

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES

Présenté par
Sarah SOLTANI
Imene SETBEL

Mémoire dirigée par **M M'hemed RACHEK**
Thème

Calcul par éléments finis 2D en pas à pas dans le temps de la force électromotrice induite dans les dispositifs de transfert sans fil d'énergie électrique.

Mémoire soutenu le 27 / 01 / 2021 devant le jury composé de :

Mme Nadia RADJA
MCB, UMMTO, Présidente

M M'hemed RACHEK
Prof, UMMTO, Encadreur

Mme Salma CHERIF
MAA, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

Nous tenons à remercier notre Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la santé et la volonté pour compléter ce modeste travail.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et fructueux sans l'aide et l'encadrement de Mr. M'hemed RACHEK, nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, ses conseils judicieux, et ses encouragements durant notre préparation de ce mémoire.

Nos profondes gratitudee à la présidente du Jury et à l'examinatrice qui ont l'honneur d'évaluer ce mémoire de fin d'études.

Tous nos infinis remerciements vont à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire, ainsi qu'à notre chef de département Mr. CHAFIK BIROUCHE.

Nos vifs remerciements s'adressent également à nos chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien durant toutes ces années d'études.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce mémoire.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail:

*A Mes parents (Amar et Fatima) en témoignage
d'affection et de reconnaissance pour leurs
sacrifices, leurs encouragements et leurs
soutiens tout au long de mon parcours scolaire et
universitaire.*

*A ma sœur et ma meilleure amie Nacera et à mon cher
petit frère Abderrahmane.*

*A toute ma famille maternelle, pour son soutien, et ses
encouragements.*

*A ma sœur de cœur ALLAM Karima pour son soutien et
son encouragement et sa famille.*

A ma chère binôme SOLTANI Sarah et sa famille.

*Ainsi qu'à mes deux camarades et amies
ZEMMOUCHE Yamina et SADOUK Sarah et à tous mes
proches.*

A toute la promotion Machines électriques 2020.

Imene



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail:

A la mémoire de mon cher grand père Mohammed

A ma chère grande mère Fatma

A Mes parents (Djamel et Farida) en témoignage

d'affection et de reconnaissance pour leurs

sacrifices, leurs encouragements et leurs

soutiens tout au long de mon parcours scolaire et

universitaire.

A ma grande sœur et amie Bachira , à mon frère Mustapha

et à ma petite sœur Aya.

A mes chers oncles paternelle et leurs familles.

A ma meilleure tante Torkia et sa famille.

A ma sœur de cœur BOUACILA Samia pour son soutien et

son encouragement et sa famille.

A ma chère binôme SETBEL Imene et sa famille.

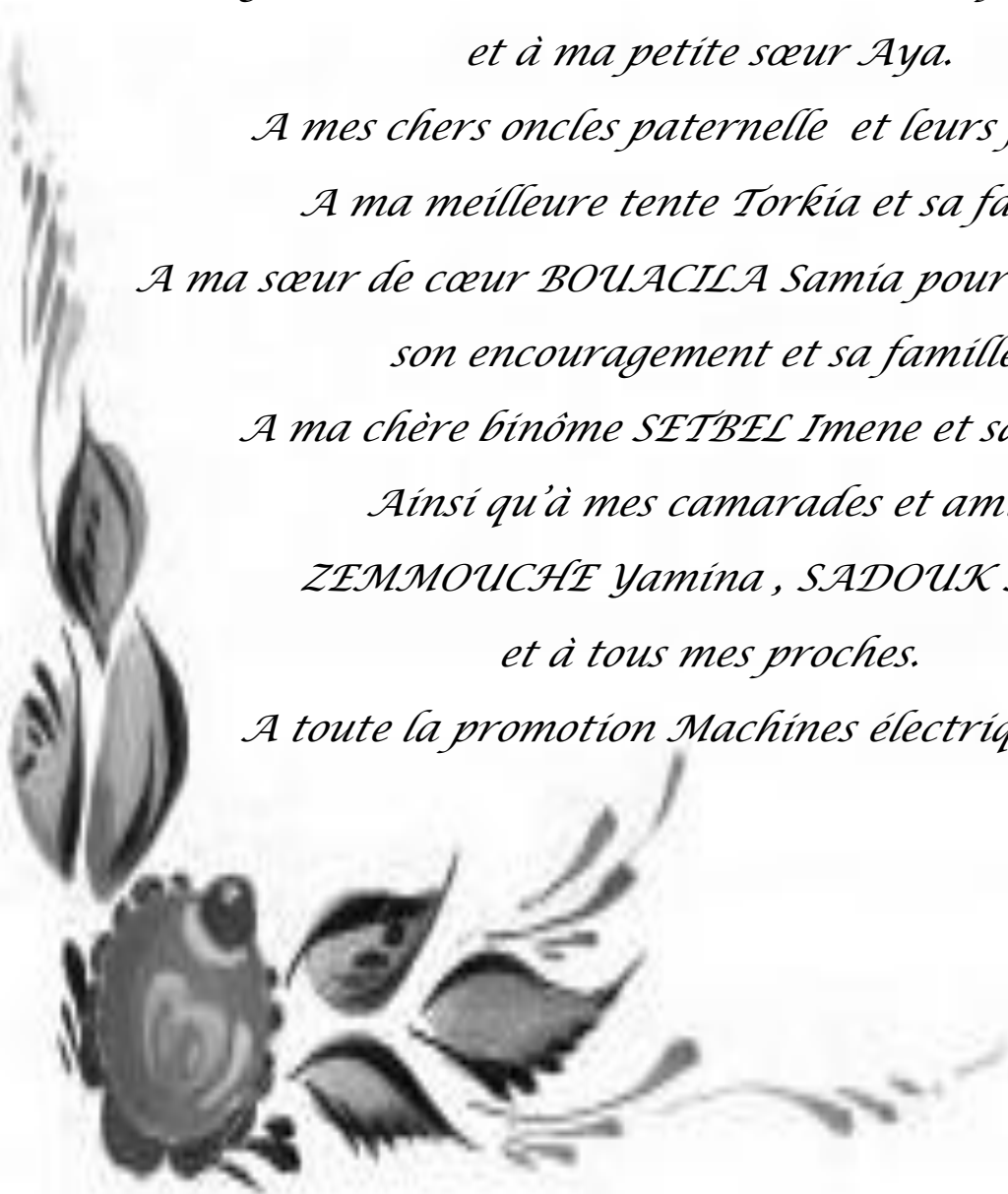
Ainsi qu'à mes camarades et amies

ZEMMOUCHE Yamina , SADOUK Sarah

et à tous mes proches.

A toute la promotion Machines électriques 2020

Mana



Résumé :

Le travail abordé dans ce mémoire comporte quatre parties:

- L'objet de la première partie est de donner des généralités sur l'état de l'art du domaine de transfert sans fil d'énergie électrique "TSFE".
 - La seconde partie fera l'objet de présenter les différentes approches de la modélisation électromagnétiques.
 - La troisième partie abordera la modélisation électromagnétique du TSFE, et le calcul des grandeurs globales.
 - La quatrième partie est l'application et interprétation des résultats.
- ✓ On fait la simulation de notre modèle, ainsi que la configuration géométrique de TSFE de notre projet d'étude sous MATLAB pdetool.

Mots clés: Transfert sans fil d'énergie électrique, TSFE, Méthode des éléments finis, FEM, MATLAB, bobines, champ magnétique....

Abstract

The work discussed in this thesis has four distinguished parts:

- The first part is a stat of art of electrical wireless energy transfer.
 - The object of the second part is to represent the different approaches of electromagnetic modeling of WPT
 - The third part presents the magneto-dynamic modeling as well as the calculation of the global quantities.
 - The fourth part is the application and the simulation results.
- ✓ We simulate the model of study as well as the geometric configuration of the WPT of our project with MATLAB pdetool environment.

Keywords: Wireless energy transfer, WPT, Finite elements method, FEM, MATLAB, Coils, electromagnetic field....

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
 Chapitre I: Etat de l'art des dispositifs du transfert sans fil d'énergie "TSFE"	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Principe de transfert sans fil d'énergie	6
I.4. Techniques de TSFE.....	6
I.4.1. Technique de TSFE par induction magnétique	6
I.4.2. La TSFE par résonance magnétique	7
I.4.3. La TSFE par onde radio	8
I.4.4. La TSFE par couplage capacitif	8
I.5. Domaines d'application des techniques de TSFE	9
I.5.1. Domaine du grand public	9
I.5.2. Domaine industriel	11
I.5.2.1. Le chauffage par induction	11
I.5.3. Domaine médical.....	12
I.5.3.1. Les dispositifs implantables électroniques biomédicaux	12
I.5.3.2. Les techniques d'imagerie médicale et biomédicale.....	13
I.5.3.2.1. Imagerie par résonance magnétique	13
I.5.3.3. La stimulation cérébrale thérapeutique	14
I.5.3.3.1. La stimulation magnétique transcrânienne	14
I.5.4. Domaine militaire	14
I.5.5. Domaine spatial	15
I.5.6. Domaine du transport.....	15
I.5.6.1. Voitures Electriques (EV)	15
I.5.6.2. Systèmes ferroviaires sans caténaires	17
I.5.6.2.1. L'APS	17
I.5.6.2.2. PRIMOVE.....	18
I.5.6.2.3. L'e-BRT.....	18
I.6. Avantages et inconvénients de TSFE	19
I.7. Conclusion	20

Chapitre II: Les approches de modélisation électromagnétique du TSFE

II.1. Introduction	21
II.2. Les approches analytiques	21
II.2.1. Formules analytiques.....	22
II.2.1.1. L'inductance propre.....	22
II.2.1.2. L'inductance mutuelle dans le cadre du TSFE.....	22
II.2.1.3. L'expression du flux magnétique	23
II.2.1.4. Relation flux magnétique inductance	23
II.3. Approche numérique et modèles électromagnétiques.....	23
II.3.1. Les équations de Maxwell	23
II.3.2. La loi de Lenz-Faraday	24
II.3.3. Les conditions de passage.....	25
II.3.4. Lois de comportement des milieux et la loi d'ohm	26
II.3.4.1. Relation diélectrique	26
II.3.4.2. Relation magnétique	26
II.3.4.3. Loi d'ohm.....	26
II.4. Notion de Potentiel Vecteur Magnétique (PVM)	27
II.5. Conditions aux limites.....	27
II.5.1. Condition type Dirichlet	27
II.5.2. Condition type Neumann	28
II.5.3. Condition mixte.....	28
II.6. Les méthodes numériques	28
II.6.1. La méthode des éléments finis	28
II.6.1.1. Principe de la méthode des éléments finis	29
II.6.1.2. Principales étapes de résolution par la méthode des éléments finis	29
II.6.2. La discrétisation ou subdivision du domaine	29
II.6.3. La construction de la fonction d'approximation	30
II.6.4. La formulation intégrale	30
II.6.4.1. Formulation variationnelle Ritz.....	30
II.6.4.2. Formulation résidus pondérés	31
II.7. Avantages de la méthode des éléments finis	32
II.8. Inconvénients de la méthode des éléments finis	32
II.9. Conclusion	32

Chapitre III : Modélisation magnétodynamique du système de TSFE et calcul des grandeurs globales

III.1. Introduction	33
III.2. Présentation du logiciel PDETOOL	33
III.4. Modèle électromagnétique général.....	34
III.4.1. Modèle général en coordonnées cylindriques	34
III.4.2. Formulation élément finis de modèle électromagnétique	36
III.5. Discrétisation temporelle	38
III.6. Calcul des grandeurs globales	39
III.6.1. Calcul de la tension (f.e.m) de la bobine réceptrice	40
III.6.2. Calcul de la densité de courant et le (courant) de la bobine réceptrice	40
III.6.3. Calcul de la puissance de la bobine réceptrice	41
III.7. Conclusion.....	41

Chapitre IV: Application et résultats de simulation

IV.1. Introduction	42
IV.2. Modèle géométrique	42
IV.2.1. Configuration géométrique du système étudié	42
IV.2.2. Les caractéristiques géométriques du système étude.....	43
IV.2.3. Les caractéristiques physiques du dispositif	44
IV.2.4. Les paramètres de pdetool.....	44
IV.3. Résultats de simulation	44
IV.4. Interprétation des résultats	49
IV.5. Conclusion	50
Conclusion générale.....	51

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : La géante bobine de Tesla	4
Figure I.2 : La tour " Wardencllyffe"	4
Figure I.3 : La plus grande démonstration de TSFE jamais réalisée.....	5
Figure I.4 : Schéma de principe de TSFE	6
Figure I.5 : Schéma de système TSFE par induction magnétique	7
Figure I.6 : Exemple de schéma de système TSFE par résonance magnétique	8
Figure I.7 : Représentation schématique du processus de transmission d'énergie sans fil par ondes électromagnétiques	8
Figure I.8 : Structure type du système à couplage capacitif	9
Figure I.9 : chargeur QI pour smart phone	9
Figure I.10 : Principe du chargement par induction	10
Figure I.11 : Module récepteur QI pour smart phone.....	10
Figure I.12 : Le mixeur sur la plaque à induction	11
Figure I.13 : Schéma de principe de chauffage par induction	12
Figure I.14 : Stimulateur cardiaque sans fil.....	13
Figure I.15 : Mécanisme d'action de la TMS	14
Figure I.16 : Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire orbitale	15
Figure I.17 : Schéma de voiture électrique rechargeable avec câble	16
Figure I.18 : Exemple de système TSFE pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables	17
Figure I.19 : Système APS (Alimentation Par le Sol) (Source : [ALSTOM])	17
Figure I.20 : Schéma de fonctionnement d'un tramway électrique de la technologie PRIMOVE.....	18
Figure I.21 : Inter station de "biberonnage" de l'e-BRT	19
Figure II.1 : Etapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis	29
Figure II.2 : Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis	29
Figure III.1 : Eléments triangulaire du premier ordre	37
Figure III.2 : Circuit électrique du système étudié	40
Figure.III.3 : Schéma représentatif des répartitions des lignes de champ sur un contour fermé ..	40
Figure IV.1 : Configuration géométrique du système étudié.....	42
Figure IV.2 : Maillage du domaine d'étude.....	43
Figure IV.3 : Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	45

Figure IV.4 : Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	45
Figure IV.5 : Potentiel vecteur magnétique	45
Figure IV.6 : Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	46
Figure IV.7 : Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	46
Figure IV.8 : Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	46
Figure IV.9 : Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	47
Figure IV.10 : Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	47
Figure IV.11 : Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	47
Figure IV.12 : Potentiel vecteur magnétique	48
Figure IV.13 : Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	48
Figure IV.14 : Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.....	48
Figure IV.15 : Potentiel vecteur magnétique	49

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II .1 : Equations de Maxwell.....	24
Tableau III.1 : Schéma de discrétisation temporelle	38
Tableau IV.1 : Données géométriques du système étudié	43
Tableau IV.2 : Les équations attribuées aux différentes régions du modèle	44

Introduction générale

Introduction générale

C'est à Faraday que l'on doit la découverte en 1831 du phénomène d'induction magnétique, qui se trouve en effet le principe de base de la production d'électricité, et aussi l'origine de tout développement dans le domaine électrique, dans les années qui suivaient.

Au début du 20^{ème} siècle, Nikola Tesla était le premier à imaginer et à appliquer le principe de la transmission sans fil d'énergie, en utilisant alors le principe de l'induction magnétique; lorsqu'il a réussi à transférer de l'énergie électrique sans fil sur un entrefer entre deux bobines alignées axialement, cette réalisation marque alors la naissance de la recherche et du développement de la technologie du TSFE. Cette dernière a connu une croissance considérable au cours des dernières décennies, elle s'est avérée prometteuse et fiable qu'elle a pu recouvrir une large gamme d'applications qui ont accéléré son développement dont: les implants médicaux, les véhicules électriques, les dispositifs installés au bord de ces véhicules, les appareils photo numériques, les appareils mobiles tels que les téléphones, les ordinateurs et les téléviseurs portables [1].

Le Transfert Sans Fil d'Energie, ou Wireless Power Transmission en anglais, aussi abrégée WiTricity, est une technique permettant de transmettre l'énergie sans support matériel. Son principe repose sur la loi de Faraday, le circuit primaire est alimenté sous une tension alternative, le courant alternatif qui circule dans l'enroulement primaire « la bobine émettrice » génère un champ magnétique, qui génère à son tour une tension aux bornes de la bobine réceptrice. Il existe deux grands types de techniques de transmission d'énergie sans fil; celle à champs proche (où l'émetteur doit se trouver à proximité du récepteur comme dans le cas du transfert par couplage inductif ou par couplage capacitif), ainsi que celle à champs lointain (où l'émetteur et le récepteur sont à une distance importante comme dans le cas du transfert par ondes).

L'objectif de ce travail est la modélisation électromagnétique d'un système de transfert sans fil d'énergie composé de deux bobines plates cylindrique (pancake) identiques ; une bobine primaire (émettrice) et une bobine secondaire (réceptrice), qui sont entièrement recouvertes par des plaques de ferrites comme blindage magnétique afin de canaliser le flux sous une fréquence de 30 KHZ, à travers une mise en équations aux dérivées partielles (EDP), en coordonnées cylindriques 2D qui sont exprimées en potentiel vecteur magnétique en régime magnétodynamique transitoire, la méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution numérique des EDP.

La modélisation conduira à l'estimation de la force électromotrice induite dans ce système en faisant varier l'entrefer et la distance inter-axes.

Le mémoire est constitué de quatre chapitres

Le premier chapitre donnera l'état de l'art du domaine de transfert sans fil d'énergie électrique, et décrira les différentes techniques ainsi que les différents domaines d'applications de ce dernier, tout en illustrons ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre fera l'objet de présenter les différentes approches de la modélisation électromagnétiques, en mettant la lumière sur la méthode des éléments finis qui sera par la suite utilisé dans ce travail.

Le troisième chapitre abordera la modélisation électromagnétique du TSFE, en formulant en éléments finis le modèle électromagnétique qui sera mis en œuvre sous l'environnement MATLAB pde-tool, Ce dernier sera par la suite succinctement présenté.

Le quatrième chapitre, sera consacré à la simulation du modèle mathématique développé dans le chapitre précédent, ainsi que la configuration géométrique de TSFE de notre projet d'étude sous MATLAB pde-tool. la présentation des résultats et leurs interprétations.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale.

Chapitre I

**Etat de l'art des dispositifs du transfert
sans fil d'énergie "TSFE"**

I.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, le monde a connu une grande évolution dans tous les domaines du secteur technologique. Parmi ces domaines, on trouve les systèmes de Transfert Sans Fil d'Energie, la "TSFE" qui connaît un grand essor. En effet les méthodes de récupération et de transfert d'énergie reçoivent actuellement une attention très significative de la part de la communauté de recherche. De ce fait on peut trouver alors les différentes applications ayant recours à ces systèmes ; domotique, santé, domaine militaire, transport, l'industrie automobile ou bien encore surveillance de phénomène environnementaux [2].

Qu'est ce qu'un transfert d'énergie sans contact ? Jusqu'à quand et à qui remontent les prémices de ce domaine ? Quel est son principe ? Quels sont les travaux et les applications qui lui reviennent ? Quelle importance présente-t-il dans le monde actuel ? Quelle importance présentera-t-il dans le futur ? Ce sont les réponses à ces interrogations que nous aborderons dans ce premier chapitre de notre travail.

I.2. Historique

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 commencé à travailler sur la bobine d'induction en 1834, et en 1836 il fabrique la toute première. En parallèle "Callan" fait la démonstration d'une transmission d'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 d'ondes radio, validant les modèles mathématiques de Maxwell. L'appareil d'Hertz est considéré comme le premier transmetteur radio. Quelques années plus tard, le physicien Italien "Guglielmo Marconi" (1874 - 1937) améliore le transmetteur d'ondes (télégraphe sans fil), en y ajoutant un conducteur élevé et une connexion à la terre.

En 1891, l'ingénieur serbe "Nikola Tesla" (1856–1943) dans son laboratoire au Colorado Spring, a inventé la bobine de tesla" (Figure I.1) : 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 [3] [4].

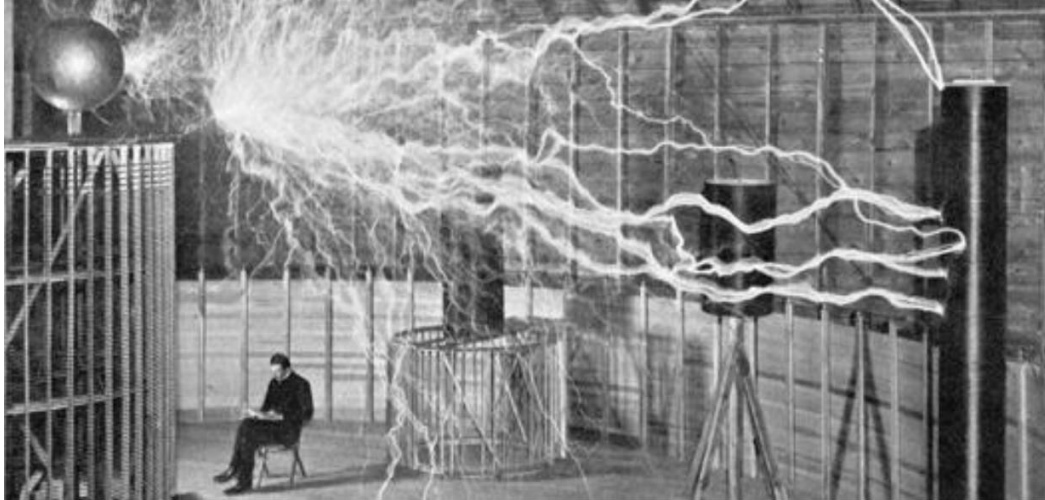


Figure I.1: La géante bobine de Tesla [5].

Il a aussi construit une tour à long Island au début des années 1900, la tour " Wardencllyffe" (Figure I.2) 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.



Figure I.2: La tour " Wardencllyffe"[6].

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).

Dans les années 1960, "William C. Brown" a commencé à mener des expérimentations de transmission sans fil d'énergie avec des tubes microondes tels que les magnétrons et les klystrons. Il a été également le premier 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 [7] [8].

En 1964, dans le cadre du Projet "RAMP3" (Raytheon Airborne Microwave Platform) qui 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 [9].

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.3).

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 [10].

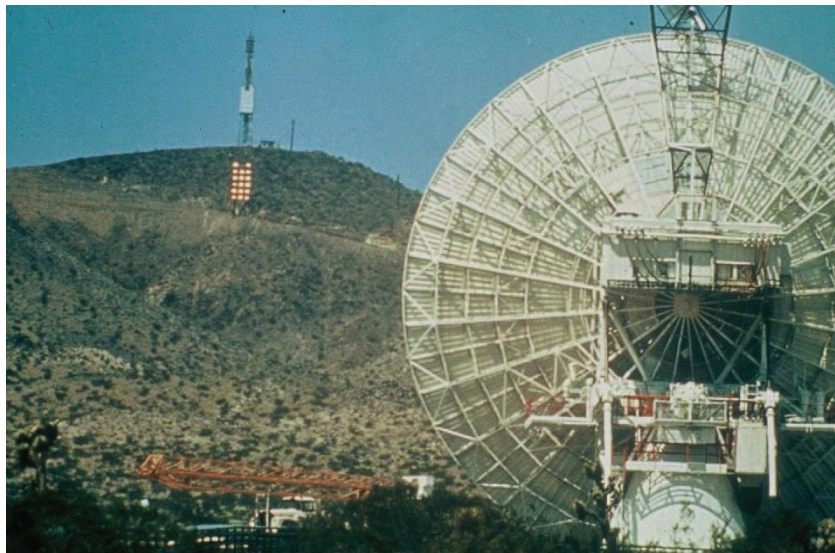


Figure I.3: La plus grande démonstration de TSFE jamais réalisée [11].

Les différentes démonstrations de transfert de niveaux d'énergie élevés sur des grandes distances ont prouvées qu'il était possible d'obtenir des efficacités élevés (70 %), mais pour des raisons de coût, d'encombrement des antennes et surtout des normes sanitaires de sécurité des personnes, ces systèmes n'étaient pas adaptés pour des applications pratiques viables. C'est principalement pour ces raisons que les systèmes de transfert

d'énergie par microondes ne sont pas répandus dans des applications 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 [11].

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

Le transfert sans fil d'énergie 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, le vide ou tout environnement, sans utiliser une matière conductrice. 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 [10] [12].

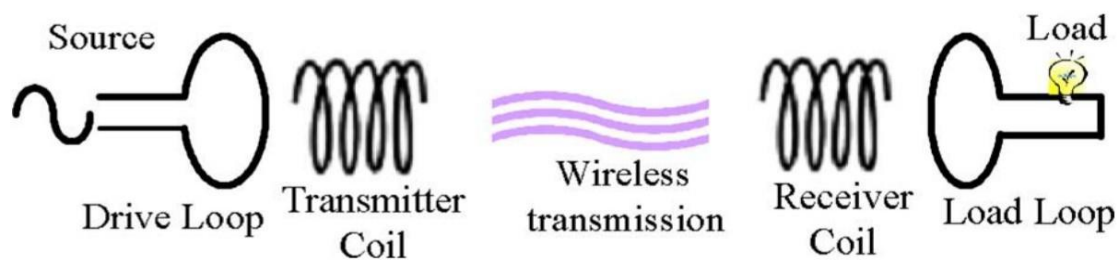


Figure I.4: Schéma de principe de la TSFE [13].

I.4. Techniques de TSFE

Le Transfert Sans Fil d'Énergie (TSFE) a été démontré en utilisant divers techniques tels que: couplage capacitif; induction magnétique; résonnance magnétique; onde- radio. La configuration de base de tous ces systèmes (TSFE) est similaire, ils se composent tous d'un émetteur connecté à un circuit électronique primaire et un récepteur connecté à un circuit électronique secondaire.

I.4.1. Technique de TSFE par induction magnétique

Le transfert d'énergie par induction magnétique a commencé en grande partie dans les années 1989/1990 à l'université d'Auckland avec le travail de "John Boys", "Andrew Green" et "Grant Govic" développant des systèmes de piste inductive pour la manutention

des matériaux. Ce système permet d'échanger de l'énergie entre deux systèmes, sans aucune connexion électrique entre eux. Fondé sur le principe de l'induction électromagnétique expérimenté en 1831 par Michael Faraday [14].

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. La transmission d'énergie par induction dans l'air, dans laquelle les bobines primaire et secondaire sont séparées physiquement, est également une technique connue depuis plus d'un siècle (Figure I.5). Appelée TSFE 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 K entre les inducteurs et de leur facteur de qualité Q [15].

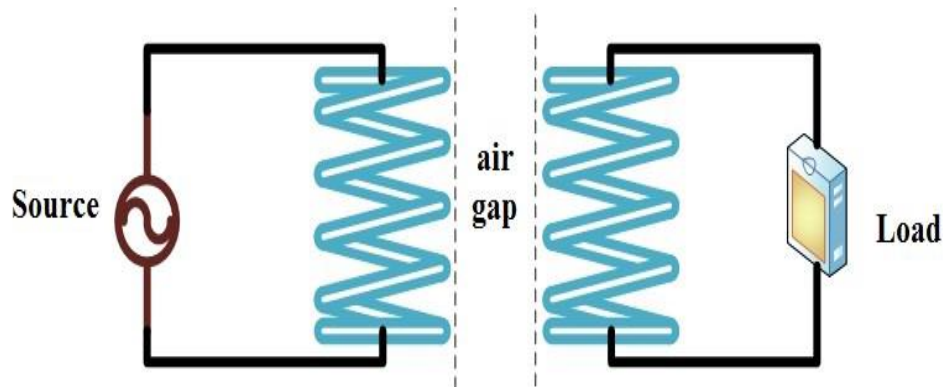


Figure I.5: Schéma de système TSFE par induction magnétique [16].

I.4.2. La TSFE par résonance magnétique

La TSFE par résonance magnétique est également appelée TSFE 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 et celle du récepteur (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 une grande distance sur laquelle le couplage magnétique entre les deux bobines est faible. La TSFE par résonance magnétique permet de transmettre l'énergie électrique sur une distance pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres [17].

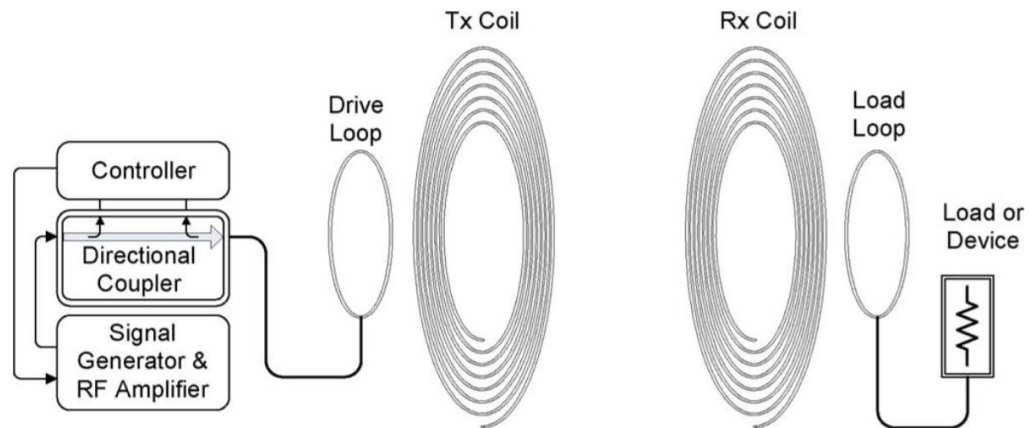


Figure I.6: Exemple de schéma de système TSFE par résonance magnétique [18].

I.4.3. La TSFE par ondes radio

L'énergie peut également être transmise à distance par l'intermédiaire d'un champ radiatif haute fréquence. Cette méthode utilise des ondes électromagnétiques à haute fréquence, en général supérieure à 1GHz [19].

Le transfert de grandes quantités d'énergie sans fil sur des distances de plusieurs km a déjà été réalisé, avec des efficacités supérieures à 70 %, mais le nombre d'applications viables à ces niveaux de puissances est très limité, en raison des normes sanitaires de protection des personnes ainsi que les tailles imposantes des antennes nécessaires [11].

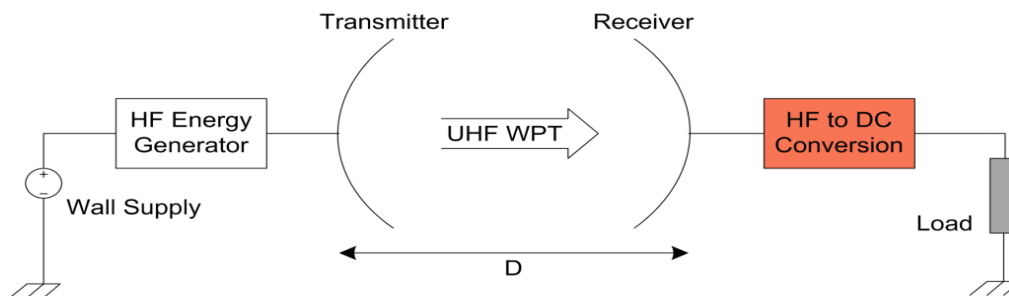


Figure I.7: Représentation schématique du processus de transmission sans fil d'énergie par ondes électromagnétiques [18].

I.4.4. La TSFE par couplage capacitif

L'idée de la TSFE par couplage capacitif est relativement récente dans la littérature, elle n'a apparue que lorsque "Camaruti Patrick" et "Bondar Henri" ont publié une proposition de vues techniques afin de transférer l'énergie par milieu diélectrique, et ont déposé leur brevet en 2007. Le système TSFE par couplage capacitif consiste en un transfert d'énergie via un champ électrique comme dans les condensateurs, il possède deux ensembles d'électrodes et n'utilise pas de bobines comme dans le cas des systèmes TSFE de type magnétique. L'énergie

est transmise via un champ d'induction généré par le couplage des deux ensembles d'électrodes [2].

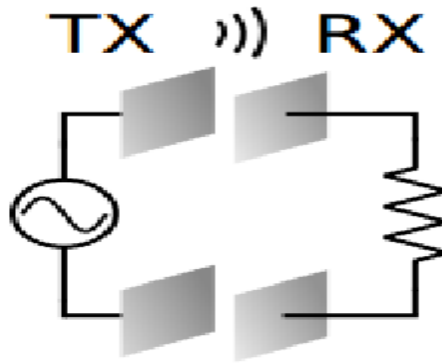


Figure I.8: Structure type du système à couplage capacitif [20].

I.5. Domaines d'application des techniques de TSFE

Le transfert sans contact d'énergie trouve actuellement son application dans nombreux domaines allant de la recharge des véhicules électriques, et des dispositifs de l'électronique mobile, aux applications médicales et aux applications militaires et spatiales. Cependant d'autres utilisations de cette technologie commencent à voir le jour, dans différents domaines.

I.5.1. Domaine du grand public

La transmission sans fil d'énergie électrique permet la recharge des appareils du quotidien, quel que soit la demande en puissance et le nombre d'appareils à recharger. Elle permet en effet d'effectuer la recharge de l'électronique mobile (téléphones, ordinateurs portables, ...) sans fil, de manière automatique dans les maisons, les voitures, les bureaux, les points d'accès publics et aussi elle permet l'alimentation sans fil les périphériques des ordinateurs de bureau (souris, claviers, imprimantes, écrans) [21].

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. Pour fonctionner, le système Qi a besoin d'un support de transmission et d'un récepteur compatible dans un appareil mobile, tel qu'un Smartphone, une tablette ou un autre appareil compatible [17].



Figure I.9: Chargeur QI pour smartphone [16].

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).

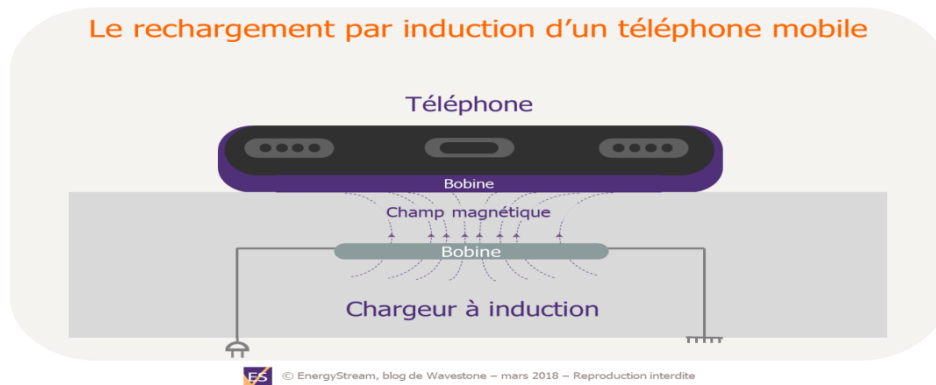


Figure I.10: Principe du chargement par induction [22].

La norme Qi est conçue que pour les appareils utilisant 5 watts de puissance ou moins, tels que les smartphones, les appareils photo ou les télécommandes. 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.

Pour le téléphone ou tablette qui ne sont pas dotés de cette technologie on peut même ajouter un petit module récepteur qu'on branche dans le port micro USB [17].



Figure I.11: Module récepteur QI pour smart phone [17].

Au salon de l'IFA 2012 à Berlin, le constructeur chinois Haier™ a présenté un téléviseur et un socle permettant d'échanger un flux vidéo de haute définition en trois dimensions ainsi que l'énergie nécessaire au fonctionnement du téléviseur. Ce produit utilise la norme Wireless Home Digital Interface pour l'échange du flux vidéo. Le constructeur Panasonic™ a présenté la même année au salon de Berlin une table à induction pour pouvoir cuisiner mais aussi pour alimenter sans fil un presse-agrume ou un mixeur [10].



Figure I.12: Le mixeur sur la plaque à induction [10].

I.5.2. Domaine industriel

I.5.2.1. Le chauffage par induction

Le chauffage par induction magnétique est une technique électrothermique permettant de chauffer des matériaux conducteurs d'électricité, sans contact matériel avec une source électrique. Cette technique est une application directe de deux lois physiques la loi de Lenz et l'effet Joule. Les courants de chauffage par effet Joule sont créés à l'intérieur de la même pièce à chauffer ou à fondre par induction électromagnétique. Il s'agit de courant de Foucault. Ce type de chauffage nécessite l'utilisation d'un convertisseur (élevateur) de fréquence. Il met en jeu trois phénomènes physiques successifs :

- ✓ Transfert d'énergie de l'inducteur au corps à chauffer par voie électromagnétique.
- ✓ Transformation en chaleur dans le corps de l'énergie par effet Joule.
- ✓ Transmission de la chaleur par conduction, convection et rayonnement thermique.

On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les cuisines individuelles et collectives, dans de nombreuses applications industrielles telles que la fusion, le traitement thermique, le préchauffage avant soudage, le chauffage avant formage, le scellement et la rétraction d'emballages plastiques, et aussi dans la recherche et le développement [23].

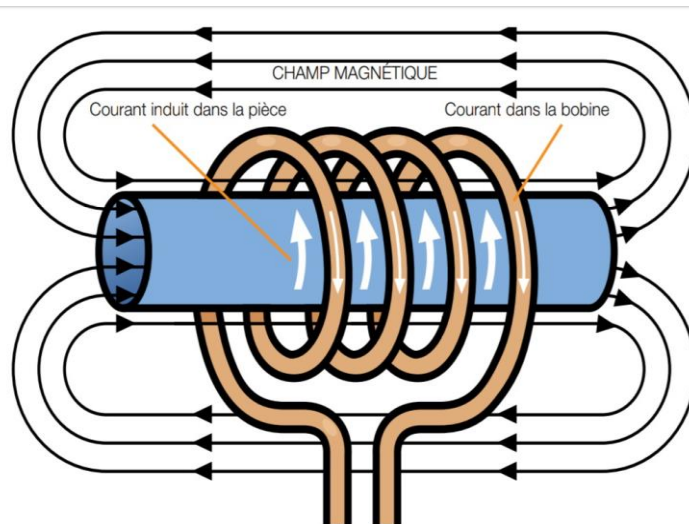


Figure I.13: Schéma de principe de chauffage par induction [23].

I.5.3. Domaine médical

Grâce à la TSFE le domaine médical est en progrès continu dans les diverses applications qui lui appartiennent. Par exemple la recharge et le fonctionnement à distance des différents appareils et dispositifs médicaux est devenue possible, de même pour certains dispositifs implantables qui exigent un niveau élevé de puissance pour leurs fonctionnement, comme les stimulateurs cardiaques, les défibrillateurs, et les dispositifs d'assistance ventriculaire , et aussi pour les charriots médicaux transportant des ordinateurs et d'autres instruments de diagnostic, ce qui a éliminé le besoin de câbles et la recharge de la batterie stationnaire [24].

Les techniques d'imagerie biomédicale, et les procédés de stimulation cérébrale thérapeutiques font aussi parti des applications médicales qui ont connu un grand essor grâce au transfert sans fil d'énergie.

I.5.3.1. Les dispositifs implantables électroniques biomédicaux

Les dispositifs implantables électroniques biomédicaux sont des appareils électroniques captifs d'énergie qui se composent d'une partie allant dans le corps humain (unité interne) et d'une unité de commande externe ou contrôleur externe, ils peuvent être profondément implantés dans la cavité du corps, plusieurs centimètres sous la peau, en parallèle avec une source d'énergie qui peut être aussi placée à plusieurs centimètres de la surface de la peau . C'est la technologie utilisée dans le cas des stimulateurs cardiaques sans fil.

Une fois l'implant placé sous la peau de l'utilisateur, il est destiné à fonctionner d'une manière efficace et autonome durant de longues périodes (plusieurs années) pour ne pas avoir recours à différentes chirurgies de remplacement de l'implant ou des batteries d'alimentation [25].

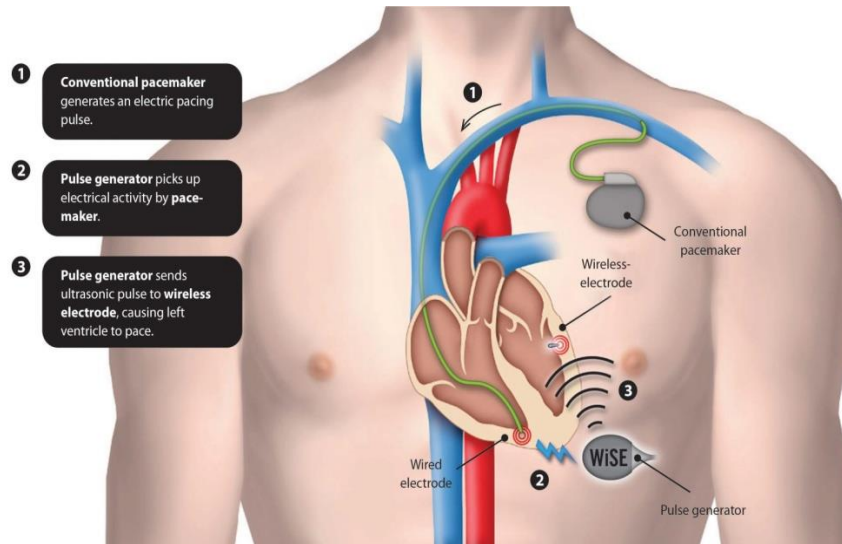


Figure I.14: Stimulateur cardiaque sans fil [26].

I.5.3.2. Les techniques d'imagerie médicale et biomédicale

L'imagerie médicale est née il y a à peine plus de cent ans. Aujourd'hui, les techniques d'imagerie sont nombreuses, souvent complémentaires. Elles ont été développées à partir des grandes découvertes de la physique: les rayons X, les ondes radio et les propriétés magnétiques de noyaux et des atomes [27]. Ces techniques utilisent des rayonnements répartis sur l'ensemble du spectre électromagnétique : des rayons gamma dans le cas de l'imagerie nucléaire pour les rayonnements les plus énergétiques, aux ultrasons lors des échographies, en passant par les rayons X, et enfin les ondes radio dans le cas des IRM [28].

I.5.3.2.1. Imagerie par résonance magnétique

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) exploite le phénomène de résonance magnétique nucléaire, elle repose principalement sur les propriétés magnétiques des atomes d'hydrogène, très abondant dans le corps humain en grande partie sous forme d'eau, et dans le noyau possède un spin nucléaire. Lorsque le patient est placé sous un champ magnétique puissant (1.5-3 teslas), les spins d'hydrogène s'alignent sur le champ magnétique. L'envoi d'impulsions radiofréquences d'énergie proportionnelle au champ magnétique perturbe cet alignement. Le retour à l'état initial, s'accompagne de l'émission d'une onde électromagnétique caractéristique, détectée par l'antenne et dont l'analyse fournit des images 3D des organes

explorés. Avec cette technique d'imagerie, les chercheurs peuvent étudier finement les tissus "mous" [27].

I.5.3.3. La stimulation cérébrale thérapeutique

La stimulation cérébrale thérapeutique est un domaine médical très vaste en terme de procédés et de stratégies; dans ce domaine on distingue les procédés convulsifs comme la thérapie électro convulsive (violente) (ECT) ou la thérapie par convulsion magnétique (TCM), et les procédés non invasifs comme la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) [29].

I.5.3.3.1. La stimulation magnétique transcrânienne

La stimulation magnétique transcrânienne (TMS) est une technique qui permet de stimuler sans douleur le cerveau humain en alternant rapidement un champ magnétique induit dans une bobine de fil de cuivre placée sur la tête. Le champ magnétique est généré par un courant qui circule à travers une bobine de fil isolée dans une gaine de plastique. Le courant engendre un champ magnétique qui, à son tour, induit un courant secondaire dans une toute petite partie du cerveau. L'effet de la TMS est de moduler (amplifier ou diminuer) temporairement (quelques secondes à quelques minutes) l'activité d'une petite partie du cerveau (quelques millimètres carrés) [30].

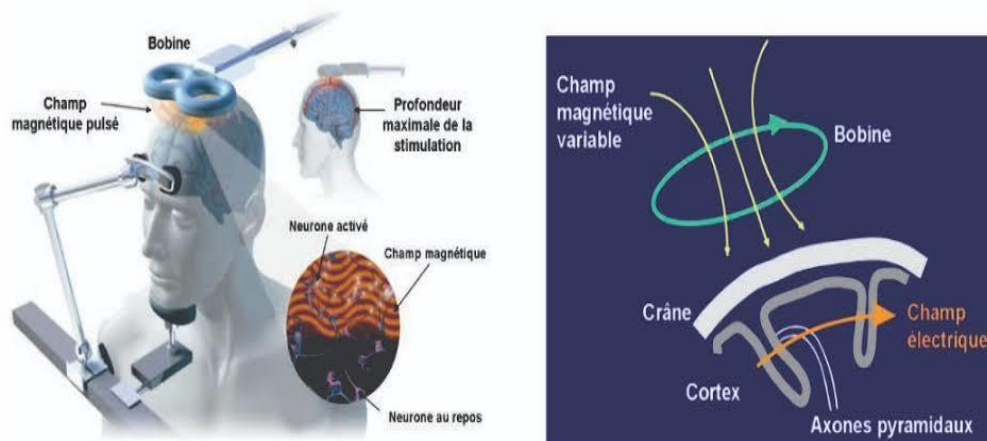


Figure 15: Mécanisme d'action de la TMS [30].

I.5.4. Domaine militaire

La transmission sans fil d'énergie tend à offrir un grand potentiel pour une multitude d'applications militaires d'aujourd'hui.

La recharge automatique sans fil pour les systèmes militaires de haute technologie, tels que les robots mobiles sans pilote. On élabore aussi le transfert d'énergie du gilet du soldat au casque et du casque à la lunette optique [21].

I.5.5. Domaine spatial

Au vu de la demande croissante d'électricité dans le monde, les ingénieurs américains ont réfléchi à la possibilité d'une centrale solaire orbitale. Le principe est d'envoyer une station avec des panneaux solaires pour produire de l'énergie et la transférer à la terre grâce à la transmission sans fil d'énergie. Les tests sur le rendement d'une transmission sans fil ont été faits en 1975 dans la bande de fréquence correspondante aux micro-ondes [18].

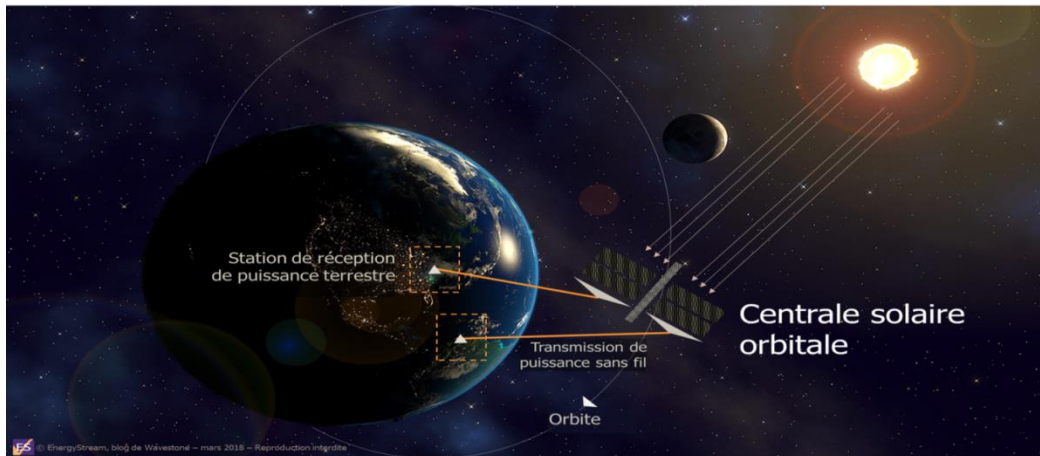


Figure I.16: Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire orbitale [22].

Une expérience concluante de transmission d'énergie par onde radio date de 2008; l'ancien scientifique de la NASA "John Mankins", a réussi à transmettre 20W soit la puissance suffisante pour alimenter une petite ampoule, entre deux îles hawaïennes distantes de 148 km. Mankins a ainsi réussi à transmettre de la puissance sur une distance de transmission qui représente l'épaisseur de l'atmosphère terrestre [22].

L'agence spatiale chinoise (CAST) a déjà lancé son programme SBSP (Space-based Solar Power) et prévoit une première commercialisation en 2050, avec le début de la phase de test dès 2025, pour subvenir aux besoins énergétiques exponentiels du pays. Après avoir envoyé et converti de l'électricité par micro-ondes sur 55 mètres, l'agence spatiale japonaise, la JAXA, travaille aussi depuis 1998 au lancement d'un prototype de centrale solaire en orbite géostationnaire et espère un lancement en 2040 [22].

I.5.6. Domaine du transport

I.5.6.1. Voitures Electriques (EV)

L'industrie automobile a connue une transformation technologique majeure vis-à-vis des inconvénients que la voiture thermique traditionnelle présente tels que : leurs faible rendement (20%), les nuisances sonores, l'émission du gaz de CO₂. Ce qui a conduit les

constructeurs à travailler sur des concepts plus propres, plus confortables et plus fiables, comme le véhicule électrique et le véhicule électrique hybride. De tels véhicules utilisent une connexion par câble régulière pour la recharge (batterie embarquée) dans les stations de charge (Figure I.17).

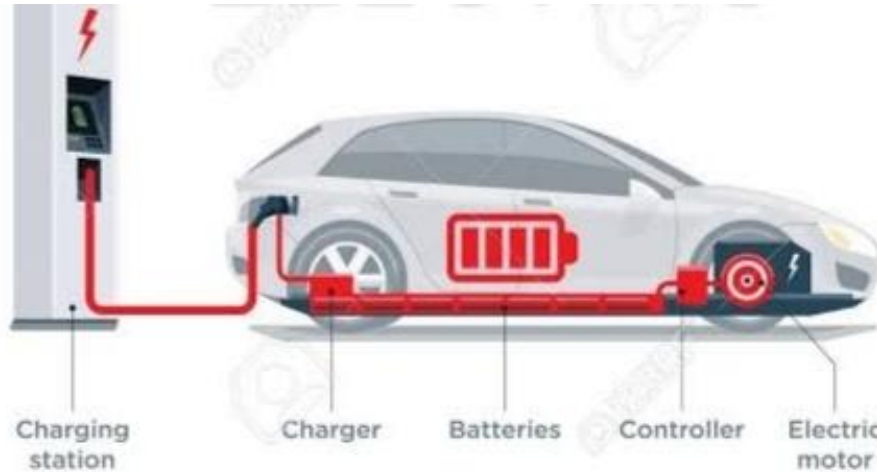


Figure I.17: Schéma de voiture électrique rechargeable avec câble [31].

Bien que ce type de charge, développé ces dernières années, soit connu pour être très rapide et efficace pour une charge complète de la batterie (EV), il peut inclure des éléments fastidieux ou gênants pour l'utilisateur qui traîne les câbles du chargeur qui devait être branché dans la station. Dans ce contexte, pour éviter les inconvénients des câbles, la charge sans contact présente une solution alternative intéressante avec plus de flexibilité [2].

La charge sans contact présente l'avantage d'éviter toute manipulation de câble et d'être moins sensible que les chargeurs filaires. Le système est composé d'une première plaque posée au sol intègre une bobine primaire qui va émettre un champ magnétique alternatif à destination d'une deuxième plaque dotée d'une bobine secondaire installée sous le véhicule électrique ou hybride rechargeable (Figure I.18). Ce système fonctionne lorsque la voiture est stationnée au-dessus de la bobine primaire et que les deux plaques sont parfaitement alignées. Pratique, la charge sans fil permet de faire le plein d'une batterie en toute sécurité, qu'il pleuve ou qu'il neige. Par contre, cette même technologie pouvant alimenter un véhicule en roulant en change toutes ses caractéristiques. En considérant une infrastructure routière équipée de bobines émettrices, activées au passage d'un véhicule demandant à être alimenté, l'autonomie du véhicule devient limitée principalement par la taille de l'infrastructure équipée [2].

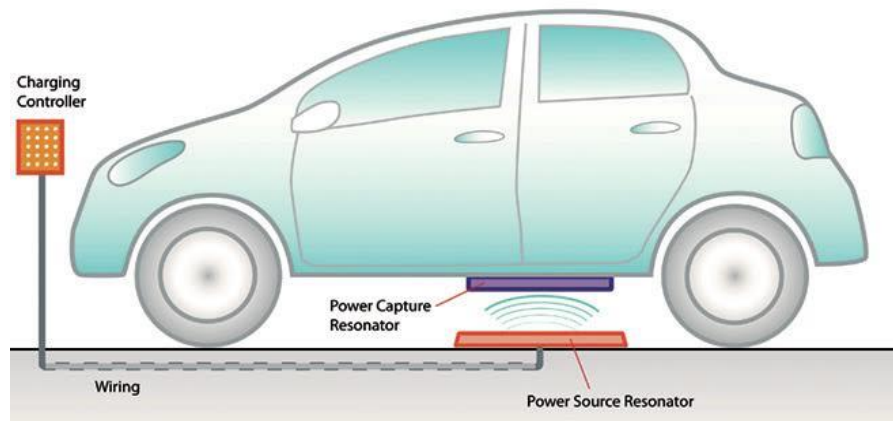


Figure I.18: Exemple de système TSFE pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables [19].

I.5.6.2. Systèmes ferroviaires sans caténaires

I.5.6.2.1. L'APS

Au début des années 2000, la société "ALSTOM Transport" a commercialisé le premier système moderne qui permet de couvrir de grandes distances sans nécessiter la présence des caténaires, appelée APS (Alimentation Par le Sol). Il a été mis en service pour la première fois dans l'agglomération de Bordeaux en France fin 2003 [33].

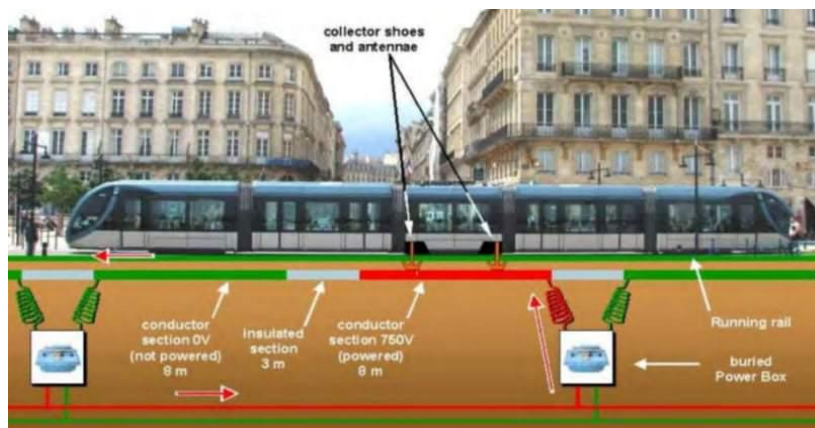


Figure I.19: Système APS (Alimentation Par le Sol) [32].

Le tramway est alimenté par un troisième rail encastré dans le sol entre les deux rails de roulements. Ce rail d'alimentation est composé de tronçons conducteurs, séparés par des isolants, qui sont mis successivement sous tension lors du passage du tramway. Sur la (Figure I.19), les tronçons conducteurs sont représentés respectivement en vert lorsqu'ils sont connectés à la terre et en rouge lorsqu'ils sont sous tension. Les isolants sont représentés en gris. La captation se fait par deux frotteurs situés sous le bogie central. On remarque que les tronçons conducteurs où il n'y a pas de frotteurs et ceux dépassant du tramway sont hors

tension afin de garantir la sécurité des usagers de la voie publique. La communication de la position du tramway se fait localement. En effet, une antenne d'émission est placée sur chaque frotteur et envoie un signal hautement sécurisé afin d'indiquer sa présence au tronçon conducteur sur lequel le frotteur se trouve. L'antenne de réception est composée d'une grande boucle de conducteur et est placée dans le rail central de l'APS [32].

I.5.6.2.2. PRIMOVE

La société Bombardier® a présenté fin 2008 lors du salon Innotrans à Berlin, le système PRIMOVE « BOMBARDIER » qui permet d'alimenter sans contact un tramway lorsque celui-ci est en mouvement. Le transfert de puissance se faisant sans contact, les éléments de transmission sont « invisibles ». Le principe de transmission d'énergie est le même que celui présenté dans ces travaux de recherches, c'est-à-dire la captation inductive.

Le système d'émission, enterré dans le sol constitue le primaire. Il est composé de grandes boucles de courant non connectées entre elles et ne possède pas de circuit magnétique. Le système de réception fixé sous le tramway constitue le secondaire. Il est composé d'un bobinage et d'un circuit magnétique (Figure I.20). Comme pour les transformateurs classiques ou les transformateurs hautes fréquences, le transfert d'énergie se fait via les flux magnétiques échangés entre primaire et secondaire. Ce système, fonctionnant sur la voie publique, doit respecter les normes de compatibilité électromagnétique. Par conséquent, comme pour l'APS, les boucles de courants primaires alimentées sont uniquement celles qui sont totalement recouvertes par le tramway [32].

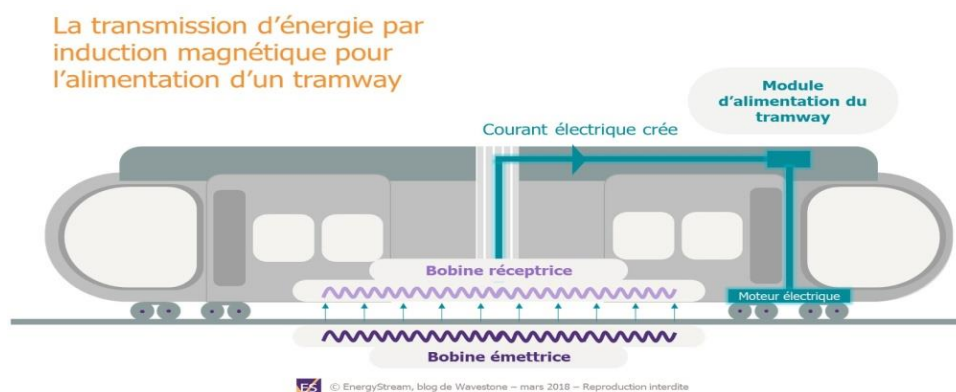


Figure I.20: Schéma de fonctionnement d'un tramway électrique de la technologie PRIMOVE [22].

I.5.6.2.3. L'e-BRT

La solution proposée par SIEMENS® pour s'affranchir des caténaires consiste à équiper le véhicule d'un système de stockage d'énergie électrique et de le charger uniquement

en inter station. L'énergie stockée permet alors au véhicule d'atteindre l'inter station suivante où il pourra à nouveau se recharger (biberonnage). Dans le cadre de cette technologie les composants de stockage utilisés sont des super condensateurs. Le transfert d'énergie se fait par contact via un pantographe et une courte caténaire de la longueur de l'inter station [32].

Les véhicules équipés de ce type de système sont des bus d'une longueur de 12 m à 18m ou 24m. Ils se déplacent sur des sites propres aménagés (absence de voiture, inter stations dédiées). Le temps de charge correspond au temps de montée et descente des voyageurs et est d'environ 20 secondes. De plus, le bus est équipé d'un système de guidage optique qui aide le conducteur à maintenir la trajectoire optimale en ligne et en inter station [32].



Figure I.21: Inter station de "biberonnage" de l'e-BRT [33].

Jusqu'à aujourd'hui l'alimentation sans fil a pu être utilisée dans une large gamme d'applications allant des téléphones portables des appareils mobiles, tablettes, ordinateurs portables, capteurs, implants médicaux, voitures électriques, trains, bus, tramways jusqu'aux applications spatiales. Et comme l'homme est grand innovant, ces applications ne sont pas limitées à ces stades. Actuellement les scientifiques travaillent sur l'idée de la maison intelligente (Smart home), et l'idée de la route électrique pour véhicules en mouvement.

I.6. Avantages et inconvénients de TSFE

La TSFE est une technologie qui présente beaucoup d'avantages; cette dernière est innovante pour l'alimentation en énergie dans les environnements dangereux et difficiles d'accès, elle a permis de se débarrasser des fils et des câbles, et donc de réduire le coût associé à la fabrication et le maintien des connecteurs directs. La TSFE a rendue la recharge de batterie plus facile et toute utilisation plus confortable. Du point de vu écologie, il se trouve que la TSFE a éliminé un tas d'impacts sur l'environnement.

Et comme toute technologie la TSFE a aussi ses inconvénients; elle est complexe et coûteuse (au vue du nombre de composant nécessaires pour son fonctionnement), elle est

limitée sur les plants technologiques, environnementaux ou biologiques (niveau de puissance tolérée, compatibilité électromagnétique), et du point de vu sécurité, la TSFE peut présenter des risques pour la santé (dans le cas du transfert radiatif à hautes fréquences).

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé un état de l'art du domaine de la transmission sans fil d'énergie. Citant au passage les différentes techniques de cette technologie, ses différents domaines d'applications (transport urbain, diagnostic et thérapeutiques médicales,...), tout en illustrant ses avantages et ses désavantages.

La transmission sans fil d'énergie électrique se révèle être un moyen de transmission innovateur et efficace, tout en étant en symbiose avec l'environnement.

Chapitre II

Les approches de modélisation électromagnétique du TSFE

II .1. Introduction

La modélisation électromagnétique est devenue aujourd'hui incontournable dans tous les domaines de la recherche scientifique; dans la créativité, l'innovation, et l'optimisation des dispositifs électromagnétiques tels que les actionneurs, les machines électriques, les réseaux électriques, les matériaux médicaux et thérapeutiques médicales, aussi dans le domaine du transfert sans contact/fil d'énergie électrique.

Les problèmes à résoudre sont de plus en plus complexes. Pour y répondre efficacement, il est nécessaire d'adopter une approche adaptée au problème traité. Dans le cadre de l'électrotechnique, la modélisation est basée sur : les équations de Maxwell, les relations du milieu, les conditions aux limites, et les techniques de résolution analytiques/semi-analytiques, et numériques.

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. Les approches analytiques

Les méthodes analytiques sont très souvent utilisées pour modéliser les phénomènes électromagnétiques impliquant des géométries relativement simples et des milieux homogènes. Dans le cadre du TSFE, l'approche analytique englobe les formules analytiques exprimant aussi bien les champs électrique et magnétique que des grandeurs tel que le flux magnétique, les courants induits, les énergies/puissances électriques et magnétique, que les paramètres inductifs tel que les inductances propres et mutuelles. En général les approches analytiques présentent une facilité de mise en œuvre et leur point fort est leur temps d'exécution très faible par rapport aux méthodes numériques.

L'utilisation des formules analytiques demande d'analyser et de bien poser les hypothèses obligeant ainsi le concepteur de très bien connaître le comportement des composants magnétiques afin d'être sûr de la validité, la fiabilité et la précision et des limites d'application des formules.

L'inconvénient de ce type de modèle est sa complexité de mise en œuvre dans les géométries complexes 2D/3D, sans intégrer les non-linéarités des matériaux [34].

II.2.1. Formules analytiques

II.2.1.1. L'inductance propre

L'inductance propre L est une propriété d'un conducteur, sa définition électromagnétique est le rapport magnétique entre le flux magnétique $\emptyset$ et le courant I [3].

$$L = \frac{\emptyset}{I} \quad (\text{II.1})$$

L : inductance propre [H].

$\emptyset$: Flux magnétique [wb].

I : Courant [A].

II.2.1.2. L'inductance mutuelle dans le cadre du TSFE :

L'inductance mutuelle dans un système de transfert d'énergie sans contact est un point crucial, car elle définit sa capacité de puissance de transfert. C'est une image du couplage mutuel et du lien entre les bobines primaire et secondaire [35].

L'inductance mutuelle entre deux bobines circulaires filamenteuses non coaxiales avec des axes parallèles, l'une avec un rayon R_p et l'autre avec un rayon R_s , avec une distance " d " entre leurs axes (latéral désalignement), peut être calculé comme suit [36] :

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

Avec:

μ_0 est la perméabilité magnétique de l'espace libre, R_p et R_s sont respectivement les rayons des bobines primaire et secondaire, d est le désalignement latéral (distance entre les axes), c est la distance de séparation entre les centres des bobines, α est le facteur de forme 19 de la géométrie physique des bobines, θ est le désalignement angulaire, k est une variable, le paramètre $\psi(k)$ est l'angle d'intégration en tout point de la bobine secondaire. β , V et ξ sont des paramètres sans dimension, $K(k)$ et $E(k)$ sont l'intégrale elliptique complète des premier et second types respectivement [37].

Tel que :

$$\alpha = \frac{R_s}{R_p}, \quad \beta = \frac{c}{R_p}, \quad \xi = \beta, \quad K^2 = \frac{4\alpha}{(1+\alpha)^2 + \xi^2}$$

$$\psi(k) = \left(1 - \frac{K^2}{2}\right) K(k) - E(k)$$

$$V = \sqrt{1 - 2 \frac{d}{R_s} \cos \phi + \frac{d^2}{R_s^2}}$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} d\theta$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

II.2.1.3. L'expression du flux magnétique

Le flux magnétique Φ est un champ magnétique total traversant une surface fermée S , Ce champ peut avoir une direction quelconque dans l'espace, il est défini par [10]:

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{II.3})$$

Tel que:

S : La surface [m^2].

$\vec{B}$: Induction magnétique [T].

II.2.1.4. Relation flux magnétique inductance

Soit une bobine de N spires parcourue par un courant i . Ce courant engendre une induction, et donc un flux dans les spires de cette bobine. L'induction magnétique en tout point de l'environnement de la bobine (et donc le flux dans celle-ci) est proportionnelle au courant qui la traverse [10].

$$\Phi = L \cdot i \quad (\text{II.4})$$

II.3. Approche numérique et modèles électromagnétiques

Les approches numériques et les modèles électromagnétiques permettent d'avoir accès au calcul des grandeurs électriques et magnétiques (le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, les densités de courant, les puissances et les pertes) et au détail des conditions de fonctionnement de tout système électromagnétique que ce soit en régime permanent ou transitoire, et cela en connaissant les champs électriques et magnétiques.

II.3.1. Les équations de Maxwell

Les phénomènes électromagnétiques sont décrits par les équations de Maxwell. Ces équations relient les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ aux sources de champs, à la densité de charge ρ et à la densité de courant $\vec{J}$. Elles sont aussi fondamentales en électromagnétisme que les lois de Newton en mécanique.

Le tableau (II.1) montre les équations de Maxwell sous forme intégrales et sous forme différentielles :

Les équations de Maxwell	Formes intégrales	Formes différentielles
Maxwell-Gauss	$\oint \vec{D} \cdot \vec{ds} = Q_{\text{int}}$	$\text{div} \vec{D} = \rho \dots \dots \dots (\text{II.5})$
Maxwell-Gauss magnétique	$\oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0$	$\text{div} \vec{B} = 0 \dots \dots \dots (\text{II.6})$
Maxwell-Faraday	$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots \dots \dots (\text{II.7})$
Maxwell-Ampère	$\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = I$	$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{cond}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots \dots \dots (\text{II.8})$

Tableau II.1: Equations de Maxwell [38].

Les équations (II.5), (II.7): équations de conservation.

Les équations (II.6), (II.8): équations de couplage électromagnétique.

Où :

$\vec{D}$: Vecteur déplacement électrique $\left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2} \right]$.

Q_{int} : charge électrique [C].

ρ : Densité volumique de charge $\left[\frac{\text{C}}{\text{m}^3} \right]$.

$\vec{E}$: Vecteur champ électrique $\left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$.

$\vec{H}$: Vecteur champ magnétique $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$.

$\vec{J}_{\text{cond}}$: Vecteur densité de courant de conduction $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$.

t: Le temps [s].

II.3.2. La loi de Lenz-Faraday

La loi de Faraday dit que la force électromotrice induite dans un bobinage fermé placé dans un champ magnétique est proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique qui entre dans le circuit [39].

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (\text{II.9})$$

$$e = - \frac{d}{dt} \iint |\vec{B}| |\vec{S}| \cos \theta \, d\vec{n} \quad (\text{II.10})$$

$$e = - \iint_s \frac{d\vec{B}(t)}{dt} \vec{ds} - \iint_s \vec{B} \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Où :

$\iint_s \frac{d\vec{B}(t)}{dt} \vec{ds}$: f.e.m de transformation.

$\iint_s \vec{B} \frac{d\vec{s}}{dt}$: f.e.m de mouvement.

Dans notre cas :

$$e = - \iint_s \frac{d\vec{B}(t)}{dt} \vec{ds} \quad (\text{II.12})$$

Tel que:

e : Force électromotrice [V].

Le signe (-) de la loi de Faraday a une signification bien précise donnée explicitement par la loi de Lenz .Cette loi a été formulée par Lenz en 1934 et éclaircit mieux le phénomène d'induction que faraday avait observé. Elle indique que la tension induite s'oppose par ses effets à la cause qui lui donne naissance [39].

II.3.3. Les conditions de passage :

Le passage entre deux milieux, indicés respectivement (1) et (2), ayant de caractéristiques électriques ou magnétiques différentes nécessite des conditions de passage à la surface de séparation des deux milieux. Ces conditions sont obtenues en intégrant les équations de Maxwell entre deux points voisins différents situés de part et d'autre de la surface séparant les deux milieux. Elle s'énonce comme suit [40] [41] [42] :

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique:

$$(E_2 - E_1) \times n = 0$$

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique:

$$(\mu_2 H_2 - \mu_1 H_1) \times n = 0$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique dans le cas d'existence des courants surfaciques

$$(H_2 - H_1) \times n = J$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique si les charges surfaciques existent.

$$(\epsilon_2 E_2 - \epsilon_1 E_1) \times n = 0$$

II.3.4. Lois de comportement des milieux et la loi d'ohm

Pour définir complètement le phénomène électromagnétique, on rajoute les lois de comportement des milieux qui exprime la relation non linéaire entre $\vec{B}$ et $\vec{H}$ due à la saturation du champ magnétique [38].

II.3.4.1. 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 [43].

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Tel que:

ϵ : Permittivité diélectrique $\left[\frac{F}{m}\right]$.

ϵ_0 : Permittivité diélectrique à vide $\left[\frac{F}{m}\right]$.

ϵ_r : Permittivité diélectrique relative de milieu.

II.3.4.2. Relation magnétique

La relation magnétique détermine la relation entre le champ et l'induction magnétique, cette relation donne la courbe d'aimantation $\vec{B} = f(\vec{H})$, une variation du champ $\vec{H}$ conduit à une variation de l'induction $\vec{B}$ [43].

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.14})$$

Avec :

μ : perméabilité magnétique $\left[\frac{H}{m}\right]$.

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

II.3.4.3. Loi d'ohm

La loi d'Ohm exprime la relation liant la densité de courant au champ électrique à travers la conductivité électrique σ $[\Omega.m]^{-1}$ [44].

Dans un milieu statique avec courant de source.

$$\vec{J}_{cond} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_{source} \quad (\text{II.15})$$

σ : Conductivité électrique $\left[\frac{S}{m}\right]$.

II.4. Notion de Potentiel Vecteur Magnétique (PVM)

A partir de l'équation (II.6), on peut déduire qu'il existe un potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (II.16)$$

Le champ magnétique $\vec{H}$ s'écrit alors:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (II.17)$$

D'où :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) \quad (II.18)$$

Donc :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_{source} + \vec{J}_{ind} \quad (II.19)$$

On doit assurer l'unicité de $\vec{A}$ en imposant une condition de Jauge .Dans le cadre des systèmes 2D ceci n'est pas nécessaire. La jauge de coulomb définie par $div \vec{A} = 0$ est vérifiée automatiquement.

On aura l'équation électrodynamique, en terme de potentiel vecteur magnétique, suivante :

$$\begin{cases} \overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_{source} \\ div \vec{A} = 0 \end{cases} \quad (II.20)$$

II.5. Conditions aux limites

La solution des équations aux dérivées partielles dépend entièrement des conditions de limites, qui leur seront associés, on peut distinguer trois sortes de conditions aux limites, qu'on peut généralement rencontrer [45].

II.5.1. Condition type Dirichlet

Cette condition nous informe sur la valeur de l'inconnue sur la frontière du domaine d'étude.

Elle est sous forme :

$$A|_{\Gamma_d} = A_0 \quad (II.21)$$

Γ : La frontière extérieure du domaine.

II.5.2. Condition type Neumann

Elle est appliquée sur la frontière lorsque la valeur de la grandeur calculée n'est pas connue à la frontière du domaine d'étude.

$$\left. \frac{\partial A}{\partial n} \right|_{\Gamma_n} = A_0 \quad (\text{II.22})$$

II.5.3. Condition mixte

C'est la combinaison des deux types précédents, elle s'exprime de la manière suivante :

$$\alpha A + \beta \frac{\partial A}{\partial n} = \gamma \quad (\text{II.23})$$

Où :

α , β et γ sont des constantes.

II.6. Les méthodes numériques

Les méthodes analytiques ne permettent pas la résolution des problèmes électromagnétiques impliquant des géométries complexes et des propriétés physiques non homogènes, c'est pour cela qu'on en fait appel à des méthodes plus puissantes et polyvalentes fondées sur la discrétisation géométrique dans le cadre d'approches numériques, on peut citer : la méthode des différences/volumes finis, les méthodes des intégrales de frontières, la méthode des moments, et la méthode des éléments finis que nous utiliserons dans le cadre de notre travail.

II.6.1. La méthode des éléments finis

L'approche des éléments finis est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une très bonne précision, elle est fondée sur la résolution des équations de Maxwell.

La Méthode des Eléments Finis (FEM) est généralement un outil puissant pour la simulation numérique des systèmes de transfert d'énergie sans fil. En raison de la fréquence de fonctionnement relativement élevée, la présence d'inductance et de capacité distribuée dans le système, ainsi que les densités de courants de Foucault et de déplacement essentielles dans l'étude de la distribution électromagnétique dans les systèmes de transfert sans fil d'énergie [46].

II.6.1.1. Principe de la méthode des éléments finis

Le principe de la méthode est basé sur une formulation intégrale du problème aux dérivées partielles et de leurs conditions aux limites. Cette formulation peut être de type variationnelle ou résidus pondérés [42].

II.6.1.2. Principales étapes de résolution par la méthode des éléments finis

Les principales étapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis sont représentées dans le synoptique suivant:

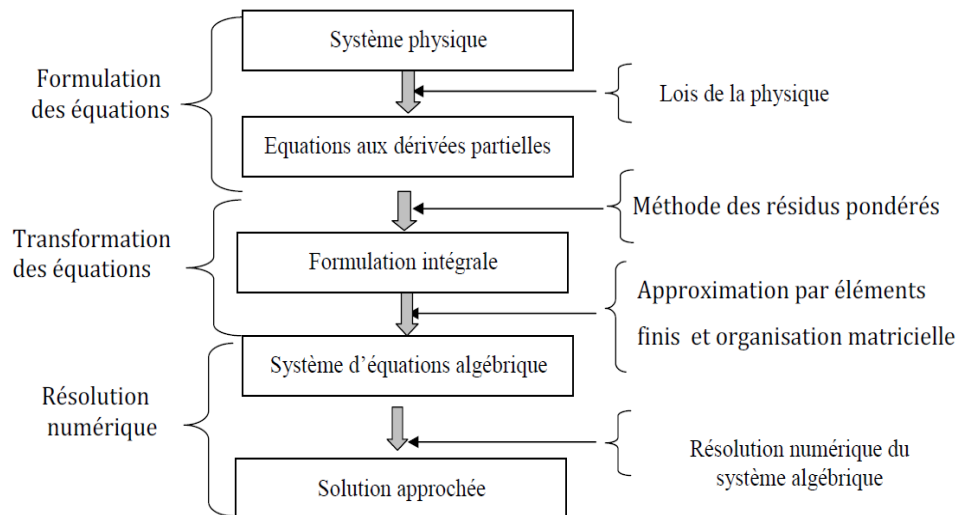


Figure II.1: Etapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis [47].

II.6.2. La discrétisation ou subdivision du domaine

La résolution des problèmes physiques par la méthode des éléments finis nécessite la réalisation du maillage du domaine où se déroule le phénomène étudié, et cela en le décomposant en un ensemble de sous-domaines élémentaires à l'aide d'un ensemble d'éléments géométriques simples: Segments, triangulaires, quadrilatères, pentaèdres, hexaèdres... Suivant la dimension de l'espace. De ce maillage découle une forte influence vis à vis de la précision des résultats du calcul [48] [49].

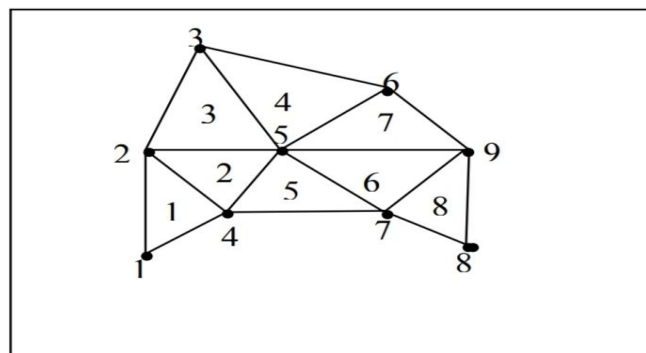


Figure II.2: Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis [49].

II.6.3. La construction de la fonction d'approximation

La fonction d'approximation consiste à chercher la meilleure approximation d'une fonction $A(x, y)$ à l'intérieur de son domaine d'étude de manière à satisfaire au mieux les lois physiques auxquelles elle obéit.

II.6.4. La formulation intégrale

La formulation intégrale est basée sur l'une des deux approches suivantes : La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement, l'énergie du système étudié. Cette méthode n'est donc applicable que si on connaît une fonctionnelle équivalente au problème différentiel que l'on veut résoudre. La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue [40].

II.6.4.1. Formulation variationnelle Ritz

La formulation variationnelle se base sur la connaissance d'expression de l'énergie du système à étudier qui est appelée variationnelle d'énergie [50].

La formulation d'énergie est donnée par:

$$F(A) = \int L(A) d\Omega \quad (\text{II.24})$$

Avec :

Ω : Le domaine d'étude.

$L(A)$: La fonction de Lagrange déduite de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système.

$$L(A) = W_c - W_p \quad (\text{II.25})$$

W_c : Énergie cinétique du système.

W_p : Énergie potentielle du système.

Cas d'un problème électromagnétique (notre cas), dans ce cas la fonction L est donnée par l'expression :

$$L = \int_0^B v B dB - JA \quad (\text{II.26})$$

L : Fonction de Lagrange.

A : Potentiel vecteur magnétique [T.m].

J : Densité de courant $\left[\frac{A}{m^2}\right]$.

ν : Réductivité magnétique $\left[\frac{H}{m^{-1}} \right]$.

L'expression de la fonction d'énergie est donnée comme suit :

$$F(A) = \int_{\Omega} \left[\int_0^B \nu B dB - JA \right] d\Omega \quad (II.27)$$

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonction; la minimisation est effectuée en utilisant le principe de Rayleigh - Ritz. Qui s'énonce comme suit :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \quad (II.28)$$

Et $i=1, 2, 3, \dots, n$

Ou:

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \dots = \frac{\partial F(A)}{\partial A_n} = 0 \quad (II.29)$$

Avec:

n : Nombre de nœuds du domaine d'étude.

A_i : Est l'inconnu aux nœuds i du domaine.

II.6.4.2. Formulation résidus pondérés

Contrairement à la méthode variationnelle, la méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance au préalable, de la fonctionnelle d'énergie du système [40]. La méthode des résidus pondérés consiste à choisir la fonction projective de façon à minimiser l'intégrale du résidu [51].

Le résidu est donnée par :

$$R = L(A) - f \quad (II.30)$$

Avec :

R : Résidu de l'approximation.

L : Operateur différentiel.

f : Fonction source.

A l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en n points du domaine Ω :

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \alpha_i \cdot d\Omega = \int_{\Omega} (L(A_i) - f_i) \alpha_i d\Omega = 0 \quad (II.31)$$

α . : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A permettant d'annuler l'intégral du résidu. On se limitera dans ce qui suit, à présenter la méthode projective de Galerkin qui consiste à choisir des fonctions de pondération identiques aux fonctions de formes, pour obtenir un système algébrique symétrique dont la résolution devient relativement rapide.

II.7. Avantages de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis présente beaucoup d'avantages, dont :

- ✓ Elle peut facilement gérer une géométrie très complexe (le cœur et la puissance de la FEM).
- ✓ Elle peut gérer une grande variété de problèmes d'ingénierie (Mécanique du solide, dynamique, problèmes de transfert chaleur, mécanique des fluides, problèmes éclectiques, problèmes magnétiques et électromagnétiques).

II.8. Inconvénients de la méthode des éléments finis

Comme toutes méthodes, cette dernière a ses désavantages:

- ✓ La (MEF) est grande consommatrice de taille mémoire et de temps de calcul.
- ✓ Une solution générale sous forme fermée, qui permettrait d'examiner la réponse du système aux changements de divers paramètres, n'est pas produite.
- ✓ La (MEF) n'obtient que des solutions "approximatives".

II.9. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la présentation des différentes approches de la modélisation électromagnétique du domaine du TSFE, dont les approches analytiques (formules analytiques) et les approches numériques où une attention particulière a été accordée à la méthode des éléments finis. Les notions de base de l'électromagnétisme, les équations de Maxwell et le modèle magnétodynamique en termes de potentiel vecteur magnétique ont été aussi présenté dans ce chapitre.

Chapitre III

Modélisation magnétodynamique du système de TSFE et calcul des grandeurs globales

III.1. Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre précédent les approches de la modélisation électromagnétique, on optera dans le présent chapitre pour la modélisation de notre système TSFE, en utilisant le logiciel de simulation PDETOOL sous MATLAB qui sera par la suite succinctement présenter.

III.2. Présentation du logiciel PDETOOL

Le PDETOOL sous MATLAB est un logiciel permettant le traitement des équations aux dérivées partielles en deux dimensions en utilisant la méthode des éléments finis.

Les logiciels éléments finis sont structurés selon trois modules : le préprocesseur, le processeur et le post-processeur. Nous présentons quelques éléments simples permettant l'utilisation efficace de cette interface graphique [52].

1. En draw mode (mode dessin) : Nous pouvons dessiner des objets solides. Il existe quatre types d'objet solide : Cercle, Polygone, Rectangle, Ellipse. A chaque objet est attribué automatiquement un nom unique qui est affiché dans l'interface graphique sur l'objet lui-même.
2. En boundary mode (mode frontières) : Dans ce mode, l'origine des formes de la construction des objets solides constituent les frontières entre les sous domaines du modèle. Ces frontières ne peuvent être éliminées dans ce mode. Les limites extérieures sont codées par couleur pour indiquer le type de conditions aux limites. Le rouge correspond à la limite extérieure de Dirichlet, le bleu généralise les conditions de Newman et le vert, les conditions aux limites mixtes.
3. En mesh mode (mode maillage): Nous pouvons contrôler la génération de maillage automatique et de tracer le maillage. Un maillage initial peut être généré en cliquant sur le bouton ou en sélectionnant le bouton "initialize mesh", puis sur "refine mesh" dans le menu "mesh".
4. En PDE mode : Nous pouvons spécifier le type de problème EDP (elliptiques, hyperbolique et parabolique) et les coefficients c , a , f et d associés aux lois de comportements, la réductivité magnétique, la conductivité électrique, la densité de courant source et le facteur d'onde ou de propagation respectivement. Nous pouvons également spécifier ces coefficients pour chaque sous-domaine de façons indépendantes.
5. En solve mode (mode de résolution): Le problème continu de l'EDP est transformé via la formulation éléments finis en systèmes d'équations algébrique dont la résolution conduit à la

solution en tous les nœuds du maillage. Pour les EDP hyperboliques et paraboliques, nous pouvons également spécifier les conditions initiales.

6. En plot mode : Nous pouvons choisir une grande variété de représentation graphique de la solution en tous points du maillage.

III.4. Modèle électromagnétique général

A partir du modèle générale en potentiel vecteur magnétique donnée par l'équation (II.20) on peut extraire les formulations éléments finis relatives au modèle magnétodynamique en régime transitoire.

Dans les dispositifs suffisamment longs ou pourvus d'une symétrie de révolution, les courants sont généralement perpendiculaires au plan d'étude. Le potentiel vecteur n'a plus alors qu'une seule composante A_φ également orthogonale au plan d'étude.

$$A_z = (0, 0, A_\varphi) \text{ et } J = (0, 0, J_\varphi)$$

Pour les différentes régions du système, les équations aux dérivées partielles (EDP) exprimées en terme de potentiel vecteur magnétique d'après l'équation (II.20) sont:

Dans l'air :

$$\vec{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \vec{\text{rot}}(\vec{A}) \right) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Dans la bobine émettrice :

$$\vec{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \vec{\text{rot}}(\vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (\text{III.2})$$

Dans la bobine réceptrice :

$$\vec{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \vec{\text{rot}}(\vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.3})$$

III.4.1. Modèle général en coordonnées cylindriques:

Le plan d'étude se résume au plan (r, z), ce qui se traduit par $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$

On a:

$$A = (0, 0, A_\varphi). J = (0, 0, J_\varphi)$$

$$\vec{\text{rot}}(\vec{A}) = \vec{\nabla} \times \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{U}_r & \vec{U}_z & r\vec{U}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ 0 & 0 & rA_\varphi \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} \right) \vec{U}_r - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \right) \vec{U}_z \quad (\text{III.4})$$

D'où :

$$\frac{1}{\mu}(\overrightarrow{rot}(\vec{A})) = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \vec{U}_r - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) \vec{U}_z \right] \quad (III.5)$$

Et:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) &= \frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} = \frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{U}_r & \vec{U}_z & r\vec{U}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) & - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) & 0 \end{vmatrix} \\ \overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) &= \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) \right) \vec{U}_r + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \right) \vec{U}_z \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{r} \left(- \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \right) r\vec{U}_\varphi \right] \end{aligned} \quad (III.6)$$

Donc:

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \frac{1}{\mu} \left[- \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \right] \quad (III.7)$$

Donc l'équation (II.20) peut s'écrire:

$$- \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (III.8)$$

Avec : $v = \frac{1}{\mu}$

Les équations (III.1), (III.2) et (III.3) deviennent :

Dans l'air:

$$- \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (III.9)$$

Dans la bobine émettrice :

$$- \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (III.10)$$

Dans la bobine réceptrice :

$$- \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r.A_\varphi)}{\partial z} \right) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (III.11)$$

III.4.2. Formulation élément finis de modèle électromagnétique EM

En appliquant le théorème de Galerkin à l'équation précédente (III.8), nous obtenons la forme intégrale suivante :

$$\iint \alpha_i \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r \cdot A_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r \cdot A_\varphi)}{\partial z} \right) \right) \right] dr dz - \sigma \iint \alpha_i \frac{\partial A}{\partial t} dr dz = - \iint \alpha_i J_s dr dz \quad (III.12)$$

En appliquant le théorème de Green pour le premier terme (intégral) de l'équation (III.12), on aura :

$$\begin{aligned} \iint \alpha_i \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r \cdot A_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(r \cdot A_\varphi)}{\partial z} \right) \right) \right] dr dz \\ = -\sigma \iint v \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} \right) dr dz \\ + \int v \alpha_i \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma \end{aligned} \quad (III.13)$$

Le terme $\int v \alpha_i \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma$ représente la frontière. Dans le cas des conditions aux limites type Dirichlet ou Neumann homogènes, ce terme est nul, donc la forme intégrale devient en écriture condensé :

$$\iint \frac{v}{r} \overrightarrow{grad} \alpha_i \cdot \overrightarrow{grad} A dr dz + \sigma \iint \alpha_i \frac{\partial A}{\partial t} dr dz = \iint \alpha_i J_s dr dz \quad (III.14)$$

Dans notre cas la fonction d'approximation est donnée comme suit :

$$A = \sum_{j=1}^{N_n} \alpha_j \cdot A_j \quad (III.15)$$

Avec :

N_n : Nombre de nœuds du domaine.

α_j : La fonction de forme associée au nœud j du domaine.

En remplaçant (III.15) dans (III.14), on aboutit à :

$$\sum_{j=1}^{N_n} \left[\iint \frac{v}{r} (\overrightarrow{\text{grad}} \alpha_i) \cdot (\overrightarrow{\text{grad}} \alpha_j) dr dz \right] A_j + \sum_{j=1}^{N_n} \left[\iint \frac{\sigma}{r} (\alpha_i \cdot \alpha_j) dr dz \right] \frac{\partial A_j}{\partial t} = \iint (\alpha_i \cdot J_s) dr dz \quad (\text{III.16})$$

Avec :

i,j : Entiers naturels, variant de 1 à N_n .

Le système matriciel obtenu de (III.16) est de la forme :

$$[K] [A] + \frac{\partial}{\partial t} [M] [A] = [F]$$

Avec :

$$K_{ij} = \iint \frac{v}{r} (\overrightarrow{\text{grad}} \alpha_i) \cdot (\overrightarrow{\text{grad}} \alpha_j) dr dz$$

$$M_{ij} = \iint \frac{\sigma}{r} (\alpha_i \cdot \alpha_j) dr dz$$

$$F_i = \iint (\alpha_i \cdot J_s) dr dz$$

Le maillage utilisé est un maillage triangulaire du premier ordre, tel que le montre la figure (III.1) :

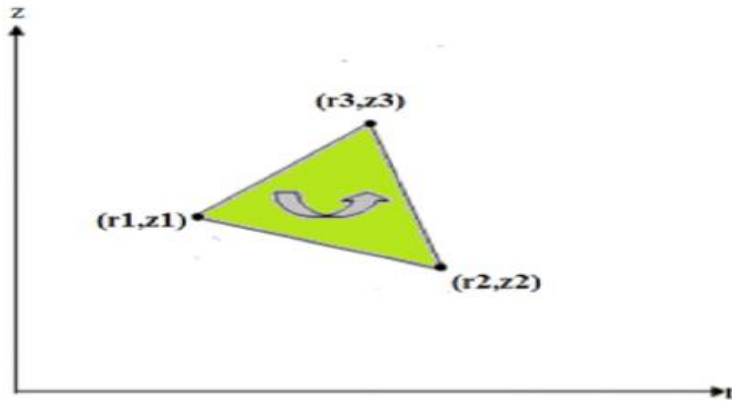


Figure.III.1: Élément triangulaire du premier ordre [53].

$$\alpha_i = (a_i + b_i r + c_i z)$$

Avec :

$$a_1 = (r_2 z_3 - r_3 z_2) / 2\Delta_e$$

$$b_1 = (z_2 - z_3) / 2\Delta_e$$

$$c_1 = (r_3 - r_2) / 2\Delta_e$$

Où :

Δ_e : Air du triangle

a_i, b_i, c_i : Coefficients représentant les poids des fonctions d'interpolation obtenus par permutation circulaire.

On obtient alors :

$$K_{ij} = (b_i b_j + c_i c_j) \cdot \frac{\Delta_e}{r}$$

$$F_i = \frac{\Delta_e}{3} J_s$$

$$M_{ij} = \begin{cases} \frac{\sigma \Delta_e}{6r} & \text{si } i = j \\ \frac{\sigma \Delta_e}{12r} & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3$$

III.5. Discrétisation temporelle

La méthode de discrétisation pas à pas utilisée dans la résolution des problèmes transitoires consiste à discrétiser la variable temporelle en instants $t_1, t_2, t_3, \dots, (t_{k+1} = t_{k+\Delta t}), \dots$. Régulièrement et à évaluer l'inconnue pour chacun de ces instants, en utilisant un schéma de discrétisation faisant intervenir les paramètres et les solutions des inconnues durant les instants précédents. La précision de la solution dépend essentiellement de la discrétisation temporelle, et du pas de temps. La discrétisation temporelle générale de la dérivée est exprimée par l'expression du premier ordre pour le potentiel vecteur magnétique.

$$\frac{(A_z^*)^{t+\Delta t} - (A_z^*)^t}{\Delta t} \cong \theta \left(\frac{\partial A_z^e}{\partial t} \right)^{t+\Delta t} + (1 - \theta) \left(\frac{\partial A_z^e}{\partial t} \right)^t \quad (\text{III.17})$$

Avec :

Valeur de θ	0	1	1/2	2/3	0.878
Schéma de discrétisation	Euler explicite	Euler implicite	Crank-Nicholsan	Galerkine	Lineger

Tableau III.1: Schéma de discrétisation temporelle.

D'après l'expression (III.17) on a :

$$\theta [K]\{A\}_{t+\Delta t} + \theta [M] \left\{ \frac{d\{A\}}{dt} \right\}_{t+\Delta t} = \theta \{F\}_{t+\Delta t} \quad (\text{III.18})$$

et :

$$(1 - \theta)[K]\{A\}_t + (1 - \theta)[M]\left\{\frac{d\{A\}}{dt}\right\}_t = (1 - \theta)\{F\}_t \quad (\text{III.19})$$

Donc :

$$\begin{aligned} \theta [K]\{A\}_{t+\Delta t} + \theta [M]\left\{\frac{d\{A\}}{dt}\right\}_{t+\Delta t} + (1 - \theta)[K]\{A\}_t(1 - \theta)[M]\left\{\frac{d\{A\}}{dt}\right\}_t \\ = \theta\{F\}_{t+\Delta t} + (1 - \theta)\{F\}_t \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Ensuite :

$$\begin{aligned} \theta [K]\{A\}_{t+\Delta t} + \frac{[M]}{\Delta t}\{A\}_{t+\Delta t} = \left(- (1 - \theta)[K] + \frac{[M]}{\Delta t}\right)\{A\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t} + \\ (1 - \theta)\{F\}_t \end{aligned} \quad (\text{III.21})$$

$$\begin{aligned} \theta [K]\{A\}_{t+\Delta t} + [M]\frac{\{A\}_{t+\Delta t} - \{A\}_t}{\Delta t} = - (1 - \theta)[K]\{A\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t} + \\ (1 - \theta)\{F\}_t \end{aligned} \quad (\text{III.22})$$

$$\begin{aligned} \left(\theta [K] + \frac{[M]}{\Delta t}\right)\{A\}_{t+\Delta t} = \left(- (1 - \theta)[K] + \frac{[M]}{\Delta t}\right)\{A\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t} + \\ (1 - \theta)\{F\}_t \end{aligned} \quad (\text{III.23})$$

$$[S]_{t+\Delta t}\{A\}_{t+\Delta t} = [S]_t\{A\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t} + (1 - \theta)\{F\}_t \quad (\text{III.24})$$

On aboutit à l'expression à implémenter sous pdeTool :

$$\{A\}_{t+\Delta t} = [S]_{t+\Delta t}^{-1}([S]_t\{A\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t} + (1 - \theta)\{F\}_t) \quad (\text{III.25})$$

Avec :

Δt : le pas de temps.

$[A]_{t+\Delta t}$: est le vecteur correspondant aux valeurs du potentiel magnétique aux nœuds du maillage à l'instant (t) et $[A]_t$ sa valeur à l'instant précédant (t - Δt).

III.6. Calcul des grandeurs globales

Le modèle électrique équivalent de la TSFE peut être décrit comme suit :

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt} \quad (\text{III.26})$$

$$v_2(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} - R_2 \cdot i_2(t) - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (\text{III.27})$$

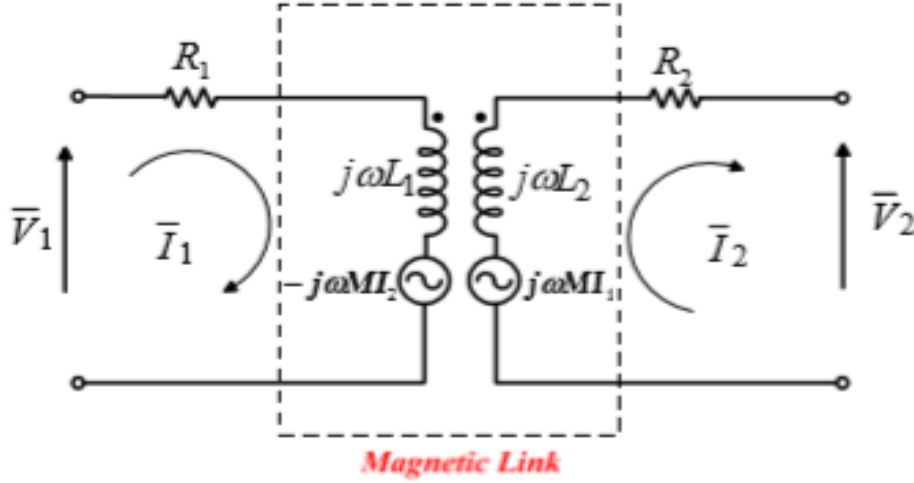


Figure.III.2: Circuit électrique du système étudié [2].

III.6.1. Calcul de la tension (f.e.m) de la bobine réceptrice

$$e_2 = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\iint_{s_2} \vec{B} \cdot d\vec{s}}{dt} = \frac{\iint \text{rot } \vec{A} \cdot d\vec{s}}{dt} = \frac{\int_c \vec{A} \cdot d\vec{l}}{dt} \quad (\text{III.28})$$

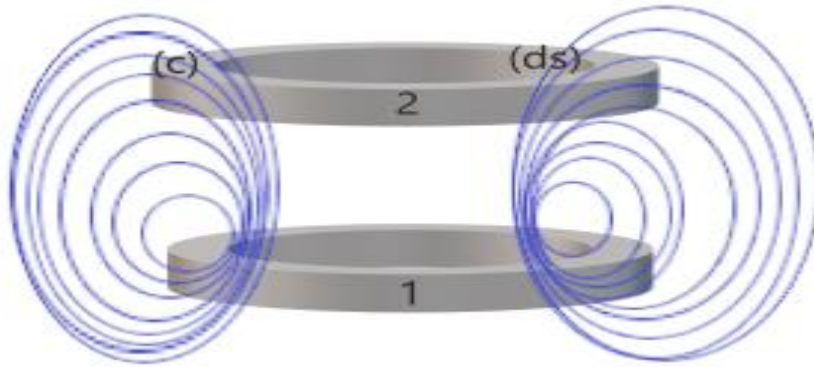


Figure.III.3: Schéma représentatif des répartitions des lignes de champ sur un contour fermé.

III.6.2. Calcul de la densité de courant et le (courant) de la bobine réceptrice

$$J_s = (\sigma \cdot V) / (2 \cdot \pi \cdot r_{moy}) \quad (\text{III.29})$$

III.6.3. Calcul de la puissance de la bobine réceptrice

$$P_2 = I_p * e_2 \quad (\text{III.30})$$

III.7. Conclusion

Ce chapitre a été essentiellement consacré à la présentation du logiciel pdetool et à la formulation des équations électromagnétiques en terme du potentiel vecteur magnétique en coordonnées cylindriques, et à leurs formulation en éléments finis, ce qui nous a permis au final d'obtenir l'équation de la magnétodynamique transitoire régissant notre modèle d'étude. En outre cet avant dernier chapitre a été aussi consacré à la détermination des grandeurs globales.

Chapitre IV

Application et résultats de simulation

IV.1. Introduction

Ce dernier chapitre de notre mémoire sera dédié essentiellement à la présentation des résultats des simulations et aux interprétations qui leur sont appropriés, ces derniers concernent l'évolution de la tension et du courant dans la bobine réceptrice, ainsi que la répartition des lignes du potentiel vecteur magnétique en fonction de la distance entre les deux bobines.

IV.2. Modèle géométrique

La géométrie étudiée est composée de deux bobines plates cylindriques pancake identiques (émetteur et récepteur), et de deux plaques de ferrites circulaires qui recouvrent entièrement les bobines comme un blindage magnétique. La Configuration géométrique et les caractéristiques géométriques des deux bobines ainsi que la distance qui les sépare sont représentés dans la figure (IV.1) et le tableau (IV.1) respectivement.

IV.2.1. Configuration géométrique du système étudié

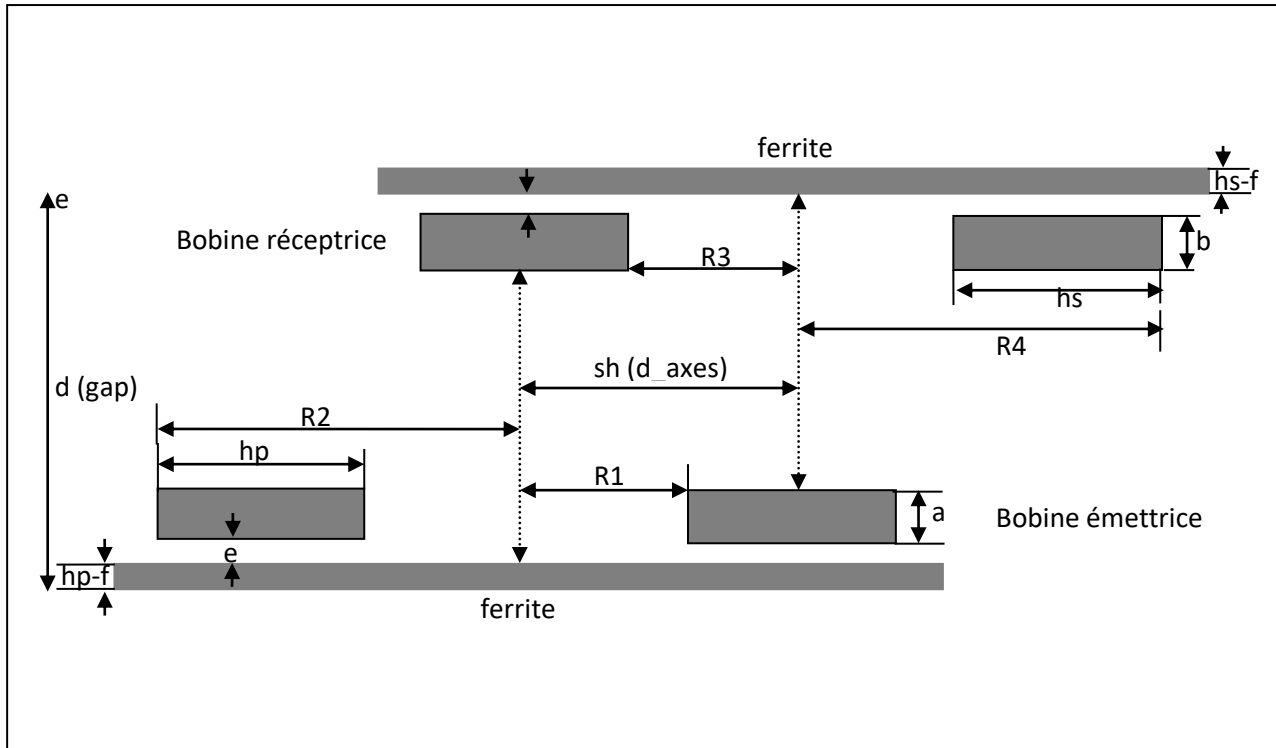


Figure IV.1: Configuration géométrique du système étudié.

Sous l'environnement MATLAB pdetool, on a programmé les commandes des éléments finis en 2D appropriées à notre système de TSFE en se basant sur un maillage triangulaire, comme le montre la figure (IV.2).

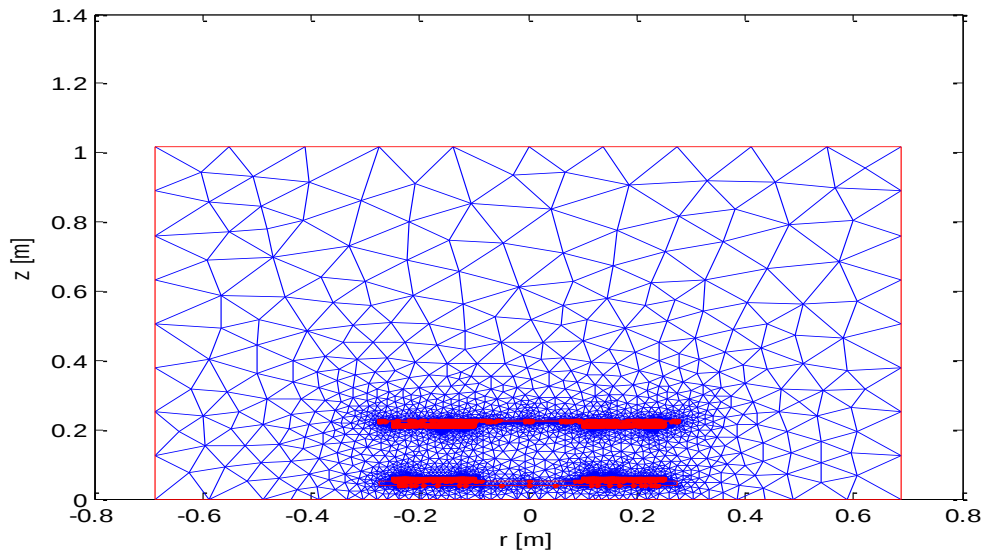


Figure IV.2: Maillage du domaine d'étude

IV.2.2. Les caractéristiques géométriques du système étudié

coté	Type	Paramètre	Valeur	Unité
Emetteur	Bobine	R1	100×10^{-3}	m
		R2	250×10^{-3}	m
		hp	150×10^{-3}	m
		S1	855×10^{-6}	m ²
		a	S1 / hp	m
		N1	20	/
	Ferrite	hp_f	10×10^{-3}	m
Espacement	Epaisseur entrefer	e	5×10^{-3}	m
	Vertical	d (gap)	Variable	m
	Horizontal	sh (d_axes)	Variable	m
Récepteur	Bobine	R3	100×10^{-3}	m
		R4	250×10^{-3}	m
		hs	150×10^{-3}	m
		S2	855×10^{-6}	m ²
		b	S2/ hs	m
		N2	20	/
	Ferrite	hs_f	5×10^{-3}	m

Tableau IV.1: Données géométriques du système étudié.

IV.2.3. Les caractéristiques physiques du dispositif

Perméabilité absolue : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$.

Perméabilité relative : $\mu_r = 1$.

Perméabilité de ferrite : $\mu_{r \text{ ferrite}} = 2000 \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$.

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

Fréquence d'alimentation : $F_r = 30 \cdot 10^3 \text{ [Hz]}$.

Pulsation : $\omega = 2\pi \cdot F_r \text{ [rad/s]}$.

Courant d'alimentation : $I_1 = 40 \text{ [A]}$.

La tension d'alimentation : $V = 50 \text{ [V]}$.

Le rayon moyen : $r_{\text{moy}} = (R_1 + R_2)/2 \text{ [mm]}$.

Densité de courant d'alimentation : $J_s = \sigma \cdot V / (2\pi \cdot r_{\text{moy}}) \text{ [A.m}^{-1}\text{]}$.

IV.2.4. Les paramètres de pdetool

Paramètres Régions	c	a	f
Air	$1/\mu_0$	0	0
Bobine émettrice	$1/\mu_0$	0	+Jsp
Bobine réceptrice	$1/\mu_0$	σ	0
Ferrite	$1/\mu_0 \cdot \mu_{r \text{ ferrite}}$	0	0

Tableau IV.2: Les équations attribuées aux différentes régions du modèle.

IV.3. Résultats de simulation

Après l'étape de la résolution vient celle de la collecte des résultats, dans notre travail nous nous intéressons à la présentation des allures des courants et des tensions, dans les bobines émettrice et réceptrice, ainsi que celles de la répartition des lignes du potentiel vecteur magnétique, pour chaque variation des paramètres de positionnement "sh" et "d" qui représentent respectivement la distance inter axe et l'entrefer.

Premier cas :

Dans le premier cas, pour un sh= 0 m, on effectue 3 simulations correspondantes à la variation de d comme suit: d=0,05 m, d= 0.1m, d= 0.15m.

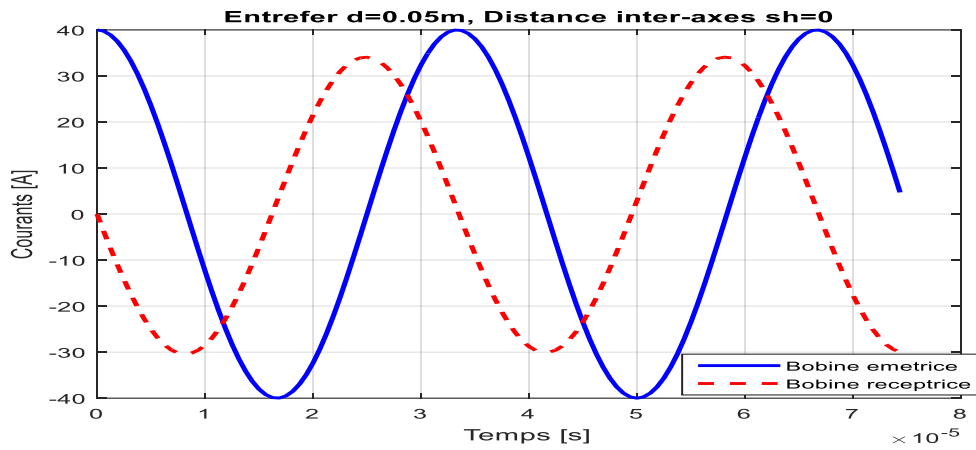


Figure IV.3: Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

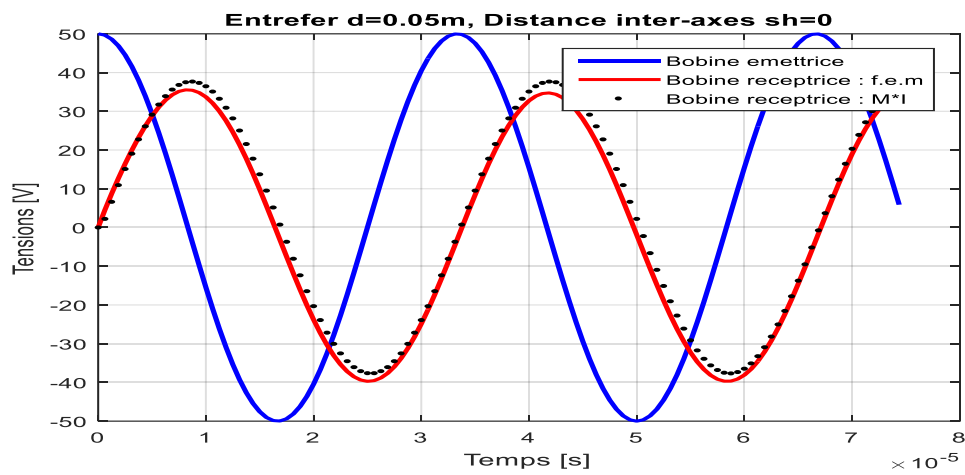


Figure IV.4: Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

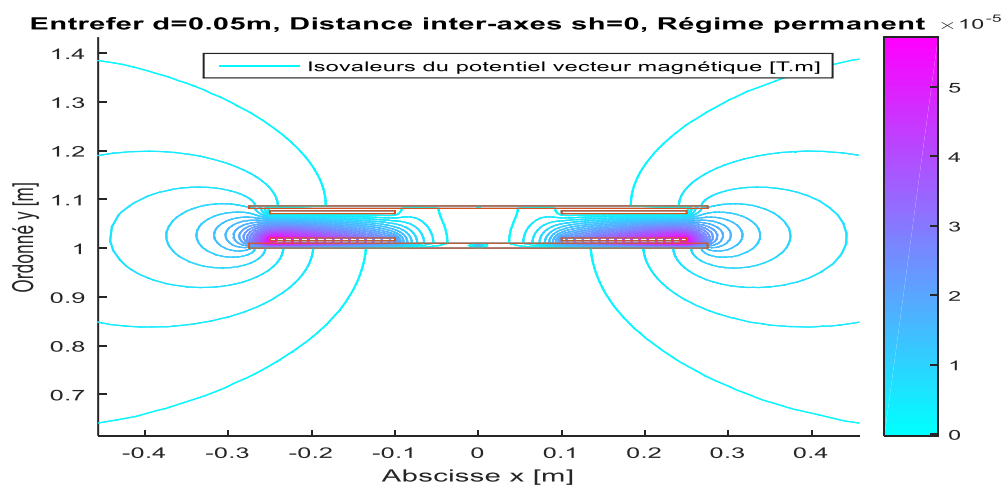


Figure IV.5: Potentiel vecteur magnétique.

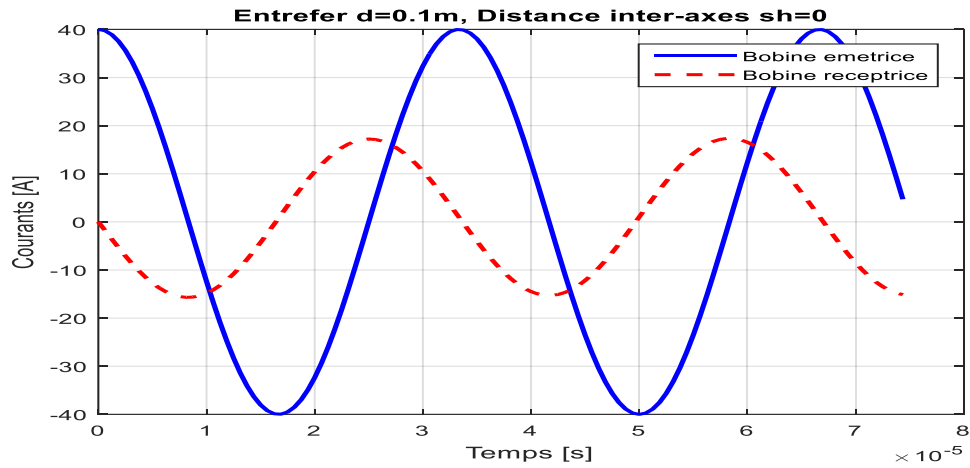


Figure IV.6: Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

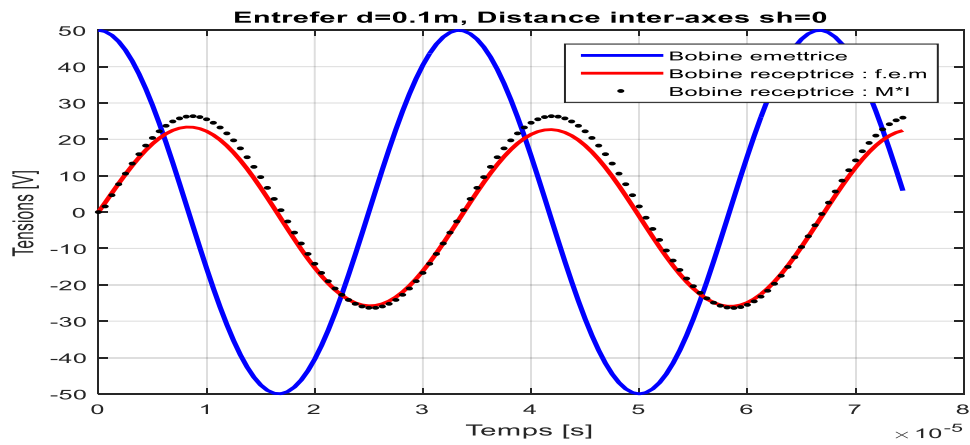


Figure IV.7: Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

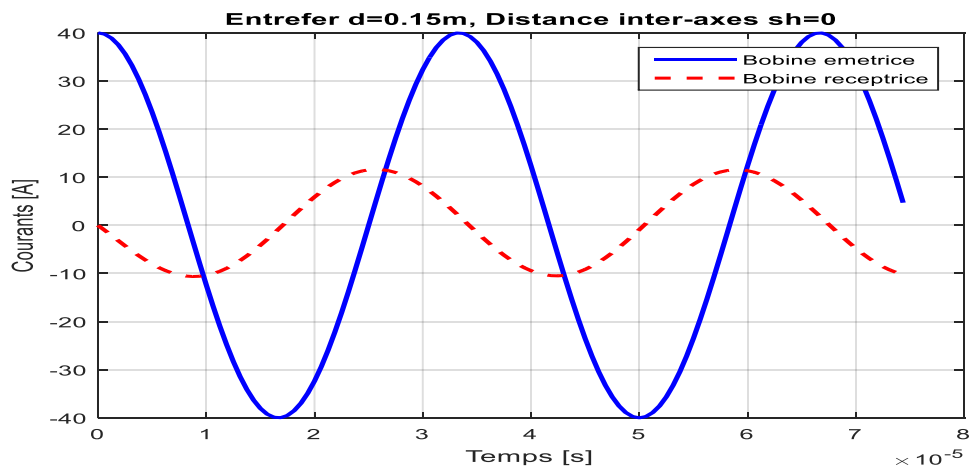


Figure IV.8: Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

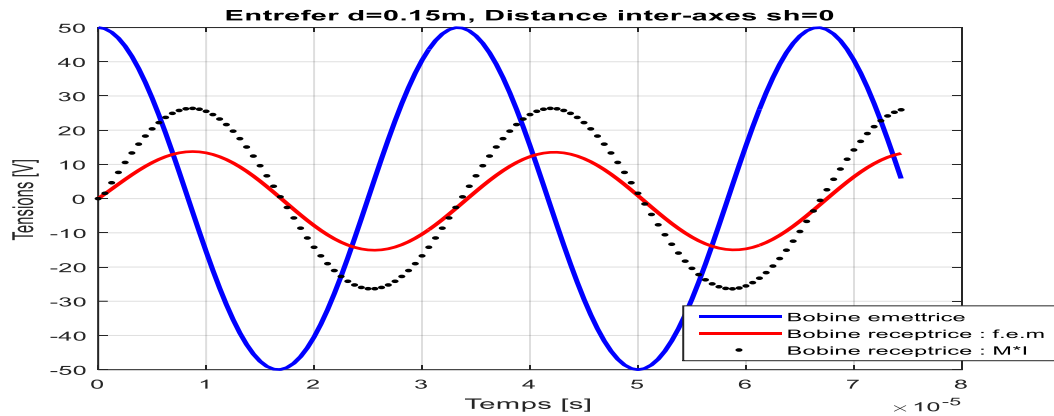


Figure IV.9: Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

Deuxième cas :

Dans le deuxième cas, pour $d=0,05$ m, on effectue 2 simulations correspondantes à la variation de sh comme suit: $sh= 0.1$ m, $sh= 0.2$ m.

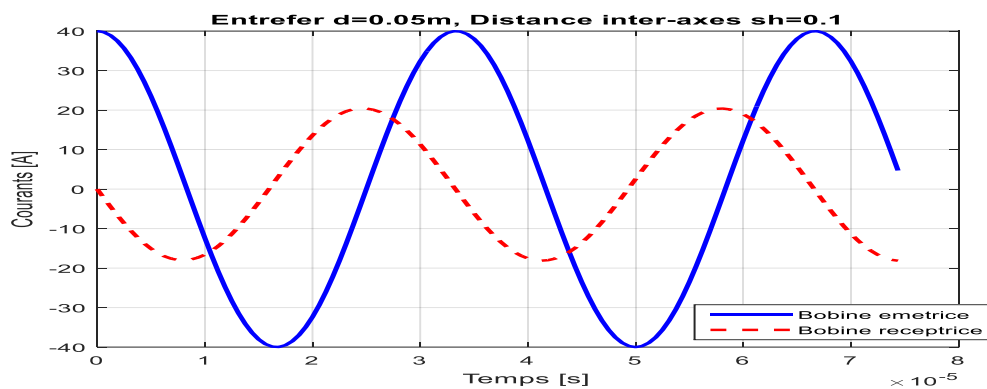


Figure IV.10: Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps

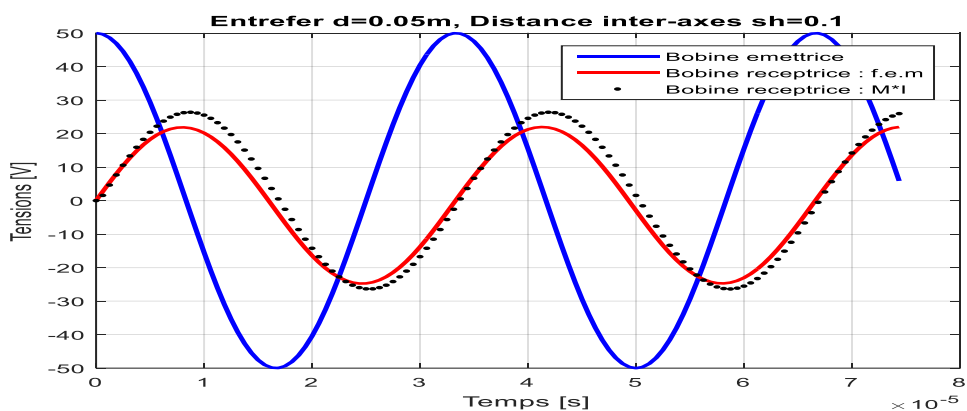


Figure IV.11: Force électromotrice dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

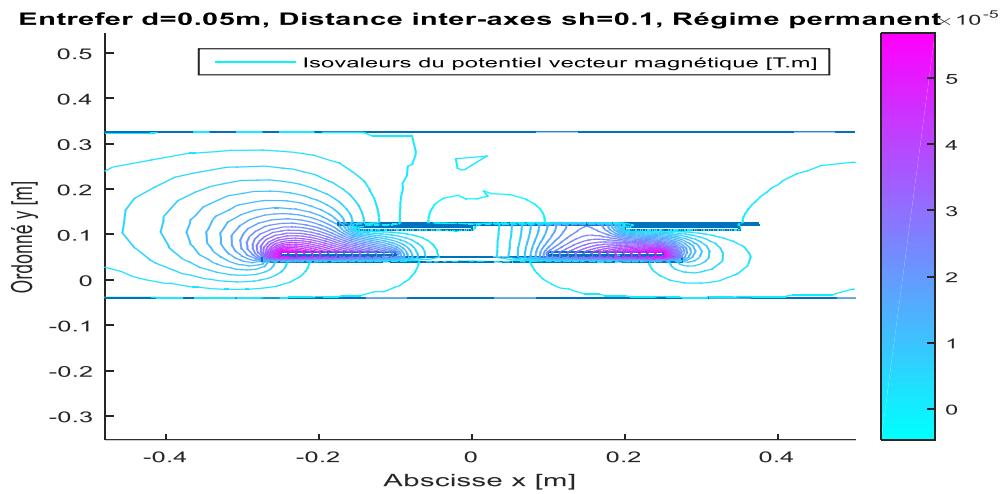


Figure IV.12: Potentiel vecteur magnétique.

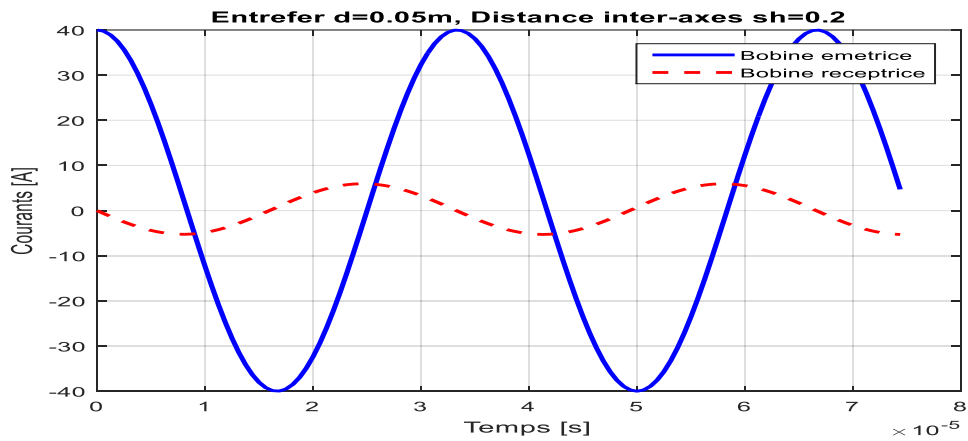


Figure IV.13: Courants dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

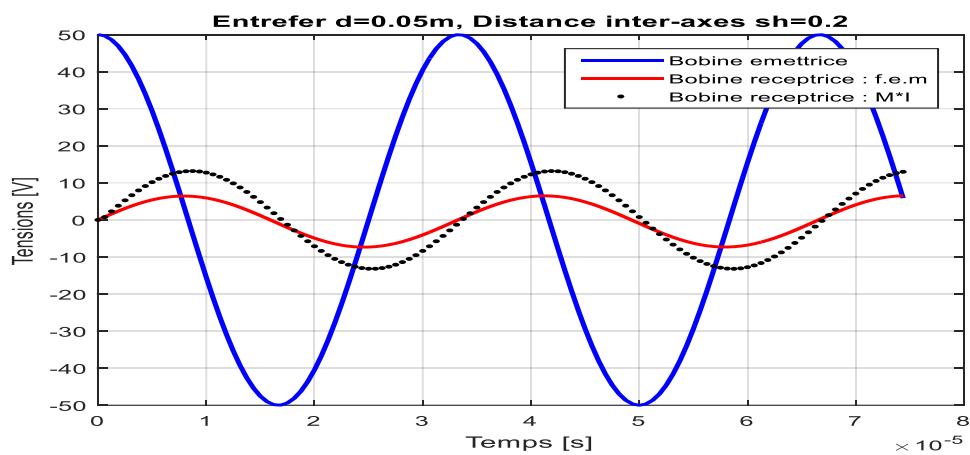


Figure IV.14: Tensions dans les bobines émettrice et réceptrice en fonction de temps.

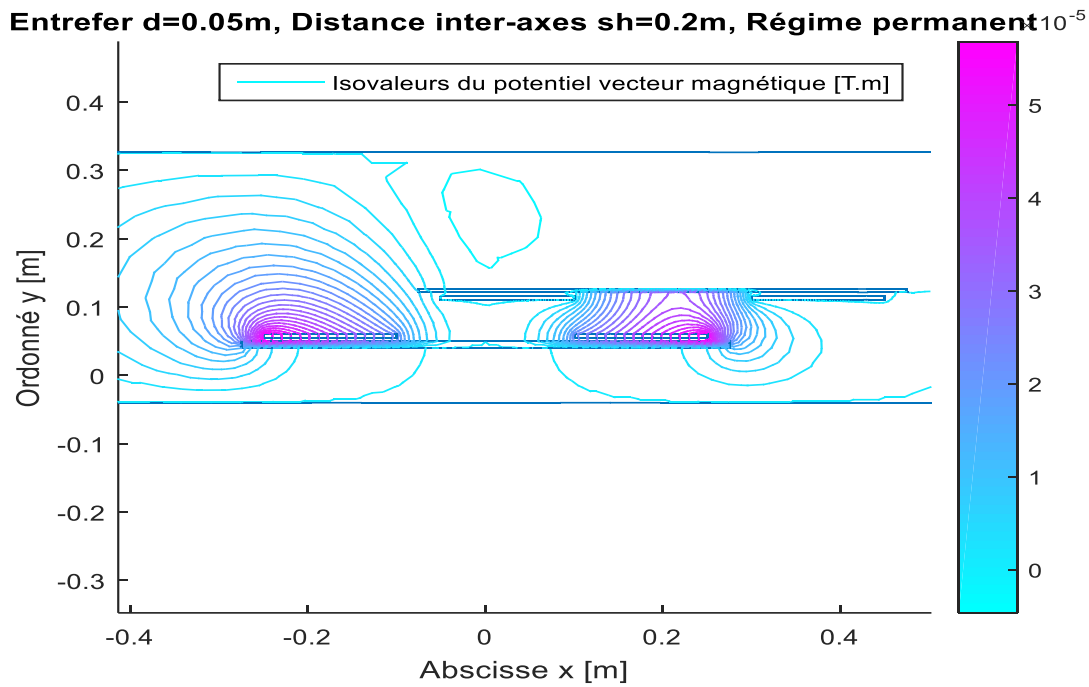


Figure IV.15: Potentiel vecteur magnétique.

IV.4. Interprétation des résultats

Dans les figures (IV.3) (IV.4) on voit clairement que le courant et la f.e.m dans la bobine réceptrice ont la même forme (sinusoïdale) que ceux de la bobine émettrice, et qu'ils ont une amplitude légèrement différente, donc on constate que le courant et la f.e.m induits sont importants, et donc on en déduit que la quantité d'énergie transmise est importante.

La figure (IV.5) montre que les lignes du champ magnétique en régime permanent sont refermées sur la surface du dispositif, donc la bobine réceptrice capte parfaitement toutes les lignes du champ magnétique générées par la bobine émettrice, et donc on a un transfert d'énergie efficace.

D'après les figures (IV.6) (IV.7) (IV.8) (IV.9) (IV.10) (IV.11) (IV.13) (IV.14), il est clairement notable que plus les distances " d " et " sh " sont grande plus le courant et la f.e.m induits sont en dégradation en terme d'amplitude. Donc on constate qu'avoir un grand entrefer ou même une grande distance inter-axes entre les bobines émettrice et réceptrice agit négativement sur l'efficacité du transfert d'énergie électrique.

Les figures (IV.12) et (IV.15) montrent que les lignes du champ magnétique ne sont pas refermées sur toute la surface du dispositif, donc elles ne sont pas entièrement captées par la bobine réceptrice, dans ce cas le transfert d'énergie n'est pas efficace.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des distances (qu'elles soient horizontales ou verticales) entre les bobines d'un dispositif du transfert sans fil d'énergie sur la f.e.m induite ainsi que sur le courant induit, et le potentiel vecteur magnétique.

L'ensemble des résultats obtenu confirment que la quantité d'énergie transmise dépend des paramètres de positionnement d et sh , et que le transfert d'énergie optimal s'obtient pour de faibles distances entre l'émetteur et le récepteur (principe de transfert d'énergie par induction).

. Conclusion générale

Conclusion générale

La transmission sans fil d'énergie électrique a été initiée dans les années soixante afin de répondre à des besoins énergétiques. Un demi-siècle plus tard cette technologie est devenue une réalité qui a su faire une place dans plusieurs domaines grâce à sa simplicité et sa fiabilité. Cette étude a traité l'aspect théorique qui permet de bien décrire le phénomène physique de la TSFE.

Ce projet a fait l'objet d'une étude électromagnétique détaillée du système de transfert sans fil d'énergie électrique en se basant sur la méthode des éléments finis 2D, dans le but de calculer la f.e.m induite dans un dispositif de TSFE électrique, le système étant constitué de deux bobines plates cylindrique (pancake) identiques, entièrement recouvertes des plaques de ferrites comme un blindage magnétique sous une fréquence de 30 KHZ.

L'étude faite au cours de ce projet a mis en évidence l'influence des paramètres de positionnement "d" et "sh" qui représentent respectivement l'entrefer et la distances inter-axes entre les bobines du système émetteur, sur la répartition des lignes du champ et sur l'amplitude du courant et de la f.e.m induits dans ce système, et cela pour aboutir aux meilleurs paramètres qui donnent un transfert d'énergie optimal.

Les résultats trouvés lors de la simulation effectuée sous l'environnement MATLAB pdetool confirment le principe de l'induction électromagnétique expérimenté par Michael Faraday, ainsi que la théorie du transfert sans fil d'énergie par la technique du couplage inductif. Dans un système de transfert sans fil d'énergie par couplage inductif, la distance séparant l'émetteur du récepteur doit être faible (quelques centimètres).

Le dispositif de transfert sans fil d'énergie étudié au cours de notre projet, peut être adapté aux applications qui utilisent la techniques de transmission sans fil d'énergie, par induction magnétique comme pour la recharge d'un téléphone portable, aussi bien que pour la recharge de la voiture électrique ou hybride.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] M.Faraday, « On the Various forces of nature », publié par Vigyan Prasar, New Delhi,2003.
- [2] M.Ibrahim, "Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicles: Electromagnetic Modeling and Interoperability Analysis", Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme du Doctorat en génie électrique, Université Paris-Sud, Ecole Doctorale Sciences et Technologie de l'Information, des Télécommunications et des Systèmes, 09 décembre 2014.
- [3] P.Meyer, « Modeling of Inductive Contactless Energy Transfer Systems », Thèse de doctorat en sciences, École polytechnique fédérale de Lausanne, 25 Septembre 2012.
- [4] <https://sites.google.com/site/lelectricitesansfil/tpe/2-historique-et-principe/1-historique> , (consulté le 10 octobre 2020).
- [5] <https://www.connaissancedesenergier.org/fiche-pedagogique/nikola-tesla>, (consulté le 13 octobre 2020).
- [6] <https://teslasciencecenter.org/history/tower/> (consulté le 24 octobre 2020).
- [7] 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.
- [8] WC.Brown, « The history of the development of the rectenna ». In Proc. SPS Microwave Systems Workshop at JSC-NASA, pages 271–280,1980.
- [9] G.Maryniak, « Status of international experimentation in wireless power transmission ». Sunset energy counsel, Solar energy, Vol. 56, 1996.
- [10] A.Lhafhaf, A.El Alaoui, M.El Jalouli, D.Materred, et G.Obdam, (2014).Recharge sans fil des téléphones mobiles.Repéréà : https://thierryperisse.free.fr/documents/projet_line1/projets-L3EEAREL/projet-Thierry/projet-chargeur-batterie-smartphone/SPI_FIPA17_Chargeur_sans_fil_de_telephones_mobiles.pdf, (consulté le 25 octobre 2020).
- [11] V.Marian, « Transmission d'énergie sans fil. Application au réveil à distance de récepteurs en veille zéro consommation », Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 21 Novembre 2012.

- [12] M.Boudjema, " Etude Electromagnétique du Transfert Sans Fil d'Energie par voie de Couplage Inductif Résonant Série-Parallèle", Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en électrotechnique, Université Abderrahmane mira -Bejaia Faculté de Technologie, 2016/2017.
- [13] X.Zhang, Y.Zhao, S.L.Ho, and W.N.Fu , « Analysis of Wireless Power Transfer System Based on 3-D Finite-Element Method Including Displacement Current »,October 2012.
- [14] A.Caillierez," Etude et mise en œuvre de l'énergie électrique par induction: application à la route électrique pour véhicules en mouvement", Thèse de doctorat en génie électrique, Université Paris-Saclay, 2016.
- [15] B.Bouchebbah et N.Benniche , " Étude et modélisation du Transfert Sans fil d'Énergie électrique en Continu", Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira -Bejaia Faculté de Technologie, 2018.
- [16] F.Jolani «Wireless Power Transfer via magnetic resonant coupling », Submitted in partiel fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Dahlousie University, August 2015.
- [17] A.Bouacida, "Chargeur de batteries sans fil pour voiture électrique géré par PIC16F877", Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en électronique, Université Badji Mokhtar- Annaba, Faculté : Sciences de l'Ingéniorat, 2018.
- [18] 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.
- [19] I.Guious, M.Foul, "Calcul analytique en 3D des inductances mutuelles dans les systèmes de recharge sans contact pour le véhicule électrique",Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Electromécanique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie, 2019.
- [20] J.Cooley , J.Giguere, D.Perez, « Wireless Charging of Mobile Systems », Institute in Partial Fulfillment of the Requirements for a Degree in Bachelor of Science in Electrical and Computer Engineering, 30 April 2015.

- [21] I.Medjebar ,G.Ouinharoun, « Transmission sans fils d'énergie électrique par voie d'induction magnétique ». Diplôme de master génie électrique Bejaia Université Abderrahmane Mira, 2016.
- [22] "L'électricité sans fil, bientôt une réalité quotidien", Mars 2018, <https://www.energystream-wavestone.com/2018/03/lelectrice-fil-bientot-realite-quotidien/>,(consulté le 24 Novembre 2020).
- [23] «Chauffage par induction bobines d'induction », AMBRELL Precision Induction Heating, 411-0168-13 Rév. A, www.ambrell.fr.
- [24] F.Zhang, X.Liu, S.A.Hackworth, R. J.Sclabassi, and M.Sun, "In Vitro and In Vivo Studies on Wireless Powering of Medical Sensors and Implantable Devices", IEEE-NIH 2009 Life Science Systems and Applications Workshop, Bethesda, Maryland, USA, Apr. 9-10, 2009.
- [25] B.Laroussi, « transmission d'énergie par couplage inductif. Applications aux capteurs biomédicaux intégrés », Symposium de Génie Electrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE 2014, ENS Cachan, France, 8-10 Juillet 2014.
- [26] "World's first wireless cardiac pacing system ce approval",<https://pumpingmarvellous.org/world's-first-wireless-cardiac-pacing-system> ,(consulté le 27 November 2020).
- [27] Livre Pédagogique « L'imagerie médical ».
- [28] M.Beladgham ,« Construction d'une technique d'aide audiagnostic en imagerie medicale. Application à la compression d'images »,Thèse de doctorat en électronique, Université Abou-Beker Belkaid-Tlemcen, Décembre 2012.
- [29] <http://www.fr.inomed.com/produits/diagnostic/la-stimulation-cerebrale-non-invasive> , consulté le 27 Novembre 2020.
- [30] <http://www.cinq.ulaval.ca/TMS> , consulté le 27 Novembre 2020.
- [31] https://fr.123rf.com/photo_74734478_cool-sch%C3%A9ma-d-illustration-incroyable-d-une-voiture-%C3%A9lectrique-charge%C3%A9-%C3%A0-la-station-de-chargeur-montra.html , consulté le 28 Novembre 2020.

- [32] J-R. Sibue, "Conception de systèmes d'alimentation sans contact pour la traction ferroviaire", Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Grenoble, 7 août 2008.
- [33] <https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/keolis-operates-a-new-brt-in-amiens-with-43-irizar-electric-buses/> , consulté le 29 Novembre 2020.
- [34] K.Belghitri, "Contribution à la modélisation par la méthode des réseaux de reluctances (MRR) d'une machine à reluctance variable", thèse présentée en vue d'obtention du diplôme de doctorat en science en Electrotechnique, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014/2015.
- [35] O.Ronnback, "Optimization of Wireless Power", Master of Science in Engineering Technology, Luleå University of Technology, 2013.
- [36] C.Akyel, S. I.Babic, and M.-M. Mahmoudi, " Mutual inductance calculation for non coaxial circular air coils with parallel axes", Ecole Polytechnique, Canada,2009.
- [37] A.O.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, le 28/06/2016.
- [38] J-C.Sabonnadiere, J-L.Coulomb "CAO en électrotechnique", Editeur Hermès, Paris 1985.
- [39] S.Bouguedah, "Inversion par optimisation appliquée au contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF)", mémoire présentée en vue d'obtention du diplôme de Master en génie électrique, Université Larbi Ben M'hidi Oum el Bouaghi, 2016/2017.
- [40] A.Diche, « développement de modèles de transformation pour l'étude des capteurs a courants de Foucault », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Avril 2003.
- [41] M.Rachek, « Modélisation analytico-numérique d'inducteurs axisymétriques alimente en moyenne fréquence », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Avril2001.
- [42] H.Mohellebi, « Elaboration des modèles 2D analytico-numérique pour l'étude des systèmes comportants des pièces en mouvement ».Thèse de Doctorat d'état, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2001.

-
- [43] Y.Belkhiri, "Etude des phénomènes d'induction électromagnétique liés au voisinages 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.
- [44] K.J.Bennis, P.J.Lawrenson, C.W.Trowbridge, «The analytical and Numerical Solution of Electric and magnetic Fields »John Wileys & Sons Ltd, ISBN-0 471 192460, 1992.
- [45] B.Thidé, «Electromagnetic field theory», edition Epsilon, Uppsala, 2001.
- [46] S.Ratnajeevan, H.Hoole «Finite Elements Electromagnetics And Design »,1995.
- [47] S.Charif et DJ.Ould Slimane," Modélisation 2-D par Eléments finis des transformateurs de distribution par couplage fort Magnétique-Circuit Electrique et Magnétique-Densité de courant", mémoire présentée en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2008/2009.
- [48] K.Srairi, B.Bendjima and M.Féliachi , « Coupling Models for analizing dynamic behaviors of Electromagnetic Actuators »,ELECTRIMACS'96 Conference , Paper Number 83 Septembre 17-19, pp. 467-472, 1996 Saint-Nazaire , France.
- [49] B.Bendjima, K.Srairi and M.Féliachi , «Modeling of Magnetic and Mecanical transient Phenomena in an Electromagnetic forming System » ELECTRIMACS'96 Conference , Paper Number 83 Septembre 17-19, pp. 217-221, 1996 Saint-Nazaire , France.
- [50] G.Dhatt, G.Touzot, «Une présentation de la méthode des éléments finis ».2^{ème} édition, Maloine, S.A.Paris,1984.
- [51] J-C.Sabonnadiere, J-L.Coulomb, « CAO en électrotechnique ».Hermès publishing, 1985.
- [52] M.A.Handala, «Calcul numérique du champ et potentiel électriques dans l'air en configuration pointe-plan », mémoire présentée en vue d'obtention du diplôme de fin d'étude en Electrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou,2012.
- [53] F.Abba, S.Aliouane, «Modélisation électromagnétique par élément finis 2D d'un générateur linéaire tubulaire utilisé pour la récupération de l'énergie des vagues »,Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 3 avril

