

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA JIJEL  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE



## *Mémoire de Fin d'Etudes*

*En vue d'obtention du diplôme de :*

*MASTER en Electromécanique*

*Spécialité : Electromécanique*

## *Thème*

*Analyse des effets des paramètres géométriques  
et électriques sur la performance du système  
d'énergie sans contact*

*Réalisé par :*

*✍ Aliouane Adel*

*✍ Khemoula Mohammed*

*Encadré par :*

*Mr. Mohdeb Naamane*

*Promotion 2021*



## Résumé

Ce travail présente l'étude et le développement d'un système de transmission d'énergie sans fil à travers un lien inductif résonant.

Le système de transmission de puissance sans fil suscite un grand intérêt depuis des décennies en raison de ses nombreux avantages par rapport aux systèmes filaires. À cet égard, cette étude a traité la structure de couplage de diverses bobines avec différents types de noyaux magnétiques et de bobines, et elle était réalisée sur la base d'une analyse mathématique et d'une modélisation pour calculer les valeurs inductives pour des profils de charge.

Par conséquent, le modèle de lien couplé est basé sur la conception de la bobine en spirale, et a été développé à l'aide d'une analyse théorique et d'une optimisation géométrique du lien inductif. Cette étude nous a permis d'avoir des excellentes performances qui sont représentées dans l'espacement des inter-bobines, une efficacité élevée du transfert d'énergie et une géométrie réduite.

**Mots clés :** Transfert d'énergie sans fil, bobines spirales, l'efficacité de transfert d'énergie, lien inductif.

## Abstract

This work proposes the study and development of a wireless energy transfer system through a resonant inductive link.

The wireless power transfer system has been a major concern for several decades since various advantages have been included over the wired counterpart. In this context, the coupling structure has been studied for various coils having different shapes of magnetic cores and windings. This investigation is implemented on the basis of mathematical analysis and modeling to calculate inductive values of load configurations.

The coupling link model based on the design of spiral coils is developed using theoretical analysis and geometric optimization of an inductive link. The results obtained in this work showed better performance such as inter-coil distance, high energy transfer efficiency and reduced geometry.

**Keywords:** Wireless energy transfer, spiral coils, energy transfer efficiency, inductive link.

## ملخص

يقترح هذا العمل دراسة وتطوير نظام نقل الطاقة اللاسلكي من خلال ارتباط حثي رنيني.

كان نظام نقل الطاقة اللاسلكية مصدر قلق كبير لعدة عقود منذ أن تم تضمين مزايا مختلفة على النظر السلكي. في هذا السياق، تمت دراسة بنية التوصيل لملفات مختلفة لها أشكال مختلفة من النوى والملفات المغناطيسية. يتم تنفيذ هذا التحقيق على أساس التحليل الرياضي والنمذجة لحساب القيم الاستقرائية لتكوينات الحمل.

تم تطوير نموذج ارتباط الاقتران المستند إلى تصميم الوشيعات اللولبية باستخدام التحليل النظري والتحسين الهندسي للرباط

الحثي.

**الكلمات المفتاحية:** نقل الطاقة اللاسلكية، الوشيعات اللولبية، كفاءة نقل الطاقة، ارتباط حثي.

# *Remerciements*

Nous remercions en premier lieu notre Dieu de nous donner la santé et la patience pour avoir terminé ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements à monsieur MOHDEB NAAMANE qui a proposé et dirigé ce projet, pour son entière disponibilité et ses nombreux conseils tout au long de nos travaux.

Nos plus vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont bien accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

# SOMMAIRE

Remerciement  
Sommaire  
Liste des figures  
Liste des tableaux

**Introduction générale** ..... 01

## CHAPITRE I

### Induction électromagnétique et la transmission de puissance sans fil

I. Introduction.....	03
II. Histoire .....	03
III. Exploitation de l'induction électromagnétique.....	04
III.1 Four de fusion à induction électromagnétique .....	04
III.2 La plaque à induction .....	05
III.3 Transmission d'énergie sans fil .....	06
IV. Systèmes de transmission à champ proche .....	06
IV.1 Couplage inductif .....	06
IV.2 Couplage inductif par résonance .....	06
V. Systèmes de transmission à champ lointain .....	08
VI. Pour les portables .....	08
VII. Pour les véhicules électriques .....	09
VII.1 Transmission d'énergie sans fil utilisant un champ magnétique .....	09
VII.2 Convertisseur AC-DC .....	09
VIII. Systèmes de recharge sans contact .....	10
VIII.1 Recharge statique .....	10
VIII.2 Recharge dynamique .....	12

IX. Des routes à induction pour se recharger en roulant .....	13
X. Localisation de la recharge sans contact .....	14
XI. Les avantages de l'énergie sans fil .....	14
XII. L'électricité sans fil bientôt à l'assaut de notre quotidien .....	14
XIII. Conclusion .....	15
Rèfèrence .....	15
<b>Chapitre II :</b>	
<b>Inductance et bobines</b>	
I. Introduction .....	18
II. Généralités sur les inductances .....	18
II.1 Définition .....	18
II.2 Inductance et induction propre .....	18
II.3 Principales caractéristiques .....	19
II.4 Phénomène d'induction .....	20
II.4.1 Flux d'induction magnétique .....	20
II.4.2 Loi de Faraday .....	20
II.4.3 Champ magnétique créé par un solénoïde .....	20
II.4.4 Champ magnétique créé par une bobine plate .....	21
II.5 Phénomène d'auto-induction .....	21
III. Caractéristiques électriques .....	21
IV. Les différentes géométries de bobine .....	22
V. Pertes dans les bobines .....	22
V.1 Effet de peau .....	22
V.1.1 Épaisseur de peau .....	23
V.1.2 Conséquences de l'effet de peau .....	23
V.2 Effet de proximité .....	24
V.2.1 Facteurs affectant l'effet de proximité .....	24
V.3 Effet de bord .....	25
VI. Les différents modes de couplage .....	25
VII. Bobine couplées magnétiquement .....	25
VII.1 Facteurs affectant l'inductance d'une bobine .....	26
VII.2 Cas de deux bobines en couplage total .....	27
VII.3 Cas de deux bobines en couplage partiel .....	27

VIII. Méthode de calcul des inductances et inductance mutuelle .....	28
V.III.1 Bobine monocouche .....	28
V.III.2 Bobine multicouche .....	29
V.III.3 Inductance mutuelle .....	29
IX. Analyse du TESF via des résonances magnétiques couplées .....	32
IX.1 Modèle de circuit série-série .....	32
X. Conclusion .....	34
Rèfèrence .....	34
<b>Chapitre III :</b>	
<b>Analyse des effets des paramètres géométriques et électriques sur le TESF</b>	
I. Introduction .....	36
II. Données de l'application .....	36
III. Conclusion .....	44
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>46</b>

# Liste des figures

Fig.I.1 Faraday et l'induction magnétique .....	04
Fig.I.2 Sturgeon invente l'électroaimant.....	04
Fig.I.3 Nicola tesla et ampoule allumée.....	04
Fig.I.4 Schéma du principe du chauffage par induction – Décapage par induction.....	04
Fig.I.5 Description fonctionnement plaque à induction.....	05
Fig.I.6 Système de transmission d'énergie.....	06
Fig.I.7 a) Démonstration de système d'alimentation sans fil en allumant une ampoule située à deux mètres d'une source d'énergie, b) Evolution de transfert d'électricité sans fil.....	07
Fig.I.8 Chargeur de portable .....	08
Fig.I.9 Transfert de puissance pour les véhicules électriques.....	09
Fig.I.10 Système de charge par induction d'une voiture.....	10
Fig.I.11 La recharge du bus électrique par induction Les bobines situées sous la route et dans le plancher du bus batterie sur le toit du véhicule.....	10
Fig.I.12 Secondaire du système Primove développé par Bombardier, (a) Secondaire pendant le déplacement, (b) Secondaire abaissé lors de la recharge.....	11
Fig.I.13 Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train.....	11
Fig.I.14 Système DWPT développé par Renault-Supelec, source.....	12
Fig.I.15 Différents types de pistes, (a) Piste à émetteur unique, (b) Piste à émetteur segmenté Pour les systèmes à émetteur unique la bobine réceptrice est de taille réduite.....	12
Fig.I.16 Une portion de route de la recharge automatique.....	13
Fig.I.17 Placement automatiquement.....	14
Fig.I.18 La solution proposée par ENERGOUS.....	15
Fig.II.1. Symbole de l'inductance pure.....	18
Fig.II.2. Champ d'induction magnétique dans l'espace environnant.....	19

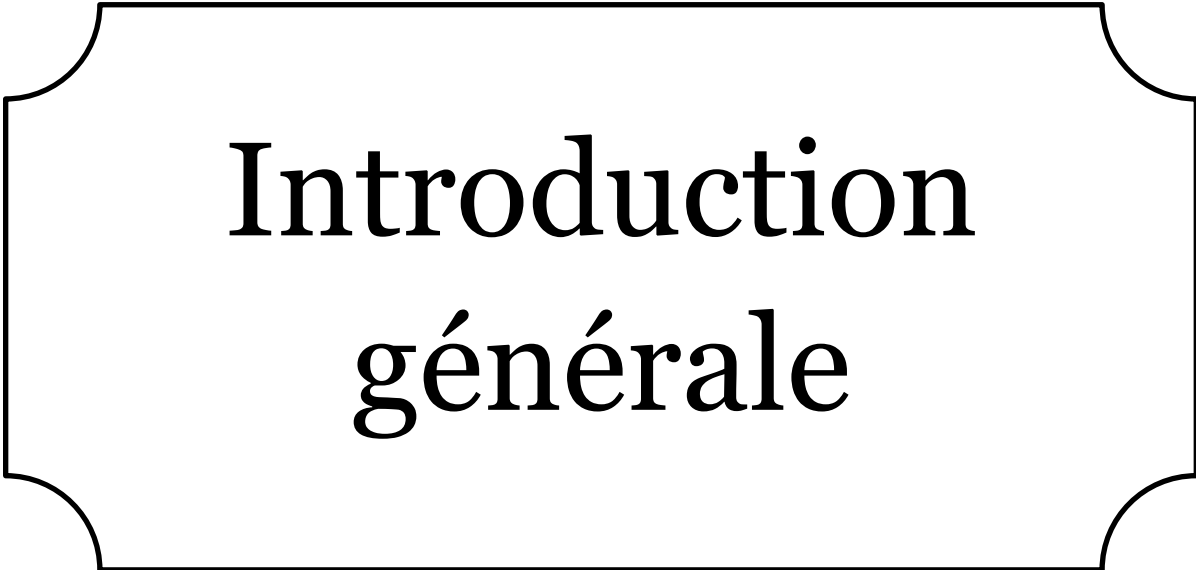


Fig.II.3. Variation du flux magnétique .....	20
Fig.II.4 Le schéma a été découpé en plusieurs étapes pour la compréhension, mais tout se passe dans le même temps .....	21
Fig.II.5 Formes des bobine de CI: a) Circulaire, b) Carrée et c) Elliptique .....	22
Fig.II.6 Effet de peau .....	23
Fig.II.7 Fil divisé .....	23
Fig.II.8 Distribution des courants induits dû à l'effet de proximité a) Courants sources circulant dans le même sens, b) Courants sources circulant dans des sens opposé .....	24
Fig.II.9 Les différents modes de couplage .....	25
Fig.II.10 Circuits magnétiques couplés, flux commun et flux de fuites .....	25
Fig.II.11 Schéma équivalent d'une inductance (a) et d'une mutuelle inductance idéale (b) .....	26
Fig.II.12 Facteurs affectant l'inductance d'une bobine .....	26
Fig.II.13 Couplage totale .....	27
Fig.II.14 Couplage partiel .....	27
Fig.II.15 Dimension de la bobine spirale .....	28
Fig.II.16 Bobine massée ou multicouches .....	29
Fig.II.17 Lien inductif entre deux spires .....	29
Fig.II.18 Deux bobines toriques de sections rectangulaires couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial) .....	30
Fig.II.19 Section rectangulaire de bobine torique divisée en $(2N + 1) \times (2K + 1)$ éléments dont chacun est équivalent à une spire élémentaire .....	31
Fig.II.20 Topologies de résonance: a) SS b) SP c) PS et d) PP .....	32
Fig.II.21 Le modèle de couplage : (a) série-série (SS) et (b) leur Circuit équivalent vu du côté primaire .....	32
Fig.III.1 Dimensions de la bobine spirale .....	38
Fig.III.2 Arrangement basique de la liaison sans fil. (a) Alignement frontal, (b) Désalignement angulaire, et (c) Désalignement latéral .....	39
Fig.III.3 Calcul de l'influence de la translation sur ( $R_c=4.6$ , $V= 48$ V, $P=500$ W): a) Inductance mutuelle, b) Coefficient du couplage, c) Efficacité de translation, d) Tension à la sortie, e) Puissance à la sortie .....	40

Fig.III.4 Inductance et coefficient du couplage en fonction de la rotation pour différentes valeurs de distance ( $r=0$ ) .....	41
Fig.III.5 Efficacité et puissance en fonction de la rotation pour différentes valeurs de distance ( $r=0$ ) .....	41
Fig.III.6 Tension à la sortie en fonction de rotation pour différentes valeurs de distance ( $r=0$ ) .....	42
Fig.III.7 Puissance de sortie et impédance totale en fonction de désalignement pour différentes valeurs de la résistance de charge $R_c$ .....	42
Fig.III.8 Courant d'entrée en fonction de désalignement pour différentes valeurs de la résistance de charge $R_c$ ( $dis=10e-2$ m) .....	43
Fig.III.9 Efficacité et la puissance en fonction de désalignement pour différentes valeurs de fréquence ( $dis=10e-2$ m) .....	43

# Liste des tableaux

Tableau.II.1 Montage d'une bobine en parallèle et série .....	22
Tableau.II.2 Paramètres géométriques utilisés par Mohan .....	28
Tableau.III.1 Caractéristiques géométriques et électromagnétiques .....	39



# Introduction générale

## **Introduction générale**

La mise au point de la première technique de transmission d'énergie sans fil – la technique d'induction – remonte au XIXe siècle. Une découverte en 2006 a permis d'améliorer le rendement afin que la transmission d'énergie sans fil soit attrayante. Marin Soljačić un professeur assistant du département physique et du laboratoire de recherche du Massachusetts Institute of Technology ainsi que ces collègues ont pu allumer une ampoule de 60 watts à 2 mètres de distance avec un rendement total de 40%. Cette amélioration est l'utilisation de la résonance magnétique et le système se nomme WiTricity. Depuis 2006 et l'innovation du Massachusetts Institute of Technology relative à une technique de transmission d'énergie sans fil n'utilisant pas de faisceau, de nombreuses techniques de transmission d'énergie sans fil (TESF) sont étudiées, par exemple

- La transmission par faisceau radiofréquence,
- La transmission par induction d'un champ magnétique,
- La transmission par résonance, etc.

Le fait d'utiliser la résonance magnétique permet d'avoir un rendement correct à des fréquences inférieures aux gigahertz pour une application commerciale, et permet de ne pas interférer avec d'autres appareils fonctionnant sur d'autres fréquences.

Les applications de la TESH vont des dispositifs mobiles et portables aux véhicules électriques en passant par les appareils domestiques et les équipements de bureau. L'évolution technique rapide dans ce domaine tend à montrer que dans l'avenir, le nombre d'appareils électroniques grand public rechargeables ou utilisables sans fil prendra une large place.

Les spécifications portent principalement sur les fréquences adaptées pour la TESH pour pouvoir atteindre le niveau de puissance d'émission et l'efficacité énergétique requises, et sur les dimensions physiques des bobines et des antennes.

La détermination de l'inductance d'une bobine peut être nécessaire pour la compréhension de la conception d'un système de transfert d'énergie sans fil. Il existe plusieurs formules analytiques pour évaluer l'inductance mutuelle. Le nombre de fabricants d'inductances pour la charge sans contact et de circuits intégrés va lui aussi augmenter pour répondre aux besoins croissants des utilisateurs.

Dans ce travail, on va étudier le TESF par une méthode de couplage résonance magnétique entre deux bobines spirales circulaires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

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 avons proposé un état de l'art sur les inductances et les bobines et les méthodes de calcul des inductances propre et mutuelles. Ainsi que, nous avons proposé une méthodologie pour résoudre le problème de transfert d'énergie sans fil.

Le troisième chapitre est consacré à l'application du TESF par couplage résonnant en champ proche entre deux bobines spirales circulaires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

# Chapitre I :

## Induction électromagnétique et la transmission de puissance sans fil

- I. INTRODUCTION.**
- II. HISTOIRE.**
- III. EXPLOITATION DE L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE.**
- IV. SYSTEMES DE TRANSMISSION A CHAMP PROCHE.**
- V. SYSTEMES DE TRANSMISSION A CHAMP LOINTAIN.**
- VI. POUR LES PORTABLES.**
- VII. POUR LES VEHICULES ELECTRIQUES.**
- VIII. SYSTEMES DE RECHARGE SANS CONTACT.**
- IX. DES ROUTES A INDUCTION POUR SE RECHARGER EN ROULANT.**
- X. LOCALISATION DE LA RECHARGE SANS CONTACT.**
- XI. LES AVANTAGES DE L'ENERGIE SANS FIL.**
- XII. L'ELECTRICITE SANS FIL BIENTOT A L'ASSAUT DE NOTRE QUOTIDIEN.**
- XIII. CONCLUSION.**

## **Chapitre I : Induction électromagnétique et la transmission de puissance sans fil**

### **I. INTRODUCTION**

Après avoir découvert qu'un courant électrique induisait un champ magnétique, les scientifiques, par de multiples expériences, ont ensuite démontré que le processus inverse existait: un champ magnétique peut générer un courant électrique. On appelle ce processus l'induction électromagnétique. Ce dernier est la production d'un courant électrique par magnétisme. Ce chapitre va éclaircir l'exploitation de l'induction électromagnétique (pour produire l'électricité sans fil), découverte par Faraday en 1831, qui a tant d'applications technologiques: moteur électrique, alternateurs, transformateurs, freinage par courant de Foucault.

La transmission de puissance sans fil est une technologie ayant un énorme potentiel qui permet le développement des systèmes et des réseaux hautement intégrés et autonomes. Ce chapitre donne l'état de l'art dans le domaine de la transmission d'énergie sans fil, avec une brève histoire de son progrès remarquable, il décrit des différentes technologies de transmission d'énergie sans fil, tout en illustrant les avantages et les inconvénients.

### **II. HISTOIRE**

En 1825, William Sturgeon invente l'électroaimant, un fil conducteur enroulé autour d'un noyau de fer. Le principe de l'induction électromagnétique - un champ magnétique fluctuant induit un courant électrique dans un fil électrique - est découvert par Michal Faraday en 1831. Nicholas Joseph Callan était le premier (en 1836) qui a fait la démonstration d'une transmission d'une énergie électrique sans fil. En 1864, James Clerk Maxwell réalise une modélisation mathématique du comportement des radiations électromagnétiques. En 1888, Heinrich Hertz réalise une transmission sans fil d'ondes radio, validant les modèles mathématiques de Maxwell. Quelques années plus tard, Guglielmo Marconi perfectionne le transmetteur, en y ajoutant un conducteur élevé et une connexion à la terre. Nikola Tesla investigue aussi dans la transmission radio mais au contraire de Marconi, Tesla conçoit son propre transmetteur, d'une puissance instantanée cinq fois supérieure à celui de ses prédécesseurs. Tous ces dispositifs utilisent au



## Chapitre I Induction électromagnétique et la transmission de puissance sans fil

minimum 4 circuits de résonance, 2 pour l'émetteur et 2 pour le récepteur. Tandis que les techniques sans fil se développent au début du XXe siècle, des recherches sont effectuées sur des méthodes de transmission alternatives. L'objectif était de générer un effet localement et de le détecter à distance. Au St. Louis World's Fair (1904), un prix est offert pour l'alimentation à une distance de 30 mètres d'un moteur de 0.1 cheval (75 W) [1]-[2]-[3]-[4].



Fig.I.1 Faraday et l'induction magnétique

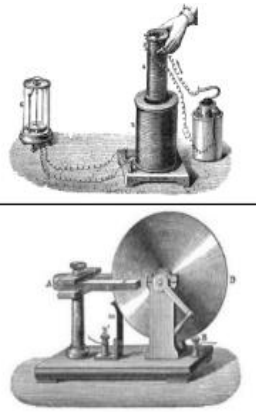


Fig.I.2 Sturgeon invente l'électroaimant

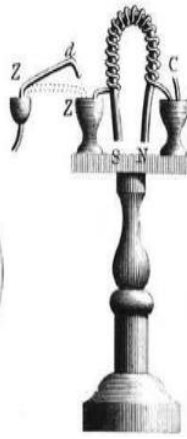


Fig.I.3 Nicola tesla et ampoule allumée

### III. EXPLOITATION DE L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

#### III.1 Four de fusion à induction électromagnétique

Le générateur d'induction envoie un courant alternatif à travers une bobine d'induction, ce qui génère un champ électromagnétique. Ce champ induit des courants de Foucault dans les matériaux conducteurs comme l'acier. En raison de la résistance de l'acier, ces courants sont transformés en chaleur par induction. La chaleur est générée en dessous du revêtement, ce qui entraîne un décollement rapide et propre de celui-ci [5]-[6].

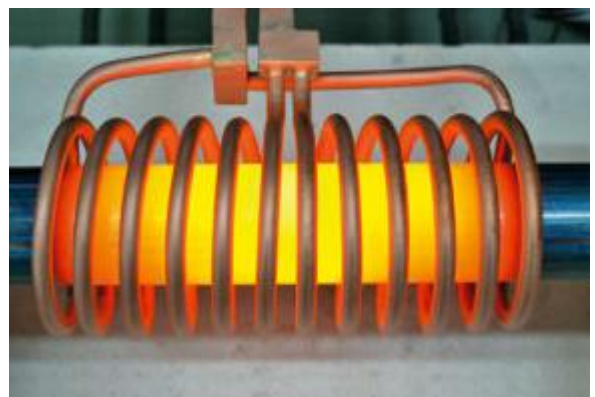
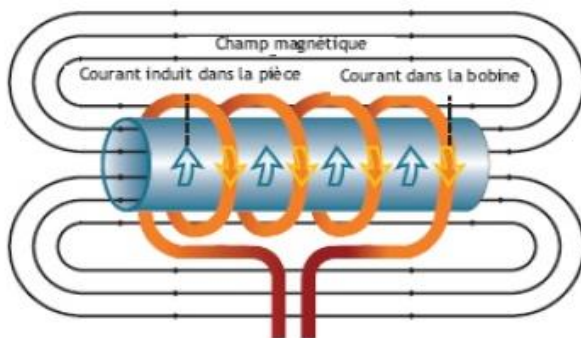


Fig.I.4 Schéma du principe du chauffage par induction  
- Décapage par induction

Le système de décapage par induction est idéal pour décaper la peinture, la rouille et les autres revêtements (caoutchouc vulcanisé, revêtements ignifuges, peintures époxy, etc.), tout en offrant le contrôle des fonctions suivantes :

- la consommation d'énergie.
- la gamme de température de décollement.
- la pénétration de la chaleur.
- la vitesse de décapage.

Ce système est idéal pour les navires, les cuves, les plates-formes offshore et les pipelines.

### III.2 La plaque à induction

L'induction est basée sur le principe de l'échauffement par courants de Foucault de matériaux ayant une conductibilité électrique.

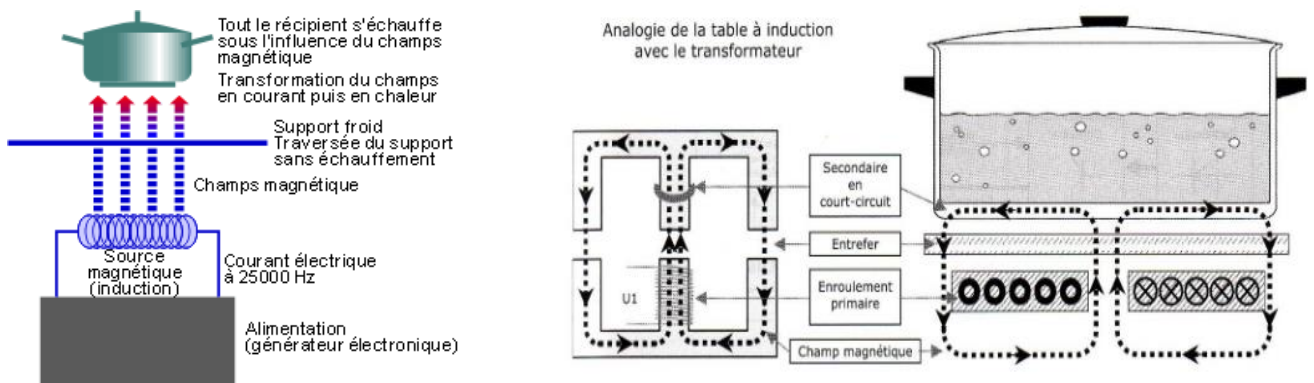


Fig.I.5 Description fonctionnement plaque à induction [7]

La table à induction peut être assimilée à un transformateur monophasé dont le secondaire est en court-circuit : l'inducteur correspond au primaire, la table vitrocéramique à l'entrefere et le fond de la casserole au secondaire en court-circuit.

Concrètement, sous la plaque vitrocéramique (plaque de verre) des inducteurs (bobine d'induction) sont placées sous chaque feu. L'inducteur est alimenté par un convertisseur qui transforme le courant électrique continu en courant électrique alternatif haute fréquence (20 à 50 KHz) [7].

Ce courant alternatif génère un champ électromagnétique traversant la plaque vitrocéramique est induit des courants électriques (courant de Foucault) produisant de la chaleur dans le fond du récipient à son contact.

### III.3 Transmission d'énergie sans fil

Un système de transmission d'énergie sans fil inductif (illustré par la Fig.I.6) comporte un dispositif électronique d'émetteur, une bobine d'émission, une bobine de réception et un dispositif électronique de récepteur. La puissance reçue dépend de plusieurs facteurs : puissance d'émission, couplage entre la bobine d'émission (Tx) et les bobines de réception (Rx) (distance, alignement, propriétés physiques, ferrites), métaux étrangers situés à proximité, mais aussi tolérances des composants [8].

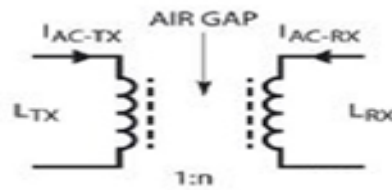


Fig.I.6 Système de transmission d'énergie

Dans un système de transmission sans fil, l'énergie est transmise en utilisant un champ magnétique alternatif. Le courant alternatif présent dans la bobine d'émission produit un champ magnétique.

## IV. SYSTEMES DE TRANSMISSION A CHAMP PROCHE

Ces techniques permettent la transmission d'énergie sur une distance identique au diamètre des éléments transmetteurs. Elle va le plus souvent de quelques cm à quelques mètres.

### IV.1 Couplage inductif

Le principe d'un transformateur électrique est l'exemple le plus courant de transmission d'énergie sans fil. Le transfert d'énergie qui se produit par couplage électromagnétique est connu sous le nom de courant induit. L'inconvénient principal est la proximité requise du récepteur pour permettre le couplage. Les applications sont diverses :

- brosse à dent électrique, portables.
- les plaques de cuisson à induction.
- transfert transcutané (TET ou Transcutaneous Energy Transfer) dans les dispositifs de piles cardiaques (ex AbioCor), et autres dispositifs implantés.

### IV.2 Couplage inductif par résonance

Le couplage inductif par résonance est une réponse prometteuse aux défauts liés au couplage inductif respectant les traditions ainsi qu'aux rayonnements électromagnétiques :

## Chapitre I Induction électromagnétique et la transmission de puissance sans fil

distance et efficacité. En 2006, Marin Soljačić mais aussi d'autres chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) proposaient une nouvelle application de transfert d'énergie sans fil, en se basant sur la théorie de l'électromagnétisme à champ proche, et l'utilisation de «résonateurs couplés». L'énergie canalisée peut ainsi être transformée en énergie électrique continue au niveau du récepteur, et elle ne serait pas dissipée ou absorbée par l'environnement du dispositif. Le 7 juin 2007 un prototype est réalisé par le MIT : WiTricity permet d'alimenter une ampoule de 60 watts à une distance de 2 mètres, avec un rendement de 40 %. Actuellement le transfert d'énergie par couplage inductif résonant est souvent utilisé dans énormément d'implants commercialisés [9].

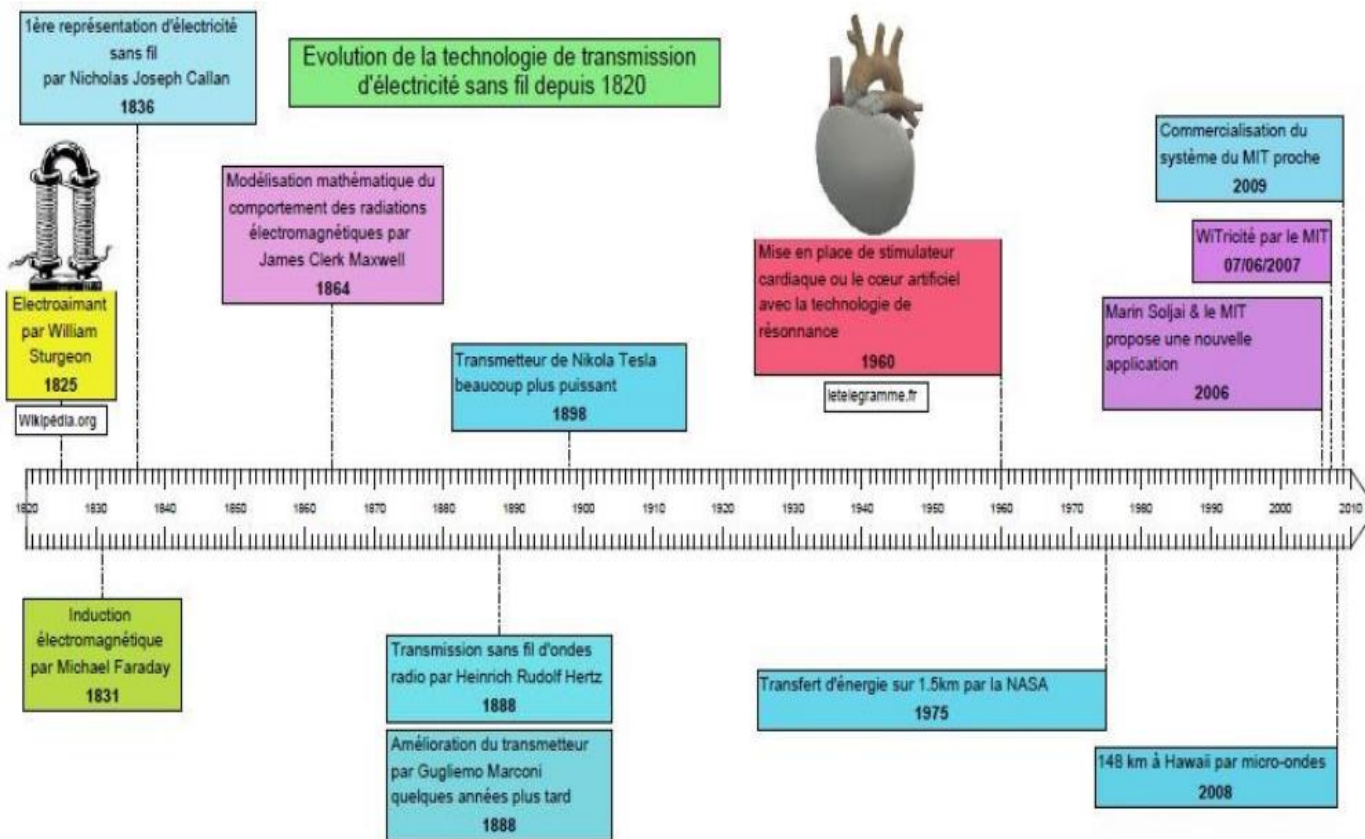


Fig.I.7 a) Démonstration de système d'alimentation sans fil en allumant une ampoule située à deux mètres d'une source d'énergie, b) Evolution de transfert d'électricité sans fil [10]

• **WiTricité**

La WiTricité (Wireless elecTRICITY) est un mot-valise pour électricité sans fil, découvert par Dave Gerding en 2005 et utilisé par l'équipe de recherche du Massachusetts Institute of Technology, dirigée par le professeur Marin Soljačić en 2007 pour décrire la capacité... Le concept de la WiTricité est principalement semblable au champ magnétique de la bobine Tesla.

**V. SYSTEMES DE TRANSMISSION A CHAMP LOINTAIN**

Ces dispositifs permettent l'acheminement de l'énergie sur des distances énormément plus grandes que le diamètre des transmetteurs, par exemple sur plusieurs kilomètres. La peur d'éventuels risques sanitaires concernant la transmission aérienne d'énergie est une cause de l'abandon du projet. L'utilisation de radiations microondes directionnelles sert à limiter les risques concernant la santé et la sécurité. En 2007, les recherches commencent à aboutir à des solutions concrètes, tels que le dispositif Witricité [10].

En faisant converger le champ électromagnétique grâce à une antenne géante, la NASA a réalisé en 1975 un transfert d'environ 34 kW sur une distance de 1,5 km. Le rendement obtenu était, (selon la NASA) supérieur à 82%. L'utilisation d'un tel dispositif n'est bien entendu pas sans risque pour la santé, au vu des champs électromagnétiques particulièrement puissants.

**VI. POUR LES PORTABLES**

Le principe de l'induction électromagnétique est utilisé dans les plaques de cuisson à induction pour produire de la chaleur, il s'agit de transformer un champ électromagnétique en énergie. Dans le cas de la recharge d'une batterie, le chargeur diffuse un champ électromagnétique qui est transformé en courant induit grâce à une petite bobine située à l'intérieur de l'appareil à recharger, le courant ainsi créé sert alors à recharger la batterie.

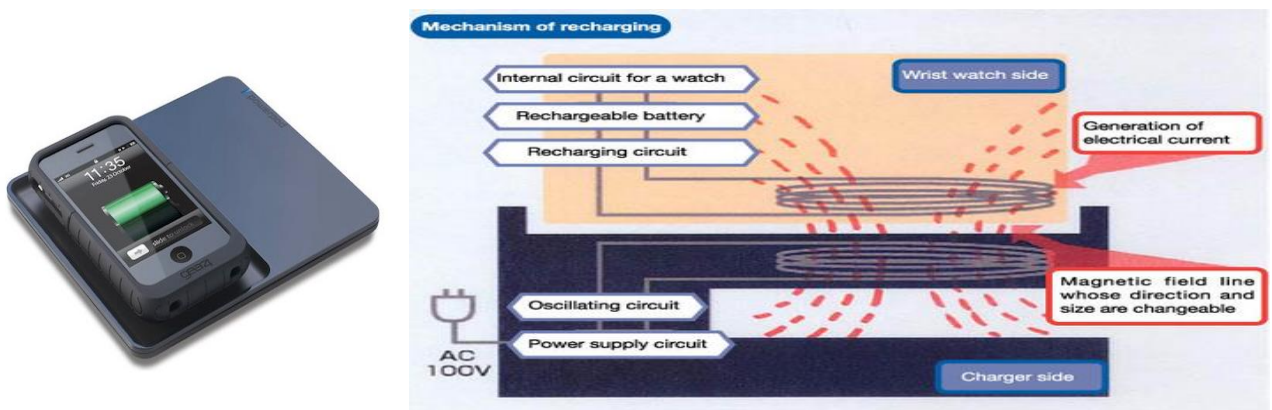


Fig.I.8 Chargeur de portable

**VII. POUR LES VEHICULES ELECTRIQUES**

Les véhicules électriques et hybrides présentent un grand intérêt écologique, mais la recharge rebute les consommateurs. L'entreprise WiTricity a proposée donc une solution au problème en créant une expérience plus efficace. La recharge est automatique à la maison, dans les garages de stationnement, dans les dépôts de la flotte, et dans les kiosques à distance. Ce kit permet même la recharge d'appareils mobiles pendant la conduite, sans la nécessité de cordons d'alimentation [11].

**VII.1 Transmission d'énergie sans fil utilisant un champ magnétique**

Il existe plusieurs types de méthodes TESF, mais la transmission d'énergie sans fil utilisant un champ magnétique (TESF-CM) est l'une des principales méthodes étudiées aux fins de la normalisation en ce qui concerne la TESF pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables. La TESF-CM pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables utilise à la fois l'induction et la résonance magnétique [12].

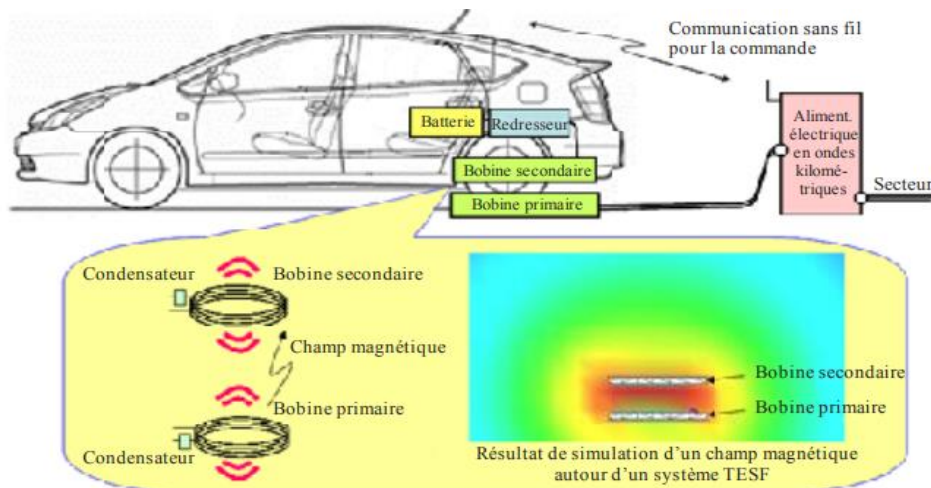


Fig.I.9 Transfert de puissance pour les véhicules électriques

**VII.2 Convertisseur AC-DC**

Dans un premier temps un convertisseur AC-DC redresse la tension du réseau. Un convertisseur DC-AC alimente ensuite la bobine primaire, posée sur le sol ou enterrée, à une fréquence variant entre 20 et 100kHz. La bobine primaire génère alors un champ magnétique qui va induire une tension alternative aux bornes de la bobine secondaire intégrée au véhicule. Un convertisseur AC-DC connecté à cette bobine secondaire permet la recharge des batteries. Les condensateurs de résonance notés  $C_p$  et  $C_s$  sont utilisés au primaire et au secondaire pour compenser l'énergie réactive des bobinages.



Fig.I.10 Système de charge par induction d'une voiture

Jusqu'ici, la construction d'un système de charge avec transmission d'énergie sans fil nécessitait une solution complexe [14] :

- un chargeur de batterie.
- un régulateur Buck de commutation et des circuits de transmission d'énergie sans fil.

Cette solution tendait à être extrêmement complexe et difficile à réaliser.

## VIII. SYSTEMES DE RECHARGE SANS CONTACT

### VIII.1 Recharge statique

De nombreuses compagnies dans le monde ont développé leurs propres systèmes de recharge sans contact statiques. Nous citerons par exemple le Waseda Electric Bus au Japon avec une puissance allant de 30 kW à 150 kW pour une distance entre bobines émettrice et réceptrice de 105 mm (Fig.I.11). Dans ce système, le véhicule se recharge à chaque passage dans les arrêts de bus. Citons également des projets de recharge de bus pour des puissances de respectivement 20 kW et 60 kW en Nouvelle Zélande et en Italie [3].

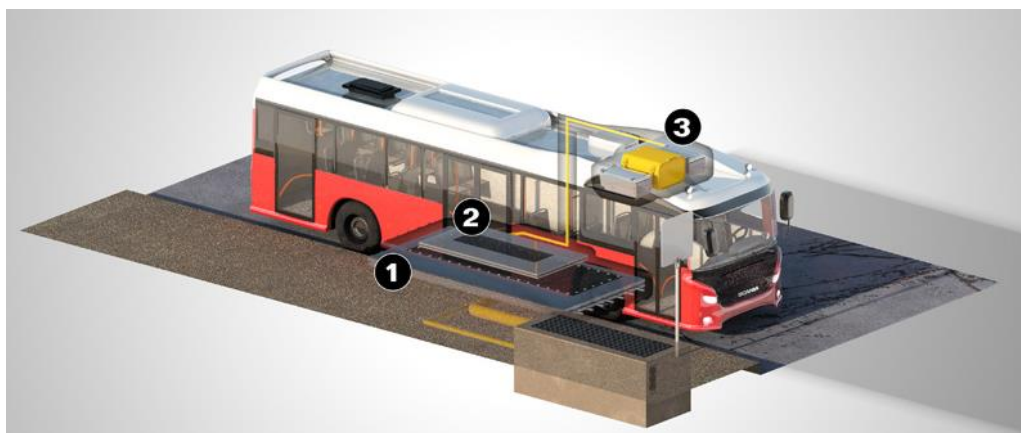


Fig.I.11 La recharge du bus électrique par induction, les bobines situées sous la route et dans le plancher du bus batterie sur le toit du véhicule [4]



Fig.I.12 Secondaire du système Primove développé par Bombardier, (a) Secondaire pendant le déplacement, (b) Secondaire abaissé lors de la recharge [4]

La société Bombardier propose également une solution de recharge aux arrêts pour le bus Primove au travers d'un système sans contact. La puissance de charge est de 200 kW [4]. La (Fig I.12) montre une partie du récepteur (sous le véhicule) qui s'abaisse pour se rapprocher de l'émetteur au sol.

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

En juillet 2012, WiTricity fait une démonstration avec une BMW électrique conduite du Massachusetts au Connecticut sur 225 km avec trois arrêts de rechargement sans fil. Sur le toit de la voiture trois lampes à LED permettent de visualiser le passage du courant électrique. Déjà, un concurrent arrive sur le marché. L'électricité sans fil connaît ainsi un démarrage prometteur. Sans doute en priorité sur des véhicules qui ne posent pas de problème de taille des bobines.



Fig.I.13 Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train [11]

Ainsi, le 13 février 2013, l'Institut avancé de science et de technologie de la Corée (KAIST) et l'Institut de recherche sur les chemins de fer de Corée ont-ils annoncé avoir développé un système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train (Fig.I.13). Plus fort encore que les systèmes américains, la technologie coréenne permet le rechargement pendant les



trajets, les arrêts et le parking. D'où une réduction d'un cinquième de la quantité des batteries nécessaires.

### VIII.2 Recharge dynamique

Le constructeur français Renault a développé pour sa part un système de recharge inductif de 2,5 kW pour une distance de 15 cm entre émetteur et récepteur à une fréquence de 85 kHz. Le projet a été réalisé en collaboration avec Centrale-Supélec.



Fig.I.14 Système DWPT développé par Renault-Supélec, source [16]

Dans ce type de recharge, le véhicule se charge en roulant (Fig.I.14). Cela se fait à partir d'une voie spécialement équipée où sont disposées des bobines qui ne s'activent que lors du passage du véhicule, nous parlerons alors de route électrique. Cette solution offre la possibilité de réduire la capacité des batteries embarquées dans le véhicule, et donc de réduire son poids et son prix [3-6-7-8-9-10].

Il existe deux solutions techniques pour la recharge inductive dynamique. La différence provient de la forme des bobines côté de piste. Les pistes peuvent être soit à émetteur segmenté, soit à émetteur unique (Fig.I.15.a).

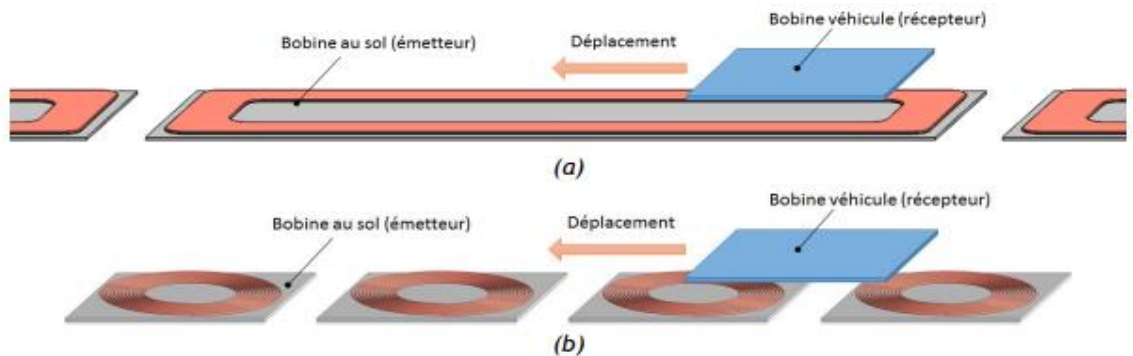


Fig.I.15 Différents types de pistes, (a) Piste à émetteur unique, (b) Piste à émetteur segmenté pour les systèmes à émetteur unique la bobine réceptrice est de taille réduite [3]

Par rapport à la bobine émettrice de forme allongée dans la direction de déplacement du véhicule. Ce type de piste permet d'avoir un couplage relativement constant tout au long de l'émetteur. De plus, bien que quasi constant, le coefficient de couplage magnétique entre l'émetteur et le récepteur est relativement faible ce qui est problématique en matière d'efficacité énergétique du transfert d'énergie comme nous le verrons plus loin. Pour les pistes segmentées, il n'y a pas de différence de taille remarquable entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (Fig.I.15.b). Ce type de piste nécessite de connaître la position du véhicule en temps réel afin d'alimenter au fur et à mesure les bobines sous le véhicule.

### **IX. DES ROUTES A INDUCTION POUR SE RECHARGER EN ROULANT**

Dans l'automobile, la recharge par induction connaîtra d'autres évolutions. Notamment celle d'intégrer complètement des routes. L'entreprise américaine Qualcomm en partenariat avec Renault a récemment doté une portion de route de cette installation. Cela permet alors de rouler et de se recharger en même temps [17].



Fig.I.16 Une portion de route de la recharge automatique

Cette société a conçu avec la marque au losange le premier prototype de route de ce type en 2017. Concrètement, cette installation est pour l'heure capable de charger deux véhicules en même temps, chacun allant jusqu'à 100 km/h. La puissance de charge délivre tout de même 20 kW et permettrait au véhicule équipé d'une batterie de 40 kWh de se charger en deux heures. À titre de comparaison, les bornes de charge ultra-rapides Tesla développent 145 kW voire 350 kW prochainement [18].

Ce type d'aménagement n'en est qu'à ses débuts mais ouvre la porte aux routes permettant de se recharger en roulant. Ainsi, à terme, il n'y aurait plus de problème d'autonomie et les V.E pourront se recharger en permanence. Mais nous n'en sommes pas encore là car ces installations sont coûteuses et nous voyons seulement les grandes villes s'y investir au début sur quelques portions de route.

### **X. LOCALISATION DE LA RECHARGE SANS CONTACT**

Mieux encore, certaines voitures viennent se placer automatiquement au-dessus de la plate-forme à induction et se charge sans que vous n'ayez rien à faire. Pour celles ne profitant pas de cette technologie, des aides sur l'écran de l'habitacle aident à viser juste.

De plus, le chargement par induction permet d'éviter l'électrocution. C'est d'ailleurs cette technique qui est utilisée depuis des années par les brosses à dents électriques.

En plus de sa praticité, cette recharge peut être très rapide et vient concurrencer les chargeurs rapides (pourvu que le véhicule soit parfaitement positionné et que les déperditions thermiques soient minimales).



Fig.I.17 Placement automatiquement

### **XI. LES AVANTAGES DE L'ENERGIE SANS FIL**

Avec une énergie sans fil, nous n'aurions plus à nous soucier de tout cela. Nous pourrions facilement recharger nos téléphones en position couchée dans nos lits et pas de se lever pour trouver le cordon d'alimentation et le brancher, et avoir nos ordinateurs portables à court de batterie qui pourrait devenir une chose du passé [19].

Cependant, les scientifiques ne s'intéressent pas à notre confort et notre tranquillité d'esprit, ils ne pensent que par l'expérimentation de transmission d'énergie sans fil et à repousser les limites de cette technologie émergente. Et oui, Monsieur, ils ont pour cette technologie des projets plus grands.

En outre, l'énergie sans fil permettrait de réduire considérablement les coûts associés à la fabrication et le maintien de connecteurs directs, et il serait plus facile de garder l'équipement médical électrique stérile en éliminant le besoin de les vérifier constamment.

### **XII. L'ELECTRICITE SANS FIL BIENTOT A L'ASSAUT DE NOTRE QUOTIDIEN**

Si le rechargement sans fil n'a pas encore pénétré nos usages, il se pourrait que cela soit le cas plus vite que l'on pourrait l'imaginer. Entreprises, start-ups et grands groupes, s'emploient

déjà pour développer les meilleures technologies de puissance sans fil et créer les conditions de leur essor.

L'entreprise américaine Energous, pionnière du secteur, a mis en place la technologie Watt Up, permettant de générer un champ dans lequel tout appareil électronique disposant d'un récepteur adapté peut se recharger. Dans ce « champ d'électricité » délocalisé d'un rayon de 4 à 5 mètres, les appareils se rechargent en mobilité, à partir des ondes générées par un émetteur d'ondes radiofréquences [20]



Fig.I.18 La solution proposée par ENERGOUS

### **XIII. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, on a exposé un historique sur l'induction électromagnétique et la transmission d'énergie sans fil. Ensuite, On a présenté l'importance de la découverte de Faraday dans la naissance de transfert d'énergie sans fil.

#### **Référence**

- [1] I. Kharrat. Modélisation et réalisation d'un système de récupération d'énergie imprime : caractérisation hyper fréquence des matériaux papiers utilisés. Université Grenoble Alpes, 2014.
- [2] H. Takhedmit. Modélisation et conception de circuits de réception complexes pour la transmission d'énergie sans fil à 2.45 GHz. Ecole Centrale de Lyon, 2010.
- [3] ÉRIC LABOURÉ. Recharge sans contact de véhicules électriques. Publication 3EI N° 3EI 2020-100
- [4] C. T. Rim and Chris Mi, Wireless Power Transfer for Electric Vehicles. 2017
- [5] <https://www.waseda.jp/top/en-news/49596>
- [6] [http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE\\_11\\_20171201.pdf](http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE_11_20171201.pdf)

- [7]<http://www.assistancetechnic26.fr/blog/depanneur-electromenager/fonctionnement-plaque-induction/>
- [8]: U. C. Berkeley, "Roadway Powered Electric Vehicle Project Track Construction and Testing Program Phase 3D," Traffic, 1995
- [9] [http://www.serpentine.ch/p\\_realisations/Realisations.html](http://www.serpentine.ch/p_realisations/Realisations.html)
- [10] [http://www.electrosup.com/transmission\\_d\\_energie\\_sans\\_fil.php](http://www.electrosup.com/transmission_d_energie_sans_fil.php)
- [11] [https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST\\_OLEV\\_en.pdf](https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_en.pdf)
- [12] A. Caillierez, « Etude et mise en œuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicules en mouvement », Thèse Université Paris-Saclay, 2016
- [13]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_power\\_transfer](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer)
- [14]: Karim Kadem, « Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques », Thèse Université Paris-Saclay, 2020
- [15]: Paul-Antoine Gori, « Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique », Thèse Université Paris-Saclay, 2019
- [16] Transmission d'énergie sans fil au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radiofréquence. Rapport UIT-R SM.2303-1.  
[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf)
- [17]<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/technologie-renault-teste-route-recharge-voitures-electriques-33574/>
- [18]A. Hammoud. Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts. Université Montpellier, 2017.
- [19] M. IBRAHIM. Analyse d'Interopérabilité d'un Système de Recharge Sans Contact pour le Véhicule Electrique. UNIVERSITE PARIS-SUD.2015
- [20]<https://www.energystream-wavestone.com/2018/03/lelectricite-fil-bientot-realite-quotidien/>

# Chapitre II : Inductance et bobines

**I. INTRODUCTION.**

**II. GENERALITES SUR LES INDUCTANCES.**

**IV. LES DIFFERENTES GEOMETRIES DE BOBINE.**

**V. PERTES DANS LES BOBINES.**

**VI. LES DIFFERENTS MODES DE COUPLAGE.**

**VII. BOBINE COUPLEES MAGNETIQUEMENT.**

**VIII. METHODE DE CALCUL DES INDUCTANCES ET INDUCTANCE MUTUELLE.**

**IX. ANALYSE DU TESF VIA DES RESONANCES MAGNETIQUES COUPLEES.**

**X. CONCLUSION.**

## Chapitre II : Inductance et bobines

### I. INTRODCUTION

Les premières recherches étaient dirigées vers l'intégration de capacités et d'inductances dans le but de réaliser soit des circuits résonants soit des filtres selon le mode de connexion mis en œuvre. Le niveau de puissance demandée, l'encombrement et le coût sont des facteurs déterminants dans le choix de leur utilisation. La plupart des inductances intégrées que l'on voit dans le transfert d'énergie possèdent une forme spirale circulaire, rectangulaire, carrée, polygonale. Les structures d'inductances hexagonales et circulaires sont très connues pour fournir un accroissement des performances du système. Comme le précise l'intitulé du chapitre, nous exposerons un état de l'art sur les inductances et les méthodes de calcul des inductances qui sont importante à la conception des systèmes de transfert d'énergie.

### II. GENERALITES SUR LES INDUCTANCES

#### II.1 Définition

L'inductance est un dipôle électrique formé d'une ou de plusieurs spires enroulées autour d'un noyau. Ce dipôle possède la propriété de stocker de l'énergie magnétique et de créer un champ magnétique lorsqu'il est traversé par un courant électrique. Le symbole représentatif de l'inductance est donné par la Fig.II.1 [1].

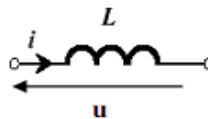


Fig.II.1. Symbole de l'inductance pure

Il existe plusieurs types d'inductances à savoir les inductances classiques principalement utilisées en basse fréquence (plus précisément jusqu'à quelques MHz) et les inductances planaires pour des applications en haute fréquence.

#### II.2 Inductance et induction propre

Lorsqu'un courant électrique traverse un conducteur, un champ magnétique est induit dans l'espace environnant. Ce phénomène se traduit par une accumulation locale d'énergie sous

forme de lignes de flux magnétique. Tout composant qui utilise ces propriétés est appelé inductance ou plus communément bobine, bobine d'induction, self, ...

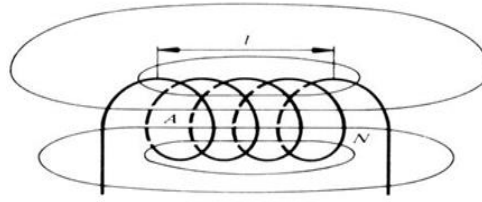


Fig.II.2. Champ d'induction magnétique dans l'espace environnant

Nous pouvons dire également qu'une inductance est caractérisée par la propriété de créer un flux magnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. Le facteur de proportionnalité entre le flux créé et le courant électrique est appelé coefficient d'auto-induction, inductivité ou encore inductance, et est symbolisé par la lettre L et exprimé en Henry [1] [2].

### II.3 Principales caractéristiques

Une inductance est classiquement caractérisée par la valeur de son inductance pure L, son facteur de qualité Q et sa résistance R. Le facteur de qualité est donné par la formule :

$$Q = L\omega/R \quad (\text{II.1})$$

Comme n'importe quelle bobine, la bobine de charge aura également certaines pertes qui réduiront l'efficacité globale du système.

La valeur de l'inductance L n'est rien d'autre que le coefficient de proportionnalité entre le flux total à travers la bobine et le courant qui la traverse.

$$\Phi(t) = L i(t) \quad (\text{II.2})$$

La variation de ce flux est à l'origine d'une force contre électromotrice (f<sub>cem</sub>) ou électromotrice (f<sub>em</sub>).

$$u(t) = d\Phi(t)/dt \quad (\text{II.3})$$

En régime quelconque :

$$u(t) = L di(t)/dt \quad (\text{II.4})$$

Ou u est la tension aux bornes de la bobine (en V), et i est l'intensité traversant la bobine (en A),  $\Phi$  est le flux total à travers la bobine, L est l'inductance propre (en Henry H).

Une inductance est un élément à "inertie de courant". Cela signifie qu'une inductance a pour effet de freiner les variations du courant. En effet,

$$\frac{di}{dt} = \frac{v(t)}{L} \quad (\text{II.5})$$



Cela montre que plus l'inductance  $L$  est élevée, plus les variations de courant sont faibles. On utilise souvent les inductances quand on veut "lisser" un courant, c'est à dire limiter ses fluctuations. Puis en régime sinusoïdal pur :

$$V(t) = j L \omega I = Z I \tag{II.6}$$

Ou  $Z = jL\omega$  : Impédance d'une bobine sans pertes.

**II.4 Phénomène d'induction.**

**II.4.1 Flux d'induction magnétique**

Un courant constitue une source de champ d'induction magnétique. Lorsqu'un courant circule dans un circuit, on conçoit que la surface  $\Sigma$  sous-tendue par ce circuit subit un flux d'induction magnétique [3]-[4]-[5]:

$$\Phi = \iiint_{\Sigma} \vec{B} \cdot \vec{ds} \tag{II.7}$$

**II.4.2 Loi de Faraday**

Une variation du flux magnétique  $\Phi$  à travers un circuit induit dans ce circuit une force électromotrice égale et opposée à la dérivée  $d\Phi/dt$  quelle que soit la cause qui lui a donné naissance. Ainsi, si le circuit est seul dans l'espace, de géométrie fixe et parcouru par un courant  $i$  variable, comme  $\Phi = Li$ ,  $d\Phi/dt = L di/dt$ .

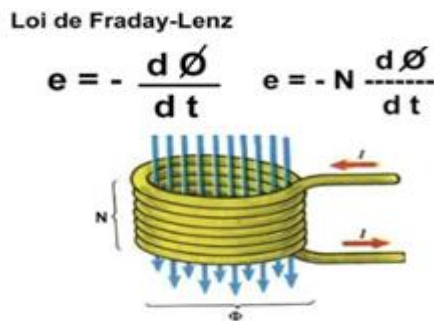


Fig.II.3. Variation du flux magnétique

**II.4.3 Champ magnétique créé par un solénoïde**

Un solénoïde est une bobine de longueur  $L$  et de rayon  $R$  constituée de  $N$  enroulements (spires) (Fig.II.2). On peut montrer que, si  $L$  est grand par rapport à  $R$ , le champ magnétique est uniforme à l'intérieur et nul à l'extérieur (excepté près des bords où les lignes de champ sont déformées). Dans un tel système, l'amplitude du champ magnétique a pour expression [1]-[6]-[7]:

$$B = \mu \frac{N}{L} I \tag{II.8}$$

Où  $I$  représente l'intensité du courant qui circule dans le circuit, et  $\mu$  la perméabilité du vide.

#### II.4.4 Champ magnétique créé par une bobine plate

Le champ magnétique créé par une bobine plate n'est plus uniforme. Seul le champ magnétique créé sur son axe prend une expression simple. Il est parallèle à l'axe de la bobine, et son amplitude vaut :

$$B = \mu \frac{N}{L} I \frac{1}{2} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \tag{II.9}$$

Où  $L$  est la longueur de la bobine, et les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont des angles orientés.

#### II.5 Phénomène d'auto-induction

La spire parcourue par le courant créé un champ magnétique qui créé un courant induit dans cette même spire. D'après la loi de Lenz, ce courant induit s'oppose à la cause qui lui a donné naissance: ce courant induit est dans le sens inverse du courant initial qui s'établit dans la spire.

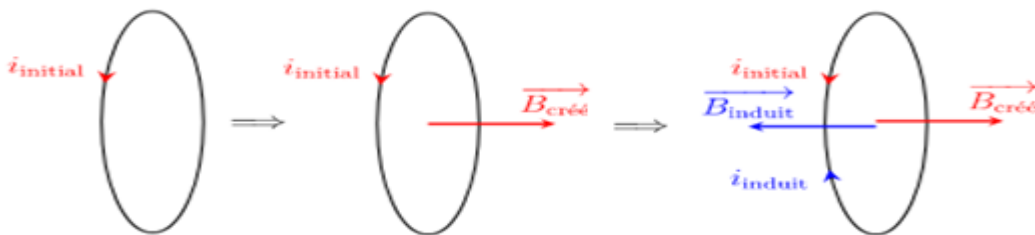


Fig.II.4 Le schéma a été découpé en plusieurs étapes pour la compréhension, mais tout se passe dans le même temps

Le phénomène physique correspond au stockage d'énergie sous forme magnétique. Le stockage est momentané et l'énergie est restituée au circuit en courant. L'énergie accumulée par l'élément auto inductif vaut [10]:

$$Emag = 0.5 L i^2(t) \tag{II.10}$$

Le sens du courant électrique définit ici la direction de l'axe de la bobine. Inverser le sens du courant revient à inverser la direction de  $B$ .

### III. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

La bobine possède la même caractéristique qu'un condensateur, c'est-à-dire la possibilité d'emmagasiner de l'énergie, et s'exprime en Henry (H). La bobine est fréquemment utilisée en série ou en parallèle d'une résistance, pour profiter des caractéristiques de l'inductance et de la résistance.

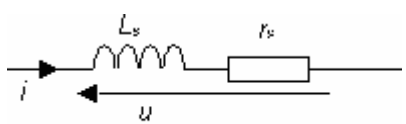
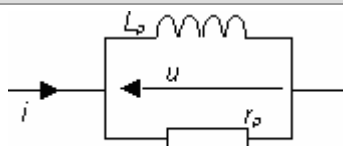
Mode série	Mode parallèle
 <p>Modèle série Montage d'une bobine en série avec une résistance</p>	 <p>Modèle parallèle Montage d'une bobine en parallèle avec une résistance</p>
$u = L_s \cdot \frac{di}{dt} + r_s \cdot i$ <p>Equation de l'inductance en série avec une résistance</p>	$i = \frac{1}{L_p} \cdot \int_t u dt + \frac{u}{r_p}$ <p>Equation de l'inductance en parallèle avec une résistance</p>

TABLEAU.II.1 Montage d'une bobine en parallèle et série

**IV. LES DIFFERENTES GEOMETRIES DE BOBINE**

Les géométries de base décrites dans la littérature utilisent des bobinages circulaires ou rectangulaires. Afin d'améliorer le couplage entre les bobines, différents auteurs proposent des combinaisons de plusieurs bobinage au primaire comme au secondaire.

De nombreuses formes de bobines peuvent être choisies à la fois pour les parties primaire et secondaire: circulaire, carrée ou elliptique comme illustré à la Fig.II.5. Les bobines fabriquées habituellement et utilisées dans cette application sont réalisées en fil de Litz isolé, pour lequel les effets de peau et de proximité sont très faibles dans la gamme de fréquences considérée [11]-[12].



Fig.II.5 Formes des bobine de CI: a) Circulaire, b) Carrée et c) Elliptique

**V. PERTES DANS LES BOBINES**

**V.1 EFFET DE PEAU**

Comme la fréquence augmente le courant à travers un fil aura tendance à circuler principalement au travers de la couche externe, avec peu ou pas de courant au centre du fil. Etant donné que seule une partie de la surface du fil est utilisé, la résistance en courant alternatif sera plus grande que la résistance en courant continu et augmente à mesure que la fréquence augmente [13].

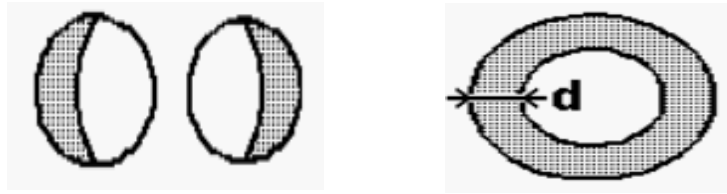


Fig.II.6 Effet de peau

### V.1.1 Épaisseur de peau

L'épaisseur de peau détermine, en première approximation, la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur. Elle permet de calculer la résistance effective à une fréquence donnée [12]-[15]-[17].

$$\delta = \sqrt{2/w\mu\sigma} = \sqrt{2\rho/w\mu} \quad (\text{II.11})$$

Où  $\delta$  est l'épaisseur de peau en mètre [m],  $\omega$  est la pulsation en radian par seconde [rad/s] ( $\omega=2.\pi.f$ ),  $f$  est la fréquence du courant en Hertz [Hz],  $\mu$  est perméabilité magnétique en Henry par mètre [H/m],  $\rho$  est résistivité en Ohm-mètre [ $\Omega.m$ ] ( $\rho=1/\sigma$ ), et  $\sigma$  est la conductivité électrique en Siemens par mètre [S/m].

### V.1.2 Conséquences de l'effet de peau

En même temps que diminue la section conductrice en haute fréquence (HF) la résistance du conducteur augmente dans des proportions notables. Pour une self en HF, l'effet de peau provoque des pertes supplémentaires et une détérioration du facteur de qualité.



Fig.II.7 Fil divisé

Sur les fréquences allant d'une centaine de kHz à quelques MHz on peut utiliser du fil divisé c'est à dire un conducteur constitué de multiples brins (diam. 0,05 mm environ) de cuivre émaillé thermo-soudable tressés ensemble, ce qui augmente la surface de la "peau" par rapport à un conducteur plein de section équivalente.

## V.2 Effet de proximité

Quand un courant alternatif circule à travers deux fils qui sont rapprochés les courants ont tendance à circuler à une distance maximale de l'autre, ceci provoque un effet similaire à l'effet pelliculaire. Cela entraîne une augmentation supplémentaire de la résistance à la perte. Cet effet peut être minimisé en augmentant l'espacement entre les fils. Des expériences ont montré que la perte la plus faible est obtenue lorsque l'espacement des fils est égal au diamètre du fil [16].

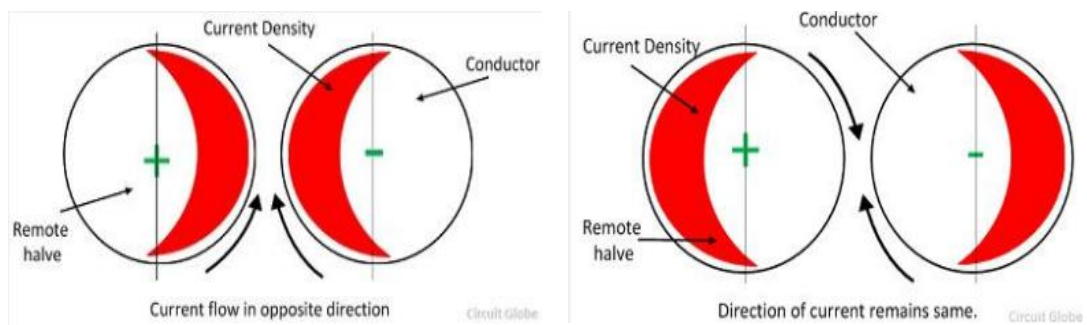


Fig.II.8 Distribution des courants induits dû à l'effet de proximité

a) Courants sources circulant dans le même sens, b) Courants sources circulant dans des sens opposés

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

### V.2.1 Facteurs affectant l'effet de proximité

L'effet de proximité dépend principalement de facteurs tels que le matériau des conducteurs, leur diamètre, leur fréquence et leur structure. Les facteurs sont expliqués ci-dessous en détail,

- **La fréquence**

La proximité augmente avec les augmentations de la fréquence.

- **Diamètre**

L'effet de proximité augmente avec l'augmentation du conducteur.

- **Structure**

Cet effet concerne davantage le conducteur solide que le conducteur toronné (c'est-à-dire l'ASCR) car la surface du conducteur toronné est plus petite que celle du conducteur solide.

- **Matériel**

Si le matériau est composé d'un matériau à haute teneur en fer, alors l'effet de proximité est plus présent à la surface.

V.3 Effet de bord

Appelé encore couramment effet de tête de bobine, il se traduit par une forte concentration de la densité de courant aux extrémités d'un conducteur plat susceptible de se manifester en hautes fréquences. Celui-ci se rapproche physiquement de l'effet de peau.

VI. LES DIFFERENTS MODES DE COUPLAGE

Il s'agit d'un passage d'énergie d'un étage (dit amplificateur) à l'autre, donc d'un couplage.

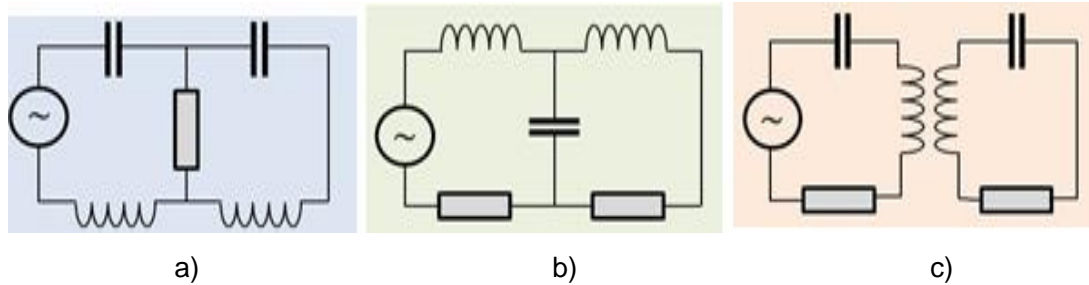


Fig.II.9 Les différents modes de couplage

Les trois modes de couplage : par résistance, par capacité, par inductance. Parmi les nombreux procédés de couplage, il existe trois types fondamentaux :

- Le couplage par résistance (Fig.II.9.a)
- Le couplage par capacité (Fig.II.9.b)
- Le couplage par inductance (Fig.II.9.c)

Nous insisterons essentiellement sur ce dernier couplage, appelé encore couplage magnétique, la liaison étant assurée par un véritable transformateur (c'est-à-dire sans noyau de fer doux).

VII. BOBINE COUPLEES MAGNETIQUEMENT

Considérons deux bobines placées à proximité l'une de l'autre. Si on fait passer un courant dans la première, la seconde sera soumise à un champ d'induction magnétique, et donc traversée par un flux... et réciproquement. Il y a donc influence « mutuelle » entre les deux bobines.

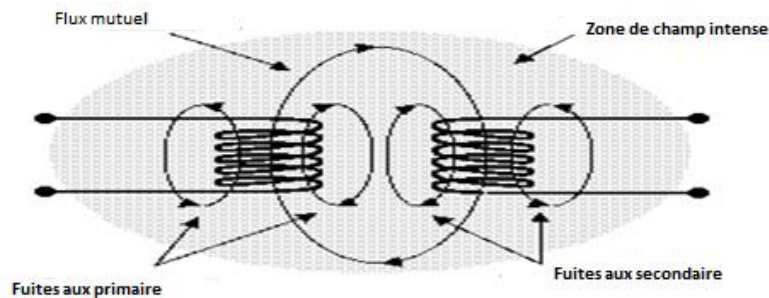


Fig.II.10 Circuits magnétiques couplés, flux commun et flux de fuites

Dans le cas le plus simple, le modèle équivalent d'une structure inductive est constitué d'une inductance parfaite  $L_1$  en série avec une résistance  $R_1$  qui rend compte de la valeur finie de la conductivité du métal utilisé pour former cette inductance (Fig.II.11).

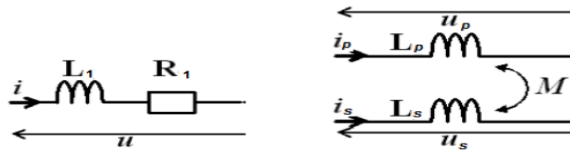


Fig.II. 11 Schéma équivalent d'une inductance (a) et d'une mutuelle inductance idéale (b).

Il apparaît comme le rapport de l'inductance mutuelle à la moyenne géométrique des self inductances. Le coefficient de couplage magnétique se définit simplement par :

$$k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{II.12}$$

Comme le flux mutuel ne peut pas être plus grand que le flux qui traverse chacun des circuits, le coefficient de couplage est nécessairement plus petit que l'unité, le problème n'est jamais dégénéré.

La détermination de l'inductance d'une bobine peut être nécessaire pour la compréhension de la conception du transfert d'énergie sans fil. La modélisation est difficile et complexe. La complexité est apparue à cause des intégrations. Dans le cas de simulation en 3D est évidemment plus difficile que celui en 2D. Dans ce chapitre on va proposer une méthodologie modéliser le système de transfert d'énergie.

### VII.1 Facteurs affectant l'inductance d'une bobine

Plusieurs facteurs influent sur l'inductance d'une bobine :

- Le nombre de spires. Une bobine ayant plus de spires a une plus grande inductance que celle ayant moins de spires.
- La longueur d'une bobine. Deux bobines ayant le même nombre de spires et une longueur différente affichent une inductance différente. La bobine la plus longue aura une inductance moindre.
- Le diamètre de la bobine. Plus la bobine est grande, plus l'inductance est élevée.
- Le noyau de la bobine. Plus le noyau est perméable, plus l'inductance est élevée.

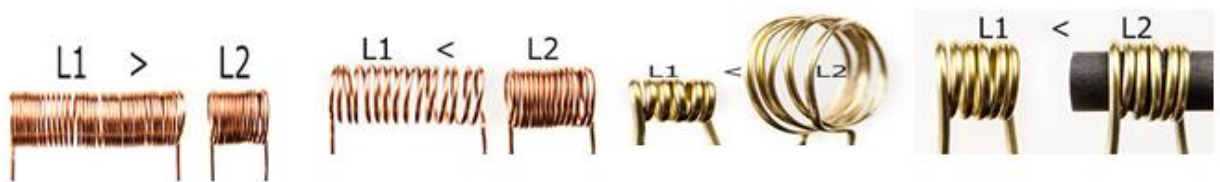


Fig.II.12 Facteurs affectant l'inductance d'une bobine

VII.2 Cas de deux bobines en couplage total

Lorsque deux bobinages sont disposés à proximité, le « partage » de leurs lignes de champs représente un « couplage » magnétique. Le « couplage total » correspond simplement au fait que l'intégralité des lignes de champ traversant une bobine traverse également l'autre. Dans ce cas précis, représenté sur la Fig.II.13 une grandeur supplémentaire  $M$ , appelée « inductance mutuelle » apparaît [19].

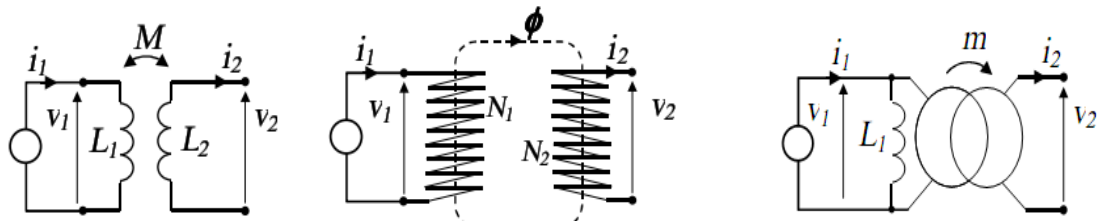


Fig.II.13 Couplage totale

Le terme  $m = \frac{M}{L_1}$  est appelé « rapport de transformation » des tensions et permet de ramener le problème du couplage à la présence d'un transformateur idéal, représenté également sur la Fig.II.13.

VII.3 Cas de deux bobines en couplage partiel

Lorsque le couplage n'est pas « total », il est impératif de bien dissocier les flux « propres » des bobines des flux « mutuels ». La Fig.II.14 représente ainsi chacun des bobinages traversé à la fois par le flux mutuel  $\phi$  et par un flux non partagé dit « de fuite » :  $\phi_{f1}$  ou  $\phi_{f2}$ .

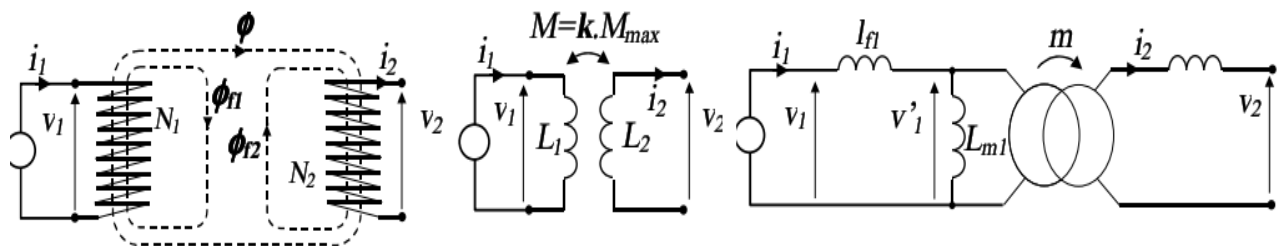


Fig.II.14 Couplage partiel

Le problème se ramène ainsi à la connaissance des deux inductances propres  $L_1, L_2$  et du coefficient de couplage. Le coefficient de couplage est égal à 1 (100%) lorsque les bobines sont parfaitement couplées magnétiquement. Il varie donc de 0% (en absence de couplage magnétique) à 100%. Dans un système de transfert d'énergie par induction, le coefficient de couplage se situe classiquement dans une plage comprise entre 10% et 30% [19].



VIII. METHODE DE CALCUL DES INDUCTANCES ET INDUCTANCE MUTUELLE

V.III.1 Bobine monocouche

La méthode de calcul développée par Wheeler permet une évaluation de l'inductance d'une bobine hexagonale, octogonale ou carrée, réalisée de manière discrète. Une simplification peut être opérée lorsqu'on se transpose dans le cas planaire intégré. L'inductance donnée par la méthode de Wheeler a alors pour expression [21]:

$$L = \frac{a^2 N^2}{8a + 11c} \tag{II.13}$$

Où «N» est le nombre de tours. Les paramètres c et a peuvent être donnés [21]:

$$c = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} \tag{II.14}$$

$$a = \frac{D_{out} - c}{2} = \frac{D_{out} + D_{in}}{4} \tag{II.15}$$

$$D_{out} = D_{in} - (s + w)N \tag{II.16}$$

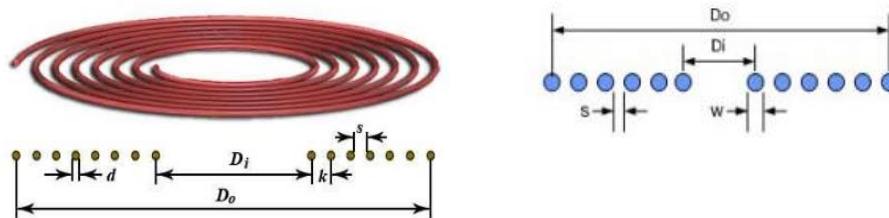


Fig.II.15 Dimension de la bobine spirale

Mohan a développé une autre méthode pour la détermination de L, sa méthode sert d'approximation correcte dans le cas de géométrie où l'épaisseur du conducteur est négligeable devant sa largeur et sa longueur. Cette méthode a de plus l'avantage d'être facilement adaptable à d'autres géométries (carrée, octogonale et circulaire). L'inductance s'exprime par la relation suivante [21] :

$$L = 0.5 \mu N^2 d_{avg} \left( \ln \left( \frac{c_1}{\rho} \right) + c_2 \rho + c_3 \rho^2 \right) \tag{II.17}$$

$$d_{avg} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} \tag{II.18}$$

Et C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> : Coefficients dépendants de la forme géométrique utilisée.

Géométrie	C1	C2	C3	C4
Carrée	1.27	2.07	0.18	0.13
Hexagonal	1.09	2.23	0	0.17
Octogonal	1.07	2.29	0	0.19
Circulaire	1	2.46	0	0.20

Tableau.II.2 Paramètres géométriques utilisés par Mohan [20]

V.III.2 Bobine multicouche

Une formule de calcul approché dans le cas d'une bobine massée ou multicouches [23] :

$$L = \frac{10 \pi N^2 R_1^2}{6 R_1 + 9l + 10(R_2 - R_1)} \tag{II.19}$$

Où L est l'inductance en Henry, et N est le nombre total de spire, R<sub>1</sub> est le rayon intérieur (m), et R<sub>2</sub> est le rayon extérieur du bobinage (m), et l est la longueur du bobinage (m)), R<sub>2</sub>-R<sub>1</sub> est l'épaisseur du bobinage.

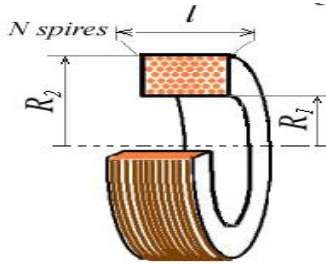


Fig.II.16 Bobine massée ou multicouches

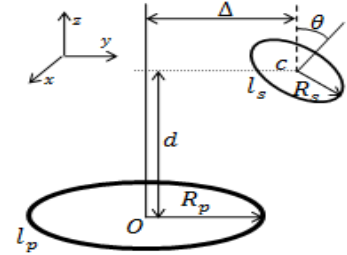


Fig.II.17 Lien inductif entre deux spires

V.III.3 Inductance mutuelle

Considérant deux spires couplées entre eux. La première spire notée l<sub>p</sub> de rayon R<sub>p</sub> et de centre O(0,0,0). La deuxième spire notée l<sub>s</sub> de rayon R<sub>s</sub> et de centre c (x<sub>c</sub>, y<sub>c</sub>, z<sub>c</sub> = d). La formule de la mutuelle inductance entre deux spires situées arbitrairement dans l'espace est donnée par [24]:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{c1} \int_{c2} \frac{dS1'.dS2}{r_{12}} \tag{II.20}$$

$$M(r_1, r_2, d, \theta, \Delta) = \frac{\mu_0}{\pi} \sqrt{r_2 r_1} \int_0^\pi \frac{(\cos(\theta) - \frac{\Delta}{r_2} \cos(\phi)) \psi(k)}{\sqrt{V^3}} d\phi \tag{II.21}$$

$$V = \sqrt{1 - \cos^2(\phi) \sin^2(\theta) - 2 \frac{\Delta}{r_2} \cos(\phi) \cos(\theta) + \frac{\Delta^2}{r_2^2}} \tag{II.22}$$

$$k = \frac{4\alpha V}{(1+\alpha V)^2 + \xi^2} \tag{II.23}$$

$$\xi = \beta - \alpha \cos(\phi) \sin(\theta), \alpha = \frac{r_2}{r_1}, \beta = \frac{d}{R_1} \tag{II.24}$$

$$\psi(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) = Q_{\frac{1}{2}}(x), x = \frac{2-k^2}{k^2} \tag{II.25}$$

où dS<sub>1</sub> et dS<sub>2</sub> sont les éléments de parcourt situé respectivement à la position P<sub>1</sub> et la position P<sub>2</sub> qui décrivent mathématiquement la géométrie des circuits à traiter, alors que r

est la distance relative de séparation de ces deux positions engendrant le déplacement latéral et le déplacement longitudinal.  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide et  $r_1, r_2$  transmettent et reçoivent des rayons de spires de bobine. Sa valeur est de  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m.  $K(k)$  et  $E(k)$  sont l'intégrale elliptique complète de la première et le deuxième type, respectivement.  $Q_{1/2}(x)$  est la fonction de Legendre du deuxième type.

La mutuelle inductance  $M_{ps}$  entre les deux bobines plates  $L_p$  et  $L_s$  est donnée par la formule suivante :

$$M_{ps} = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_s} M(R_{p_i}, R_{s_j}, \Delta, d, \theta) \tag{II.26}$$

Avec  $M(R_{p_i}, R_{s_j}, \Delta, d, \theta)$  est la mutuelle inductance entre les deux spires  $i$  et  $j$ . La spire  $i$  appartenant à la bobine  $l_p$  et de rayon  $R_{p_i}$ . Par contre  $j$  est une spire de la bobine  $l_s$  et de rayon  $R_{s_j}$ .

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

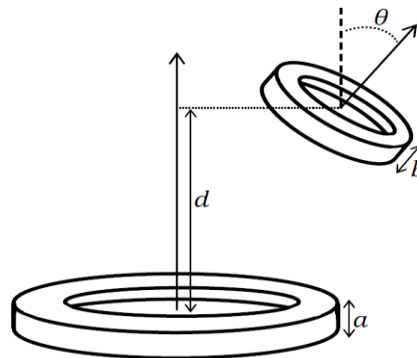


Fig.II.18 Deux bobines toriques de sections rectangulaires couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial).

Dans un excellent article, S. BABIC et all. ont développé une méthode analytique qui permet de calculer la mutuelle inductance entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

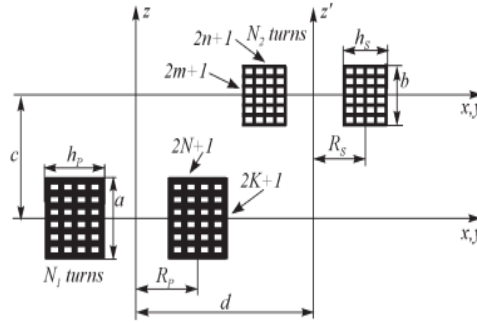


Fig.II.19 Section rectangulaire de bobine torique divisée en  $(2N + 1) \times (2K + 1)$  éléments dont chacun est équivalent à une spire élémentaire [24].

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

Le même principe de calcul a été appliqué pour déterminer la mutuelle inductance, notée  $M_{l_p l_s}$ , entre les deux bobines toriques de section rectangulaires  $l_p$  et  $l_s$ .

La mutuelle inductance  $M_{l_p l_s}$  est donnée par l'équation suivante [25]:

$$M_{l_p l_s} = \frac{N_1 N_2 \sum_{g=-K}^{g=K} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{p=-m}^{p=m} \sum_{l=-n}^{l=n} M(g, h, p, l)}{(2K+1)(2N+1)(2m+1)(2n+1)} \quad (II.27)$$

Le terme  $M(g, h, l, p)$  correspond à la mutuelle inductance entre les deux spires  $g, h$  et  $l, p$  de la même bobine  $l_p$ . En effet, la spire  $g, h$  est de rayon  $R_{g,h}$  et la spire  $l, p$  de rayon  $R_{l,p}$ .  $K(q)$  et  $E(q)$  sont des fonctions de Bessel de premier et deuxième ordre.

$$M(g, h, p, l) = \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{R_p(g, h)R_s(p, l)} \left[ \left(1 - \frac{q^2}{2}\right) K(q) - E(q) \right] \quad (II.28)$$

$$q^2(g, h, l, p) = \frac{4R_s(l, p)R_p(g, h)}{(R_p(g, h) + R_s(l, p))^2 + z^2(g, p)} \quad (II.29)$$

$$R_p(g, h) = R_p + \frac{h_p}{(2N+1)} h, h = -N, \dots, N \quad (II.30)$$

$$R_s(l, p) = R_s + \frac{h_s}{(2n+1)} l, l = -n, \dots, n \quad (II.31)$$

$$z(g, p) = c + \frac{a}{(2K+1)} g + \frac{b}{(2m+1)} p, g = -K, \dots, K, p = -m, \dots, m \quad (II.32)$$

IX. ANALYSE DU TESF VIA DES RESONANCES MAGNETIQUES COUPLEES

Il existe quatre topologies de circuit résonnant qui pourraient être utilisés dans le système TPSF. Ils sont nommés d'après la manière d'insérer les condensateurs de résonance de chaque côté: connexion en parallèle (P) et/ou en série (S).

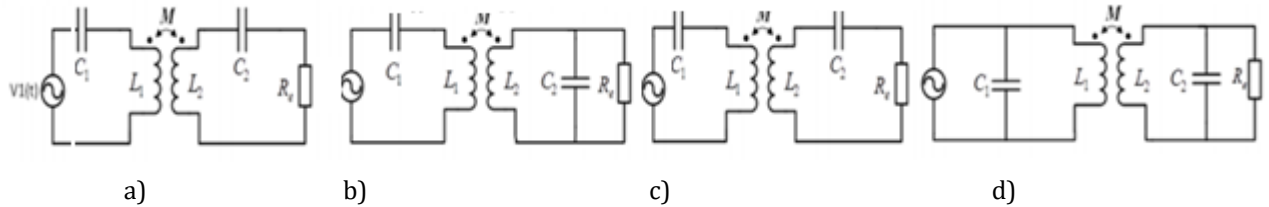


Fig.II.20 Topologies de résonance: a) SS b) SP c) PS et d) PP

IX.1 Modèle de circuit série-série

La Fig.II.21 représente le modèle électrique équivalent du système de transfert d'énergie. En effet, la charge  $R_{charge}$  est alimentée par l'intermédiaire du lien inductif de deux bobines couplées. Le rendement de la puissance transmise peut être optimisé si les deux coupleurs résonnent à la même fréquence. Dans ces conditions la fréquence de résonance est égale à  $f_0$ .

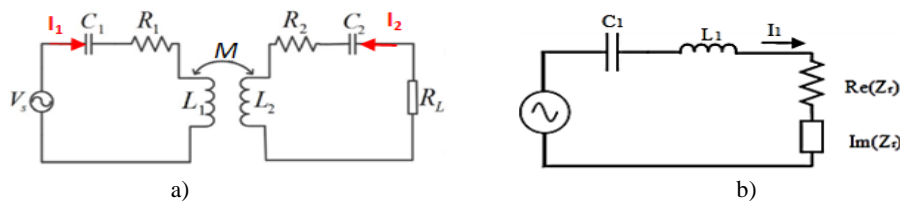


Fig.II.21 Le modèle de couplage : (a) série-série (SS) et (b) leur Circuit équivalent vu du côté primaire.

Lorsque le système fonctionne à  $\omega_0$ , les équations de tension pour peuvent être exprimées sous forme:

$$V_s = Z_1 I_1 + Z_m I_2 \tag{II.33}$$

$$0 = (Z_2 + R_L) I_2 + Z_m I_1 \tag{II.34}$$

Et

$$Z_1 = R_1 + j\omega_0 L_1 + \frac{1}{j\omega_0 C_1} \tag{II.35}$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega_0 L_2 + \frac{1}{j\omega_0 C_2} + R_L \tag{II.36}$$

$$Z_m = j\omega_0 M \tag{II.37}$$

Une application simple de la loi d'ohm conduit à la détermination de l'impédance équivalente vue du côté primaire lors du couplage :

$$Z_{in} = Z_1 + Z_r = Z_1 + \frac{Z_m^2}{(Z_2 + R_L)} \tag{II.38}$$

Où  $Z_r$  est l'impédance réfléchi du circuit secondaire vers le primaire dont la formule est de la forme :

$$Z_r = \frac{V_{12}}{I_1} = \frac{Z_m^2}{(Z_2 + R_L)} \quad (II.39)$$

Sachant que la puissance transférée du primaire au secondaire est :

$$P_{in} = |I_1|^2 \operatorname{Re}(Z_{in}) \quad (II.40)$$

On constate que l'impédance réfléchie est proportionnelle au carré de l'inductance mutuelle. Donc, un couplage fort entre les deux bobines augmente évidemment la puissance transférée au circuit secondaire.

La puissance de sortie de la seconde bobine peut être définie comme suit :

$$P_{out} = |I_2|^2 R_L \quad (II.41)$$

Le rendement global de la transmission est alors :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left| \frac{Z_m}{(Z_2 + R_L)} \right|^2 \frac{R_L}{\operatorname{Re}(Z_{in})} \quad (II.42)$$

Où  $\eta$  le coefficient d'efficacité de transmission est défini comme étant le rapport entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie.

Pour obtenir la résistance de charge optimale entre deux résonateurs. La résistance de charge optimale est [3]-[6]:

$$R_L = \sqrt{\frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_1} + R_2^2} \quad (II.43)$$

Pour ce faire, la dérivée de l'équation Eq. (II.9) par rapport à  $R_L$  doit être égale à zéro :

$$\frac{d\eta(R_L)}{dR_L} = 0 \quad (II.44)$$

Le facteur Q des deux bobines joue un rôle primordial dans la transmission d'énergie sans fil. Un facteur Q élevé signifie une faible perte d'énergie et donc une meilleure efficacité de transmission. Pour le circuit série, le facteur de qualité donne :

$$Q_{1,2} \approx \frac{\omega_0 L_{1,2}}{R_{1,2}} \quad (II.45)$$

Où  $Q_1$  et  $Q_2$  sont les facteurs de qualité des bobines émettrice et réceptrice, respectivement.

Un facteur de qualité global combiné du système est défini comme suit:

$$Q = \sqrt{Q_2 Q_1} \quad (II.46)$$

L'efficacité de transfert maximale est définie comme suit [2]-[3]-[4]:

$$\eta_{\max} = \frac{(kQ)^2}{(1 + \sqrt{(kQ)^2 + 1})^2} \quad (II.47)$$

Par conséquent, afin d'atteindre le maximum d'efficacité, les développeurs doivent optimiser le couplage et les facteurs de qualité de leurs systèmes.

## **X. CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur les inductances, bobines et les différents couplages. De même, nous avons présenté les différentes formes utilisées dans le transfert d'énergie, ainsi qu'un aperçu sur les méthodes de calcul des inductances et inductance mutuelle. Les différentes pertes qui apparaissent lors du fonctionnement d'une inductance, aident dans la conception des bobines.

### **Référence**

- [1] P. MALVINO ; Principe d'électronique ; Ediscience.
- [2] T. FLOYD, Electronique Composants et Systèmes d'Application, 5ème Edition, Dunod, 2000.
- [3] V. GOFFROY "Conception de circuits intégrés radio fréquences sur technologie CMOS pour des applications sans fil grand public" pp 118-133 Thèse de doctorat 2002.
- [4] P. DESJOURS L'électricité, une énergie à maîtriser, collection « Les petits débrouillards », Albin Michel Jeunesse, Paris, 2000.
- [5] L. LEPRINCE-RINGUET, L'aventure de l'électricité, collection L'Odyssée, Flammarion, Paris, 1983
- [6] P. GORI, « Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique », Thèse Université Paris-Saclay, 2019
- [7] Transmission d'énergie sans fil au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radiofréquence. Rapport UIT-R SM.2303-1. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf)
- [8] A. HAMOUD. Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts. Université Montpellier, 2017.
- [9] G. TROUSSIER, Intégration de bobines sur silicium Pour la conversion d'énergie, Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Analyse Et d'Architecture Des Systèmes Du CNRS, 2004
- [10] Transmission d'énergie sans fil au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radiofréquence. Rapport UIT-R SM.2303-1. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf)
- [11] A. HAMOUD. Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts. Université Montpellier, 2017.

- [12] Y. BENJADDA, "Modélisation thermique des composants magnétiques intégrés dans les microsystèmes," These de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf Faculté, 2016
- [13] «Chauffage par induction bobines d'induction », AMBRELL Precision Induction Heating, 411-0168-13 Rév. A, www.ambrell.fr.
- [14] M. IIBRAHIM, « 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.
- [15] M. THOMPSON, "Inductance Calculation Techniques -- Part II: Approximations and Handbook Methods", Power Control and Intelligent Motion, December 1999.
- [16] M. Leclair. Caractérisation d'un lien inductif destiné à transmettre le courant et les données à des neurostimulateurs implantables" . Mémoire de thèse Sherbrooke (Québec) Canada mai 1992.
- [17] A. CAILLEIERZ, « Etude et mise en œuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicules en mouvement », Thèse Université Paris-Saclay, 2016
- [18] K. KADEM, « Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques », Thèse Université Paris-Saclay, 2020
- [19] 'Étude des bobines couplées et transmission d'énergie à distance sous conditions de résonance, Luc Lasne BUP n°915 Juin 2009.
- [20] LAI DAC Kien "Estimation des pertes cuivre dans les composants magnétiques planar - Application au LCT". Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab) JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [21] A. GHANNAM. Conception et intégration "above IC" d'inductances à fort coefficient de surtension pour applications de puissance RF ». L'Université Toulouse III- Paul Sabatier 17 Novembre 2010. pp41-43-44-45.
- [22] H.A. WHEELER, Simple inductance formulas for radio coils, Proceedings of IRE, vol. 16, n°10, pp. 1398-1400, 1928.
- [23] S. MOHANH « Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances, » IEEE Journal of Solid -State Circuits, 34, no 10 (1999), pp. 1419-1424.
- [24] L. Bettaieb, F. Costa . Transmission d'énergie par couplage inductif. Application aux capteurs biomédicaux intégrés. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France.



[25] S. BABIC, F. SIROIS, C. AKYEL, C. GIRARDI, « Mutual inductance calculation between circular filaments arbitrarily positioned in space: alternative to Grover's Formula», IEEE transactions on magnetics, vol. 46, n°. 9, pp. 3591-3600, 2010.

# Chapitre III :

## Analyse des effets des paramètres géométriques et électriques sur le TESH

**I. INTRODUCTION.**

**II. DONNEES DE L'APPLICATION.**

**III. CONCLUSION.**

## **Chapitre III : Analyse des effets des paramètres géométriques et électriques sur le TESH**

### **I. INTRODCUTION**

Pour étudier le transfert d'énergie sans fil, nous avons besoin d'exploiter les modèles analytiques, telles que la méthode de Babic et le modèle série-série de deuxième chapitre. On s'intéresse particulièrement à un coupleur constituant deux bobines de forme spirale toute en essayant d'analyser les effets des grandeurs électriques et géométriques sur l'efficacité du transfert d'énergie sans contact.

### **II. DONNEES DE L'APPLICATION**

Plusieurs géométries de coupleur ont été proposées pour réaliser les coupleurs destinés à la recharge inductive. Parmi les géométries possibles, citons les formes :

- Rectangulaire.
- Double D.
- Bipolaire.
- Circulaire [1].

Nous constatons que les bobines de forme circulaire et rectangulaire correspondent au meilleur compromis alliant fort coefficient de couplage à un comportement en fonction du désaxement satisfaisant.

Cette partie présente les paramètres utilisés pour l'étude menée dans la section prochaine. La Fig.III.1 et le Tableau.III.1 sont également présentés les caractéristiques géométriques et électromagnétiques du bobinage étudié qui est composé d'une bobine émettrice et réceptrice, dont les valeurs de diamètre des bobines et le nombre de spire comme suite :

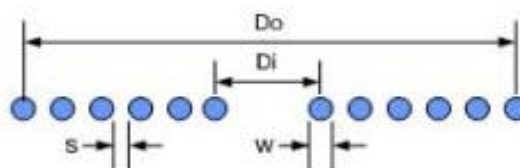


Fig.III.1 Dimensions de la bobine spirale

Type	N	$D_{out}$ (mm)	$D_{in}$ (mm)	s (mm)	w (mm)	R (Ohm) (Mesurée)	Capacité ( $\mu F$ )	L ( $\mu H$ ) (Mesurée)	L( $\mu H$ ) (Analytique)
Bobine 1	52	280	140	0	1.244	1	0.2051	722.56	728.64
Bobine 2	13	280	214	1.244	1.244	0.28	0.02045	75.44	75.11

Tableau.III.1 Caractéristiques géométriques et électromagnétiques [2].

Deux bobines ont été fabriquées pour l'application à la recharge inductive des batteries. Leurs dimensions sont présentées dans le Tableau.III.1, tandis que les mesures des résistances et les condensateurs sont présentés sur le même tableau.

**a) Effet du désalignement par translation**

On va étudier le désalignement latéral. En effet, la transmission de puissance à fort gain est très sensible au désalignement angulaire et au désalignement latéral en raison de la directivité élevé. Le couplage non-résonant est sensible au désalignement latéral en raison de la distance limitée de transmission.

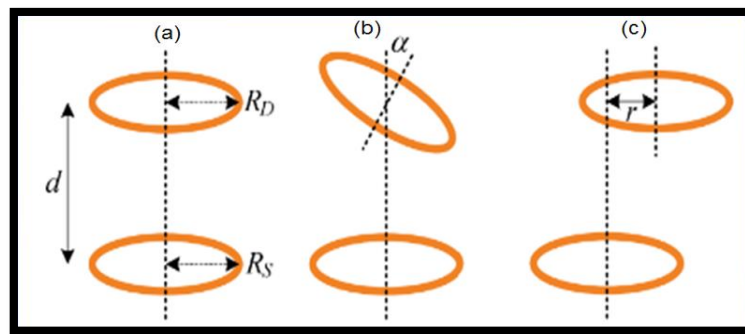
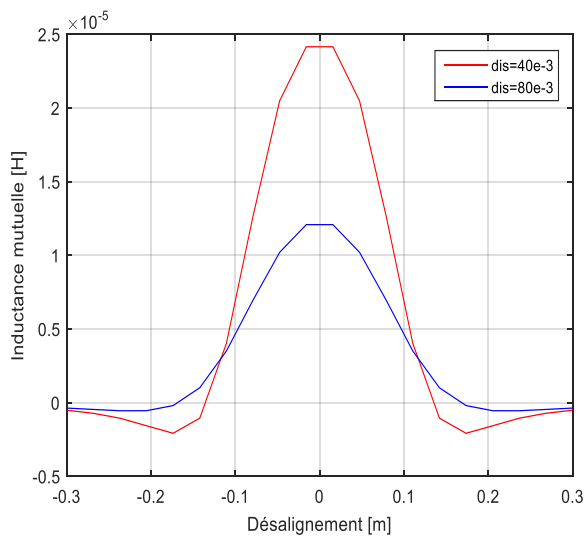
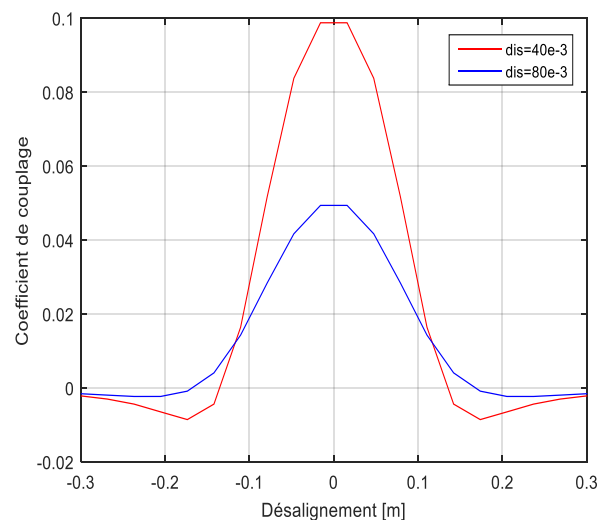


Fig.III.2 Arrangement basique de la liaison sans fil. (a) Alignement frontal, (b) Désalignement angulaire, et (c) Désalignement latéral.



(a)



(b)

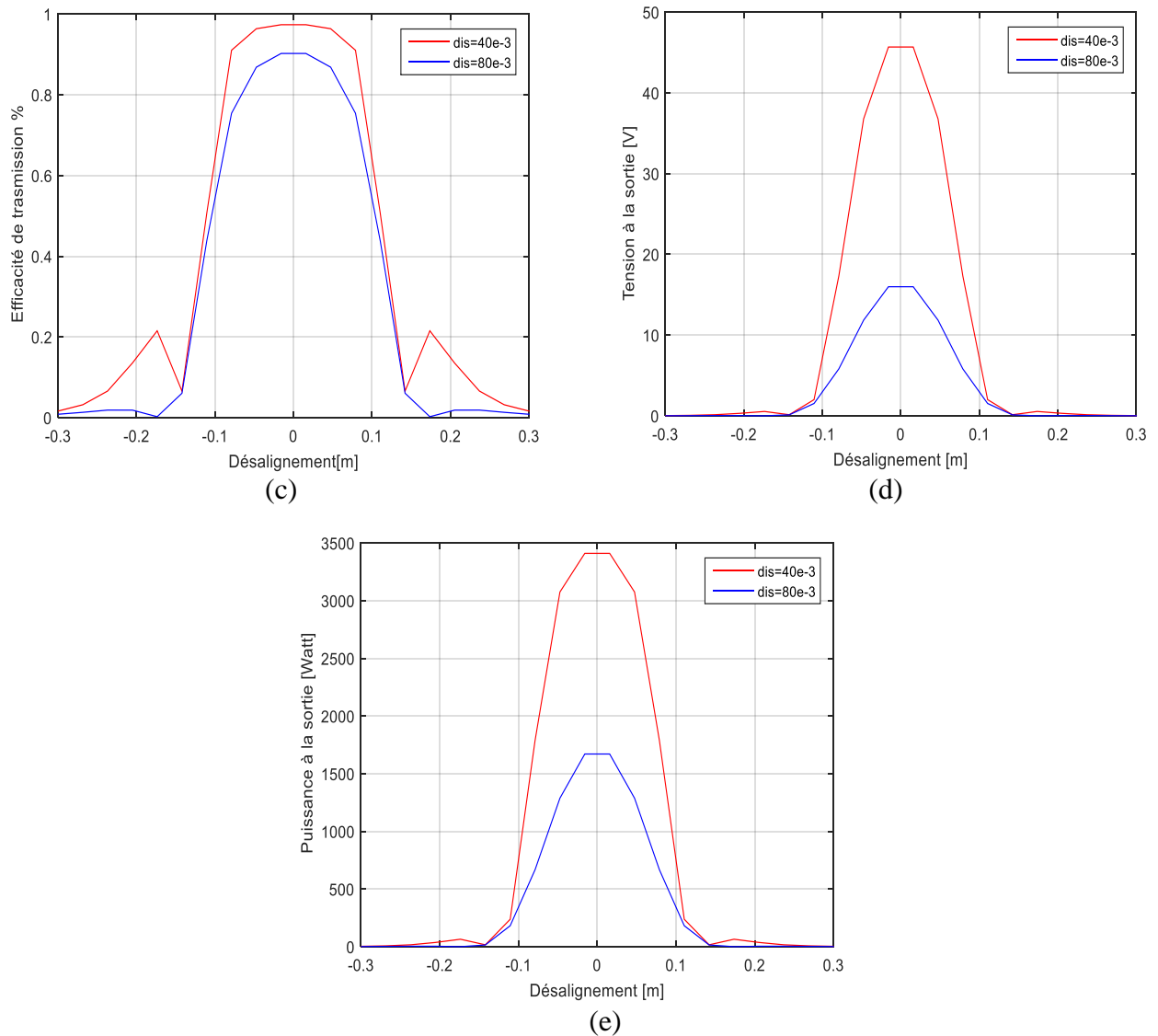


Fig.III.3 Calcul de l'influence de la translation sur ( $RL=4.6$ ,  $V= 48$  V,  $P=500$  W): a) Inductance mutuelle, b) Coefficient couplage, c) Efficacité de translation, d) Tension à la sortie, e) Puissance à la sortie

Puis, on voit qu'une translation entre 40 cm et 80 cm permet encore de conserver une inductance mutuelle maximale. En revanche, l'inductance mutuelle descend rapidement, ce qui a pour effet de rendre le lien inefficace.

Les figures montrent également l'effet de la variation des valeurs du coefficient de couplage entre les bobines émettrices et réceptrices. Il est à noter ici que le circuit atteint une efficacité de transfert d'énergie plus élevée pour une valeur plus grande du coefficient de couplage ( $K$ ).

Pour le dimensionnement du système de transfert d'énergie, il est souhaitable de se mettre à l'optimum d'efficacité pour le couplage le plus élevé. Les caractéristiques de sortie du système de transfert d'énergie sans fil (TESF) par lien inductif sont liées au coefficient de couplage et d'inductance propre de la bobine.

**b) Effet du désalignement par rotation**

Pour évaluer l'influence du désalignement par rotation, les deux bobines parfaitement alignées et distantes de 8 cm et 12 cm sont considérées. Puis, une structure est pivotée sur elle-même entre 0 et 90 degrés. Le calcul analytique a tout d'abord été fait. Les résultats sont présentés aux Fig.III.4, Fig.III.5 et Fig.III.6.

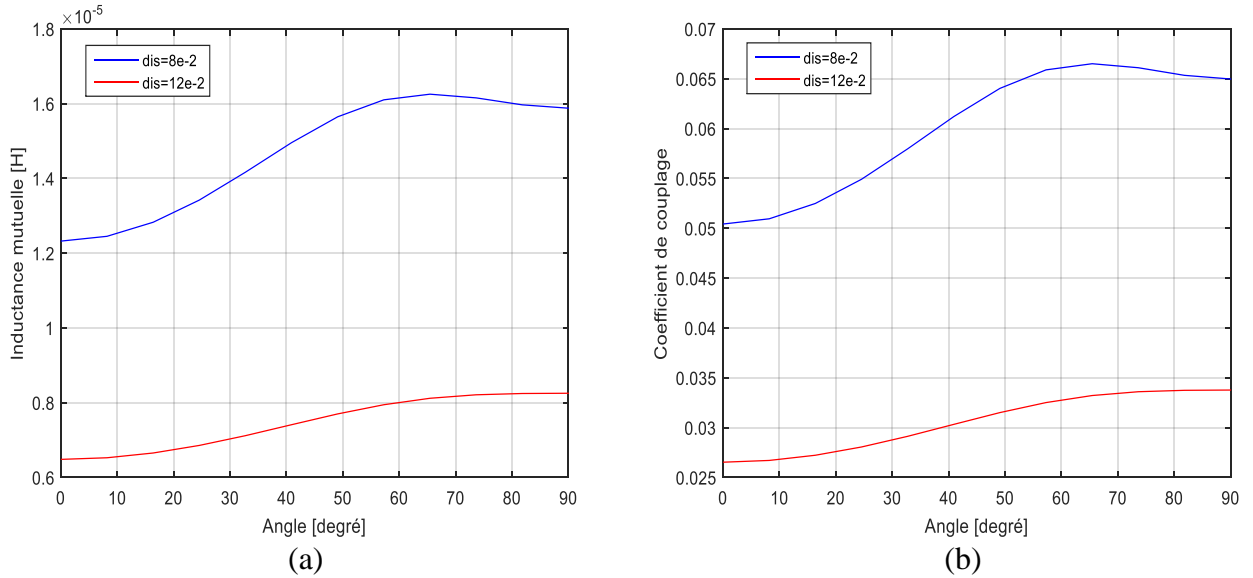


Fig.III.4 Inductance et coefficient du couplage en fonction de la rotation pour différentes Valeurs de distance ( $r=0$ )

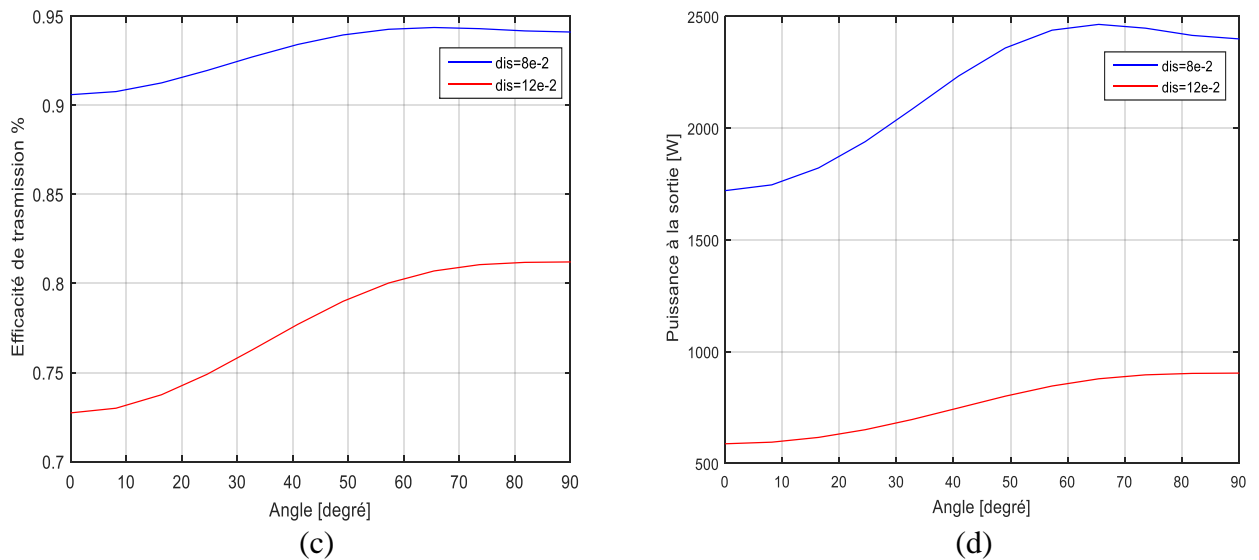


Fig.III.5 Efficacité et puissance en fonction de la rotation pour différentes Valeurs de distance ( $r=0$ )

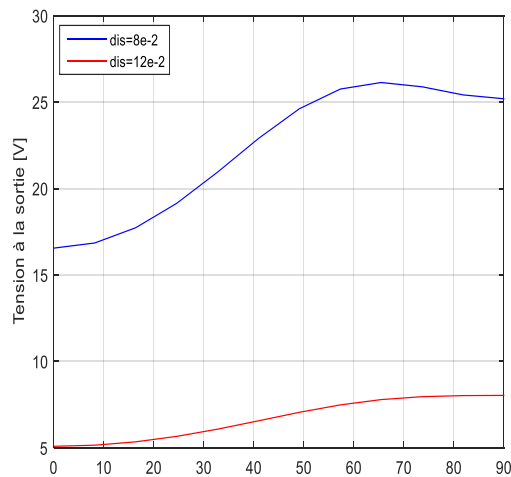


Fig.III.6 Tension à la sortie en fonction de rotation pour différentes Valeurs de distance ( $r=0$ )

**c) Effet de la résistance de charge sur les performances**

Une augmentation de la valeur de la résistance de charge ( $R_c$ ) réduit l'impédance de la bobine secondaire car elles sont inversement proportionnelles les unes aux autres. Cette diminution de l'impédance augmente l'efficacité du transfert d'énergie par la suite. Pour vérifier l'effet de la variation de la résistance de charge sur l'efficacité de transfert d'énergie, nous avons tracé en maintenant tous les composants de circuit constants, à l'exception de la valeur de  $R_c$  qui varie entre  $4.6\Omega$  et  $10\Omega$ .

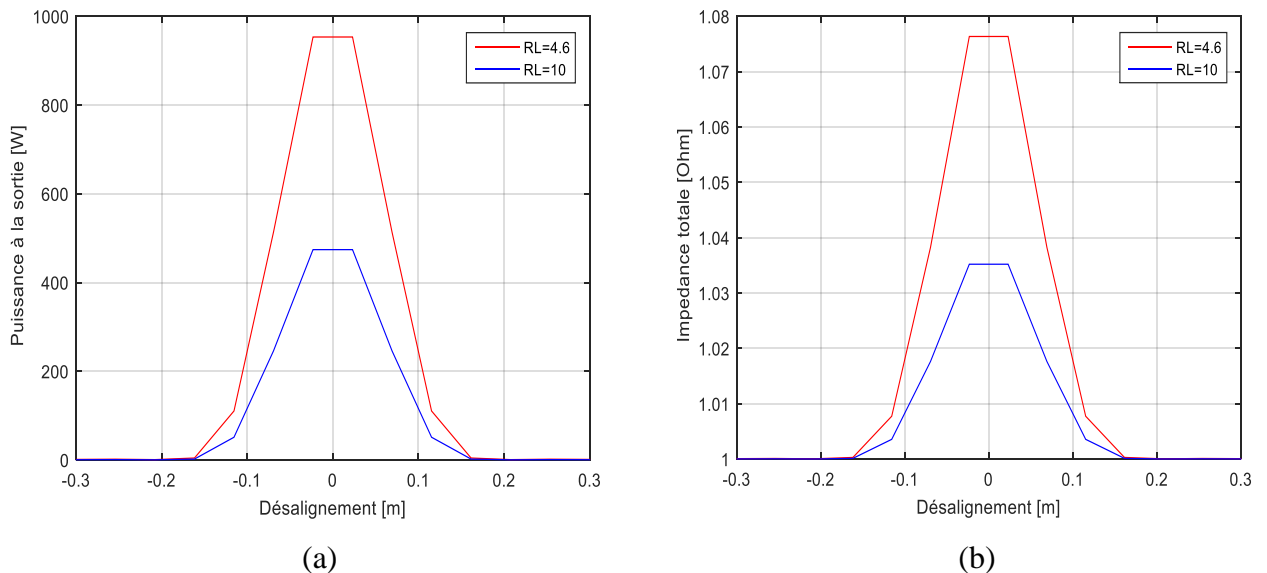
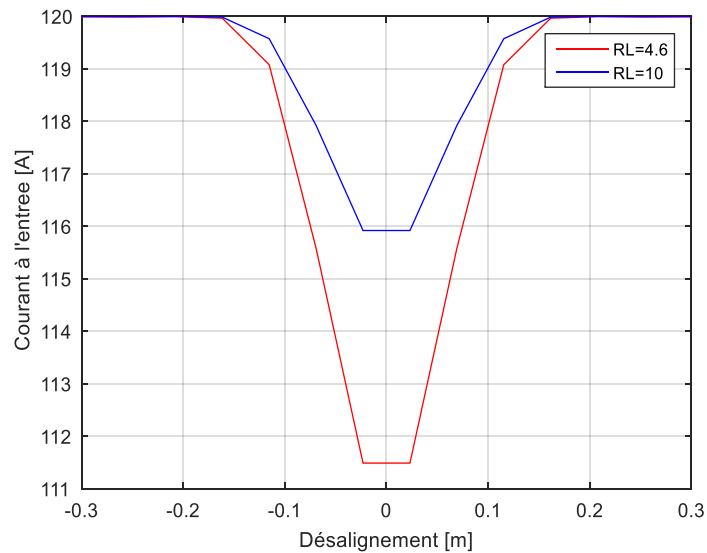


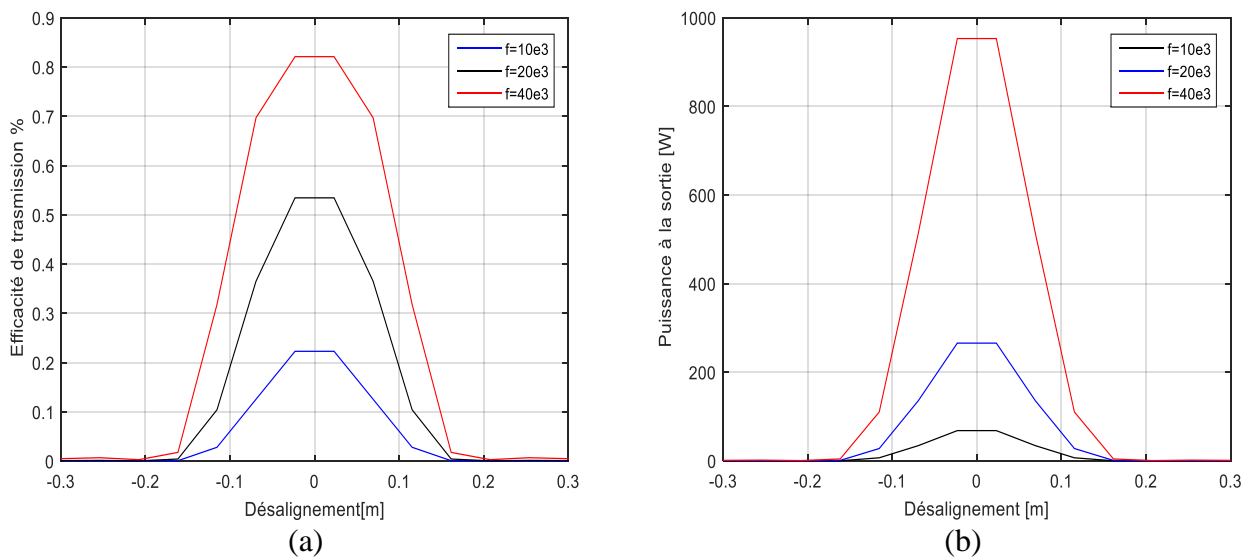
Fig.III.7 Puissance de sortie et impédance totale en fonction de désalignement pour différentes valeurs de la résistance de charge  $R_c$



**Fig.III.8** Courant d'entrée en fonction de désalignement pour différentes Valeurs de la résistance de charge  $R_c$  ( $dis=10e-2$  m)

**d) Effet de la fréquence de résonance sur les performances**

La résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques sont sensibles à certaines fréquences. Le transfert de puissance est encore plus important car le coefficient fréquence de résonance est 40kHz.



**Fig.III.9** Efficacité et la puissance en fonction de désalignement pour différentes Valeurs de fréquence ( $dis=10e-2$  m)

Pour les deux cas de désalignement, on voit que la performance dépend de désalignement par rotation. Tout d'abord, pour la rotation, on voit que pour un angle entre  $0^\circ$  et  $15^\circ$  (ainsi qu'entre  $70^\circ$  et  $90^\circ$ ) l'inductance mutuelle ne varie pratiquement pas et reste presque minimale et maximale.

Afin d'obtenir une efficacité de transmission maximale, l'angle de rotation doit être réglé entre  $70^\circ$  et  $85^\circ$  une valeur optimale telle que la quantité maximale de flux puisse traverser la



### **Chapitre III Analyse des effets des paramètres géométriques et électriques sur le TESH**

bobine réceptrice. De plus, en cas de désalignement par rotation, le flux du champ magnétique produit par la bobine émettrice passe progressivement par la bobine réceptrice.

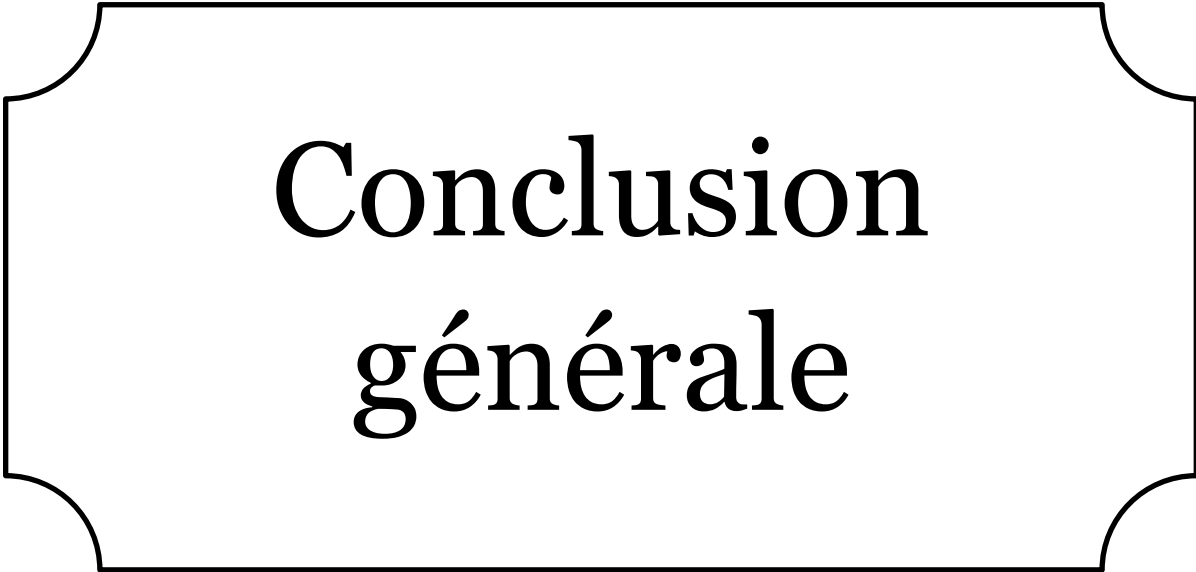
#### **III.CONCLUSION**

Dans ce chapitre, on a donné un couplage analytique-électriques pour évaluer les effets des paramètres géométrique et électriques sur le transfert d'énergie sans fil. Nous avons aussi cité les difficultés liées au choix des paramètres pour avoir une efficacité maximale.

#### **Référence**

[1]<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/12100/12100-recharge-sans-contact-des-vehicules-electriques-ensps.pdf>.

[2] K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse, and K. Takeda, "Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles," World Electr. Veh. J., vol. 6, no. 4, pp. 848–857, 2013.



# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

La modélisation d'un système de transfert d'énergie sans contact est cruciale pour l'évaluation et l'optimisation des performances. Les travaux présentés dans cette recherche visent à modéliser un système de transfert d'énergie par lien inductif résonant performant et efficace pour l'alimentation direct et automatique des batteries dans les voitures. Dans un premier temps, une définition du système de transfert d'énergie sans fil (TESF) a été présentée pour expliquer son principe de base et ses objets et les différentes techniques du système de TESF.

Nous avons proposé un état de l'art sur les inductances et les bobines et les méthodes de calcul des inductances propre et mutuelles. Une partie a été consacrée à l'application du système de transfert d'énergie sans contact par couplage résonnant en champ proche entre deux bobines spirales circulaires couplées et situées arbitrairement dans l'espace. L'interaction ou couplage inductif entre deux bobines étant mutuelle. Soljačić et al proposent d'exploiter les interactions pour créer le transfert d'énergie sans contact.

La détermination des différentes grandeurs électriques ou magnétiques sont nécessaire pour la compréhension de la conception d'un système de transfert d'énergie sans fil. Dans ce projet, nous avons exposé une méthodologie de solution pour modéliser le système de transfert d'énergie sans contact. Nous avons exposé une étude théorique du couplage par résonance magnétique qui est à la base de notre travail, ce calcul est basé sur un couplage entre un calcul analytique en 3D pour calculer l'inductance mutuelle et un modèle fondé sur la théorie des circuits afin de déterminer les performances du système de transfert d'énergie sans fil, ces deux modèles constituent des grandes fiabilités pour le dimensionnement des systèmes TESF. Ainsi, le coefficient de couplage, la résistance de charge, le facteur de qualité et l'efficacité de transfert d'énergie du lien inductif résonant ont été définis. Nous avons présenté les relations géométriques pour calculer les inductances, l'inductance mutuelle, la distance mutuelle inter bobines, le coefficient de couplage et la résistance des bobines.

Pour le calcul de l'inductance, on a proposé une méthode de calcul de l'inductance mutuelle entre deux bobines spirales circulaire. Le Calcul est basé sur la formule de Neumann, Babić et al, ces derniers travaillaient sur ce problème, et ils ont réussi à résoudre le calcul en publiant les premières expressions analytiques en 3D en 2010. Les applications montrent que ces expressions semblent être adéquates pour le problème d'interaction. Nous avons présenté la méthode de conception analytique d'un lien inductif basé sur des bobines spirales avec une gamme de fréquence de fonctionnement de 40 kHz.

## Résumé

Ce travail présente l'étude et le développement d'un système de transmission d'énergie sans fil à travers un lien inductif résonant.

Le système de transmission de puissance sans fil suscite un grand intérêt depuis des décennies en raison de ses nombreux avantages par rapport aux systèmes filaires. À cet égard, cette étude a traité la structure de couplage de diverses bobines avec différents types de noyaux magnétiques et de bobines, et elle était réalisée sur la base d'une analyse mathématique et d'une modélisation pour calculer les valeurs inductives pour des profils de charge.

Par conséquent, le modèle de lien couplé est basé sur la conception de la bobine en spirale, et a été développé à l'aide d'une analyse théorique et d'une optimisation géométrique du lien inductif. Cette étude nous a permis d'avoir des excellentes performances qui sont représentées dans l'espacement des inter-bobines, une efficacité élevée du transfert d'énergie et une géométrie réduite.

**Mots clés :** Transfert d'énergie sans fil, bobines spirales, l'efficacité de transfert d'énergie, lien inductif.

## Abstract

This work proposes the study and development of a wireless energy transfer system through a resonant inductive link.

The wireless power transfer system has been a major concern for several decades since various advantages have been included over the wired counterpart. In this context, the coupling structure has been studied for various coils having different shapes of magnetic cores and windings. This investigation is implemented on the basis of mathematical analysis and modeling to calculate inductive values of load configurations.

The coupling link model based on the design of spiral coils is developed using theoretical analysis and geometric optimization of an inductive link. The results obtained in this work showed better performance such as inter-coil distance, high energy transfer efficiency and reduced geometry.

**Keywords:** Wireless energy transfer, spiral coils, energy transfer efficiency, inductive link.

## ملخص

يقترح هذا العمل دراسة وتطوير نظام نقل الطاقة اللاسلكي من خلال ارتباط حثي رنيني.

كان نظام نقل الطاقة اللاسلكية مصدر قلق كبير لعدة عقود منذ أن تم تضمين مزايا مختلفة على النظر السلكي. في هذا السياق، تمت دراسة بنية التوصيل لملفات مختلفة لها أشكال مختلفة من النوى والملفات المغناطيسية. يتم تنفيذ هذا التحقيق على أساس التحليل الرياضي والنمذجة لحساب القيم الاستقرائية لتكوينات الحمل.

تم تطوير نموذج ارتباط الاقتران المستند إلى تصميم الوشيعات اللولبية باستخدام التحليل النظري والتحسين الهندسي للرباط

الحثي.

**الكلمات المفتاحية:** نقل الطاقة اللاسلكية، الوشيعات اللولبية، كفاءة نقل الطاقة، ارتباط حثي.