



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Présenté par :

Messaad BOUDJEMA

pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option :

ENERGIE RENOVELABLE

Thème

***Etude Electromagnétique du Transfert
Sans Fil d'Energie par voie de Couplage
Inductif Résonant Série-Parallèle***

Encadré par :

Pr. Bachir MAUCHE

Année universitaire 2016/2017

Remerciements

Un énorme merci en premier lieu au **Pr. Bachir Maouche**, qui a orienté ce travail. Ses propositions sur les méthodes d'apprentissage, les méthodes de recherche et le développement de personnalité vont me donner beaucoup d'avantage dans ma vie. Je remercie les membres de juré pour avoir accepté de jurer ce travail.

Un merci particulier à mes **parents**, ainsi mes **sœurs** et **frères** qui m'en soutenue tout au long de mon parcours d'études et pour leur amours et encouragements.

Dédicaces

Je dédié ce travail à :

- **Mes parents,**
- **Mes sœurs Mebarka et Dyhia,**
- **Mes frères Ameziane et Massinissa,**
- **A tous ceux qui contribuent à rendre le monde meilleur.**

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Sommaire	III
Liste des figures et tableaux	VI
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le Transfert Sans Fil d’Energie Electrique ..	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. Etat de l’art sur le transfert sans fil d’énergie.....	5
I.2.1. Historique	5
I.2.2. Développement du concept de TSFE	5
I.3. Objectif de TSFE	6
I.3.1. Problématique.....	6
I.3.2. Objectif	6
I.4. Généralités sur le TSFE	7
I.4.1. Définition.....	7
I.4.2. Recharge sans fil.....	7
I.4.3. Principe de transfert d’énergie sans fil	7
I.4.4. Vecteurs de transfert d’énergie sans fil.....	8
I.5. Technique de TSFE	9
I.5.1. Induction magnétique	9
I.5.2. Résonance magnétique	9
I.6. Couplage de deux bobines.....	10
I.6.1. Couplage inductif standard.....	10
I.6.2. Couplage inductif par résonance.....	10
I.7. Exemple d’applications	11
I.7.1. Chauffage par induction	11
I.7.2. Magnétoformage	12
I.7.3. Recharge de batterie	13
I.7.4. Véhicule électrique.....	13

I.7.5. Application biomédical	14
I.8. Avantages et inconvénients de TSFE	15
I.8.1. Avantages	15
I.8.2. Inconvénients	15
I.9. Conclusion	16
Chapitre II : Modélisation électromagnétique du TSFE	17
II.1. Introduction	18
II.2. Généralité sur électromagnétisme	18
II.2.1. Equations de Maxwell général	18
II.2.2. Loi de Lenz-Faraday	18
II.3. Lois de comportement des milieux	19
II.3.1. Loi d'ohm	19
II.3.2. Relation magnétique	19
II.3.3. Relation diélectrique	19
II.4. Hypothèses simplificatrices	20
II.5. Equations électromagnétiques couplées	20
II.6. Système axisymétrique	21
II.9. Méthode de résolution	22
II.9.1. Expression du potentiel magnétique vecteur	23
II.9.2. Principe du couplage et équation élémentaire	23
II.9.3. Couplage inductif entre deux bobines	23
II.9.4. Tension de sortie	25
II.9.5. Couplage inductif avec capacités de compensation	26
II.9.6. Optimisation de la puissance	27
II.10. Conclusion	30
Chapitre III : Application et résultats	31
III.1. Introduction	32
III.2. Modèle géométrique	32
III.3. Couplage inductif sans compensation	33
III.3.1. Système à fort couplage inductif	33
III.3.2. Système à faible couplage inductif	35

III.4. Couplage inductif avec compensation	36
III.4.1. Système électromagnétique sans charge	36
III.4.1. Système électromagnétique avec charge	37
III.4. Influence de la distance entre bobines	39
III.5. Conclusion.....	41
Conclusion générale et perspectives	42
Références bibliographiques	44

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le Transfert Sans Fil d’Energie Electrique

Figure. I. 1 : Recharge sans contact pour appareils mobiles [6]	7
Figure. I. 2: Schéma de principe de TSFE.....	8
Figure. I. 3 : Différentes topologies de couplage par résonance [1]	10
Figure. I. 4 : Schéma de principe de chauffage par induction [9][10]	11
Figure. I. 5 : Schéma de principe de magnétoformage.....	12
Figure. I. 6 : Principe du transfert d’énergie sans fil	13
Figure. I. 7 : Principe de la recharge sans fil d’un véhicule électrique [6]	14
Figure. I. 8 : Schéma d’un dispositif électronique implantable biomédical	15

Chapitre II : Modélisation d’un système de TSFE

Figure. II. 1 : Géométrie de la bobine.....	21
Figure. II. 2 : Domaine d’étude	22
Figure. II. 3 : Schéma du système de couplage sans compensation	25
Figure. II. 4 : Schéma de couplage avec compensation	26

Chapitre III : Application et résultats de simulations

Figure.III. 1 : Modèle géométrique	33
Figure.III. 2 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (faibles fréquences).....	34
Figure.III. 3 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (fréquence importantes).....	34
Figure.III. 4 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (fréquences faibles).....	35
Figure.III. 5 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (fréquences importantes)	36
Figure.III. 6 : Evolution du rapport des tensions à vide en fonction de la fréquence	37
Figure.III. 7 : Evolution du rapport des tensions en charge en fonction de la fréquence	38
Figure.III. 8 : Evolution de la puissance en fonction de la fréquence.....	38
Figure.III. 9 : Evolution du rapport des tensions à vide en fonction de la distance. 39	
Figure.III. 10 : Evolution du rapport des tensions en charge en fonction de la distance	40

Liste des figures et tableaux

Figure.III. 11 : Evolution de la puissance en fonction de la distance..... 40

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Vecteurs de transfert d'énergie sans fil 9

Tableau III.1 : Paramètres géométriques du bobinage 32

Tableau III.2 : Paramètres électromagnétique..... 32

Introduction générale

Introduction générale

Au cours de la dernière décennie, le secteur technologique a connu une croissance rapide dans tous les domaines. Parmi ces domaines, on cite les systèmes de transfert sans fil d'énergie (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. On peut trouver alors les différentes applications ayant recours à ces systèmes ; domotique, santé, domaine militaire ou bien encore surveillance de phénomène environnementaux. [1]

Afin d'éviter les inconvénients des câbles, le TSFE à induction électromagnétique est une solution alternative intéressante offrant plus de souplesse. C'est une solution facile, robuste et résistante aux intempéries par rapport aux câbles généralement utilisés.

Aujourd'hui, pour des faibles distances, les dispositifs de TSFE à couplage inductif sont utilisés de plus en plus dans les produits de l'industrie et public pour l'alimentation sans contact. Cependant en raison de la limitation de la distance de transfert, cette technologie ne peut pas être utilisée car le rendement est extrêmement faible. Pour contourner cet inconvénient, on associe au système inductif des capacités de compensation. Le nouveau dispositif ainsi obtenu permet à travers la fréquence de résonance d'optimiser la puissance transmise et ainsi augmenter le rendement.

Dans ce travail, nous étudions le TSFE du point de vue électromagnétique et optimisation. Pour le calcul des résistances et des inductances, nous utilisons la méthode des circuits électriques couplées et pour l'optimisation nous exploitons le phénomène de résonance. Le modèle ainsi obtenu est transcrit sous MATLAB.

Le mémoire est composé de trois chapitres dont le premier chapitre consiste à présenter des généralités sur le transfert sans fil d'énergie électrique et ces différentes applications.

Dans le deuxième chapitre, nous traitons la modélisation électromagnétique du TSFE et son optimisation.

Le troisième chapitre est consacré à l'application du modèle développé à une configuration géométrique et électromagnétique du TSFE où nous exposons les différents résultats des couplages fort et faible ainsi que ceux obtenus pour les systèmes inductifs résonnants.

***Chapitre I : Généralités sur le Transfert
Sans Fil d'Énergie Électrique***

I.1. Introduction

Ces dernières années, Les appareils sans fil jouent clairement un rôle de plus en plus important dans notre vie quotidienne ainsi leurs développements. Les recherches scientifiques sont orientées vers les sources d'énergies dites renouvelable ou propre. Parmi ces énergies, le solaire, l'éolienne, les ondes électromagnétiques.

Dans ce chapitre, on s'intéresse particulièrement à la transmission sans fil d'énergie par induction, qui présente une solution intéressante et alternative pour avoir l'autonomie énergétique des dispositifs nomades ou bien les applications industrielles.

I.2. Etat de l'art sur le transfert sans fil d'énergie

I.2.1. Historique

Les prémices de transfert sans fil d'énergie sont attribuées à Heinrich Hertz grâce à ses expériences entre 1887 et 1888. Il construit un oscillateur produisant des étincelles de manière régulière. Cette expérience a prouvée l'existence d'émission et de réception d'ondes électromagnétiques. Ensuite Guglielmo Marconi utilisera les ondes en transmission radio.

Le concept de transporter l'énergie sans l'utilisation de câble, vient de Nikola Tesla en 1899. Il a réussi à allumer des lampes à distance. [2]

I.2.2. Développement du concept de TSFE

Dans les années 1960, William C. Brown a commencé à mener des expérimentations de TSFE avec des tubes micro-ondes tels que les magnétrons et les Klystrons.

Ensuite en 1963, il a développé une antenne rectificatrice pour la réception des ondes électromagnétiques et leurs conversions en tension continue, d'une puissance de sortie de 4 W et 7 W avec un rendement de 50% et 40% respectivement. De plus en 1964, il a effectué une démonstration d'une plateforme aéroportée qui volait à une altitude de 18 m alimentée à travers un faisceau micro-onde depuis le sol.

En 1975, la NASA a réussi un essai de 34 kW, sur une distance de 1.55km, en utilisant les micro-ondes à 2.45 GHz, avec un rendement de 54%.

A partir des années 1980, les problématiques de TSFE par micro-ondes ont suscités un réel intérêt au Japon, où des applications pratiques ont été démontrées en utilisant des technologies provenant des domaines des télécommunications et de télédétection radar. [3]

En 2006, Marin Soljacic et le laboratoire de recherche MIT (Massachusetts Institute of Technology) ont pu allumer une ampoule de 60W à 2m, d'un rendement de 40%. [2].

Aujourd'hui, plusieurs applications de TSFE ont été réalisées et sont utilisables. De nombreuses recherches sont entrain de se faire pour l'amélioration de la technique.

I.3. Objectif de TSFE

I.3.1. Problématique

Les dernières années ont été caractérisées par un développement massif d'une gamme variée de dispositifs électroniques portatifs, aussi bien dans le domaine du grand public, tels que les Smartphones ou les tablettes, mais aussi des applications industrielles, comme les réseaux de capteur sans fil, ou encore dans le domaine médical. [3]

L'un des problèmes les plus sensibles à résoudre réside dans la source d'énergie de ces dispositifs. Le plus souvent, l'utilisation des câbles d'alimentation n'est pas envisageable, au vue de leur nature « nomade ». L'autonomie de tels dispositifs est limitée par l'éphémère due à la durée de charge et de recharge.

I.3.2. Objectif

Afin de rendre les dispositifs électroniques plus autonomes, le concept de Transmission sans fil d'énergie se présente comme une solution alternative aux systèmes d'alimentations classiques. Il existe plusieurs forme d'énergie susceptibles d'être utilisées dans cette thématique de Transmission sans fil

tels que le solaire, vibratoire, mécanique, piézoélectrique, acoustique, électromagnétique...etc. [4]

Dans le cadre de notre étude, on s'intéresse au TSFE à induction électromagnétique.

I.4. Généralités sur le TSFE

I.4.1. Définition

Le transfert sans fil d'énergie 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. [5]

I.4.2. Recharge sans fil

La recharge sans fil consiste à transférer de l'énergie à partir de la source à la charge, sans contact physique.

Dans l'histoire de la recharge sans fil, les scientifiques ont été confrontés à de nombreuses difficultés en raison de puissance limitée qui peut être transférée à partir de l'émetteur de l'antenne vers le récepteur à cause d'une distance importante. [1]



Figure. I. 1 : Recharge sans contact pour appareils mobiles [6]

I.4.3. Principe de transfert d'énergie sans fil

Le transfert d'énergie sans fil est en général un processus en 3 étapes :

- ✓ L'énergie électrique alternative ou continue est fournie à un convertisseur de haute fréquence et ensuite amenée à la structure émettrice.
- ✓ L'onde électromagnétique se propage vers la structure réceptrice.
- ✓ L'énergie est captée sous forme de tension alternative puis transformée en continue, en suite utilisée pour alimenter une charge. [3]

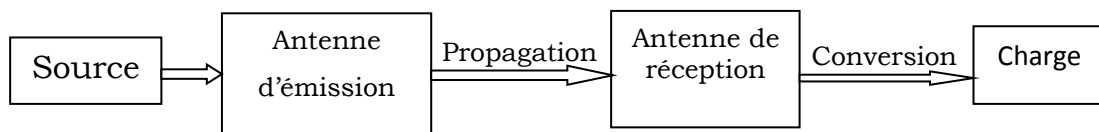


Figure. I. 2: Schéma de principe de TSFE

I.4.4. Vecteurs de transfert d'énergie sans fil

Le principe physique mise en jeu est généralement basé sur le rayonnement électromagnétique. On ne dénombre pas moins de quatre technologies différentes, à des stades de développement plus ou moins avancés et qui dépendent principalement de la longueur d'onde utilisée pour transmettre l'énergie.

On retrouve ainsi, dans le tableau I.1, les vecteurs de transmission tel que le laser, le champ électromagnétique ainsi que les ondes acoustiques. Le transfert par champ électromagnétique peut se faire en exploitant principalement le vecteur champ magnétique ou le vecteur champ électrique. [6]

Tableau I.1 : Vecteurs de transfert d'énergie sans fil

Vecteurs	Fréquence	Puissance transmissible	Distance	Rendement (%)	Exemple d'application
Acoustique	20kHz-100kHz	0.01-1000W	0.2-1mm	1-80	biomédical
			1-300mm		Nucléaire
laser	10 ¹² Hz	1-100W	du m au km	20-30	Spatiale
	10 ¹⁵ Hz				Biomédical
Inductif (magnétique)	20kHz-10MHz	1-200kW	0.2mm-2m	≥80-90	Chargeurs batterie
Capacitif (électrique)	100kHz-10MHz	1-50W	0.1-0.5mm	50-80	Téléphonie mobile Capteurs

I.5. Technique de TSFE

I.5.1. Induction magnétique

Le TSFE par induction magnétique est une technique bien connue, qui est utilisée depuis longtemps dans les transformateurs, dans lesquels une bobine primaire et une bobine secondaire sont couplées par induction.

Le TSFE par induction, dans lequel les bobines primaire et secondaire sont séparées physiquement par l'air, est caractérisé par le fait que le rendement de la transmission d'énergie chute si la distance est supérieure au diamètre de la bobine et si les bobines ne sont pas alignées au-delà de la distance de décalage. Le rendement de la transmission d'énergie dépend donc du facteur de couplage des bobines et de leur qualité. [7]

I.5.2. Résonance magnétique

Le TSFE par résonance magnétique est généralement appelé TSFE à faible couplage. Le principe théorique de cette méthode de résonance à été élaborée en 2005. Il a été validé expérimentalement en 2007. La méthode utilise une bobine et un condensateur en tant que résonateur. L'énergie électrique est 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 de qualité Q élevé, l'énergie électrique peut être transmise sur une grande distance allant jusqu'à plusieurs mètres. [7]

I.6. Couplage de deux bobines

I.6.1. Couplage inductif standard

Le couplage inductif standard (CIS) utilise deux bobines que l'on considère couplés par induction mutuelle ou couplés magnétiquement.

Le niveau de couplage entre les conducteurs correspond à leur inductance mutuelle. Il est possible d'augmenter le couplage en plaçant à proximités les bobines à un axe commun, de manière à ce que le champ magnétique d'une bobine traverse l'autre.

I.6.2. Couplage inductif par résonance

La résonance sert à augmenter la distance sur laquelle l'énergie peut être transmise efficacement. Sur une distance moyenne, il est possible de transmettre une énergie électrique sans fil en champ proche à l'aide d'un couplage inductif par résonance, qui utilise une structure à deux bobines associées à des condensateurs.

Une bobine ayant une résonance élevée, son énergie se dissipe relativement lente. Lorsqu'une deuxième bobine est placée à proximité, la plupart de l'énergie est transférée à cette dernière avant d'être perdue. [3]

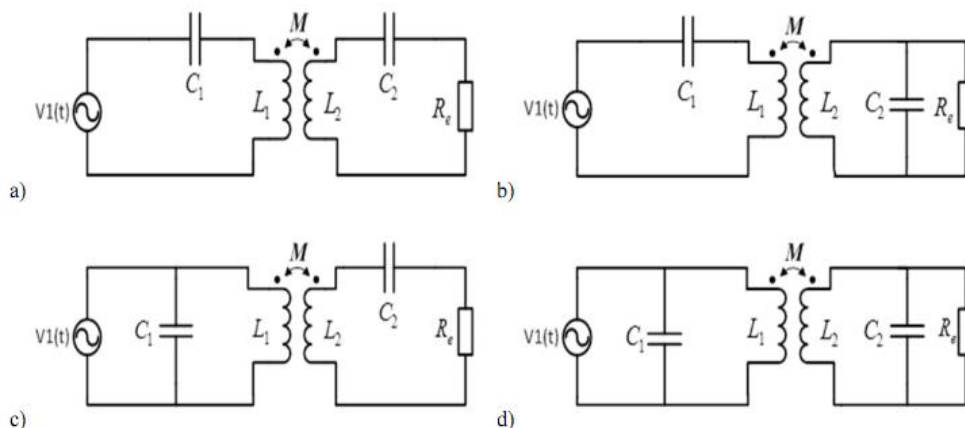


Figure. I. 3 : Différentes topologies de couplage par résonance [1]

La figure I.3 représente les différentes topologies de couplage magnétique résonnant. Dans notre étude, on optera pour le montage de la figure I.3.b dont la modélisation sera l'objet du deuxième chapitre.

I.7. Exemple d'applications

I.7.1. Chauffage par induction

Le chauffage par induction est une application directe de deux lois physiques, la loi de Lenz et l'effet Joule. Tout matériau conducteur de l'électricité plonge dans un champ magnétique variable (créé par une bobine inductrice ou inducteur) est le siège de courants électriques induits ou courant de Foucault. Ces courants dissipent de la chaleur par effet Joule dans les matériaux où ils ont pris naissance. 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. [8]

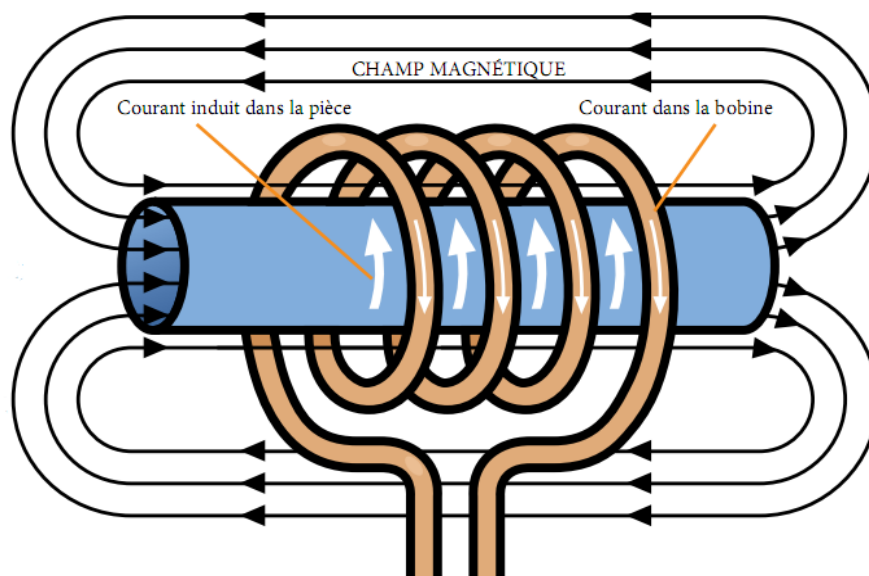


Figure. I. 4 : Schéma de principe de chauffage par induction [9][10]

Le procédé de chauffage par induction est de plus en plus utilisé et ceci de manière croissante dans les milieux industriels par la préchauffe de pièce avant mise en forme à chaud (forgeage, matriçage, laminage, brasage), pour le traitement thermique (trempe) ou encore pour des opérations de soudure entre pièces métalliques [9][11]. Le principe de chauffage par induction est présenté sur la figure I.4.

I.7.2. Magnétoformage

En présence d'un champ magnétique variable au cours du temps, tout matériau conducteur de l'électricité placé dans ce champ est l'objet d'un courant induit. La présence du champ et du courant induit crée des forces magnétiques qui ne sont autres que la force de LAPLACE. Ce phénomène est analogue au cas de conducteurs électriques parcourus par des courants parallèles de même sens ou de sens contraire qui s'attirent ou se repoussent.

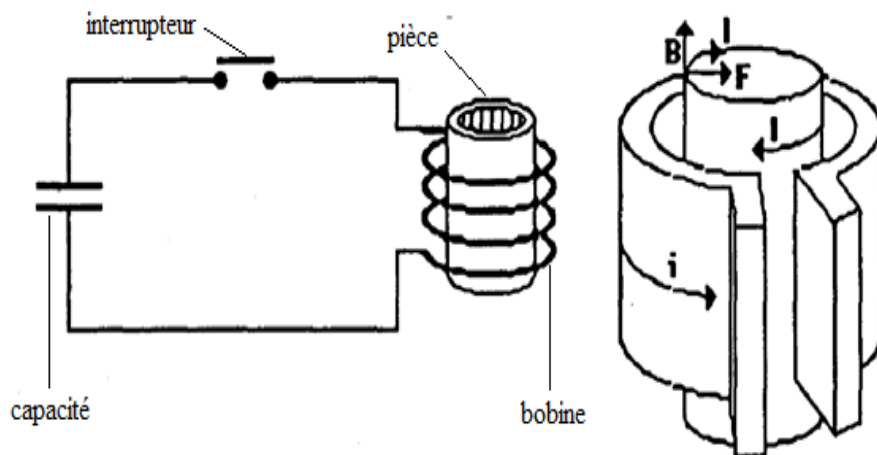


Figure. I. 5 : Schéma de principe de magnétoformage

On distingue trois types particuliers d'appareils de magnétoformage, dans l'exemple ci-dessous nous décrivons le plus couramment utilisé, c'est-à-dire qu'une pièce tubulaire et placée à l'intérieur d'une bobine sans fer, de manière coaxiale. Si une batterie de condensateurs, préalablement chargée, est connectée de manière instantanée aux bornes de la bobine, un courant sinusoïdal amorti apparaît. Un champ magnétique est alors créé dans la bobine et le tube conducteur est le siège d'un courant induit parallèle et de

sens opposé au courant inducteur. Le champ magnétique exerce sur le courant induit une force radiale dirigée vers l'intérieur.

I.7.3. Recharge de batterie

Afin de simplifier le processus de recharge (connexion/déconnexion des connecteurs), il est possible d'utiliser un chargeur sans fil. De nombreuses sociétés se sont intéressées à cette technologie, afin d'uniformiser les recherches et les travaux. Elles se sont regroupées autour de la norme Qi.

La mise en œuvre de cette norme cherche à apporter des solutions à la transmission d'énergie sans fil. [9]

La figure I.6 représente le transfert d'énergie par le biais d'un transformateur, où (L_{Tx}) est bobine primaire et (L_{Rx}) bobine secondaire

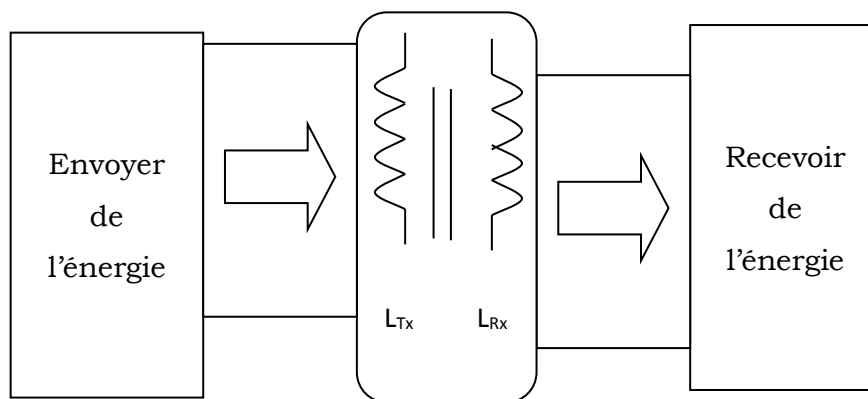


Figure. I. 6 : Principe du transfert d'énergie sans fil

I.7.4. Véhicule électrique

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. Ce système ne fonctionne que 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.

La figure I.7 représente le principe de la recharge sans fil d'un véhicule électrique

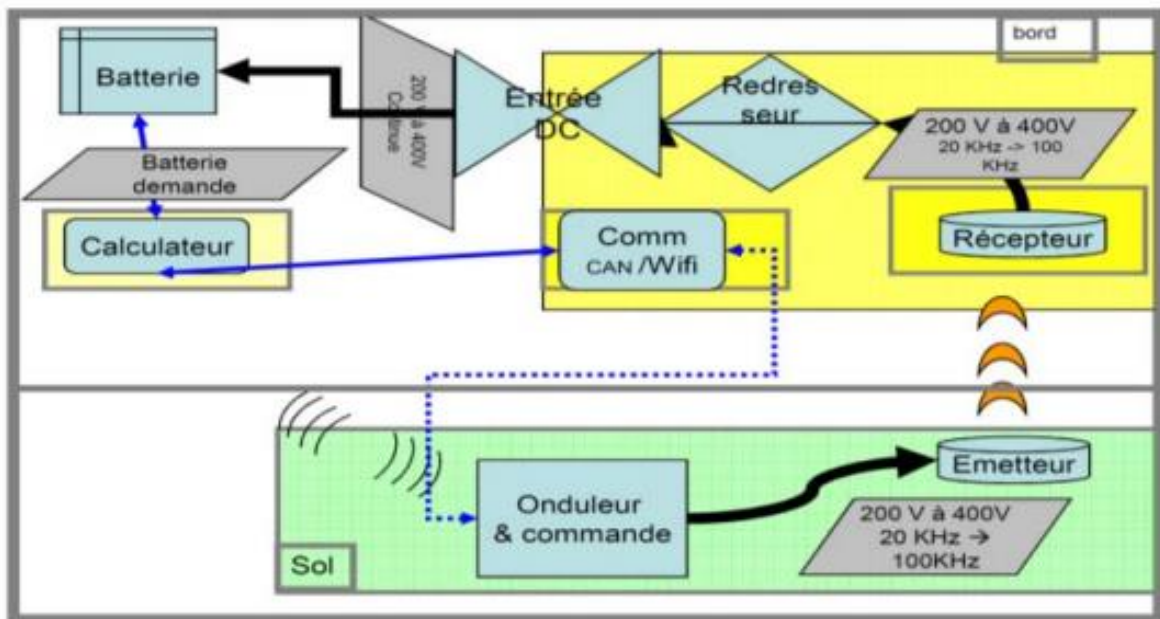


Figure. I. 7 : Principe de la recharge sans fil d'un véhicule électrique [6]

I.7.5. Application biomédical

Un dispositif électronique implantable est un appareil dédié à remplir des fonctions de stimulation électronique ou d'observation et, d'une façon générale, on peut classer les applications de ce système en deux grandes catégories :

- ✓ Le prélèvement et la transmission des signaux physiologique utiles pour l'étude de certain types de maladies et la surveillance ou le suivie des maladies.
- ✓ L'établissement des fonctions motrices de certains organes affectés par des paralyses.

Ce système est principalement compose d'une partie allant dans le corps humain (unité interne) et d'une unité de commande externe ou contrôleur externe comme le montre la figure I.8.

Le système est destiné à fonctionner avec le principe de couplage inductif d'une manière efficace et autonome durant de longues périodes. [12]

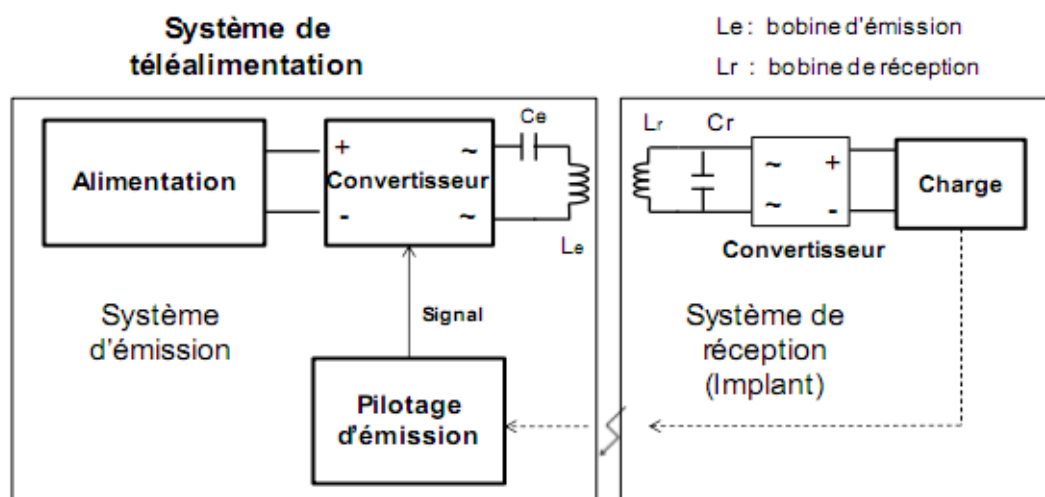


Figure. I. 8 : Schéma d'un dispositif électronique implantable biomédical

I.8. Avantages et inconvénients de TSFE

I.8.1. Avantages

- ✓ Le TSFE est une technique intéressante pour l'alimentation en énergie dans les environnements dangereux et difficiles d'accès.
- ✓ Se débarrasser des fils, câbles, recharge facile de batterie.
- ✓ Réduire le coût associé à la fabrication et le maintien de connecteur direct.
- ✓ Diminution des impacts sur l'environnement, une économie d'énergie.

I.8.2. Inconvénients

Comme d'autre technologie, cette dernière à ses désavantages :

- ✓ Il présente un certain nombre de limitation d'ordres technologiques, environnementaux ou biologiques (niveau de puissance tolérée ; compatibilité électromagnétique)
- ✓ Problème d'acceptabilités de système par un grand public.
- ✓ Faible quantité d'énergie et durée de recharge plus longue.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à l'étude du transfert sans fil d'énergie et les différentes applications existantes. Nous avons posés les briques de bases et fédérés quelques concept nécessaire à la compréhension de la problématique.

Le concept de transfert d'énergie sans fil suscite un engouement important dans la recherche. Nous avons remarqués à travers notre recherche bibliographique que la récupération du maximum de puissance à une distance assez grande est le sujet d'actualité.

***Chapitre II : Modélisation
électromagnétique du TSFE***

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de résumer les équations mathématiques de base qui décrivent les phénomènes électromagnétiques intervenant dans la transmission sans fil d'énergie. Nous présenterons la simplification de ces équations aux cas de régimes quasi-stationnaires et de configurations axisymétriques. Les équations simplifiées nous permettent de modéliser le système de TSFE.

II.2. Généralité sur électromagnétisme

II.2.1. Equations de Maxwell général

La variation spatiale ou temporel d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne ou est due à l'existence d'un autre champ au même point. Les équations de Maxwell sont donc locales et sont valables dans n'importe quel système d'axes.

Les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de Maxwell, s'écrivent comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Maxwell - Ampere :} & \text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{a}) \\ \text{Maxwell - Faraday :} & \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{b}) \\ \text{Maxwell - Thomson :} & \text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{c}) \\ \text{Maxwell - Gauss :} & \text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{d}) \end{array} \right. \quad (\text{II.1})$$

Où :

\vec{E} [V/m] et \vec{H} [A/m] : champ électrique et magnétique

\vec{D} [A.s/m] et \vec{B} [T] : induction électrique et magnétique

\vec{J} [A/m²] et ρ [C/m³] : densités de courant de conduction et de charge électrique

II.2.2. Loi de Lenz-Faraday

La loi de Faraday énonce que la force électromotrice est induite dans un circuit fermé par la variation d'un champ magnétique et elle est directement proportionnelle à cette variation.

En 1934, Lenz fait remarquer le sens absolu du signe « moins » dans la formule de l'induction. Ce signe n'est pas lié à la convention algébrique choisie pour exprimer les forces électromotrices et il est indépendant de la convention d'orientation du circuit.

En clair, ce signe à une signification physique fondamentale. Il traduit le fait que les effets de l'induction sont modérateurs car ils s'opposent à la cause qui les a produits [13] :

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.2})$$

II.3. Lois de comportement des milieux

Les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu ou ils règnent. Ainsi, pour définir complètement le phénomène électromagnétique, on rajoute les lois de comportement de milieu : [14]

II.3.1. Loi d'ohm

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.3})$$

$\sigma [(\Omega.m)^{-1}]$: Conductivité électrique

II.3.2. Relation magnétique

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} & (a) \\ \mu = \mu_0 \mu_r & (b) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$\mu [H/m]$: Perméabilité magnétique

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

μ_r : Perméabilité magnétique du milieu

II.3.3. Relation diélectrique

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} & (a) \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r & (b) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$\varepsilon [F/m]$: Permittivité électrique

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 C^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F/m} : \text{Permittivité électrique du vide}$$

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré

$C = 3.10^8 \text{ m/s}$: vitesse de la lumière

II.4. Hypothèses simplificatrices

Les équations qui précèdent décrivent globalement les phénomènes électromagnétique et s'appliquent à des états quelconques. Ces dernières se simplifient à des équations simples en fonction du domaine d'utilisation.

Dans le cas d'une excitation sinusoïdale, les courant de conduction et de déplacement sont définis respectivement comme suit : [14]

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \sigma \vec{E} & (a) \\ \vec{J}_D &= 2\pi f \varepsilon \vec{E} & (b) \end{aligned} \tag{II.6}$$

Les hypothèses à considérer pour le phénomène inductif dans les matériaux conducteur sont :

- ✓ En électrotechnique, la fréquence est de l'ordre 1MHz.
- ✓ Les distances de la région où on observe les phénomènes sont faibles devant la longueur d'onde du champ électromagnétique.
- ✓ Les matériaux sont suffisamment conducteurs pour considérer que le rapport (ε/σ) très faible.
- ✓ L'approximation quasi-stationnaire, consiste à négliger la charge d'espace dans les conducteurs et la durée de propagation du champ électromagnétique. Ce la implique que le courant de déplacement est négligé devant le courant de conduction.
- ✓ De la troisième hypothèse, on déduit que la charge statique ρ et l'effet capacitif du système sont négligés.

II.5. Equations électromagnétiques couplées

Les approximations précédentes ont pour rôle de réduire le phénomène électromagnétique à un phénomène d'induction.

On étudie le phénomène selon la géométrie des dispositifs avec un choix approprié de la variable d'état. Dans notre configuration est cylindrique,

ainsi on a intérêt à choisir comme variable d'état le champ électrique ou bien le potentiel vecteur magnétique car ils ont qu'une composante orthogonale au plan d'étude.

Dans le cas des systèmes axisymétriques, traités en coordonnées cylindriques, cette composante est dans la direction angulaire et elle ne dépend que de r et z .

En introduisant le potentiel magnétique vecteur, dont l'induction magnétique dérive dans l'espace, et le potentiel scalaire électrique où le champ électrique dérive de celui-ci, le problème se résume à résoudre les deux équations couplées : [14]

$$\begin{cases} r\vec{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}r\vec{\text{ot}}\vec{A}\right)=\vec{J} & \text{(a)} \\ \vec{J}=-\sigma\left(\frac{d\vec{A}}{dt}+\text{grad}V\right) & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(II.7)}$$

\vec{A} [T.m]: est le potentiel vecteur magnétique et V [v] : est le potentiel scalaire électrique

II.6. Système axisymétrique

La figure II.1 montre une configuration dont l'inducteur est plan spiral. En négligeant l'élicité des spires inductrices, ce système possède une symétrie de révolution. Le problème devient bidimensionnel.

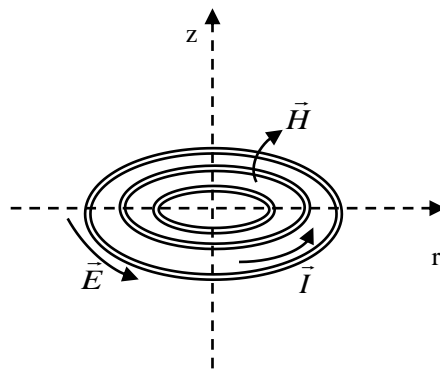


Figure. II. 1 : Géométrie de la bobine

Le potentiel se réduit à sa composante azimutale suivant l'axe θ qui ne dépend que de r et z , où celui-ci est perpendiculaire au plan r - z (Figure. II.2) D'où :

$$\begin{cases} \vec{A} = A_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & (a) \\ \vec{J} = J_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & (b) \end{cases} \quad (II.8)$$

A, J seront considéré dans la suite de l'étude comme étant des scalaire et sont égaux respectivement à A_θ, J_θ .

L'induction \vec{B} n'a que deux composantes, l'une suivant r et l'autre suivant z .

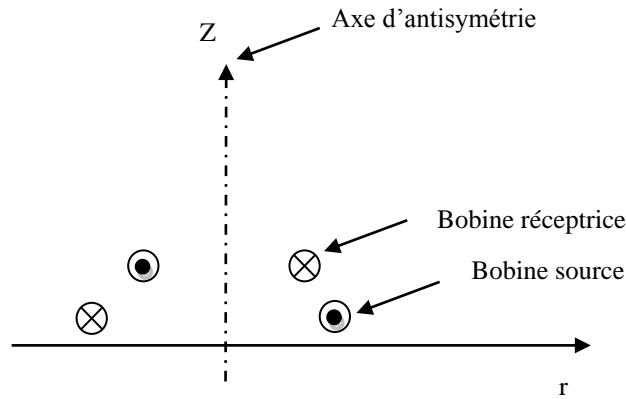


Figure. II. 2 : Domaine d'étude

Le calcul vectoriel en coordonnée cylindrique permet d'atteindre le résultat suivant :

$$\begin{cases} \text{div}(\text{grad} A) = \mu_0 J & (a) \\ \vec{J} = \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad} V \right) & (b) \end{cases} \quad (II.9)$$

II.9. Méthode de résolution

La méthode utilisée pour calculer les inductances et la mutuelle est celle des circuits couplés. La résolution est mathématiquement faite en deux étapes. L'étape analytique consiste à obtenir l'expression du potentiel vecteur magnétique. L'étape numérique consiste à discrétiser le domaine d'étude.

II.9.1. Expression du potentiel magnétique vecteur

La solution de l'équation (II.9.a) est la formule de Biot et Savart dont l'expression du potentiel magnétique vecteur est donnée comme suit : [14]

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} G(p, q) I(q) \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{cases} G(p, q) = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} E[k(p, q)] & (\text{a}) \\ E[k(p, q)] = \frac{(2 - k^2) E_1(k) - 2E_2(k)}{k} & (\text{b}) \\ k(p, q) = \sqrt{\frac{4r(p)r(q)}{[r(p) + r(q)]^2 + [z(p) - z(q)]^2}} & (\text{c}) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$E_1(k)$ et $E_2(k)$ sont respectivement des fonctions elliptiques de première et de seconde espèce de Legendre.

$r(p)$ et $r(q)$ sont respectivement les rayons des points récepteur et émetteur.

$z(p)$ et $z(q)$ sont leurs hauteurs respectivement respectives.

II.9.2. Principe du couplage et équation élémentaire

En injectant l'expression du potentiel (II.10) dans l'équation (II.9.b), on exprime la relation de couplage entre les courants des différentes spires « p et q ».

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma s(p)} I(p) + j\omega\mu_0 r(p) \sum_{q=1}^N G(p, q) I(q) = u(p) \quad (\text{II.12})$$

Où $I(p)$ et $u(p)$ sont respectivement le courant et la tension élémentaire de la spire « p ».

II.9.3. Couplage inductif entre deux bobines

Le fait que les spires des deux bobines sont en série, on écrit :

$$U_i = \sum_{p=1}^{N_i} u_i(p) ; \text{ pour } i = 1, 2 \quad (\text{II.13})$$

$$I_i(p) = I_i(q) = I_i ; \text{ pour } i = 1, 2 \quad (\text{II.14})$$

$U_i(p)$ et $I_i(p)$ sont le courant et la tension de la bobine « i »

En appliquant la relation (II.12) aux deux bobines, on arrive :

$$\begin{cases} \left(\sum_{p=1}^{N_1} \frac{2\pi}{\sigma s} r_1(p) + j\omega\mu_0 \sum_{p=1}^{N_1} r_1(p) \sum_{q=1}^{N_1} G_1(p,q) \right) I_1 + j\omega\mu_0 \sum_{p=1}^{N_1} r_1(p) \sum_{q=1}^{N_2} G_{12}(p,q) I_2 = U_1 \\ \left(\sum_{p=1}^{N_2} \frac{2\pi}{\sigma s} r_2(p) + j\omega\mu_0 \sum_{p=1}^{N_2} r_2(p) \sum_{q=1}^{N_2} G_2(p,q) \right) I_2 + j\omega\mu_0 \sum_{p=1}^{N_2} r_2(p) \sum_{q=1}^{N_1} G_{21}(p,q) I_1 = U_2 \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Ainsi, le système d'équation à résoudre est :

$$\begin{cases} (R_1 + jL_1\omega)I_1 + jM\omega I_2 = U_1 & (1) \\ jM\omega I_1 + (R_2 + jL_2\omega)I_2 = U_2 & (2) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

N : Nombre de spires

$\omega=2\pi f$: Pulsation électrique

f [Hz] : Fréquence

R_1, R_2 [Ω] : Résistance interne des bobines.

L_1, L_2 [H] : Inductance propre des bobines.

M [H] : Mutuelle inductance entre les bobines.

➤ Les paramètres de la bobine 1 :

$$\begin{cases} R_1 = \sum_{p=1}^{N_1} \frac{2\pi}{\sigma s} r_1(p) \\ L_1 = \mu_0 \sum_{p=1}^{N_1} r_1(p) \sum_{q=1}^{N_1} G_1(p,q) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

➤ Les paramètres de la bobine 2 :

$$\begin{cases} R_2 = \sum_{p=1}^{N_2} \frac{2\pi}{\sigma s} r_2(p) \\ L_2 = \mu_0 \sum_{p=1}^{N_2} r_2(p) \sum_{q=1}^{N_2} G_2(p,q) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

➤ La mutuelle entre les bobines 1 et 2 :

$$M = M_{12} = M_{21} = \omega\mu_0 \sum_{p=1}^{N_1} r_1(p) \sum_{q=1}^{N_2} G_{12}(p, q) = \omega\mu_0 \sum_{p=1}^{N_2} r_2(p) \sum_{q=1}^{N_1} G_{21}(p, q) \quad (\text{II.19})$$

➤ Le coefficient de couplage est donné par :

$$K_p = M / \sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{II.20})$$

➤ Le rapport de transformation est donné par :

$$m = M_{12} / L_1 = u_2 / u_1 \quad (\text{II.21})$$

II.9.4. Tension de sortie

Le système à étudier est composé de deux parties ; une partie émettrice alimentée, par une source de tension alternative, et d'une partie réceptrice reliée à une charge, comme le montre la figure II.3. :

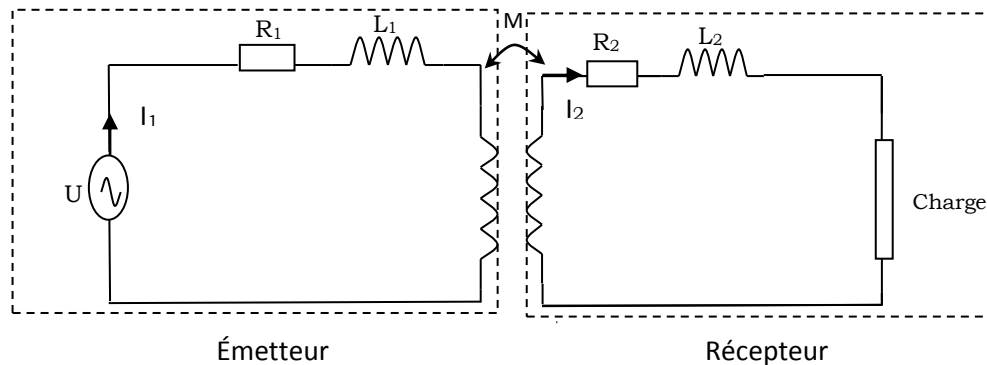


Figure. II. 3 : Schéma du système de couplage sans compensation

Lorsque $I_2=0$, le système d'équation (II.16) est sans charge et le système d'équation se réduit à :

$$\begin{cases} (R_1 + jL_1\omega)I_1 = U_1 \\ jM\omega I_1 = U_{20} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

La tension récupérée au récepteur est :

$$U_{20} = \frac{jM\omega}{R_1 + jL_1\omega} U_1 \quad (\text{II.23})$$

Lorsque la sortie du système est reliée à une charge résistive, la tension de sortie est :

$$\begin{cases} (R_1 + jL_1\omega)I_1 + jM\omega I_2 = U_1 & (1) \\ jM\omega I_1 + (R + R_2 + jL_2\omega)I_2 = 0 & (2) \\ U_2 = -RI_2 & (3) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

De l'équation (II.24-2), on tire l'expression de courant I_1 est :

$$I_1 = -\frac{R + R_2 + jL_2\omega}{jM\omega} I_2 \quad (\text{II.25})$$

On remplace I_1 par l'expression dans l'équation de (II.24-1), on aura :

$$I_2 = \frac{jM\omega}{M^2\omega^2 + (R_1 + jL_1\omega)(R_2 + R + jL_2\omega)} U_1 \quad (\text{II.26})$$

De l'équation de (II.26) dans l'équation (II.24-3), la tension de sortie U_2 est comme suit :

$$U_2 = \frac{-jMR\omega}{M^2\omega^2 + (R_1 + jL_1\omega)(R_2 + R + jL_2\omega)} U_1 \quad (\text{II.27})$$

II.9.5. Couplage inductif avec capacités de compensation

Pour compenser les pertes dues au couplage faible, on insère une capacité au primaire et une autre au secondaire (figure II.4) :

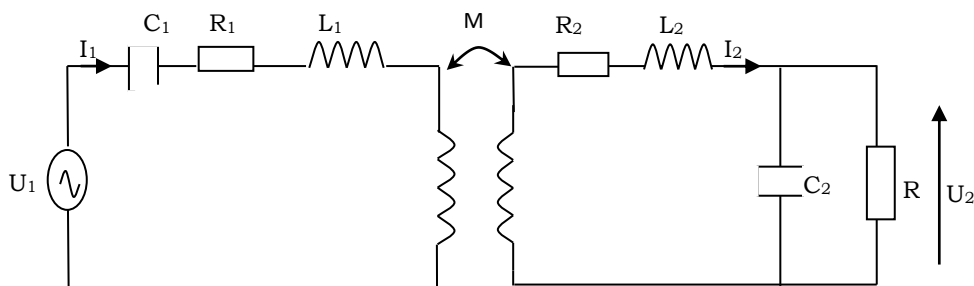


Figure. II. 4 : Schéma de couplage avec compensation

En appliquant la loi des mailles, le problème se réduit à la résolution du système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} (Z_{C1} + Z_1)I_1 + Z_m I_2 = U_1 & (1) \\ Z_m I_1 + (Z_2 + Z)I_2 = 0 & (2) \\ U_2 = -ZI_2 & (3) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + jL_1\omega \\ Z_{C1} = -\frac{j}{C_1\omega} \end{cases} ; \begin{cases} Z_2 = R_2 + jL_2\omega \\ Z_{C2} = -\frac{j}{C_2\omega} \end{cases} ; Z_m = jM\omega \text{ et } Z = \frac{R}{1 + jRC_2\omega} \quad (\text{II.29})$$

De l'équation de (II.28-2), on tire :

$$I_1 = -\frac{Z_2 + Z}{Z_m} I_2 \quad (\text{II.30})$$

En remplaçant l'expression du courant I_1 dans l'équation (II.28-1), on obtient :

$$I_2 = \frac{Z_m}{Z_m^2 - (Z_{C1} + Z_1)(Z_2 + Z)} U_1 \quad (\text{II.31})$$

En remplace l'expression de courant I_2 dans l'équation (II.28-3), on a :

$$U_2 = \frac{Z_m Z}{Z_m^2 - (Z_{C1} + Z_1)(Z_2 + Z)} U_1 \quad (\text{II.32})$$

II.9.6. Optimisation de la puissance

Pour exprimer l'impédance vue du primaire, on exprime le courant du secondaire, tel que :

$$I_2 = -\frac{Z_m}{Z_2 + Z} I_1 \quad (\text{II.33})$$

On remplace I_2 dans l'équation (II.27-1), on aura :

$$(Z_{C1} + Z_1)I_1 - \frac{Z_m^2}{Z_2 + Z} I_1 = U_1 \quad (\text{II.34})$$

D'où l'impédance vue du primaire est obtenue par la relation suivante :

$$Z_{vp} = \frac{U_1}{I_1} = (Z_{C1} + Z_1) - \frac{Z_m^2}{Z_2 + Z} \quad (\text{II.35})$$

$$\text{On note : } Z_{vp} = Z_p + Z_{sr} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$\begin{cases} Z_p = Z_{C1} + Z_1 = R_1 + j \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} \right) & (\text{a}) \\ Z_{sr} = -\frac{Z_m^2}{Z_2 + Z} = \frac{M^2 \omega^2}{R_2 + jL_2 \omega + \frac{R}{1 + jRC_2 \omega}} & (\text{b}) \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

L'équation (II.37-b) exprime l'impédance du secondaire réfléchi au primaire, telle que :

$$Z_{sr} = \frac{(1 + jRC_2 \omega) M^2 \omega^2}{(R_2 + jL_2 \omega)(1 + jRC_2 \omega) + R} \quad (\text{II.38})$$

Si on néglige R_2 devant R , l'équation (II.38) devient :

$$Z_{sr} = \frac{M^2 \omega^2 R (1 - L_2 C_2 \omega^2) + RL_2 M^2 C_2 \omega^4 + jM^2 \omega^3 (R^2 C_2 (1 - L_2 C_2 \omega^2) - L_2)}{R^2 (1 - L_2 C_2 \omega^2)^2 + L_2^2 \omega^2} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$Z_{sr} = R_{sr} + jX_{sr} \Rightarrow \begin{cases} R_{sr} = \frac{M^2 \omega^2 R (1 - L_2 C_2 \omega^2) + RL_2 M^2 C_2 \omega^4}{R^2 (1 - L_2 C_2 \omega^2)^2 + L_2^2 \omega^2} & (\text{a}) \\ X_{sr} = \frac{M^2 \omega^3 (R^2 C_2 (1 - L_2 C_2 \omega^2) - L_2)}{R^2 (1 - L_2 C_2 \omega^2)^2 + L_2^2 \omega^2} & (\text{b}) \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

La puissance transférée du primaire au secondaire est égale à la résistance réfléchiée multipliée par le carré du courant primaire : [15]

$$P_{Tps} = R_{sr} I_1^2 \quad (\text{II.41})$$

Pour transmettre le maximum de puissance du primaire au secondaire, il faut que la résistance vue du primaire soit maximale. Cette condition impose la fréquence de résonance du secondaire, telle que :

$$1 - L_2 C_2 \omega_{02}^2 = 0 \Rightarrow \omega_{02}^2 = \frac{1}{L_2 C_2} \quad (\text{II.42})$$

D'où :

$$\begin{cases} R_{sr} = \frac{RM^2 C_2 \omega_{02}^2}{L_2} & (\text{a}) \\ X_{sr} = \frac{-M^2 \omega_{02}}{L_2} = L_{sr} \omega_{02} & (\text{b}) \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

En remplaçant la fréquence de résonance secondaire, on arrive :

$$\begin{cases} R_{sr} = \frac{RM^2}{L_2^2} & (\text{a}) \\ X_{sr} = \frac{-M^2}{L_2 \sqrt{L_2 C_2}} & (\text{b}) \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

A la fréquence de résonance secondaire, le circuit secondaire reflète une inductance négative d'expression (équation II.43-b)

$$L_{sr} = \frac{-M^2}{L_2} \quad (\text{II.45})$$

Afin d'assurer une transmission d'énergie maximale et d'éviter cette inductance négative, la réactance équivalente vue du côté primaire, qui symbolise la puissance réactive, doit être annulée : [15]

$$X_{vp} = L_1 \omega_{02} - \frac{1}{C_1 \omega_{02}} - \frac{M^2 \omega_{02}}{L_2} = 0 \quad (\text{II.46})$$

Pour atteindre cet objectif, le contrôle de la capacité primaire peut être un moyen pour compenser à la fois l'auto-inductance primaire L_1 et la réactance réfléchi. Ainsi, la valeur de la capacité primaire de compensation est donnée par :

$$C_1 = \frac{1}{1-m^2} \frac{1}{L_1 \omega_{02}^2} = \frac{1}{1-m^2} \frac{L_2 C_2}{L_1} \quad (\text{II.47})$$

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué d'une manière générale les équations de Maxwell et leur simplification relativement au régime quasi-stationnaire et aux configurations axisymétriques.

A l'aide de la méthode des circuits électriques, nous avons calculé les résistances, les inductances propres et l'inductance mutuelle du système.

Enfin, nous avons établi le système d'équations à résoudre et les paramètres d'optimisation de la puissance transmise au secondaire. Dans ce qui suit, nous mettons en application les formulations élaborées.

Chapitre III : Application et résultats

III.1. Introduction

Ce chapitre est réservé à l'application du modèle développé dans le chapitre précédent. Le modèle est implanté sous MATLAB. Les résultats obtenus concernent l'évolution de la tension et de la puissance de sortie en fonction de la fréquence, d'une part et d'autre part, l'évolution des mêmes grandeurs en fonction de la distance entre deux bobines.

III.2. Modèle géométrique

La géométrie étudiée est composée d'un émetteur et d'un récepteur dont le bobinage est identique. Les caractéristiques géométriques du bobinage ainsi que la distance entre les bobines sont données quantitativement dans le Tableau N°.III.1 et visuellement par la figure III.1. [12]

Tableau III.1 : Paramètres géométriques du bobinage

Caractéristiques géométriques	Valeurs
Nombre de spires N	17
Diamètre de la section du fil (mm ²)	0.55
Rayon interne (mm)	2.775
Rayon externe (mm)	30.075
Distance inter-spires (mm)	1
Distance entre-bobines (mm)	1

Pour caractériser le système de transfert d'énergie composé de deux bobines identiques, nous avons calculé l'inductance propre des bobines et leur mutuelle (Tableau III.2). [12]

Tableau III.2 : Paramètres électromagnétique

Inductance propre (μH)	Mutuelle inductance (μH)
8.3906	6.6883

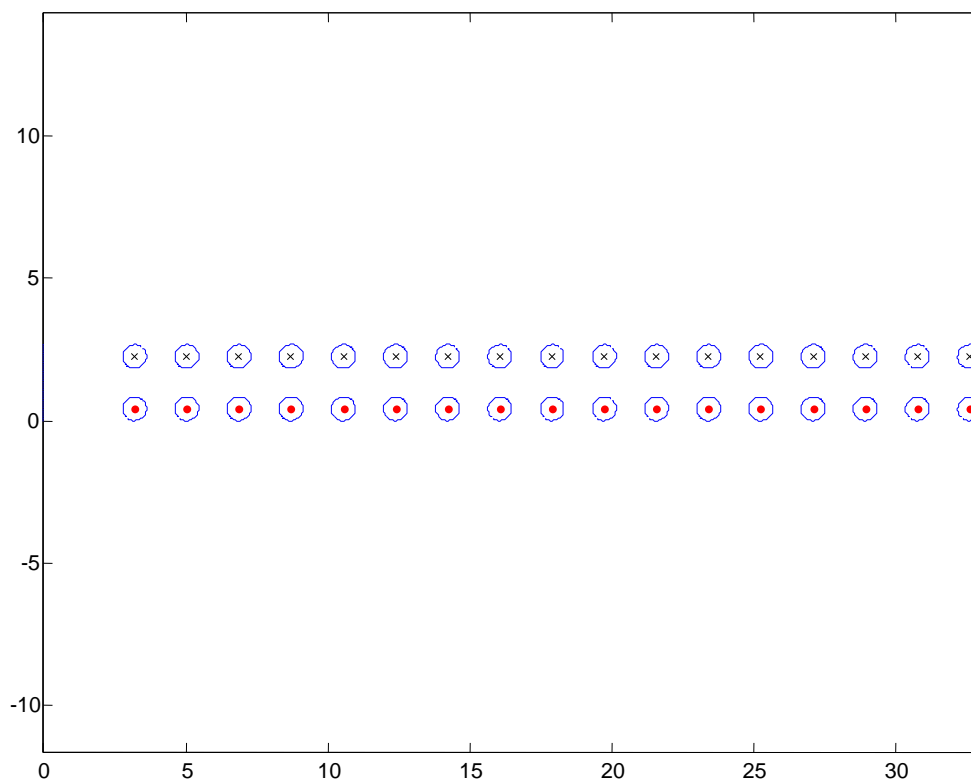


Figure.III. 1 : Modèle géométrique

III.3. Couplage inductif sans compensation

III.3.1. Système à fort couplage inductif

Pour un couplage important, la distance entre les deux bobines doit être faible et que nous prenons égale à 1mm. Dans ce cas, nous traitons deux cas : système sans charge et avec charge.

Lorsque le secondaire est sans charge, le rapport des tensions (a_0) est donné par la figure III.2.

Pour le système avec charge, le rapport des tensions (a) est donné pour les basses fréquences par la figure III.3 et pour les fréquences importantes, les résultats sont représentés par la figure III.4.

Dans le domaine des basses fréquences, on constate que le rapport des tensions ne dépend pas de la charge alors qu'elle l'est pour les fréquences importantes.

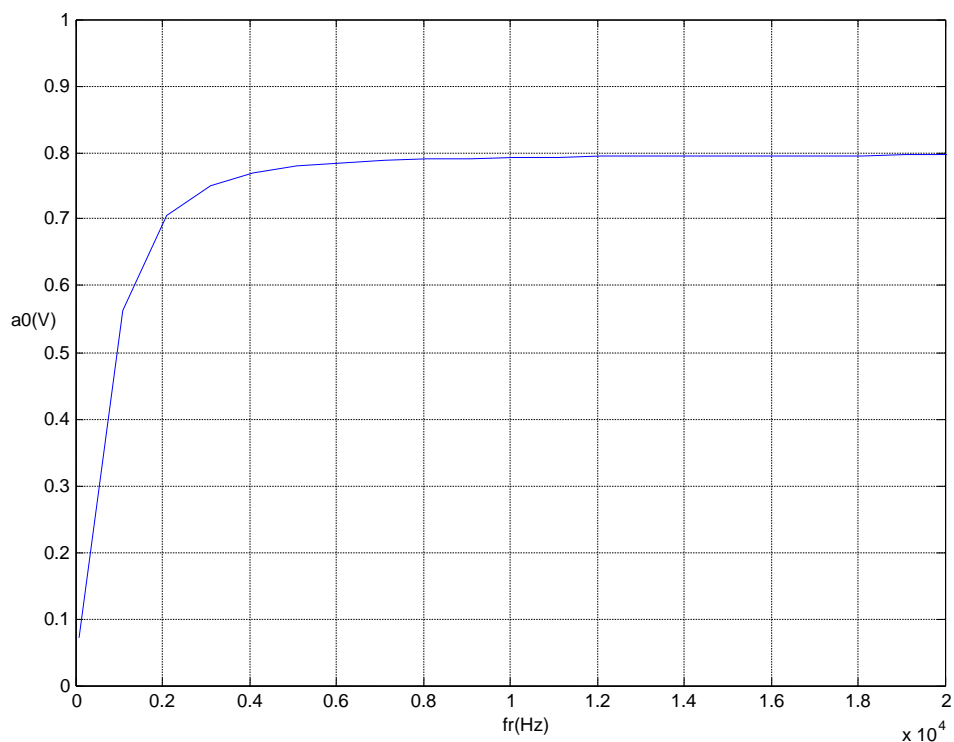


Figure.III. 2 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (faibles fréquences)

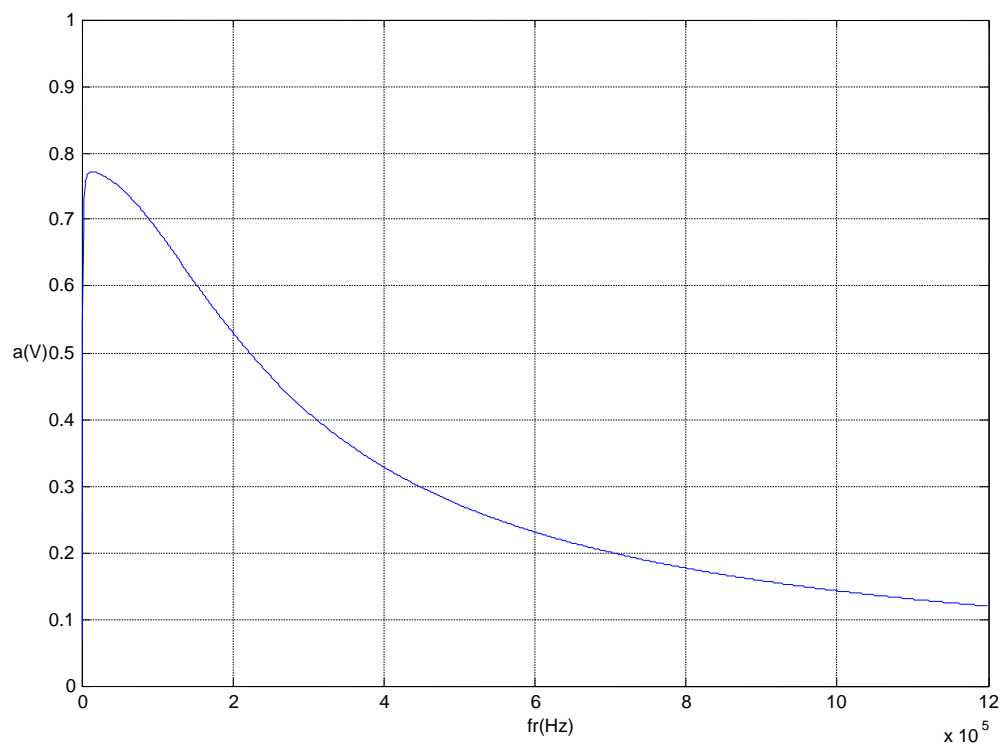


Figure.III. 3 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (fréquence importantes)

III.3.2. Système à faible couplage inductif

Pour un couplage faible, la distance entre les deux bobines doit être grande et que nous prenons égale à 20mm. Dans ce cas, nous traitons deux cas : système sans charge et avec charge.

Lorsque le secondaire est sans charge, le rapport des tensions « a_0 » est donné par la figure III.4. Pour le système avec charge, le rapport des tensions (a) est donné pour les basses fréquences par la figure III.5

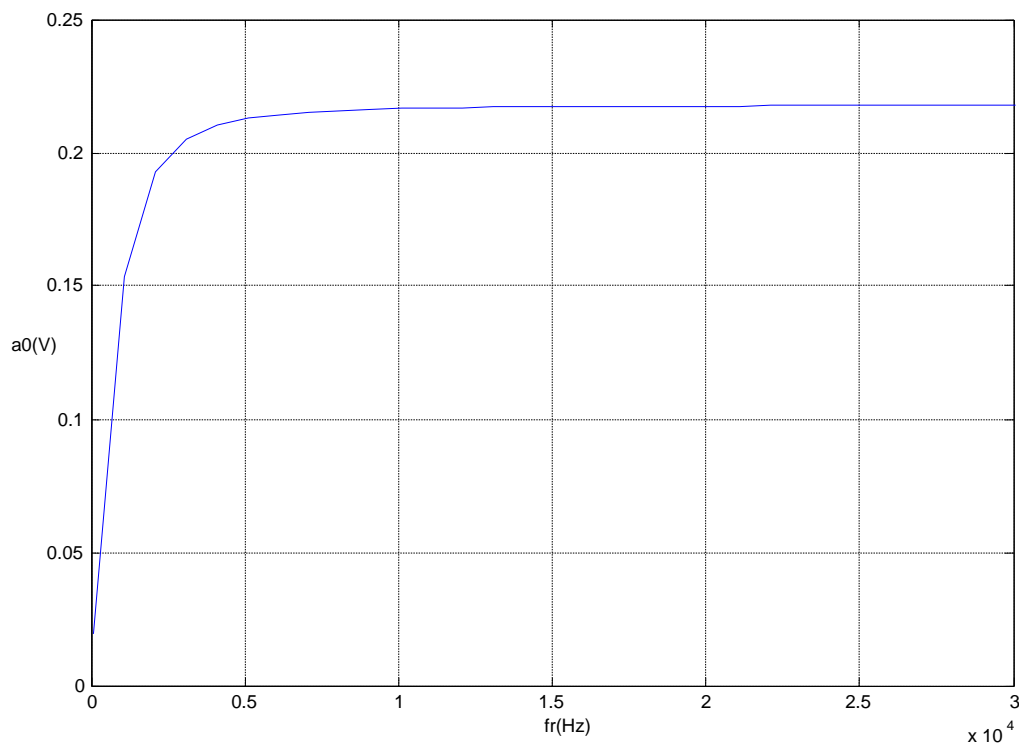


Figure.III. 4 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (fréquences faibles)

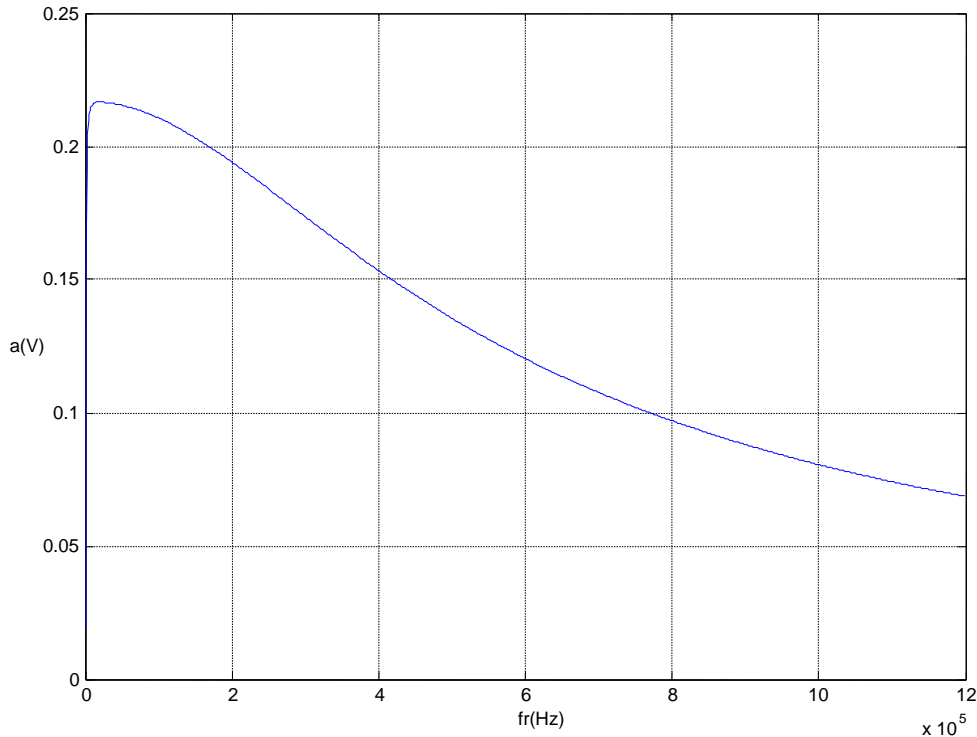


Figure.III. 5 : Evolution du rapport des tensions en fonction de la fréquence (fréquences importantes)

III.4. Couplage inductif avec compensation

Nous traitons le système électromagnétique sans charge et avec charge et pour une distance entre les deux bobines de 20mm. Pour cette distance, l'inductance mutuelle est de $1.83\mu\text{M}$. Dans les deux cas, nous calculons les capacités C_1 et C_2 respectivement par les formules II.41 et II.46 à une fréquence de résonance de 240kHz.

III.4.1. Système électromagnétique sans charge

Lorsque le secondaire est sans charge, la tension de sortie est donnée par la figure III.6. On remarque qu'elle présente deux fréquences ($f_1=192\text{kHz}$ et $f_2=300\text{kHz}$) dont le rapport des tensions (a_{0c}) est maximal et atteint une centaine de fois la tension d'entrée ($U_2=100U_1$) alors qu'elle est minimale pour la fréquence de résonance en charge qui devient une fréquence de rejection à vide.

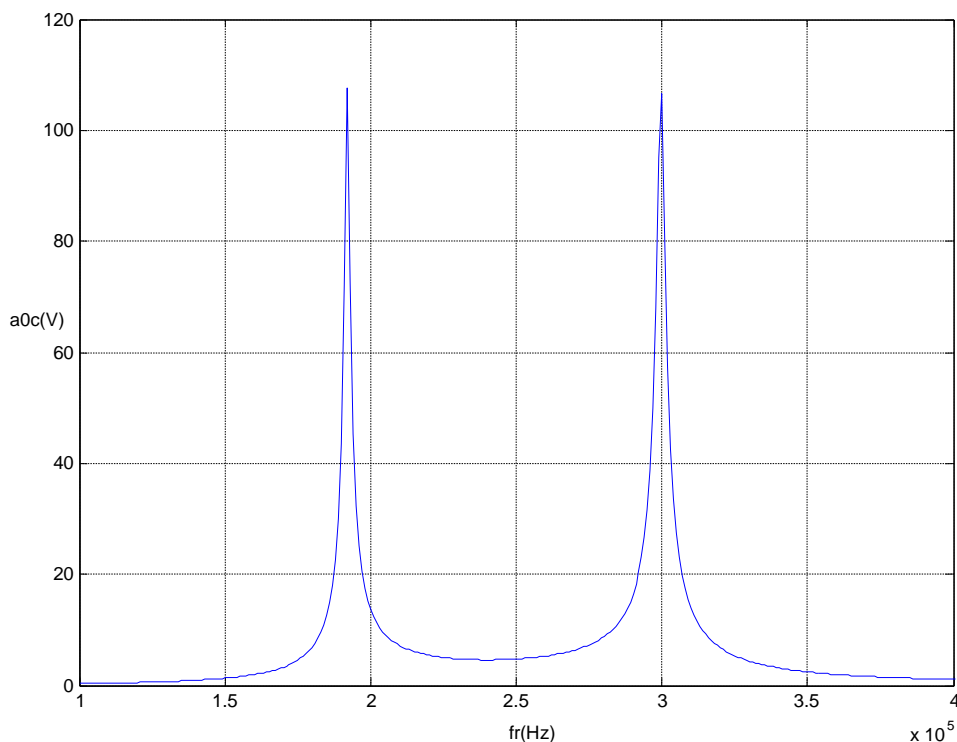


Figure.III. 6 : Evolution du rapport des tensions à vide en fonction de la fréquence

III.4.1. Système électromagnétique avec charge

Pour le système avec charge, la tension de sortie est donnée par la figure III.7. On remarque, contrairement à la précédente, qu'elle présente une seule fréquence de résonance ($f_0=240\text{kHz}$) où la tension de sortie atteint approximativement 4.3 fois la tension d'entrée ($U_2=4.3U_1$).

La figure III.8 donne l'évolution de la puissance (P_{2cf}) en fonction de la fréquence où la puissance est maximale à la fréquence de résonance.

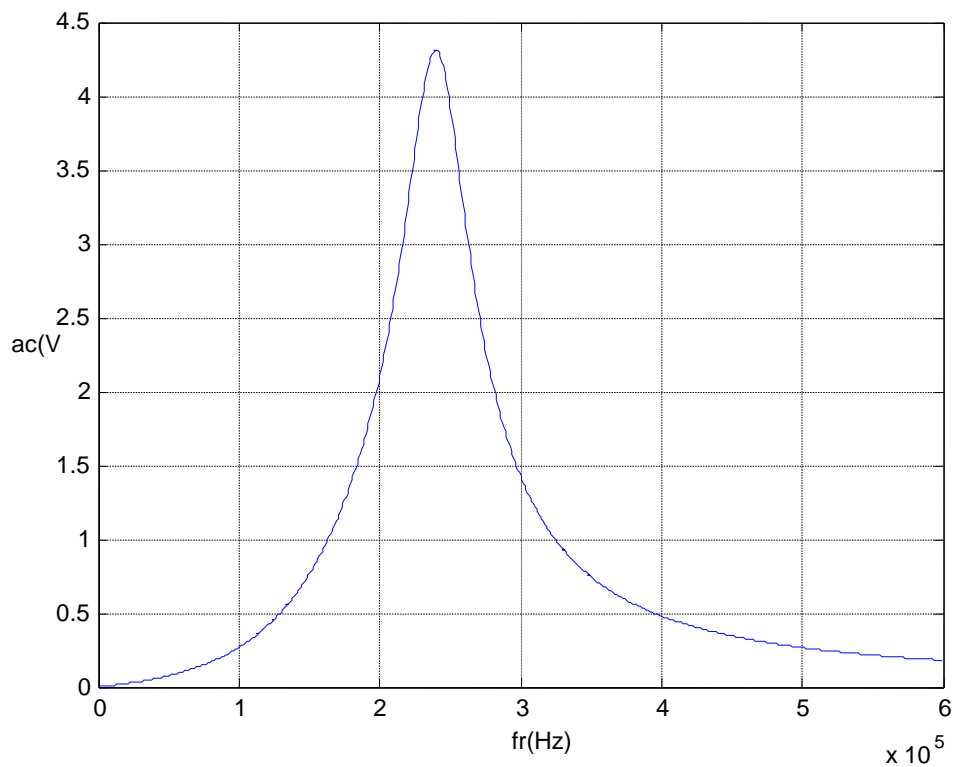


Figure.III. 7 : Evolution du rapport des tensions en charge en fonction de la fréquence

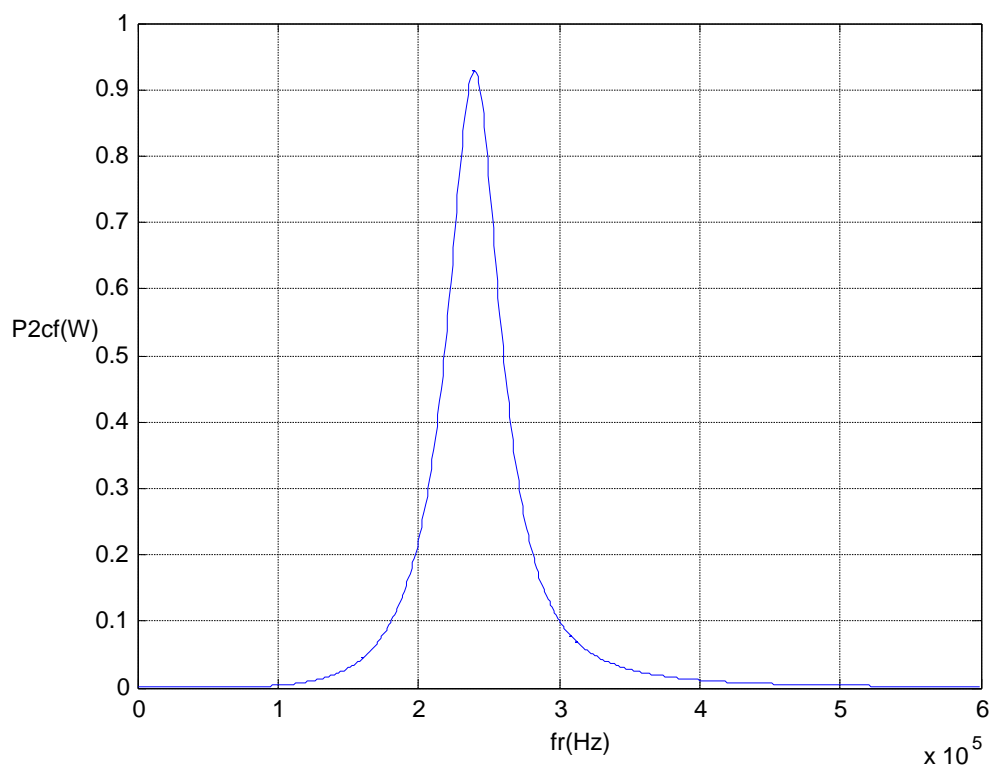


Figure.III. 8 : Evolution de la puissance en fonction de la fréquence

III.4. Influence de la distance entre bobines

En fixant la fréquence d'alimentation à la fréquence de la résonance, nous étudions l'évolution des tensions (à vide et en charge) et de la puissance en fonction de la distance entre les bobines. Les résultats sont donnés sur les figure III.9, III.10 et figure III.11.

La valeur maximale de la tension à vide est atteinte pour une distance de 47mm alors la tension en charge et la puissance(P_{2cz}) atteignent la valeur maximale à 5mm.

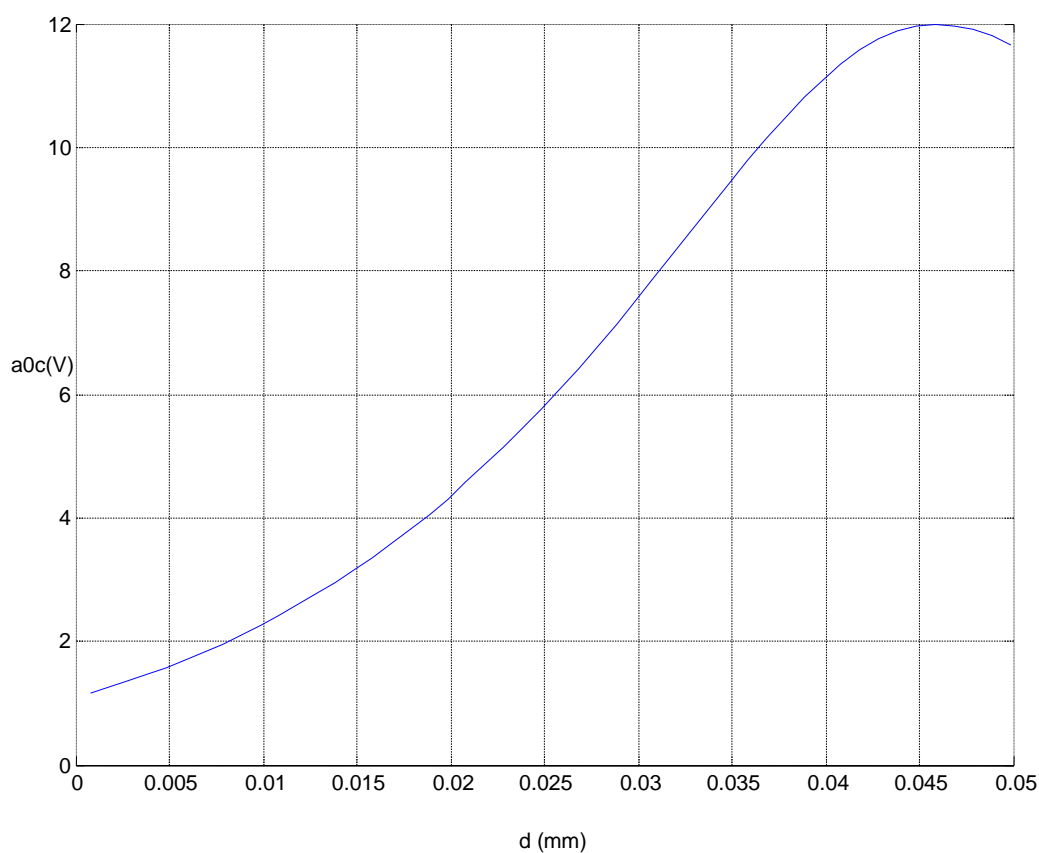


Figure.III. 9 : Evolution du rapport des tensions à vide en fonction de la distance

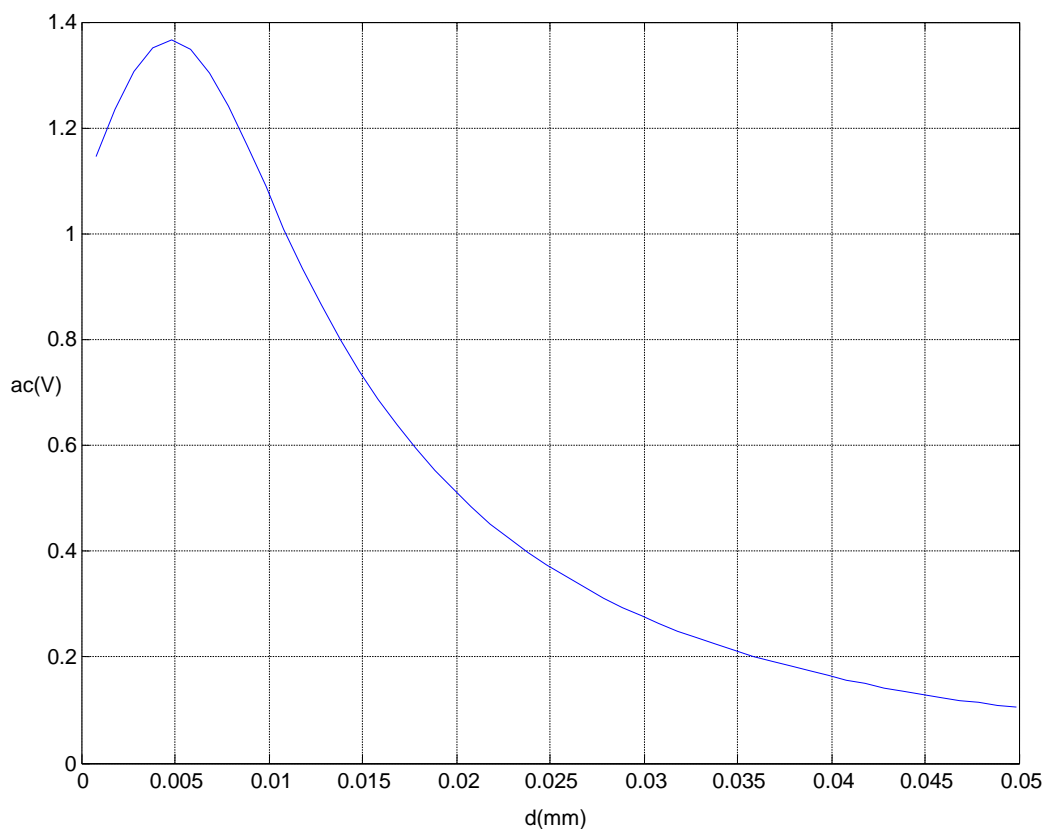


Figure.III. 10 : Evolution du rapport des tensions en charge en fonction de la distance

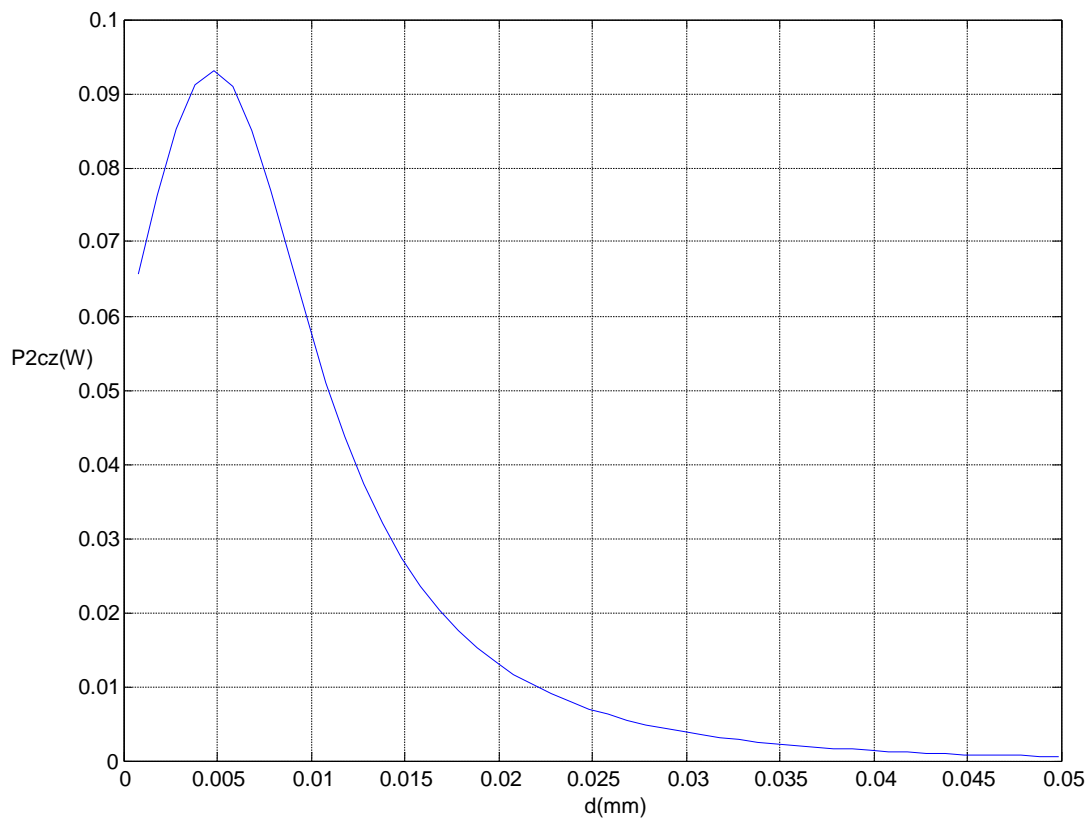


Figure.III. 11 : Evolution de la puissance en fonction de la distance

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité une des applications du transfert sans fil d'énergie. Nous avons étudié l'évolution du rapport des tensions et de la puissance en fonction de la fréquence, d'une part et d'autre part, en fonction de la distance entre deux bobines.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le transfert sans fil d'énergie électrique a été initiée dans les années soixante afin de répondre à des besoins énergétiques. Un demi-siècle plus tard, la question énergétique reste une préoccupation majeure qui ne se pose plus uniquement en termes de ressources mais également en termes d'autonomie, de portabilités et d'alimentation à distance des dispositifs électroniques inaccessibles ou nomades.

Le transfert d'énergie sans fil est désormais une réalité. Il est appliqué dans différentes application (les téléphones portables, chauffage par induction, magnétoformage, les commandes de semi conducteur, les applications biomédicales) mais elle présente toujours des limitations assez importantes.

Au cours de ce projet, nous avons présenté les généralités sur le TSFE, ses différentes applications et sa modélisation électromagnétique par les circuits électriques couplés. Le modèle mathématique obtenu est implanté sous environnement MATLAB.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la tension et la puissance dépendent fortement des caractéristiques électriques (fréquence, capacité de compensation) et des caractéristiques géométriques des bobines (dimension du bobinage, distance relative des bobines). L'optimisation de la puissance réside dans le choix des capacités dont la valeur est obtenue à la fréquence de résonance.

Pour maîtriser la théorie et la technique du TSFE, il est nécessaire de prendre en considération l'effet de peau électromagnétique dans le calcul des résistances et des inductances des bobines, et la mutuelle.

Références bibliographiques

Référence bibliographique

- [1] Mohammed Ibrahim, « Analyse d'interopérabilité d'un système de recharge sans contact pour véhicule électrique », Thèse de doctorat université Paris-Sud, Ecole doctorale science et technologie de l'information, des télécommunications et des systèmes, Septembre 2014.
- [2] Ahafhaf Amine et autres, « Recharge sans fil des téléphones mobiles », science physique pour l'ingénieur, FIPA17P1G2, SPI, Mars 2014.
- [3] Vlad Marian, « Transmission d'énergie sans fil .application au réveil à distance de récepteur en veille zéro consommation », Thèse d'Ingénieur INSA Lyon, Université de Lyon, Novembre 2012.
- [4] Hakim Takhedmit, « Modélisation et conception de circuits de réception complexes pour la transmission d'énergie sans fil à 2.45 GHz », thèse de docteur en génie électrique, Ecole doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, octobre 2010.
- [5] Boubkeur Merabet, « Contribution à l'étude de la transmission d'énergie à distance par ondes », Thèse de doctorat en Electronique - Electrotechnique-Automatique, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2010.
- [6] Antoine Caillierez, « Etude et mise en œuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicule en mouvement », thèse de doctorat en génie électriques, université paris- Saclay, Janvier 2016.
- [7] « Transmission d'énergie sans fil au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radiofréquence », Rapport UIT-R SM.2303-1, publication électronique, Genève ,2015.
- [8] Sven Wanser, « simulation des phénomènes de chauffage par induction. Application à la trempe superficielle », Thèse de docteur en génie électrique, l'école doctorale de Lyon des sciences pour l'ingénieur, Février 1995.

Référence bibliographique

- [9] Valérie Labbé, « Modélisation numérique du chauffage par induction. Approche éléments finis et calcul parallèle », Thèse de docteur, mécanique numérique, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, Avril 2002.
- [10] « Chauffage par induction bobines d'induction », AMBRELL Precision Induction Heating, 411-0168-13 Rév. A, www.ambrell.fr.
- [11] Maanani Yacine, « Alimentation des systèmes de chauffage par induction par convertisseurs à résonance », Mémoire de magister en électrotechnique, Option Modélisation et contrôle des procédés de conversion de l'énergie électrique, Université Constantine 1, Juin 2014.
- [12] Laroussi Bettaieb, « 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.
- [13] Wang Wei, « Etude de la transmission d'énergie dans fil (WPT) basé sur la résonance couplée magnétique », Mémoire de maîtrise des sciences appliquées, Université de Montréal, Juillet 2014.
- [14] Bachir Maouche, « Elaboration de modèles par Les Grandeurs Electromagnétiques Couplées. Application Au Contrôle et à L'évaluation Non Destructif par Courant De Foucault », Thèse de Doctorat en Science, Université Ferhat Abbas-Sétif, Janvier 2007.
- [15] Aref Trigui, « Asservissement de l'énergie inductive transmise aux implants électroniques », Mémoire de maîtrise de Science Appliquées, Génie Electrique, Université de Montréal, Janvier 2014.