

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

Walid MEBROUKI

Mohamed Said MESSIS

Thème

Modélisation Semi-Analytique (2D) du procédé de Transfert d'énergie électrique sans contact

**Application a la recharge dynamique des batteries de
voitures électriques-Cas de bobines spirales.**

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

Résumé

*Le transfert d'énergie sans contact (TESC) par induction magnétique traité est dédié à la recharge statique ou dynamique de batteries de voitures électriques. L'approche semi - analytique basée sur les formules intégrales de l'inductance mutuelle issue du formalisme de Biot-Savart et du flux magnétique, pour différentes topologies de bobines est exploitées dans le cadre 2D en coordonnées cylindriques et implémentée sous environnement Matlab. La première application traitée à bobines mono-spire filaires a permis de valider les codes de calcul. La seconde application du (TESC) qui est un dispositif réel a bobines émettrice et réceptrice spirales plates multi-spires. Les résultats obtenus pour la recharge dynamique montrent d'une part que l'efficacité du transfert d'énergie est fortement par le corrélé au **désalignement** et écart inter bobines émettrices, et d'autres part par la topologie ou technologies des bobines filaires/massives/plates/multi-couches.*

Mots clés : *Transfert d'énergie sans fil, formule intégrale de l'inductance mutuelle, force électromotrice induite, modèles semi-analytiques.*

Abstract

Wireless Energy Transfer (WPT) is a revolutionary technology that is gaining popularity in the electric vehicle space. With the rise of electric cars and the need for efficient charging solutions, this technology presents a multitude of benefits. In this work we delve deeper into the electromagnetic modeling of the operation of contactless energy transfer, focusing particularly on the use of spiral (two-dimensional 2D) and rectangular (three-dimensional 3D) coils through the analytical and semi-analytic. The (WPT) system is made up of transmitting and receiving coils of circular multi-turn wired and massive geometries. The analytical and semi-analytical models expressing the mutual inductance are obtained from expressions of the Biot-Savart law, of the magnetic flux, thus reflecting the transfer of electrical energy between the transmitting and receiving coils. The results obtained show the efficiency of energy transfer is strongly correlated to the misalignment and gap between transmitting coils.

Key words: *Wireless energy transfer, integral formula of mutual inductance, electromotive induced voltage, half-analytical models.*

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout puissant, de nous avoir armés de courage, de patience et santé pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail.

*Toute 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.*

*Nous adressons nos vifs et sincères remerciements aux membres de jury **Mme Nadia RADJA** et **Mme Salma CHERIF** pour avoir accepté de juger notre travail.*

Enfin, 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

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à :

Mes très chers parents

Que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices, que dieu les protèges.

Mes sœurs Ouissam et Sirin

Pour leurs grands soutiens.

Mes chères camarades

Pour leurs encouragements et aides.

Ainsi toute la promotion M2 Machines électriques 2023/2024.

A toutes les personnes que j'aime et font partie de ma vie.

*Sans oublier mon binôme **Messis Mohamed Saïd** Pour son soutien moral et son patience au long de ce projet de fin d'étude.*

WALID

Dédicace

À mes chers parents, je vous remercierai jamais assez

Que dieu vous garde

A mes sœurs et mon frère Yazid

A tout ma famille

A notre promoteur monsieur **Rachek M'hemed**

C'était agréable de travailler avec vous

Je vous remercie cher monsieur

A mes (amis et amies), vous êtes les meilleurs

A la Promo Machine entière

A **Mensour hassane et chiban mahdi**

Et bien sur

A mon cher binôme monsieur **Mebrouki Walid**

JE NE RISQUE PAS DE VOUS OUBLIER

MESSIS MOHAMED SAID

Sommaire

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

Chapitre I

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique du développement de la technologie de transfert d'énergie sans contact...	3
I.3. Principes fondamentaux du transfert d'énergie sans contact	7
I.3.1. Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique	7
I.4. Techniques de transmission d'énergie sans contact	8
I.4.1. TESC par induction magnétique.....	9
I.4.2. Le TESC par coulage magnétique résonant.....	10
I.4.3. Le TESC par couplage capacitif.....	11
I.4.4. Le transfert radiatif d'énergie électrique	11
I.4.5. TESC par Micro-onde	12
I.5. Comparatif des différentes techniques de TESC	13
I.6. Domaines d'applications	14
I.6.1. Domaine grand public	14
I.6.2. Domaine du transport	15
I.6.2.a. Principe de la recharge sans contact	15
I.6.2.b. Stockage de l'énergie par batteries dans les voitures électriques	16
I.6.2.c. Recharge statique sans contact.....	17
I.6.2.d. Recharge dynamique sans contact	19
I.6.2.e. Types de piste à bobines	21
I.6.3. La TESC dans le domaine médical	22
I.6.4. La TESC dans le domaine militaire	22
I.6.5. La TESC dans le Domaine spatial.....	23
I.6.6. Domaine industriel.....	24
I.6.6.a. Chauffage par induction	24
I.6.6.b. Magnétoformage.....	24
I.7. Les avantages et inconvénients de transfert d'énergie sans contact	25
I.8. Conclusion	26

Chapitre II

II.1. Introduction	30
II.2. Approches de modélisation du TESF	30
II.3. Formules analytiques de l'électromagnétisme.....	30
II.3.1. Théorème d'Ampère	31
II.3.2. Loi de Biot et Savart	31
II.3.3. Loi d'induction de Faraday et de Lenz	32
II.3.4. Force de Lorentz et de Laplace.....	33
II.3.5. Équations de Maxwell	34
II.3.6. Lois de comportement des milieux	35
II.3.7. Loi d'Ohm.....	35
II.3.8. Relation magnétique	35
II.3.9. Relation diélectrique	36
II.4. Expression de l'inductance propre	36
II.4.1. Potentiel vectoriel magnétique	36
II.4.2. Formules analytiques de calcul d'inductance propre	36
II.4.3. Inductance mutuelle.....	37
II.5. Développement de l'expression de l'inductance mutuelle dans le cadre de TESC	39
II.6. Expressions générales de mutuelle avec différent topologies des bobines	41
II.6.1. Mutuelles entre bobines filaires coaxiales.....	41
II.6.1.a. Sans Désalignement.....	41
II.6.1.b. Désalignement latéral.....	41
II.6.1.c. Désalignement angulaire.....	42
II.6.1.d. Désalignement latéral et angulaire	43
II.7. Expression analytique 3D de bobines rectangulaires	44
II.8. Avantages et inconvénients de la méthode analytique	46
II.9. Approche numériques dans le TESC	46
II.10. Conclusion.....	46

Chapitre III

III.1. Introduction	49
III.2. Les différentes technologies de bobines	49
III.2.1. Les bobines circulaires et rectangulaires.....	49
III.2.2. Bobines non polarisées (standards).....	50
III.2.3. Bobines polarisées.....	50
III.2.4. Bobines elliptiques mono-spires plates	51
III.2.5. Bobines elliptiques multi-spires plates/plusieurs couches.....	52
III.2.6. Bobines rectangulaires mono-spires	52
III.2.7. Bobines rectangulaires multi-spires plates/plusieurs couches.....	52
III.3. Pertes dans les bobines	53
III.3.1. Effet de peau.....	53
III.3.2. Effet de proximité	54
III.3.3. Fil de Litz.....	54
III.4. Modélisation semi-analytique de bobines.....	55
III.4.1. Bobines spirales plates non jointives.....	55
III.4.2. Bobines spirales plates jointives.....	57
III.4.3. Bobines multi spires-multicouches jointives.....	58
III.4.4. Bobines multi spires-multicouches non jointives	61
III.5. Conclusion	63

Chapitre IV

IV.1 Introduction.....	66
IV.2. Dispositif (1) : calcul de TESC pour bobines filaires monospire	66
IV.2.1. Présentation du dispositif (1)	66
IV.2.2. Simulation et discussion des résultats	67
IV.3. Dispositif (2) : calcul de TESF pour Bobines multispire plate.....	74
IV.3.1. Présentation du dispositif (2)	74
IV.3.2. Simulation et discussion des résultats	74
IV.4. Dispositif (3) : la recharge dynamique de batterie de (VE)	77
IV.4.1. Présentation du dispositif (3)	77
IV.4.2. Simulation du TESC pour la recharge dynamique de batterie de (VE) et discussion des résultats	78

V. Conclusion	81
Conclusion générale	83

Liste des abréviations

JPL : Jet Propulsion Lab

DC : Direct current

TESC : Le transfert d'énergie sans contact

WPT: Wireless Power Transmission

PbHSO : Plomb

NiCd: Nickel Cadmium

NiMH: Nickel Metal Hydrure

Li-Ion: Lithium-Ion

MIT: Massachusetts Institute of Technology

MDC: Momentum Dynamic Corporation

MST: Michigan State University

ORNL: Oak Ridge National Lab

Witricity: Wireless Electricity

OLEV : Le projet coréen « Véhicule électrique en ligne »

KAIST : l'Institut supérieur coréen des sciences et technologies

SUV : Sport Utility Vehicle

VE : Véhicule Electrique

JAXA : L'agence spatiale japonaise

MATLAB : Mathematic Laboratory

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure I.1: Montage d'expérience d'Hertz.....	4
Figure I.2: La bobine de Tesla	4
Figure I.3: Wardencllyffe Tower (la tour de Tesla).....	5
Figure I.4: du Projet "RAMP3"	6
Figure I.5: La plus grande démonstration de TESC jamais réalisée.....	6
Figure I.6: Schéma du principe du transfert d'énergie sans fil	7
Figure I.7: Rayon électromagnétique.....	8
Figure I.8 : Les différentes régions d'une onde électromagnétique.....	8
Figure I.9 : Différents principes du transfert d'énergie sans contact	9
Figure I.10: Exemple de schéma de système de TESC par induction magnétique.....	10
Figure I.11: Schéma d'un couplage inductif entre deux bobines.....	10
Figure I.12: Exemple de schéma de système TESF par résonance magnétique	11
Figure I.13: Structure du système a couplage capacitif	11
Figure I.14: Transfert de puissance sans fil par une antenne à grande directivité	12
Figure I.15: Principe de TESF par micro-ondes	13
Figure I.16: Chargeur Qi pour Smartphone	15
Figure I.17: Principe du chargement par induction.....	15
Figure I.18: Architecture d'un système de transfert d'énergie par induction	16
Figure I.19: Système "Conductix-Wampfler" avec bobine secondaire en position haute (a) et position basse (b).....	17
Figure I.20: Système "WiT 3300 kit" de recharge sans contact	17
Figure I.21: Système "Plugless Power"	18
Figure I.22: Vue de coupe transversale d'un tronçon de piste du projet "PATH"	19
Figure I.23: Vue d'ensemble du système de bus électrique du campus OLEV	20
Figure I.24: Projet "PRIMOVE" de Bombardier	20
Figure I.25: La piste d'essais recharge sans contact Kangoo Z.E.....	21
Figure I.26: Illustration des deux types de pistes de recharge, (a) piste à émetteur Unique (b) piste à émetteurs segmentés.....	21
Figure I.27: Exemple d'application dans le domaine médical.....	22
Figure I.28: Prototype de gilet équipé de la technologie WiTricity	23
Figure I.29: Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire orbitale.....	23
Figure I.30: Schéma du principe de chauffage par induction	24

Figure I.31: Schéma de principe du magnétoformage	25
Figure II.1 : Loi de Biot et Savart	31
Figure II.2 : Variation du flux magnétique	32
Figure II.3 : Deux bobines circulaires non coaxiales à axes parallèles	37
Figure II.4 : Sans désalignement	41
Figure II.5 : Avec désalignement latéral.....	41
Figure II.6 : Avec désalignement angulaire.....	42
Figure II.7 : Bobines circulaires filaires avec désalignement angulaire et latéral	43
Figure II.8 : Bobinages rectangulaires.....	44
Figure III.1 : Types de bobines circulaires : a) circulaire, b) carrée, c) elliptique, d) bobine de Litz	49
Figure III.2 : Deux catégories de bobines (a) Polarisées (b) Non polarisées	50
Figure III.3 : Prototype de BP (a), DDQP (b), Circulaire (c), DD (d).....	51
Figure III.4 : Bobine elliptique spires plates/plusieurs couches.....	52
Figure III.5 : Une bobine rectangulaire multicouche	53
Figure III.6 : Effet de peau	53
Figure III.7 : Distribution des courants induits dû à l'effet de proximité.....	54
Figure III.8 : Fil de Litz.....	55
Figure III.9 : Bobine plates de spire concentrique	56
Figure III.10 : Deux bobines spirales circulaires non jointives.....	56
Figure III.11 : Deux bobines spirales plates jointives	57
Figure III.12 : Deux bobines toriques de section rectangulaires (désalignement angulaire et axial).....	59
Figure III.13 : Coupe transversale de deux bobines circulaires non coaxiales mais parallèles..	59
Figure III.14 : Bobines multi spires-multicouches non jointives	61
Figure IV.1 : Schéma Dispositif 1 : Bobine monospire statique.	66
Figure IV.2 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour $C=0$	67
Figure IV.3 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour $C = 0.05$...67	
Figure IV.4 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour $C = 0.1$	68
Figure IV.5 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour $C = 0.15$... 68	
Figure IV.6: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 0^\circ$	69
Figure IV.7: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 30^\circ$	69
Figure IV.8: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 50^\circ$	70
Figure IV.9 : Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 75^\circ$	70

Figure IV. 10: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta=0^\circ$	71
Figure IV. 11: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 30^\circ$..	71
Figure IV. 12: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 50^\circ$...	72
Figure IV. 13: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 75^\circ$	72
Figure IV.14 : Schéma Dispositif 2 : Bobine multispire plate	74
Figure IV.15 : Inductance mutuelle d'une bobine multispire plate avec désalignement latérale pour entrefer = 0 m et $\theta = 0^\circ$	75
Figure IV. 16 : Inductance mutuelle d'une bobine plate filaire multispire avec désalignement latérale	75
Figure IV. 17 : inductance mutuelle d'une bobine filaire spirale plates multispire avec Désalignement latérale	76
Figure IV. 18 : Tension induite d'une bobine filaire spirale plate multispire avec Désalignement latérale	76
Figure IV.19 : Dispositif de recharge dynamique 02 bobines émettrice et 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices y	77
Figure IV. 20 : Mutuelle inductance entre le dispositif de TESC : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices 63mm	78
Figure IV. 21 : Force électromotrice induite pour la recharge dynamique : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices 63mm	78
Figure IV. 22 : Mutuelle inductance entre le dispositif de TESC : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices doublé.....	79
Figure IV. 23 : Force électromotrice induite pour la recharge dynamique : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices doublé	79
Figure IV. 24 : Mutuelle inductance entre le dispositif de TESC : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices réduit de moitié	80
Figure IV. 25 : Force électromotrice induite pour la recharge dynamique : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices réduit de moitié.....	80

Liste des tableaux

Tableau I.1: Détails des paramètres des techniques de TESC	14
Tableau I.2: Les caractéristiques principales des différents types de batteries	16
Tableau I.3: Ensemble des acteurs académiques et industriels de la recharge statique sans contact	18
Tableau IV.1 :	66
Tableau IV.2	74

Introduction générale

Introduction générale

Le transfert d'énergie sans fil (TESF), ou encore le transfert d'énergie sans contact (TESC), est un terme générique pour désigner différentes techniques permettant de transférer de l'énergie électrique à distance, sans liaison physique, d'un dispositif émetteur vers un dispositif récepteur. Ce mode de transfert d'énergie peut prendre différentes formes : induction magnétique, influence électrique, rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, laser infrarouge).

Le transfert d'énergie sans contact (TESC) trouve des applications dans de nombreux domaines, allant de l'électronique mobile (recharge de Smartphones, ordinateurs portables, tablettes, GPS...), au secteur des transports (voitures, bus, tramways, etc.), en passant par les implants actifs en médecine (stimulateurs cardiaques, défibrillateurs, prothèses auditives, pompes à insuline, valves cérébrales...). Dans ce type d'applications, l'énergie électrique transmise va servir à charger une batterie.

L'objectif de ce travail de mémoire est d'implémenter un modèle semi-analytique pour le calcul de l'inductance mutuelle entre des bobines émettrices et une bobine réceptrice pour le (TESC) par induction magnétique. L'expression analytique sous forme intégrale de l'inductance mutuelle est obtenue à partir des expressions analytiques de Biot-Savart, du flux magnétique, en tenant compte des diverses topologies des bobines (plates spirales, monospires, multi-spires et multi-couches) et en faisant varier d'une part l'entrefer vertical inter-bobines et le désalignement horizontal latérale inter-axes des bobines. Les codes de calcul (formules intégrales et discrétisations géométriques) implémentés sous environnement Matlab sont validés à travers des comparaisons avec ceux expérimentaux ou d'autres auteurs.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante, le premier chapitre concerne l'état de l'art, qui est constitué d'un bref historique et du principe global du TESH, ses différentes technologies ainsi que les différents domaines d'applications.

Le deuxième chapitre traitant de la modélisation électromagnétique du TESC à travers les différentes approches : analytique, numérique et particulièrement semi-analytique dans laquelle s'inscrit le travail.

Dans le troisième chapitre, nous avons détaillés l'approche semi-analytique déduite des formules intégrales d'inductances et de la discrétisation géométrique des bobines dans un plan bidimensionnel cylindrique (2D)-(r,z). Différentes formes de bobines sont considérées :

bobines filaires mono-spire, bobines filaires spirales plates multi-spires non jointives/jointives, et bobines multi-spires et multi-couches jointives.

Le dernier chapitre est dédié à la partie simulation et calcul numérique de deux dispositifs de (TESC). Le premier dispositif de (TESC) mono-spire est utilisé pour valider les codes de calculs implémentés. Le second dispositif réel est utilisé dans le cas multi-spires pour l'évaluation de l'inductance et de la force électromotrice induite dans le cas de charge statique et dynamique.

Enfin nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et des perspectives de recherche qui pourraient être intéressantes pour la communauté scientifique.

Chapitre I :
**Technologie du transfert d'énergie
électrique sans contact (TESC)**

I.1. Introduction

Le transfert d'énergie sans contact est l'une des avancées les plus prometteuses de notre époque, offrant des possibilités innovantes dans divers domaines : domestiques, industriels, dispositifs implantés en médecine de l'électronique à la médecine.

Dans ce chapitre, on donne l'état de l'art dans le domaine de la transmission d'énergie sans fil. Les différentes techniques de transmission d'énergie sans fil sont décrites, tout en illustrant les avantages et les inconvénients.

I.2. Historique du développement de la technologie de transfert d'énergie sans contact

En 1825, le scientifique anglais "William Sturgeon" (1783-1850) et le physicien américain "Henry Joseph" (1797-1878) inventent l'électroaimant qui est un fil conducteur enroulé autour d'un noyau de fer. Puis en 1831, le physicien et le chimiste anglais "Michael Faraday" (1791-1867) découvre le principe de l'induction électromagnétique qui stipule que : "un champ magnétique fluctuant/variable induit un courant électrique dans un fil électrique". En combinant ces deux découvertes, le professeur Irlandais "Nicholas Joseph Callan" (1799–1864) a initié ses travaux sur la bobine d'induction en 1834, qui l'on conduit en 1836 à fabriquer la toute première, et fait la démonstration d'une transmission à une énergie électrique sans fil. L'appareil à bobine d'induction de ce dernier est constitué de 2 bobines isolées appelées "bobinages primaire et secondaire " placées autour d'un noyau de fer. Une batterie connectée par intermittence au primaire (induit) une tension dans le secondaire, provoquant une étincelle. Vingt-huit ans après, le physicien et mathématicien Ecossais "James Clerk Maxwell" (1831-1879) réalise une modélisation mathématique du comportement des radiations électromagnétiques et prédit l'existence d'ondes radio.

En 1888, le physicien Allemand "Heinrich Rudolf Hertz" (1857-1894) réalise une transmission sans fil par ondes radio, validant les modèles mathématiques de Maxwell. L'appareil d'Hertz est considéré comme le premier transmetteur radio (Figure I.1). Quelques années plus tard, le physicien Italien "Guglielmo Marconi" (1874 - 1937) améliore le transmetteur d'ondes (télégraphe sans fil).

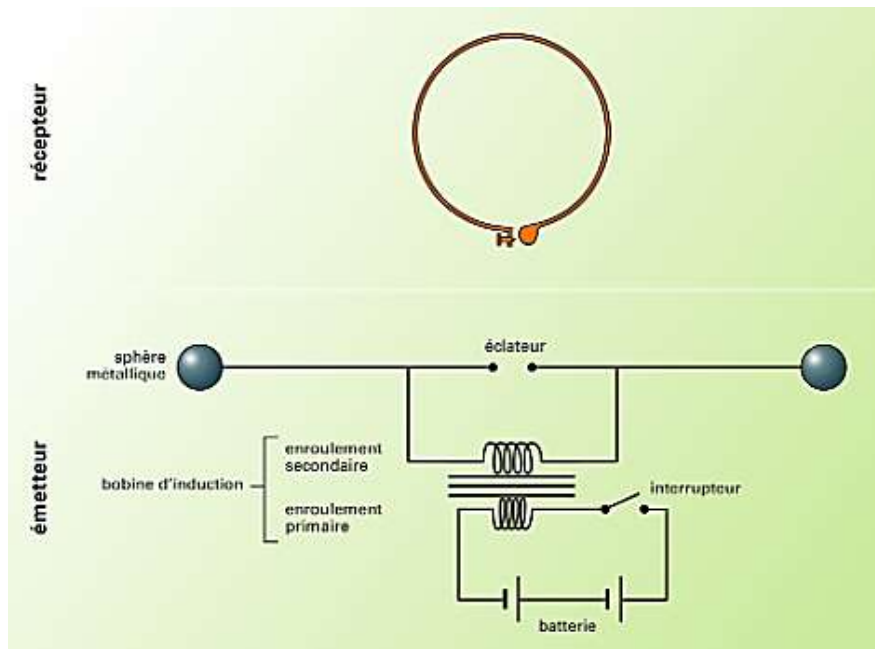


Figure I.1: Montage d'expérience d'Hertz [1].

En 1891, l'ingénieur Croite "Nikola Tesla" (1856 –1943) dans son laboratoire au Colorado Spring, a inventé la bobine de Tesla" (Figure I.2) : un récepteur de bobine Tesla réglé en résonance avec un émetteur de bobine Tesla, illumine une lampe à incandescence de 10 Watts sur une distance entre l'émetteur et le récepteur de 591m [2] [3].



Figure I.2: La bobine de Tesla [4].

Il a aussi construit une tour à Long-Island au début des années 1900, la tour " Wardenclyffe" (Figure I.3) qui a été supposé être capable de transmettre de l'énergie n'importe où sur terre, et de tester le système sans fil mondial, mais en raison de l'arrêt du financement Tesla a été contraint de quitter son expérience et aussi son rêve d'alimenter le monde.

En 1914," Nikola Tesla" a déposé un brevet américain intitulé " appareil de transmission d'énergie électrique" dans lequel il a décrit son travail sur le transport d'énergie sans support (contact).



Figure I.3: Wardenclyffe Tower (la tour de Tesla) [5].

Dans les années 1960, "William C. Brown" a mené des expérimentations de transmission sans fil d'énergie avec des tubes micro-ondes. Il a été le pionnier à développer en 1963 une antenne rectificatrice ou "rectenna" (Rectifying Antenna) pour la réception des ondes électromagnétiques et leur conversion en tension continue. L'efficacité de cette première "rectenna" était de 50% pour une puissance de sortie de 4 W DC et de 40% pour 7 W DC respectivement [6] [7].

En 1964, dans le cadre du Projet "RAMP3" (Raytheon Airborne Microwave Platform) (Figure I.4) qui a été un projet initié par l'armée américaine qui visait à développer une plateforme d'observation en altitude capable de rester en l'air pendant de longues périodes de temps, l'équipe de "W. C. Brown" a effectué une démonstration d'une plateforme aéroportée qui volait à une altitude de 18 mètres alimentée exclusivement à travers un faisceau microonde depuis le sol [8].

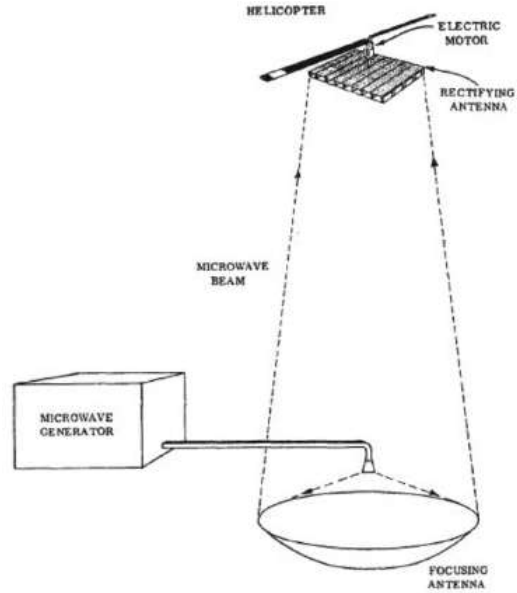
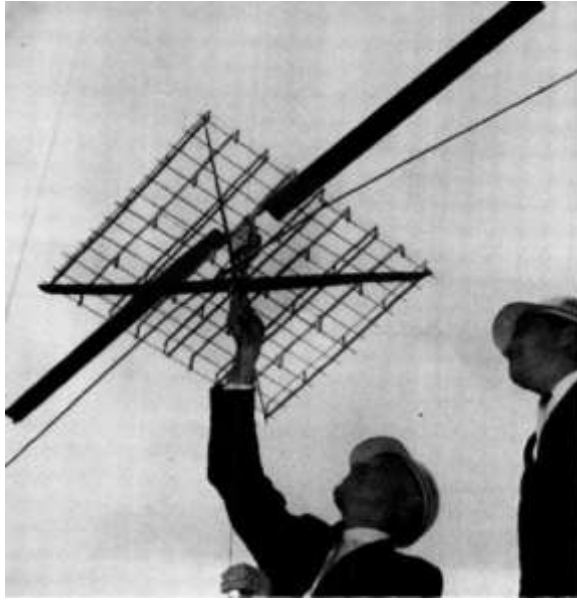


Figure I.4: du Projet "RAMP3"

En 1975, la plus grande démonstration de transmission d'énergie sans fil jamais réalisée a eu lieu au Jet Propulsion Lab (JPL) à Goldstone. L'émetteur était une antenne parabolique tandis que le récepteur était formé d'une association de rectennas (Figure I.5). La source émettait une puissance de 450 kW à 2,388 GHz et le récepteur situé à 1,6 km de distance fournissait 30 kW de puissance DC [9].



Figure I.5: La plus grande démonstration de TESC jamais réalisée

Les démonstrations de transfert de niveaux d'énergie élevés sur des grandes distances ont prouvées la possibilité d'attendre de l'efficacité élevée (70 %). Cependant ces systèmes n'ont pas été adaptés a des applications visibles a cause des raisons de coût, d'encombrement des antennes et surtout des normes sanitaires de sécurité des personnes. C'est transfert d'énergie par microondes particulièrement dans les utilisations de la vie quotidienne. Plus récemment, avec le développement des techniques de communication mobile, la puissance nécessaire aux dispositifs électroniques mobiles a diminué considérablement. Les techniques de transmission sans fil d'énergie sont de plus en plus explorées par les chercheurs et des applications grand public vont voir le jour [10].

I.3. Principes fondamentaux du transfert d'énergie sans contact

Le transfert d'énergie sans contact (TESC) ou Wireless Power Transmission (WPT) est défini comme une technique permettant de transmettre de l'énergie électrique d'un point à un autre à travers l'air ou le vide, sans utiliser de support matériel. Ce dernier se fait par couplage magnétique.

Le circuit primaire est alimenté sous la tension alternative, le courant alternatif qui circule dans l'enroulement primaire « la bobine émettrice » génère un champ magnétique. Ce même champ va générer une tension aux bornes de la bobine réceptrice. Cette tension va pouvoir être utilisée pour alimenter une charge [9] [11].

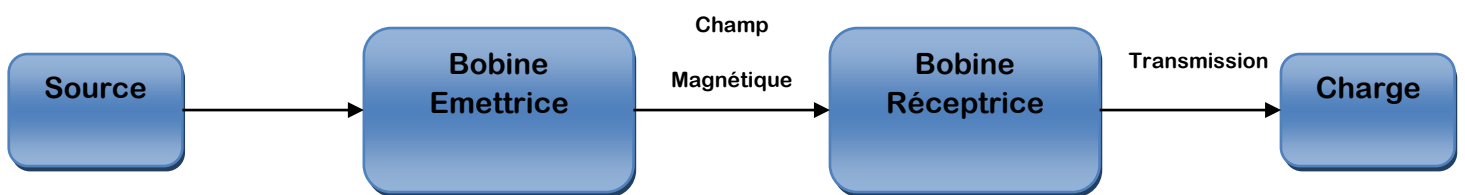


Figure I.6: Schéma du principe du transfert d'énergie sans fil.

I.3.1. Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est une catégorie d'ondes qui peut se déplacer dans un milieu de propagation comme le vide ou l'air, avec une vitesse avoisinant celle de la lumière, soit près de 300 000 kilomètres par seconde

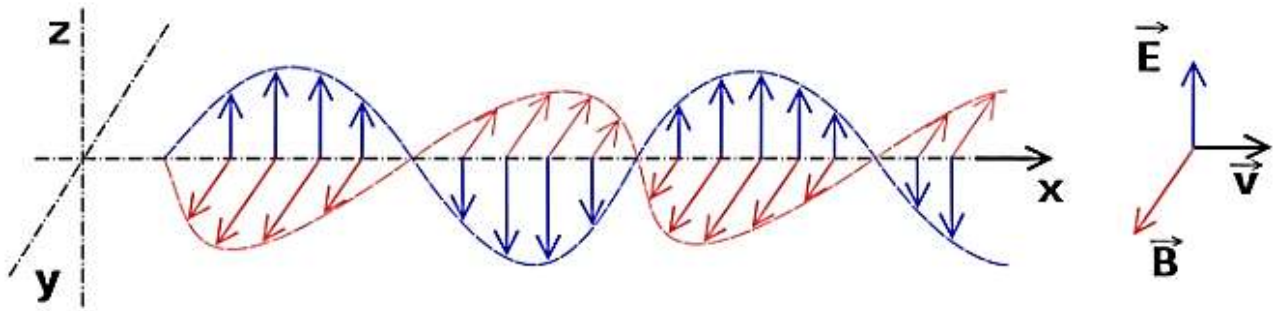


Figure I.7: Rayon électromagnétique

V = Vitesse de déplacement de l'onde. E = Champ électrique. B = Champ magnétique

En fonction de la distance où l'on se trouve par rapport à la source rayonnante, une onde électromagnétique possède différentes zones telles que définies dans la (Figure I.8)

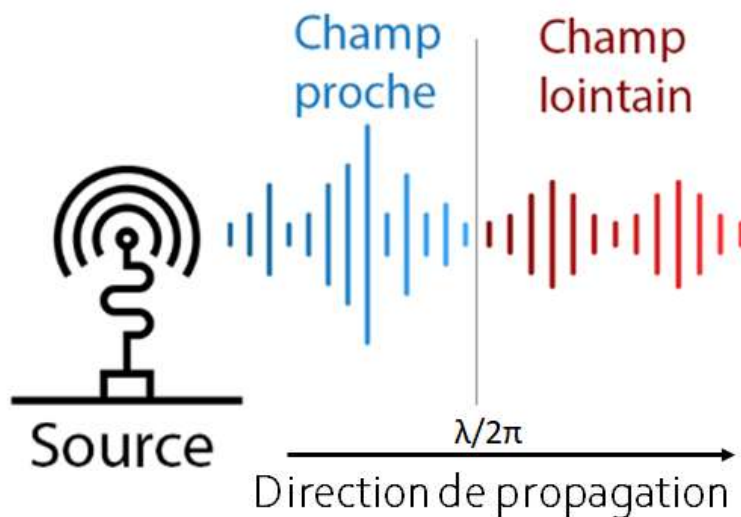


Figure I.8 : Les différentes régions d'une onde électromagnétique (λ : Longueur d'onde).

I.4. Techniques de transmission d'énergie sans contact

Le transfert d'énergie sans contact (TESC) peut se faire selon différents principes, comme le résume la (Figure I.9), le transfert d'énergie est généralement un processus en trois étapes :

- Un générateur haute fréquence reçoit de l'énergie électrique alternative ou continue et est ensuite transporté vers la structure émettrice.
- L'onde électromagnétique se propage vers la structure réceptrice.
- L'énergie est captée et transformée en tension alternative puis continue et par suite utilisée pour alimenter une charge [10].

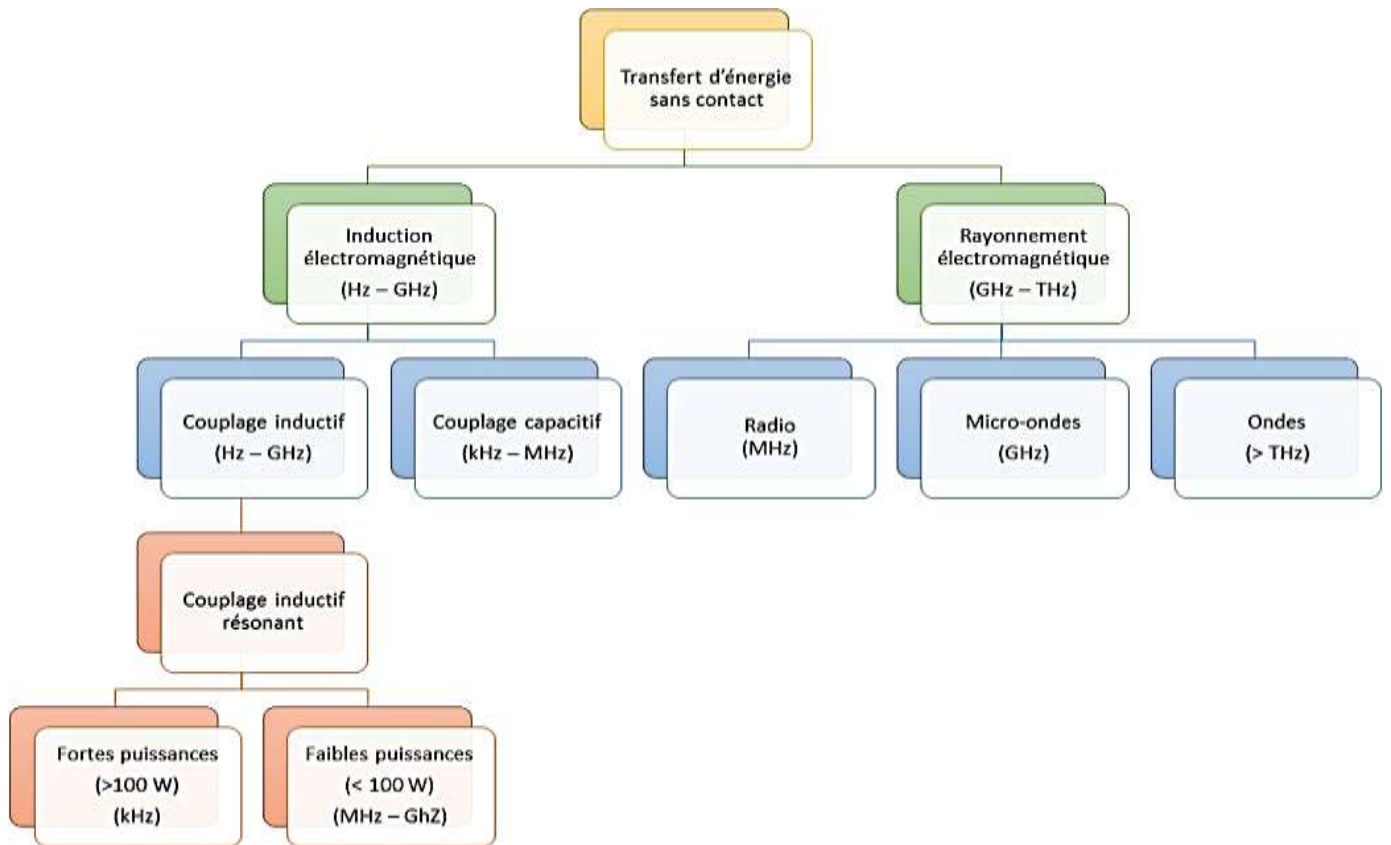


Figure I.9 : Différents principes du transfert d'énergie sans contact [12].

I.4.1. TESC par induction magnétique

Le transfert d'énergie par induction magnétique a commencé à l'université d'Auckland dans les années 1989/1990 avec le travail de "John Boys", "Andrew Green" et "Grant Govic" développant des systèmes de piste inductive pour la manutention des matériaux. Ce dispositif permet d'échanger de l'énergie entre deux systèmes, sans aucune connexion électrique entre eux, sur la base du principe de l'induction électromagnétique expérimenté en 1831 par Michael Faraday [13]. Cette technique est bien connue, elle a été utilisée depuis longtemps dans les transformateurs, dans lesquelles une bobine primaire et une bobine secondaire sont couplées par induction magnétique (Figure I.10).

Appelée TESC à couplage étroit, cette technique est caractérisée par le fait que le rendement de la transmission d'énergie chute si la distance dans l'air est supérieure au diamètre des bobines émettrice et réceptrice. Le rendement de la transmission d'énergie dépend du facteur de couplage magnétique K entre les inducteurs et de leur facteur de qualité Q [14].

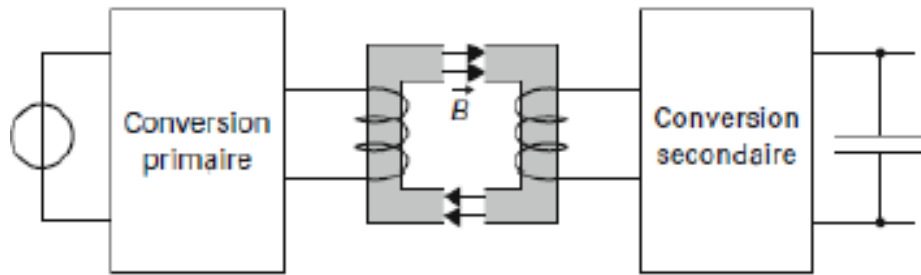


Figure I.10: Exemple de schéma de système de TESC par induction magnétique [15].

Le courant alternatif fourni à la bobine d'émission d'inductance propre L_1 génère un champ magnétique variable et donc un flux magnétique (Φ_{12}) à travers la région circulaire (S_2) à l'intérieur de la bobine réceptrice d'inductance propre L_2 (figure I.11) [16].

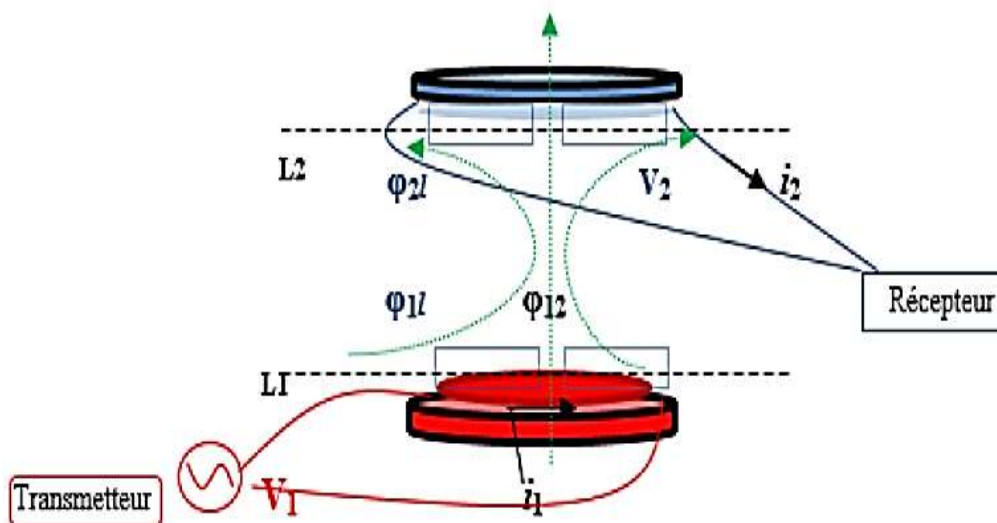


Figure I.11: Schéma d'un couplage inductif entre deux bobines [16].

I.4.2. Le TESC par coulage magnétique résonant

La TESC par résonance magnétique (figure I.12), est également appelée TESC à faible couplage. Le principe théorique de cette méthode de résonance magnétique a commencé à être élaboré en 2005 par le Massachusetts Institute of Technology, et il a été validé expérimentalement en 2007. La méthode utilise une bobine et un condensateur en tant que résonateur, l'énergie électrique étant transmise par résonance électromagnétique entre la bobine de l'émetteur (Tx) et celle du récepteur (Rx) (couplage par résonance magnétique). En faisant correspondre la fréquence de résonance des deux bobines avec un facteur Q élevé, l'énergie électrique peut être transmise sur plusieurs mètres bien que le couplage magnétique entre les deux bobines soit faible.

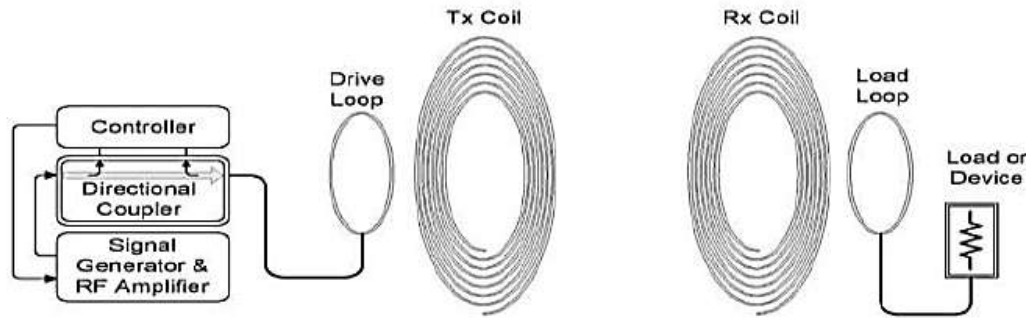


Figure I.12: Exemple de schéma de système TESF par résonance magnétique [17].

I.4.3. Le TESC par couplage capacitif

La (TESC) par couplage capacitif consiste à séparer la source d'alimentation et la charge avec deux plaques parallèles, ces plaques agissent comme l'anode et la cathode d'un condensateur à plaques parallèles. L'énergie est transmise via un champ d'induction électrique généré par le couplage des deux ensembles d'électrodes. [16]

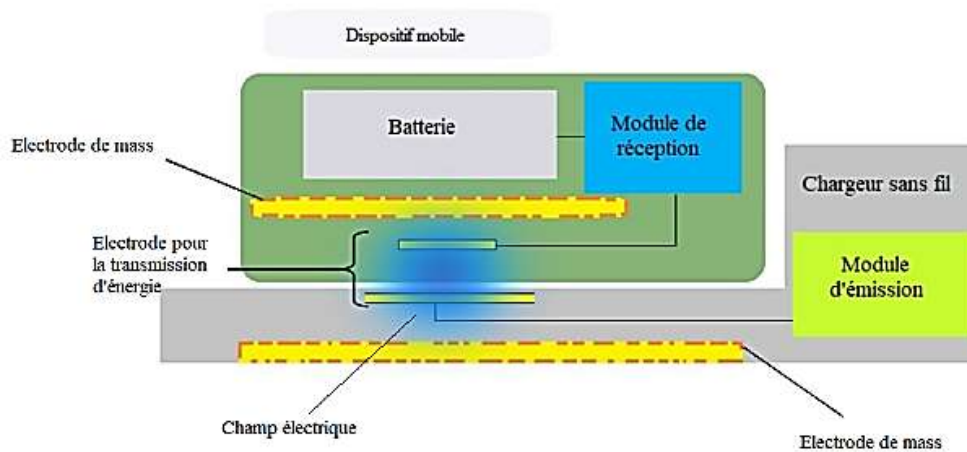


Figure I.13: Structure du système à couplage capacitif [18]

I.4.4. Le transfert radiatif d'énergie électrique

Le transfert radiatif d'énergie électrique permet de transmettre de l'énergie sans contact à travers l'espace en utilisant le rayonnement électromagnétique à des hautes fréquences, supérieur à 1GHz. Les dispositifs émetteurs transmettent de l'énergie sous forme de photons, qui peuvent être absorbés par des récepteurs appropriés pour convertir l'énergie électromagnétique en énergie électrique.

Une antenne à forte directivité (Figure I.14), est capable de transférer une puissance dans son champ lointain par rayonnement. Les antennes ou les réseaux d'antennes directionnelles peuvent être très petites si elles fonctionnent à des fréquences hautes et la distance de transmission peut être 10 fois ou plusieurs centaines de fois de la dimension de l'antenne avec une efficacité de transmission acceptable [7][19].



Figure I.14: Transfert de puissance sans fil par une antenne à grande directivité [20].

I.4.5. TESC par Micro-ondes

Les micro-ondes correspondent elles aux ondes électromagnétiques d'ordre de 10^{-2} m, capables de transporter de l'énergie ainsi que de l'information. Le signal est démodulé, soit en amplitude soit en fréquence, puis amplifié et transformé en informations par les enceintes. Ces systèmes permettent l'acheminement de l'énergie sur des distances bien plus grandes que le diamètre des transmetteurs [21] [22].

La (TESC) par micro-ondes se fait en trois étapes : l'émission d'une onde portant l'énergie à transmettre, la propagation de cette onde, et la réception et conversion de l'onde en courant électrique exploitable (Figure I.15). Ce principe de transmission s'appuie sur le fait qu'une onde se propage dans le vide en conservant l'énergie dont elle est chargée, cette énergie s'atténuant en fonction du milieu traversé par l'onde.

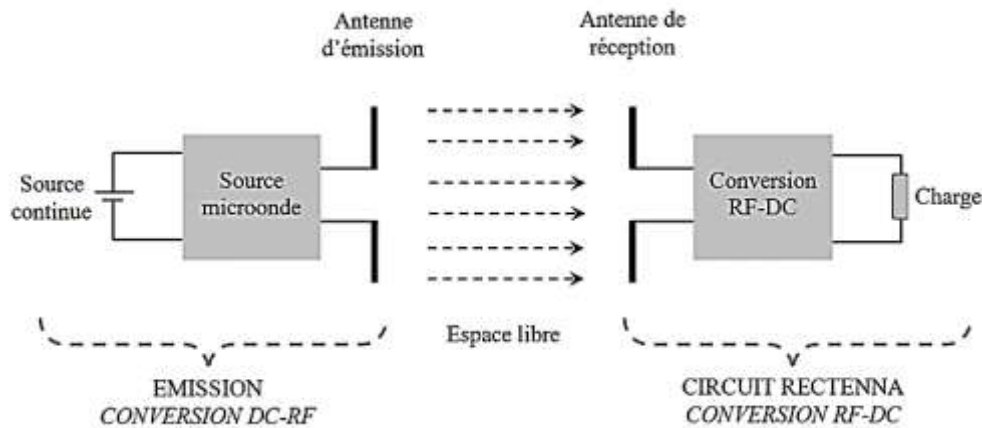


Figure I.15: Principe de TESC par micro-ondes [23].

Le faisceau de puissance laser utilise la lumière laser pour transférer l'énergie électrique d'un endroit à un autre. Contrairement aux autres méthodes de transfert d'énergie, le rayonnement laser n'interfère pas avec les signaux radio à proximité [21].

Le transfert d'énergie sans contact par onde acoustique est une méthode de transmission d'énergie qui utilise des ondes sonores pour transférer de l'électricité d'un dispositif à un autre. Le processus de transfert d'énergie sans fil par acoustique implique généralement deux composants principaux : un émetteur et un récepteur. L'émetteur convertit l'électricité en vibrations sonores, tandis que le récepteur capte ces vibrations et les convertit à nouveau en électricité. Cette conversion d'énergie permet de transférer efficacement de l'électricité d'un dispositif à un autre sur de courtes distances.

I.5. Comparatif des différentes techniques de TESC

On retrouve dans le tableau I.1, les puissances transmissibles ainsi le rendement et les intervalles des gammes fréquences de validité tel que le laser, le champ électromagnétique, les ondes acoustiques. Le transfert par champ électromagnétique peut se faire en exploitant principalement le vecteur champ magnétique ou le vecteur champ électrique.

Champ	Types	Distance	Fréquence	Puissance	Efficacité %	Domaines d'application
Lointain	Acoustique	0.1 – 1 (mm)	20 – 100 (KHz)	0.01 – 1 (KW)	1 – 80	Biomédical
		1 – 300 (mm)				Nucléaire
	Laser	1m – 1km	$10^{12} – 10^{15}$ (Hz)	1 – 100 (W)	$\geq 80 – 90$	Spatiale
						Biomédical
Proche	Inductif (magnétique)	0.2mm – 2m	20 KHz – 10 MHz	1 –200 (KW)	50 – 80	Chargeurs batteries
	Capacitif (électrique)	0.1 – 0.5 (mm)	100 KHz – 10 MHz	1 – 50 (W)		Téléphonie mobile Capture

Tableau I.1: Détails des paramètres des techniques de TESC [24].

I.6. Domaines d'applications

I.6.1. Domaine grand public

La transmission d'énergie électrique sans fil permet la recharge des appareils du quotidien : l'électronique mobile (téléphones, ordinateurs portables, ...) sans fil, de manière automatique dans les maisons, les voitures, les appareils bureaux, les points d'accès publics et périphériques des ordinateurs de bureau (souris, claviers, imprimantes, écrans) [25]. En 2008 le "Wireless Power Consortium", a créé la "Qi" une technologie qui est basée sur la transmission sans fil d'énergie sur une distance maximale de 40 mm, nécessitant un support de transmission et un récepteur compatible dans un appareil mobile, tel qu'un Smartphone (Figure I.16), une tablette, les appareils photo ou les télécommandes ou un autre appareil compatible [26]. La norme Qi est conçue que pour les appareils utilisant 5 watts de puissance ou moins. Mais actuellement le Wireless Power Consortium travaille à l'expansion de Qi pour une utilisation dans des appareils plus imposants comme les tablettes, les ordinateurs portables ou la plupart des appareils électroménagers, les véhicules électriques et d'autres solutions.

Le fonctionnement consiste à placer le périphérique mobile compatible sur le support de transmission pour que la recharge se mette en route grâce à l'induction électromagnétique entre les deux appareils (c'est le principe des transformateurs) (Figure I.17).



Figure I.16: Chargeur Qi pour Smartphone.

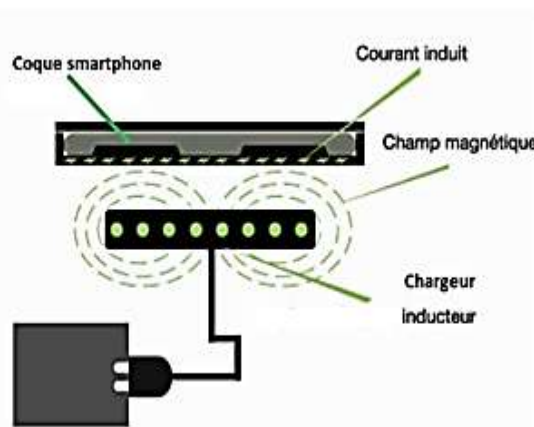


Figure I.17: Principe du chargement par induction.

I.6.2. Domaine du transport

I.6.2.a. Principe de la recharge sans contact

Un véhicule à moteur équipé d'un système de propulsion comprenant au moins un convertisseur d'énergie sous la forme d'un moteur électrique non périphérique équipé d'un système de stockage de l'énergie électrique (batteries) rechargeable à partir d'une source extérieure.

La recharge par induction est un système permettant à un véhicule de récupérer de l'électricité à distance, par induction électromagnétiques. Physiquement dans le domaine automobile, cela se traduit par un émetteur d'électricité via un boîtier au sol, ou intégré sous la couche de bitume de la voie (Figure I.18). Ce type de charge serait possible dans deux situations. Premièrement, à l'arrêt, sur une place de parking « statique », présente l'avantage d'éviter toute manipulation de câble et d'être moins sensible que les chargeurs filaires cela supprimerait ainsi la borne et l'interface [13].

Une autre utilisation de la recharge sans câble est dite « dynamique », ce qui signifie qu'elle peut être rechargée pendant la conduite à l'aide d'un dispositif intégré le long de la route. L'autonomie du véhicule est aussi limitée par la taille de la batterie, et donc le poids embarqué et le coût du véhicule [13].

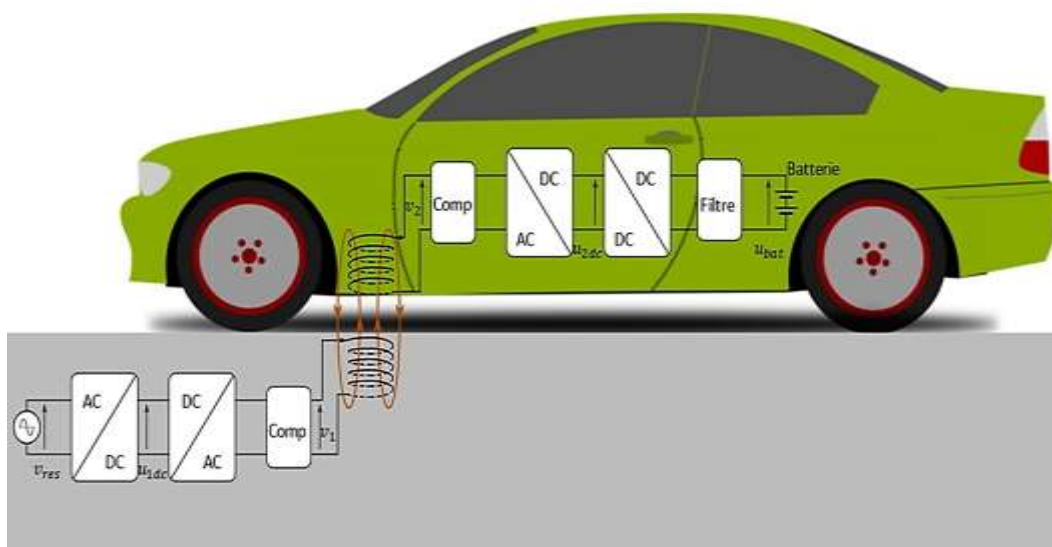


Figure I.18: Architecture d'un système de transfert d'énergie par induction [27].

I.6.2.b. Stockage de l'énergie par batteries dans les voitures électriques

Une batterie est constituée de deux métaux (ou cations) reliés par un pont électrolytique. Lorsque la batterie se décharge, une électrode libère des électrons par oxydation, tandis que l'autre électrode les absorbe, par réduction. Cette différence de potentiel forme une tension entre les deux électrodes. Par conséquent, plus la différence de potentiel entre les deux électrodes est élevée, plus la tension de la batterie est importante. Il existe des batteries de différentes formes (structure), et de différentes compositions. Les plus communes sont celles au Plomb (PbHSO), au Nickel Cadmium (NiCd), au Nickel Metal Hydrure (NiMH), et au Lithium-Ion (Li-ion). Le Tableau I.2 résume les caractéristiques principales des différents types de batteries évoqués plus haut :

	NiCd	NiMH	Plomb	Li-ion cobalt	Li-ion manganèse	Li-ion phosphate
Energie spécifique [Wh/kg]	45 → 80	60 → 120	30 → 50	150 → 190	100 → 135	90 → 120
Temps de recharge [h]	1	2 → 4	8 → 16	1.5 → 3	< 1	< 1
Fréquence d'entretien en jours	30 → 60	60 → 90	90 → 180	–	–	–
Température de Fonctionnement en [°C]	-40 → 60	-20 → 60	-20 → 60	-20 → 60	-20 → 60	-20 → 60
Usage Commercial depuis	1950	1990	1970	1991	1996	2006
Niveau de Toxication	Haut	Assez bas	Moyen	Bas	Bas	Bas

Tableau I.2: Les caractéristiques principales des différents types de batteries [28].

I.6.2.c. Recharge statique sans contact

L'un des premiers systèmes de recharge statique sans contact est opérationnel depuis 2002 à Gênes et à Turin [29]. La société "Conductix-Wampfler" a développé ce système totalement automatisé constitué de deux paires de coupleurs résonnant à une fréquence de 20 kHz et chaque paire transmettant 30 kW pour une puissance totale de 60 kW. Une bonne transmission de puissance est assurée par la réduction de l'entrefer (espacement entre les bobines du coupleur) grâce à un système mécanique comme le montre la (Figure I.19). Celui-ci permet d'abaisser la bobine secondaire et de la rapprocher de la bobine primaire [29].

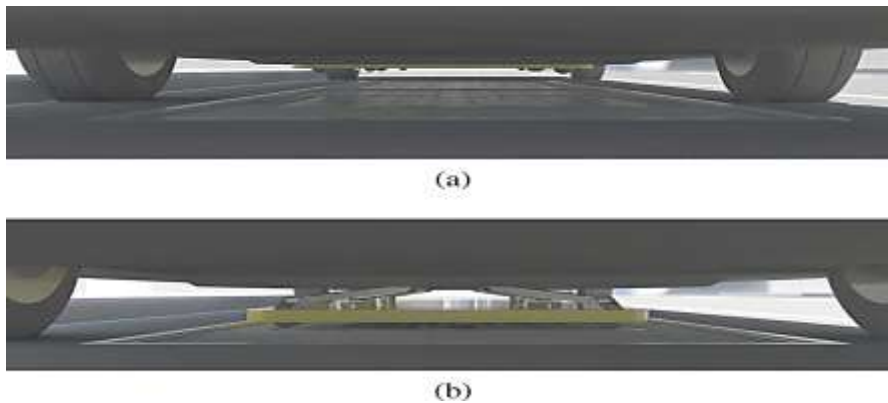


Figure I.19: Système "Conductix-Wampfler" avec bobine secondaire en position haute (a) et position basse (b) [30].

La compagnie "Witricity" est une filiale du "Massachusetts Institute of Technology" (MIT), qui a collaboré avec les constructeurs "Delphi Automotive" et "Toyota" pour le développement d'un système de recharge sans contact, la (Figure I.20) montre les composants de ce système, appelé "WiT 3300 kit". Ce dernier est caractérisé par une capacité de transfert de 3,3 kW et un rendement de 90% pour un entrefer de 180 mm [30].

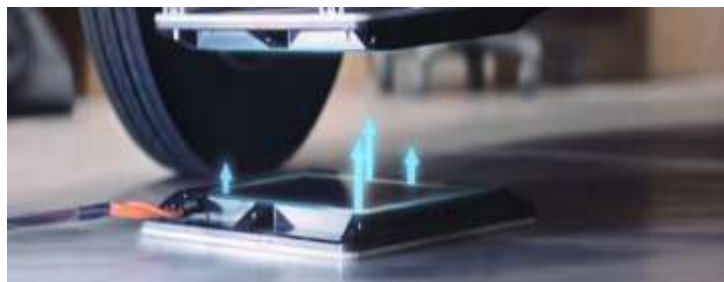


Figure I.20: Système "WiT 3300 kit" de recharge sans contact [30].

En 2009, la société « Evatran » a lancé le développement de « Plugless Power », considéré comme le premier système de recharge « mains libres » ou sans contact à courte portée.

Le système présente un rendement, de réseau à batterie, de 90% pour un transfert de puissance 3,3 kW sur une distance de 100mm séparant le primaire du secondaire comme le montre la (Figure I.20).

En 2012, le programme "Apollo Launch Program" a été lancé avec le but d'intégrer le système "Plugless Power" sur les véhicules électriques en vente sur le marché américain, la compagnie "Evatran" a commercialisé la deuxième génération "Plugless L2 Wireless" au grand public en 2014 voir la (Figure I.21) [31].



Figure I.21: Système "Plugless Power" [31].

Le tableau I.3 résume les acteurs majeurs, industriels et académiques, dans le domaine de la recharge statique sans contact ainsi que les caractéristiques des systèmes développés.

Projet	Entrefer (mm)	Fréquence (KHz)	Puissance (Kw)	Rendement (%)	Année
Acteurs industriels					
Plugless	102	20	3.3	> 90	2014–2016
Witricity	100–250	85	3.6–7.7–11	> 90	2009–2017
Qualcomm	160–220	85	3.6–6.6–7–20	> 90	2010–2017
Hevo Power	/	/	10	90	2017–2018
Bombardier	10–30	/	3.6–7.2–22–200	> 85	2015–2017
MDC	10–30	/	3.6–200	> 85	2015–2017
Acteurs académiques					
Wuhan	300	100	6–16	81	2017
KITECH	150	85	4	93	2016
MST	200	60	1	82	2016
ORNL	100–160	19.5	3.3	90	2013–2017
Auckland	100–300	10-40	2–5	85	1997–2017
Georgia	160	20	3	80	2014–2017

Tableau I.3: Ensemble des acteurs académiques et industriels de la recharge statique sans contact [32].

I.6.2.d. Recharge dynamique sans contact

Le premier système de recharge sans contact c'était le projet "PATH" avec un véhicule en mouvement a vu le jour en 1974, il commutait à 10 kHz et permettait de transférer une puissance de 200 kW associée à un courant de 2000 A [33] à travers un entrefer de 10 cm [34], [35]. Il se caractérisait par un rendement de 60% mais présentait des inconvénients majeurs tels que son volume et sa masse, à titre d'exemple sa bobine émettrice pesait 850 kg pour 4,5 m de longueur et 1 m de largeur, comme le montre la figure I.22 suivante.



Figure I.22: Vue de coupe transversale d'un tronçon de piste du projet "PATH" [35].

En 1997, le groupe "Wampfler AG" a commercialisé le premier système de transfert d'énergie sans contact pour les transports public en se basant sur le brevet de l'Université d'Auckland comme le montre la (Figure I.23) [36], [37]. Le projet coréen « Véhicule électrique en ligne » (OLEV) mis en œuvre à l'Institut supérieur coréen des sciences et technologies (KAIST) est considéré comme la première avancée dans le domaine permettant une grande avancée technologique. En effet, l'OLEV s'est divisé en trois grands projets dédiés respectivement à une voiture de golf, un bus et enfin un SUV (Sport Utility Vehicle).

Les bus fonctionnent à 60 kW grâce à un système sans contact avec un rendement de 70 %. Les SUVs sont alimentés par un système électrique de 20 kW avec un rendement de 83%. Les deux systèmes peuvent tolérer un désalignement de 160 mm et 200 mm respectivement [38].

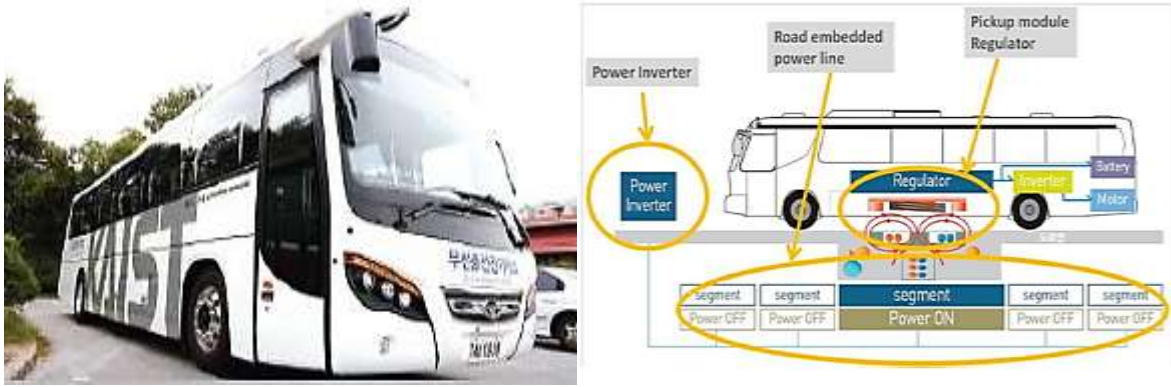


Figure I.23: Vue d'ensemble du système de bus électrique du campus OLEV.

Le groupe "Bombardier" s'est également penché sur la question via le projet "PRIMOVE", dans lequel il s'est intéressé à la recharge dynamique pour les véhicules, les bus et les tramways (Figure I.24).

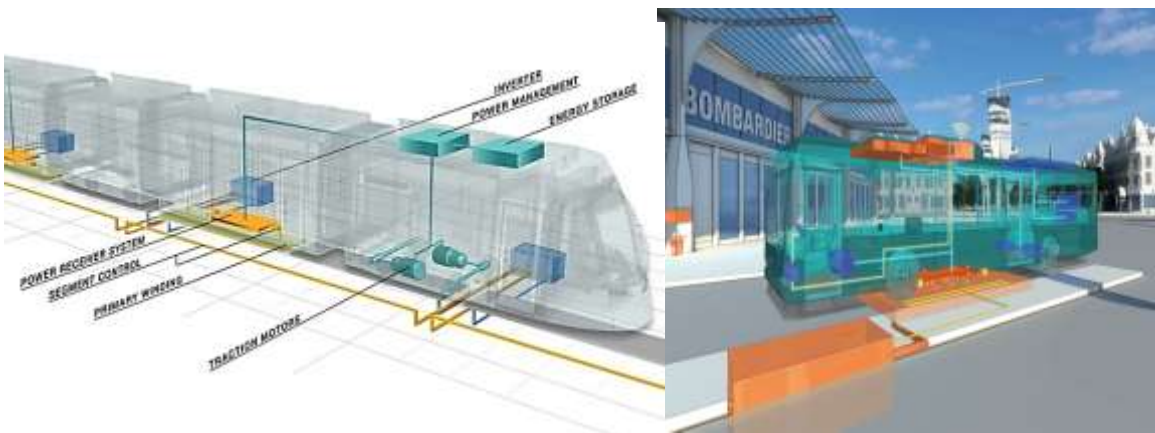


Figure I.24: Projet "PRIMOVE" de Bombardier.

Le 18 mai 2017 Renault présente un système de recharge dynamique pour véhicules électriques qui permet de recharger la batterie pendant la conduite. En collaboration avec ses partenaires Qualcomm Technologies et Vedecom, Renault a participé à la conception d'un système capable de recharger 20 kW à des vitesses allant jusqu'à 100 km/h. Sur la piste d'essai comme le montre la (Figure.I.25), Renault Kangoo Z.E. Peut chargé en conduisant simultanément, dans les deux sens.



Figure I.25: La piste d'essais recharge sans contact Kangoo Z.E [39].

La démonstration de charge dynamique s'est déroulée sur une piste d'essai de 100 mètres à Satory, Versailles, dans le cadre du projet FABRIC, impliquant Qualcomm Technologies et Vedecom et Renault.

I.6.2.e. Types de piste à bobines

Le coupleur est l'élément central du transfert d'énergie opéré par le couplage magnétique entre les deux bobines, l'une réceptrice et l'autre émettrice de configuration varies, comme illustrée dans la (Figure I.26).

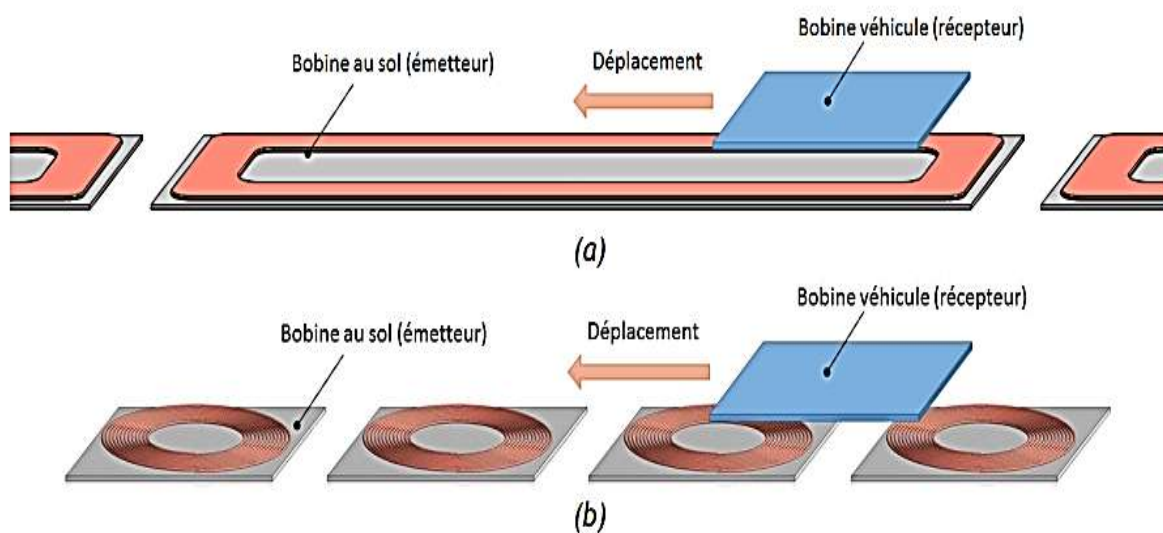


Figure I.26: Illustration des deux types de pistes de recharge, (a) piste à émetteur Unique (b) piste à émetteurs segmentés [27].

I.6.3. La TESC dans le domaine médical

Actuellement, les batteries des dispositifs électroniques implantés dans le corps sont remplacées par une chirurgie d'incision, ce qui peut entraîner des complications de santé. Par conséquent, une nouvelle technique de charge par transfert d'énergie sans contact est en train d'émerger comme on peut voir sur la (Figure I.27). La sécurité de l'utilisation des ondes ultrasonores dans le corps humain a été garantie dans diverses applications médicales, telles que le diagnostic des organes ou de l'état du fœtus. Cependant, les méthodes de transfert d'énergie acoustique existantes ne sont pas facilement commercialisées en raison de la faible efficacité de transmission de l'énergie acoustique.

Les chercheurs du KIST (Institut coréen des sciences et des technologies) ont développés un modèle qui reçoit et convertit les ondes ultrasonores en énergie électrique en utilisant le principe triboélectrique qui permet de convertir efficacement de petites vibrations mécaniques en énergie électrique.

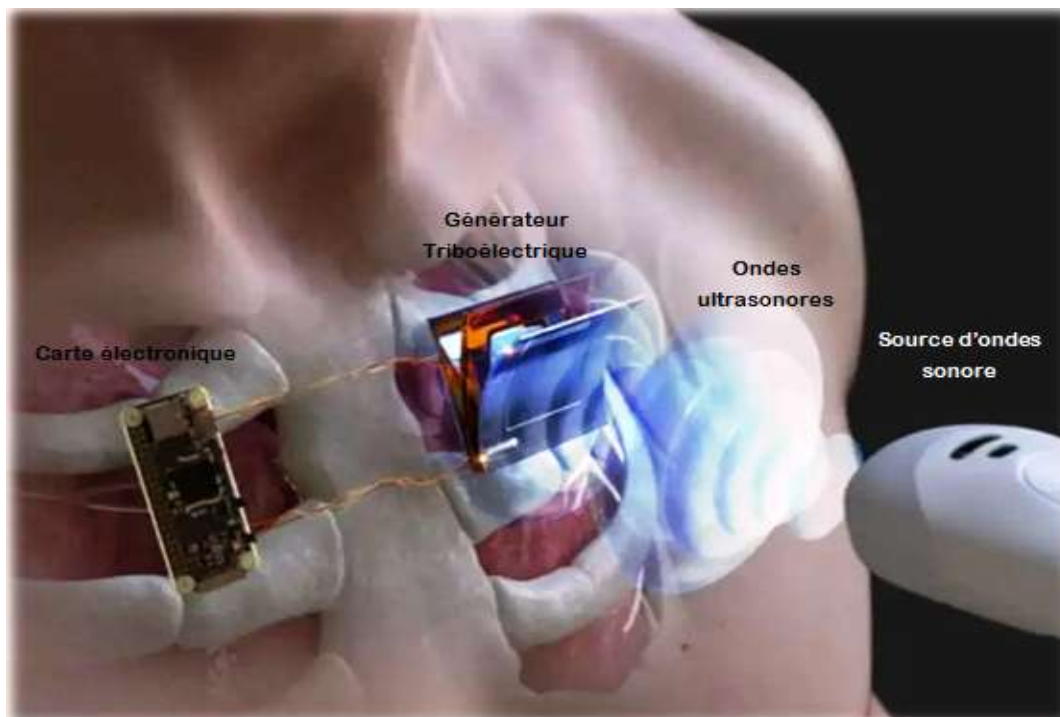


Figure I.27: Exemple d'application dans le domaine médical [40].

I.6.4. La TESC dans le domaine militaire

La transmission d'énergie sans fil dans le domaine militaire ouvre de nouvelles perspectives de technologies émergentes offrant des solutions innovantes, et améliore l'efficacité, la fiabilité et la sécurité des systèmes et des équipements militaires. La recharge automatique sans fil pour les systèmes militaires de haute technologie, concernant les robots mobiles sans pilote, le gilet du soldat au casque et du casque à la lunette optique (Figure I.28) [25].



Figure I.28: Prototype de gilet équipé de la technologie WiTricity [25].

I.6.5. La TESC dans le Domaine spatial

Une centrale solaire orbitale consiste à installer des panneaux solaires dans l'espace à une altitude d'environ 36000 kilomètres (Figure I.29). Cette position permet aux cellules photovoltaïques de capturer une grande quantité d'énergie lumineuse en permanence, ce qui les rend efficaces. L'idée a été proposée il y a plus de quarante ans par le célèbre scientifique Peter Glaser L'agence spatiale japonaise, la JAXA, travaille depuis 1998 au lancement d'un prototype de centrale solaire en orbite géostationnaire et espère un lancement en 2040 [41].



Figure I.29: Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire orbitale [41].

I.6.7. Domaine industriel

I.6.7.a. Chauffage par induction

Le chauffage par induction est un procédé de chauffage sans contact, qui utilise le principe de l'induction électromagnétique pour générer de la chaleur de manière rapide et efficace comme nous montre la (Figure I.30). Lorsqu'un courant alternatif passe à travers une bobine électrique, un champ magnétique alternatif est créé autour de celle-ci. Lorsque cette bobine est placée à proximité d'un matériau conducteur, tel que du métal, les lignes de champ magnétique traversent le matériau et induisent des courants électriques à l'intérieur de celui-ci. Ces courants, appelés courants de Foucault, génèrent de la chaleur par effet Joule, chauffant ainsi le matériau. Les systèmes de chauffage par induction sont composés principalement d'un générateur de courant haute fréquence, d'une bobine inductrice et d'une pièce à chauffer.

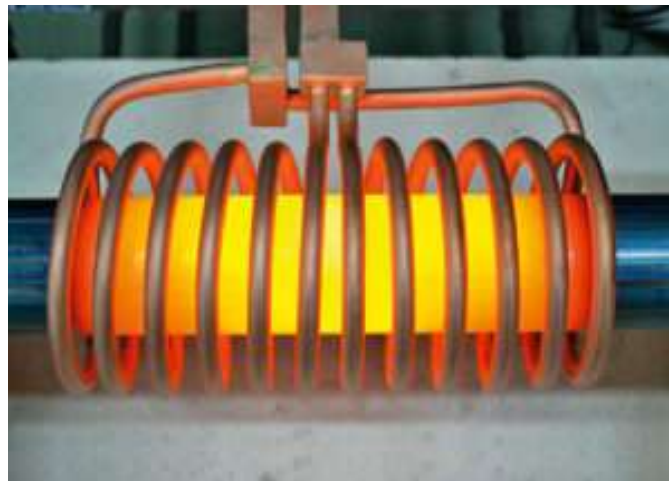


Figure I.30: Schéma du principe de chauffage par induction [42].

I.6.7.b. Magnétoformage

Le magnétoformage est une technique où on utilise des champs magnétiques pour déformer des matériaux métalliques de bonne conductivité, il permet le formage, l'assemblage et le soudage. Dans le processus de magnétoformage, une bobine électromagnétique est placée autour de la matrice de formage, tandis qu'une feuille de métal est positionnée au-dessus. Lorsque du courant électrique est appliqué à la bobine, un champ magnétique est généré, induisant des courants électriques dans la feuille métallique. Ces courants créent des forces qui déforment la feuille métallique pour prendre la forme d'une matrice comme lustré la (Figure I.31).

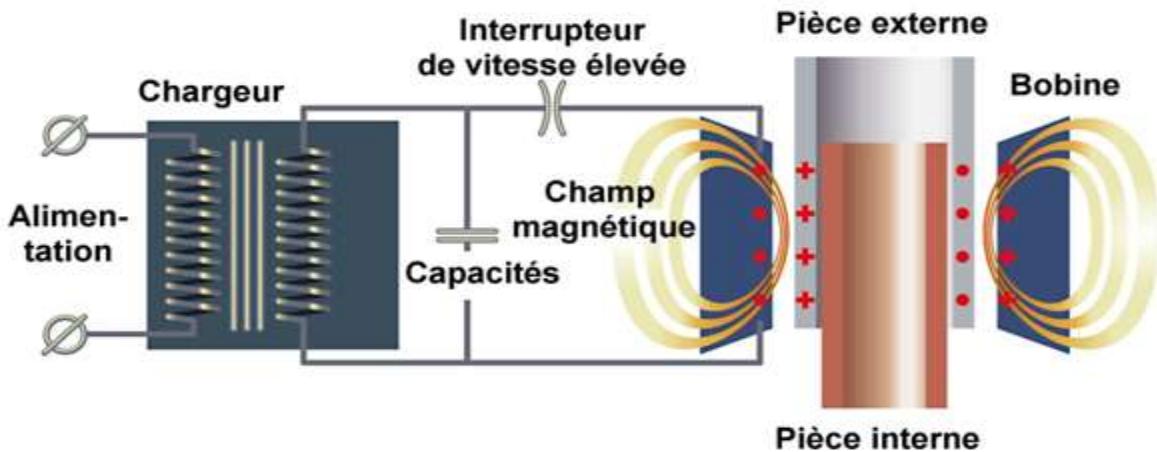


Figure 1.31: Schéma de principe du magnétoformage [43].

I.7. Les Avantages et Inconvénients de transfert d'énergie sans contact

Le transfert d'énergie sans contact offre plusieurs avantages significatifs. L'un des principaux avantages est sa facilité d'utilisation. Avec le chargement sans contact, il n'est plus nécessaire de brancher et débrancher des câbles chaque fois que vous devez charger un appareil. Il suffit de placer l'appareil compatible avec la technologie de chargement sans contact sur le chargeur et le processus commence automatiquement. Elle a permis de se débarrasser des fils et des, cette dernière contribue à réduire l'encombrement et à simplifier l'esthétique des espaces de vie et de travail. Cela permet également de réduire le risque d'enchevêtrement des câbles et de dommages potentiels associés. Cette technologie offre également une flexibilité de placement. Les appareils peuvent être chargés en étant simplement placés sur une surface de charge, ce qui permet une plus grande liberté de mouvement et une utilisation plus pratique des appareils.

Malgré ses nombreux avantages, le transfert d'énergie sans contact présente également des inconvénients :

Elle est complexe et coûteuse associée à l'installation de systèmes de chargement sans contact. L'efficacité énergétique du transfert d'énergie sans contact est généralement inférieure à celle des méthodes de charge traditionnelles. Une partie de l'énergie est perdue dans le processus de transmission sans contact, ce qui peut entraîner une efficacité réduite et une consommation d'énergie plus élevée. Un autre inconvénient est les interférences électromagnétiques et les pertes de puissance sont des problèmes potentiels. La proximité peut perturber la transmission d'énergie, ce qui peut affecter la fiabilité et l'efficacité du chargement sans contact, et du point de vue sécurité et les préoccupations en matière de santé

sont également des considérations importantes. Bien que les niveaux de rayonnement des systèmes de chargement sans contact soient généralement considérés comme sûrs, des études supplémentaires peuvent être nécessaires pour évaluer pleinement les impacts potentiels sur la santé à long terme avec le transfert d'énergie sans contact. Les obstacles physiques et d'autres appareils électroniques à proximité peuvent perturber la transmission d'énergie, ce qui peut affecter la fiabilité et l'efficacité du chargement sans fil, et du point de vue sécurité et les préoccupations en matière de santé sont également des considérations importantes.

I.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue le transfert d'énergie sans contact on travers ses différentes techniques en champs proches (induction magnétique, induction électrique) et en champs lointain (propagation d'ondes électromagnétique, ondes sonores, ...).

L'importance du TESC a été située à travers les divers domaines d'applications présentées.

Les prochains chapitres seront consacrés aux aspects de modélisations du TESC par induction magnétique.

Bibliographie chapitre I

- [1] <https://www.universalis.fr/fr/media/montage-de-hertz-v22n0039/>
- [2] P.Meyer, « Modeling of Inductive Contactless Energy Transfer Systems », These De Doctorat En Sciences, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 25 Septembre 2012.
- [3] <https://sites.google.com/site/lelectricitesansfil/tpe/2-historique-et-principe/1-historique>, (Consulte Le 10 Octobre 2020).
- [4] <https://science-labs.com/bobine-tesla-fonctionnement-fabrication/>
- [5] <https://teslasciencecenter.org/history/tower/> (Consulte Le 24 Octobre 2020).
- [6] Wc.Brown, « The History Of Power Transmission By Radio Waves ». Microwave Theory And Techniques, Ieee Transactions On, Vol. 32, Issue 9, Pp: 1230–1242,1984.
- [7] Wc.Brown, « The History Of The Development Of The Rectenna ». In Proc. Sps Microwave Systems Workshop At Jsc-Nasa, Pages 271–280, 1980.
- [8] G.Maryniak, « Status Of International Experimentation In Wireless Power Transmission ». Sunset Energy Counsel, Solar Energy, Vol. 56, 1996.
- [9] A.LHAFHAF, A.EL ALAOUI, M.EL JALOULI, D.MATERRED, ET G.OBDAM, (2014).Recharge Sans Fil Des Telephones Mobiles.Repere A: https://thierryperisse.free.fr/documents/projet_linel/projets_l3eearel/projet-thierry/projet-chargeur-batterie-smartphone/spi_fipa17_chargeur_sans_fil_de_telephones_mobiles.pdf, (Consulte Le 25 Octobre 2020).
- [10] V. Marian, « Transmission D'energie Sans Fil. Application Au Reveil A Distance De Recepteurs En Veille Zero Consommation », These De Doctorat, Universite De Lyon, 21 Novembre 2012.
- [11] M.Boudjema, " Etude Electromagnetique Du Transfert Sans Fil D'energie Par Voie De Couplage Inductif Resonant Serie-Parallele", Memoire Presente En Vue De L'obtention Du Diplome Du Master En Electrotechnique, Universite Abderrahmane Mira -Bejaia Faculte De Technologie, 2016/2017.
- [12] Salim Guerroudj. Caracterisation Et Modelisation Des Systemes De Charge Sans Contact Du Vehicule Eclectique En Mouvement Pour L'evaluation Des Champs Magnetiques Generes.. Electromagnetisme. Normandie Universite, 2020.
- [13] A.Caillierez," Etude Et Mise En Œuvre De L'energie Electrique Par Induction: Application A La Route Electrique Pour Vehicules En Mouvement", Thèse De Doctorat En Génie Electrique, Université Paris-Saclay, 2016.
- [14] B.Bouchebbah Et N.Benniche, " Etude Et Modelisation Du Transfert Sans Fil D'energie Electrique En Continu", Mémoire Présenté En Vue De L'obtention Du Diplôme Du Master En Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira -Bejaia Faculté De Technologie, 2018.
- [15] Derby, « Transfert D'energie Sans Contact Par Induction En Moyenne Puissance », Energies |Conversion De L'energie Electrique, 10 Mai 2018.

Bibliographie chapitre I

- [16] Ibrahim, Mohammad. Analyse D'interopérabilité D'un Système De Recharge Sans Contact Pour Le Véhicule Electrique. Génie Electrique. Paris : Laboratoire De Génie Electrique De Paris (Lgep), 2014.
- [17] A.P.Sample, D.A.Meyer, Et J.R.Smith. Analysis, Experimental Results, And Range Adaptation Of Magnetically Coupled Resonators For Wireless Power Transfer. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 2011 ,58(2):544–554.
- [18] Union International De Télécommunication, « Transmission D'énergie Sans Fil Au Moyen De Techniques Autres Que La Transmission Par Faisceau Radiofréquence », Rap. Uit-R Sm.2303-1, Genève 2015.
- [19] Karalis, A., Joannopoulos, J. Et Soliadic , M.« Efficient Wireless Nonradioactive Mid-Range Energy Transfer ». Annals Of Physics, Vol. 323, Issue 1, Pp: 34–48, 2008.
- [20] Wang Wei « Etude De La Transmission D'énergie Sans Fil (Wpt) Basee Sur La Resonance Couplee Magnetique», Universite De Montreal Juillet 2014.
- [21] Naoki Shinohara, « Transfer Via Radiowaves», Series Editor Pierre-Noël Favennec, Kyoto Japon, 2018.
- [22] Frauge, Ingo, « La Communication Utilisant La Transmission Analogique Et Signaux, Les Ondes Electromagnetique » [Https://Www.Ph-Ludwigsburg.De](https://www.ph-ludwigsburg.de)
- [23] Derbey, « Transfert D'énergie Sans Contact Par Induction En Moyenne Puissance », Energies | Conversion De L'énergie Electrique, 10 Mai 2018.
- [24] M. Kazmierkowski and A. Moradewicz, “Unplugged But Connected: Review of Contactless Ener-Gy Transfer Systems,” IEEE Ind. Electron. Mag., Vol. 6, No. 4, Pp. 47–55, Dec. 2012.
- [25] Medjebar , I., Ouinharoun, G . Transmission Sans Fils D'énergie Electrique Par Voie D'induction Magnetique. Diplome De Master. Genie Electrique. Bejaia : Universite Abderrahmane Mira, 2016
- [26] A.Bouacida, "Chargeur De Batteries Sana File Pour Voiture Electrique Gere Par Pic16f877", Memoire Presente En Vue De L'obtention Du Diplome Du Master En Electronique, Universite Badji Mokhtar- Annaba, Faculte : Sciences De L'ingeniorat, 2018.
- [27] Eric Laboure, « Recharge Sans Contact Des Vehicules Electriques », Culture Science De L'ingenieur, Ecole Normale Superieur Paris-Saclay, Edite Le 11/05/2020.
- [28] Rand D.A.J., Woods R., Dell R.M.: Batteries For Electric Vehicles, Taunton (Gb), Srp Ltd., 1998, 577p. & [Www.Batteryuniversity.Com](http://www.batteryuniversity.com)
- [29] Award For Conductix-Wampfle, 2017, Url : [Http://Www.Conductix.Com/En/ News/2011-02-15/Award-Conductixwampfler-Wireless-Charging Electric Vehicles.](http://www.conductix.com/en/news/2011-02-15/award-conductixwampfler-wireless-charging-electric-vehicles)
- [30] A. Doni, « D 3.3.1 - Review Of Existing Power Transfer Solutions », In : Public Deliverable Eu Fabric Project, 2014

Bibliographie chapitre I

- [31] P. Bacque, Evatran To Begin Shipping Its Plugless Electric Vehicle Charging System, Url: [Www.Richmond.Com](http://www.Richmond.Com).
- [32] Junwei Lu Chirag Panchal Sascha Stegen, « Review Of Static And Dynamic Wireless Electric Vehicle Charging System », In: Engineering Science And Technology, T. 21, 2018, P. 922–937, Doi: 10.1049/Cp.2014.1662.
- [33] D. V. Otto, « Power Supply Equipment For Electrically-Driven Vehicle », In: Jp Patent 49 063 111 (1974).
- [34] G. A. Covic Et J. T. Boy, « Inductive Power Transfer », In : Proceedings Of The IEEE, T. 101, 6, 2013, P. 1276–1289.
- [35] S. E. Shladover et Al., « Path At 20-History And Major Milestone », In: IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, T. 8, 4, 2007, P. 584–592.
- [36] J. Boys et A. Green, « Inductive Power Pick-Up Coils », In: Us Patent App. Pct/Nz1994/000,115 (1995).
- [37] J.T. Boys Et A.W Green, « Flux Concentrator For An Inductive Power Transfer System », In: Us Patent 5,821,638 (Oct. 1998).
- [38] Y. D. Ko et Y. J. Jang, « The Optimal System Design Of The Online Electric Vehicle Utilizing Wireless Power Transmission Technology », In: IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems 14.3 (Sept. 2013), P. 1255–1265, Issn: 1524- 9050, Doi: 10.1109/Tits.2013.2259159.
- [39] <https://www.automobile-propre.com/dossiers/voiture-electrique-recharge-par-induction-sans-fil/>
- [40] <https://www.everythingpe.com/news/details/1689-charging-underwater-and-body-implanted-electronic-devices-using-ultrasonic-waves>
- [41] « L'électricité Sans Fil, Bientôt Une Réalité Du Quotidien », Mars 2018,
- [42] <https://www.polyplus.fr/chauffage-par-induction/induction-magnetique/>
- [43] <https://www.energystream-wavestone.com>.

Chapitre II :
Méthode de modélisation analytique
du TESC cas mono-spire

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESH cas monophasé

II.1. Introduction

La modélisation électromagnétique est un domaine crucial dans l'étude et la conception de systèmes de transfert d'énergie sans contact. Ce type de transfert, basé sur les principes fondamentaux de l'électromagnétisme et en utilisant des techniques d'analyse avancées, offre de nombreuses possibilités dans des domaines tels que l'électromobilité, l'électronique de puissance et la biomédecine. Cette introduction explore les bases de la modélisation électromagnétique dans le contexte spécifique du transfert d'énergie sans contact.

Ce chapitre décrit le cadre théorique utilisé dans ce mémoire de Master en commençant par les définitions de base des champs électrique et magnétique, pour ensuite établir une modélisation physico-mathématique des phénomènes électromagnétiques intervenant dans la transmission sans fil d'énergie électrique.

II.2. Approches de modélisation du TESH

L'approche de modélisation du transfert d'énergie sans contact est une méthode utilisée pour étudier et prédire le fonctionnement des systèmes qui permettent le transfert d'énergie d'une source à un récepteur sans contact. Cette approche vise à modéliser les phénomènes électromagnétiques et les interactions entre les composants du système, tels que les bobines d'induction et les circuits électroniques, afin de comprendre leur comportement et d'optimiser leur conception. On distingue trois types de méthodes de résolution :

- Méthode analytique basée sur la solution des équations aux dérivées partielles issues des modèles électromagnétiques (Equations Maxwell).
- Méthode semi-analytique basée sur des expressions intégrales des grandeurs électromagnétiques.
- Méthode numérique basée sur la résolution numérique des EDP électromagnétiques en utilisant la méthode des éléments finis ou différences finies.

II.3. Formules analytiques de l'électromagnétisme

Le phénomène du magnétisme est basé sur les lois suivantes :

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESH cas monophasé

II.3.1. Théorème d'Ampère (André-Marie Ampère 1775–1836)

La circulation du champ magnétique sur le contour fermé qui délimite une surface (s) est égale au flux du courant qui le traverse [1], I est la somme algébrique des courants qui traversent la surface sur laquelle s'appuie le contour (c).

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (\text{II.1})$$

Cette relation porte le nom du théorème d'Ampère, elle joue un rôle fondamental en électromagnétisme, elle ne permet de déterminer le champ magnétique que dans des situations très symétriques de telle sorte que l'on puisse évaluer facilement la circulation du champ magnétique. Ceci limite sa facilité d'application mais pas sa validité [2].

II.3.2. Loi de Biot et Savart (Jean-Baptiste Biot 1774-1862. Félix Savart 1791-1841)

Considérant le schéma de la Figure II.1, représentant un circuit fermé de forme quelconque dans lequel circule un courant I . Selon cette loi, chaque élément $d\vec{l}$ du circuit participe à la création d'un champ magnétique en tout point de l'espace suivant une relation qui s'écrit :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{conducteur}} \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{u}_{PM}}{r_{PM}^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{conducteur}} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}_{PM}}{r_{PM}^3} \quad (\text{II.2})$$

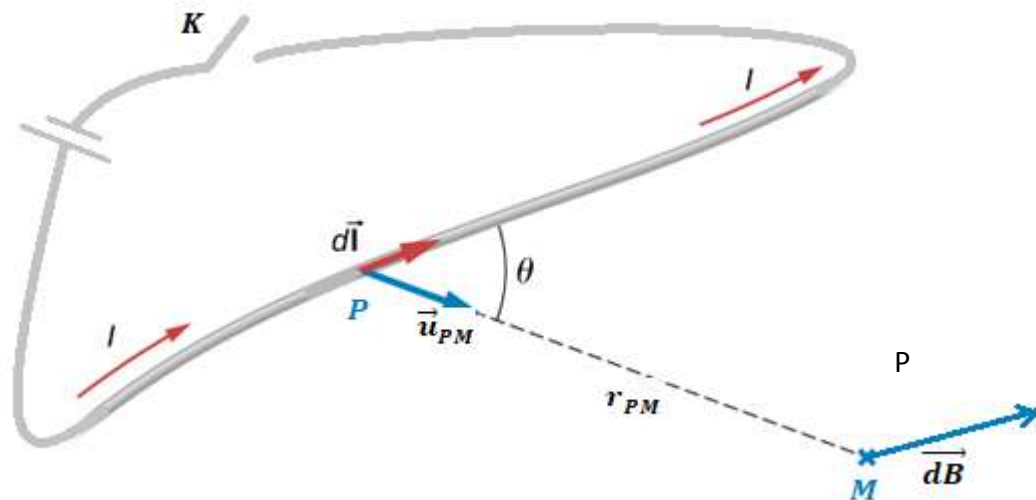


Figure II.1 : Loi de Biot et Savart.

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monopire

\vec{r}_{PM} : Vecteur distance entre le point source P, et le point cible M.

$d\vec{l}$: Tronçon élémentaire du fil conducteur [m].

\vec{B} : Induction magnétique [T].

I : Courant parcourant le conducteur [A].

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m].

II.3.3. Loi d'induction de Faraday et de Lenz (Michael Faraday 1791-1867. Heinrich Friedrich Emil Lenz 1804-1865)

La loi de Lenz-Faraday est un principe fondamental de l'électromagnétisme qui décrit le phénomène de l'induction électromagnétique. Cette loi énonce que toute variation du flux magnétique à travers une surface fermée induit une force électromotrice (f.e.m) dans un circuit électrique situé à proximité, et cette f.e.m est telle qu'elle s'oppose à la cause qui l'a produite. Mathématiquement, la loi de Lenz-Faraday peut être exprimée comme suit :

$$e_{\text{spire}} = - \frac{d\phi}{dt} \quad [\text{V}] \quad (\text{II.3})$$

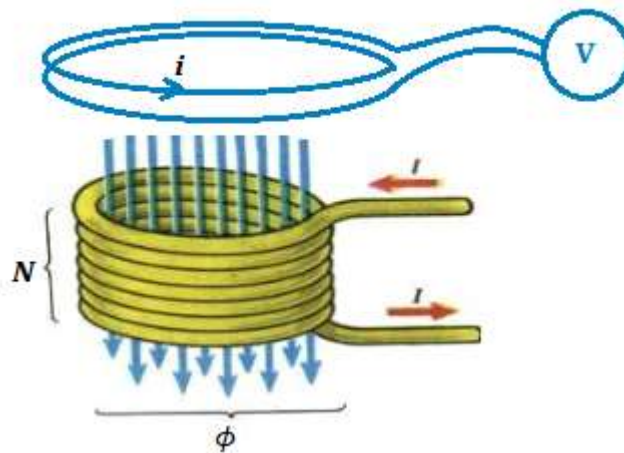


Figure II.2 : Variation du flux magnétique.

En d'autres termes, si le flux magnétique à travers une surface fermée change dans le temps, une force électromotrice est induite dans un circuit à proximité, et cette force est telle qu'elle s'oppose à la variation du flux magnétique. Cela signifie que la f.e.m induite tend à créer un courant qui génère un champ magnétique opposé à la cause du changement de flux.

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monospire

En pratique, l'induction magnétique est souvent causée par plusieurs spires, chacune d'elles produisant la même f.é.m.

$$\mathbf{e} = -N \frac{d\phi}{dt} = N e_{\text{spire}} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

e : La force électromotrice induite (f.é.m) [V].

ϕ : Flux d'induction magnétique [Wb].

N : Le nombre de spires.

Le flux magnétique à crée par le circuit source s'exprime par :

$$\Phi_M = \iint \vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{dS}} \text{ [Wb]} \quad (\text{II. 5})$$

D'où l'expression finale de la f.e.m induite est :

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \left(\iint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{dS}} \right) \\ &= -N \iint_S -\frac{d\vec{\mathbf{B}}}{dt} \cdot \vec{\mathbf{dS}} - N \iint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot \frac{d\vec{\mathbf{S}}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II. 6})$$

Tel que :

$N \iint_S -\frac{d\vec{\mathbf{B}}}{dt} \cdot \vec{\mathbf{dS}}$: f.e.m de transformation.

$N \iint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot \frac{d\vec{\mathbf{S}}}{dt}$: f.e.m de mouvement.

II.3.4. Force de Lorentz et de Laplace (Henrik Lorentz 1853-1928. Pierre-Simon de Laplace 1749-1827)

La force de Lorenz, nommée d'après le physicien Hendrik Lorentz, est une force électromagnétique $\vec{\mathbf{F}}$ qui agit sur une particule chargée q en mouvement à une vitesse $\vec{\mathbf{v}}$ à travers un champ magnétique $\vec{\mathbf{B}}$ et un champ électrique $\vec{\mathbf{E}}$ perpendiculaires entre eux. Cette force est exprimée par la formule [3] :

$$\vec{\mathbf{F}} = q(\vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{v}} \wedge \vec{\mathbf{B}}) \quad (\text{II. 7})$$

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monopaire

La force de Laplace, également connue sous le nom de force magnétique, est une force qui agit sur un conducteur parcouru par un courant électrique lorsqu'il est placé dans un champ magnétique. Elle est décrite par la formule suivante:

$$\vec{F} = \oint_c I \vec{dl} \wedge \vec{B} = I \vec{l} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.8})$$

II.3.5. Équations de Maxwell (James Clerk Maxwell 1831-1879)

Les quatre équations de Maxwell traduisent le comportement des phénomènes électriques et magnétiques à travers les variations dans l'espace et le temps des champs électriques et magnétiques vis-à-vis de leurs interactions et de leurs sources [4].

Les équations de Maxwell	Formes intégrales	Formes différentielles	
Maxwell-Gauss	$\oiint_s \vec{D} \cdot \vec{ds} = Q_{int}$	$div \vec{D} = \rho_v$	(II.9)
Maxwell-Thomson	$\oiint_s \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0$	$div \vec{B} = 0$	(II.10)
Maxwell-Faraday	$\oint_c \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	(II.11)
Maxwell-Ampère	$\oint_c \vec{H} \cdot \vec{dl} = I$	$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J}_{cond} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	(II.12)

\vec{D} : Vecteur déplacement électrique [C/m²].

Q_{int} : Charge électrique [C].

ρ_v : Densité volumique de charge [C/m³].

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

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

\vec{J}_{cond} : Densité de courant de conduction [A/m²].

t : Le temps [s].

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monophasé

II.3.6. Lois de comportement des milieux

Pour définir complètement le phénomène électromagnétique, on rajoute les lois de comportement des milieux qui expriment la relation non linéaire entre \vec{B} et \vec{H} due à la saturation du champ magnétique [4].

II.3.7. Loi d'Ohm

Traduit la relation entre la densité de courant et le champ électrique dans un conducteur.

$$\vec{J}_c = [\vec{J}_s + \sigma \vec{E}_s + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})] \quad (\text{II.13})$$

Avec :

σ : Conductivité électrique[S/m].

\vec{J}_s : Densité du courant d'excitation ou de source[A/m²].

$\sigma \vec{E}_s$: Densité des courants induits[A/m²].

$\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$: Densité des courants induits par mouvement[A/m²].

\vec{v} : Vecteur vitesse des pièces conductrices en mouvement[m/s].

Dans un milieu immobile :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \sigma \vec{E}_s \quad (\text{II.14})$$

II.3.8. Relation magnétique

La relation magnétique détermine la relation entre le champ et l'induction magnétique, cette relation donne la courbe d'aimantation $\vec{B} = \mathbf{f}(\vec{H})$, une variation du champ \vec{H} conduit à une variation de l'induction \vec{B} [5].

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0(\vec{H} \wedge \vec{M}) \quad (\text{II.15})$$

\vec{M} Représente l'aimantation[A/m].

Dans les matériaux ferromagnétiques durs "aimants permanents", la relation magnétique s'écrit :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.16})$$

Avec :

μ : La perméabilité caractéristique du milieu[H/m].

μ_r : La perméabilité relative du milieu

\vec{B}_r : Vecteur d'induction magnétique rémanente[T].

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monophasé

II.3.9. Relation diélectrique

La relation diélectrique décrit la relation entre l'induction \vec{B} et le champ électrique \vec{E} . Elle est linéaire si ϵ est constante. Cette relation prend sa grande importance dans les diélectriques où ϵ est importante [5].

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (\text{II. 17})$$

Tel que :

ϵ : Permittivité diélectrique [F/m].

ϵ_0 : Permittivité absolue du vide $\epsilon_0 = \frac{1}{36.\pi.10^9}$ [F/m].

ϵ_r : Permittivité diélectrique relative de milieu.

\vec{P} : Vecteur polarisation électrique

II.4. Expressions analytiques intégrales des inductances

II.4.1. Potentiel vectoriel magnétique

A partir de l'équation (II.10), on peut déduire qu'il existe un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

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

Ainsi, sous forme intégrale, on déduit l'expression du potentiel vecteur magnétique

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I d\vec{l}}{r_{PM}} \quad (\text{II. 18})$$

II.4.2. Formules analytiques de calcul d'inductance propre

On considère deux bobines circulaires (Figure II.3) l'une primaire et l'autre secondaire. L'inductance propre L_p de la bobine primaire parcourue par le courant I_p est donnée par :

$$L_p = \frac{\Phi_p}{I_p} = \frac{\iint_{S_{\text{circuit}}} \vec{B}_p \cdot d\vec{S}_p}{I_p}$$

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monopaire

$$\begin{aligned}
 L_p &= \frac{1}{I_p} \iint_{S_{\text{circuit } p}} \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{contour } p} \frac{I_p \vec{dl}_p \wedge \vec{u}_{pm}}{r_{PM}^2} \right) d\vec{S}_p \\
 &= \iint_{S_{\text{circuit } p}} \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{contour } p} \frac{I_p \vec{dl}_p \wedge \vec{u}_{pm}}{r_{PM}^2} \right) d\vec{S}_p
 \end{aligned}
 \tag{II.19}$$

L_p : Inductance propre[H].

ϕ_p : Flux magnétique[Wb].

I_p : Le courant [A].

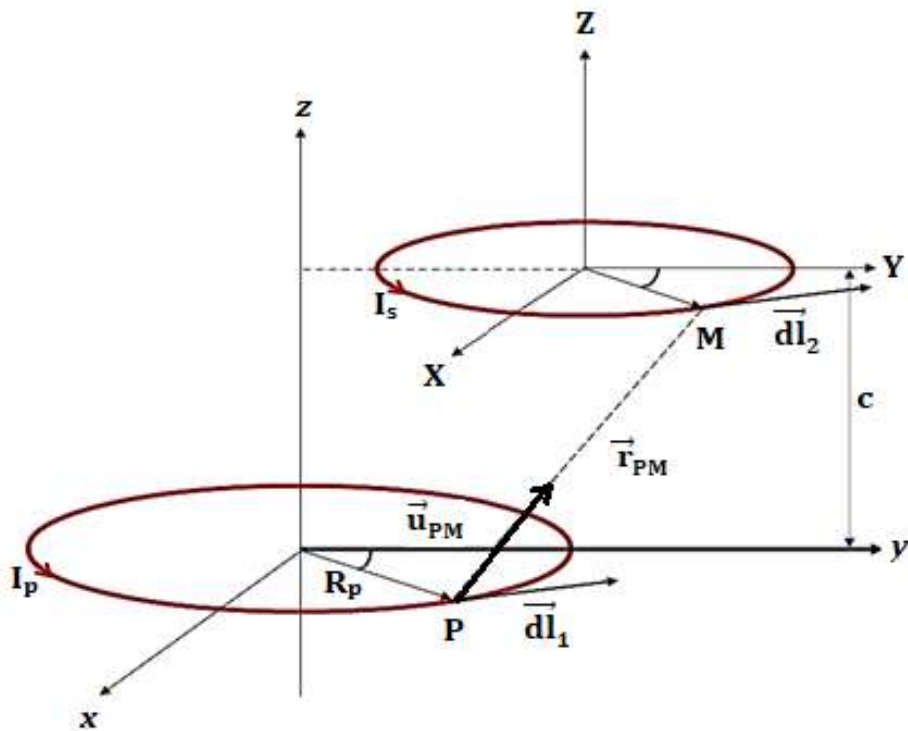


Figure II.3 : Deux bobines circulaires non coaxiales à axes parallèles

II.4.3. Inductance mutuelle

L'inductance mutuelle est un point crucial, car elle définit la capacité à transférer de l'énergie. C'est une image du couplage mutuel et du lien entre les bobines primaires et secondaires. Elle contient des informations sur la façon dont les bobines s'influencent mutuellement dans un transformateur sans noyau [6].

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monopole

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{\Phi_M}{I_p} = \frac{\iint_{S_{\text{circuit } s}} \vec{B}_p \cdot \vec{dS}_{\text{circuit } S_s}}{I_p} \\
 &= \frac{1}{I_p} \iint_{\text{circuit } S_s} \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{contour } p} \frac{I_p \cdot \vec{dl}_p \wedge \vec{u}_{PM}}{r_{PM}^2} \cdot \vec{dS}_s \quad (\text{II. 20}) \\
 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{contour } p} \iint_{\text{circuit } S_s} \frac{\vec{dl}_p \wedge \vec{u}_{PM}}{r_{PM}^2} \cdot \vec{dS}_s
 \end{aligned}$$

M : L'inductance mutuelle [H].

L'inductance mutuelle dépend de la géométrie des bobines, de l'écart entre elles, et du milieu dans lequel les bobines sont plongées.

L'inductance mutuelle est aussi exprimée à partir du potentiel vecteur magnétique, en s'appuyant sur le théorème de Stokes.

$$M = \frac{1}{I_p} \iint_{S_s} B_p \cdot \vec{dS}_s = \frac{1}{I_p} \iint_{S_s} (\vec{\nabla} \times A_p) \cdot \vec{dS}_s = \frac{1}{I_p} \oint_{c_s} A_p \cdot \vec{dl}_s \quad (\text{II. 21})$$

A_p : Potentiel vecteur magnétique créée par la bobine primaire [T.m].

B_p : Densité de flux magnétique issue de la bobine primaire [T].

S_s : La section balayée par le flux délimitée par la bobine secondaire [m^2].

L'équation (II.21) doit être numériquement intégrée sur la zone délimitée par la deuxième bobine afin d'évaluer l'inductance mutuelle entre les deux bobines.

Pour les bobines primaires et secondaires qui ont plus d'un tour, l'inductance mutuelle totale M_{bobine} est obtenue en additionnant des inductances mutuelles entre chaque paire de spires possibles [7] [8].

$$M_{\text{bobine}} = N_p \cdot N_s \cdot M_{i,j}$$

N_p ; N_s : Sont respectivement le nombre de spires

M_{ij} : Inductance mutuelle entre la $i^{\text{ème}}$ spire primaire et la $j^{\text{ème}}$ spire secondaire.

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monopire

La deuxième méthode de calcul de l'inductance est donnée par la formule de Neumann, elle fournit l'équation analytique pour l'inductance mutuelle entre deux bobines de toute forme à partir du potentiel vecteur magnétique [7].

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_p} \oint_{C_s} \frac{\vec{dl}_p \cdot \vec{dl}_s}{r_{PM}} \quad (\text{II. 22})$$

C_p : Le chemin d'intégration du conducteur primaire.

C_s : Le chemin d'intégration du conducteur secondaire.

r_{PM} : La distance entre les deux longueurs d'intégration élémentaires dl_1 et dl_2 .

II.5. Développement de l'expression de l'inductance mutuelle dans le cadre de TESC

Considérons deux bobines circulaires comme le montre la Figure II.3. Le centre de bobine primaire de rayon R_p correspond à l'origine $o(0,0,0)$ du plan xoy et l'axe du cercle correspond à l'axe z . La bobine secondaire avec rayon R_s est située dans le plan XOY et les axes z et Z sont parallèles entre eux. La distance entre les plans des deux bobines est l'entrefer "c" et la distance entre les deux axes désalignements correspondants est "d". L'inductance mutuelle entre deux boucles circulaires fermées lp et ls est donnée par la formule de Neumann double intégrale [8] :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{c_1} \oint_{c_2} \frac{dl_p \cdot dl_s}{r_{PM}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R_p R_s \cos(\varphi_1 - \varphi_2) d\varphi_1 d\varphi_2}{r_{PM}} \quad (\text{II. 23})$$

φ_1 et φ_2 Variant de 0 à 2π désignent les positions angulaires des éléments de longueur \vec{dl}_p et \vec{dl}_s .

R est le vecteur distance entre les éléments de courant dl_1 et dl_2 .

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESH cas monopire

Soit P un point sur la bobine primaire et Q un point sur la bobine secondaire. Les vecteurs position de ces points sont :

$$r_p = (R_p \cos \varphi_1, R_p \sin \varphi_1, 0)$$

$$r_M = (d + R_s \cos \varphi_2, R_s \sin \varphi_2, c)$$

Le vecteur distance entre les deux points est :

$$r_{PM} = r_2 - r_1 = [R_p^2 + R_s^2 + c^2 + d^2 - 2R_p R_s \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - 2R_p d \cos \varphi_1 + 2R_s d \cos \varphi_2]^2$$

Les éléments de courant dans les bobines sont :

$$dl_p = R_p d\varphi_1 (-\sin \varphi_p, \cos \varphi_p)$$

$$dl_s = R_s d\varphi_2 (-\sin \varphi_s, \cos \varphi_s)$$

Grover [9] a présenté la formule de l'inductance mutuelle entre les deux bobines à axes parallèles en termes d'intégrale de Neumann. Babic [10] a dérivé la formule de Grover en utilisant l'approche du potentiel vectoriel magnétique. La formule de Grover pour l'inductance mutuelle est donnée comme suit [8] :

$$M = \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{R_p R_s} \int_0^\pi \frac{\left(1 - \frac{d}{R_s} \cos \phi\right) \Psi(k)}{k\sqrt{V^3}} d\varphi \quad (\text{II. 24})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{R_s}{R_p}, \quad \beta = \frac{c}{R_p}, \quad \xi = \beta, \quad K^2 = \frac{4\alpha V}{(1 + \alpha V)^2 + \xi^2}, \quad \Psi(k) = \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k)$$

$$V = \sqrt{1 - 2\frac{d}{R_s} \cos \phi + \frac{d^2}{R_s^2}}, \quad K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} d\theta, \quad E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

Dans les équations ci-dessus $K(k)$ et $E(k)$ sont respectivement les intégrales elliptiques complètes des première et deuxième ordres de 1^{er} espèce.

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monospire

II.6. Expressions générales de mutuelle avec différent topologies des bobines

II.6.1. Mutuelles entre bobines filaires coaxiales

II.6.1.a. Sans Désalignement

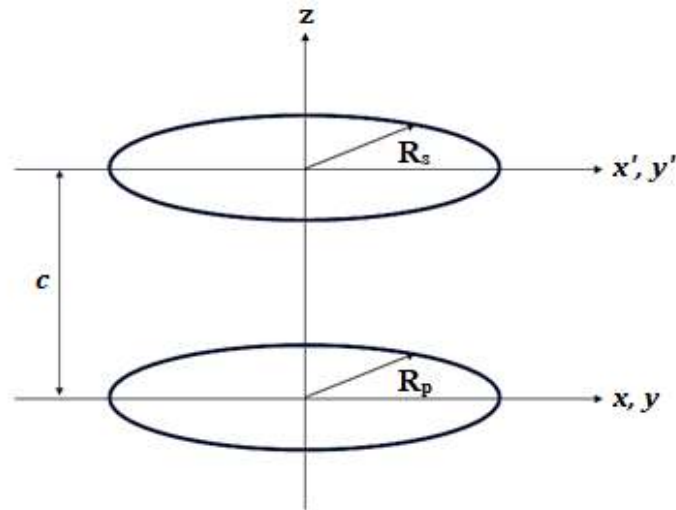


Figure II.4 : Sans désalignement.

La Figure II.4 montre le cas sans désalignement (c'est-à-dire $\theta = 0$ et $d = 0$). Ainsi, le modèle d'inductance mutuelle entre bobines circulaires filamenteuses à air sans désalignement est donné par :

$$M = \frac{2N_p N_s \mu_0}{\pi} \sqrt{R_p R_s} \int_0^\pi \frac{\Psi(k)}{k} d\phi \quad (\text{II. 25})$$

Avec :

$$K^2 = \frac{4\alpha}{(1 + \alpha)^2 + \xi^2}$$

II.6.1.b. Désalignement latéral

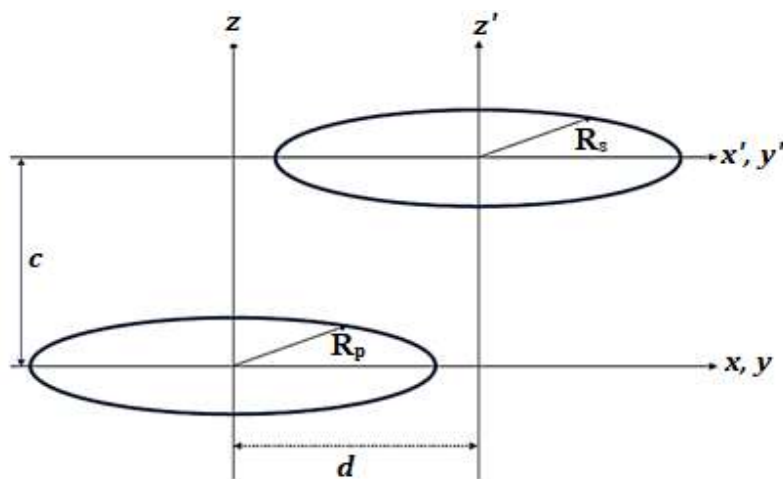


Figure II.5 : Avec désalignement latéral.

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monopaire

La Figure II.5 montre le cas avec désalignement latéral uniquement (c'est-à-dire $\theta = 0$). Ainsi, le modèle d'inductance mutuelle entre des bobines circulaires filamenteuses à noyau d'air avec uniquement un désalignement latéral est donné par :

$$M = \frac{2N_p N_s \mu_0}{\pi} \sqrt{R_p R_s} \int_0^\pi \frac{\left(1 - \frac{d}{R_s} \cos \phi\right) \Psi(k)}{k\sqrt{V^3}} d\phi \quad (\text{II. 26})$$

II.6.1.c. Désalignement angulaire

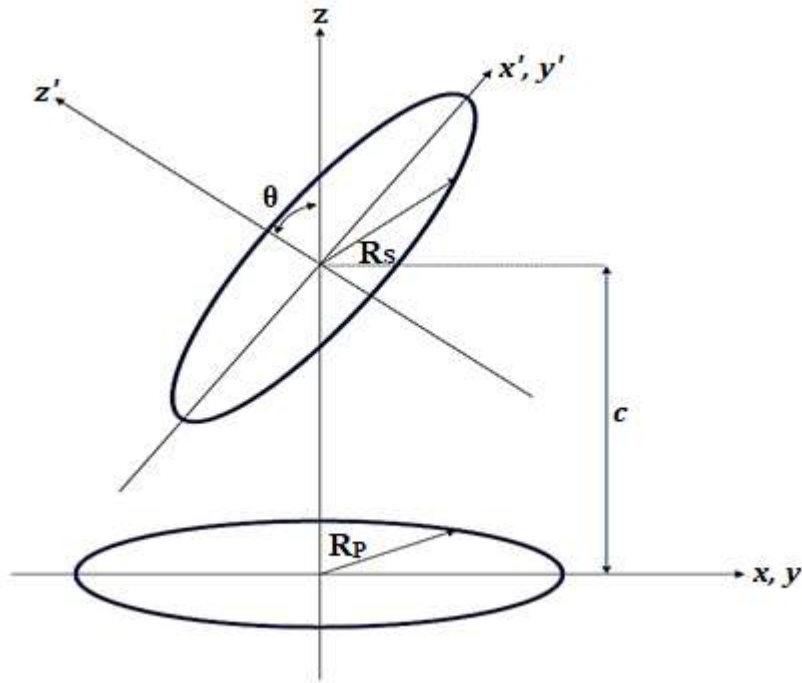


Figure II.6 : Avec désalignement angulaire.

La Figure II.6 montre le cas avec désalignement angulaire uniquement (c'est-à-dire $d = 0$). Ainsi, le modèle d'inductance mutuelle entre des bobines circulaires filamenteuses à air avec seulement un désalignement angulaire est donné par :

$$M = \frac{2N_p N_s \mu_0}{\pi} \sqrt{R_p R_s} \cos \theta \int_0^\pi \frac{\Psi(k)}{k\sqrt{V^3}} d\phi$$

Avec :

$$\xi = \beta - \alpha \cos \phi \sin \theta, V = \sqrt{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \theta}$$

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monopire

II.6.1.d. Désalignement latéral et angulaire

Grover a formulé un modèle plus efficace et plus général pour calculer l'inductance mutuelle entre deux bobines circulaires filamenteuses avec désalignement [11].

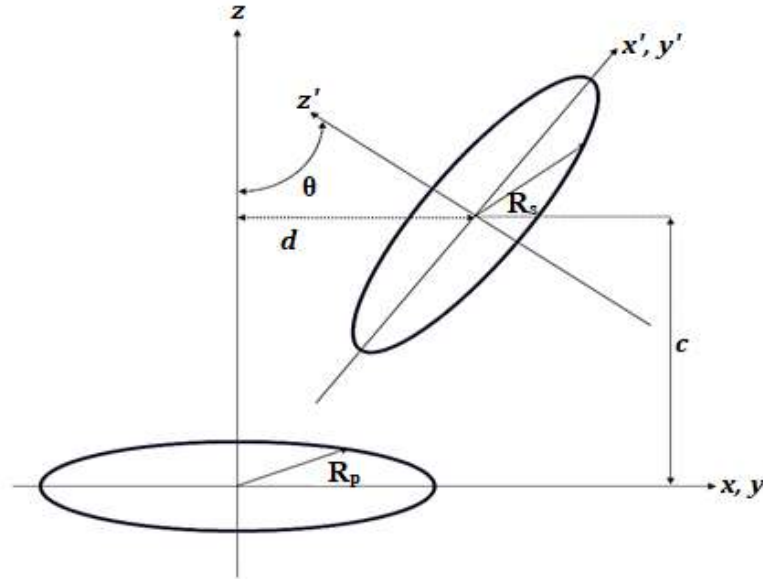


Figure II.7 : Bobines circulaires filamenteuses avec désalignement angulaire et latéral.

La Figure II.7 montre le cas avec les deux désalignements. Ainsi, en tenant compte de N_p et N_s , le modèle d'inductance mutuelle entre bobines circulaires filamenteuses à air avec désalignement latéral et angulaire est donné par :

$$M = \frac{2N_p N_s \mu_0}{\pi} \sqrt{R_p R_s} \int_0^\pi \frac{\left[\cos \theta - \frac{d}{R_s} \cos \phi \right] \Psi(k)}{k \sqrt{V^3}} d\phi \quad (\text{II. 27})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{R_s}{R_p}, \quad \beta = \frac{c}{R_p}, \quad \xi = \beta - \alpha \cos \phi \sin \theta$$

$$V = \sqrt{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \theta},$$

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESH cas monophasé

II.7. Expression analytique 3D de bobines rectangulaires

Dans ce cas, la configuration étudiée correspond à la disposition de la Figure II.8.

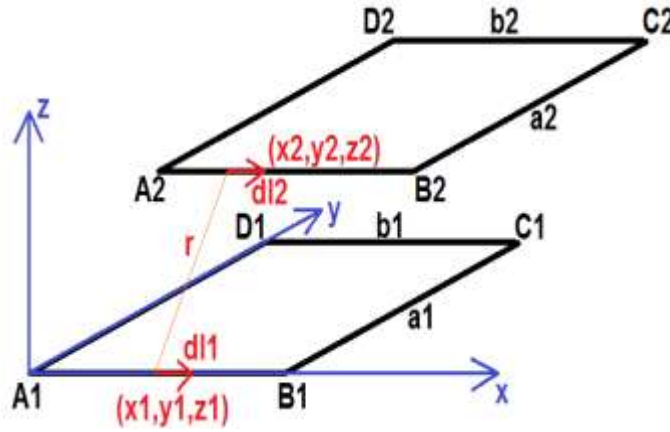


Figure II.8 : Bobinages rectangulaires [12].

On applique la formule de Neumann qui s'exprime dans l'équation (II.22) pour le calcul de la mutuelle entre une spire primaire et une spire secondaire (Figure II.8)

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{1}{r} \cdot dl_1 \cdot dl_2 \cdot \cos \theta \quad (\text{II.28})$$

θ étant l'angle entre dl_1 et dl_2 .

Le développement de (II.28) dans le cas de la Figure II.8 donne :

$$\begin{aligned}
 M = \frac{\mu_0}{4\pi} & \left[\iint_{AB_1AB_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 - \iint_{AB_1DC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 + \iint_{AB_1BC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 \right. \\
 & - \iint_{AB_1AD_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 - \iint_{DC_1AB_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 + \iint_{DC_1DC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 \\
 & - \iint_{DC_1BC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 + \iint_{DC_1AD_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 + \iint_{BC_1AB_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 \\
 & - \iint_{BC_1DC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 + \iint_{BC_1BC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 - \iint_{BC_1AD_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 \\
 & - \iint_{AD_1AB_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 + \iint_{AD_1DC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 - \iint_{AD_1BC_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 \\
 & \left. + \iint_{AD_1AD_2} \frac{1}{r} \cos(\theta) dl_1 dl_2 \right] \quad (\text{II.29})
 \end{aligned}$$

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESH cas monopire

La distance r entre les contours des spires s'exprime :

$$r = \sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}$$

Or $\cos(\theta)$ est unitaire quand les contours primaires et secondaires sont parallèles et est nul quand ils sont perpendiculaires. (II.29) devient :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\iint_{AB_1AB_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 - \iint_{AB_1DC_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 - \iint_{DC_1AB_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 + \iint_{DC_1DC_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 + \iint_{BC_1BC_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 - \iint_{BC_1AD_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 - \iint_{AD_1BC_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 + \iint_{AD_1AD_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 \right] \quad (\text{II. 30})$$

Calculer l'inductance d'un bobinage revient à calculer la mutuelle entre deux bobinages de géométries identiques qui coïncident l'un avec l'autre en utilisant l'équation (II.22). $\cos(\theta)$ est unitaire quand les contours primaires et secondaires sont parallèles et nul quand ils sont perpendiculaires

L'inductance d'une spire du bobinage s'écrit donc :

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\iint_{AB AB} \frac{1}{r} dl dl - \iint_{AB DC} \frac{1}{r} dl dl - \iint_{DC AB} \frac{1}{r} dl dl + \iint_{DC DC} \frac{1}{r} dl dl + \iint_{BC BC} \frac{1}{r} dl dl - \iint_{BC AD} \frac{1}{r} dl dl - \iint_{AD BC} \frac{1}{r} dl dl + \iint_{AD AD} \frac{1}{r} dl dl \right] \quad (\text{II. 31})$$

Les termes de (II.31) sont égaux deux à deux, ce que l'on exprime avec les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} M_{bb} &= \iint_{AB DC} \frac{1}{r} dl dl = \iint_{DC AB} \frac{1}{r} dl dl \\ M_{aa} &= \iint_{BC AD} \frac{1}{r} dl dl = \iint_{AD BC} \frac{1}{r} dl dl \\ L_b &= \iint_{AB AB} \frac{1}{r} dl dl = \iint_{DC DC} \frac{1}{r} dl dl \\ L_a &= \iint_{DC DC} \frac{1}{r} dl dl = \iint_{AD AD} \frac{1}{r} dl dl \end{aligned} \quad (\text{II. 32})$$

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESH cas monopire

L'inductance d'une spire s'exprime finalement :

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} [2.L_a + 2.L_b - 2.M_{aa} - 2.M_{bb}] \quad (\text{II.33})$$

II.8. Avantages et inconvénients de la méthode analytique

Les avantages sont :

- La possibilité de prendre en compte les matériaux magnétiques linéaires.
- Le temps d'évaluation des modèles reste relativement avantageux, lorsque la géométrie est simple.
- La possibilité d'utiliser des algorithmes déterministes lorsque ces modèles sont employés dans des routines d'optimisation.
- La possibilité d'opérer aisément un couplage entre les différents domaines physiques par la nature explicite des équations des modèles analytiques.

Les inconvénients, on cité :

- La difficulté de tenir compte des phénomènes physiques liés à la saturation des matériaux ferromagnétiques.
- Pour des géométries complexes, il devient difficile d'obtenir une formulation analytique correcte ou en d'autres termes d'écrire les équations de manière formelle.

II.9. Approche numériques dans le TESH

L'approche numérique consiste à résoudre des problèmes mathématiques complexes à l'aide de méthodes numériques et d'algorithmes. Ces méthodes sont beaucoup plus adaptées à la résolution de problèmes d'équations aux dérivées partielles du (TESC) en zone de champ proche et à des structures de tailles électriquement réduites. Elle implique la discrétisation des équations physiques ou des modèles en éléments finis, volumes finis ou différences finies, suivie de leur résolution numérique sur des ordinateurs.

II.10. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons exploré différentes approches de modélisation du Transfert Électrique Sans Contact (TESC) ainsi que des formules analytiques de l'électromagnétisme. Nous avons examiné en détail le développement de l'expression de l'inductance mutuelle dans le cadre du TESH, ainsi que les expressions générales de mutuelle

Chapitre II : Méthode de modélisation analytique du TESF cas monospire

avec différents topologies de bobines circulaires pour le cas 2D et 3D pour les bobines rectangulaires.

Cette exploration nous a permis de comprendre les avantages et les inconvénients de la méthode analytique par rapport aux approches numériques. La méthode analytique offre des solutions précises et explicites, ce qui facilite la compréhension des phénomènes électromagnétiques. Cependant, elle peut être limitée dans sa capacité à traiter des configurations complexes.

Bibliographie chapitre II

- [1] Michel Hulin, Jean-Pierre Maury, « Les Bases De L'électromagnétisme ». Pierre, Marie Curie Et L'université De Paris 1991
- [2] Valerie Labbe, « Modelisation Numerique Du Chauffage Par Induction Approche Elements Finis Et Calcul Parallele » These De Doctorat Specialite Mecanique Numerique. L'école Nationale Supérieur Des Mines De Paris.
- [3] Jackson, J. D. (1998). Classical Electrodynamics (3rd Edition). Wiley.
- [4] J-C.Sabonnadiere, J-L.Coulomb "CAO En Electrotechnique", Editeur Hermès, Paris 1985.
- [5] Y.Belkhiri, "Etude Des Phénomènes D'induction Electromagnétique Liés Au Voisins Des Ouvrages THT De Transport De L'électricité", Thèse Présentée En Vue D'obtention Du Diplôme De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université De Batna 2.
- [6] Nannapaneni Narayana Rao, « Element of Engineering Electromagnetic», Edition 6 Université De l'Illinois, Urbana-Champaign, Pearson Education International
- [7] Pascal Meyer, « Modeling Of Inductive Contactless Energy Transfer Systems », Présenté Pour L'obtention Du Grade De Docteur Dès Sciences, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne, 25 Septembre 2012.
- [8] Kai-Hong Song*, Jian Feng, Ran Zhao, And Xian-Liang Wu, « A General Mutual Inductance Formula For Parallel Non-Coaxial Circular Coils», Key Laboratory Of Intelligent Computing And Signal Processing, Ministry Of Education Anhui University, Hefei Anhui 230039, China Khsong@Ahu.Edu.Cn Aces Journal, Vol. 34, No. 9, September 2019
- [9] F. W. Grover, Inductance Calculations. Dover, New York, 1964.
- [10] S. I. Babic, F. Sirois, And C. Akyel, "Validity Check Of Mutual Inductance Formulas for Circular Filaments with Lateral and Angular Misalignments," Progress In Electromagnetics Research M, 8, Pp. 15 26, 2009
- [11] A O Anele Et Al 2015 J. Phys.: Conf. Ser. 633 012011
- [12] Mr. Amos Onyedikachi Anele, «Conception Et Amélioration De La Structure De Couplage Magnétique Pour Des Systèmes De Transfert De Puissance Inductive Localisés », Thèse De Doctorat De L'université Paris-Saclay, 28/06/2016.

Chapitre III :
Méthode de modélisation analytique
du TESC cas multi-spire

III.1. Introduction

La modélisation semi-analytique est une approche hybride qui combine des méthodes analytiques avec des techniques numériques. Elle permet de créer des modèles plus précis que les méthodes purement analytiques qui se basent sur des équations théoriques souvent simplifiées et moins coûteux en temps et ressources que les méthodes purement numériques qui reposent sur des simulations intensives.

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les différents types de bobines utilisées dans le processus de transfert d'énergie sans contact (TESC), en mettant l'accent sur les bobines elliptiques et rectangulaires, mono-spires et multi-spires.

III.2. Les différentes technologies de bobines

III.2.1. Les bobines circulaires et rectangulaires

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.

De nombreuses formes de bobines peuvent être choisies à la fois pour les parties primaire et secondaire: circulaire, carrée ou elliptique comme illustré à la Fig.III.1 Les bobines fabriquées habituellement et utilisées dans cette application sont réalisées en fil de Litz isolé, pour lequel les effets de peau et de proximité sont très faibles dans la gamme de fréquences considérée [1].

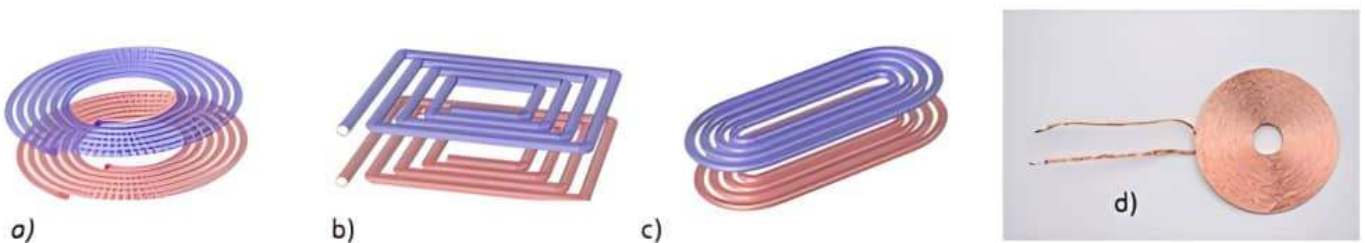


FIGURE III.1 : Types de bobines circulaires : a) circulaire, b) carrée, c) elliptique, d) bobine de Litz.

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

Les bobines peuvent être classées selon deux grandes catégories : les bobines polarisées et les bobines non polarisées dites aussi standards, comme le montre la Figure III.2, et nous les différencions par leurs géométries

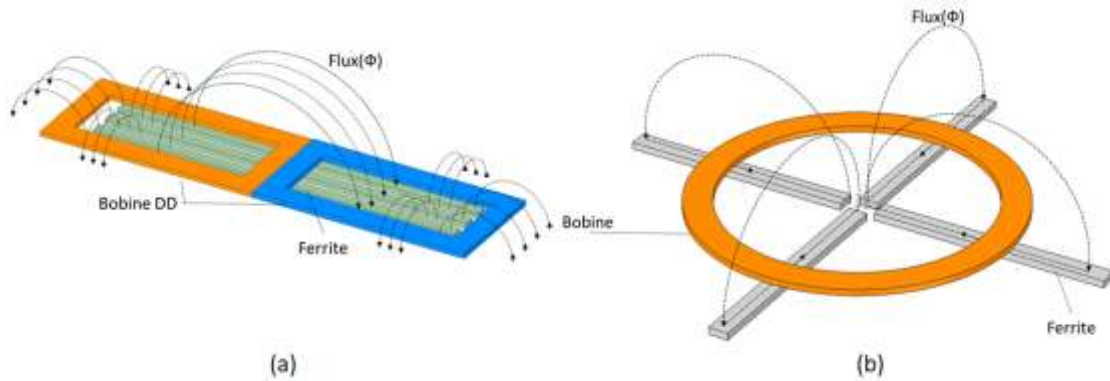


Figure III.2 : Deux catégories de bobines (a) Polarisées (b) Non polarisées [2].

III.2.2. Bobines non polarisées (standards)

Elles sont de géométrie simple, Figure I.10 (b), composées de N tours de fil conducteur, et réparties sur un ou plusieurs étages. L'avantage principal de cette géométrie est la simplicité de sa réalisation et de sa caractérisation. En effet, nous pouvons estimer les grandeurs magnétiques (inductances propres et mutuelles) de ces bobines grâce à des formules analytiques existantes et bien connues. Cependant, la tolérance de ces géométries aux désalignements, latéral et transversal, est relativement faible [3], [4].

III.2.3. Bobines polarisées

Elles présentent des formes composées, Figure III.2. (a). Du fait de cette complexité géométrique, il est difficile voire impossible d'estimer analytiquement les grandeurs magnétiques, des calculs numériques doivent alors être réalisés afin d'extraire ces données nécessaires pour le dimensionnement du système [5], [6]. Cette géométrie présente plusieurs avantages :

- Avoir une meilleure tolérance au désalignement transversal (axes de symétrie des deux bobines).
- Avoir un couplage plus important [7].
- Générer un champ magnétique polarisé.

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

Les bobines polarisées les plus répandues sont la Double D (DD), la Bipolaire (BP) et la Double D Quadratique (DDQP), Figure III.3 (d), (a), (b). Elles présentent une tolérance et une distribution de puissance acceptables au désalignement [7].

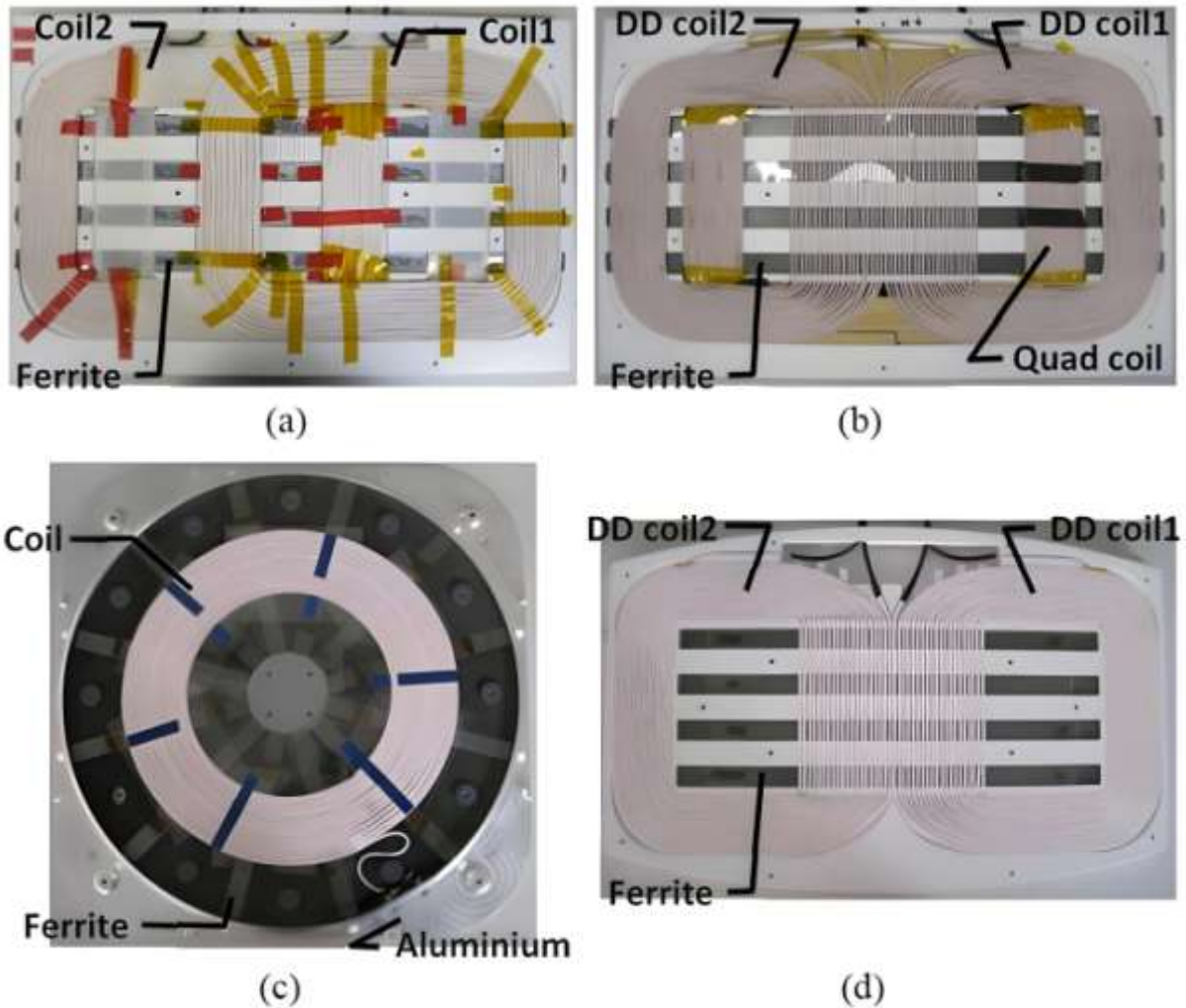


Figure III.3 : Prototypage de BP (a), DDQP (b), Circulaire (c), DD (d) [6].

III.2.4. Bobines elliptiques mono-spires plates

Les bobines elliptiques mono-spires plates (Figure III.1.c) sont conçues avec une seule spire en forme elliptique, disposée de manière plate. L'un des principaux avantages des bobines elliptiques mono-spires plates est leur simplicité de conception, ce qui les rend faciles à fabriquer et à intégrer dans divers systèmes. Cependant, elles peuvent être limitées en termes de capacité de transfert d'énergie par rapport à des bobines plus complexes et multi-spires. De plus, leur efficacité peut diminuer avec l'augmentation de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

III.2.5. Bobines elliptiques multi-spires plates/plusieurs couches



Figure III.4 : Bobine elliptique spires plates/plusieurs couches.

Les bobines elliptiques multi-spires plates (Figure III.4) ou à plusieurs couches ont plusieurs spires superposées comme montre la Figure, augmentant ainsi la surface d'induction et l'efficacité de transfert d'énergie. Elles sont utilisées dans des systèmes nécessitant une plus grande efficacité et une densité de puissance élevée, comme les stations de recharge sans fil pour véhicules électriques.

Les principaux avantages des bobines elliptiques multi-spires plates/multicouches incluent une meilleure efficacité de transfert d'énergie et une plus grande capacité à gérer des puissances plus élevées. Toutefois, elles sont généralement plus complexes à fabriquer et peuvent être plus coûteuses que les bobines mono-spires. De plus, leur structure multicouche peut entraîner une augmentation des pertes par effet de peau et effet de proximité.

III.2.6. Bobines rectangulaires mono-spires

Les bobines rectangulaires mono-spires sont conçues avec une seule spire de forme rectangulaire. Cette structure est souvent choisie pour des applications nécessitant une bobine ayant une plus grande surface de couverture tout en restant plate et facile à fabriquer.

III.2.7. Bobines rectangulaires multi-spires plates/plusieurs couches

Une bobine rectangulaire multi-spires (Figure III.5) est constituée de plusieurs couches de spires enroulées de manière compacte. Cette structure permet d'optimiser l'utilisation de l'espace et d'améliorer l'efficacité énergétique.



Figure III.5 : Une bobine rectangulaire multicouche.

III.3.Pertes dans les bobines

III.3.1.Effet de peau

Les pertes dans les bobines sont principalement dûes à l'effet joules et aux pertes supplémentaires dont sont responsables d'une part l'effet de peau ou dépendant de la fréquence, et d'autre part à l'effet de proximité dû aux influences magnétiques des conducteurs les uns par rapport aux autres.

Ainsi à travers la dépendance entre la fréquence et la résistance, il y 'aura un impact direct sur les pertes joules, sachant que la résistance augmente a mesure que la fréquence augmente. L'effet de peau concentre les courants inductifs sur une fine épaisseur 'peau', accentuant aussi les interactions ou influences magnétiques entre conducteurs conduisant à une segmentation de la résistance et des pertes.

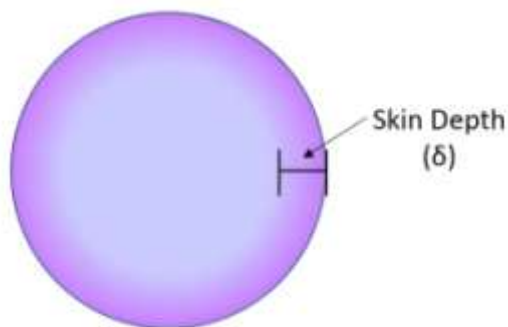


Figure III.6 : Effet de peau.

III.3.2. Effet de proximité

Quand un courant alternatif circule à travers deux fils (Figure III.7) qui sont rapprochés les courants ont tendance à circuler à une distance maximale de l'autre, ceci provoque un effet similaire à l'effet pelliculaire. Cela entraîne une augmentation supplémentaire de la résistance à la perte. Cet effet peut être minimisé en augmentant l'espacement entre les fils. Des expériences ont montré que la perte la plus faible est obtenue lorsque l'espacement des fils est égal au diamètre du fil [7].

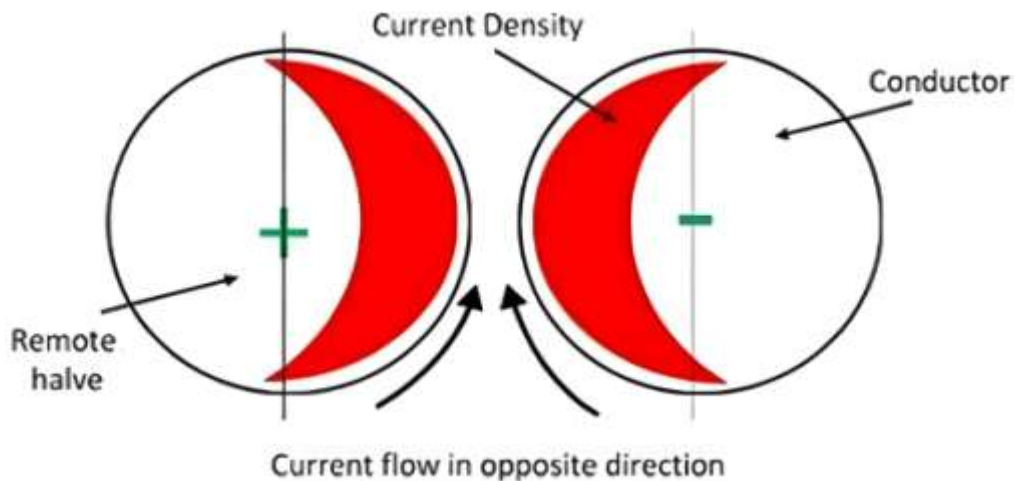


Figure III.7 : Distribution des courants induits dû à l'effet de proximité [8].

Si les conducteurs transportent le courant dans le même sens. Dans ce sens, le champ magnétique des moitiés des conducteurs proches les uns des autres s'annule et par conséquent, il n'y a pas de courant traversant cette moitié du conducteur. Le courant est encombré dans la moitié éloignée du conducteur.

III.3.3. Fil de Litz

Le fil de Litz (Figure III.8) est un fil conducteur qui est adapté au transport de courant à haute fréquence. Ce nom provient d'une erreur de traduction du terme allemand *Litzendraht* qui signifie fil multibrins, qui vient de *Litzen* signifiant « tresses ». Chaque fil est composé de brins isolés électriquement les uns des autres. Idéalement, les brins sont tressés ensemble afin de former le fil final. Dans le fil de Litz vendu dans le commerce, ces fils sont le plus souvent simplement toronnés.



Figure III.8 : Fil de Litz.

Le fil de Litz offre un certain nombre d'avantages importants, en particulier lorsqu'il est utilisé dans des composants magnétiques. Le fil Lite offre ces principaux avantages:

- Réduit les Effets Peaux et minimise les pertes par courants de Foucault.
- Atténue Effet de Proximité.
- Permet une Utilisation Avec des Hautes Fréquences.
- Augmente l'Efficienc.
- Réduit le Poids.
- Réduction de la perte de puissance CA dans Enroulement Haute Fréquence.
- Une efficacité améliorée.
- Évite l'apparition de "hot spots".
- Permet des températures de fonctionnement plus basses.

III.4.Modélisation semi-analytique de bobines

III.4.1. Bobines spirales plates non jointives

Considérons deux bobines plates constituées de spires concentriques de différents diamètres (Figure III.9). La première bobine (transmission) notée l_p est formée de N_p spires chacune de rayon $R_p(i)$ ($i = 1, 2, \dots, N_p$). La deuxième bobine (réception) notée l_s est formée de N_s spires chacune de rayon $R_s(j)$ ($j = 1, 2, \dots, N_s$). Dans la suite nous allons détailler la méthode de calcul qui permet de déterminer la valeur de l'inductance propre L de chaque bobine ainsi que la mutuelle inductance M .

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

Dans le cas d'une bobine plate constituée de N spires concentriques de rayon identiques, son inductance propre L est équivalente à l'inductance propre d'une seule spire multipliée par N^2 . Par contre dans le cas d'une bobine plate constituée de N spires concentriques chacune de rayon R_i ($= 1, 2, \dots, N_p$) et de section (cf. figure II.8), son inductance propre L_p est égale :

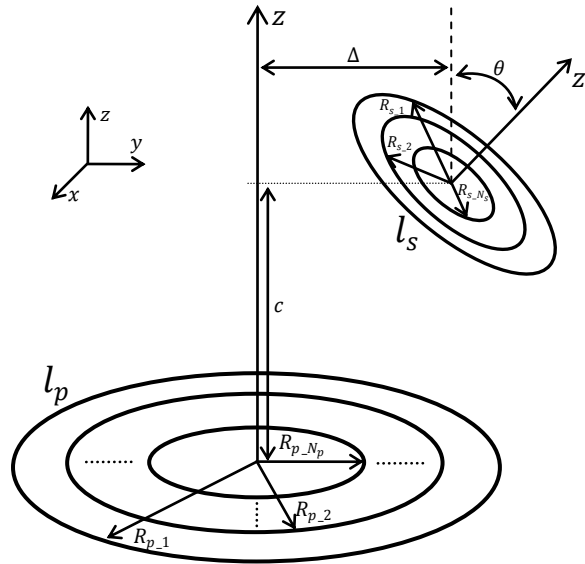


Figure III.9 : Bobine plates de spire concentrique.

$$L_p = \sum_{i=1}^{N_p} L(R_i, a) + \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} M(R_i, R_j, \Delta = 0, d = 0, \theta = 0)(1 - \delta_{i,j}) \quad (\text{III.1})$$

Avec $\delta_{i,j} = 1$ pour $i \neq j$ et $\delta_{i,j} = 0$ pour $i = j$.

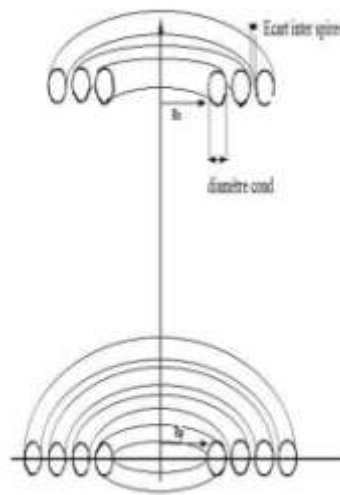


Figure III.10 : Deux bobines spirales circulaires non jointives.

$$M(i, j) = \sum_i^{N_p} \sum_j^{N_s} \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{R_p(i) \cdot R_s(j)} \int_0^\pi \frac{(\cos(\theta) - \frac{d}{R_s(j)} \cdot \cos \varphi) \Psi(k)}{k\sqrt{V^3}} \cdot d\varphi \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$R_p(i) = R_{p \text{ int}} + (i - 1) \cdot \text{diamètre cond} + \text{Ecart inter spires.}$$

$$R_s(j) = R_{s \text{ int}} + (j - 1) \cdot \text{diamètre cond} + \text{Ecart inter spires.}$$

III.4.2. Bobines spirales plates jointives

Considérons deux bobines spirales plates jointives Figure III.11 :

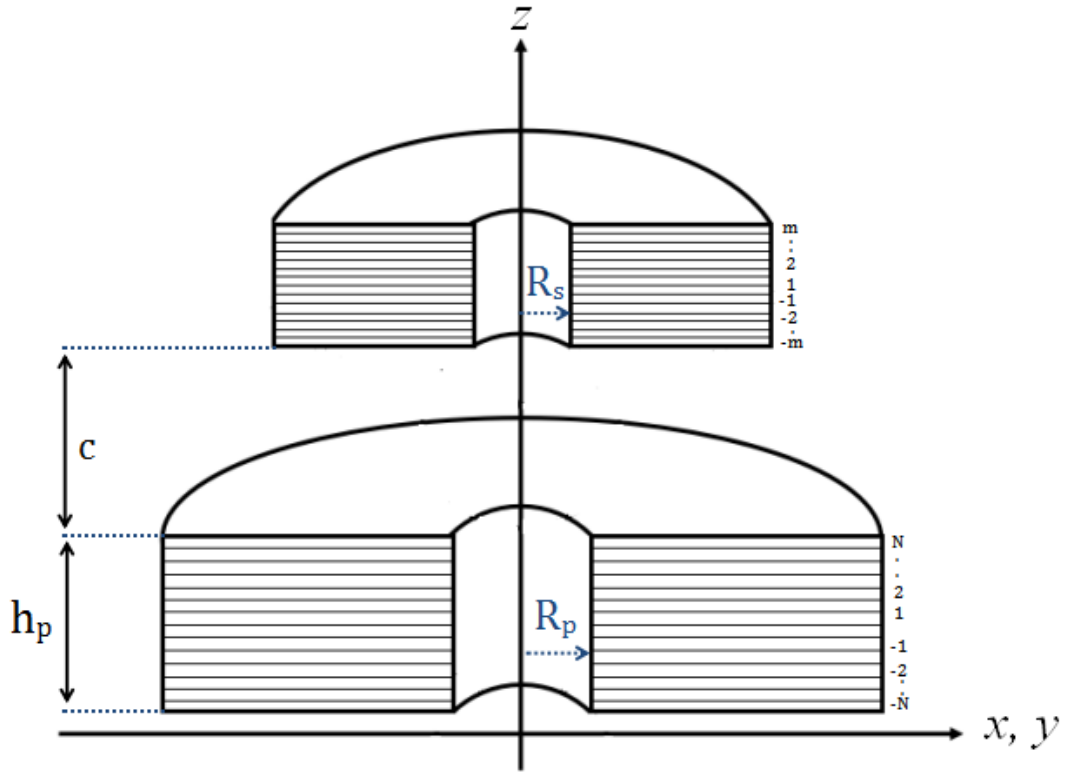


Figure III.11 : Deux bobines spirales plates jointives.

$$M = \frac{N_1 N_2 \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{p=-m}^{p=m} M(h, p)}{(2N + 1)(2m + 1)} \quad (\text{III.3})$$

$$M(h, p) = \frac{\mu_0}{\pi} \sqrt{R_p R_s} \int_0^\pi \frac{\left[\cos \theta - \frac{y(p)}{R_s(p)} \cdot \cos \varphi \right] \Psi(k)}{\sqrt{V^3}} \cdot d\varphi \quad (\text{III.4})$$

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

$$V = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \sin^2 \theta - 2 \frac{y(p)}{R_s} \cos^2 \varphi \sin^2 \theta + \frac{y^2(p)}{R_s^2}}$$

$$k^2 = \frac{4\alpha V}{(1 + \alpha V)^2 + \xi^2}; \quad \xi = \beta - \alpha \cos \varphi \sin \theta$$

$$\Psi(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right) K(k) - \frac{2}{k} E(k); \quad \alpha = \frac{R_s}{R_p(h)}; \quad \beta = \frac{Z(p)}{R_p(h)};$$

$$y(p) = d + \frac{b \sin \theta}{(2m + 1)} p; \quad p = -m, \dots, 0, \dots, m.$$

$$R_p(h) = R_p + \frac{h_p}{(2N + 1)} h; \quad h = -N, \dots, 0, \dots, N.$$

$$R_p = \frac{R_1 + R_2}{2}; \quad h_p = R_2 - R_1$$

$$R_s = \frac{R_3 + R_4}{2}$$

$$Z(p) = c + \frac{b \cos \theta}{(2m + 1)} p; \quad p = -m, \dots, 0, \dots, m.$$

R_s : rayon de la bobine secondaire de section rectangulaire.

R_p : rayon de la bobine primaire de section rectangulaire.

h_p : une hauteur de la section transversale de la bobine primaire.

N : nombre de tours dans la bobine primaire.

m : nombre de tours dans la bobine secondaire.

c : entrefer entre la bobine primaire et la bobine secondaire.

III.4.3. Bobines multi spires-multicouches jointives :

Considérant maintenant deux bobines toriques de sections rectangulaires et couplées entre elles : La première notée I_p de rayon moyen R_p et comportant N_1 spires. La deuxième notée I_s de rayon moyen R_s ($R_p \geq R_s$), composée de N_2 spires et située arbitrairement à proximité de la première.

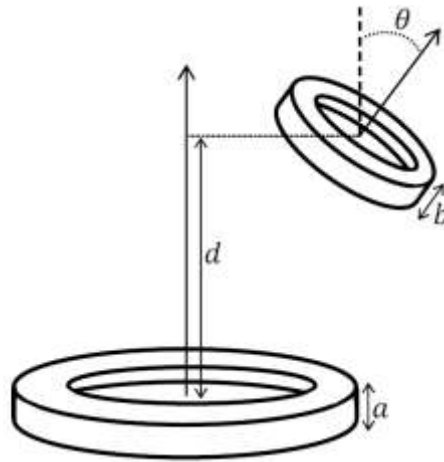


Figure III.12 : Deux bobines toriques de section rectangulaires (désalignement angulaire et axial).

Dans un article, S. BABIC et all [9]. Ont développé une méthode semi-analytique qui permet de calculer la mutuelle inductance entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

La section rectangulaire de chaque bobine peut être divisée en plusieurs éléments chacun de surface élémentaire $(2N+1)$ par $(2k+1)$ éléments pour la première bobine, et $(2m+1)$ par $(2n+1)$ éléments pour la deuxième). En effet, Chaque élément de surface est équivalent à une spire élémentaire.

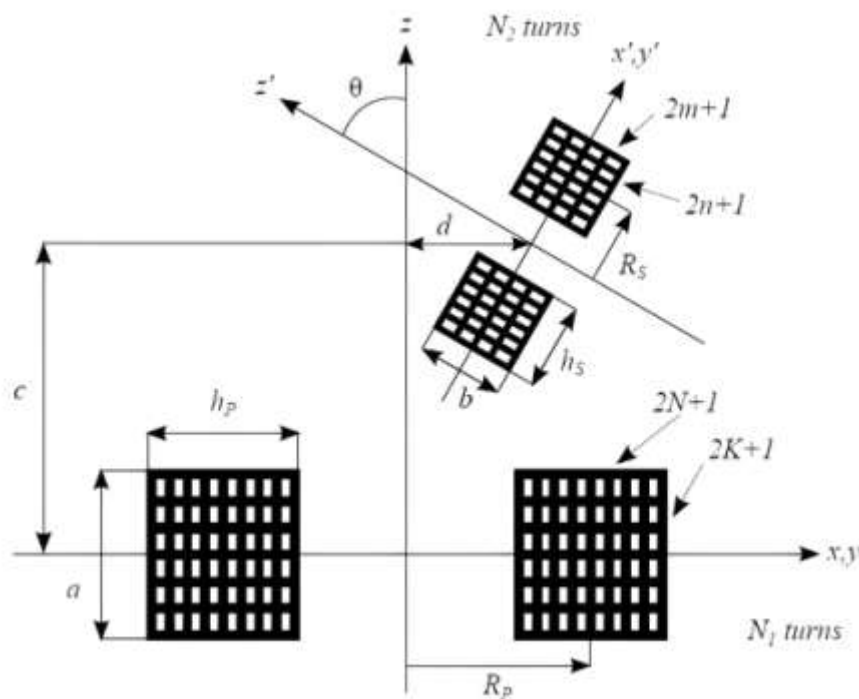


Figure III.13 : Coupe transversale de deux bobines circulaires non coaxiales mais parallèles.

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

Le même principe de calcul a été appliqué pour déterminer la mutuelle inductance, notée, entre les deux bobines toriques de section rectangulaires l_p et l_s . La mutuelle inductance est donnée par l'équation suivante :

$$M = \frac{N_1 N_2 \sum_{g=-K}^{g=K} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{p=-m}^{p=m} \sum_{l=-n}^{l=n} M(g, h, p, l)}{(2K + 1)(2N + 1)(2m + 1)(2n + 1)} \quad (\text{III. 5})$$

Le terme (g, h, l, p) correspond à la mutuelle inductance entre les deux spires g, h et l, p de la même bobine l . En effet, la spire g, h est de rayon h et la spire l, p de rayon l . (g) et (p) sont des fonctions de Bessel de premier et deuxième ordre.

$$M(g, h, p, l) = \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{R_p(h)R_s(l)} \int_0^\pi \frac{\left[\cos \theta - \frac{y(p)}{R_s(p)} \cos \phi \right] \Psi(k)}{\sqrt{V^3}}$$

$$V = \sqrt{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \theta - 2 \frac{y_p}{R_s} \cos \phi \cos \theta + \frac{y^2(p)}{R_s^2}}$$

$$k^2 = \frac{4\alpha V}{(1 + \alpha V)^2 + \xi^2}; \quad \xi = \beta - \alpha \cos \phi \sin \theta$$

$$\Psi(k) = \left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k); \quad \alpha = \frac{R_s}{R_p(h)}; \quad \beta = \frac{Z(g, p)}{R_p(h)};$$

$$y(p) = d + \frac{b \sin \theta}{(2m + 1)} p; \quad p = -m, \dots, 0, \dots, m$$

$$R_p(h) = R_p + \frac{h_p}{(2N + 1)} h; \quad h = -N, \dots, 0, \dots, N.$$

$$R_p = \frac{R_{pint} + R_{pext}}{2}; \quad h_p = R_{pext} - R_{pint}.$$

$$R_s(l) = R_s + \frac{h_s}{(2n + 1)} l; \quad l = -n, \dots, 0, \dots, n.$$

$$z(g, p) = c + \frac{\alpha}{(2k + 1)} g + \frac{b \cos \theta}{(2m + 1)} p$$

$$g = -k, \dots, 0, \dots, k.$$

$$p = -m, \dots, 0, \dots, m.$$

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

N_p : nombre de tours dans la bobine primaire.

N_s : nombre de tours dans la bobine secondaire.

a : une hauteur de la section transversale de la bobine primaire.

b : hauteur de la section transversale de la bobine secondaire.

h_p : largeur de la section transversale de la bobine primaire.

h_s : largeur de la section transversale de la bobine secondaire.

$R_{p_{int}}$: rayon intérieur de la bobine primaire de section rectangulaire.

$R_{p_{ext}}$: rayon extérieur de la bobine primaire de section rectangulaire.

$R_{s_{int}}$: rayon intérieur de la bobine secondaire de section rectangulaire.

$R_{s_{ext}}$: rayon extérieur de la bobine secondaire de section rectangulaire.

III.4.4. Bobines multi spires-multicouches non jointives

Dans cet exemple, la bobine C_1 comporte 5 boucles et 4 couches. La bobine C_2 comporte 6 boucles et 3 couches. De plus, $d_r = d_1$ du fait du choix des points P et Q

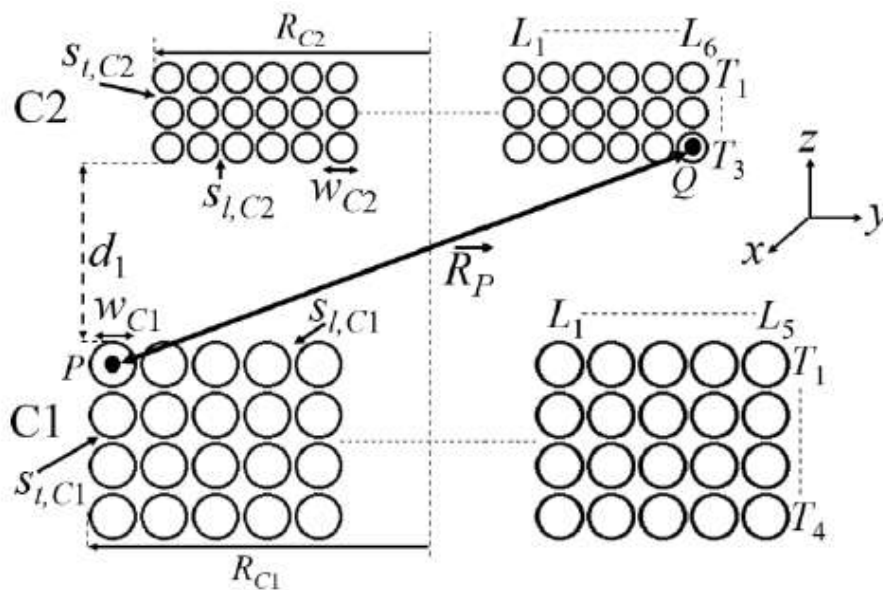


Figure III.14 : Bobines multi spires-multicouches non jointives [10]

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

L'inductance mutuelle M , pour deux bobines porteuses de courant C_1 et C_2 , peut être calculée à l'aide de la formule de Neumann [11], [12].

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{c_1} \oint_{c_2} \frac{\vec{dl}_{c_1} \cdot \vec{dl}_{c_2}}{R_p} \quad (\text{III. 6})$$

La norme, R_p du vecteur joignant un point P sur C_1 à un point Q situé sur C_2 , comme le montre la Figure III.14, est :

$$R_p = \sqrt{R_{c_1}^2 + R_{c_2}^2 + d_r^2 - 2R_{c_1}R_{c_2} \cos(\varphi_{c_1} - \varphi_{c_2})} \quad (\text{III. 7})$$

Où φ_{c_1} et φ_{c_2} sont respectivement les coordonnées angulaires de P sur C_1 et Q sur C_2 . R_{c_1} et R_{c_2} sont respectivement les rayons des bobines C_1 de diamètre de fil w_{c_1} et C_2 de diamètre de fil w_{c_2} .

Sur le N_{t,c_1} La distance relative centre à centre, d_r entre les bobines où se trouvent ces points, peut être approximé comme

$$d_r = d_{r(N_{t,c_1}, N_{t,c_2})} = d_1 + [(N_{t,c_1} - 1) \times (w_{c_1} + s_{t,c_1})] + [(N_{t,c_2} - 1) \times (w_{c_2} + s_{t,c_2})]$$

Où d_1 est la distance centre à centre pour les couches supérieure et inférieure de C_1 et C_2 , respectivement. Le point P se trouve sur la N_{t,c_1} ^{ème} couche de C_1 en prenant la couche de référence comme couche supérieure sur la Figure III.14. De la même manière, le point Q se trouve dans la N_{t,c_2} ^{ème} couche de C_2 en prenant cette fois la couche inférieure comme couche de référence. En utilisant (III.6) et le produit scalaire des deux vecteurs de déplacement infinitésimaux, dl_1 et dl_2 , (III.7) peut être réécrit comme suit :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{R_{c_1}R_{c_2}}{\sqrt{R_{c_1}^2 + R_{c_2}^2 + d_r^2}} \iint_0^{2\pi} \frac{\cos(\varphi_{c_1} - \varphi_{c_2})}{\sqrt{1 - \gamma \cos(\varphi_{c_1} - \varphi_{c_2})}} d\varphi_{c_1} d\varphi_{c_2} \quad (\text{III. 8})$$

Où γ est

$$\gamma = \frac{R_{c_1}R_{c_2}}{\sqrt{R_{c_1}^2 + R_{c_2}^2 + d_r^2}} \quad (\text{III. 9})$$

Pour une bobine C_1 contenant des couches T_{C_1} et des boucles L_{C_1} et une bobine C_2 contenant des couches T_{C_2} et des boucles L_{C_2} , l'inductance mutuelle totale est alors

Chapitre III Méthode de modélisation analytique du TESC cas multi-spire

$$M_{total} = \sum_{i=1}^{T_{c1}} \sum_{j=1}^{T_{c2}} \sum_{k=1}^{L_{c1}} \sum_{l=1}^{L_{c2}} M(R_{c1:k}, R_{c2:l}, d_{r(i,j)}) \quad (\text{III. 10})$$

Où $R_{c1:k}$ et $R_{c2:l}$ sont le rayon de $k^{\text{ème}}$ boucle de C_1 et $l^{\text{ème}}$ boucle de C_2 , respectivement, et $d_{r(i,j)}$ est calculé selon

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différentes approches de modélisation électromagnétique du TESC et plus particulièrement nous avons détaillé les approches semi-analytiques basées sur les formules intégrales pour calculer les inductances propres et mutuelles dans le cas de divers topologies de bobine (mono-spire/multi-spire plate jointive et non jointive).

Le prochaine chapitre à travers divers application permettra de valider les codes des calculs implémentes.

Bibliographie chapitre III

- [1] M. Budhia, G.A. Covic and J.T. Boys, “Design And Optimization Of Circular Magnetic Structures For Lumped Inductive Power Transfer Systems,” *Ieee Trans. Power Electronics*, Vol. 26, No. 11, Pp 1115-1123, Nov. 2011.
- [2] Salim Guerroudj. *Caracterisation Et Modelisation Des Systemes De Charge Sans Contact Du Vehicule Eclectique En Mouvement Pour L’evaluation Des Champs Magnetiques Generes.. Electromagnetisme*. Normandie Universite, 2020.
- [3] G. Buja, M. Bertoluzzo Et H. K. Dashora, « Lumped Track Layout Design For Dynamic Wireless Charging Of Electric Vehicles », In: *IEEE Transactions On Industrial Electronics* 63.10 (Oct. 2016), P. 6631–6640, Issn: 0278-0046, Doi: 10.1109/Tie.2016.2538738.
- [4] A. Zaheer Et Al., « Investigation Of Multiple Decoupled Coil Primary Pad Topologies In Lumped Ipt Systems For Interoperable Electric Vehicle Charging », In: *IEEE Transactions On Power Electronics* 30.4 (Avr. 2015), P. 1937–1955, Issn : 0885-8993, Doi : 10.1109/Tpel.2014.2329693.
- [5] M. Budhia Et Al., « Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle Ipt Charging Systems », In: *IEEE Transactions On Industrial Electronics* 60.1 (Jan. 2013), P. 318–328, Issn: 0278-0046, Doi : 10.1109/Tie.2011.2179274.
- [6] A. Zaheer, D. Kacprzak Et G. A. Covic, « A Bipolar Receiver Pad In A Lumped Ipt System For Electric Vehicle Charging Applications », In : 2012 *IEEE Energy Conversion Congress And Exposition (Ecce)*, Sept. 2012, P. 283–290, Doi : 10.1109/Ecce.2012.6342811.
- [7] G. A. Covic Et Al., « A Bipolar Primary Pad Topology for Ev Stationary Charging and Highway Power by Inductive Coupling », In: 2011 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept. 2011, P. 1832–1838, Doi : 10.1109/Ecce.2011.6064008.
- [8] M. Leclair. *Caractérisation D’un Lien Inductif Destiné {Transmettre Le Courant Et Les Données A Des Neurostimulateurs Implantables}*”. Mémoire De Thèse Sherbrooke (Québec) Canada Mai 1992.
- [9] Slobodan Babic, Frederic Sirois, Cevdet Akyel, Claudio Girardi, « Mutual Inductance Calculation between Circular Filaments Arbitrarily Positioned in Space: Alternative to Grover’s Formula», *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, N°. 9, Pp. 3591-3600, 2010
- [10] Sadeque Reza Khan, Sumanth Kumar Pavuluri and Marc P.Y. Desmulliez, Senior Member «Accurate Modeling of Coil Inductance for Near Field Wireless Power Transfer », *IEEE*

Bibliographie chapitre III

[11] F. W. Grover, Inductance Calculations: Working Formulas and Tables. Dover Publications, 1946.

[12] D. J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics, 3rd Ed. Prentice-Hall, 1999.

Chapitre IV :
**Application et validation à la
recharge VE (statique/dynamique)**

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

IV.1. Introduction

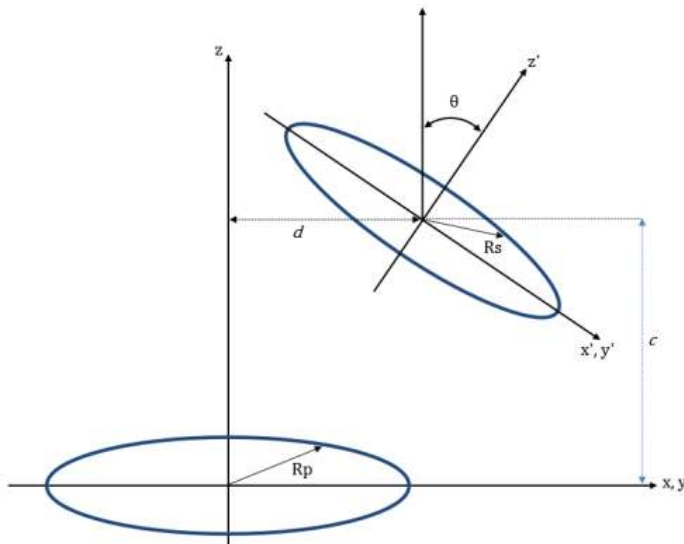
Le transfert d'énergie sans contact (TESC) offre la possibilité de recharger les batteries des véhicules électriques sans câbles. Il existe deux types de TESC : la recharge stationnaire (Static Wireless Charging) et la recharge dynamique (Dynamic Wireless Charging). La recharge dynamique est plus avantageuse car elle peut potentiellement éliminer les lourdes batteries. Cependant, l'efficacité et la portée du transfert de puissance, le désalignement des bobines et le coût de mise en œuvre sont des défis importants.

Ce chapitre étudie le système de TESC en utilisant des modèles semi-analytiques issus des formules intégrales de calcul d'inductance implémentés sous MATLAB. L'inductance mutuelle entre les bobines émettrice et réceptrice est la grandeur de base étudiée pour la recharge dynamique. La validation des codes de calcul est effectuée en comparant les résultats à des données de la littérature. L'analyse des résultats permettra de déterminer les conditions d'une efficacité optimale du système de TESC.

IV.2. Dispositif (1) : Calcul de TESC pour bobines filaires monophasées

IV.2.1. Présentation du dispositif (1)

La géométrie est présentée par la figure IV.1 et les données géométriques associées par le tableau IV.1. [44]. Les résultats suivants ont été obtenus avec une simulation sur logiciel d'application MATLAB en utilisant la formule de calcul d'inductance mutuelle (II.24).



θ degré	D (m)	C (m)
0.00	0.00	0.00
30	0.05	0.01
50	0.10	0.05
75	0.20	0.10
		0.15
		0.25
		0.30
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m	
Rs (m)	0.02	
Rp (m)	0.05	

Tableau IV.1. [44]

Figure IV.1 : Schéma Dispositif 1 : Bobine monophasée statique.

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

IV.2.2.Simulation et discussion des résultats

Les résultats présentée par les Figures (IV. 2 - 5) pour les différents cas de valeurs de désalignements (latérale et angulaire) alors que les valeurs de la distance de séparation entre les bobines (entrefer) étaient fixées pour chaque simulation.

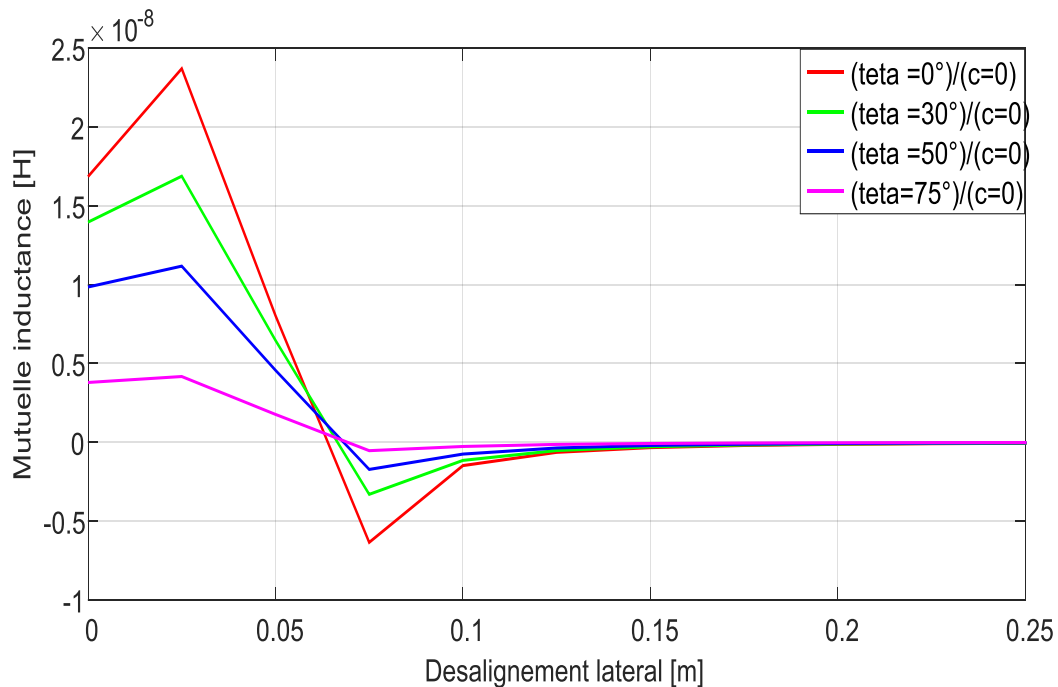


Figure IV.2 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour C=0 m.

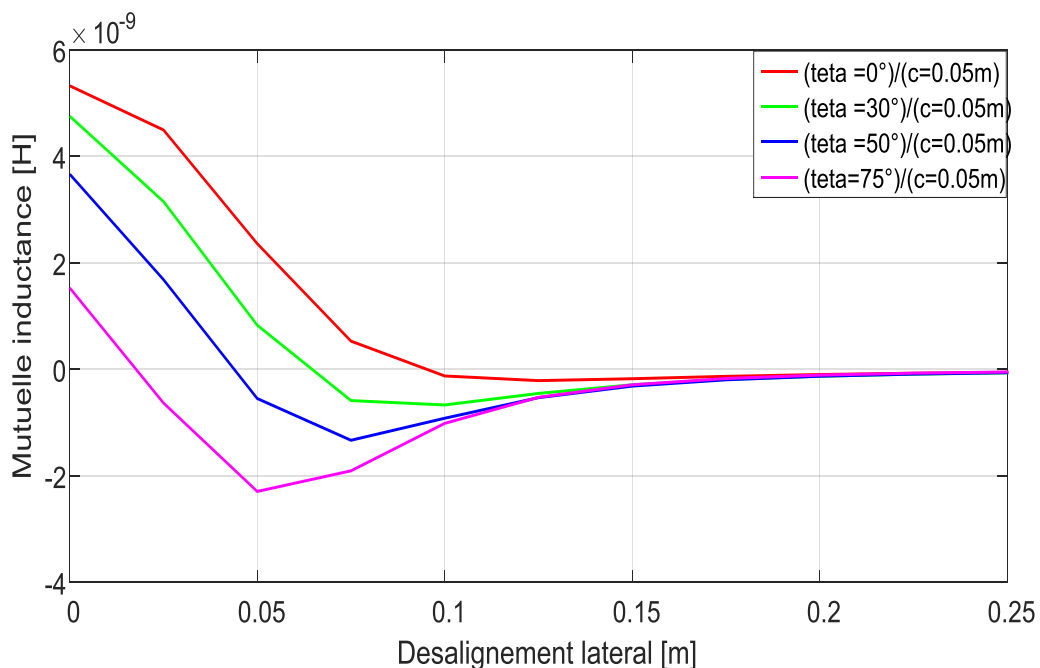


Figure IV.3 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour C = 0.05 m.

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

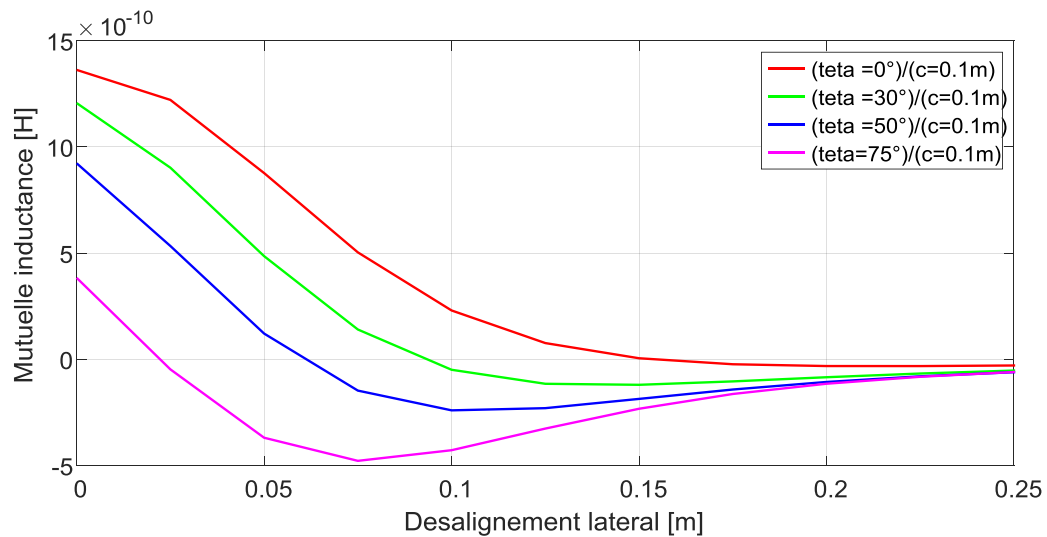


Figure IV.4 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour C = 0.1 m.

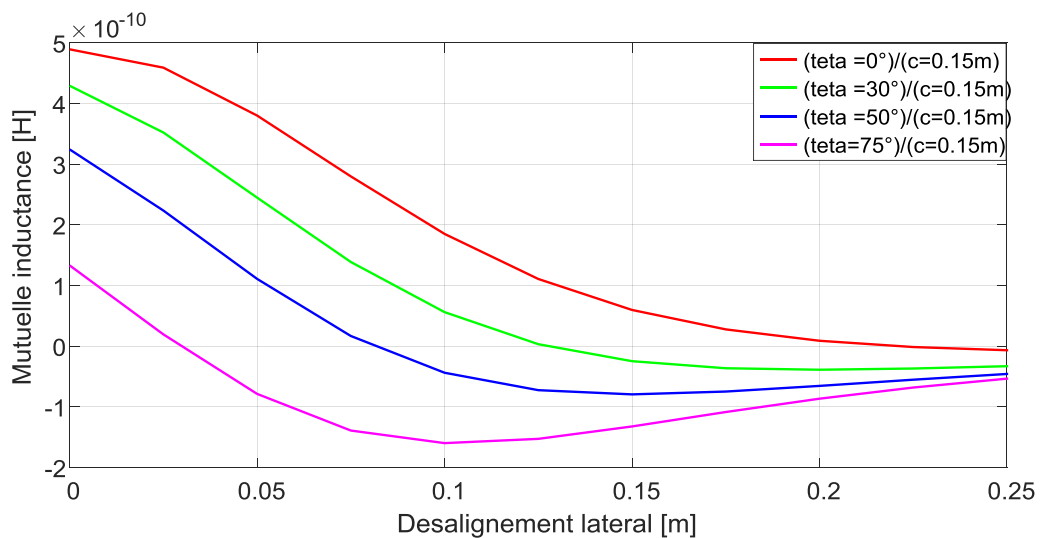


Figure IV.5 : Inductance mutuelle avec désalignement angulaire et latérale pour C = 0.15 m.

Les résultats obtenus dans les Figures (IV.2 - 5) illustrent l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction de désalignement (angulaire, latérale) et de l'entrefer

Cette dernière a tendance à augmenter pour des valeurs de désalignement (angulaire, latérale) et entrefer proche de zéro ou on peut voir qu'elle est maximale grâce à la valeur de l'entrefer qui nulle dans la Figure : IV.2.

Par contre l'inductance mutuelle a tendance à diminuer à chaque fois que les valeurs de désalignement (angulaire et latérale) et entrefer augmentent.

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

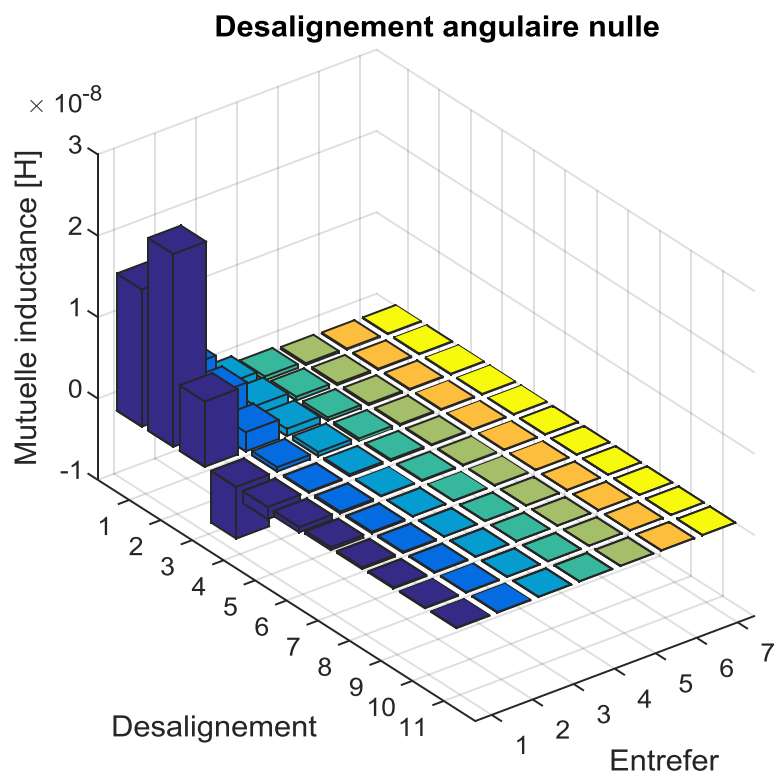


Figure IV.6: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta=0^\circ$

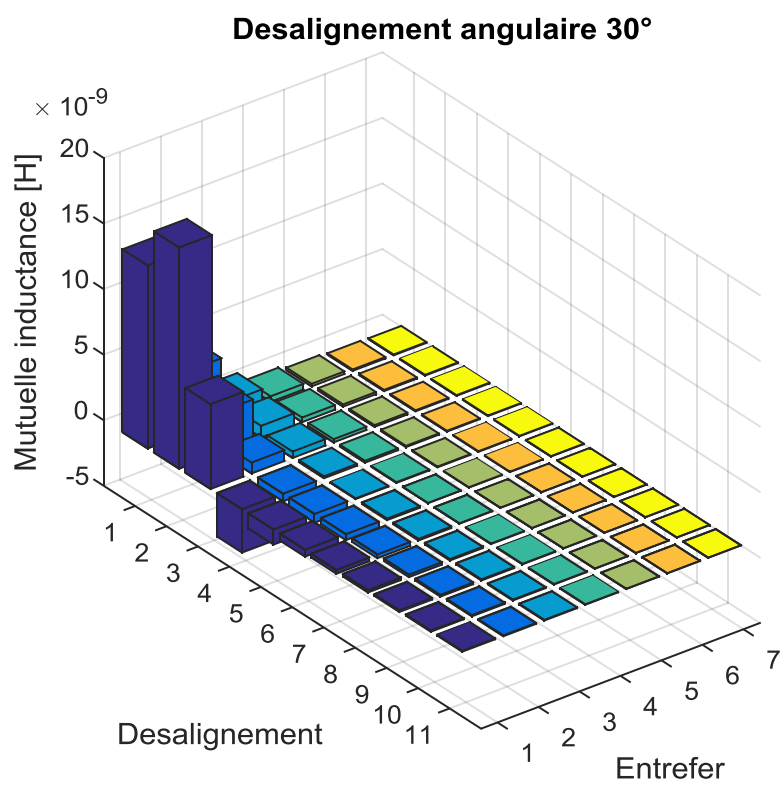


Figure IV.7: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta= 30^\circ$

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

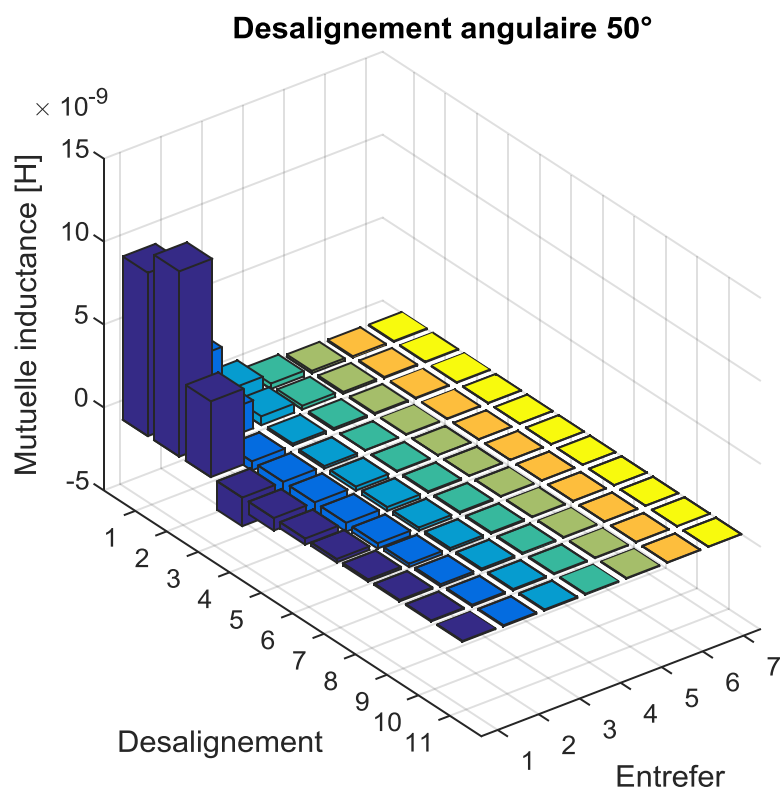


Figure IV.8: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 50^\circ$

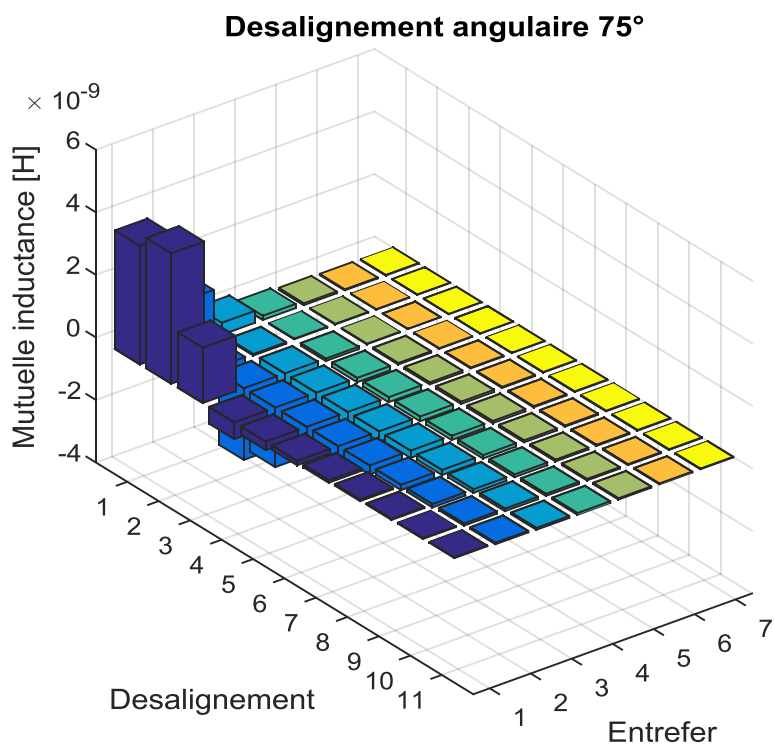


Figure IV.9 : Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 75^\circ$

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

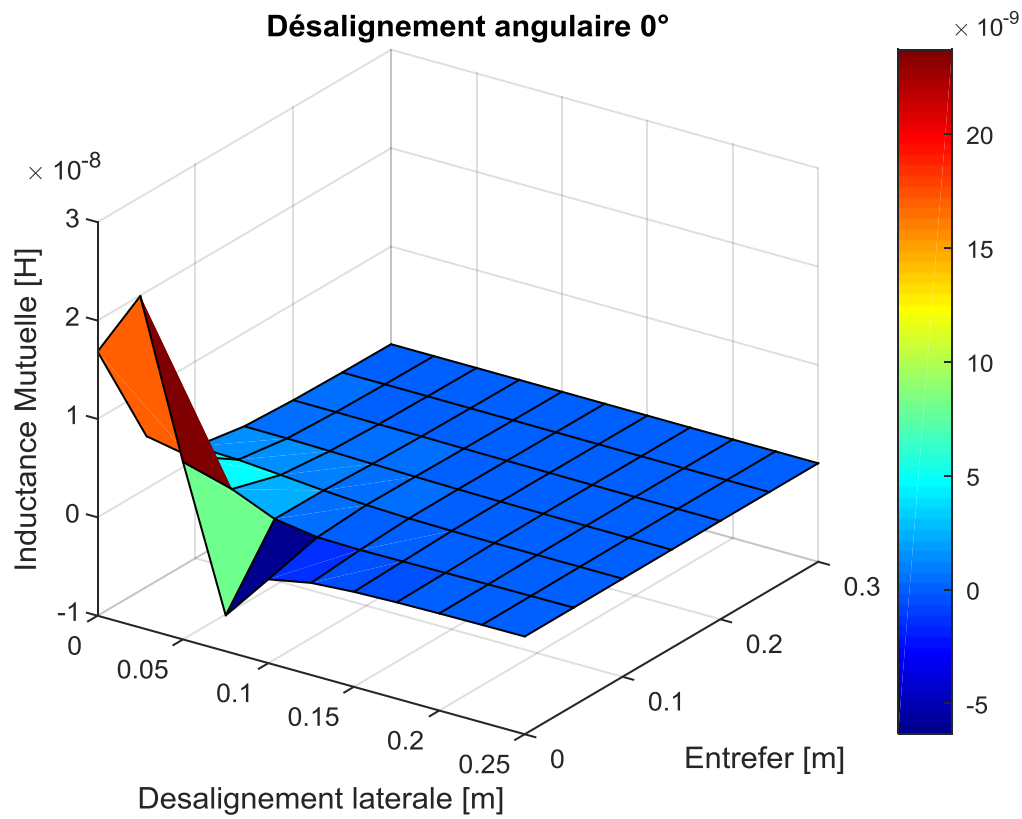


Figure IV.10: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta=0^\circ$

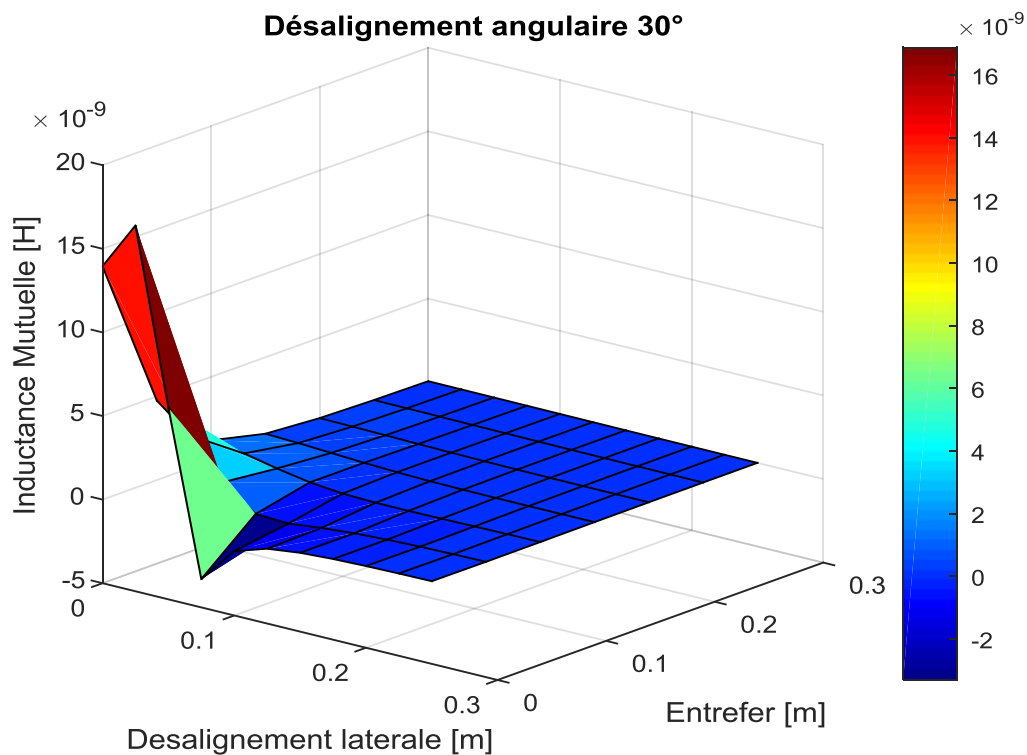


Figure IV. 11: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta=30^\circ$

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

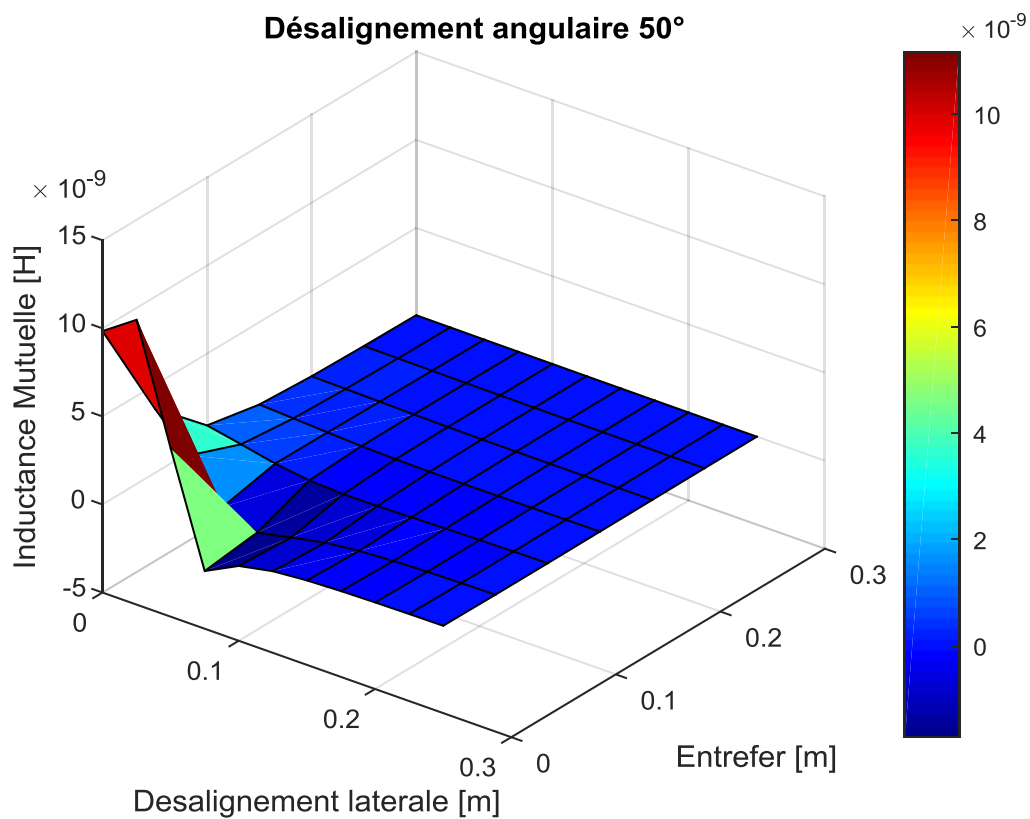


Figure IV.12: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 50^\circ$

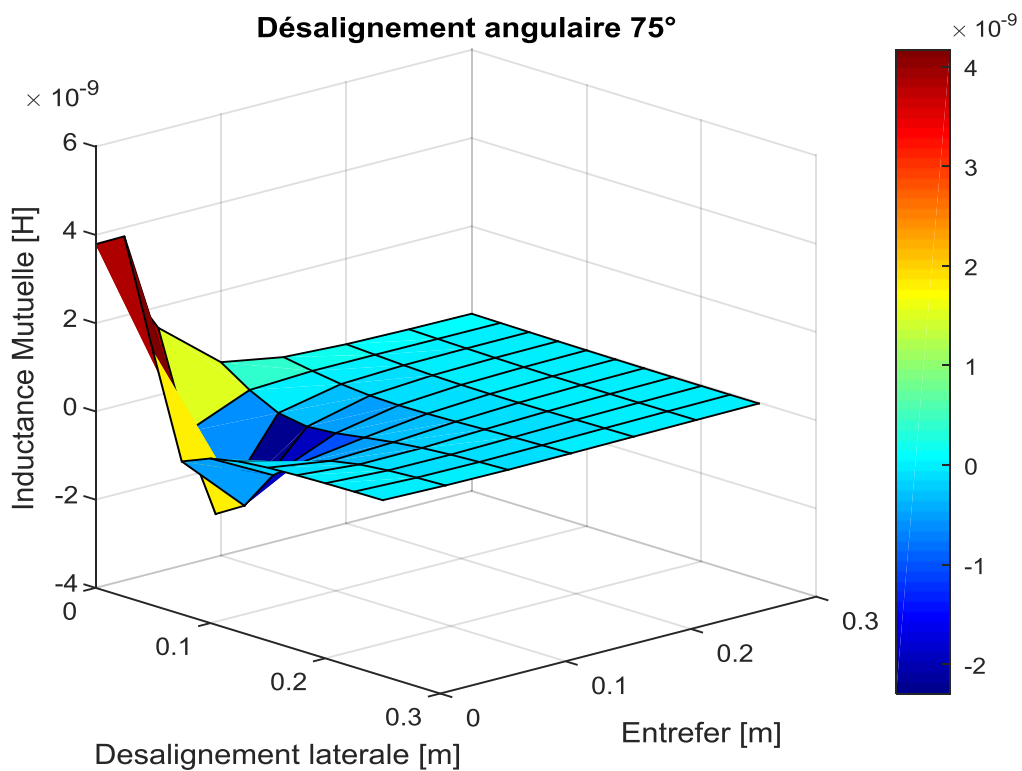


Figure IV. 13: Inductance mutuelle avec désalignement latérale et entrefer pour $\theta = 75^\circ$

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

Les Figures (6 – 9) et (10 – 13) illustrent parfaitement le comportement de la mutuelle inductance et les variations de son amplitude pour chaque changement de paramètre de désalignement (angulaire, latérale) et entrefer effectuée. Les allures sont pratiquement les mêmes pour chaque figure, il y'a uniquement la valeur de l'amplitude qui change pour chaque cas différent.

A chaque fois que le désalignement angulaire augmente, la bobine réceptrice sera dans une position inclinée ce qui va faire diminuer le flux balayé par la bobine c'est pour cela que la mutuelle inductance diminue quantitativement. Et bien sur, à fur et à mesure que le (Θ) prend des valeurs qui se rapprochent de zéro, la mutuelle augmente et prend une amplitude de plus en plus importantes.

La mutuelle inductance augmente quantitativement quand la bobine émettrice et réceptrice se rapprochent, autrement dit la valeur de l'entrefer se rapproche de zéro, et évidemment l'amplitude de la mutuelle diminue à fur et à mesure que la distance entre la bobine émettrice et réceptrice augmente.

L'amplitude de mutuelle inductance diminue quantitativement pour des valeurs importantes de désalignement latéral, à chaque fois que le décalage latéral entre la bobine émettrice et réceptrice est faible, la mutuelle inductance devient plus importante.

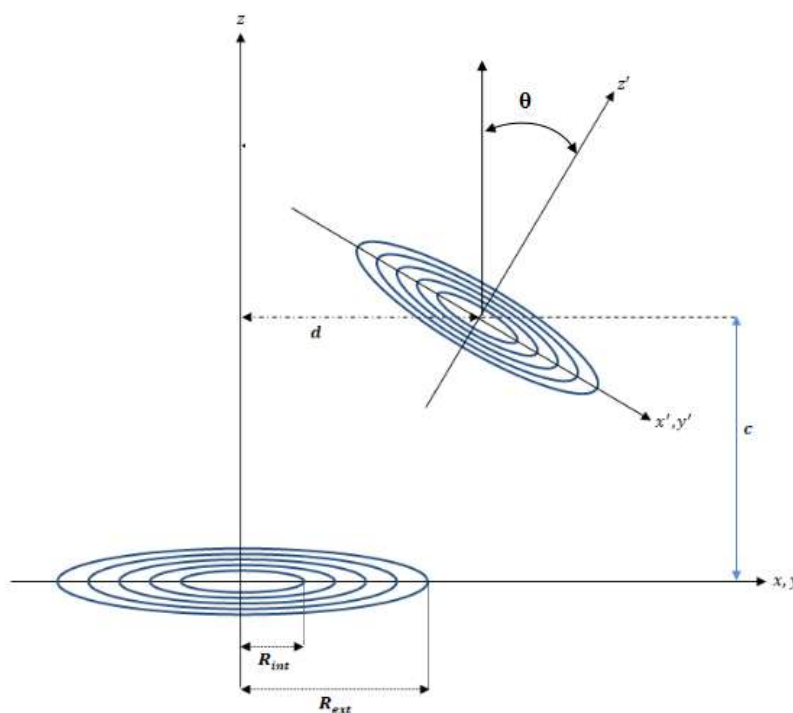
Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

IV.3. Dispositif (2) : Calcule de TESC pour Bobine multispire plate

IV.3.1. Présentation du dispositif (2)

Ce dispositif est composée de deux bobines (émettrices et réceptrices) de structure multispire plate identiques. La géométrie est présentée par la Figure IV.14. et les données géométrique associées par le tableau IV.2.

Les résultats suivants ont été obtenus avec une simulation sur logiciel d'application MATLAB en utilisant le formule de calcule d'inductance mutuelle (II.24) et les données de l'expérience [45].



Paramètres	Valeurs
Nombre de spires P	18
Nombre de spires S	18
R extérieur	$400 \times 10^{-3} \text{m}$
R intérieur	$140 \times 10^{-3} \text{m}$
Ecart inter spires.	$3 \times 10^{-3} \text{m}$
Ecart inter bobines.	$0.5 * R_{ext}$
Diamètre conducteur	$4 \times 10^{-3} \text{m}$

Figure IV.14 : Schéma Dispositif 2 : Bobine multispires plate.

Tableau IV.2 [45]

IV.3.2. Simulation et discussion des résultats

Le résultat présenté par la Figure IV. 15. nous montre que pour une valeur de θ (téta et entrefer) étant nul, l'inductance mutuelle augmente quantitativement a chaque fois que la valeur du désalignement latérale se rapproche de 0, mais elle a tendance a diminuer a chaque fois que la distance latérale augmente .L'inductance mutuelle aura le même comportement dans la Figure IV.16pour des bobines filaire multispires plate.

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

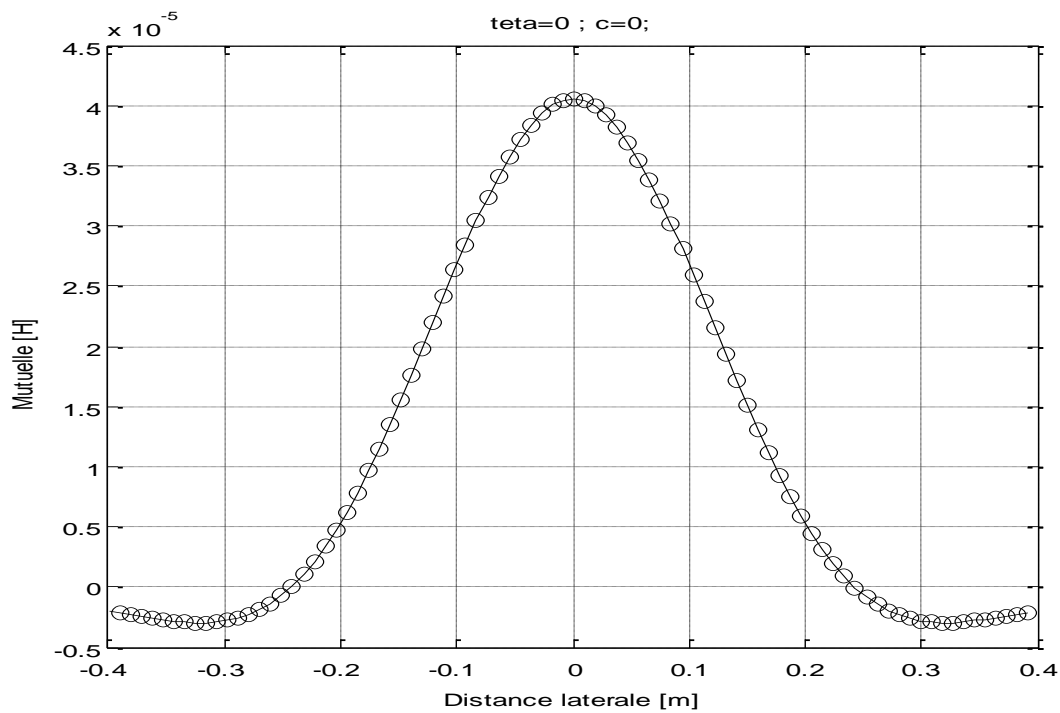


Figure IV.15 : Inductance mutuelle d'une bobine multispire plate avec désalignement latérale pour entrefer=0 m et téta=0°

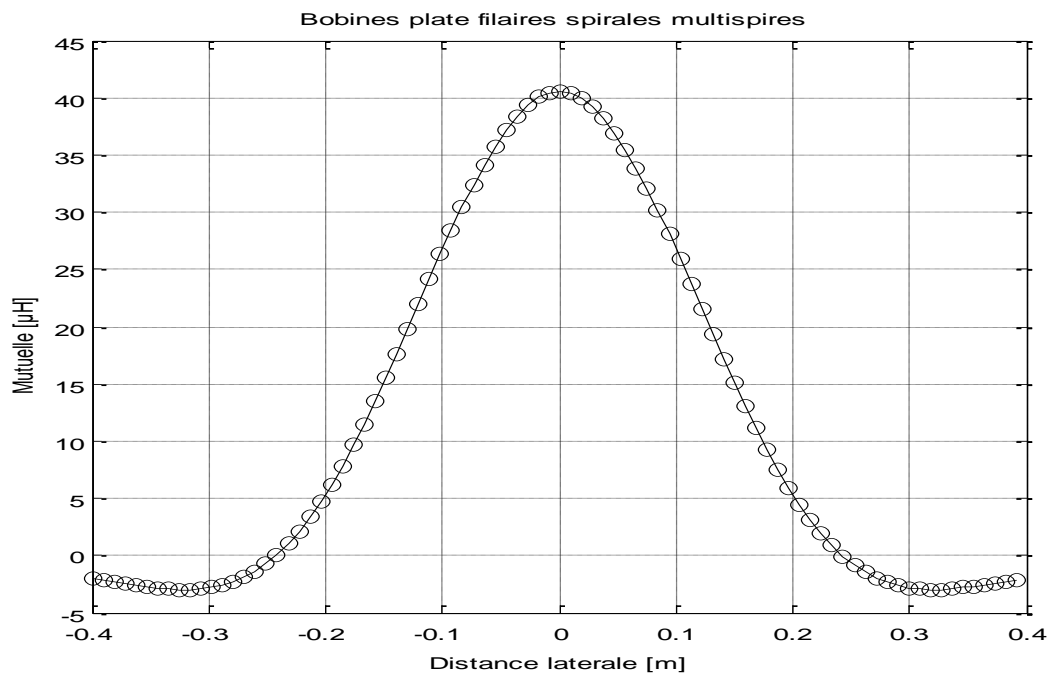


Figure IV.16 : Inductance mutuelle d'une bobine plate filaire multispire avec désalignement latérale

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

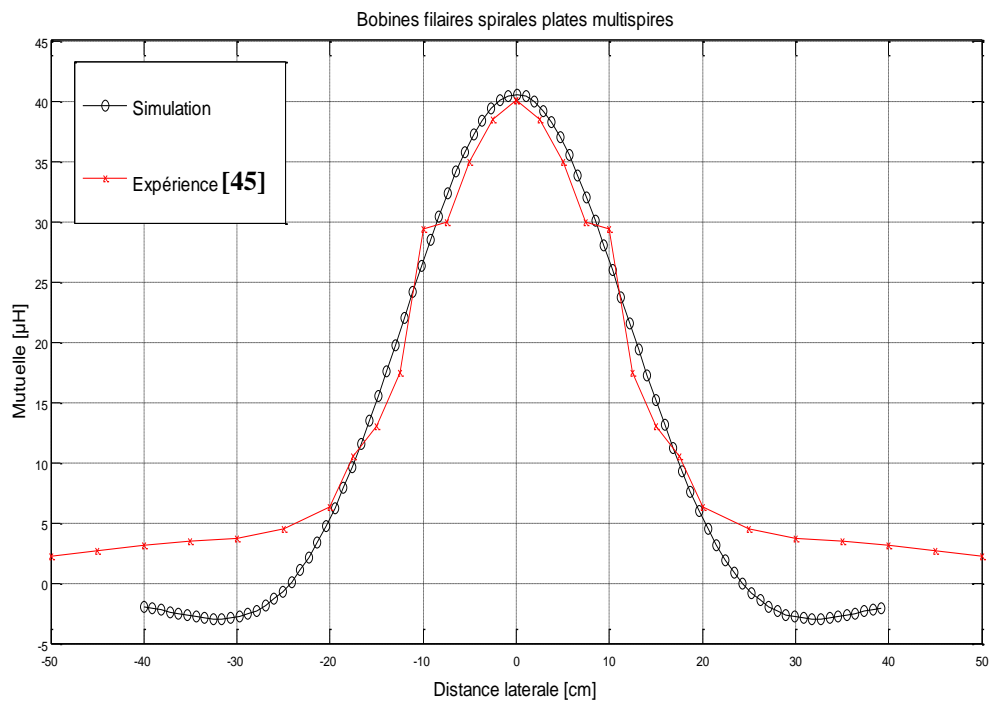


Figure IV.17 : inductance mutuelle d'une bobine filaire spirale plates multispires avec Désalignement latérale

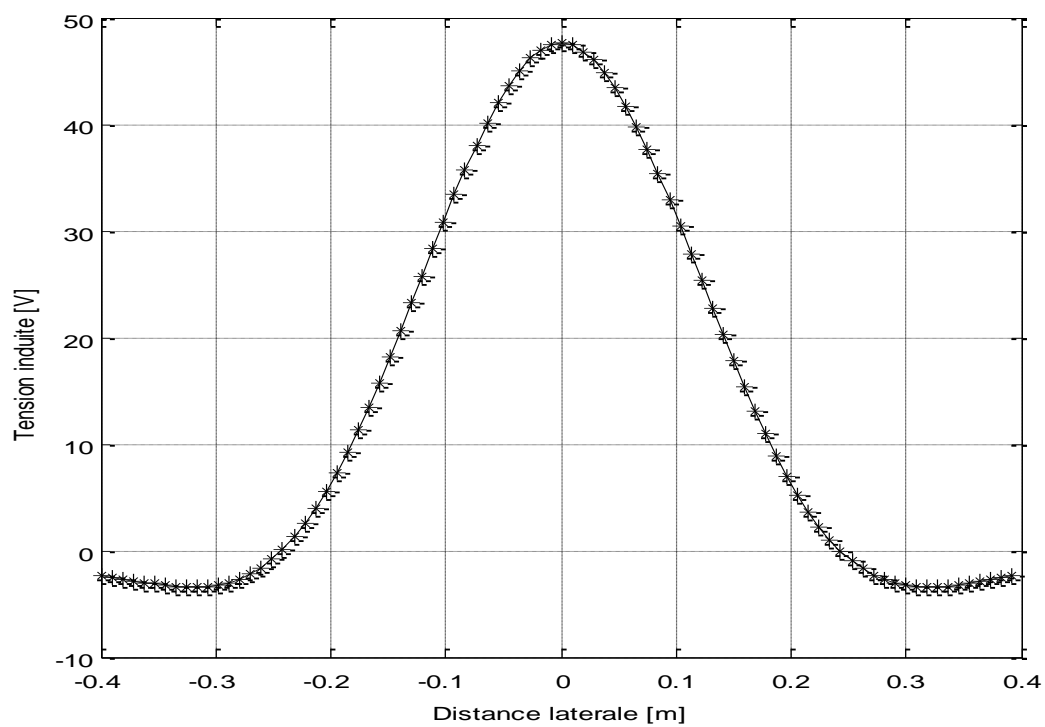


Figure IV. 18 : Tension induite d'une bobine filaire spirale plate multispires avec Désalignement latérale

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

Les résultats de la simulation donnée par la Figure IV.17 montre une très bonne concordance entre les résultats de simulation et ceux expérimentaux fournis par [44], validant ainsi les codes de calculs mis en œuvre.

La Tension de la bobine donné par la Figure IV.18 a tendance a augmenter quantitativement a chaque foi que la valeur du désalignement latérale se rapproche de zéro, mais elle a tendance a diminuer pour des valeurs de désalignement latérale plus importantes.

IV.4. Dispositif (3) : la recharge dynamique de batterie de (VE)

IV.4.1. Présentation du dispositif (3)

Le dispositif de recharge dynamique de batterie de voiture électrique est présenté par la Figure. IV.19. dont laquelle on notera une bobine réceptrice et deux bobines émettrices identiques. Le paramètre important est la distance inter bobines émettrices.

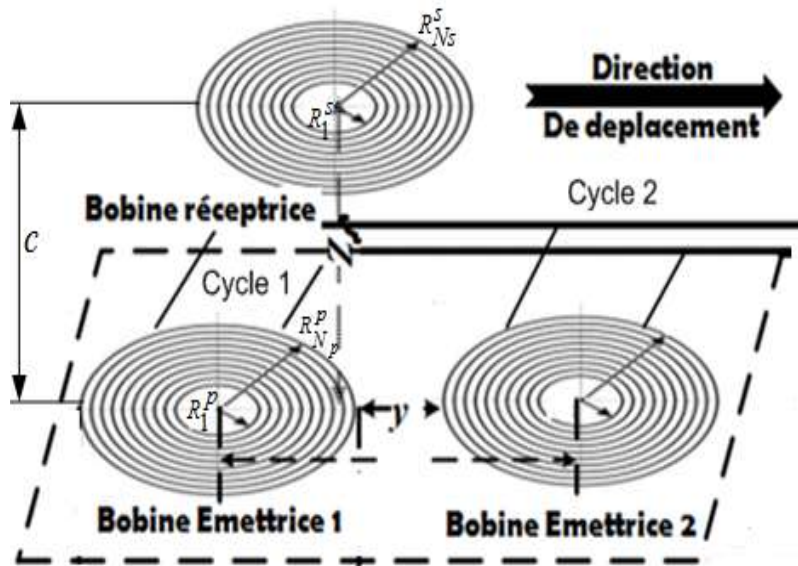


Figure IV.19 : Dispositif de recharge dynamique 02 bobines émettrice et 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices y [45].

Les mutuelles inductances et les tensions induites dans la bobine réceptrice sont données par les Figure. IV. (20). (21), (x), Figure. IV. (22).(23), Figure. IV. (24). (25), respectivement pour différents écart inter bobines émettrice $y=63\text{mm}$, $2y$ et $y/2$.

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

IV.4.2.Simulation du TESC pour la recharge dynamique de batterie de (VE) et discussion des résultats

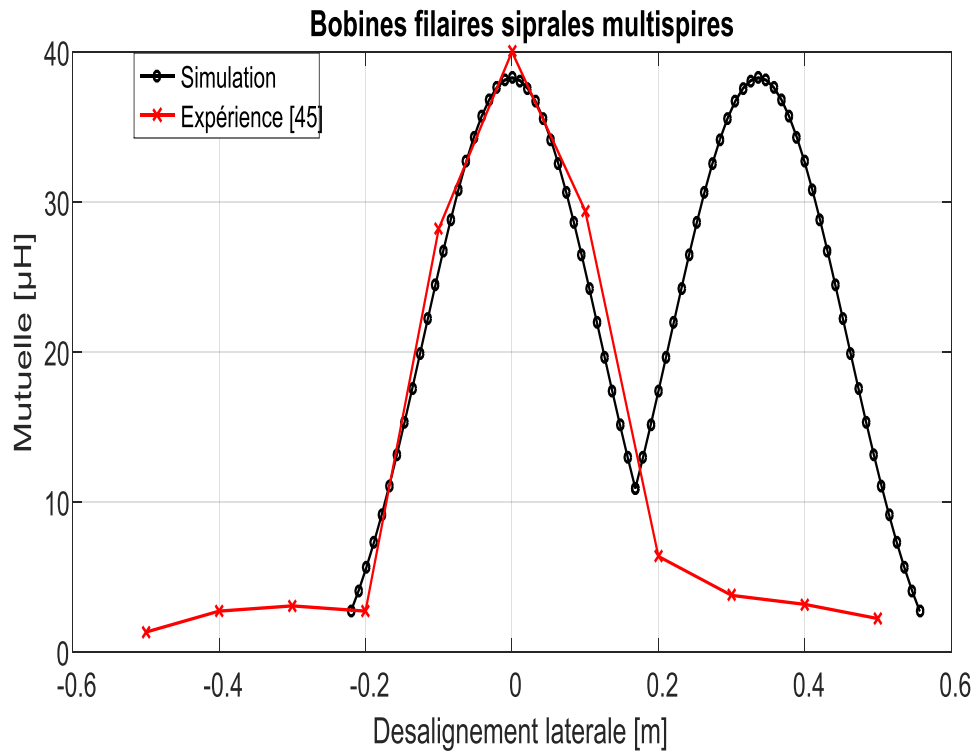


Figure IV.20 : Mutuelle inductance entre le dispositif de TESC : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices 63mm

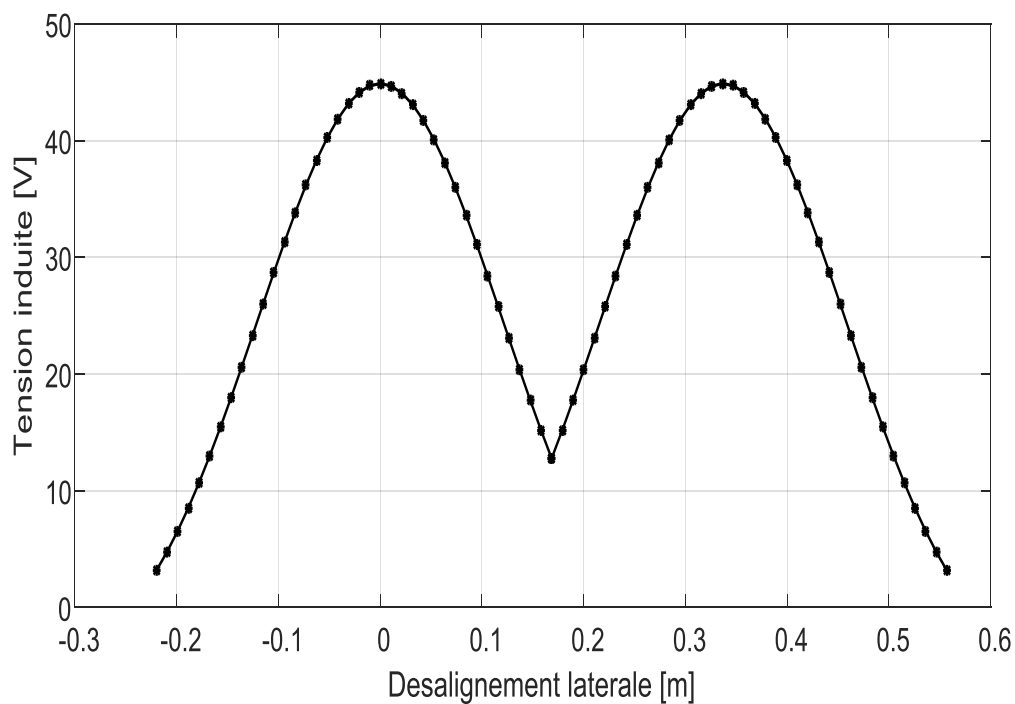


Figure IV.21 : Force électromotrice induite pour la recharge dynamique : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices 63mm

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

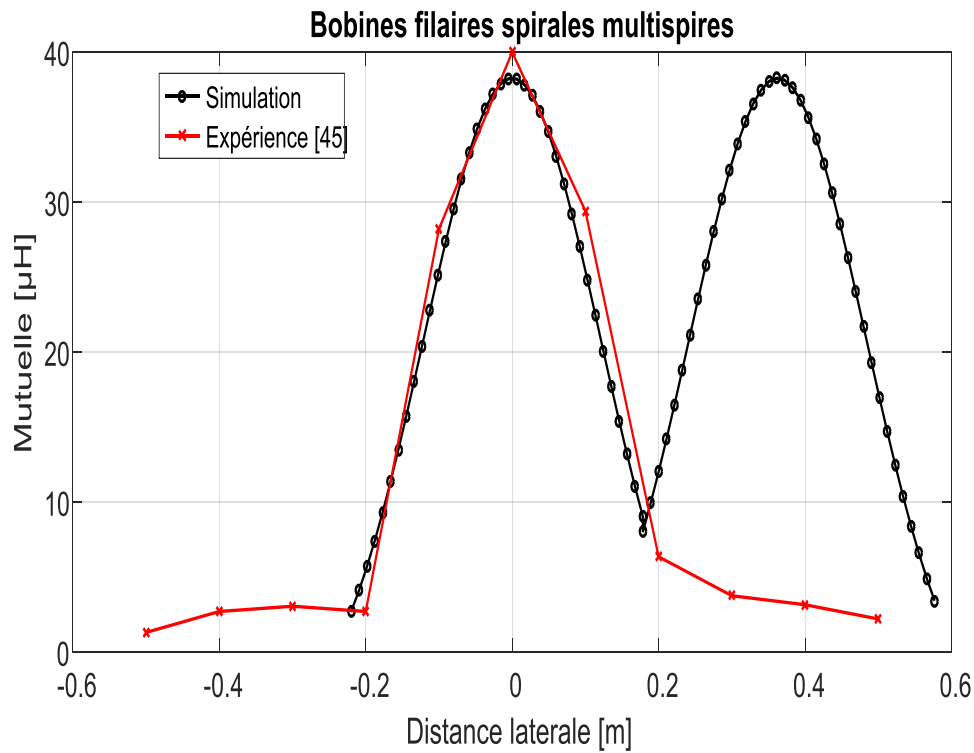


Figure IV.22 : Mutuelle inductance entre le dispositif de TESC : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices doublé

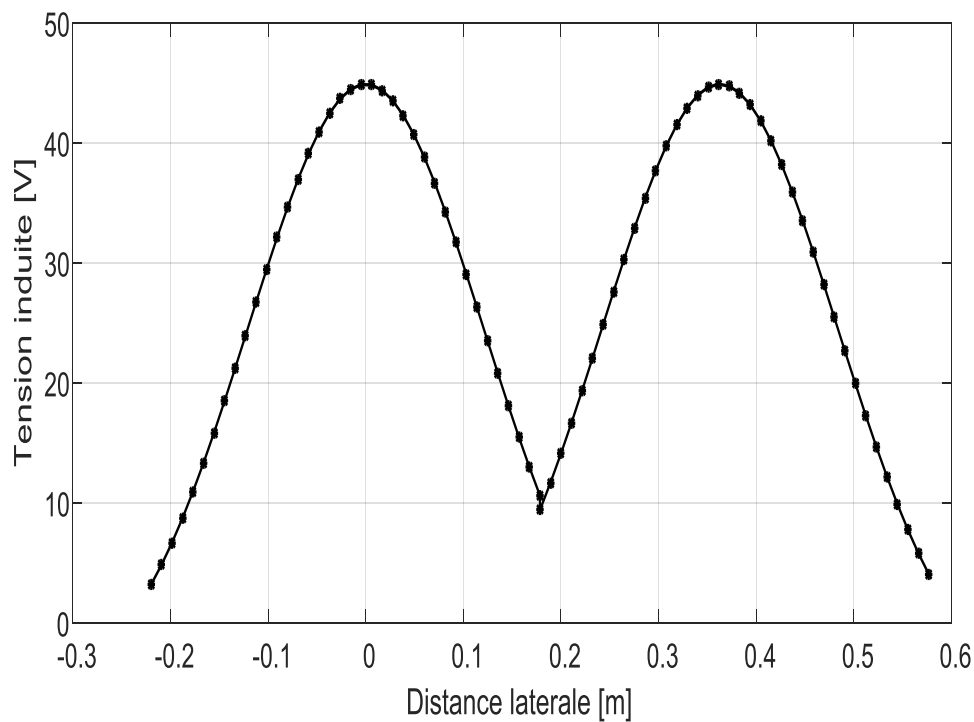


Figure IV.23 : Force électromotrice induite pour la recharge dynamique : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices doublé.

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

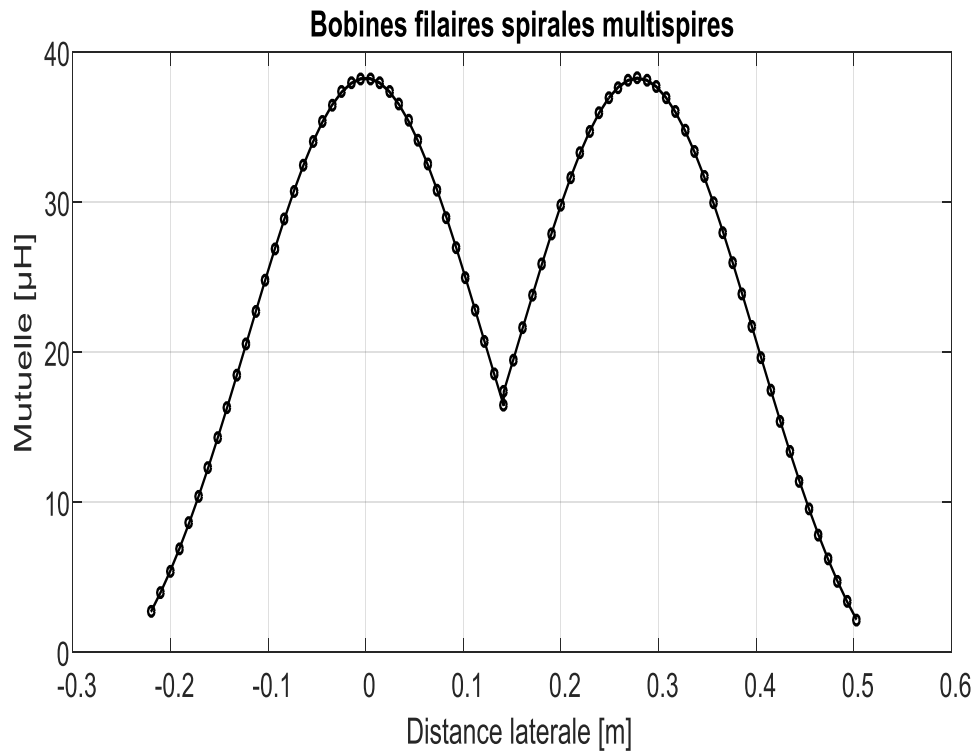


Figure IV.24 : Mutuelle inductance entre le dispositif de TESC : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices réduit de moitié

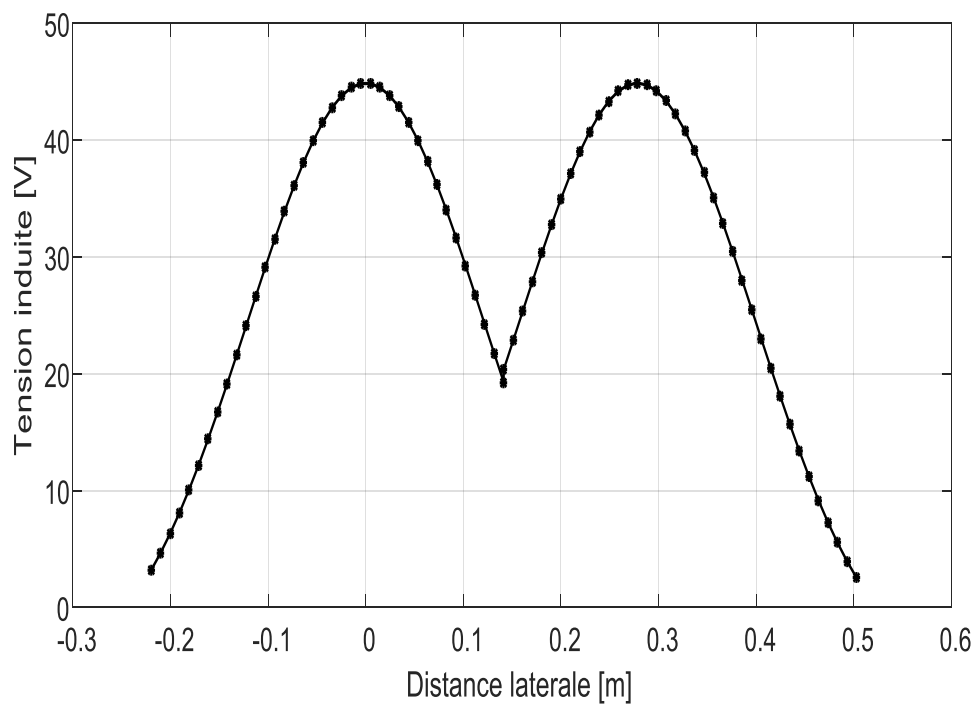


Figure IV.25 : Force électromotrice induite pour la recharge dynamique : 02 bobines émettrices, 01 bobine réceptrice, distance inter-bobines émettrices réduit de moitié

Chapitre IV : Application et résultats de simulation : TESC pour la recharge de voitures électriques

Les résultats donnés par les Figure IV. (20 -22 -24) montrent clairement que lorsque la distance inter bobines émettrice est inférieur $a(y)$, montrent clairement que lorsque les bobines sont trop rapprochées ($y/2$), la valeur minimale de la mutuelle est assez élevée.

Par contre pour des distances inter bobines émettrice supérieur ($2 \times Y$), l'inductance mutuelle présente des valeurs minimales de la mutuelle est assez faible.

La mutuelle inductance prend des valeurs maximales lorsque le désalignement entre bobines émettrice et réceptrice est nul.

Les Figures IV. (21 -23 -25) illustrent le comportement de la tension induite en fonction des variations de l'écart inter bobines émettrices, lorsque les bobines sont trop rapprochées ($y/2$), la valeur minimale de la tension induite est assez élevée, L'écart minimale entre les valeurs maximales et minimales correspondant à une efficacité de recharge moyenne élevée, mais sur une distance de recharge réduite, et pour un nombre réduit de bobines émettrices.

Par contre pour des distances inter bobines émettrice supérieur ($2 \times Y$), la tension induite présente des valeurs minimales de la tension induite assez faibles.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, on utilisée calcule de TESH pour étudier influence du positionnement de la bobine, autrement dit le Désalignement (latérale, angulaire) et entrefer sur la valeur de l'inductance mutuelle et la tension induite..

Les applications considérées (bobines circulaires filaires monopaires/multipaires, bobines circulaires plates multipaires) ont permis de valider semis analytiques mis en œuvre sous environnement Matlab. Ainsi les résultats obtenus ont montrés une très bonne concordance avec les résultats fournis par d'autres auteurs [44]. Il est apparu que l'écart inter bobine ainsi que la topologie des bobines jouent un rôle important sur l'efficacité du transfert, la distance de recharge ainsi que le cout de l'installation. Enfin, on notera aussi que si pour le modèle de bobines circulaires filaires multipaires les temps de résolution restent raisonnablement acceptables, la méthode semi-analytiques discrétisant les bobines jointives le cout de calcul est très importants

Bibliographie chapitre IV

[44] S. I. Babic, C. Akyel, and M. M. Mahmoudi, "Mutual Inductance Calculation Between Circular Coils With Lateral And Angular Misalignment," Session 3ap, P. 156, 2009.

[45] Ainurrakhymbay, Anvarkhamitov, Mehdi Bagheri, Batyrbekalimkhanuly, Maxim Lu and Toanphung, "Precise Analysis on Mutual Inductance Variation In Dynamic Wireless Charging Of Electric Vehicle." Energies 2018, 11, 624; Doi: 10.3390/En11030624.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre de l'étude des champs magnétiques générés par les systèmes de transfert d'énergie sans contact dynamiques et statiques pour le véhicule électrique. Cette étude se fait en premier lieu à travers de méthodologie de modélisation par formules intégrales analytiques et semi-analytiques de l'inductance mutuelle obtenues à partir des relations de Biot et savart, et du flux magnétique. L'approche semi-analytique (2D en coordonnées cylindriques) concerne des systèmes de (TESF) à bobines plates circulaires filaires mono-spires et multi-spires, et pour des bobines multi-couches/multi-spires jointives (massives) auxquelles s'applique une discrétisation géométrique.

La modélisation semi-analytique du système de (TESF) et la mise en œuvre de code de calcul sous environnement MATLAB a permis l'obtention des profils de l'inductance mutuelle et de la tension induite en fonction des grandeurs géométriques : entrefer verticale inter-bobines et désalignement horizontale latérale entres les axes des bobines. Les résultats obtenus comparés a ceux connus ou expérimentaux fournis dans la littérature scientifique montre une très bonne concordance qualitative et quantitative, validant ainsi les modèles implémentés. De plus les résultats font ressortir les observations suivantes :

- l'efficacité du transfert d'énergie dépend des distances entres les bobines réceptrice et émettrice,
- la topologie spirale multi-spires plates peut mettre en jeu des niveau de puissance élevée,
- l'écart inter-bobines émettrices (recharge dynamique) conditionne grandement d'une part la valeur moyenne de la tension induite utilisable pour la recharge et d'autres part le nombre de bobines émettrices pouvant êtres mobilisées dans un cycle complet de recharge. En conséquence il doit être ajusté avec précision pour assurer une recharge rapide et efficace toute en réduisant le parcours de la recharge et particulièrement les couts.

Les perspectives envisageables pour le présent travail, sont une extension à d'autres topologies de bobines et la prise en compte du phénomène de diffusion de la chaleur permettant d'estimer les niveaux de températures mis en jeu.