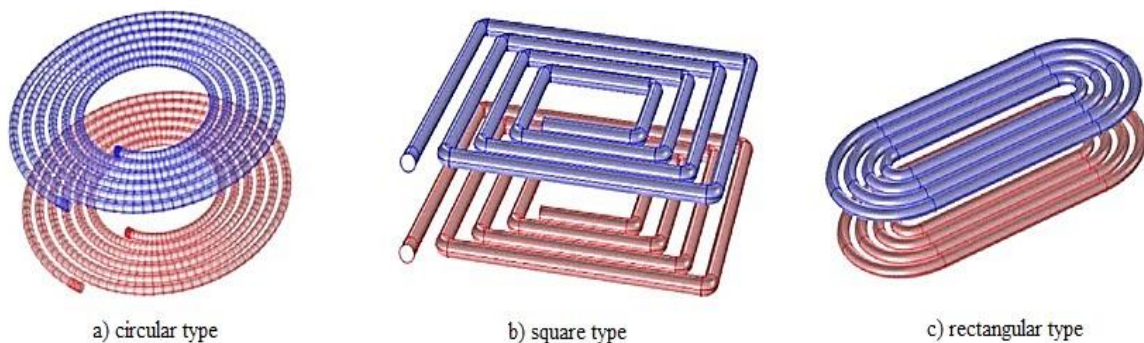
L'industrie automobile a connu une transformation technologique majeure en réponse aux inconvénients des voitures thermiques traditionnelles, notamment leurs faibles rendements et les émissions de CO<sub>2</sub>. Cette évolution a incité les constructeurs à se tourner vers des concepts plus propres et fiables tels que les véhicules électriques et hybrides. Ces véhicules utilisent une connexion par câble pour la recharge des batteries. Afin d'éviter les inconvénients de ces câbles, la recharge sans fil est une solution intéressante offrant plus de souplesse (fig I.16). Cette innovation permet une plus grande mobilité et une meilleure sécurité par rapport aux méthodes traditionnelles [22].



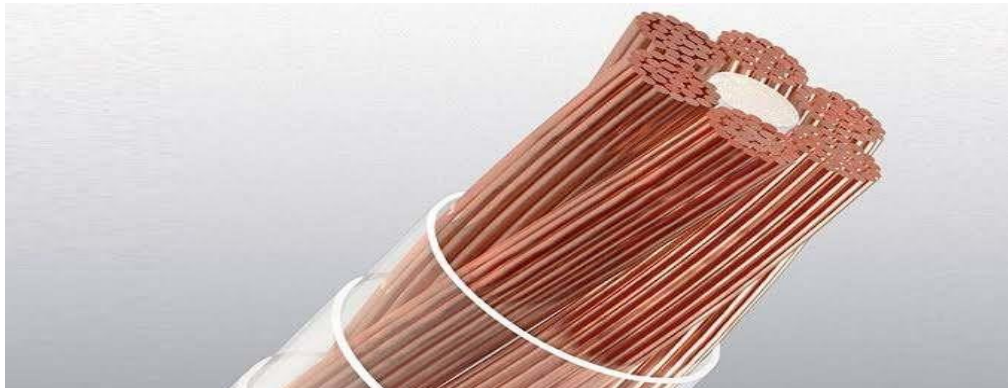
**Figure I.16:** Recharge de batterie pour véhicule électrique : Avec et sans câble [21].

### I.7.6.b. Technologie des bobines émettrices et réceptrices

Les géométries de base décrites dans la littérature utilisent des bobinages circulaires ou rectangulaires. Afin d'améliorer le couplage entre les bobines, différents auteurs proposent des combinaisons de plusieurs bobinages au primaire comme au secondaire (fig I.17). Les bobines utilisées actuellement dans cette application sont réalisées en fil de Litz isolé. Ce dernier est un type de câbles composé de brins isolés électriquement les uns des autres et tressés ensemble. Ce type de câble est bien adapté au fonctionnement à des fréquences élevées en permettant de limiter les pertes liées aux effets de peau et de proximité dans les conducteurs (fig I.18) [11] [23].



**Figure I.17 :** Différentes formes de bobines [21].



**Figure I.18 :** Fil de Litz [11].

### **I.7.6.c. Recharge statique sans fil**

Dans ce système, le véhicule se recharge à chaque passage par des arrêts spécifiques. Lors de ces arrêts, le véhicule se positionne sur une station de recharge équipée de dispositifs de couplage magnétique ou d'induction pour recevoir l'énergie nécessaire à la recharge de sa batterie. Ce mode de recharge est couramment utilisé dans les parkings, les garages résidentiels ou les stations de recharge dédiées, où les véhicules peuvent s'immobiliser suffisamment longtemps pour effectuer la recharge.

De nombreuses compagnies dans le monde ont développé leurs propres systèmes de recharge sans contact statiques. Nous citerons la société canadienne Bombardier et la société Witricity. La société Witricity développe un système de recharge sans contact pour véhicule électrique. En proposant plusieurs puissances de transfert 3,6, 7,7 et de 11 KW avec un rendement atteignant 94% pour différentes distances bobine émettrice - bobine réceptrice.

La société Bombardier propose également une solution de recharge aux arrêts pour le bus primove au travers d'un système sans contact. Ce que veut dire qu'une partie du récepteur (sous véhicule) s'abaisse pour se rapprocher de l'émetteur au sol. la puissance de recharge est de 200 KW [24].

En 2011 la société Qualcomm acquiert HaloIPT, propriété de l'université d'Auckland qui avait développé avec succès des systèmes de recharges inductifs sans contact pour Citroën et avait conclu un accord avec Rolls Royce pour la recharge de la voiture de luxe Phantom. Peu de temps après Qualcomm annonce la commercialisation de systèmes similaires pour le grand public [24].



Figure I.19 : Recharge Statique [22].

#### I.7.6.d. Recharge dynamique sans fil

Ce mode de recharge permet au véhicule de se recharger en mouvement, en passant par une voie spécialement équipée de bobines qui s'activent uniquement lorsque le véhicule les traverse. Cette approche offre la possibilité de diminuer la taille des batteries embarquées dans le véhicule, réduisant ainsi son poids et son coût [24].

La voiture électrique est équipée d'une première bobine réceptrice qui va recevoir un champ magnétique alternatif créé par une deuxième plaque dotée d'une bobine émettrice installée sous le sol (fig I.20) et (fig I.21).

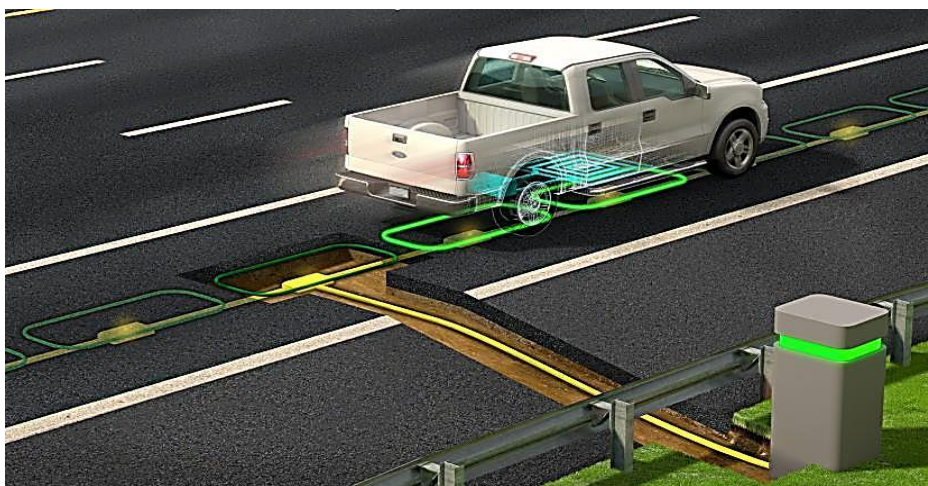
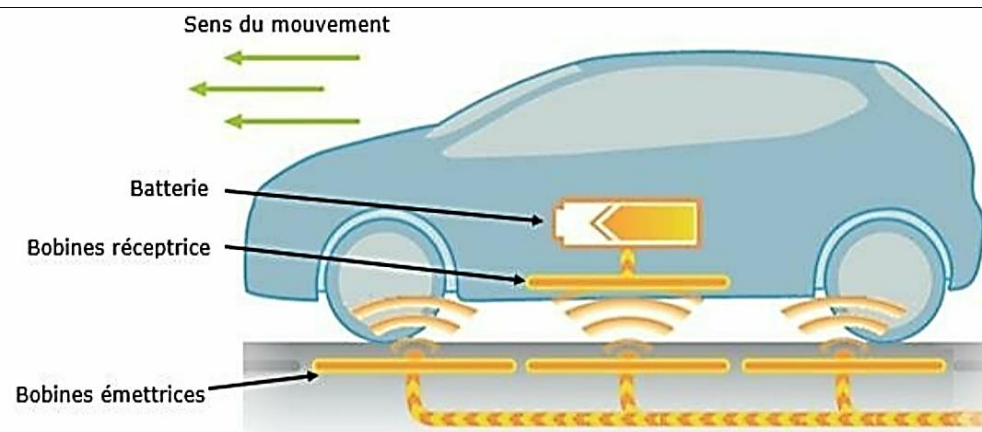


Figure I.20 : Une portion de route automatique [12].

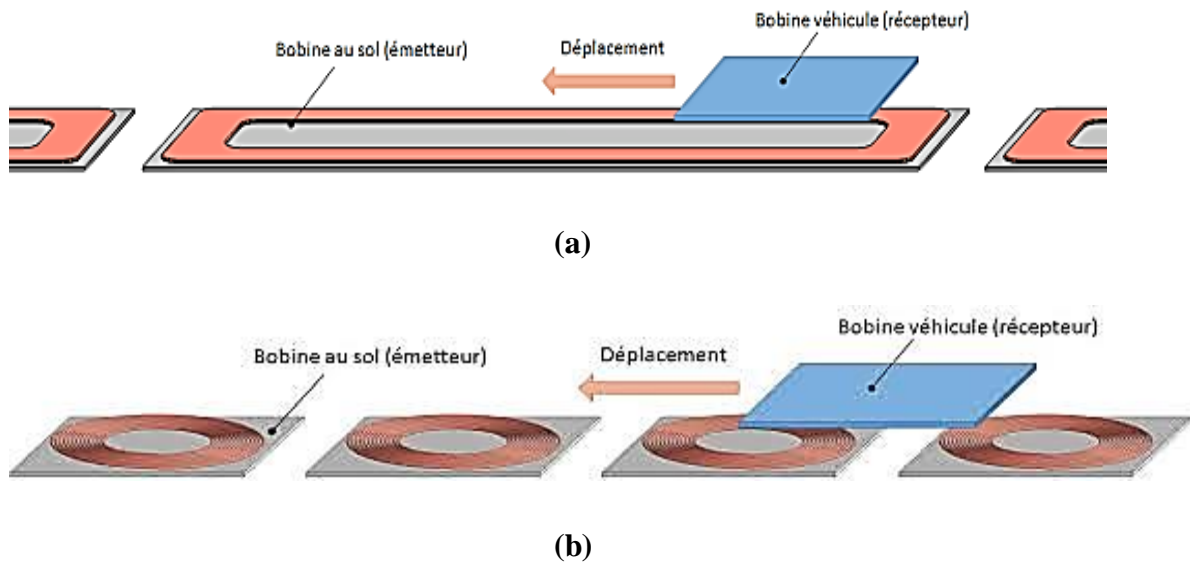


**Figure I.21:** Exemple d'une voiture électrique chargée par induction dynamique [11].

Il existe deux solutions techniques pour la recharge inductive dynamique. La différence provient de la forme des bobines côté de piste. Les pistes peuvent être soit à émetteur segmenté, soit à émetteur unique (fig.I.22).

Pour les systèmes à émetteur unique (fig.I.22. a) la bobine réceptrice est de taille réduite par rapport à la bobine émettrice, ce qui est de formes allongée dans la direction de déplacement du véhicule. Ce type de piste assure un couplage constant tout au long de l'émetteur. De plus, bien que quasi constant, le faible coefficient de couplage magnétique entre l'émetteur et le récepteur pose un défi en termes d'efficacité énergétique du transfert d'énergie.

Dans le cas des pistes segmentées, il n'y a pas de différence de taille significative entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice. Ce type de piste nécessite de connaître la position du véhicule en temps réel afin d'alimenter au fur et à mesure les bobines sous le véhicule (fig.I.22. b) [24].



**Figure I.22 :** Différents types de pistes :**(a)** piste à émetteur unique, **(b)** piste à émetteur segmenté [24].

## I.8. Avantages de la transmission d'énergie sans fil

### I.8.1. Avantages

- Le transfert sans fil d'énergie est une technique intéressante pour l'alimentation en énergie dans les environnements dangereux et difficiles d'accès
- Se débarrasser des fils, câbles, recharge facile de batterie.
- Réduire le cout associé à la fabrication et le maintien de connecteur direct
- Moins de pertes d'énergie qui signifie moins de chaleur indésirables
- Moins d'efforts pour gérer les températures
- La TESH a rendu la recharge de batterie plus facile avec un meilleur confort d'utilisation.
- La TESH a éliminé beaucoup d'impacts négatifs sur l'environnement : Emissions de Gaz, réchauffement climatique [25].

### **I.8.2. Inconvénients**

- Le rendement du TESH est fortement impacté par l'écart entre bobines émettrices et réceptrices, responsable de pertes d'énergies.
- Dans le cas du transfert radiatif à hautes fréquences, le système peut présenter des problèmes de compatibles électromagnétique, voir des risques pour la santé
- Temps de charge dépend de la puissance.
- Le problème de la compatibilité des appareils : certains appareils électroniques et matériaux ne sont pas compatibles avec la recharge sans fil [25].

### **I.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a exposé un état de l'art succinct du domaine de la transmission d'énergie sans fil. Ainsi différentes techniques Historique de TESH sont présentées à travers les domaines d'applications (Domestique, médical, militaire, spatial, industriel et transport) pouvant y être associés. Enfin une attention particulière est accordée à la recharge sans fil statique et dynamique des batteries de voitures électriques.

Le prochain chapitre détaillera les aspects liés à la modélisation du TESH.

**Références**

- [1] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 1873
- [2] Guillaume Vigneau, « Etude et modélisation d'un système de transmission d'énergie par couplage inductif pour des systèmes électroniques dans l'environnement automobile » Thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2016.
- [3] N. Tesla, «Apparatus for Transmitting Electrical Energy», US patent number 1,119,732, issued in Dec. 1914.
- [4] Hakim Takhedmit, « Modélisation et conception de circuit de réception complexes pour la transmission d'énergie sans fil à 2.5 GHz », Thèse de Doctorat de l'école centrale de Lyon 2010.
- [5] Vlad Marian, « Transmission d'énergie sans fil. Application au réveil à distance de récepteurs en veille zéro consommation », Thèse de doctorat, Université Lyon 2012.
- [6] Document INRS élaboré par un groupe de travail RNICarsat-Cramif/ INRS composé de : C. Bissériex, Carsat Auvergne P. Laurent, A. Bourdieu, INRS « champs électromagnétique ED 4211 ». Février 2021.
- [7] Rapport UIT-R SM.2303-1, « Transmission d'énergie sans fil au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radiofréquence », publication électronique, Genève ,2015.
- [8] <http://inductionchiller.com/induction-heating/> consulté le 30 Mai 2024.
- [9] Tahiry Andrianantenaina « Electricité sans fil : une longue histoire ! » 2 septembre 2022.
- [10] Lakhdari Abdelghani, « Développement d'un système de transfert d'énergie sans fil : Application au domaine biomédicale », Thèse de Doctorat en électronique, Université Mohamed Boudiaf d'Oran, Faculté des sciences, 2019-2020.
- [11] Karim KADEM, « Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques », Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay, présentée et soutenue en visioconférence totale, le 09/11/2020
- [12] Emmanuel Touzout, « Aux USA, Une route intelligente pour recharger les voitures électriques » 31 Août 2021.

- [13] Article : « Transmission Sans fil D'énergie Electrodynamique pour L'alimentation de Systèmes Biomédicaux IN-VIVO », Université Savoie Mont Blanc, mars-août 2023.
- [14] <https://www.manufacturingguide.com/en/inductive-magnetic-forming-pipes> consulté le 30 Mai 2024.
- [15] Gianluca Riccio, journal « Énergie, Militaire, Technologie », le 7 novembre 2022
- [16] AjeyKumar, WiTricity: «Wireless Power Transfer By Non-radiative Method», May2014
- [17] Laurie Henry « La première transmission réussie d'énergie Solaire de l'espace à la Terre : un pas de géant vers un avenir durable » article publié Le 19 Février 2024.
- [18] "Ambrell Introduction Heating Solutions ".[www.ambrell.com](http://www.ambrell.com) Consulté le 20/03/2024.
- [19] Sven Wanser, « simulation des phénomènes de chauffage par induction. Application à la trempe superficielle », Thèse de docteur en génie électrique, l'école doctorale de Lyon des sciences pour l'ingénieur, Février 1995.
- [20] <https://www.metatron.fr/magneton.html>consulté le7/04/2024
- [21] M. Ibrahim, « Analyse d'Interopérabilité d'un Système de Recharge Sans Contact pour le véhicule Electrique », Thèse de Doctorat Université Paris-Sud, 09 décembre 2014
- [22] Maxime Johnson, « Voiture électrique : les promesses de la recharge sans fil », publié le 23 juin 2016.
- [23] Aliouane. A, Khemoula.M, « Analyse des effets des paramètres géométriques et électriques sur la performance du système d'énergie sans contact » Mémoire de fin d'étude soutenue à L'Université Mohamed Ben Seddik Ben Yahia Jijel, 2021.
- [24] Eric Labouré, « Recharge sans contact des véhicules électrique », Ecole normale supérieure Paris –Saclay. 2020
- [25] GuiousIssam,Foul Mustapha, « Calcul analytique en 3D des inductances mutuellesdans les systèmes de recharge sans contact pour le véhicule électrique » Master en électromécanique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel ,2019.
- [26] Mohammed Salem, «The block diagram of wireless power transfer induction coupling method»,September 2020

[27] Md .EbrahimKhallil, TusharKumarDas, «Comparison Study of Inductive Coupling and Magnetic Resonant Coupling Method for Wireless Power Transmission of Electric Vehicles»

[28] Cyril Fievet, « Demain de l'électricité (vraiment) sans fil ? », conférence.Bangladesh. 28 mai 2021.

[29 ]<https://www.manomano.fr/cat/brosse+a+dent+electrique> consulté le 30 /04/2024

[30] Valérie Labbé, « Modélisation numérique du chauffage par induction, Approche éléments finis et calcul parallèle », Thèse de docteur, mécanique numérique, Ecole nationale supérieur des Mines de Paris, Avril 2002.

[31] Yue Ma, «Wireless Energy Transfer », Submitted as coursework for Physics 240, Stanford University, Fall 2010 Le 22 October 2010.

**Chapitre II**  
**Modélisation électromagnétique**  
**Systemes de "TESF"**

## II.1. Introduction

La modélisation électromagnétique est le souci permanent de l'ingénieur dans sa démarche de conception, qui doit s'articuler sur une meilleure prévision du comportement des systèmes utilisant l'énergie électrique. Au 19<sup>ème</sup> siècle, les formules et les solutions analytiques étaient les seuls moyens d'analyse et d'interprétation. Depuis l'apparition des moyens de calcul informatique au cours des années 60, la puissance des méthodes numériques s'est rapidement développée pour devenir l'outil principal de modélisation des systèmes complexes et variés [32].

Ce chapitre présente les bases de la modélisation électromagnétique des systèmes électrotechniques à travers un rappel sur les équations et les différents modèles rencontrés dans la pratique liée au TESH : la magnétostatique et la magnétodynamique.

## II.2. Formules de base de l'électromagnétisme

### II.2.1. Equations de Maxwell

Les phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations de Maxwell, qui constituent un système d'équations aux dérivées partielles et qui expriment des lois universelles unifiant les quatre grandeurs qui caractérisent le champ électromagnétique. Les constituants types d'un système de TESH par induction électromagnétique est donnée par la figure (II-1) [35] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maxwell-Gauss:} \quad \text{div } \vec{D} = \rho_v \end{array} \right. \quad \text{(II.1)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maxwell-Thomson:} \quad \text{div } \vec{B} = 0 \end{array} \right. \quad \text{(II.2)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maxwell-Faraday:} \quad \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{array} \right. \quad \text{(II.3)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maxwell-Ampere:} \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{array} \right. \quad \text{(II.4)}$$

Le premier couple d'équation (II.1) et (II.2) constitue des équations dites de conservation. L'équation (II.3) est appelée la loi de Faraday et l'équation (II.4) est la généralisation de la loi d'Ampère. Elles constituent les équations dites d'évolution [35].

$\vec{D}$  : Vecteur déplacement électrique [C/m<sup>2</sup>]

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

$\vec{E}$  : Vecteur champs électrique [V/m]

$\vec{H}$  : Vecteur champs magnétique [A/m]

$\rho_v$  : Densité volumique de charge [ $C/m^3$ ]

$\vec{J}_c$  : Vecteur densité de courant de conduction [ $A/m^2$ ]

t : le temps [s]

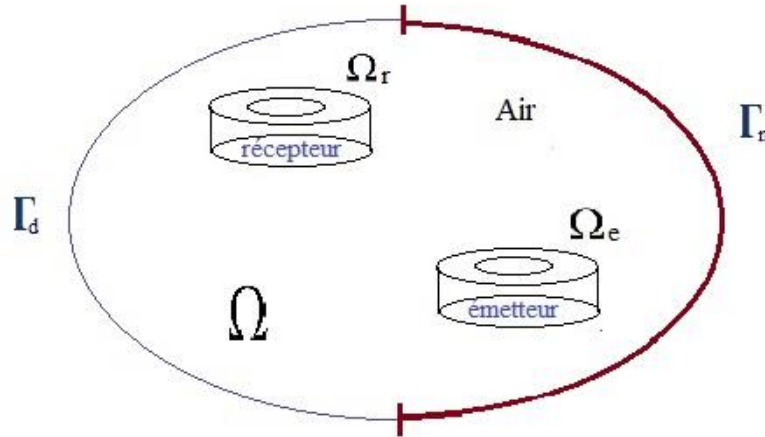


Figure II-1 : Topologie type du TESF par induction

### II.2.2. Relation constitutives des matériaux

Les lois de comportement établissant des relations de dépendance entre les couples  $(\vec{E}, \vec{D})$ ,  $(\vec{H}, \vec{B})$  et  $(\vec{J}_c, \vec{E})$ . Ces relations constitutives tiennent compte de l'impact des matériaux [37]. Il s'agit de :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \tag{II.5}$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \tag{II.6}$$

$$\vec{J}_c = \sigma \cdot \vec{E} = \vec{J}_s + \vec{J}_{induit} \tag{II.7}$$

$$\vec{J}_{induit} = \sigma \vec{E} + \sigma \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$\epsilon$ : Permittivité électrique absolue [F/m]

$\mu$  : Perméabilité magnétique absolue [H/m]

$\sigma$ : Conductivité électrique du matériau [S/m]

L'effet du matériau est contenu dans permittivité relative  $\epsilon_r$  et sa perméabilité relative  $\mu_r$

### II.2.3. Conditions de passage

Lors du passage d'un milieu à un autre, les grandeurs électromagnétiques subissent des discontinuités aux interfaces. Les conditions de passage ou la transmissions des champs selon les grandeurs normales ou tangentiels sont :

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.8})$$

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{II.9})$$

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{K}_s \quad (\text{II.10})$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = 0 \quad (\text{II.11})$$

$\rho_s$  : densité surfacique de charge [C/m<sup>2</sup>]

$\vec{K}_s$  : Courant linéique ou surfacique [A/m]

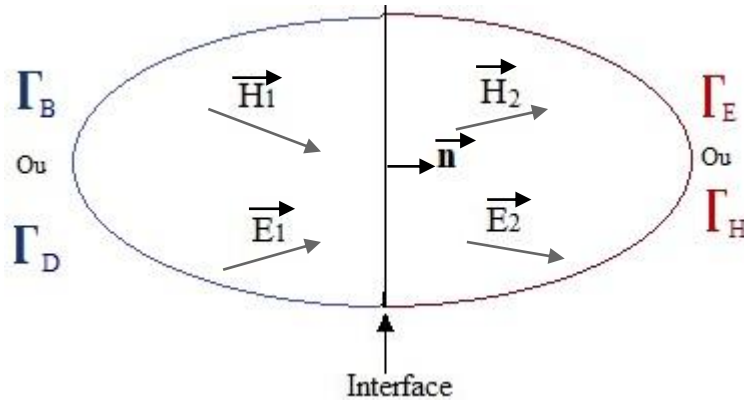


Figure II-2 : Conditions de passage du milieu 1 vers le milieu 2

### II.2.4. Conditions aux limites

Pour la résolution des équations aux dérivées partielles électromagnétiques, il est inévitable d'associer les conditions aux limites du domaine d'étude à ces équations

$$\vec{D} \cdot \vec{n} |_{\Gamma_D} = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{B} \cdot \vec{n} |_{\Gamma_B} = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{E} \wedge \vec{n} |_{\Gamma_E} = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$\vec{H} \wedge \vec{n} |_{\Gamma_H} = 0 \quad (\text{II.15})$$

### II.3. Approche de modélisation du TESH

L'analyse physique du comportement des systèmes de transfert d'énergie sans fil montre qu'il s'agit d'un problème électromagnétique. Deux approches de modélisation sont utilisées par les scientifiques et les ingénieurs pour les problèmes de ce type. La première est la modélisation par les Equations aux Dérivées Partielles (EDP) qui sont formulées à base des équations de Maxwell, La deuxième famille de méthodes de modélisation dites analytiques ou semi analytique est basée sur les équations intégrales des grandeurs électromagnétiques (Biot-Savart, Ampère, Gauss) dont l'exploitation passe par une étape de discrétisation géométrique.

En règle générale, les méthodes de résolution d'équation aux dérivées partielles peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes numériques et les méthodes analytiques. Les méthodes numériques consistent à utiliser des algorithmes pour obtenir une solution numérique approximative, tandis que les méthodes analytiques visent à trouver une solution exacte sous forme de formule mathématique. Le choix de la méthode dépend des propriétés de l'EPD et de la nature du problème à résoudre [36].

#### II.3.1. Principe de modèle analytique du TESH

L'objectif global de cette approche est de résumer les équations mathématiques de base intervenant dans la transmission sans fil et de les simplifier afin que nous permettent de modéliser le système de (TESH). La résolution des équations de Maxwell par une méthode analytique permet d'obtenir une solution mathématique précise des problèmes. La méthode utilisée est : la méthode de séparation des variables qui consiste à remplacer une équation aux dérivées partielles (EDP) (à trois dimensions) par trois équations différentielles linéaires à coefficients constants et cela pour remplacer un problème à plusieurs dimensions par des problèmes unidimensionnels qui seront plus facile à résoudre.

Le principal inconvénient des méthodes analytiques est l'incapacité de gérer les systèmes de transfert d'énergie sans fil impliquant des géométries complexes. Cette approche est limitée à des configurations simples en 2D. De plus, la solution analytique est souvent difficile, voire coûteuse en temps de calcul [36].

#### II.3.2. Principe de modèle semi analytique

Les modèles semi-analytiques combinent des techniques de discrétisation géométriques des formules analytiques intégrales . Cette méthode est particulièrement utile pour calculer les paramètres du modèle avec une grande précision en discrétisant le domaine

en mailles sur lesquelles des expressions analytiques des grandeurs électromagnétiques sont appliquées. Cette méthode utilise une expression intégrale (loi de Biot et Savart) des grandeurs électromagnétiques. Le maillage consiste à diviser le domaine en spires élémentaires pour exprimer la résistance, l'inductance propre de chaque spire élémentaire et les inductances mutuelles entre les différentes spires.

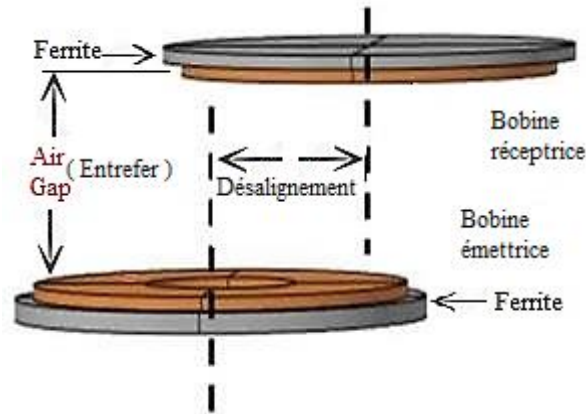
### **II.3.3. Principe de modèle numérique**

L'application des ordinateurs, de grandes puissances, a mis en valeur l'intérêt des méthodes dites numériques, celles-ci font appel à des techniques de discrétisation et d'approximation. En effet, elles transforment les équations aux dérivées partielles du champ en un système d'équations algébriques compte tenu des conditions aux limites. Dans les formulations issues de la physique de l'électrotechnique, on peut citer Les principales méthodes numériques : La méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (MEF), et la méthode des volumes finis (MVF) [37].

## **II.4. Modèle d'équations aux dérivées partielles électromagnétique dédiées au TESH**

### **II.4.1. Topologie du dispositif de base du TESH par induction électromagnétique**

Le coupleur magnétique est la pièce maîtresse de tout système TESH, sa conception affecte l'efficacité du système. La topologie des bobines doit permettre d'avoir le maximum de couplage magnétique pour réduire les flux de fuites, ce qui permet d'assurer un bon rendement du transfert. Pour rappel, un coupleur magnétique est basé sur le même principe qu'un transformateur classique, il est composé d'enroulements primaire et secondaire et doit pouvoir transférer de l'énergie même si l'air-gap (entrefer /inter bobines) est important. La Figure (II.3) présente le dispositif de base du TESH par induction magnétique.



**Figure II-3** : Schéma d'un coupleur magnétique

Plus généralement coupleur magnétique est composé de deux bobines, enroulées sur un matériau magnétique et parfois d'un blindage conducteur permettant de réduire les rayonnements électromagnétiques engendrés par le coupleur. L'utilisation d'un matériau magnétique permet de canaliser les lignes de champ magnétique et d'accroître ainsi, le champ magnétique reçu dans la bobine secondaire. Généralement ce matériau magnétique est construit à base de tôles de ferrites collés les unes aux autres pour former un seul et même noyau [11].

## II.4.2. Modèle d'équation électromagnétique général

### II.4.2.1. Modèle électromagnétique statique

Les équations de Maxwell en régime statique dans lequel les grandeurs sont indépendantes de temps sont données comme suit :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_v \quad (\text{II.16})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.17})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{cond}} = \vec{J}_s \quad (\text{II.19})$$

### II.4.2.2. Modèle électromagnétique dynamique

Le modèle dynamique est obtenu en considérant que la densité de courant de déplacement est négligée par rapport à la densité de conducteur  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \ll \vec{J}_{\text{conduction}}$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_v \quad (\text{II.20})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.22})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} = \vec{J}_{\text{cond}} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma \vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{II.23})$$

### II.4.3 Modèle magnétodynamique du TESH

En régime magnétodynamique on a :

A partir de (II.21),  $\exists \vec{A}$  potentiel vecteur magnétique tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.24})$$

La jauge de Coulomb permettant de garantir l'unicité du potentiel magnétique est automatiquement vérifiée pour les systèmes en 2D

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0$$

On remplace (II.24) dans (II.22), on trouve :

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = \overrightarrow{\operatorname{rot}} \left( - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.25})$$

L'équation (II.25) devient :

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.26})$$

A partir de l'équation ci-dessous, on peut définir un potentiel scalaire électrique  $V$  tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = - \overrightarrow{\operatorname{grad}} (V)$$

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\operatorname{grad}} (V) \quad (\text{II.27})$$

En considérant la loi d'ohm :

$$\vec{J}_c = \sigma \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) + \sigma \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.28})$$

On obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \sigma \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) + \sigma \vec{v} \wedge \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.29})$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$$

Finalement :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) = \sigma \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) + \sigma \vec{v} \wedge \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.30})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\sigma \overrightarrow{\text{grad}}(V) + \sigma \vec{v} \wedge \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$\vec{J}_s = -\sigma \overrightarrow{\text{grad}}(V) \text{ (Densité de courant source)}$$

On aboutit à l'équation magnétodynamique :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s + \sigma (\vec{E} + \vec{v} \wedge \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) \quad (\text{II.32})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{\vec{B}}{\mu} \right) = \overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) = \vec{J}_s + \sigma (\vec{E} + \vec{v} \wedge \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) \quad (\text{II.33})$$

Les vitesses de déplacement des parties mobiles étant faibles,

$$\text{Alors : } \sigma (\vec{v} \wedge \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) \ll \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

D'où finalement l'équation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) = \vec{J}_s + \sigma \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.34})$$

Le système de transfert d'énergie sans fil présente en générale 03 régions principales :

2 bobines (émettrices et réceptrices) et l'air :

- Equation dans la bobine émettrice :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_s \tag{II.35}$$

- Equation dans la bobine réceptrice

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{II.36}$$

En harmonique :  $\frac{\partial}{\partial t} \equiv j\omega$

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) - j\omega\sigma \cdot A = 0 \tag{II.37}$$

- L'équation dans l'air :

L'air est un milieu de perméabilité linéaire et non conducteur, donc l'équation peut se résumer à la formule suivante :

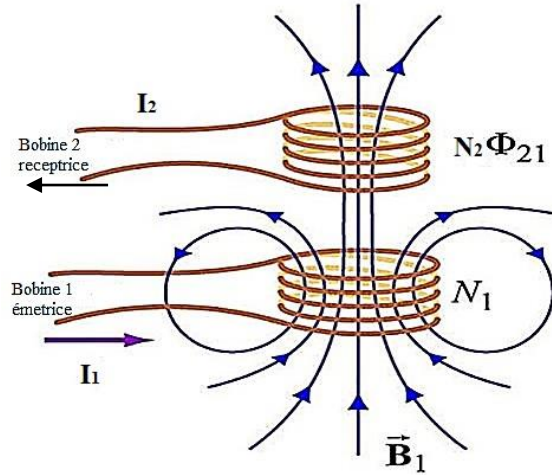
$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = 0 \tag{II.38}$$

D'où, le modèle magnétodynamique général est :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \begin{cases} 0 & \text{Air} \\ \vec{J}_s + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} & \text{Bobine émettrice} \\ -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} & \text{Bobine réceptrice} \end{cases} \tag{II.39}$$

## II.5. Calcul des inductances propres et mutuelles

Les inductances propres et mutuelles sont déduites à partir des flux magnétiques créés par les courants dans les bobines (fig II.4)



**Figure II.4 :** Schéma d'un système de TESF montrant les  $\Phi$ ,  $I$  et  $B$  des bobines [38].

- L'expression de l'inductance propre de la bobine émettrice est :

$$L_1 = N_1 \frac{\Phi_1}{I_1} = N_1 \frac{\iint_{S_1} \vec{B}_1 \cdot \vec{ds}_1}{I_1} \tag{II.40}$$

En introduisant, le potentiel vecteur magnétique, l'inductance propre devient :

$$L_1 = \frac{N_1}{I_1} \iint_{S_1} \text{rot} \vec{A}_1 \cdot \vec{ds}_1 \tag{II.41}$$

- L'expression de l'inductance propre de la bobine réceptrice est :

$$L_2 = N_2 \frac{\Phi_2}{I_2} = N_2 \frac{\iint_{S_2} \vec{B}_2 \cdot \vec{ds}_2}{I_2} \tag{II.42}$$

$$L_2 = \frac{N_2}{I_2} \iint_{S_2} \text{rot} \vec{A}_2 \cdot \vec{ds}_2 \tag{II.43}$$

- L'inductance Mutuelle entre les deux bobines est donnée :

$$M = N_2 \cdot \frac{(N_1 \Phi_{12})}{I_1} = N_1 N_2 \frac{\iint_{S_2} \vec{B}_1 \cdot \vec{ds}_2}{I_1} = N_1 N_2 \frac{\iint_{S_2} \text{rot} \vec{A}_1 \cdot \vec{ds}_2}{I_1} \tag{II.44}$$

$S_1, S_2$ : Les sections des bobines.

$N_1, N_2$  : Le nombre de spires de chaque bobine.

## **II.6. Conclusion**

Le présent chapitre a été d'une part dédiée à la présentation des diverses approches de la modélisation électromagnétiques dans le domaine du TESH. Différentes méthodes de résolution, analytique, numérique et semi analytiques sont mentionnés. D'autre part les modèles magnétostatique et magnétodynamique reprisant le fonctionnement des systèmes de TESH par induction ont été aussi présentés, et les expressions de calcul des différentes inductances propres et mutuelles.

Une présentation détaillée de la méthode des éléments finis fera l'objet du chapitre suivant.

## **Références de chapitre II**

### **Références**

- [32] Alaa CHATEAUNEUF, Maître de conférences à l'institut français de Mécanique avancée « comprendre les éléments finis : principe, Formulation et exercices corrigés ».
- [33] Mohammad Ibrahim, «Wireless Inductive Charging for Electrical Véhicules: Electromagnetic Modelling and Interoperability Analysis», These de doctorat Université Paris-Sud, 2014.
- [34] Dominic Grenier, « Electromagnétisme et transmission des ondes », Université Laval, Québec, Automne 2016
- [35] Jean-Claude SABONNADIÈRE, Jean-Louis COULOMB « Calcul des champs électromagnétique ».
- [36] Ahmed Boutadjine, « Analyse du comportement Transitoire d'une Mise à la Terre par la théorie des lignes de transmission non-uniforme », Thèse de doctorat, Université Mohammed Seddik Benyahia –Jijel, 2024.
- [37] Habiba Becha, « Application de la méthode des volumes finis pour la modélisation de configuration de contrôle non destructifs par courants de Foucault », Thèse de doctorat Université Mohammed Khider Biskra ,2018.
- [38] « Inductance and Magnetic Energy », Massachusetts Institute of Technology, 11 Février 2012.

## **Chapitre III**

# **Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnétostatique et magnétodynamique du TESF**

## **III.1. Introduction**

De nos jours, l'approche numérique s'avère incontournable pour résoudre des problèmes réagissant le fonctionnellement des systèmes réels rencontrés dans les différents secteurs de l'ingénieur notamment en électrotechnique. La Méthode des Eléments Finis (MEF) est une méthode numérique basée sur deux principes fondamentaux : la discrétisation et l'interpolation. La diversité des applications de cette méthode témoigne de son intérêt dans le calcul des dispositifs très variés en champs statique ou dynamique, et intégrant les propriétés des matériaux.

L'objectif de ce chapitre est de présenter sommairement la méthode des éléments finis, et de l'appliquer pour les modèles électromagnétiques du TESH. Le calcul des grandeurs globales et inductances sera établi en considérant les dispositifs maillés.

## **III.2. Présentations de la méthode des éléments finis**

### **III.2.1. La méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est une méthode numérique indispensable en électrotechnique pour la résolution des problèmes électromagnétiques régis par des équations aux dérivées partielles. Elle est aussi appliquée dans la majorité des domaines de la physique cela va de la mécanique à l'électronique, en passant par la thermique et la météorologie. Dans tous ces cas, la formulation reste quasiment identique, mais la nature des champs et les lois de comportement sont adaptées au domaine d'application [32].

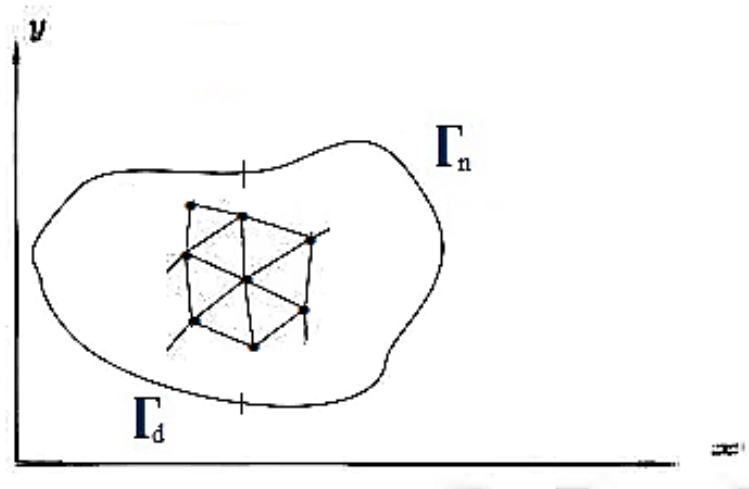
La MEF est sans doute la plus utilisée car elle est mieux adaptée pour traiter les géométries complexes et les milieux non linéaires en discrétisant le domaine à étudier en éléments de forme géométrique simple passant par des champs électriques et magnétiques modélisés par les équations de Maxwell [39].

### **III.2.2. Principe**

Le principe de cette méthode est de résoudre les équations aux dérivées partielles des champs sur le domaine ( $\Omega$ ), en associant des conditions aux limites sur la frontière  $\Gamma_n, \Gamma_D$  (fig.III.1) pour garantir l'obtention d'une solution réaliste. Cette méthode consiste à diviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous domaines appelés éléments finis à

### Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TESH

dimensions non infinitésimales. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou sommation de tous les éléments [40].



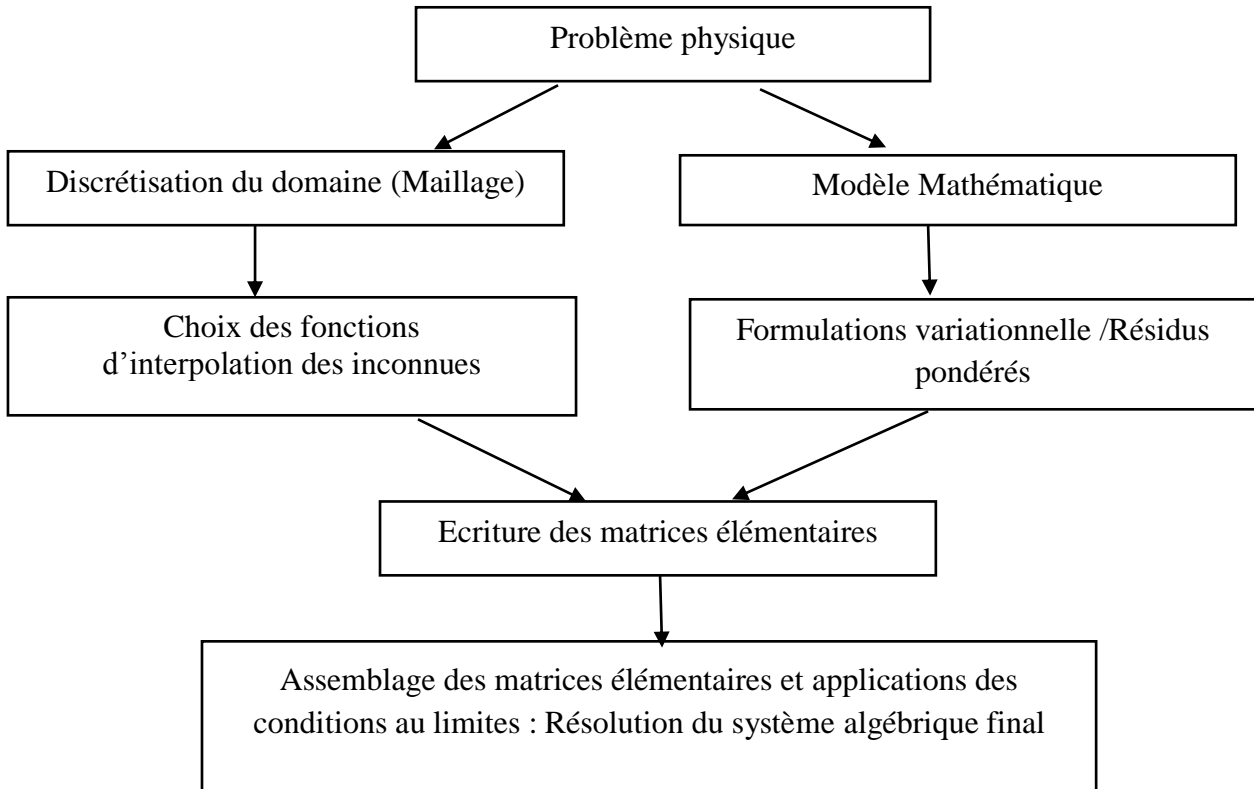
**Figure III.1:** Concept de base de la méthode des éléments finis

Afin d'appliquer la MEF sur un problème physique, il convient de suivre les étapes suivantes [40]:

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations.

Les étapes de la MEF sont reprises par l'organigramme suivant :

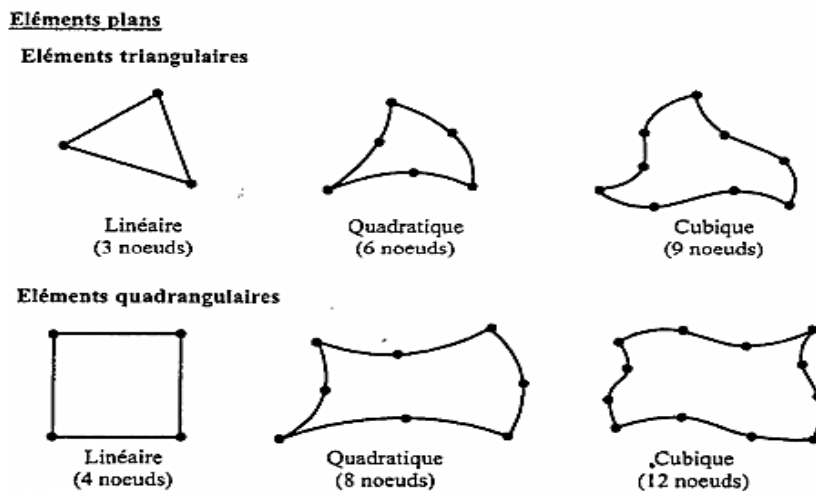
## Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TEF



**Figure III.2 :** Structure d'analyse en utilisant l'approche numérique

### III.2.3. Types d'éléments finis

Selon que le domaine d'étude, soit une, deux ou trois dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Dans la majorité de cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre.



**Figure III.3:** Types d'éléments finis

## Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TESH

### III.2.4. Discrétisation ou maillage

Une structure réelle est constituée d'un certain nombre de points singuliers appelés nœuds physiques, ce sont les points permettant la définition de la géométrie (fig.III.1). La résolution par éléments finis implique le découpage de la structure en sous domaines appelés éléments formant ainsi le domaine maillé. Les connexions de ces éléments ne se font pas toute la frontière commune, mais seulement en un certain nombre de points d'attache, appelés nœuds du maillage.

En effet, dans notre cas le domaine étudié est en 2D et que les éléments que nous avons choisis sont triangulaires. Les éléments à deux dimensions sont les plus utilisés car ils permettent la modélisation d'un grand nombre de systèmes [32].

$$\Omega = \sum_{e=1}^{n_e} \Omega_e \quad (\text{III.1})$$

$\Omega$ : Domaine continue maillé

$\Omega_e$  : Sous domaine "éléments finis "

$n_e$  : Nombre de sous domaine

### III.2.5. Approximation

La méthode des éléments finis est basée sur la construction systématique d'une approximation  $A^*$  du champ des variables  $A$  par sous domaine. Cette approximation est construite sur les valeurs approchées du champ aux nœuds de l'élément considéré, on parle de représentation nodale de l'approximation ou plus simplement d'approximation nodale [41].

$$A^*(M) = \phi(M).A \quad (\text{III.2})$$

$A^*(M)$  : La valeur de la fonction approchée en tout point M d'un élément finis

$\phi$  : Fonction de base ou d'interpolation

L'approximation par éléments finis présente deux aspects différents :

- Il faut d'abord définir la géométrie de tous les éléments, ce qui est plus au moins compliqué selon leurs formes.

## Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TESF

- Il ensuite construire les fonctions d'interpolations  $\phi_i(x)$  correspondant à chaque élément et qui vérifient la continuité entre les éléments.

$$A(x) = \langle \phi_1(x), \phi_2(x), \phi_3(x), \dots, \phi_n(x) \rangle \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} = \langle \phi_n(x) \rangle \{A_{ne}(x)\} \quad (\text{III.3})$$

Tels que:

$A(x)$ : Fonction exacte.

$\phi(x)$  : Fonction d'interpolations

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  sont les valeurs de  $A(x)$  aux nœuds d'interpolations de l'élément.

$\phi_1(x), \phi_2(x), \phi_3(x), \dots, \phi_n(x)$  sont les fonctions de forme ou d'interpolations sur l'élément réel

### III.2. 6. Formulation intégrale des EDP

La (MEF) ne s'applique pas directement pour la résolution des équations aux dérivées partielles, mais à une formulation intégrale du problème, en utilisant l'une des deux approches : la méthode variationnelle et la méthode des résidus pondérés.

#### III.2.6.1. La Méthode variationnelle

Le principe de cette méthode repose sur la minimisation d'une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié. Cependant, cette approche n'est applicable que si l'on dispose d'une fonctionnelle équivalente au problème différentiel que l'on souhaite résoudre. En d'autres termes, la méthode nécessite de connaître une formulation fonctionnelle qui exprime de manière équivalente le problème différentiel donné [41].

$$F(A) = \int L(A) \cdot d\Omega \quad (\text{III.4})$$

$$L = W_c - W_p \quad (\text{III.5})$$

$L$  : est la fonction de Lagrange résultant de la Co-énergie du système de type cinétique et de son énergie potentielle.

$d\Omega$  : Domaine d'étude

$W_c$ : Énergie de type cinétique

$W_p$  : Énergie de type potentiel

### Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnétostatique et magnétodynamique du TESH

Dans le cas d'un phénomène magnétostatique cette fonction ( $L$ ) aura pour expression :

$$L = \int_0^B \nu B \cdot dB - J_c A \quad (\text{III.6})$$

D'où la fonctionnelle suivante :

$$F(A) = \left[ \int_V \nu B \cdot dB - J_c A \right] \quad (\text{III.7})$$

$\nu$ : Reluctivité magnétique

$$\text{Avec : } \nu = \frac{1}{\mu}$$

$B$ : Module de l'induction

$J_c$ : Densité de courant de conduction

#### **III.2.6.2. Formulation résidus pondérés**

Cette méthode consiste à choisir la fonction de projection de manière à minimiser l'intégrale du résidu. En d'autres termes, on cherche une fonction de projection qui réduit au maximum l'intégrale du résidu [41].

Le résidu est donné par :

$$W_i = \int_{\Omega} \Psi_i R_i d\Omega \quad (\text{III.8})$$

Tel que :

$$R_i = L(A^*) - f \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Avec :

$R_i$ : Résidu de l'approximation.

$L$ : Operateur différentiel.

$A^*$  : Grandeur physique inconnue

$\Psi_i$  : Fonction projective

$f$ : Terme associé aux sources électrique (densité de courant) ou magnétique (aimantation)

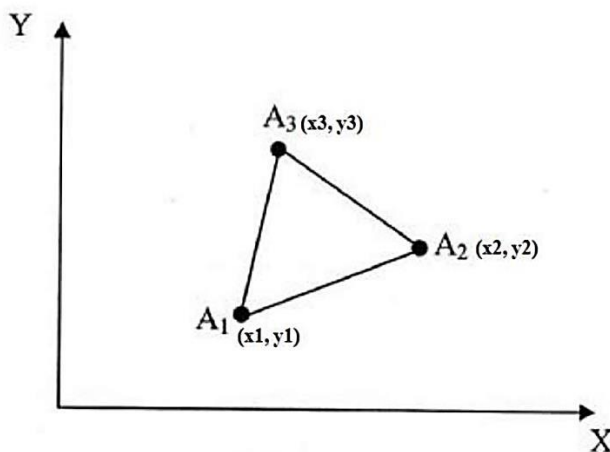
**III.2.6.3. Calcul de la fonction d'approximation**

On choisit une approximation sous forme d'un polynôme du premier degré d'un élément triangulaire du 1<sup>er</sup> ordre [44].

$$A(x, y) : ax + by + c \tag{III.9}$$

$$A(x, y) = [x \quad y \quad 1] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{III.10}$$

Soient  $A_1, A_2, A_3$  les valeurs de la fonction d'interpolation aux nœuds 1, 2 et 3 comme le montre la figure ci-dessous :



**Figure III.4:** Elément triangulaire type 2D (x, y)

Sachant que :  $A_1(x, y)$ ,  $A_2(x, y)$ ,  $A_3(x, y)$  sont les valeurs de l'inconnu aux nœuds, on aura alors :

$$\begin{aligned} A_1(x_1, y_1) &= ax_1 + by_1 + c = A_1 \\ A_2(x_2, y_2) &= ax_2 + by_2 + c = A_2 \\ A_3(x_3, y_3) &= ax_3 + by_3 + c = A_3 \end{aligned} \tag{III.11}$$

Le système matriciel correspondant est le suivant :

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \tag{III.12}$$

Les coefficients a, b et c se déduisent comme suit :

**Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnétostatique et magnétodynamique du TESF**

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad \text{(III.13)}$$

On aura :

$$A(x, y) = [x \quad y \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad \text{(III.14)}$$

Pour chaque élément e, on aura :

$$A^e(x, y) = \langle \phi_1^e(x, y) \phi_2^e(x, y) \phi_3^e(x, y) \rangle \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad \text{(III.15)}$$

Tel que :

$$\phi_i^e(x, y) = \frac{1}{2\Delta^e} = [\sigma_i^e + \beta_i^e x + \mu_i^e y] \quad \text{ou} \quad i = 1, 2, 3$$

Et :

$$2\Delta_e = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}, \Delta^e = \text{est l'air de l'élément triangulaire}$$

Cette interpolation nous permet d'obtenir un système algébrique à résoudre dans le but d'obtenir des solutions physiquement significatives.

### III.2.7. Assemblage des matrices élémentaires

L'assemblage des matrices élémentaires  $[K]^e$  et des vecteurs élémentaires  $[F]^e$  est l'opération qui permet de construire la matrice globale  $[K]$  et le vecteur global  $[F]$ , on peut donc obtenir un système de la forme [41].

$$R = \sum_{e=1}^{ne} R_e \quad \text{(III.16)}$$

$$R = \sum_{e=1}^{ne} [K]^e \cdot [A]^e - [F]^e \quad \text{(III.17)}$$

ne : représentant le nombre d'éléments du domaine

$[K]$  : La matrice globale discrétisée dite la matrice Raider

$[F]$  : Vecteur source

Le système final est :

$$[K] \cdot [A] = [F] \quad \text{(III.18)}$$

## Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TESF

### III.2.8. Avantages et inconvénients de la MEF

#### III.2.8.1. Avantages

- Flexibilité pour s'adapter à des géométries complexes en 2D/3D
- Temps de calcul relativement avantageux en 2D
- Implémentation aisée des conditions aux limites
- Applicable à une grande variété de problèmes d'ingénierie (Mécanique du solide, dynamique, problèmes de transfert chaleur, mécanique des fluides, problèmes électromagnétiques).
- Elle s'intègre aisément à des logiciels de conception assistée par ordinateur CAO.

#### III.2.8.2. Inconvénients

- Une grande quantité de données est requise comme entrée pour le maillage utilisé en termes de connectivité nodale et d'autres paramètres en fonction du problème.
- Nécessite des ressources informatiques importantes.
- Il existe des points chauds tels que le rapport d'aspect (rapport des dimensions plus longues aux dimensions plus petites), qui peuvent affecter la précision des résultats.

### III.3. Formulation éléments finis du modèle électromagnétique du TESF

#### III.3.1. Equation aux dérivées partielles 2D(r, z)

Dans le cadre de la modélisation 2D en coordonnées cylindrique ( $\vec{u}_r, \vec{u}_\varphi, \vec{u}_z$ ), et sachant que les propriétés des matériaux sont linéaires, isotropes, l'expression (II.39) peut être développée aisément.

En effet, en 2D cylindriques dans le plan (r,z) la densité de courant ainsi que le potentiel vecteur magnétique sont dirigés suivant l'axe orthogonale  $\vec{u}_\varphi$  tel que  $\vec{j}_s = (0, J_{s\varphi}, 0)$  et  $\vec{A} = (0, A_\varphi, 0)$

L'induction magnétique s'obtient comme suit :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{u}_r & r\vec{u}_\varphi & \vec{u}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & rA_\varphi & 0 \end{vmatrix} = \begin{cases} -\vec{u}_r \left( \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial x} \right) \\ \vec{u}_\varphi (0) \\ \vec{u}_z \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right) \end{cases} \quad \text{(III.19)}$$

**Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnétostatique et magnétodynamique du TESF**

De plus, on exprime le terme de gauche de l'expression (II.39) tel que :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{u}_r & r\vec{u}_\varphi & \vec{u}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -\frac{v}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} & 0 & \frac{v}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \end{vmatrix} \quad (\text{III.20})$$

$$= \frac{1}{r} \begin{cases} \vec{u}_r \left[ \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \right) \right] \\ -r \vec{u}_\varphi \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \right) \right] \\ \vec{u}_z \left[ \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( -\frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \right) \right] \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Les composantes suivantes  $\vec{u}_r$  et  $\vec{u}_z$  étant nulle car  $A$  est constant suivant  $\vec{u}_\varphi$ , alors :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = - \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \right) \right] \vec{\mu}_\varphi \quad (\text{III.22})$$

On obtient finalement l'équation aux dérivées partielles du modèle général du TESF en coordonnées cylindriques 2D ( $r, z$ )

$$- \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \right) \right] - j \omega \sigma A_\varphi = J_{s\varphi} \quad (\text{III.23})$$

On pose le changement de variable  $A = rA_\varphi$  pour avoir des termes symétrique, d'où :

$$- \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial r A}{\partial z} \right) \right]$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{Air} \\ j \omega \frac{\sigma}{r} A & \text{Bobine réceptrice (multispire)} \\ j \omega \frac{\sigma}{r} A + J_{s\varphi} & \text{Bobine émettrice (multispire)} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

**Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TESH**

**III.3.2. Formulation en éléments finis du modèle magnétique 2D (r, z)**

La formulation intégrale des (EPD) (III.24) s'écrit

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \Psi_i(r, z) \left[ -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] d\Omega \\ & = \begin{cases} 0 \\ \iint_{\Omega} \Psi_i(r, z) j\omega \frac{\sigma}{r} A(r, z) d\Omega \\ \iint_{\Omega} \Psi_i(r, z) \left( j\omega \frac{\sigma}{r} A(r, z) + J_{s\varphi} \right) d\Omega \end{cases} \end{aligned} \quad \text{(III.25)}$$

$\Psi_i(r, z)$  : Fonction de projection

En utilisant le théorème de Green, le membre de gauche devient :

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \Psi_i(r, z) \left[ -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] d\Omega \\ & = \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Psi_i(r, z)}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial \Psi_i(r, z)}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial z} \right) \right] d\Omega - \int_{\Gamma} \Psi_i(r, z) \frac{\partial A(r, z)}{\partial n} d\Gamma \end{aligned} \quad \text{(III.26)}$$

Pour les conditions homogènes sur la frontière  $\Gamma$  du domaine, le terme intégral linéique s'annule :

$$\int_{\Gamma} \Psi_i(r, z) \frac{\partial A(r, z)}{\partial n} d\Gamma = 0 \quad \text{(III.27)}$$

Ainsi, la formulation éléments finis s'écrit tel que :

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Psi_i(r, z)}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial \Psi_i(r, z)}{\partial z} \left( \frac{v}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial z} \right) \right] d\Omega \\ & = \begin{cases} 0 \\ \iint_{\Omega} \Psi_i j\omega \frac{\sigma}{r} A(r, z) d\Omega \\ \iint_{\Omega} \Psi_i(r, z) \left[ j\omega \frac{\sigma}{r} A(r, z) \right] d\Omega + \iint_{\Omega} \Psi_i(r, z) j s_{\varphi} d\Omega \end{cases} \end{aligned} \quad \text{(III.28)}$$

**Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TESH**

Le Maillage est formé d'éléments finis triangulaire du 1<sup>er</sup> ordre, et le potentiel vecteur magnétique peut être exprimé sur chaque triangle par le facteur d'approximation suivante pour tous les nœuds d'un triangle.

$$A(r, z) = \sum_{j=1}^3 \Psi_j(r, z) A_j \quad (\text{III.29})$$

En introduisant la fonction d'approximation dans la formulation intégrale, on obtient pour un élément

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega^e} \Psi_i(r, z) \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial (\sum_{j=1}^3 \Psi_j(r, z) A_j)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial (\sum_{j=1}^3 \Psi_j(r, z) A_j)}{\partial z} \right) \right] d\Omega^e \\ & = \begin{cases} 0 \\ \iint_{\Omega^e_{recepteur}} \Psi_i(r, z) \left[ j\omega \frac{\sigma}{r} \sum_{j=1}^3 \Psi_j(r, z) A_j \right] d\Omega^e_{recepteur} \\ \iint_{\Omega^e_{emetteur}} \Psi_i(r, z) \left[ j\omega \frac{\sigma}{r} \sum_{j=1}^3 \Psi_j(r, z) A_j + J_{s\phi} \right] d\Omega^e_{emetteur} \end{cases} \quad (\text{III.30}) \end{aligned}$$

L'expression peut s'écrire sous forme matricielle comme suit :

$$[K]\{A\} = \begin{cases} 0 & \text{Air} \\ [M]\{A\} & \text{Réceptrice} \\ [M]\{A\} + \{F\} & \text{Émettrice} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

$$K_{ij} = \iint_{\Omega} \left( \frac{\nu}{r} \nabla \Psi_i \cdot \nabla \Psi_j \right) dr dz$$

$$F_{ij} = \iint_{\Omega} \Psi_j J_s dx dz$$

$$M_{ij} = \iint j \sigma \Psi_i \Psi_j dr dz$$

[K] : Matrice raideur

[M] : Matrice masse

### III.4. Expressions de calcul des grandeurs électromagnétique globales

#### III.4.1. Calcul des flux magnétiques

La bobine émettrice (1) est alimentée par un courant alternatif, ce courant  $I_1(t)$  donne naissance à une induction magnétique  $B_1(t)$  responsable du flux  $\Phi_1(t)$ . Le flux de la bobine émettrice traverse et brasse la bobine réceptrice donnant naissance à un courant induit  $I_2(t)$  auquel est associé un flux magnétique  $\Phi_{22}(t)$  [42].

$$\Phi_1(t) = \Phi_{11}(t) + \Phi_{12}(t) \quad (\text{III.32})$$

$\Phi_{11}(t)$  : Partie du flux magnétique de la bobine émettrice

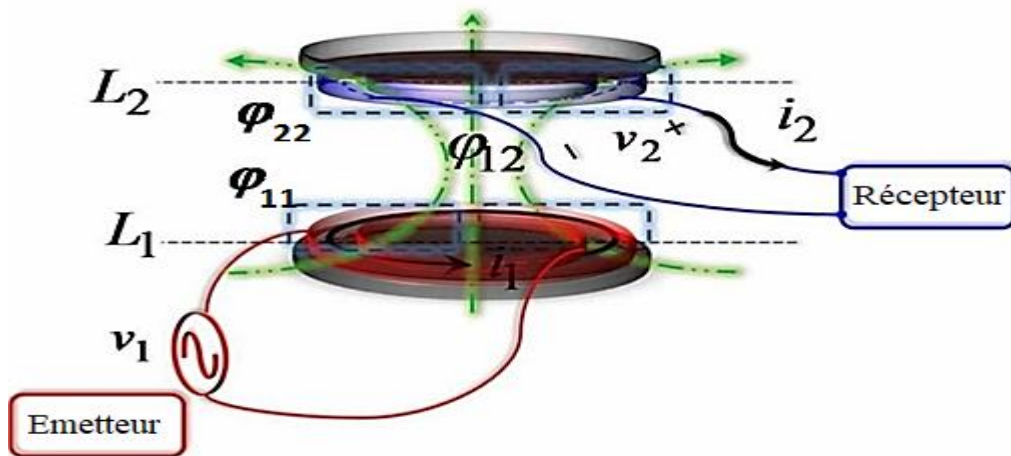
$\Phi_{12}(t)$  : Partie du flux magnétique traversant la bobine réceptrice

D'où :

$$\Phi_{11}(t) = \iint_{S_1} \vec{B}_1(t) \cdot \vec{ds}_1 = \sum_{k=1}^{N^{\Delta}_{emetteur}} B_{1k}^{\Delta}(t) \cdot dS_1^{\Delta} = L_1 I_1(t) \quad (\text{III.33})$$

En introduisant, le potentiel vecteur magnétique, on aura :

$$\Phi_{11}(t) = \iint_{S_1} \vec{B}_1(t) \cdot \vec{ds}_1 = \iint_{S_1} (\text{rot} \cdot \vec{A}_1) \vec{ds}_1 = \oint_{\Gamma_1} A_{1moy} d\Gamma_1 = A_{1moy} 2\pi r_{moy} \quad (\text{III.34})$$



**Figure III.5:** Schéma d'un système de TESH montrant les  $\phi$ ,  $I$  et  $B$  des bobines [36]

#### III.4.2. Calcul de la force électromotrice

$$e_{21} = -n_2 \frac{d\phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (\text{III.35})$$

$$e_{22} = L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (\text{III.36})$$

**Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnéto-statique et magnéto-dynamique du TESF**

**III.4.3. Calcul des énergies électriques et magnétiques**

$$DW_{\text{mag}} = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad (\text{III.37})$$

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \quad (\text{III.38})$$

**III.4.4. Calcul des inductances propres et mutuelles :**

Ainsi, l'inductance propre de la bobine émettrice est obtenue, on considérant son alimentation par le courant  $I_1(t)$ , la bobine réceptrice étant a circuit ouvert de sorte que [33] :

$$\Phi_1(t) = N_1 \Phi_{11}(t) = L_1 \cdot I_1(t) \quad (\text{III.39})$$

D'où pour  $N_1$  spires

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_{11}(t)}{I_1(t)} = \frac{\iint_{S_1} \vec{B}_1(t) \cdot d\vec{s}_1}{I_1(t)} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\Delta} \text{emett}} B_1^{\Delta} \cdot dS_1^{\Delta}}{I_1(t)} = \frac{N_1 \oint_{\Gamma_1} A_{1\text{moy}} \cdot d\Gamma_1}{I_1(t)} \quad (\text{III.40})$$

Sachant que :

$$A_{1\text{moy}} = \frac{\iint_{S_1} A_1 ds_1}{S_1}$$

Alors :

$$L_1 = \frac{N_1}{I_1(t)} \cdot \oint_{\Gamma_1} \iint_{S_1} \frac{(A_1 ds_1) d\Gamma_1}{S_1} \quad (\text{III.41})$$

$$L_1 = \left( \frac{N_1}{I_1(t)} \iiint_{V_1} \frac{A_1 \cdot dv_1}{S_1} \right)_{I_2=0} \quad (\text{III.42})$$

Le même raisonnement en considérant que c'est la bobine réceptrice qui est alimenté, nous conduit à la même expression de l'inductance propre :

$$L_2 = \left( \frac{N_2}{I_2(t)} \iiint_{V_2} \frac{A_2 \cdot dv_2}{S_2} \right)_{I_1=0} \quad (\text{III.43})$$

L'inductance mutuelle est définie à partir des flux mutuel  $\Phi_{12}(t)$  ou  $\Phi_{21}(t)$

$$\Phi_{12}(t) = \iint_{S_2} \vec{B}_1(t) \cdot d\vec{s}_2 \quad (\text{III.44})$$

$$M = \frac{N_2(N_1 \Phi_{12}(t))}{I_1} = \frac{N_2 N_1}{I_1} \iint_{S_2} \vec{B}_1(t) \cdot d\vec{s}_2 \quad (\text{III.45})$$

**Chapitre III Modélisation par éléments finis 2D du modèle magnétostatique et magnétodynamique du TESF**

$$M = \left( \frac{N_1 N_2}{I} \iiint_{V_2} \frac{A_1 \cdot dv_2}{S_2} \right)_{I_1(t) \neq 0}^{I_2(t) \neq 0} \quad (\text{III.46})$$

$V_1, V_2$  : Le volume des bobines

En considérant un maillage des bobines émettrices et réceptrices, on déduit les expressions discrètes suivantes :

$$L_1 = \frac{N_1}{I_1} = \oint_{C_1} A_1^{moy} \cdot d\vec{l}$$

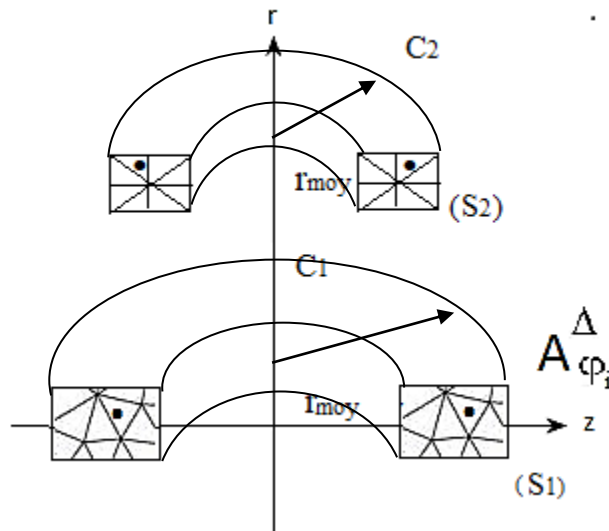
$$A_1^{moy} = \frac{\iint_{S_1} A_1^\Delta \vec{ds}_1}{S_1} = \frac{\sum_{j=1}^{N^\Delta} A_{1j}^{\Delta j} \Delta S}{S_1}$$

$A_{1j}^{\Delta j}$  Étant le potentiel vecteur magnétique défini au barycentre de chaque triangle

$$L_1 = \frac{N_1}{I_1} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{emetteur}}} A_{1k}^\Delta dv_1}{S_1} = \frac{N_1 \sum_{k=1}^{N_{\text{emetteur}}} A_{1k}^\Delta ds_{1k} 2\pi r_{\text{moy}}}{I_1 S_1} \quad (\text{III.47})$$

$$L_2 = \frac{N_2}{I_2} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{emetteur}}} A_{2k}^\Delta dv_2}{S_2} = \frac{N_2 \sum_{k=1}^{N_{\text{emetteur}}} A_{2k}^\Delta ds_{2k} 2\pi r_{\text{moy}}}{I_2 S_2} \quad (\text{III.48})$$

$$M = \frac{N_1 N_2}{I_1} \frac{\sum_{k=1}^N A_1 ds_{2k} 2\pi r_{\text{moy}}}{S_2} \quad (\text{III.49})$$



**Figure III.6:** Schéma montre le potentiel vecteur magnétique au milieu des triangles

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode des éléments finis avec ses étapes à suivre pour résoudre des problèmes complexes en électromagnétisme. Puis nous avons décrit les différentes expressions de calcul des grandeurs électromagnétiques globales.

D'où on conclut que la modélisation électromagnétique par la méthode des éléments finis offre une approche précise et flexible pour résoudre des problèmes complexes en électromagnétisme, et joue un rôle essentiel dans l'avancement et l'optimisation des technologies de transfert d'énergie sans fil.

## **Références de chapitre IV**

### **Références**

[39] Hervé Oudin, « Méthodes des éléments finis "Ecole Centrale de Nantes », 2008, pp.63.

[40] SEGHIR Abdelghani, « Cours Méthode des Éléments Finis », Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2014.

[41] Jacques-Hervé SAIAC Ingénieur de l'école centrale de Paris, « Mathématique pour l'électricien »

[42] Gérard Fournet, Professeur émérite de l'université de Paris « Electromagnétisme ».

## **Chapitre IV**

# **Simulation numériques de la recharge statique et dynamique sans fil de batteries de voiture électriques**

## **IV.1 : Introduction**

Le transfert d'énergie sans fil offre la possibilité de recharger les véhicules électriques en éliminant les câbles électriques. On distingue deux différentes topologies de recharges des batteries : La recharge statique et la recharge dynamique. La recharge dynamique offre une flexibilité supérieure par rapport à la recharge statique car elle optimise l'utilisation de l'énergie.

Ce chapitre est consacré à l'étude du système de TESF sous MATLAB et à la présentation des résultats de simulation ainsi leurs interprétations. Ces derniers concernant la Mutuelle inductance entre les bobines émettrices et réceptrices dans les deux cas de la recharge. Ainsi que la répartition des lignes du potentiel vecteur magnétique.

## **IV.2. Présentation du système expérimental de TESF utilisé pour une recharge statique**

### **IV.2.1. Dispositif (1) d'étude**



**Figure IV.1:** Bobines plates à écartement variable

Les bobines du dispositif d'étude représenté dans la (fig IV.1) sont des bobines circulaires identiques montées sur un support sérigraphié. L'une des bobines est fixe, l'autre mobile. Un index permet de mesurer leur écartement. Les valeurs des différentes grandeurs géométriques sont données dans le tableau IV.1 suivant :

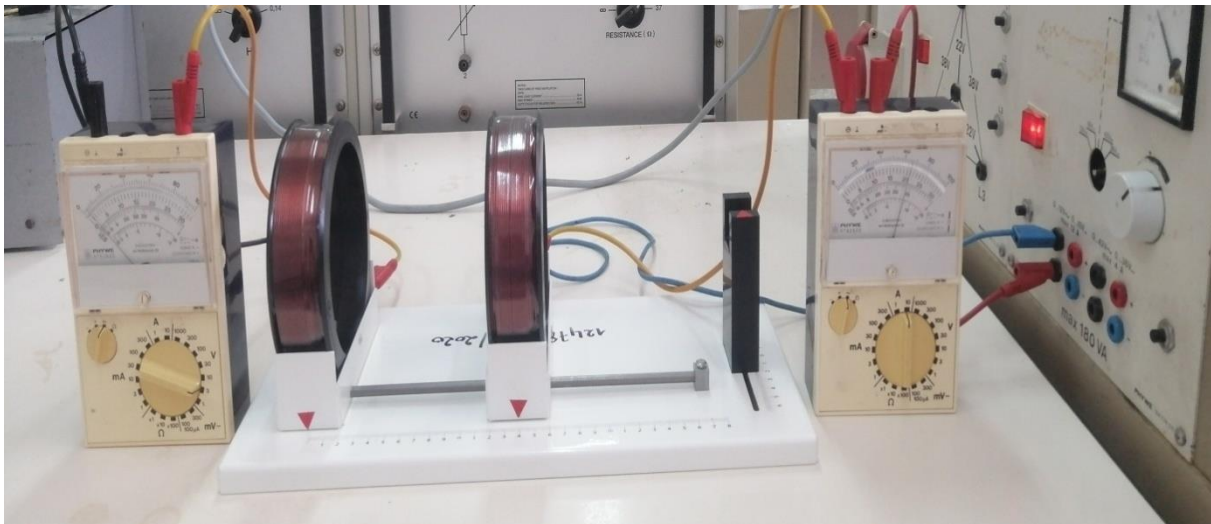
## Chapitre IV Simulations numériques de la recharge statique et dynamique sans fil de batteries de voiture électrique

Paramètres	Valeurs
Nombre de spires	95
Type de fil	13 /10
Diamètre du fil	1,3 mm

**Tableau IV.1** : Paramètres des bobines émettrices et réceptrices

### IV.2.2. Mesure expérimentale de la mutuelle inductance

La (fig IV.2) montre l'expérience faite au laboratoire où on a réalisé le montage ci-dessous. Premièrement on a fixé le courant à 6A à l'aide d'un ampèremètre branché à la bobine émettrice, un champ magnétique est créé et lorsque ce champ atteint la deuxième bobine, il induit une tension dans cette dernière qu'on a mesurée avec un voltmètre. Ensuite on fait déplacer la bobine progressivement pour mesurer la (f.e.m) pour des valeurs différentes de l'entrefer dont on déduit la mutuelle inductance.



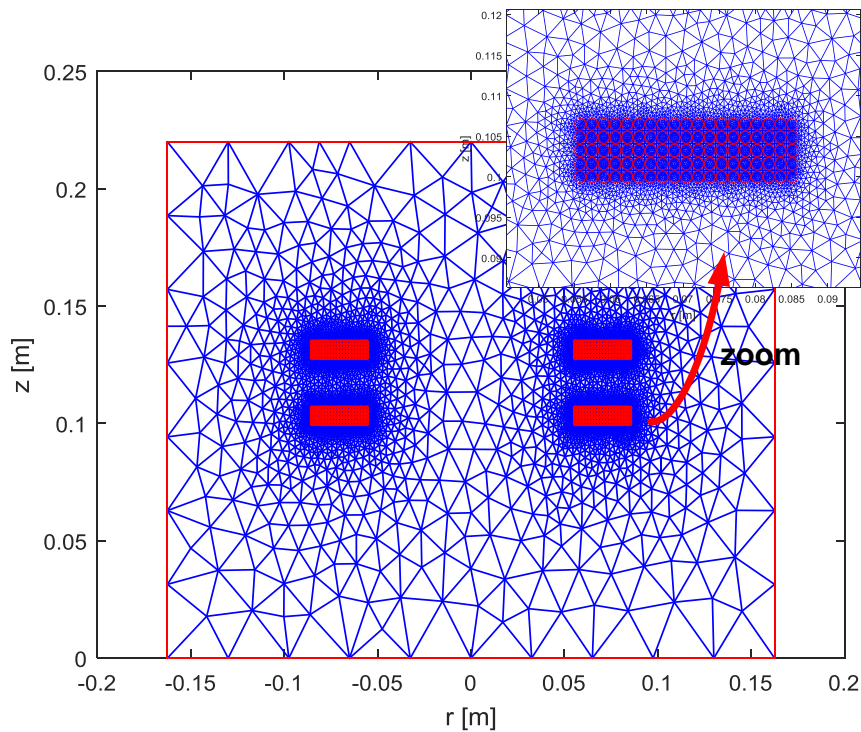
**Figure IV.2** : Expérience réalisée pour un entrefer variable et un désalignement nul

Dans cette expérience, le but est de comprendre l'influence de l'entrefer sur l'inductance mutuelle, nous nous concentrons sur le dispositif visible sur la (fig IV.1). La détermination analytique des inductances mutuelles entre ces bobines circulaires en fonction de l'entrefer, se fait en utilisant la formule suivante :

$$M = \frac{f.e.m}{\omega.I}$$

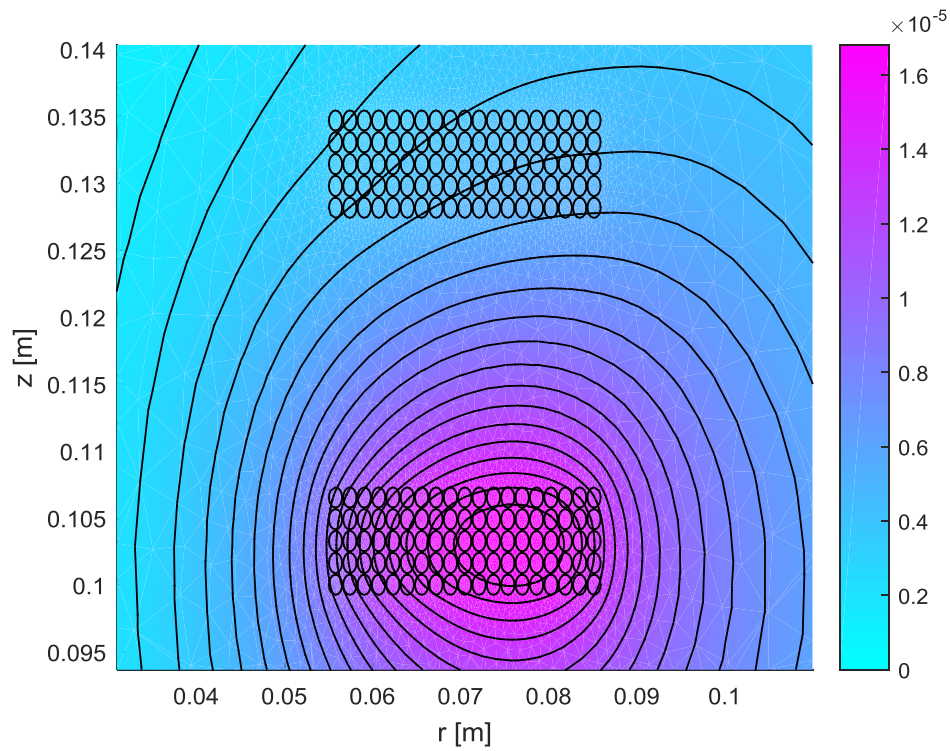
### **IV.2.3. Etude du modèle sous MATLAB pdetool**

La modélisation du dispositif permettra de valider les codes de calcul éléments finis et les modèles magnétodynamique utilisés à travers une comparaison avec des résultats expérimentaux.

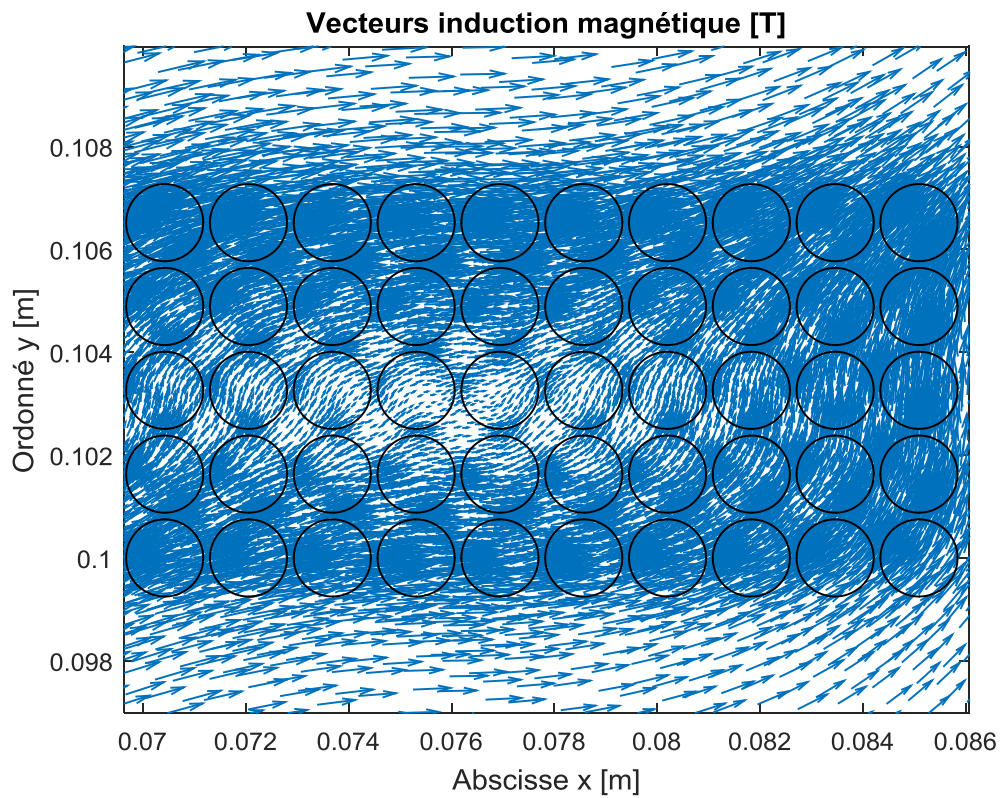


**Figure IV.3 : Maillage du dispositif (1) de TESF**

La (fig IV.4) montre que les lignes du champ magnétique sont refermées sur la surface du dispositif donc la bobine réceptrice capte parfaitement les lignes du champ générées par la bobine émettrice.



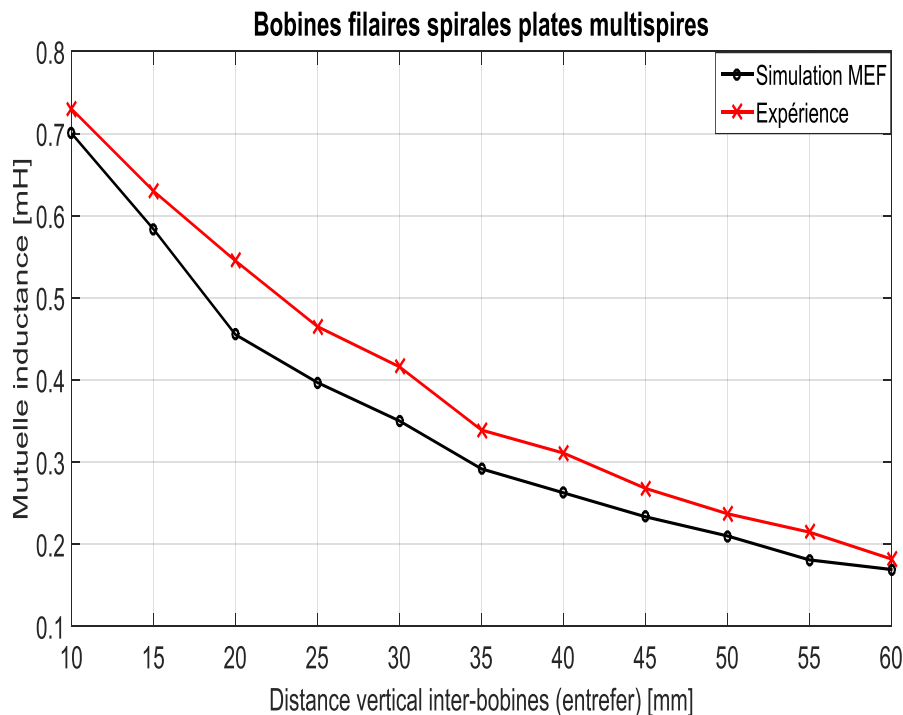
**Figure IV.4 :** Module du potentiel vecteur magnétique pour un entrefer inter-bobines de 20mm.



**Figure IV.5 :** Module Vecteur induction magnétique

## Chapitre IV Simulations numériques de la recharge statique et dynamique sans fil de batteries de voiture électrique

Les résultats de l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction de l'entrefer inter-bobines calculés en utilisant la formulation éléments finis du modèle magnétodynamique sont comparés à ceux obtenus expérimentalement sont donnés sur la (fig. IV.6).

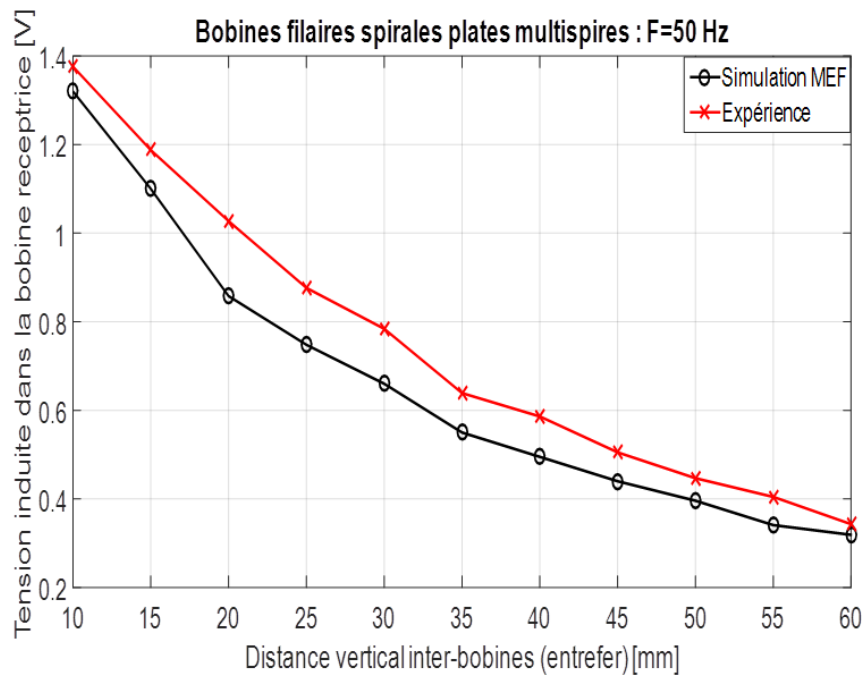


**Figure IV.6 :** Mutuelle inductance entre bobines circulaire multi-spaires avec la variation de l'entrefer

La (figIV.6) montre une décroissance de la mutuelle inductance avec l'augmentation de l'entrefer, ceci est dû à la réduction du flux magnétique traversant la bobine secondaire qui décroît avec la distance à la bobine émettrice. Nous remarquons une bonne concordance entre les résultats de simulation par éléments finis et ceux de l'expérimentale.

Les résultats de l'évolution de force électromotrice induite sont obtenus à partir de l'inductance mutuelle et de la fréquence pour un courant donné sont présentés par la (fig.IV.7).

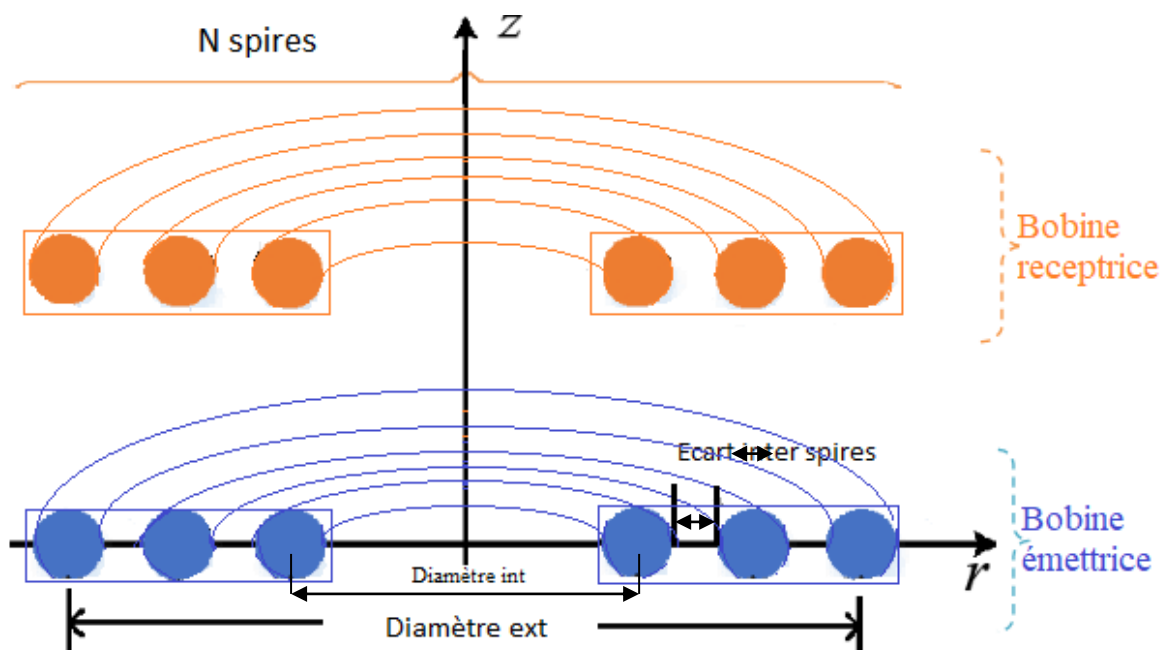
Cette figure montre que la tension induite dans la bobine réceptrice diminue avec l'augmentation de l'entrefer.



**Figure IV.7 :** Tension induite dans la bobine réceptrice

### IV.3. Présentation du système d'étude de TESF pour la recharge de batteries de voitures électriques.

#### IV.3.1. Dispositif (2) d'étude



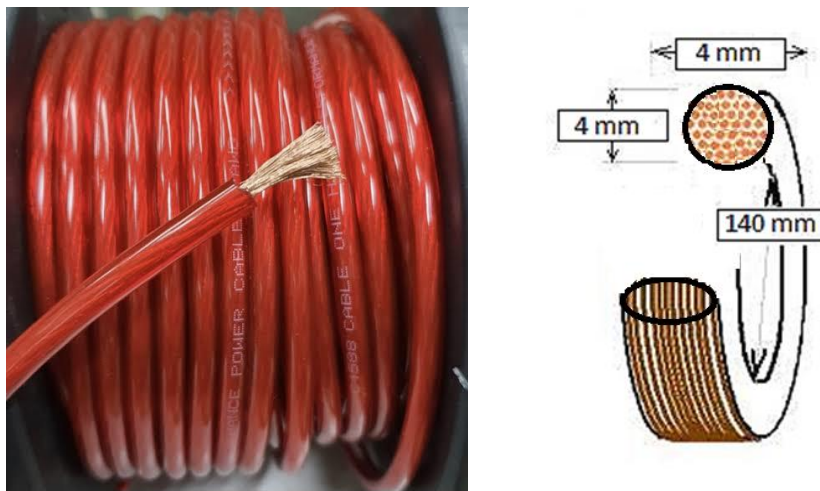
## Chapitre IV Simulations numériques de la recharge statique et dynamique sans fil de batteries de voiture électrique

**Figure IV.8:** Deux bobines spirales circulaires multi-spires.

Les bobines du dispositif d'étude représenté dans la figure IV.8 sont des bobines circulaires construites à base de fil conducteur de type AWG 8 montré dans la (fig IV.9). Les valeurs des différentes grandeurs géométriques sont données dans le tableau IV.2 suivant :

Paramètres	Valeurs
Nombre de spires	18
Diamètre intérieure	140mm
Diamètre du conducteur	4mm
Espacement des tours	3mm
Diamètre extérieur	400 mm

**Tableau IV.2 :** Paramètres des bobines émettrices et réceptrices



**Figure IV.9:** Le fil AWG 8 utilisé dans le dispositif d'étude : Détail d'une spire

### IV.4. L'étude du modèle sous MATLAB pdeTool

#### IV.4.1. Les caractéristiques du dispositif

Les bobines sont considérées identiques  $N_1=N_2=18$  spires

La fréquence d'alimentation :  $f_r = 33$  KHz

Courant dans la bobine émettrice :  $I=6$  A

Perméabilité magnétique du vide :  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  [H.m<sup>-1</sup>]

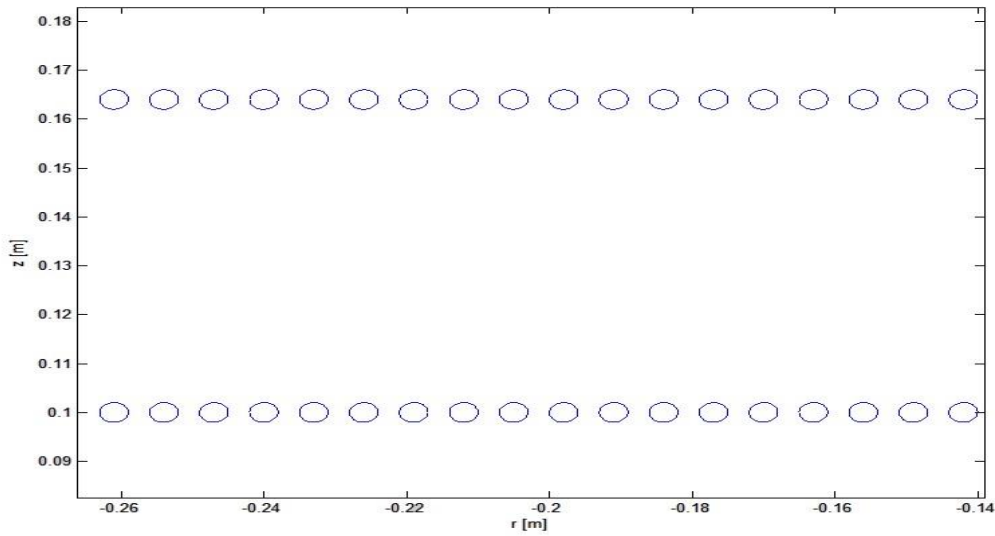
Perméabilité relative :  $\mu_r = 1$

Conductivité électrique :  $\sigma = 5.8 \cdot 10^{+7}$  [S.m<sup>-1</sup>].

Pulsation:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_r$  [rad/s].

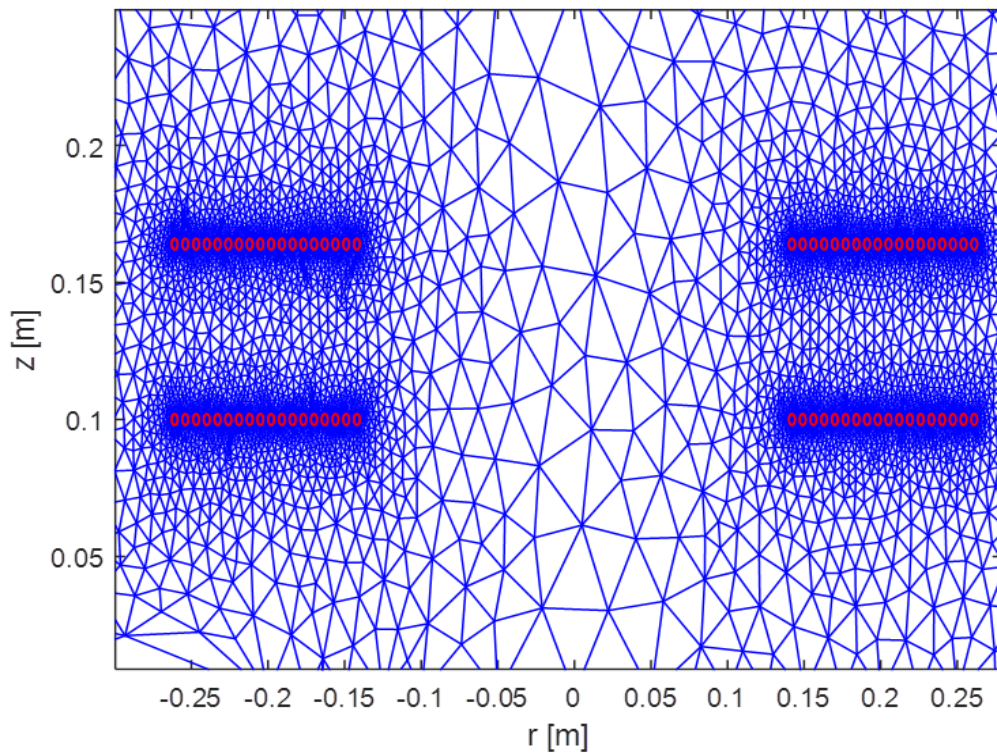
### IV.4.2. La définition de la géométrie

La figure suivante donne la géométrie du modèle réalisée sous MATLAB 2D (r, z).



**Figure IV.10 :** La géométrie et les domaines d'étude

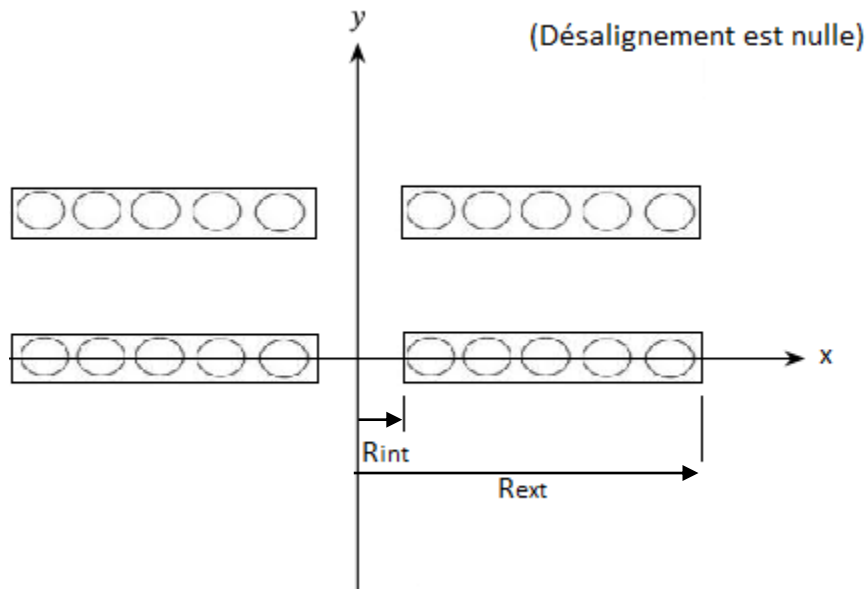
### IV.4.3. Création du maillage



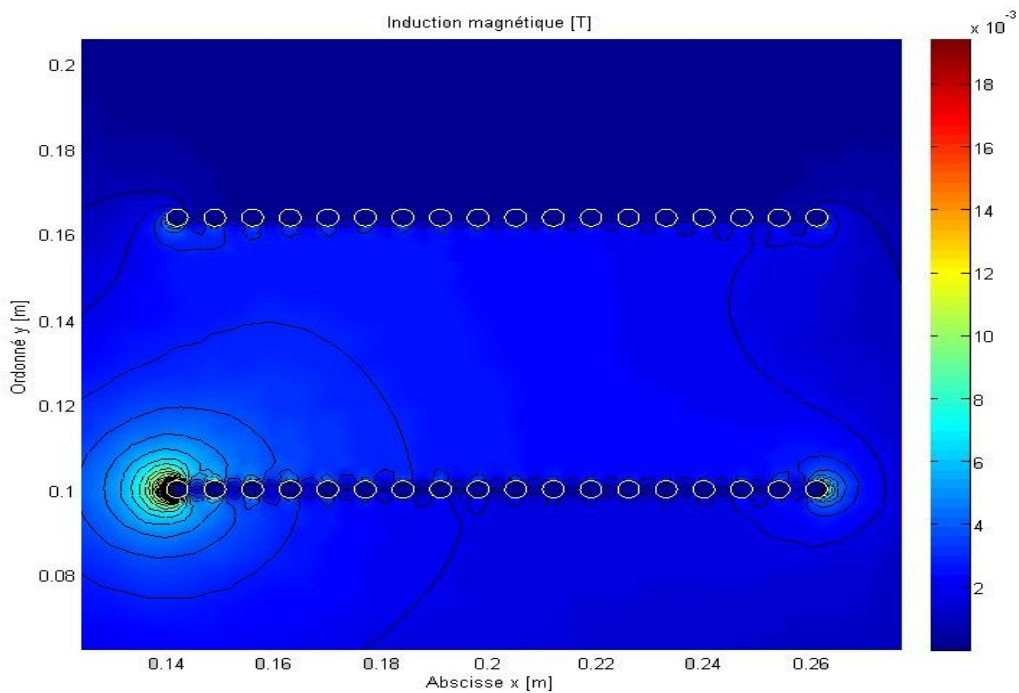
**Figure IV.11:** le maillage des bobines plates spirales (13085 nœuds, 26090 triangles)

### **IV.5. TESH bobines spirales plates pour la recharge statique**

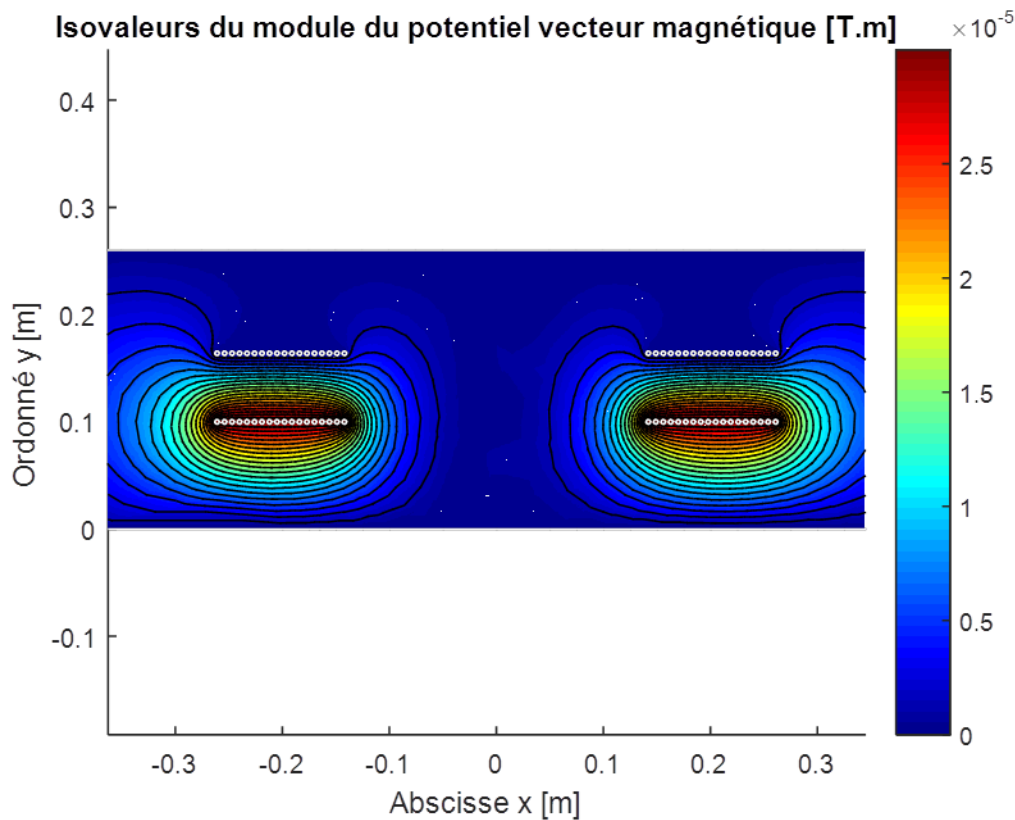
La (fig IV.12) présente la configuration géométrique du dispositif utilisé pour la recharge statique. Le calcul des inductances mutuelles est obtenu avec la variation de la distance verticale (gap) entre les deux bobines.



**Figure IV.12:** Configuration 2D des bobines spirales plates avec un désalignement nul



**Figure IV.13:** L'induction magnétique du système étudié

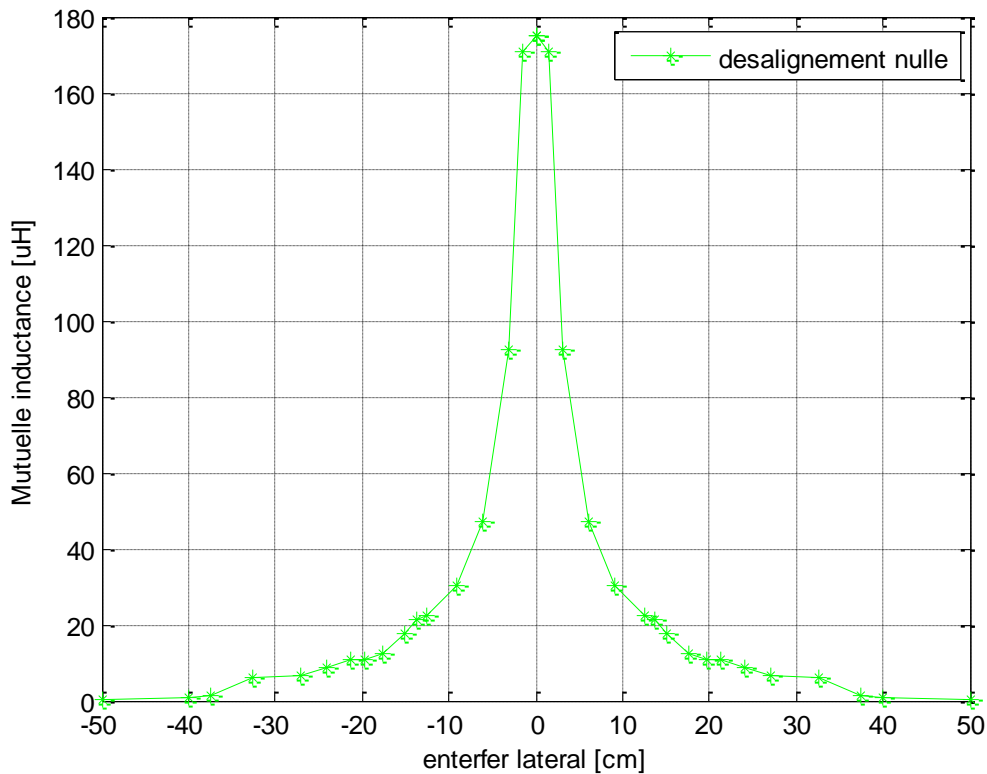


**Figure IV.14:** Module du potentiel vecteur magnétique

La (fig IV.14) montre que les lignes du champ magnétique dans la recharge statique sont refermées sur la surface de la bobine émettrice ce qui fait que la bobine réceptrice capte parfaitement toutes les lignes du champ magnétique, donc on a un transfert d'énergies efficaces.

Les résultats de l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction de l'entrefer inter-bobines sont donnés sur la (fig. IV.15).

La (fig IV.15) montre la mutuelle inductance en fonction de l'entrefer lors de la recharge statique sans fil de voiture électrique. Cette courbe montre que la mutuelle prend des valeurs maximales lorsque le désalignement entre bobines émettrices et réceptrices est nul. Cette dernière diminue avec l'augmentation de l'entrefer.

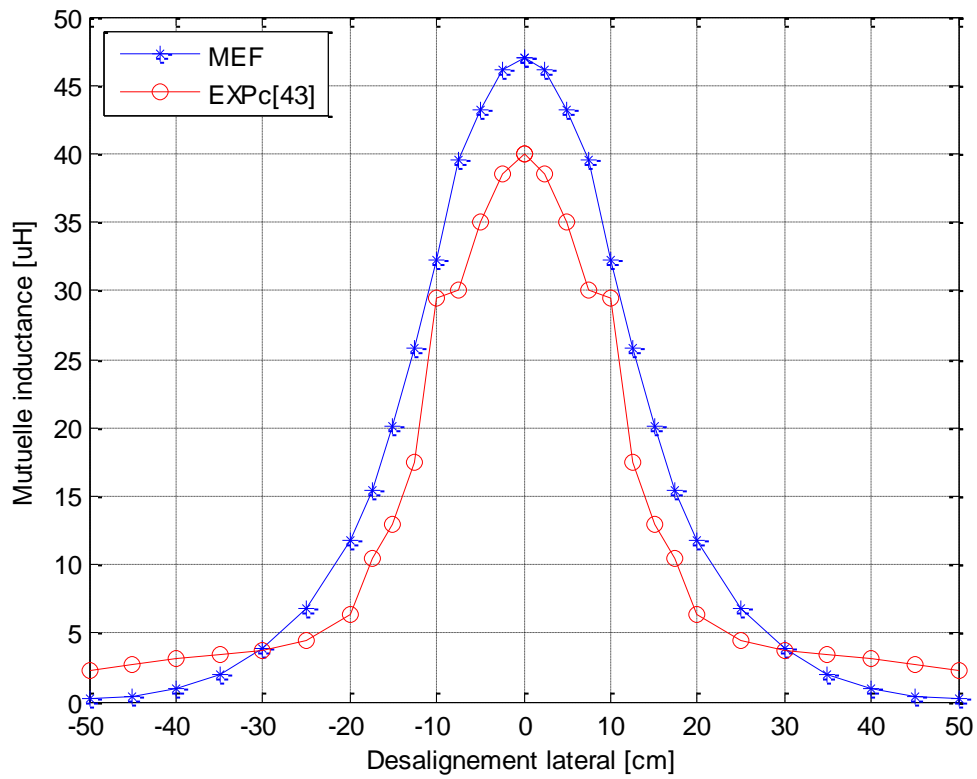


**Figure IV.15 :** Mutuelle inductance entre bobines circulaires multi-spire avec un désalignement nul

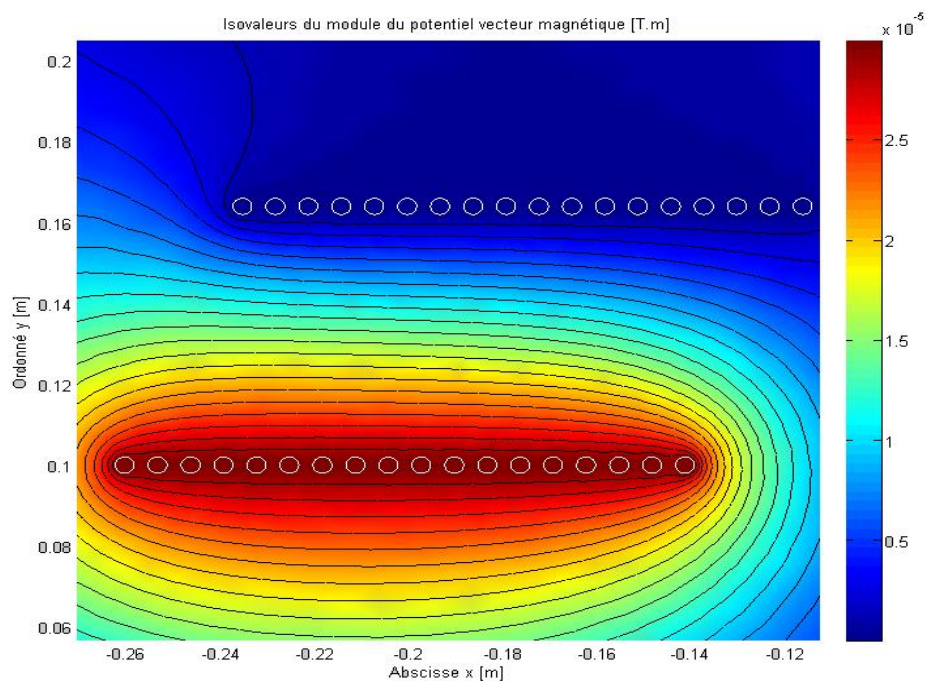
## **IV.6 : TESH bobines spirales plates multi-spires pour la recharge dynamique**

### **IV.6 .1 : Mutuelle inductance pour un entrefer constant et un désalignement variable**

Les résultats obtenus pour la mutuelle inductance entre les deux bobines circulaires émettrices et réceptrices multi-spires identiques sont donnés par la (fig IV.16) ci-dessous. L'allure présente la mutuelle inductance pour un entrefer constant ( $\text{Gap} = 6\text{cm}$ ) en fonction de désalignement, ou les résultats de la simulation et de l'expérience sont en bon accord. L'inductance mutuelle est maximale lorsque les deux bobines sont en alignement parfait, environ  $40\mu\text{h}$  et  $47\mu\text{h}$  pour l'expérience et la simulation respectivement, ce qui valide aussi les codes de calcul mis en œuvre.



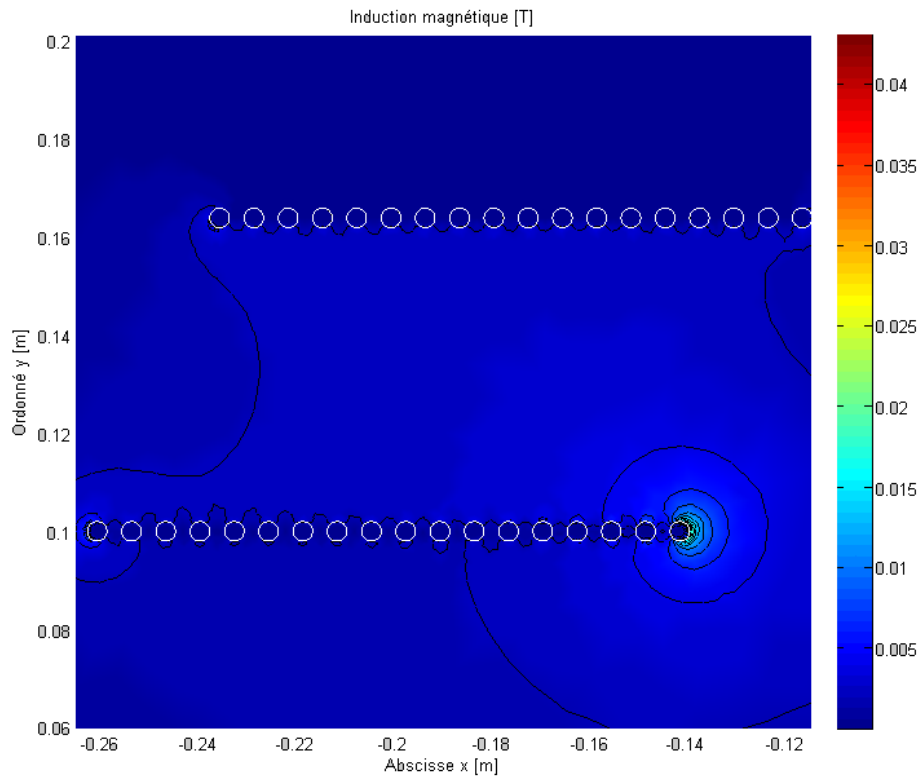
**Figure IV.16:** Mutuelle inductance entre deux bobines circulaires plates multi-spires pour entrefer constant et un désalignement variable



**Figure IV.17:** Module du potentiel vecteur magnétique

## Chapitre IV Simulations numériques de la recharge statique et dynamique sans fil de batteries de voiture électrique

La (fig IV.17) montre que les bobines émettrices ne génèrent pas les lignes du champ magnétique sur sa surface, donc elles ne sont pas captées entièrement par la bobine réceptrice dans ce cas le transfert d'énergie n'est plus efficace.



**Figure IV.18:** Induction magnétique pour un désalignement  $=2.5$  et un entrefer fixe

### **IV.6.2 : Mutuelle inductance pour un entrefer constant et déplacement de la bobine réceptrice**

Le dispositif étudié est constitué de plusieurs bobines émettrices, distantes l'une de l'autre avec un écart de 3 mm et une bobine réceptrice située à une distance verticale fixe (gap=6cm) tel que la (fig IV.19) montre.

## Chapitre IV Simulations numériques de la recharge statique et dynamique sans fil de batteries de voiture électrique

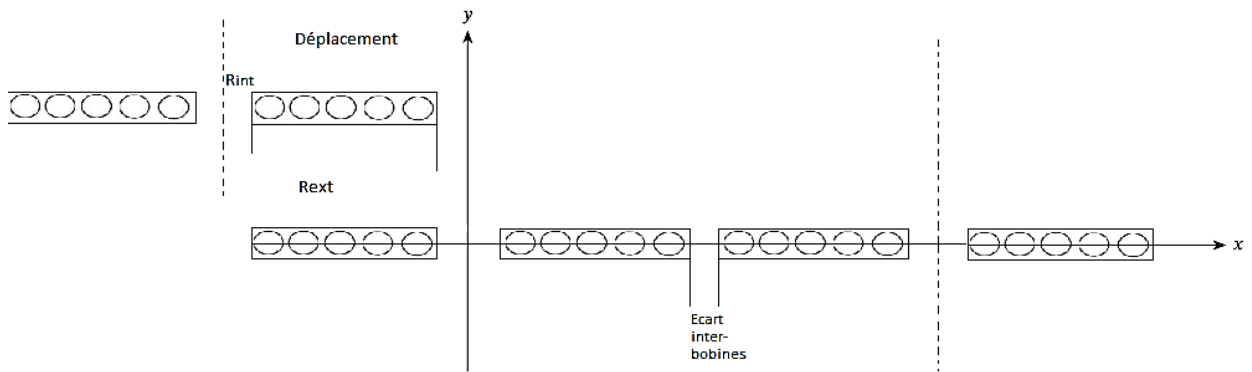


Figure IV.19: Configuration géométrique du système TESF à bobines plates avec un entrefer constant et un déplacement de la bobine réceptrice

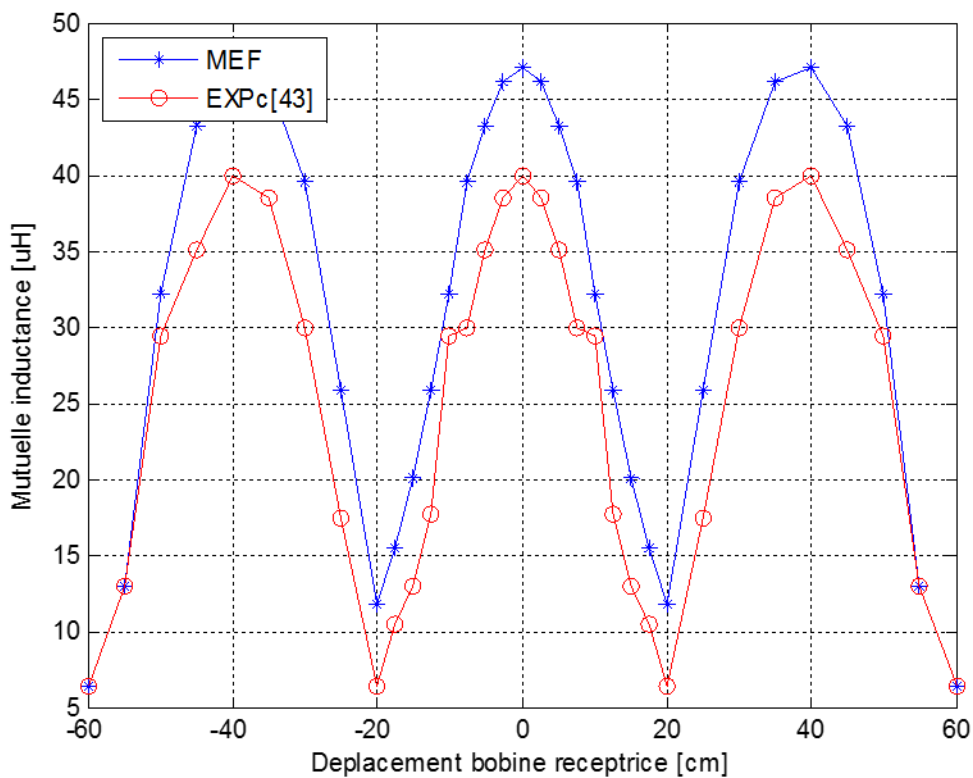


Figure IV.20: Mutuelle inductance à bobines plates avec un déplacement de la bobine réceptrice

La (fig IV.20) montre une bonne concordance entre les résultats de simulation et ceux expérimentaux donnés dans l'article «Energie». La présence de plusieurs bobines émettrices fait apparaître plusieurs maximums lorsque le désalignement est nul. Les minimums correspondent à la transition entre extinction du courant dans une bobine émettrice et l'alimentation de la bobine réceptrice suivante.

## **IV.7. Conclusion**

Ce chapitre se concentre sur la modélisation d'un système de TESF ou des essais sont faits pour le calcul des mutuelles inductances pour des différentes valeurs de l'entrefer et désalignement pour les recharges statiques et dynamiques. D'où on a conclu que la mutuelle diminue avec l'augmentation de l'entrefer et désalignement ce qui confirme que le transfert d'énergie est dépendant de la distance séparant le récepteur de l'émetteur.

## **Reference de chapitre IV**

### **Références**

[43] AinurRakhymbay , AnvarKhamitov,Batyrbek Alimkhanuly ,Maximum Lu and Toanphung , « Precise Analyse on Mutual Variation in Dynamic Wireless charging of Electric vehicle» . Energies 2018.

## **Conclusion générale**

Le transfert d'énergie sans fil par induction magnétique est en plein essor dans divers domaines d'applications et plus particulièrement pour la recharge statique et dynamique de batteries de voitures électriques, et ce dans le contexte écologique actuel. Ainsi les chercheurs soutenus par des entreprises travaillent pour son amélioration et son développement pour le rendre moins chère et abordable aux consommateurs. Cette technologie pourra être largement utilisée puisqu'elle simplifie l'utilisation des appareils compatibles, surtout parce qu'elle offre beaucoup d'avantages, et permet de transmettre de l'électricité en toute sécurité, en évitant d'utiliser des fils électriques, et son intégration dans les appareils que nous utilisons au quotidien peut les rendre plus pratiques et faciles à utiliser.

Dans ce mémoire l'objectif était de calculer la mutuelle inductance et la force électromotrice induite (f.e.m) dans un système de transfert d'énergie électrique sans fil par induction électromagnétique. A cet effet, le modèle magnétostatique et magnétodynamique harmonique bidimensionnel en coordonnées cylindriques 2D ( $r,z$ ) est résolu en utilisant la méthode des éléments finis. Les grandeurs locales calculées sont le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique à partir de laquelle est déduit le flux magnétique globale ainsi que les inductances mutuelles et la f.e.m induite aussi bien en faisant varier l'entrefer inter-bobines émetteur-récepteur pour la recharge statique et le désalignement latéral dans le cas de la recharge dynamique.

Deux dispositifs de TESF sont considérés, le premier ayant des bobines circulaires multi-spaires multi-couches pour valider le modèle numérique implémenté sous environnement Matlab, et le second a une géométrie réelle formée de bobines spirales plates multi-spaires pour prédire la mutuelle inductance et la f.e.m pour la recharge statique et dynamique. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de l'entrefer (air gap) distance verticale inter-bobines et le désalignement latéral qui est la distance horizontale inter-axes des bobines pour la recharge dynamique à plusieurs cycles. Une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par simulation numérique, démontre une bonne concordance particulièrement en considérant la géométrie multi-spaires des bobines, validant ainsi l'efficacité des modèles de calcul mis en œuvre.

La perspective envisagée étant d'inclure le blindage magnétique et d'implémenter une technique de prise en compte du mouvement de la bobine réceptrice.