

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département de Électrotechnique

N°/2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Scienceset Technologies

FILIERE: Electromécanique

SPECIALITE: Electromécanique

Thème

**Modélisation et optimisation d'un dispositif de transfert de puissance à
courte distance sans fil par induction électromagnétique**

Présenté Par : Mokrani Amir

Encadré Par : Mr / Mahdeb Naamane

Chagour Sohaib

Date de soutenance: 13/07/2022

Jury de Soutenance

Président : Lyes Aomar

Grade MCA

UnivMSB jijel

Encadreur : Mahdeb Naamane

Grade MCA

Univ MSB jijel

Examineur 1: Meheidine kechicheb

Grade MCB

Univ MSB jijel

Promotion :2021 /2022

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents, pour leurs sacrifices et leurs efforts consentis, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude ;

À mes sœurs Alaa rahmane et Amel.

À toute la famille Mokrani

À Mes camarades de la promotion : Electromécanique.

À la famille du département électromécanique.

À tous ceux qui me sont chers.

Et bien sûr le meilleur partenaire Souhaib qui m'a supporté.

Mokrani Amir

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents pour leurs patiences, leur soutien et leur encouragement.

À mon grand-père Rabah que je souhaite une bonne santé.

À mes chers frères

À tous mes proches, mes amis, mes collègues de classe

*À notre encadrer Mr.Mahdeb
Naamane À tous nos profs de la
spécialité.*

Et enfin, à tous ceux qui m'ont aidé dans mon parcours

Chagour Souhaib

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions DIEU tout puissant, de nous avoir donné la volonté et la patience d'arriver ce travail

*Nous exprimons tout particulièrement notre gratitude
A notre cher docteur, Mahdeb Naamane, notre superviseur
dans ce travail, pour son aide et ses précieux conseils.
Une contribution efficace et des encouragements ont été
Nécessaire pour mener à bien ce travail.*

*Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du
département Electromécanique pour leur disponibilité, leurs
orientations et leur soutien tout au long de notre formation.
Pour finir, que toutes les personnes ayant contribué, de près
ou de loin, à la réalisation de ce travail trouvent ici nos
remerciements les plus sincères.*

Chagour Souhaib

Mokrani Amir

SOMMAIRE

Introduction général	-1-
-----------------------------------	-----

Chapitre I :

La transmission de puissance sans contact

I.1	INTRODUCTION.....	- 3 -
I.2	Histoire.....	- 3 -
I.3	induction électromagnétique et générateur d'induction.....	- 5 -
I.4	générale d'un système d'alimentation sans fil.....	- 5 -
I.5	Techniques en champ proche (non radiatives).....	- 6 -
I.5.1	Couplage inductif.....	- 6 -
I.5.2	Couplage inductif résonnant.....	- 8 -
I.5.3	Couplage capacitif.....	-10-
I.5.4	Couplage capacitif résonnant.....	-11-
I.5.5	Couplage magnétodynamique.....	-11-
I.6	Techniques en champ lointain (radiatif).....	- 12 -
I.6.1	Micro onde	-12-
I.6.2	Les lasers	-13-
I.7	Pour les véhicules électriques.....	- 14 -
I.7.1	Systèmes de recharge sans contact.....	-14-
I.7.1.1	Recharge statique.....	-14-
I.7.1.2	Recharge dynamique.....	-16-
I.8	Applications mises au point pour utiliser les techniques TESF.....	- 19 -
I.9	Conclusion.....	- 19 -
	Reference.....	- 20 -

Chapitre II :

Modélisation et conception géométrique d'un lien inductif

II.1	Introduction.....	-22-
II.2	Création d'un champ magnétique uniform.....	- 22 -
II.2.1	Le solénoïde.....	-22-
II.2.2	Flux magnétique	-23-
II.2.3	Linduction électromagnétique	-23-
II.2.4	Self-inductance.....	-24-
II.2.5	Résistance interne.....	-24-
II.2.6	Facteur de qualité.....	-25-
II.3	phénomène d'induction mutuelle.....	- 25 -
II.4	Bobine d'inductance : modèle détaillé.....	- 26 -
II.5	transformateur électrique.....	- 27 -
II.6	Coupleurs inductifs.....	- 28 -
II.7	Structure planaire du coupleur	- 29 -
II.8	Formes de bobines spiral.....	- 29 -
II.9	Facteurs affectant l'inductance d'une bobine.....	- 30 -
II.10	Calcul des inductances.....	- 30 -
II.11	Résistances des bobines.....	- 32 -
II.12	Principe de fonctionnement d'un lien inductif	- 33 -
II.13	Coefficient de couplage magnétique.....	- 37 -
II.14	Modèle électrique équivalent du système de transfert d'énergie.....	- 38 -
II.15	conclusion.....	- 41 -

Chapitre III

Résultats et simulations

III.1	Introduction.....	- 44 -
III.2	Modélisation et simulation d'une inductance spirale.....	- 44 -
III.2.1	Influence des paramètres électriques sur la bobine spirale.....;;.....	-44-
III.2.2	Influence de la fréquence sur la valeur de la résistance.....	-44-
III.2.3	Pour différentes valeurs de l'espace inter spires « s ».....	-45-
III.2.4	Pour différentes valeurs de la largeur du conducteur « w ».....	-46-
III.2.5	Pour différentes valeurs du nombre de spires.....	-46-
	III.2.6 Influence des paramètres électriques sur le facteur de qualité.....	-47-
	III.2.7 étude de l'inductance d'une bobine en fonction du nombre de spires.....	-48-
III.3.1	Modélisation et simulation d'un lien inductif	-48-
	III.3.1 Influence de nombre de tours pour différentes valeur de l'espace inter spire.....	-49-
	III.3.2 Influence de la résistance de charge pour différentes valeur de l'espace inter spire.....	-51-
	III.3.3 Coefficient de couplage en fonction de la distance.....	-52-
	III.3.4 inductance mutuelle et coefficient de couplage	-53-
	III.3.5 Etude du lien inductif par Multisim.....	-54-
III.4	Conclusion.....	-56-
	Conclusion générale	-57-

Liste des figures

Chapitre I

Fig(I.1)	Evolution de transfert d'électricité sans fil	04
Fig(I.2)	Faraday et l'induction magnétique	04
Fig(I.3)	Sturgeon invente l'électroaimant	04
Fig(I.4)	Nicola tesla et ampoule allumée	04
Fig(I.5)	Schéma du principe du chauffage par induction-Décapage par induction	05
Fig(I.6)	Système d'alimentation sans fil	05
Fig(I.7)	Schéma fonctionnel générique d'un système par d'alimentation sans fil inductif	06
Fig(I.8)	Une ampoule alimentée sans fil induction, en 1910	06
Fig(I.9)	Système de recharge par induction de téléphone portable	06
Fig(I.10)	Appareils de cuisine à alimentation sans fil	07
Fig(I.11)	Description fonctionnement plaque à induction	07
Fig(I.12)	Schéma fonctionnel générique d'un système	08
Fig(I.13)	Démonstration de système d'alimentation sans fil en allumant une ampoule située à deux mètres d'une source d'énergie,	08
Fig(I.14)	Système de recharge de voiture électrique Power mat par induction	09
Fig(I.15)	Points de charge inductifs dans un café	09
Fig(I.16)	Le GM EV1 et le Toyota RAV4 EV se rechargent par induction	09
Fig(I.17)	Transfert de puissance pour les véhicules électriques	10
Fig(I.18)	Couplage bipolaire	11
Fig(I.19)	Couplage mono polaire	11
Fig(I.20)	Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion	12
Fig(I.21)	Représentation d'un satellite solaire qui pourrait envoyer de l'énergie par micro-ondes à un vaisseau spatial ou à une surface planétaire	13
Fig(I.22)	Un faisceau laser centré sur un panneau de cellules photovoltaïques fournit suffisamment de puissance à un modèle réduit d'avion léger pour qu'il puisse voler	13
Fig(I.23)	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	15
Fig(I.24)	Secondaire du système Primove développé par Bombardier	15
Fig(I.25)	Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train	16
Fig(I.26)	Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train	17
Fig(I.27)	Projet Serpentine : 'capsule' autonome alimenté sans contact	17
Fig(I.28)	Système DWPT développé par Renault-Supelec, source	18
Fig(I.29)	Différents types de pistes	18
Fig(I.30)	Prévisions du marché de l'énergie sans fil	19

Chapitre II

Fig(II.1)	les lignes de champ	22
Fig(II.2)	le flux du champ magnétique qui traverse un circuit conducteur	23
Fig(II.3)	l'induction magnétique	24
Fig(II.4)	l'apparition d'un courant induit qui circule dans la bobine 2	25

Fig (II.5)	Modèle inductif	26
Fig(II.6)	module de l'impédance d'une bobine d'inductance	27
Fig(II.7)	Résonance LC d'une bobine	27
Fig(II.8)	transformateur électrique comporte un bobinage primaire et un bobinage secondaire	28
Fig(II.9)	Inductance mutuelle décrivant l'interaction entre deux bobines	28
Fig(II.10)	Structure planaire du coupleur	29
Fig(II.11)	dimension de la bobine spirale	30
Fig(II.12)	dimension de la bobine spirale	31
Fig(II.13)	Bobine massée ou multicouches	33
Fig(II.14)	Lien inductif entre deux spires	34
Fig(II.15)	Deux bobines toriques de sections rectangulaires couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial)	35
Fig(II.16)	Section rectangulaire de bobine torique divisée en $(2N + 1) \times (2K + 1)$ éléments dont chacun est équivalent à une spire élémentaire	36
Fig(II.17)	Bobine plate composée de 17 spires	37
Fig(II.18)	représentation en convention récepteur	38
Fig(II.19)	Topologies de résonance	39
Fig(II.20)	Le modèle de couplage	39

Chapitre III

Fig(III.1)	Variation de l'inductance série en fonction de la fréquence	45
Fig(III.2)	Variation de la résistance en fonction de la fréquence	45
Fig(III.3)	Variation de l'inductance série en fonction de la fréquence pour différentes largeurs du conducteur	46
Fig(III.4)	Variation de l'inductance série en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du nombre de spires	47
Fig(III.5)	Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs de la fréquence	47
Fig(III.6)	Variation du coefficient de couplage en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs de l'inter-spire	49
Fig(III.7)	Variation de l'efficacité en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs de l'inter-spire	50
Fig(III.8)	Puissance de sortie en fonction du nombre de tours	50
Fig(III.9)	Efficacité de transmission en fonction de la résistance de charge pour différentes valeurs de l'inter-spire	51
Fig(III.10)	Variation du coefficient de couplage en fonction du Distance entre bobine pour différentes valeurs de l'inter-spire	52
Fig(III.11)	coefficient de couplage en fonction du désalignement	53
Fig(III.12)	Inductance Mutuelle en fonction du désalignement	53
Fig(III.13)	Circuit de lien inductif résonant	55
Fig(III.14)	Effet de la fréquence sur le lien inductif résonant $f=75\text{kHz}$	55
Fig(III.15)	Effet de la fréquence sur le lien inductif résonant $f=100\text{kHz}$	56

Liste des Tableaux

Tableau II Paramètres pour différentes formes de bobines.....	31 -
Tableau.III.1 I Caractéristiques géométriques.....	44 -
Tableau.III.2 Valeur théorique de l'inductance d'une bobine de 600 mm	48 -
Tableau.III.3 Valeur théorique de la résistance interne d'une bobine de 600 mm.....	48 -
Tableau.III.4 Caractéristiques géométriques.....	49 -
Tableau.III.5 Paramètres et valeurs choisis.....	54 -

Introduction générale

Introduction générale

La transmission d'énergie sans fil est une technique donnant la possibilité la distribution de l'énergie électrique sans utiliser de support matériel. La transmission d'énergie sans fils n'est pas une idée nouvelle. Au début du 20ème siècle, Nikola Tesla avait déjà effectué une transmission d'électricité sans fil. Il utilisait alors l'induction électromagnétique. Il avait découvert que l'électricité pouvait être transmise à travers l'air mais aussi la terre. Au cours de ses recherches, il avait réussi à allumer des lampes à une distance moyenne. Dans les techniques de champ proche ou non radiatives, la puissance est transférée sur de courtes distances par des champs magnétiques utilisant un couplage inductif entre des bobines de fil.

Cette technique est conçue pour être utilisée pour alimenter des lieux complexes d'accès. Au contraire de la transmission de données, le rendement est le critère à maximiser, il va déterminer les différences des principales technologies. Le principe d'un transformateur électrique est l'exemple le plus courant de transmission d'énergie sans fil. Les bobines du primaire et du secondaire sont électriquement isolées l'une de l'autre. Le transfert d'énergie se fait par couplage électromagnétique connu sous le nom de courant induit. L'inconvénient principal est la proximité requise du récepteur pour permettre le couplage. Ses applications incluent la charge d'appareils portables tels que les téléphones et les brosses à dents électriques, la cuisson par induction et la charge sans fil ou le transfert d'énergie sans fil continu dans des dispositifs médicaux implantables tels que des stimulateurs cardiaques artificiels ou des véhicules électriques.

Le couplage inductif par résonance est une réponse prometteuse aux défauts liés au couplage inductif respectant les traditions ainsi qu'aux rayonnements électromagnétiques : distance et efficacité. La résonance augmente le rendement en concentrant le champ magnétique sur le récepteur qui possède la même fréquence de résonance. Cependant, la complexité de la géométrie des bobines couplées dans les liens inductifs rend très difficile voir impossible l'extraction des expressions analytiques générales pour des caractéristiques importantes du lien. En effet, pour déterminer le comportement électrique des bobines couplées, il faut connaître le coefficient de couplage k , les inductances propres, les inductances mutuelles et les capacités parasites.

Dans ce travail, nous étudions la transmission sans fil 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 exposé quelques notions de bases sur les inductances des bobines et leurs résistances. Dans le cadre de la modélisation et la conception de système de transfert sans contact, des méthodes de calcul des inductances propre et mutuelles ont été proposées pour résoudre ce système.

Le troisième chapitre est consacré à l'optimisation paramétrique des différents paramètres formant les deux bobines spirales circulaires qui sont très utilisés dans l'application de transfert d'énergie sans fil.

La détermination de l'inductance d'une bobine est 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. Dans ce projet nous allons proposer une méthode de calcul de l'inductance mutuelle et les grandeurs électromagnétiques (potentiel vecteur magnétique et le champ magnétique) entre deux conducteurs parallèles de section transversale rectangulaire.

Chapitre I

Chapitre I : **La transmission de puissance sans fil**

I.1 INTRODUCTION

La mise au point de la première technique de transmission d'énergie sans fil – la technique d'induction – remonte au XIXe siècle. 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, par induction d'un champ magnétique, par résonance, etc. Les applications de la TESF vont des dispositifs mobiles et portables aux véhicules électriques en passant par les appareils domestiques et les équipements de bureau.

Ce chapitre donne l'état de l'art dans le domaine de la transmission d'énergie sans fil. Un court historique passe en revue les avancées notables. Les différentes techniques de transmission d'énergie sans fil sont décrites, tout en illustrant les avantages et les inconvénients.

I.2 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 est le premier en 1836 à faire 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 minimum quatre circuits de résonance, deux pour l'émetteur et deux 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].

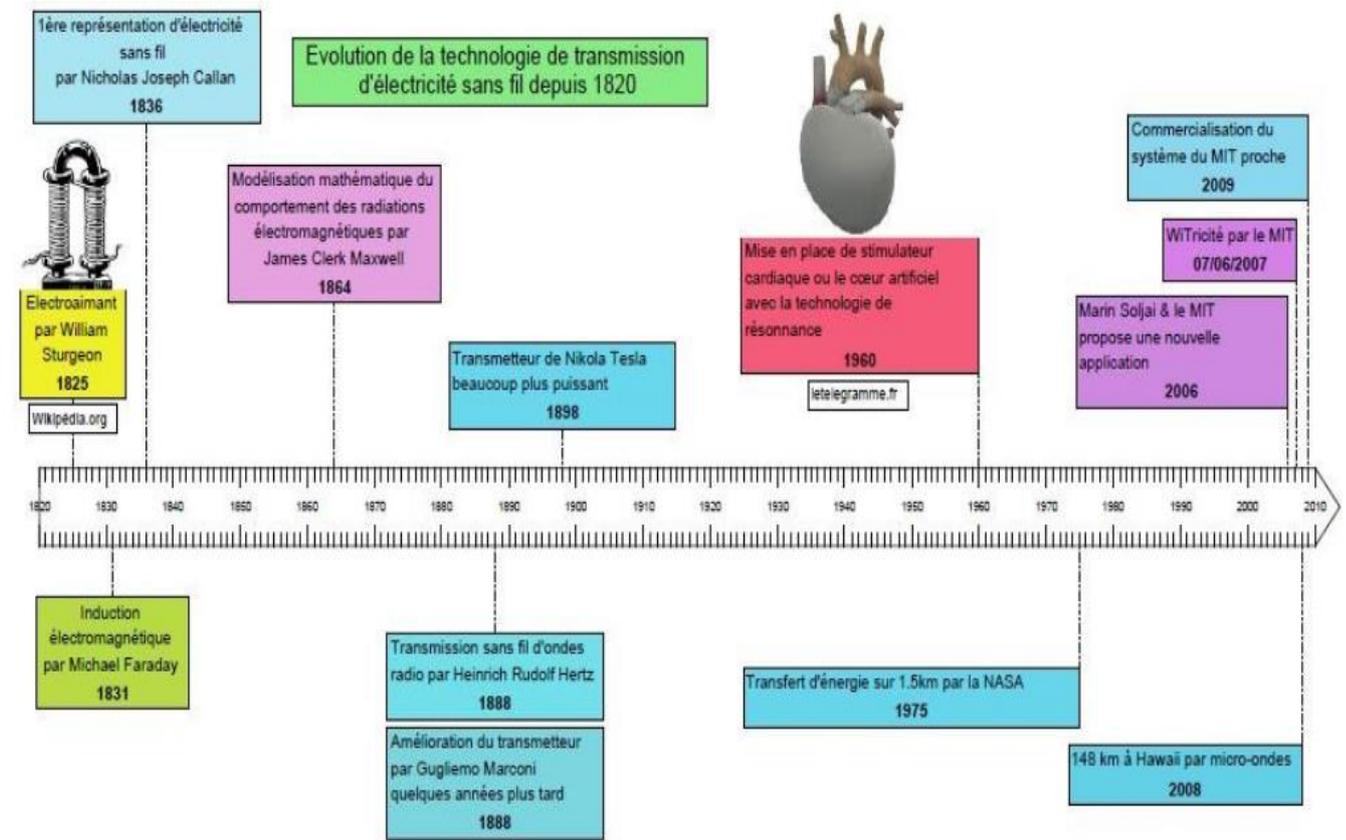


Fig.I.1 Evolution de transfert d'électricité sans fil



Fig.I.2 Faraday et l'induction magnétique

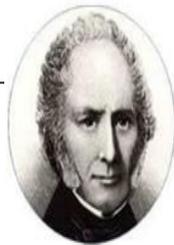
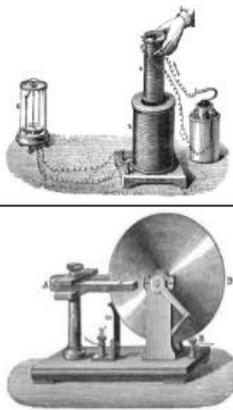


Fig.I.3 Sturgeon invente l'électroaimant

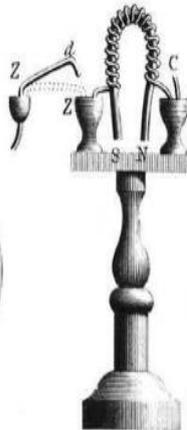


Fig.I.4 Nicola tesla et ampoule allumée

I.3 induction électromagnétique et générateur d'induction

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]-[7].

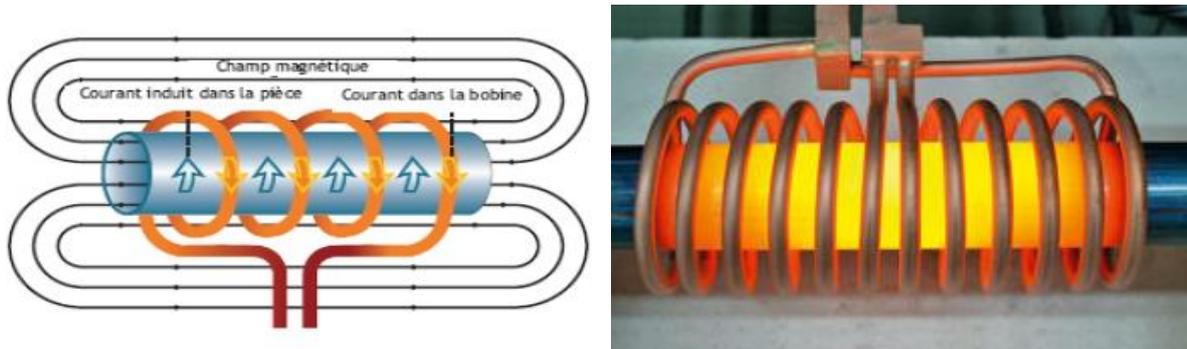


Fig.I.5 Schéma du principe du chauffage par induction
– Décapage par induction

I.4 générale d'un système d'alimentation sans fil

Comme on le voit en Fig.I.6, un système d'alimentation sans fil est constitué de deux parties séparées par un vide : un circuit émetteur, comportant un bobinage d'émission, et un circuit récepteur, comportant un bobinage de réception. Le circuit émetteur génère un champ magnétique alternatif de haute fréquence autour du bobinage d'émission. Ce champ magnétique est couplé au bobinage de réception et converti en énergie électrique qui peut être utilisée pour charger une batterie ou alimenter d'autres circuits.

Wireless Battery Charger System Overview

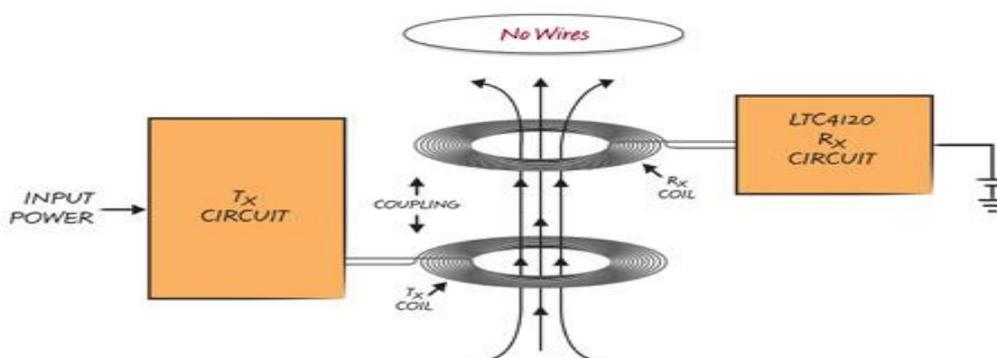


Fig.I.6 Système d'alimentation sans fil

I.5 Techniques en champ proche (non radiatives)

I.5.1 Couplage inductif

La technologie d'alimentation sans fil est la plus ancienne et la plus largement utilisée, et pratiquement la seule à ce jour utilisée dans les produits commerciaux (Fig.I.8). Dans le couplage inductif (induction électromagnétique ou transfert de puissance inductif, IPT), la puissance est transférée entre les bobines de fil par un champ magnétique. Les bobines de l'émetteur et du récepteur forment ensemble un transformateur (Fig.I.7). Un courant alternatif à travers la bobine émettrice crée un champ magnétique oscillant par la loi d'Ampère. Le champ magnétique passe à travers la bobine de réception, où il induit une EMF (tension) alternative par la loi d'induction de Faraday, qui crée un courant alternatif dans le récepteur. Le courant alternatif induit peut soit conduire la charge directement, soit être redressé en courant continu par un redresseur dans le récepteur, qui entraîne la charge.

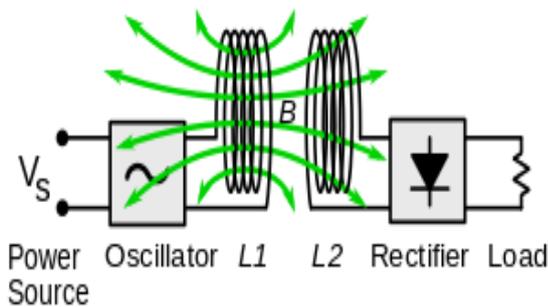


Fig.I.7 Schéma fonctionnel générique d'un système par d'alimentation sans fil inductif

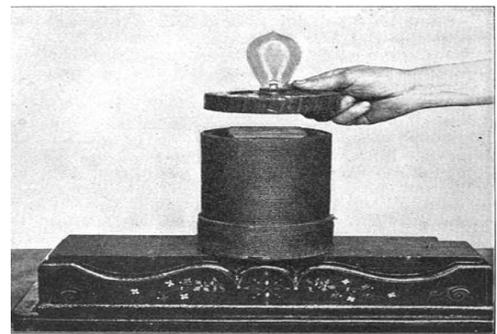


Fig.I.8 Une ampoule alimentée sans fil induction, en 1910



Fig.I.9 Système de recharge par induction de téléphone portable



Fig.I.10 Appareils de cuisine à alimentation sans fil

Un couplage inductif ordinaire ne peut atteindre un rendement élevé que lorsque les bobines sont très proches les unes des autres (Fig.I.9 et Fig.I.10), généralement adjacentes.

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.11).

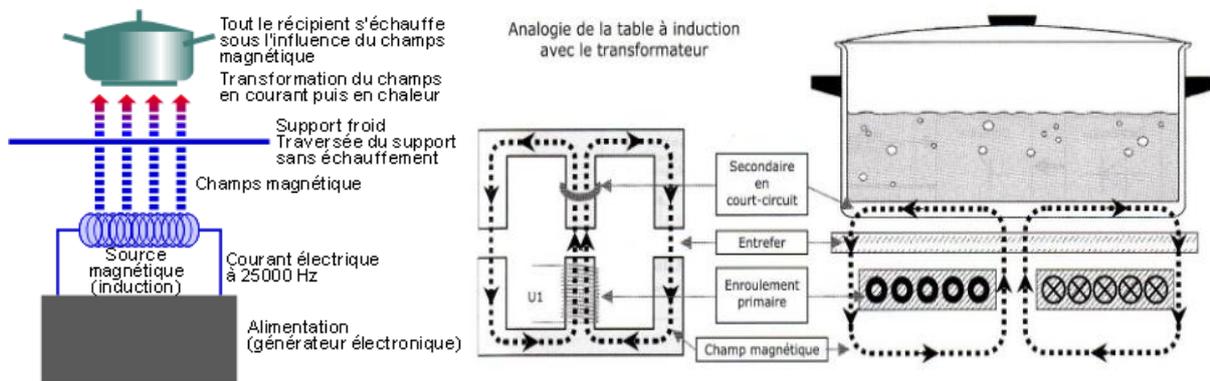


Fig.I.11 Description fonctionnement plaque à induction [7]

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'entrefer 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.

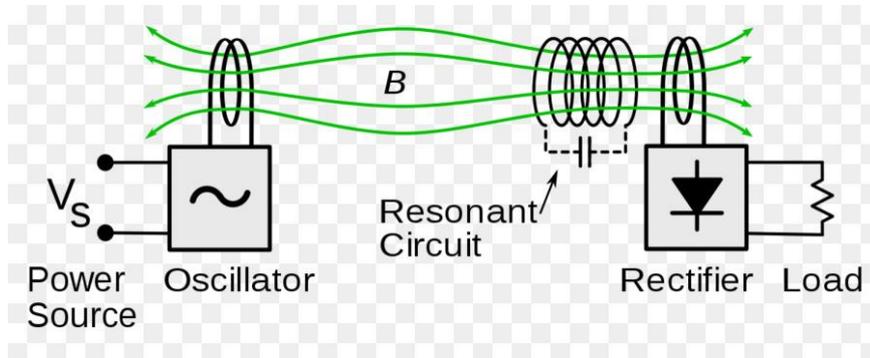


Fig.I.12 Schéma fonctionnel générique d'un système

I.5.2 Couplage inductif résonnant

Le couplage inductif résonnant (couplage électrodynamique, résonance magnétique fortement couplée) est une forme de couplage inductif dans lequel la puissance est transférée par des champs magnétiques entre deux circuits résonants (circuits accordés), un dans l'émetteur et un dans le récepteur ((Fig.I.12). La résonance entre les bobines peut augmenter considérablement le couplage et le transfert de puissance, de la même manière qu'un diapason vibrant peut induire une vibration sympathique dans une fourche distante accordée au même pas. 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 résonnant est souvent utilisé dans énormément d'implants commercialisés (Fig.I.13) .



Fig.I.13 Démonstration de système d'alimentation sans fil en allumant une ampoule située à deux mètres d'une source d'énergie,

Dans la plupart des systèmes inductifs modernes, un couplage inductif résonant est utilisé, dans lequel l'efficacité est augmentée en utilisant des circuits résonants. Ceci peut atteindre des rendements élevés à des distances plus grandes que le couplage inductif non résonant.



Fig.I.14 Système de recharge de voiture électrique Power mat par induction



Fig.I.15 Points de charge inductifs dans un café.



Fig.I.16 Le GM EV1 et le Toyota RAV4 EV se rechargent par induction

Dans une station de charge

La technologie de résonance est actuellement largement intégrée dans les systèmes d'alimentation sans fil inductifs modernes (Fig.I.14, Fig.I.15, Fig.I.16). Un avantage environnemental et économique de l'alimentation sans fil de petits appareils tels que des horloges, des radios, des lecteurs de musique et des télécommandes est qu'il pourrait réduire considérablement les 6 milliards de piles éliminées chaque année, une grande source de déchets toxiques et de contamination des eaux souterraines.

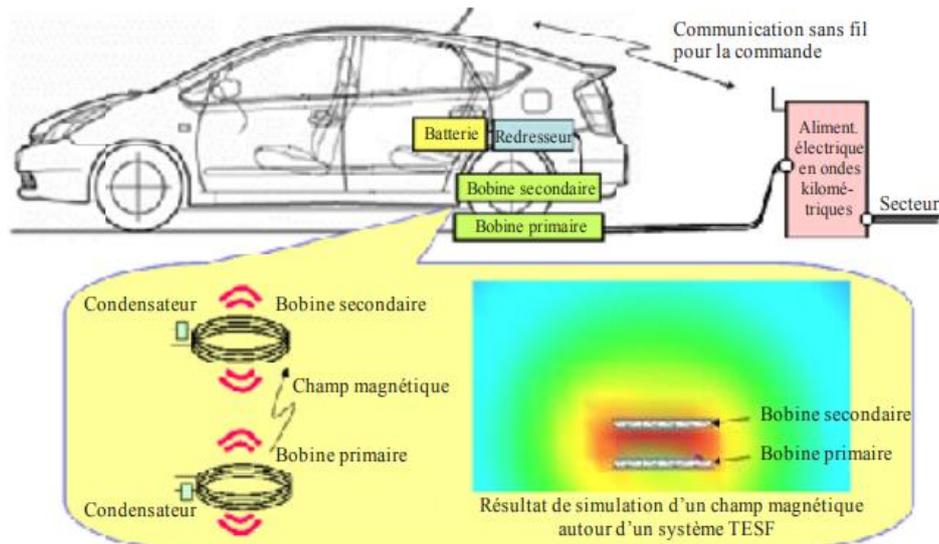


Fig.I.17 Transfert de puissance pour les véhicules électriques

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 TESH pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables (Fig.I.17). La TESH-CM pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables utilise à la fois l'induction et la résonance magnétique [9]-[10]-[11]-[12].

I.5.3 Couplage capacitif

Le couplage capacitif, également appelé couplage électrique, utilise des champs électriques pour la transmission de puissance entre deux électrodes (une anode et une cathode) formant une capacité pour le transfert de puissance.

Le couplage capacitif n'a été utilisé pratiquement que dans quelques applications à faible puissance, car les tensions très élevées sur les électrodes nécessaires pour transmettre une puissance significative peuvent être dangereuses, et peuvent provoquer des effets secondaires désagréables tels que la production d'ozone nocif [14].

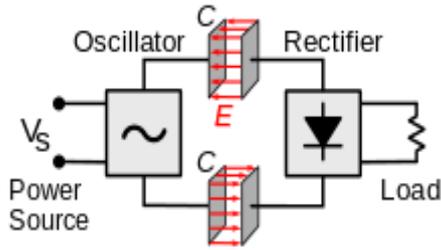


Fig.I.18 Couplage bipolaire

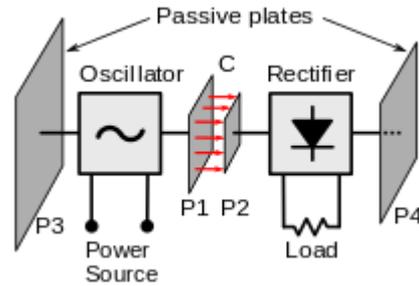


Fig.I.19 Couplage mono polaire

Deux types de circuits ont été utilisés:

a) Conception transversale (bipolaire):

Dans ce type de circuit, il y a deux plaques émettrices et deux plaques réceptrices. Chaque plaque émettrice est couplée à une plaque réceptrice. L'oscillateur émetteur entraîne les plaques émettrices en phase opposée par une tension alternative élevée, et la charge est connectée entre les deux plaques réceptrices. Les champs électriques alternatifs induisent des potentiels alternatifs de phase opposée dans les plaques réceptrices, et cette action "push-pull" provoque un courant de va-et-vient entre les plaques à travers la charge (Fig.I.18).

b) Conception longitudinale (unipolaire):

Dans ce type de circuit, l'émetteur et le récepteur n'ont qu'une seule électrode active, et soit la terre, soit une grande électrode passive sert de chemin de retour pour le courant. La charge est également connectée entre une électrode active et une électrode passive. Le champ électrique produit par l'émetteur induit un déplacement de charge alternatif dans le dipôle de charge par induction électrostatique (Fig.I.18).

I.5.4 Couplage capacitif résonnant

La résonance peut également être utilisée avec un couplage capacitif pour étendre la portée. Au tournant du 20e siècle, Nikola Tesla a fait les premières expériences avec le couplage inductif et capacitif résonnant.

I.5.5 Couplage magnétodynamique

Dans ce procédé, la puissance est transmise entre deux armatures tournantes, une dans l'émetteur et une dans le récepteur, qui tournent de manière synchrone, couplées ensemble par un champ

magnétique généré par des aimants permanents sur les armatures. Le champ magnétique agit comme un couplage mécanique entre les armatures [17]-[18]. L'armature du récepteur produit de l'énergie pour entraîner la charge, soit en faisant tourner un générateur électrique séparé, soit en utilisant l'armature du récepteur elle-même comme rotor dans un générateur. Ce dispositif a été proposé comme alternative au transfert de puissance inductif pour la recharge sans contact de véhicules électriques.

I.6 Techniques en champ lointain (radiatif)

Les méthodes de champ lointain atteignent des portées plus longues, souvent des portées de plusieurs kilomètres, où la distance est beaucoup plus grande que le diamètre du ou des dispositifs.



a)



b)

Fig.I.20 Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion : a) Vue d'ensemble

b) Réseau de 2376 rectennas

I.6.1 Micro-ondes

La transmission de puissance par ondes radio peut être rendue plus directionnelle, permettant un faisceau de puissance à plus longue distance, avec des longueurs d'onde plus courtes de rayonnement électromagnétique, généralement dans la gamme des micro-ondes (Fig.I.20). Une rectenne peut être utilisée pour reconvertir l'énergie micro-onde en électricité. Des rendements de conversion Rectenna dépassant 95% ont été réalisés. Le faisceau de puissance utilisant les micro-ondes a été proposé pour la transmission de l'énergie des satellites d'énergie solaire en orbite vers la Terre et le faisceau de puissance vers les vaisseaux spatiaux quittant l'orbite a été envisagée (Fig.I.21) [10]-[19].

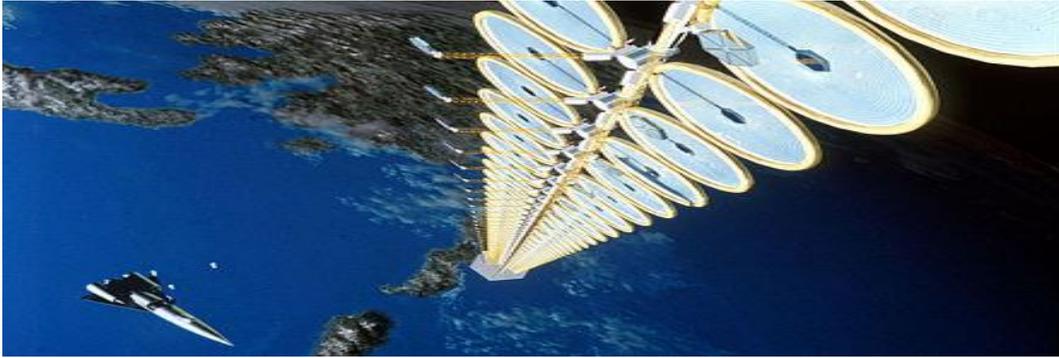


Fig.I.21 Représentation d'un satellite solaire qui pourrait envoyer de l'énergie par micro-ondes à un vaisseau spatial ou à une surface planétaire.

I.6.2 Les lasers

Dans le cas d'un rayonnement électromagnétique plus proche de la zone visible du spectre (0,2 à 2 micromètres), la puissance peut être transmise en convertissant l'électricité en un faisceau laser qui est reçu et concentré sur des cellules photovoltaïques (cellules solaires) [4]-[9]. Ce mécanisme est généralement connu sous le nom de «faisceau de puissance» parce que la puissance est transmise à un récepteur qui peut la convertir en énergie électrique. Au niveau du récepteur, des convertisseurs de puissance laser photovoltaïques spéciaux optimisés pour la conversion de lumière monochromatique sont appliqués (Fig.I.22).

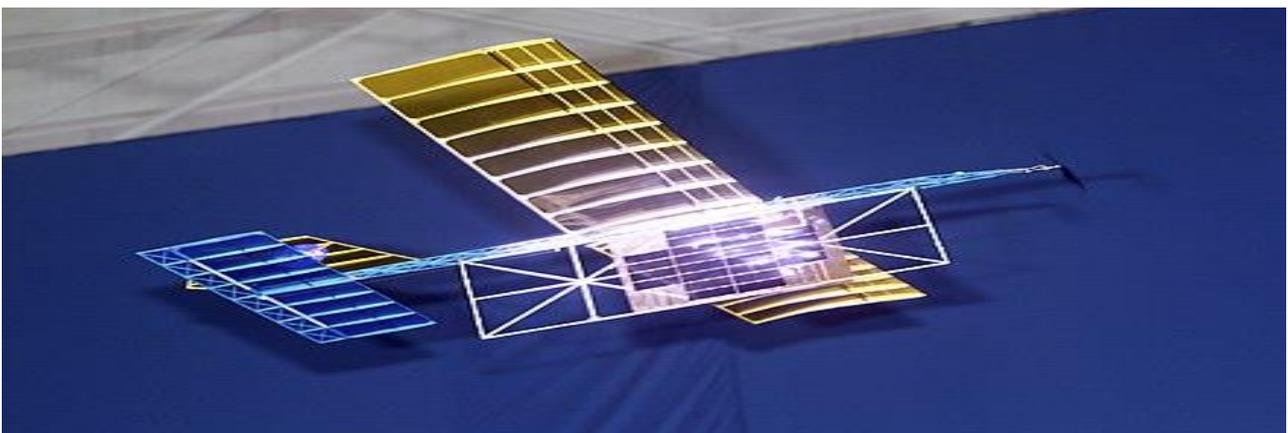


Fig.I.22 Un faisceau laser centré sur un panneau de cellules photovoltaïques fournit suffisamment de puissance à un modèle réduit d'avion léger pour qu'il puisse voler.

- Les avantages par rapport aux autres méthodes sans fil sont les suivants:
 - Il y a peu ou pas de réduction de puissance lors de l'augmentation de la distance entre l'émetteur et le récepteur.
 - Taille compacte: les lasers à semi-conducteurs s'intègrent dans de petits produits.
 - Aucune interférence de fréquence radio avec les communications radio existantes telles que le Wi-Fi et les téléphones portables.
 - Seuls les récepteurs touchés par le laser reçoivent de l'énergie.

- Les inconvénients comprennent:
 - Le rayonnement laser est dangereux.
 - La conversion entre l'électricité et la lumière est limitée.
 - L'absorption atmosphérique, ainsi que l'absorption et la diffusion par les nuages, le brouillard, la pluie, etc., entraînent jusqu'à 100% de pertes.
 - Nécessite une ligne de vue directe avec la cible.

I.7 Pour les véhicules électriques

Les véhicules électriques et hybrides présentent un grand intérêt écologique, mais la recharge rebute les consommateurs. L'entreprise WiTricity propose 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].

I.7.1 Systèmes de recharge sans contact

I.7.1.1 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.23). 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].

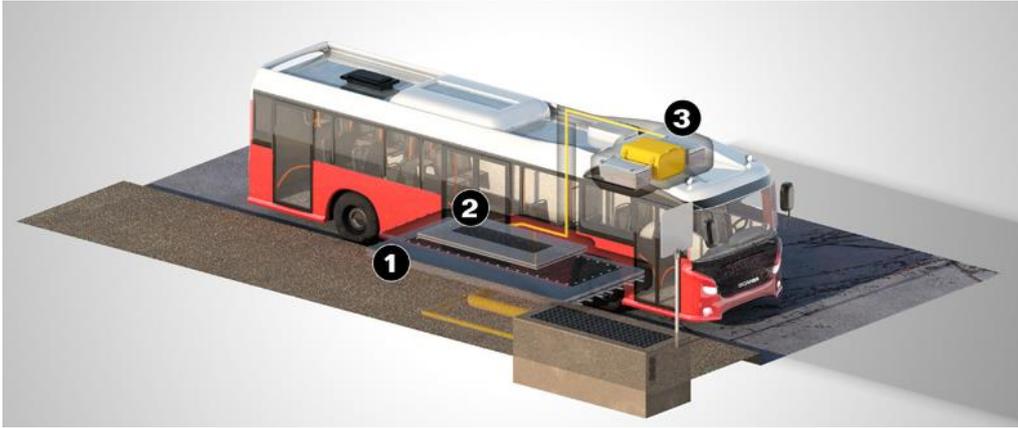


Fig.I.23 La recharge du bus électrique par induction Les bobines situées sous la route et dans le plancher du bus batterie sur le toit du véhicule [4]



Fig.I.24 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 Figure montre une partie du récepteur (sous le véhicule) qui s'abaisse pour se rapprocher de l'émetteur au sol (Fig.I.24).

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

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.25 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.25). 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 de batteries nécessaire.

I.7.1.2 Recharge dynamique

La recharge par induction en mobilité reste néanmoins une belle promesse. Encore faut-il que les différentes sociétés en charge des infrastructures routières adoptent ce genre de technologie qui nécessite d'importants travaux sur les routes [19].

Renault, en coopération avec Qualcomm Technologies et Vedecom, vient de présenter un système de charge dynamique pour recharger les véhicules électriques en roulant. Les premiers tests ont été effectués avec deux Renault Kangoo Z.E. sur une longue piste d'essai, dont cent mètres étaient équipés avec les nouveaux modules technologiques. Le système de charge dynamique développé par le constructeur automobile permet une charge de 20kW à une vitesse de 100km/h.



Fig.I.26 Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train.

Projet Serpentine EPFL Réalisé à Lausanne (Fig.I.27), il a abouti à la réalisation d'un démonstrateur : une capsule autonome était alimentée sans contact lors de ses déplacements sur le site pilote d'Ouchy en 2001. Ce projet a permis de démontrer que le transfert de l'énergie par induction peut se faire avec très peu de pertes (rendement annoncé de 96 %). Ce démonstrateur fut démonté en Août 2004 pour des raisons de législation : les véhicules étaient entièrement automatisés et sans conducteur, ce qui posa un problème réglementaire [4]-[6]-[7].



Fig.I.27 Projet Serpentine : 'capsule' autonome alimenté sans contact

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-Supelec (Fig.I.28).



Fig.I.28 Système DWPT développé par Renault-Supelec, source [16]

Dans ce type de recharge, le véhicule se charge en roulant (Fig.I.28). 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.29).

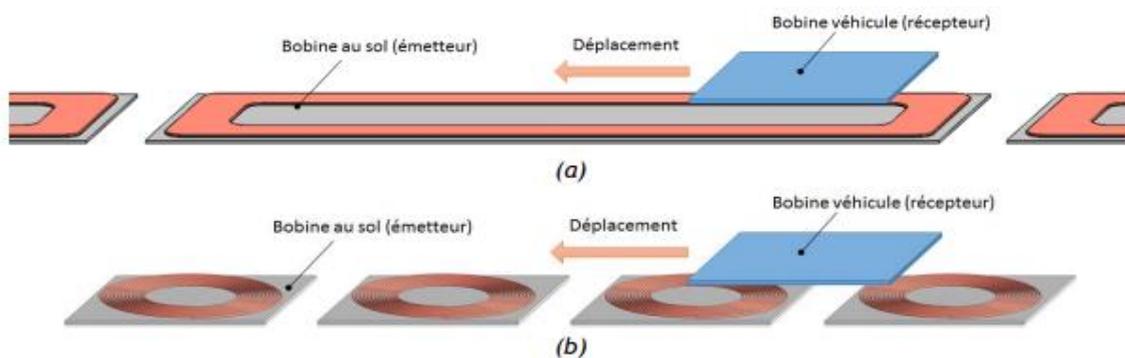


Fig.I.29 Différents types de pistes

(a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté

Pour les systèmes à émetteur unique (Fig.I.29.a) la bobine réceptrice est de taille réduite [3]. Par rapport à la bobine émettrice qui est 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.29.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.

I.8 Applications mises au point pour utiliser les techniques TESH

D'après les dernières prévisions d'IHS Markit, le nombre de dispositifs à recharge sans fil dépassera les 300 millions d'unités par an pour la première fois en 2017. Ce chiffre, tiré par l'intégration de ces dispositifs dans les téléphones mobiles, les ordinateurs portables et les appareils à porter sur soi, représente une augmentation de 75% par rapport à 2016 alors que de plus en plus de consommateurs expérimentent la recharge sans fil pour la première fois et que de nouvelles applications adoptent cette technologie. D'un autre côté, la demande pour la recharge sans fil croît chaque année, tandis que le volume de dispositifs compatibles continue d'augmenter [10]-[13].



Fig.I.30 Prévisions du marché de l'énergie sans fil

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.

Reference

- [1] I. Kharrat. Modélisation et réalisation d'un système de récupération d'énergie imprime : caractérisation hyperfréquence 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>
- [9] 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
- [10] http://www.electrosup.com/transmission_d_energie_sans_fil.php
- [11] https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_en.pdf
- [12] A. Caillierez, « Etude et mise en oeuvre 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
- [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
- [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

Chapitre II :**Modélisation et conception géométrique d'un lien inductif****II.1 Introduction**

La transmission de l'énergie par lien inductif paraît alors la meilleure solution qui répond à plusieurs problèmes technologiques [1]-[2]-[3]. Un lien inductif peut être utilisé à la fois pour transmettre l'énergie nécessaire à l'alimentation. Cependant, la complexité de la géométrie des bobines couplées dans les liens inductifs rend très difficile voir impossible l'extraction des expressions analytiques générales pour des caractéristiques importantes du lien [4]. En effet, pour déterminer le comportement électrique des bobines couplées, il faut connaître le coefficient de couplage k , les inductances propres, les inductances mutuelles et les capacités parasites. Ce chapitre présente tout d'abord un état de l'art sur les bobines et survole leurs principales fonctions. Ensuite, une méthode analytique originale pour le calcul de grandeurs électriques sera élaborée.

II.2 Création d'un champ magnétique uniforme

Dans des expériences liées à la physique, chimie, biologie, on peut avoir besoin d'avoir un champ magnétique uniforme.

II.2.1 Le solénoïde

Un solénoïde est une bobine dont la longueur L est plus longue par rapport à son rayon R . La figure ci-après montre les lignes de champ en 3D(Fig.II.1).

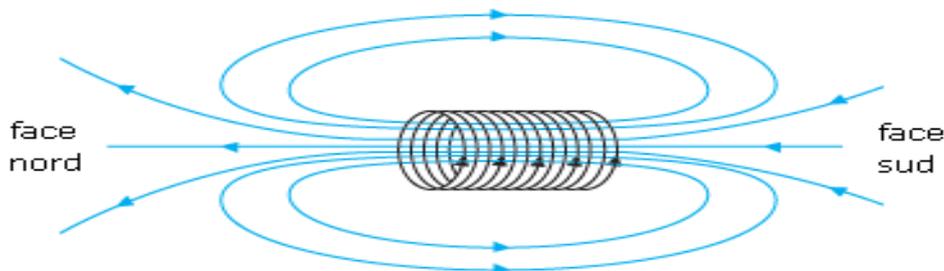


Fig.II.1 les lignes de champ

A l'intérieur du solénoïde, le champ \vec{B} est uniforme. Sa norme B pour un solénoïde comportant N spires est donnée par la relation :

$$B = \mu \frac{N}{L} I \quad (\text{II.1})$$

Où I est le courant circule à la bobine, L est la longueur de la bobine, μ est la perméabilité du vide, dont la valeur reste valable pour l'air.

L'énergie stockée dans une bobine d'inductance L , parcourue par un courant I vaut :

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{II.2})$$

II.2.2 Flux magnétique :

Le flux magnétique est proportionnel au champ magnétique B et à une surface de référence S traversée par ce champ. Le flux magnétique est défini par :

$$\Phi = \int B ds \quad (\text{II.3})$$

II.2.3 L'induction électromagnétique ou tension induite :

Un conducteur parcouru par un courant électrique génère un champ magnétique (loi de Biot et Savart). La loi de Lenz-Faraday décrit le phénomène suivant : lorsque le flux du champ magnétique qui traverse un circuit conducteur varie au cours du temps, il apparaît dans ce circuit une tension appelée force électromotrice (Fig.II.2). La f.e.m. ainsi créée est orientée de façon à générer des courants s'opposant à la variation du flux :

$$e = -d\Phi/dt \quad (\text{II.4})$$

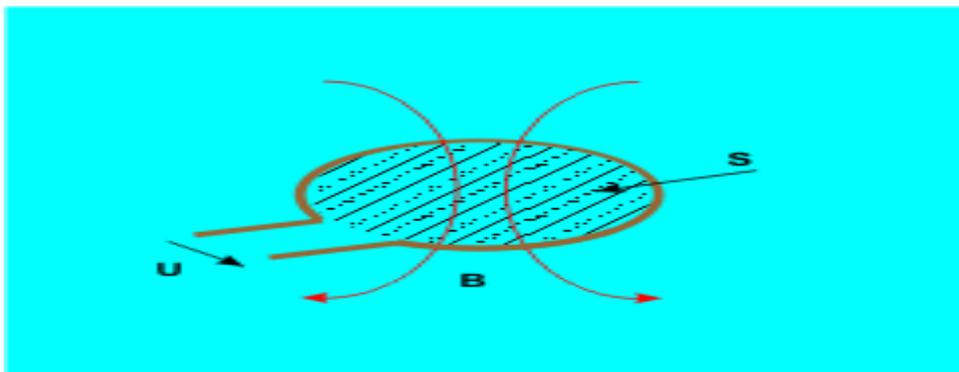


Fig.II.2 le flux du champ magnétique qui traverse un circuit conducteur

Toute variation du courant produit une variation de ce champ induit, ce qui a pour effet de produire une tension qui s'oppose à la variation du champ donc qui s'oppose à la variation du courant :

$$U = -Ldi/dt \quad (\text{II.5})$$

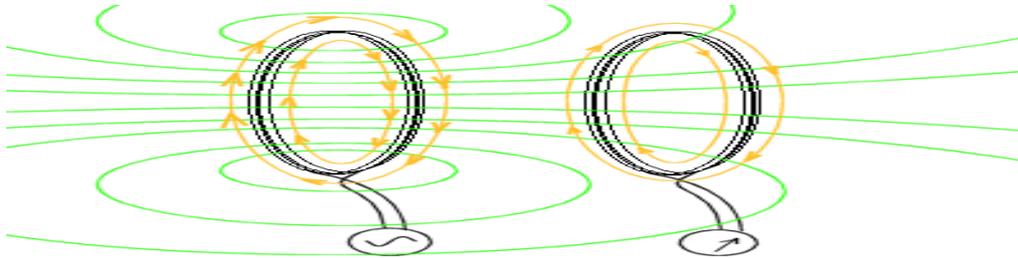


Fig.II.3 l'induction magnétique

II.2.4 Self-inductance

L'inductance de la bobine est une constante positive qui ne dépend que des caractéristiques géométriques de la bobine. Elle est définie comme le rapport entre le flux magnétique embrassé par le circuit et l'intensité du courant :

$$\Phi = LI \quad (\text{II.6})$$

Toutefois, il n'existe aucune formule fiable pour le calcul de l'inductance des bobines : chacune est le fruit d'approximations et a donc ses limites. Dans le cas où l'épaisseur du fil est faible devant le diamètre de la bobine, on peut considérer que toutes les spires ont le même diamètre, et donc on peut déduire approximativement la formule de L :

$$L = \mu S \frac{N^2}{l} \quad (\text{II.7})$$

Où L est l'inductance de la bobine en Henry (H), N est le nombre de spires de la bobine, l est la longueur de la bobine (non pas du fil). S est la section de bobine en m^2 et μ il s'agit de la perméabilité du milieu autour duquel sont enroulées les spires. Dans notre cas les spires sont enroulées sans aucun matériau, on utilise alors la perméabilité du vide.

II.2.5 Résistance interne :

Le fil de cuivre ayant une conductivité γ finie, la bobine résiste au passage du courant. Sa résistance interne R peut être donnée par la formule suivante :

$$R = \frac{4ND}{\gamma d^2} \quad (\text{II.8})$$

Ou D est le diamètre de la bobine, γ est la conductivité du cuivre, d est le diamètre du fil conducteur et N est le nombre de spires.

Nous parlons de la résistance interne d'une bobine pour déterminer la section du fil de cuivre à utiliser. On conclut que plus la section du fil est grande plus la résistance interne est petite.

II.2.6 Facteur de qualité

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 :

$$Q = Lw/R \quad (\text{II.9})$$

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

II.3 phénomène d'induction mutuelle

L'induction mutuelle est le phénomène apparu lorsqu'une variation du courant dans une bobine induit une force électromotrice magnétique dans une autre bobine placée proche d'elle (Fig.II.3). Soit une bobine (1) reliée à un générateur de courant alternatif I , la variation du courant induit une force électromotrice magnétique aux bornes de la bobine qui s'oppose au courant principale I (selon la Loi de Lenz), cette force est définie par des lignes du champ magnétique qui décrit le flux. Ce flux forme une liaison avec celui d'une autre bobine (bobine (2)) si on la met si près de la première bobine (bobine (1)) traduit par l'apparition d'un courant induit qui circule dans la bobine 2.

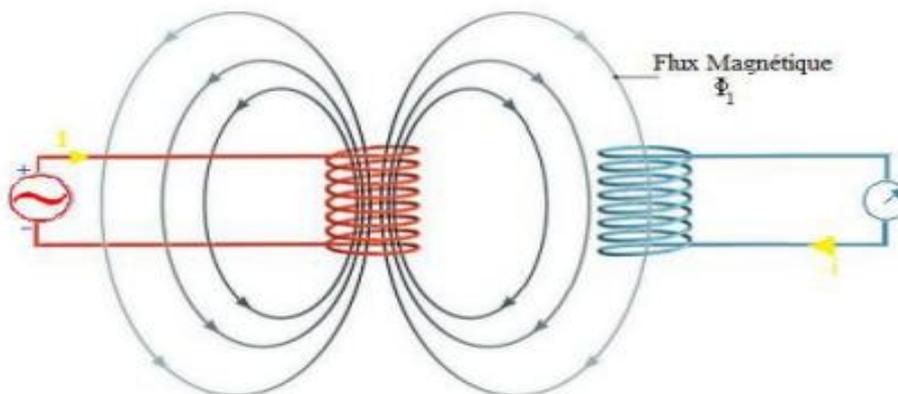


Fig.II.4 l'apparition d'un courant induit qui circule dans la bobine 2

II.4 Bobine d'inductance : modèle détaillé

Les fabricants s'efforcent de réaliser des éléments "inductance" dont la partie inductive est prépondérante, ceci dans toutes les conditions d'utilisation. Mais il est impossible de réaliser un élément qui soit purement inductif et on le modèle composé de: capacité parasite (fils de connexion, capacité inter-spires C_p), et une résistance parasite série (fils de connexion et du bobinage, R_s), et une résistance parasite parallèle (pertes magnétiques, R_p) et une inductance L (Fig.II.5).

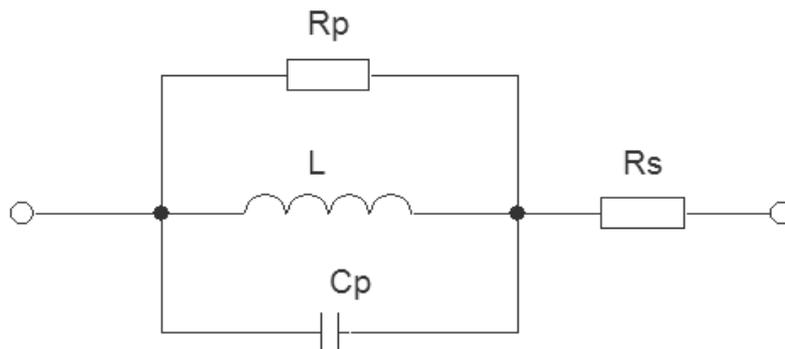


Fig.II.5 Modèle inductif

La figure ci-dessous illustre le module de l'impédance d'une bobine d'inductance en fonction de la fréquence, calculé avec le modèle ci-dessus. On peut définir trois zones :

- Zone résistive : caractérisée par la résistance série R_s . Cette valeur limite le courant maximum dans l'inductance, donc l'énergie qu'il est possible de stocker
- Zone inductive : caractérisée par l'inductance L . C'est la zone de travail habituelle de la bobine d'inductance
- Zone capacitive : caractérisée par la capacité C_s . C'est une zone à éviter en pratique puisque la bobine d'inductance présente une impédance qui décroît en fonction de la fréquence, ce qui est l'inverse de son comportement souhaité

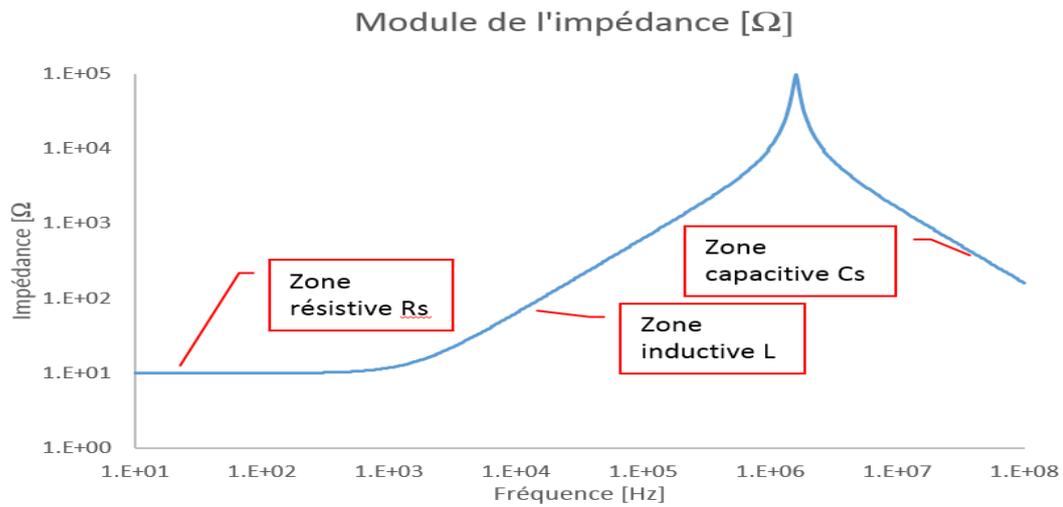


Fig.II.6 module de l'impédance d'une bobine d'inductance

- Résonance LC : choix de la capacité

Pour améliorer ce phénomène de résonance, on peut rajouter une capacité en parallèle de L_2 (la capacité se connecte entre les bornes de la bobine pour former un circuit LC parallèle). Ceci a pour effet de créer un circuit résonnant à la fréquence utilisée lors de la transmission sans fil. Avec une capacité bien choisie pour que le circuit $L_2 C_2$ résonne à cette fréquence, on améliore la transmission d'énergie(Fig.II.7).

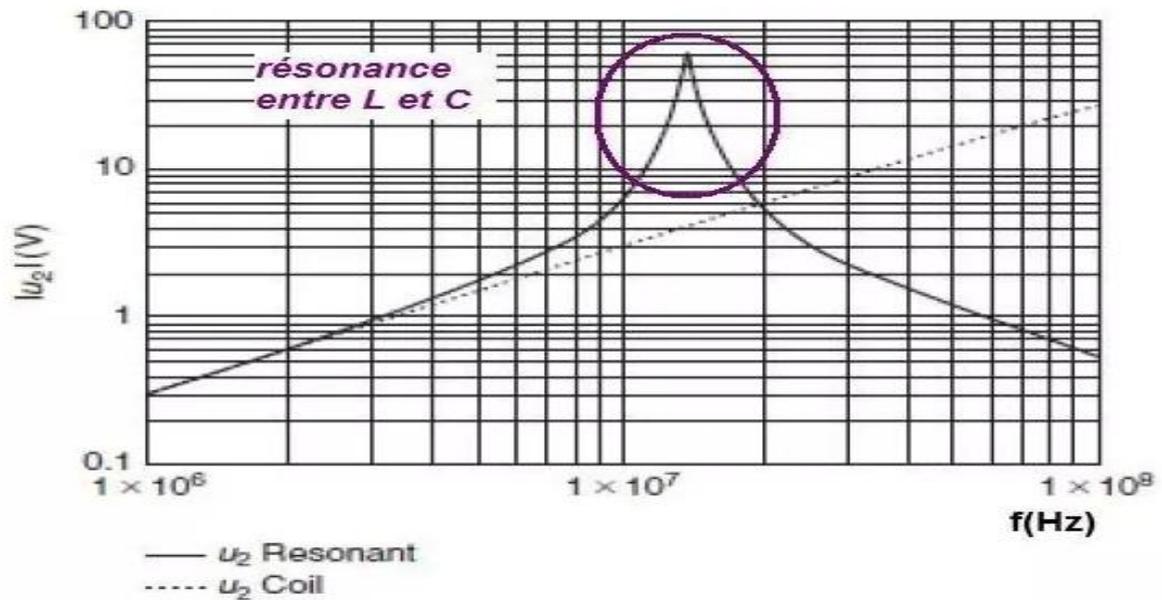


Fig.II.7 Résonance LC d'une bobine

II.5 transformateur électrique

Un transformateur électrique comporte un bobinage primaire et un bobinage secondaire. Le courant circulant dans le bobinage du circuit primaire engendre un champ magnétique concentré dans l'axe du solénoïde, mais qui atteint aussi le solénoïde du circuit secondaire (Fig.II.8). Celui-ci étant alors soumis à un champ magnétique alternatif (la tension primaire est supposée alternative), un courant alternatif y est induit. L'amplitude de la tension secondaire correspondante est égale à l'amplitude de la tension primaire multipliée par le rapport des nombres de spires des deux solénoïdes. Ici, le transformateur réduit donc la tension.

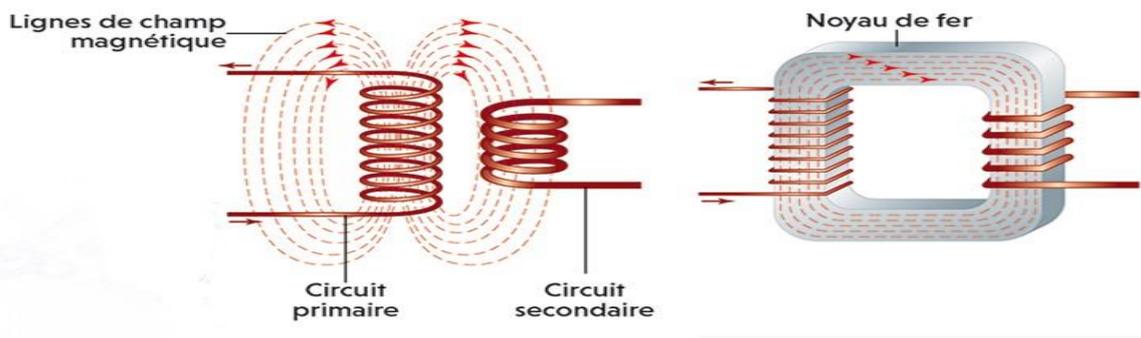


Fig.II.8 transformateur électrique comporte un bobinage primaire et un bobinage secondaire

II.6 Coupleurs inductifs

Les couplages inductifs reposent sur le principe du transformateur. Pour caractériser le couplage entre deux bobines, on peut utiliser les notions d'inductances mutuelles et de coefficient de couplage. L'inductance mutuelle est un coefficient qui permet de décrire dans notre cas l'influence d'une bobine sur l'autre. Elle caractérise la quantité de flux magnétique généré par un courant dans une bobine traversant une autre bobine (Fig.II.9).

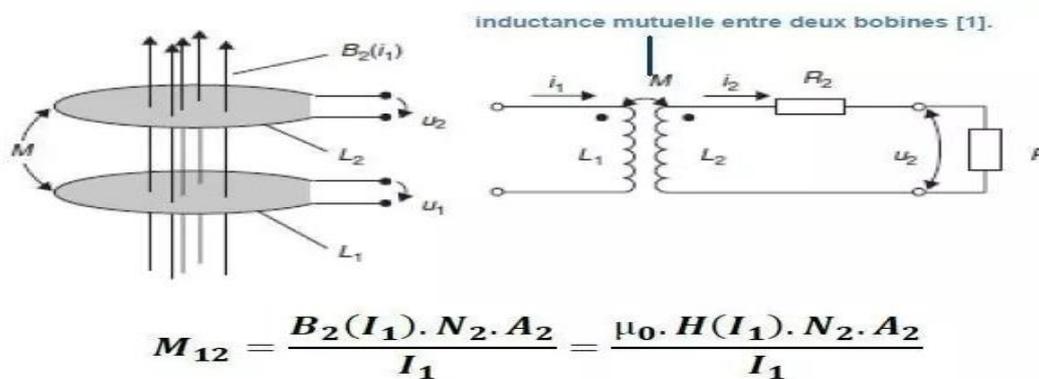


Fig.II.9 Inductance mutuelle décrivant l'interaction entre deux bobines

II.7 Structure planaire du coupleur

Le dimensionnement d'un coupleur à grand entrefer demeure un exercice difficile par rapport à celui d'un transformateur classique (Fig.II.10). Bien avant la transmission d'énergie sans fil entre deux appareils indépendants, ce principe a été massivement employé dans les transformateurs électriques, qui utilisent deux bobines autour d'un noyau ferromagnétique pour abaisser ou augmenter la tension. Il a ensuite été utilisé pour des appareils où l'absence de contact électrique apporte un gain de sécurité, par exemple, les brosses à dent électriques, où le rechargement par induction permet d'éviter des contacts apparents sur des appareils en contact fréquent avec de l'eau.

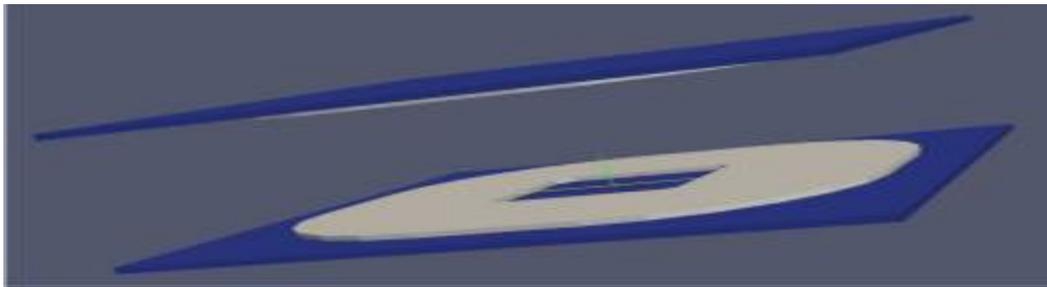


Fig.II.10 Structure planaire du coupleur [7]

La connaissance de l'inductance mutuelle (M) et donc du coefficient de couplage (k) reste un point clé pour ce processus de dimensionnement. Par ailleurs, le choix de la forme du système magnétique est à considérer ; on retrouve usuellement des formes planaires en E ou simplement en I de rapport de forme important (faible épaisseur devant les deux autres dimensions, Fig.II.10).

Dans le monde de l'informatique, l'induction a d'abord été utilisée pour alimenter des souris sans-fil avec un tapis à induction, disponibles sur le marché depuis une grosse dizaine d'années, et se retrouve aujourd'hui dans les tablettes et Smartphones.

II.8 Formes de bobines spiral

Pour voir les formes des bobines, plusieurs auteurs ont proposé Une combinaison de plusieurs enroulements primaires et secondaires. Différents types de bobines peuvent être sélectionnés pour la section primaire Secondaire

Bien que les spirales circulaires fournissent une inductance plus élevée, les spirales carrées sont plus classiques en raison de la facilité de leur mise en œuvre. En outre, certains concepteurs

préfèrent les polygones comportant plus de quatre côtés, par exemple, hexagonales et octogonales pour améliorer les performances électriques. La Fig.II.11 représente différents types de formes conventionnelles.

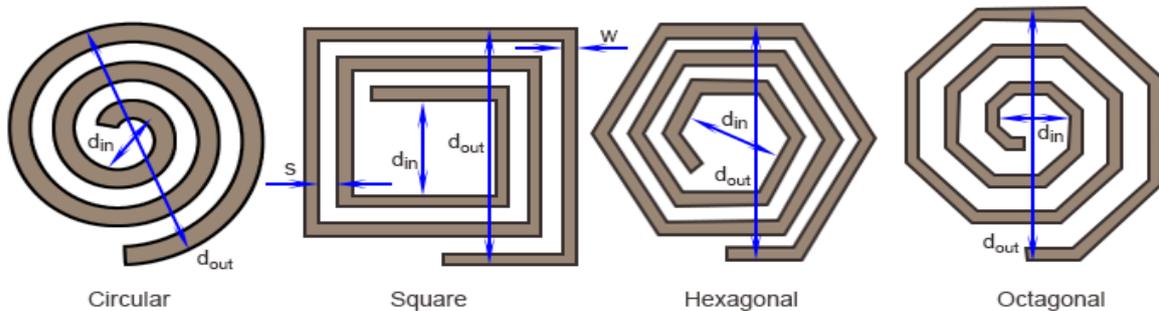


Fig.II.11 dimension de la bobine spirale

II.9 Facteurs affectant 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.
- Le diamètre de la bobine.
- Plus la bobine est grande, plus l'inductance est élevée.
- Le noyau de la bobine. Le noyau magnétique est souvent inséré dans la bobine afin d'augmenter l'inductance de la bobine, avec une perméabilité magnétique élevée. Plus le noyau est perméable, plus l'inductance est élevée.

II.10 Calcul des inductances

Il existe plusieurs approximations différentes [8], telles que les expressions de Wheeler et Mohan et les expressions optimales [9]. Les résultats obtenus en appliquant différentes formules ne diffèrent pas de plus de 10%, quel que soit le système [10].

Mohan a développé une méthode pour calculer l'inductance (L) avec une bonne précision. Dans le cas de la géométrie, l'épaisseur du conducteur est une approximation négligeable par rapport à sa largeur et sa longueur. L'avantage de cette approche est qu'elle est facilement adaptable à d'autres formes géométriques (carrés, octogones et cercles) [11].

L'inductance d'une bobine hélicoïdale carrée plate est déterminée par L'approximation de la spirale et la densité de courant équivalente sont calculées selon l'équation (II.10) [12] :

$$L = \frac{c_1 \mu N^2 d_{avg}}{2} \left(\ln \left(\frac{c_2}{\rho} \right) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \tag{II.10}$$

Où n est le nombre de spires dans la bobine et μ_0 est la perméabilité Magnétique, C_1, C_2, C_3 et C_4 sont des coefficients de différentes dispositions géométriques forme de la bobine, dans la longueur de la bobine, d_{avg} est le diamètre moyen, ρ est le coefficient forme, qui passe de 0 à 1 lorsque tous les virages sont centrés autour du périmètre, lorsque tourne hélicoïdal vers le centre de la bobine.

Forme	C1	C2	C3	C3
Carrée	1.27	2.07	0.18	0.13
Hexagonal	1.09	2.23	0	0.17
Octogonal	1.07	2.29	0	0.2
Circulaire	1	2.46	0	0.2

Tableau I Paramètres pour différentes formes de bobines

Pour une bobine spirale carrée plane avec les différents valeurs de coefficients de la disposition géométrique de la forme carrée, l'inductance L peut être déterminée par [13]-[14] :

$$L = 0.5 \mu N^2 d_{avg} \left(\ln \left(\frac{c_1}{\rho} \right) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \tag{II.11}$$

$$d_{avg} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} \tag{II.12}$$

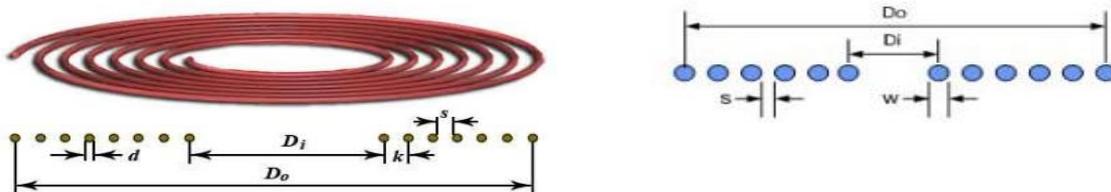


Fig.II.12 dimension de la bobine spirale

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 [12]:

$$L = \frac{a^2 N^2}{8a + 11c} \quad (\text{II.13})$$

Où «N» est le nombre de tours. Les paramètres c et a peuvent être donnés [12]:

$$c = \frac{D_{\text{out}} - D_{\text{in}}}{2} \quad (\text{II.14})$$

$$a = \frac{D_{\text{out}} - c}{2} = \frac{D_{\text{out}} + D_{\text{in}}}{4} \quad (\text{II.15})$$

$$D_{\text{out}} = D_{\text{in}} - (p + w)N \quad (\text{II.16})$$

II.11 Résistances des bobines

Pour estimer la résistance parasite totale en courant continu R_{dc} de l'inducteur, il convient d'estimer les facteurs suivants : résistivité du matériau conducteur ρ , longueur de la conducteur l_c , l'épaisseur de conducteur t_c et la largeur de conducteur w La résistance de la bobine R_{dc} est calculée à partir de l'équation [16]:

$$R_{\text{dc}} = \rho \frac{l_c}{wt_c} \quad (\text{II.17})$$

Où t_c est l'épaisseur du cuivre, ρ est la résistivité du cuivre. l_c la longueur de la bobine, calculée à partir de l'équation [16]

$$l = 4n(D_{\text{out}} - (n - 1)s - nw)s \quad (\text{II.18})$$

L'effet de peau augmentera la résistance AC de la bobine à des fréquences plus élevées et doit être pris en compte. Considérant l'effet de peau, la résistance série équivalente, R_s , est donnée par l'équation (II-16) :

$$R_s = R_s \frac{t_c}{\sigma(1 - e^{-\frac{t_c}{\delta}})} \quad (\text{II.19})$$

Où δ est la profondeur de peau.

Bobine multicouche

Une formule de calcul approché dans le cas d'une bobine massée ou multicouches [17] :

$$L = \frac{10 \pi N^2 R_1^2}{6 R_1 + 9l + 10(R_2 - R_1)} \quad (\text{II.20})$$

Où L est l'inductance en Henry, et N est le nombre total de spire, R_1 est le rayon intérieur (m), et R_2 est le rayon extérieur du bobinage (m), et l est la longueur du bobinage (m), $R_2 - R_1$ est l'épaisseur du bobinage.

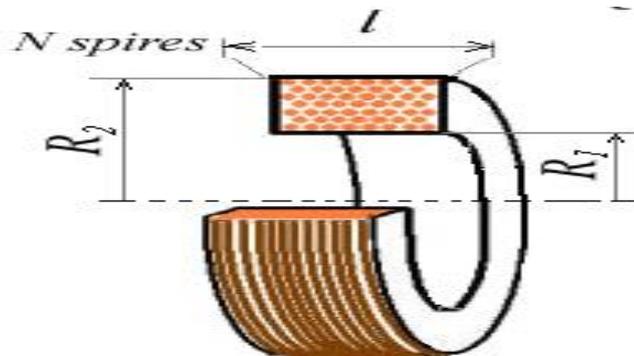


Fig.II.13 Bobine massée ou multicouches

II.12 Principe de fonctionnement d'un lien inductif

Le comportement d'un lien inductif comprenant un circuit primaire et un circuit secondaire peut être traité à deux niveaux d'abstraction différents : une description des champs électromagnétiques et une description au niveau circuit. La description électromagnétique est basée sur la géométrie et la composition physique des éléments de liaison, mais elle ne donne pas l'information directe sur la

façon dont les signaux électriques se propagent dans le lien de transfert de puissance. Aussi description au niveau circuit peut être utilisée pour déduire les caractéristiques du lien, mais les paramètres clefs, c'est-à-dire les éléments composant du circuit. Cette extraction de paramètres n'est pas toujours une tâche facile due à la complexité des équations découlant de différentes formes géométriques. Pour ce faire nous allons présenter une méthode analytique qui permet de calculer ces paramètres électriques dans le cas de deux bobines couplées entre eux et situées arbitrairement dans l'espace [18].

Modèle électromagnétique

Considérant deux spires couplées entre eux. La première spire notée l_p de rayon R_p et de centre $O(0,0,0)$. La deuxième spire notée l_s de rayon R_s et de centre $c(x_c, y_c, z_c = d)$. La formule de la mutuelle inductance entre deux spires situées arbitrairement dans l'espace est donnée par [24]:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{c1}^{r1} \int_{c2}^{r2} \frac{dS' \cdot dS}{r_{12}} \tag{II.21}$$

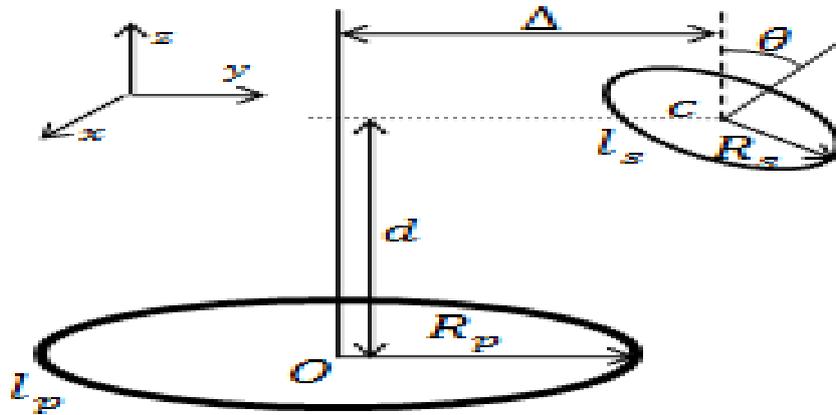


Fig.II.14 Lien inductif entre deux spires

$$M(r_1, r_2, d, \theta, \Delta) = \frac{\mu_0}{\pi} \sqrt{r_2 r_1} \int_0^\pi \frac{(\cos(\theta) - \frac{\Delta}{r_2} \cos(\phi)) \psi(k)}{\sqrt{V^3}} d\phi \tag{II.22}$$

$$V = \sqrt{1 - \cos^2(\phi) \sin^2(\theta) - 2 \frac{\Delta}{r_2} \cos(\phi) \cos(\theta) + \frac{\Delta^2}{r_2^2}} \tag{II.23}$$

$$k = \frac{4\alpha V}{(1 + \alpha V)^2 + \xi^2} \tag{II.24}$$

$$\xi = \beta - \alpha \cos(\phi) \sin(\theta), \alpha = \frac{r_2}{r_1}, \beta = \frac{d}{R_1} \tag{II.25}$$

$$\psi(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) = Q_{\frac{1}{2}}(x), x = \frac{2-k^2}{k^2} \tag{II.26}$$

Où dS_1 et dS_2 sont les éléments de parcourt situé respectivement à la position P_1 et la position P_2 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. μ_0 est la perméabilité magnétique du vide. $K(k)$ 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 :

$$M_{ps} = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_s} M(R_{p_i}, R_{s_j}, \Delta, d, \theta) \tag{II.27}$$

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.

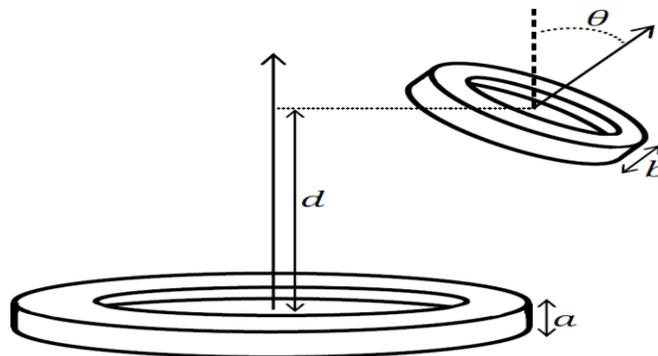


Fig.II.15 Deux bobines toriques de sections rectangulaires couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial).

Dans un excellent article, S. BABIC et all [19] ont développé une méthode analytique qui permet de calculer la mutuelle inductance entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

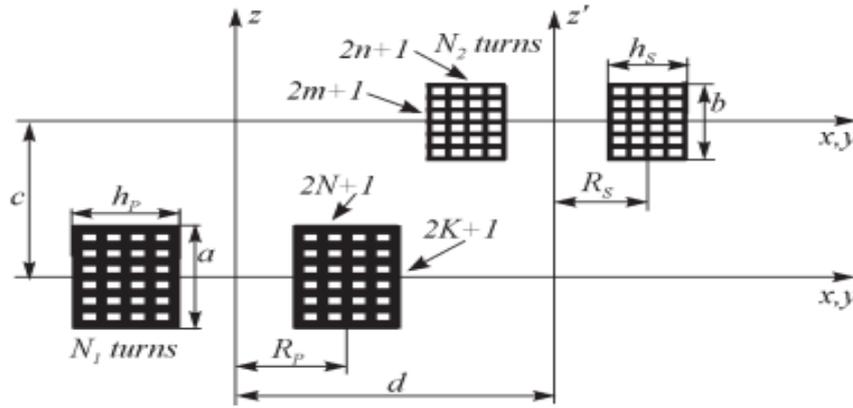


Fig.II.16 Section rectangulaire de bobine torique divisée en éléments dont chacun est équivalent à une spire élémentaire [24].

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 [20]:

$$M_{l_p l_s} = \frac{N_1 N_2 \sum_{g=-K}^{g=K} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{p=-m}^{p=m} \sum_{l=-n}^{l=n} M(g,h,p,l)}{(2K+1)(2N+1)(2m+1)(2n+1)} \quad (II.28)$$

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.

$$M(g, h, p, l) = \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{R_p(g, h)R_s(l, p)} \left[\left(1 - \frac{q^2}{2}\right) K(q) - E(q) \right] \quad (\text{II.29})$$

$$q^2(g, h, l, p) = \frac{4R_s(l, p)R_p(g, h)}{(R_p(g, h) + R_s(l, p))^2 + z^2(g, p)} \quad (\text{II.30})$$

$$R_p(g, h) = R_p + \frac{h_p}{(2N+1)} h, h = -N, \dots, N \quad (\text{II.31})$$

$$R_s(l, p) = R_s + \frac{h_s}{(2n+1)} l, l = -n, \dots, n \quad (\text{II.32})$$

$$z(g, p) = c + \frac{a}{(2K+1)} g + \frac{b}{(2m+1)} p, g = -K, \dots, K, p = -m, \dots, m \quad (\text{II.33})$$

Dans la suite nous allons étudier un système de transfert d'énergie composé de bobines plates identiques et accordées à la même fréquence de résonance f_0 . Pour ce faire, nous avons conçus et réalisé quatre bobines spirales. Nous avons également choisi de travailler à la fréquence de résonance $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

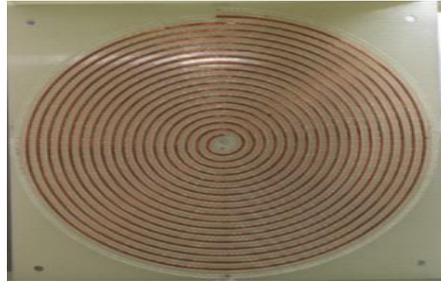


Fig.17 Bobine plate composée de 17 spires.

II.13 Coefficient de couplage magnétique

Le coefficient de couplage magnétique se définit simplement par :

$$K = M / \sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{II.34})$$

Il apparaît comme le rapport de l'inductance mutuelle à la moyenne géométrique des self inductances. 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.

II.14 Modèle électrique équivalent du système de transfert d'énergie

Principe charge par induction

Le phénomène d'induction s'observe en particulier dans un circuit électrique sollicité par un champ magnétique variable. Ce champ peut être produit par le circuit électrique lui-même : on parle alors d'auto-induction. Les coefficients d'auto-induction L_1 et L_2 permettent d'expliciter les termes d'induction propre relatifs à chacun des deux bobinages. L'interaction entre les deux bobinages introduit un terme d'induction mutuelle, de coefficient M .

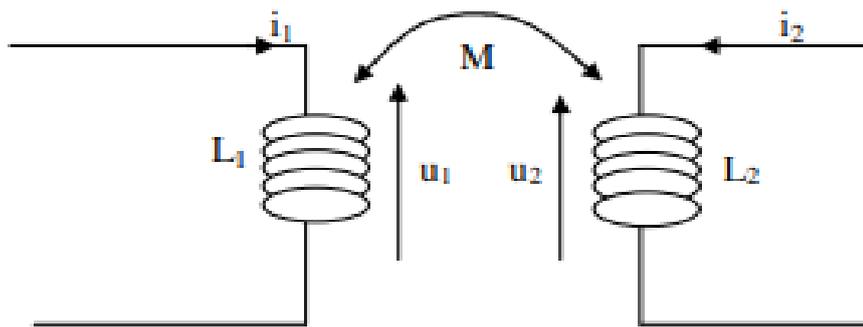


Fig.II.18 représentation en convention récepteur

Les phénomènes inductifs amènent des tensions u_1 et u_2 aux bornes de chaque bobine d'expressions respectives :

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (\text{II.36})$$

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).

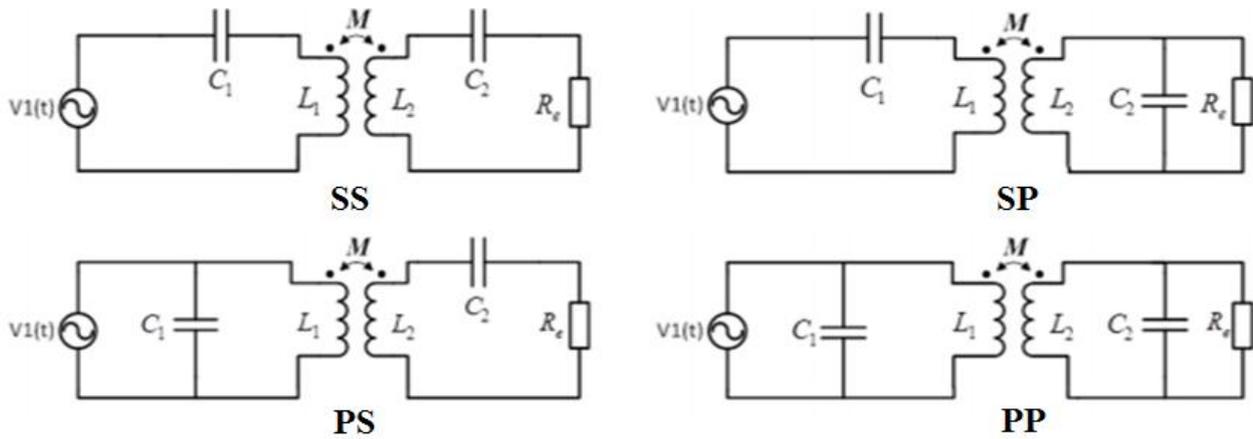


Fig.II.19 Topologies de résonance: a) SS b) SP c) PS and d) PP

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

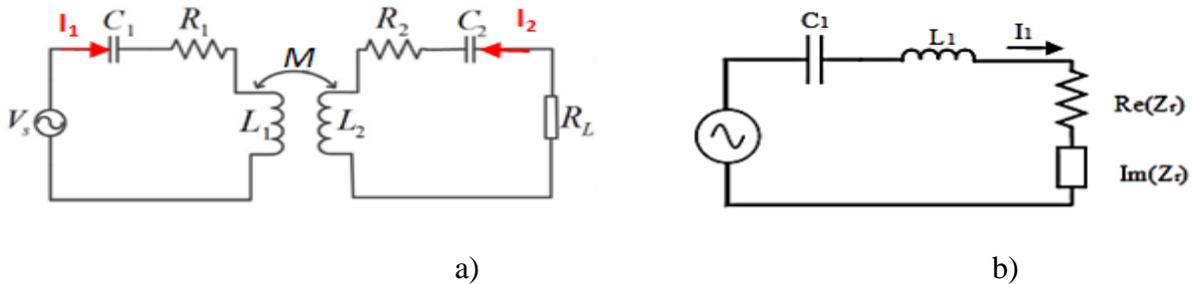


Fig.II.20 Le modèle de couplage : (a) série-série (SS) et (b) leur Circuit équivalent vu du côté primaire.

Lorsque le système fonctionne à ω_0 , les équations de tension pour peuvent être exprimées sous forme:

$$V_s = Z_1 I_1 + Z_m I_2 \tag{II.37}$$

$$0 = (Z_2 + R_L) I_2 + Z_m I_1 \tag{II.38}$$

Et

$$Z_1 = R_1 + j\omega_0 L_1 + \frac{1}{j\omega_0 C_1} \tag{II.39}$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega_0 L_2 + \frac{1}{j\omega_0 C_2} + R_L \quad (\text{II.40})$$

$$Z_m = j\omega_0 M \quad (\text{II.41})$$

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

$$Z_{in} = Z_1 + Z_r = Z_1 + \frac{Z_m^2}{(Z_2 + R_L)} \quad (\text{II.42})$$

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

$$Z_r = \frac{V_{12}}{I_1} = \frac{Z_m^2}{(Z_2 + R_L)} \quad (\text{II.43})$$

Sachant que la puissance transférée du secondaire au primaire est :

$$P_{in} = |I_1|^2 \operatorname{Re}(Z_{in}) \quad (\text{II.44})$$

On constate que l'impédance réfléchiée 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 :

$$P_{out} = |I_2|^2 R_L \quad (\text{II.45})$$

Le rendement global de la transmission est alors :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left| \frac{Z_m}{(Z_2 + R_L)} \right|^2 \frac{R_L}{\operatorname{Re}(Z_{in})} \quad (\text{II.46})$$

Où η le rendement 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]:

$$R_L = \sqrt{\frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_1} + R_2^2} \quad (\text{II.47})$$

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

$$\frac{d\eta(R_L)}{dR_L} = 0 \quad (\text{II.48})$$

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 :

$$Q_{1,2} \approx \frac{\omega_0 L_{1,2}}{R_{1,2}} \quad (\text{II.49})$$

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:

$$Q = \sqrt{Q_2 Q_1} \quad (\text{II.50})$$

L'efficacité de transfert maximale est définie selon Sun et al. par [2]-[3]-[4]:

$$\eta_{\max} = \frac{(kQ)^2}{(1 + \sqrt{(kQ)^2 + 1})^2} \quad (\text{II.51})$$

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

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle analytique permettant d'évaluer avec précision les paramètres électriques et électromagnétiques ainsi que les performances en termes de rendement énergétique du lien inductif. A partir de ce modèle ainsi établi, nous avons pu déterminer les dimensions géométriques des bobines formant le lien. En effet, Ce modèle analytique peut être facilement adapté à d'autres types d'applications (véhicule électrique, robots, éléments de machines-outils et appareils domestiques portatifs).

Reference

- [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
- [8] A. HAMOUD. Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts. Université Montpellier, 2017.
- [7] M. IBRAHIM. Analyse d'Interopérabilité d'un Système de Recharge Sans Contact pour le Véhicule Electrique. UNIVERSITE PARIS-SUD.2015
- [8] M. HULIN, N. HULIN, D. PERRIN, Equation de Maxwell ondes électromagnétique, Dunod, France : 1991.
- [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
- [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 oeuvre 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 Genie 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.

Chapitre III



Chapitre III : Résultats et simulations

III .1 Introduction

L'efficacité du transfert d'énergie, la taille des bobines sont les caractéristiques la plus importantes à prendre en compte lors de la conception du système de transfert d'énergie sans fil pour transférer l'énergie à des dispositifs comme les véhicules ou les vélos électriques.

Dans ce chapitre, nous présenterons une analyse électrique sur un une seule bobine et puis l'analyse des effets des paramètres du circuit sur la performance du lien inductif résonant série-série.

Nous présenterons également l'effet du coefficient de couplage et la résistance de charge sur l'efficacité de transfert d'énergie. La simulation du circuit électrique du lien inductif résonant est exécutée par le logiciel MULTISIM.

III.2 Modélisation et simulation d'une inductance spirale

II.2.1 Influence des paramètres électriques sur la bobine spirale

Nous allons montrer l'influence des paramètres électriques ou géométrique sur le la bobine spirale. Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenues à l'aide des équations présentées au chapitre précédent. Le Tableau.III.1 illustre les caractéristiques géométriques de la bobine étudié. La valeur de la fréquence f qui varie entre 10 et 10^6 Hz.

Type	N	D _{out} (mm)	D _{in} (mm)	s (mm)	w (mm)
Bobine 1	[3 30]	300	200	[0 2.5]	[0.5 1.5]

Tableau.III.1 I Caractéristiques géométriques

III.2.2 Influence de la fréquence sur la valeur de la résistance

La Fig.III.1 représente la variation de la résistance en fonction de la fréquence. Nous remarquons que la résistance décroît de manière hyperbolique lorsque la fréquence augmente. L'effet de peau a pour conséquence une augmentation des pertes dans le conducteur aux hautes fréquences à cause du confinement du courant à la périphérie.

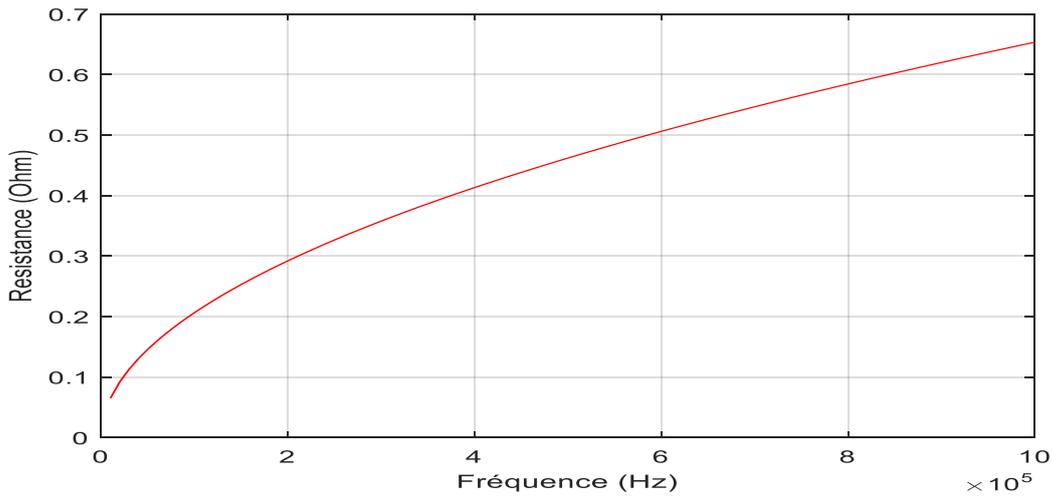


Fig.III.1 Variation de l'inductance série en fonction de la fréquence.

III.2.3 Pour différentes valeurs de l'espace inter spires « s »

La Fig.III.2 représente les valeurs de la résistance variant avec la fréquence et pour différentes valeurs de l'espace entre conducteur s. Ces s sont choisis de 0 à 2.5 mm. La largeur du conducteur (w=0.5 mm) et le nombre de tours sont constants (N=15). Nous pouvons déduire que :

- La diminution de l'espace inter-spires s en fonction de la fréquence provoque une augmentation de la résistance.
- L'espace a de répercussions sur la résistance. Nous pouvons conclure qu'une réduction de s va dans le sens de l'optimisation d'un composant inductif.

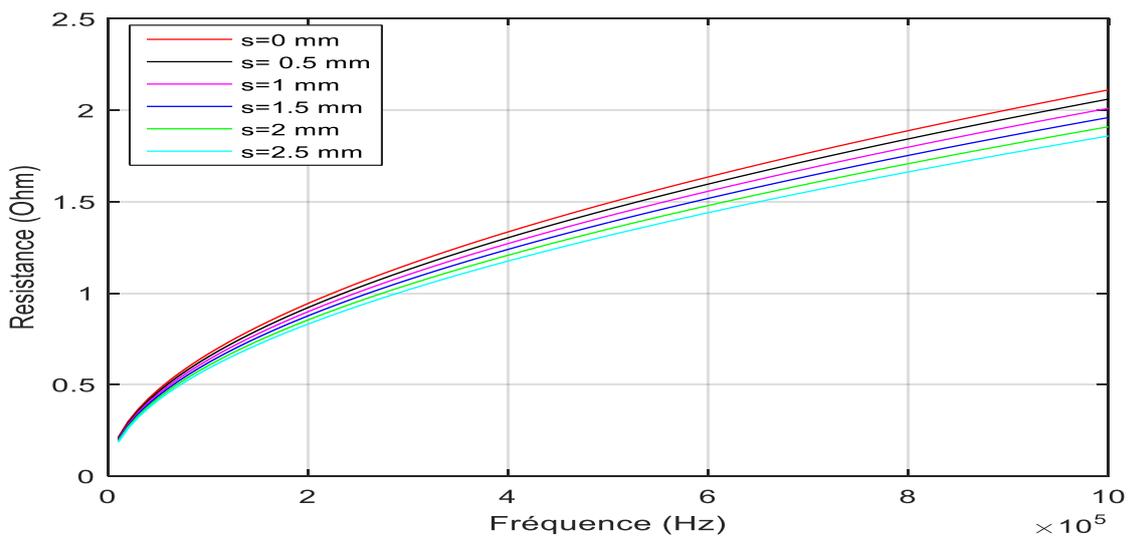


Fig.III.2 Variation de la résistance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de l'espace inter-spires

III.2.4 Pour différentes valeurs de la largeur du conducteur « w »

La Fig.III.3 représente les valeurs résistances variant avec la fréquence pour différentes valeurs de la largeur de conducteur w . Ces w sont choisis de 0.5 à 2.5 mm. L'espace inter-spires s et le nombre de tours n sont constants. Nous pouvons déduire que :

- La diminution de la largeur des conducteurs en fonction de la fréquence provoque une augmentation de la résistance

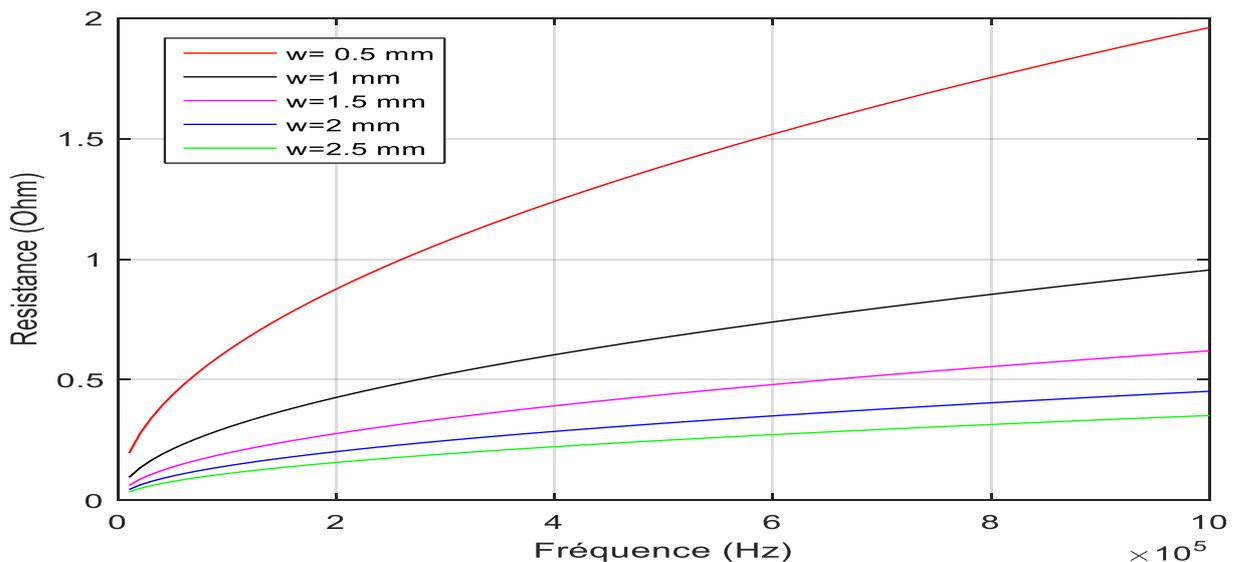


Fig.III.3 Variation de l'inductance série en fonction de la fréquence pour différentes largeurs du conducteur

III.2.5 Pour différentes valeurs du nombre de spires

La Fig.III.4 représente les valeurs de la résistance variant avec la fréquence et le nombre de spires n . Ces n sont choisis de 2 à 16 tours. L'espace inter-spires s et la largeur de conducteur w sont constants. Nous pouvons déduire que :

- L'augmentation de nombre de tours en fonction de la fréquence provoque une augmentation de la résistance. En outre, l'augmentation de nombre de tours provoque l'augmentation de la résistance série.

III.2.6 Influence des paramètres électriques et géométriques sur le facteur de qualité

La Fig.III.5 représente le facteur de qualité variant avec le nombre de spire. Au fur et à mesure de l'augmentation de la fréquence pour une même valeur de la largeur de conducteur, nous remarquons que pour une fréquence élevée, la valeur du facteur de qualité est élevée. Lorsque le nombre de tours augment, la valeur de facteur de qualité augmente.

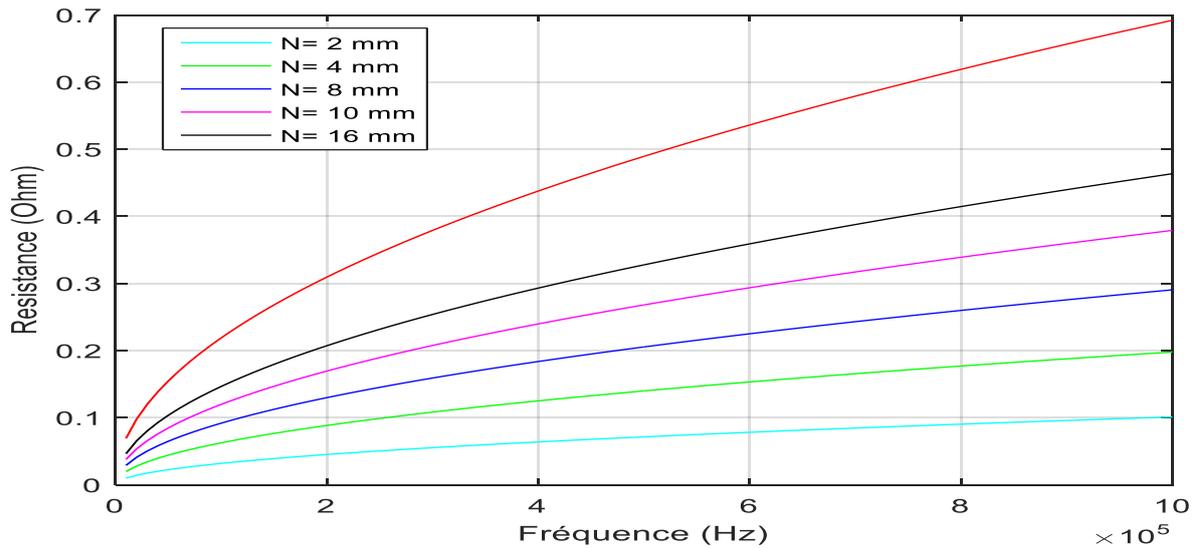


Fig.III.4 Variation de l'inductance série en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du nombre de spires (w=s=1.5 mm)

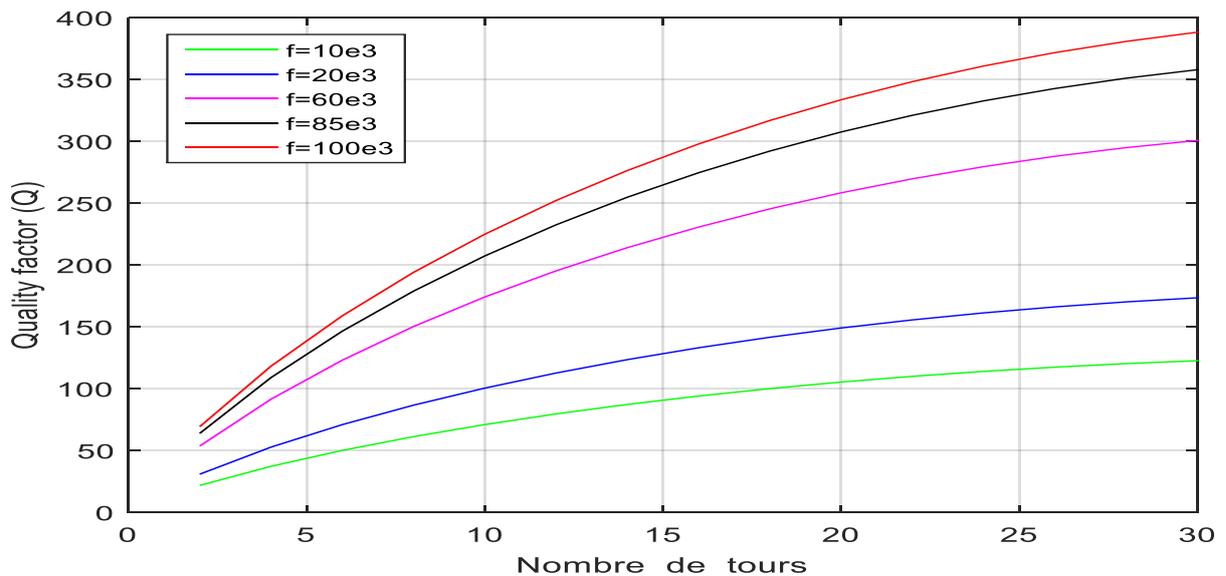


Fig.III.5 Variation du facteur de qualité en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs de la fréquence (w=s=1.5 mm)

III.2.7 étude de l'inductance d'une bobine en fonction du nombre de spires

Avant de réaliser le couplage inductif, nous avons effectué quelques calculs, d'inductance et de résistance interne en utilisant les équations du chapitre II. Les résultats sont présentés dans les tableaux Tableau.III.2 et Tableau.III.3. Ces tableaux montrent l'effet de nombre de spire et diamètre du fil sur la valeur de l'inductance.

Nombre de spires	5	10	20	25	30	35
Inductance de la Bobine (μH)	18.208	56.945	157.93	209.38	256.62	297.24

Tableau.III.2 Valeur théorique de l'inductance d'une bobine de 600 mm de diamètre en fonction du nombre de spires

Rayon du fil	Nombre de spires						
	5	10	15	20	25	30	35
0.1	0.0731	0.1421	0.2072	0.2682	0.3252	0.3783	0.4273
0.3	0.0729	0.1411	0.2049	0.2642	0.3190	0.3692	0.4150
0.5	0.0726	0.1401	0.2027	0.2602	0.3127	0.3602	0.4028
1	0.0720	0.1376	0.1970	0.2502	0.2971	0.3377	0.3721
1.5	0.0714	0.1351	0.1914	0.2402	0.2815	0.3152	0.3415
2	0.0707	0.1326	0.1858	0.2302	0.2658	0.2927	0.3108
2.5	0.0701	0.1301	0.1802	0.2202	0.2502	0.2702	0.2802

Tableau.III.3 Valeur théorique de la résistance interne d'une bobine de 600 mm de diamètre en fonction des spires et de la section du fil

La bobine optimale est celle avec la plus grande valeur d'inductance et la plus petite résistance interne. L'idéal aurait été donc de choisir une bobine avec 35 spires de 2.5 mm de diamètre de fil.

III.3 Modélisation et simulation d'un lien inductif

Dans cette partie, nous présentons les paramètres utilisées pour l'étude menée dans la section prochaine. Le Tableau.III.4 illustre les caractéristiques géométriques du lien inductif étudié qui est composé d'une bobine émettrice et réceptrice, dont les valeurs de rayon des bobines et le nombre de spire comme suite :

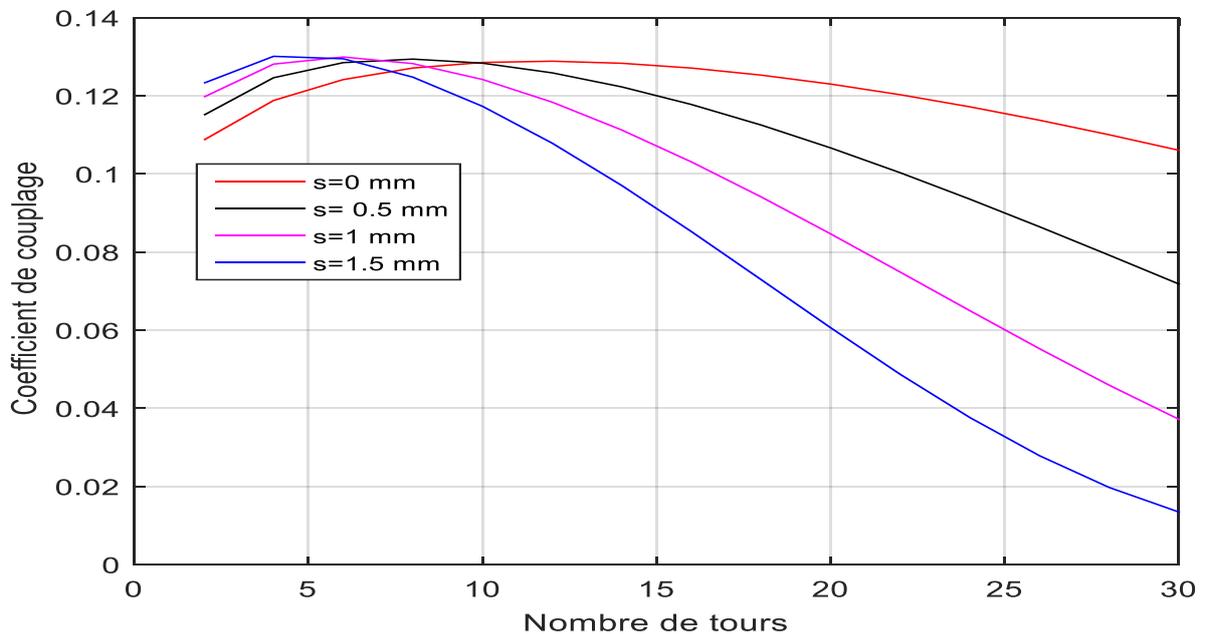
Type	N	D _{out} (mm)	D _{in} (mm)	s (mm)	w (mm)
Bobine 1	[2 30]	300	120	[0 2.5]	[0.5 1.5]
Bobine 2	[2 30]	300	120	[0 2.5]	[0.5 1.5]

Tableau.III.4 Caractéristiques géométriques

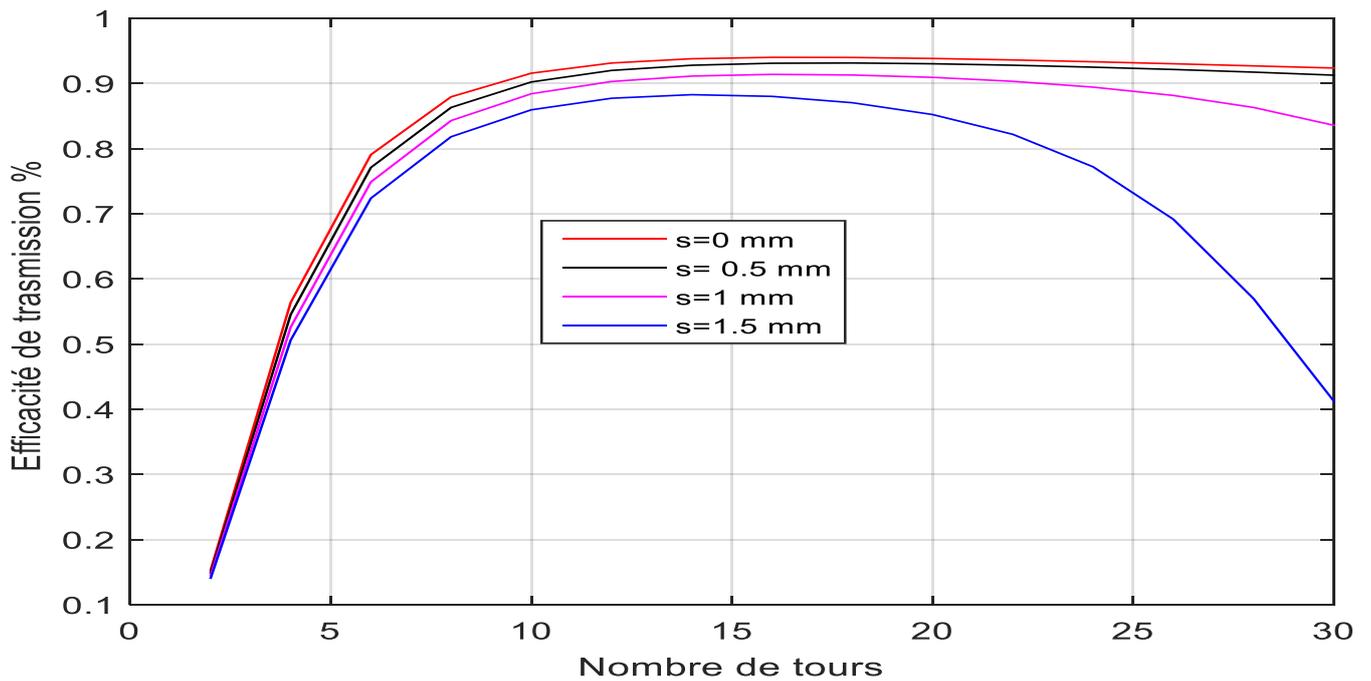
Dans cette section, nous avons présenté une analyse électrique d’un circuit série–série du système de transfert d’énergie sans fil par lien inductif résonant afin de faire fonctionner le dispositif avec une fréquence de résonance égale à 85kHz.

III.3.1 Influence de nombre de tours pour différentes valeur de l’espace inter spire

La Fig.III.6 représente la variation du coefficient de couplage en fonction de nombre de tours pour différentes valeurs de l’espace inter spire. Nous remarquons que l’augmentation les nombres de tours entraîne une diminution de la valeur du coefficient de couplage. Et aussi, l’augmentation l’espace inter spire entraîne une réduction de la valeur du coefficient de couplage.



La Fig.III.6 Variation du coefficient de couplage en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs de l’inter–spire



La Fig.III.7 Variation de l'efficacité en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs de l'inter -spire.

La Fig.III.7 présent la variation de l'efficacité de transfert d'énergie en fonction nombre de tours pour différentes valeurs de l'inter -spire. Par exemple, on peut observer que de l'efficacité de transfert d'énergie atteint son maximum à nombre de tours 15 à s=1.5 mm.

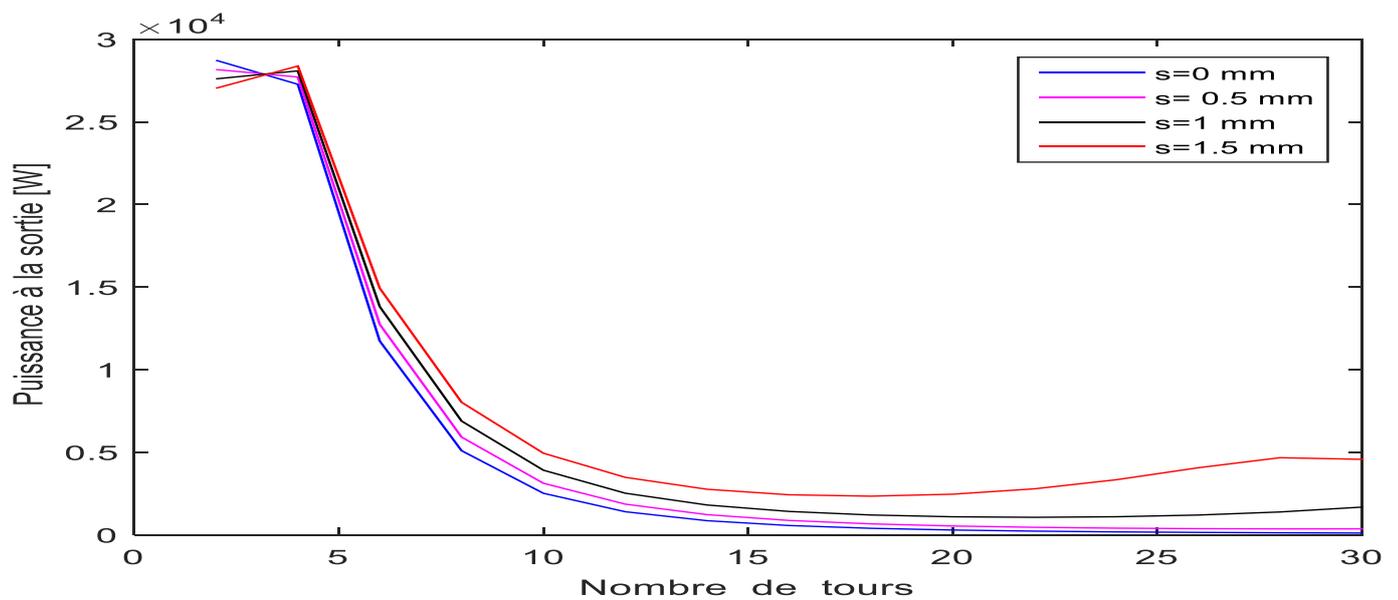


Fig.III.8 Puissance de sortie en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs du coefficient de couplage K (w=1 mm)

La Fig.III.8 illustre la variation de la puissance de sortie du système en fonction du nombre de tours pour différentes valeurs de l'inter-spire « s ». On peut observer que l'énergie de sortie reçue atteint son maximum à des nombre de tours qui varie de 3 et 6.

III.3.2 Influence de la résistance de charge pour différentes valeur de l'espace inter spire

Un autre facteur, qui affecte directement sur l'efficacité de transfert d'énergie totale, est la résistance de charge, qui joue un rôle important dans l'efficacité du transfert d'énergie par lien inductif.

La Fig.III.9 illustre la variation de l'efficacité du système en fonction de nombre de tours pour différentes valeurs du « s ». La résonance du circuit ($f=85$ kHz) l'efficacité est maximale. Ainsi, pour la diminution de la résistance de charge R_c le circuit atteint une puissance de sortie est plus élevée. Pour vérifier l'effet de la variation de la résistance de charge sur l'efficacité de transfert d'énergie, nous avons tracé en maintenant la variation de l'efficacité du système en fonction de la charge qui varie entre 2Ω et 60Ω .

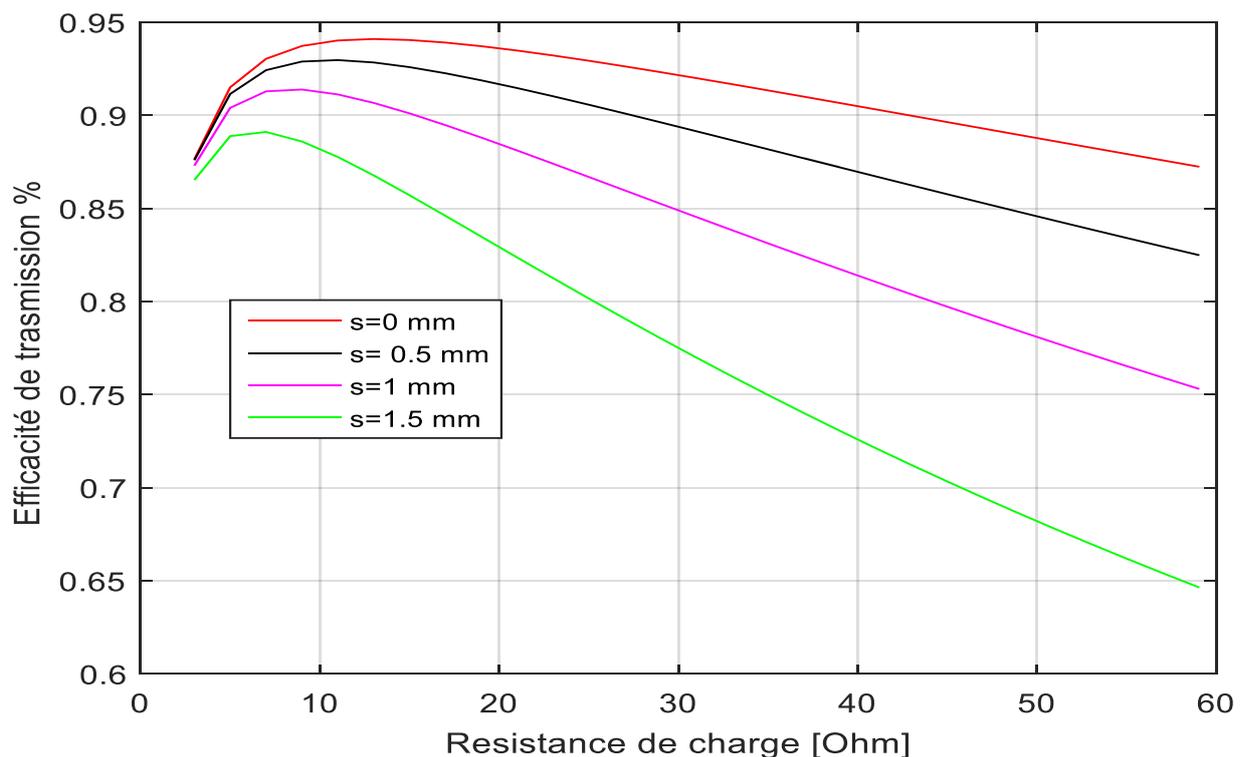
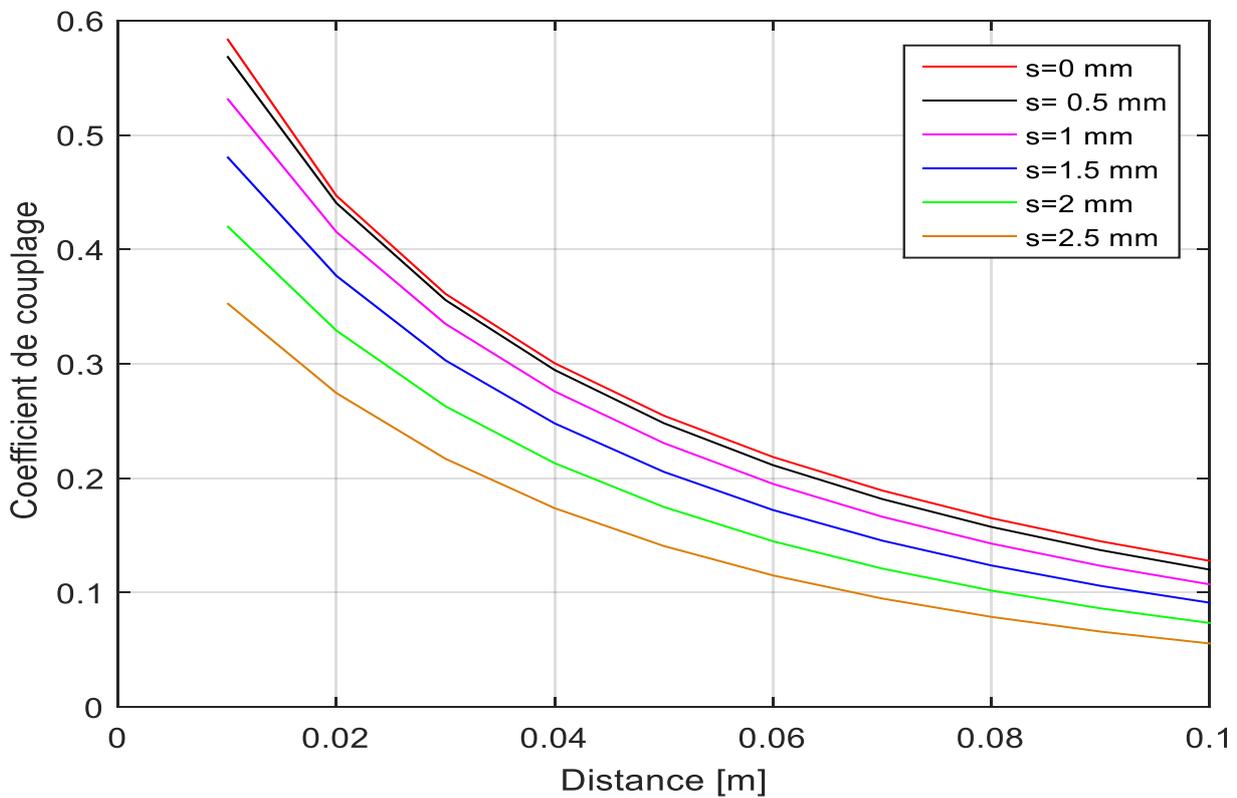


Fig.III.9 Efficacité de transmission en fonction de la résistance de charge pour différentes valeurs de l'inter-spire ($N=15$, $w=1$ mm)

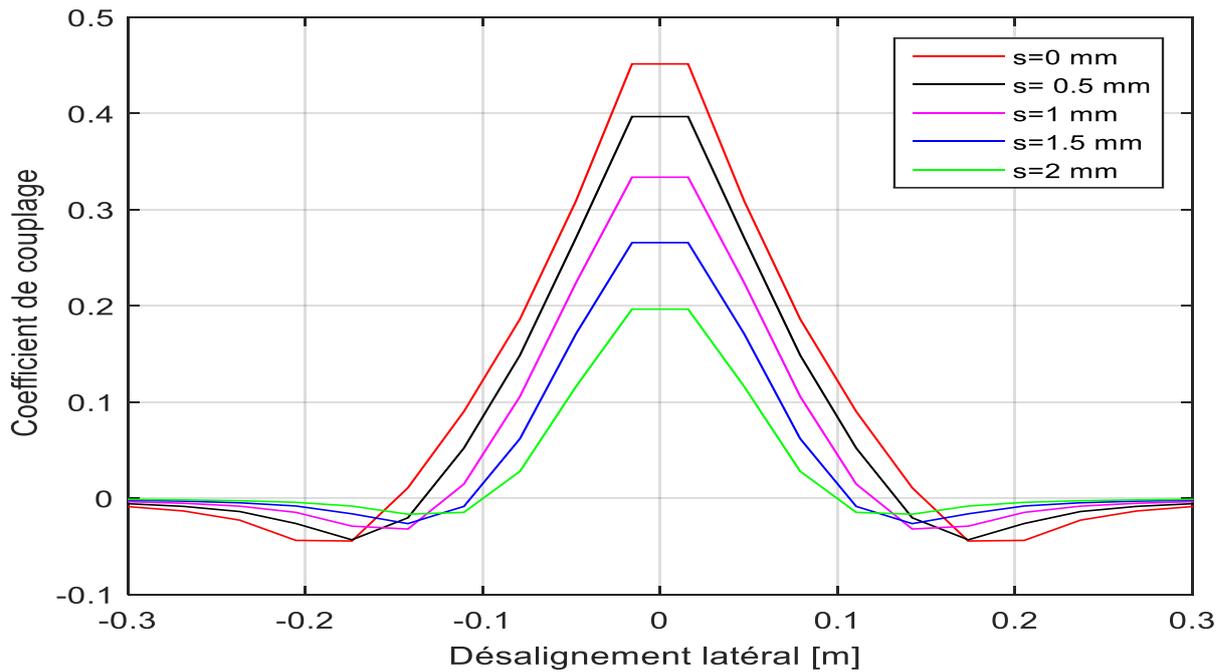
Dans les résultats ci-dessus, nous avons présenté l'influence des paramètres géométriques des bobines extérieure et l'implantée tel que les diamètres extérieur et intérieur des bobines, le nombre de spire et la distance entre les bobines sur différents paramètres du lien inductif tel que : le coefficient de couplage, l'inductance mutuelle et l'efficacité du transfert d'énergie.

III.3.3 Coefficient de couplage en fonction de la distance

La Fig.III.10 montre l'effet du facteur de couplage pour un arrangement proposé de bobines plates, avec un diamètre de 600 mm. Cette figure montre le facteur de couplage calculé pour des bobines placées parallèlement mais décalées horizontalement l'une de l'autre.



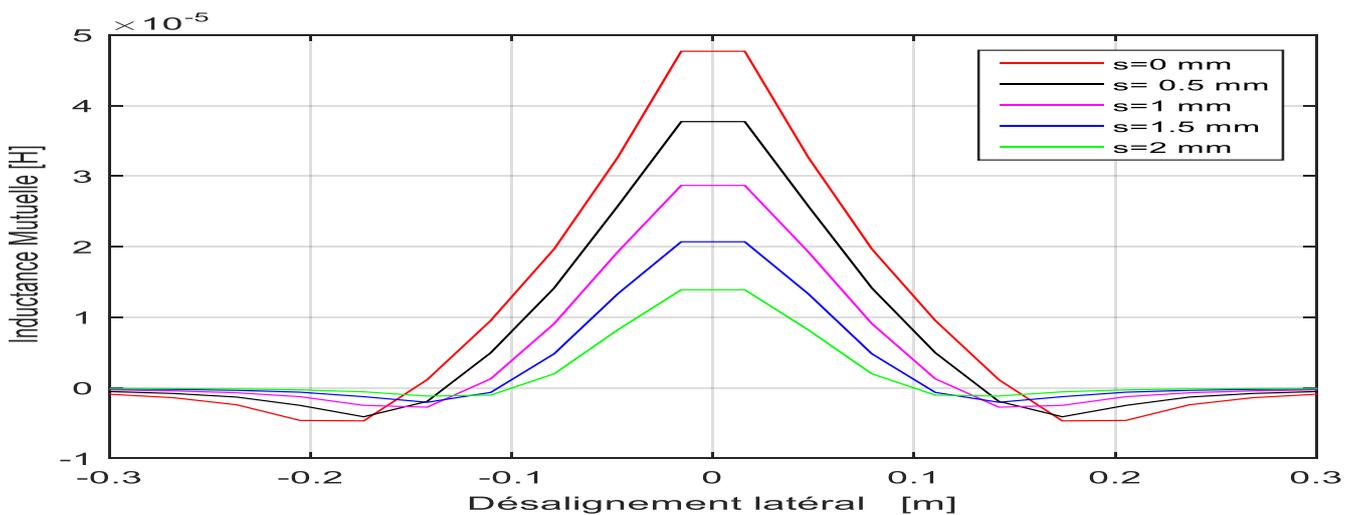
La Fig.III.10 Variation du coefficient de couplage en fonction de la Distance entre bobine pour différentes valeurs de l'inter-spire (N=15, w=2.5 mm)



La Fig.III.11 coefficient de couplage en fonction du désalignement (w=2.5 mm , N=15)

III.3.4 inductance mutuelle et coefficient de couplage en fonction du désalignement latéral

On a trouvé que le désalignement latéral diminue peu l'efficacité de transmission, montrés dans la Fig.III.11, et le désalignement latéral montré dans la figure 1.14 dans un rayon équivalent à celui du résonateur a peu d'influence sur l'efficacité de transmission. la transmission de puissance antennes à fort gain est très sensible au désalignement angulaire et au désalignement latéral en raison de la directivité élevé.



La Fig.III.12 Inductance Mutuelle en fonction du désalignement (w=2.5 mm , N=15)

III.3.5 Etude du lien inductif par Multisim

Le modèle de transfert d'énergie sans fil par lien inductif résonant, décrit précédemment, est appliqué en choisissant des paramètres donnés par les résultats ci-dessus. Le tableau.III.5 représente les différentes valeurs des paramètres choisis après la réévaluation de tous les résultats. Le tableau présente les paramètres électriques de la bobine émettrice et la bobine réceptrice proposés après l'étude paramétrique.

Description	Value
Nombre de spire	15
Rayon de fil	0.5 mm
Espace inter-spire	0.5 mm
Rayon de la bobine	300 mm
Inductance secondaire, primaire	154.76 μ H
Résistance primaire, secondaire	Ω
Capacité primaire, secondaire	0.022654 μ F
Résistance de charge	5 Ω
Coefficient de couplage	0.1278
Fréquence de résonance	85 kHz
Inductance mutuelle	19.780 μ H
Distance mutuelle	100 mm
Tension de source	100 V

Tableau.III.5 Paramètres et valeurs choisis
de lien inductif.

Des simulations à base de MULTISIM sont proposées afin d'éclaircir et de prouver le fonctionnement de notre modèle du lien inductif résonant. En utilisant la simulation par le logiciel MULTISIM, nous avons évalué l'efficacité de transfert d'énergie pour certaines valeurs de coefficient de couplage et la résistance de charge.

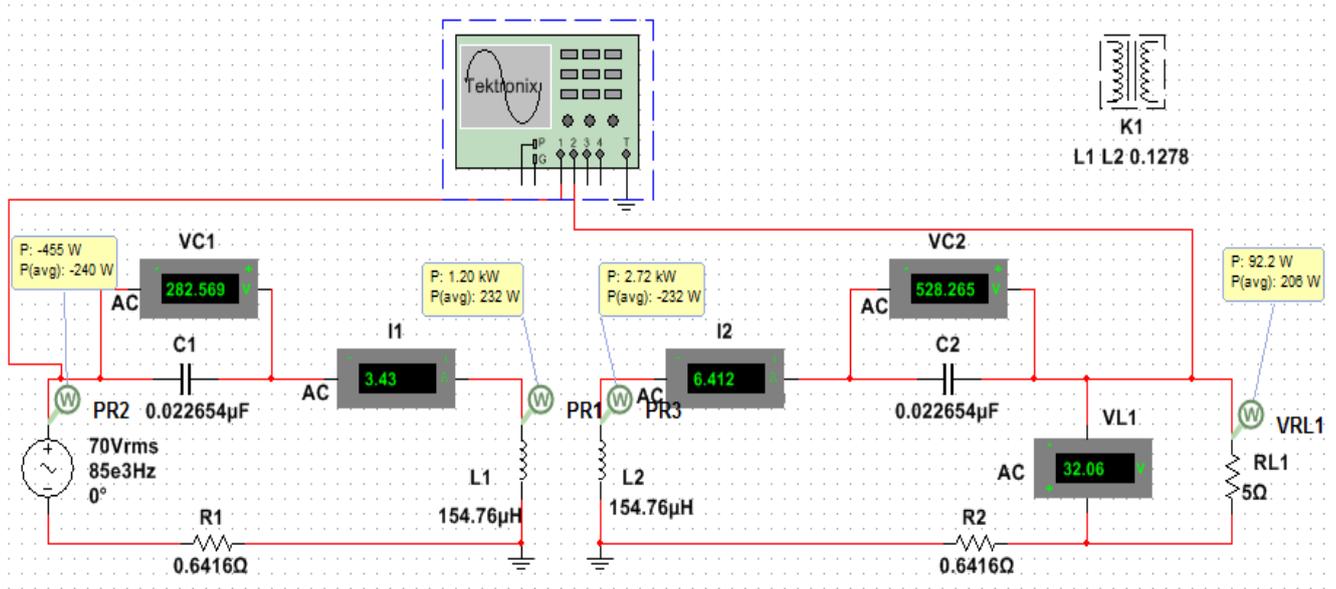


Fig.III.13 Circuit de lien inductif résonant

Nous pouvons en conclure que lorsque les données citées dans le Tableau.III.5 sont prendre en considération, le lien inductif permet d'atteindre une puissance de sortie de 206 W.

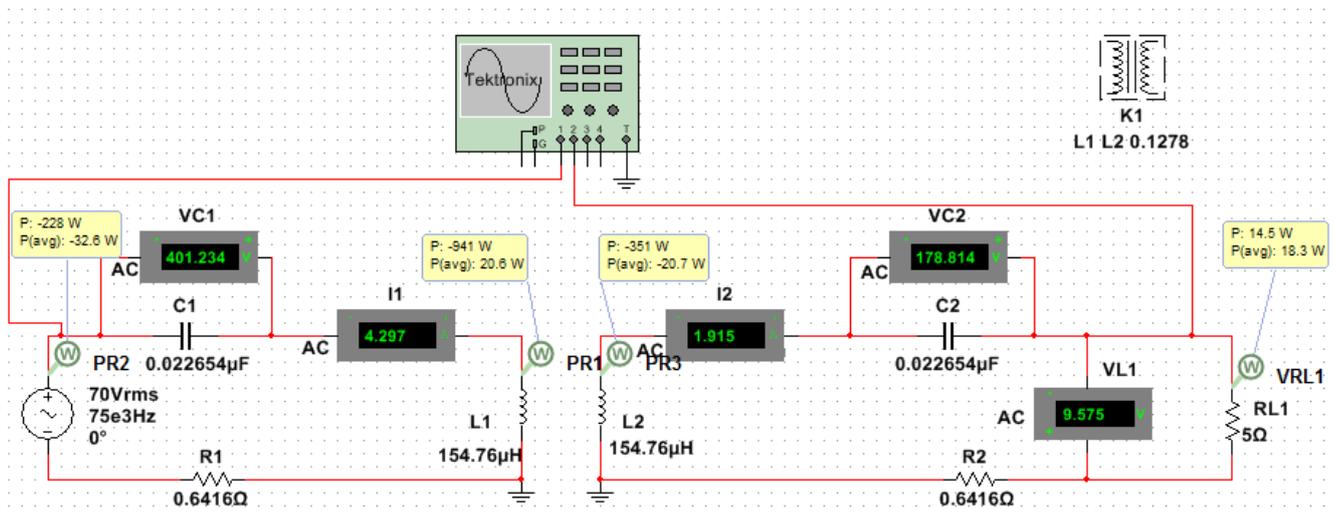


Fig.III.14 Effet de la fréquence sur le lien inductif résonant $f=75\text{kHz}$

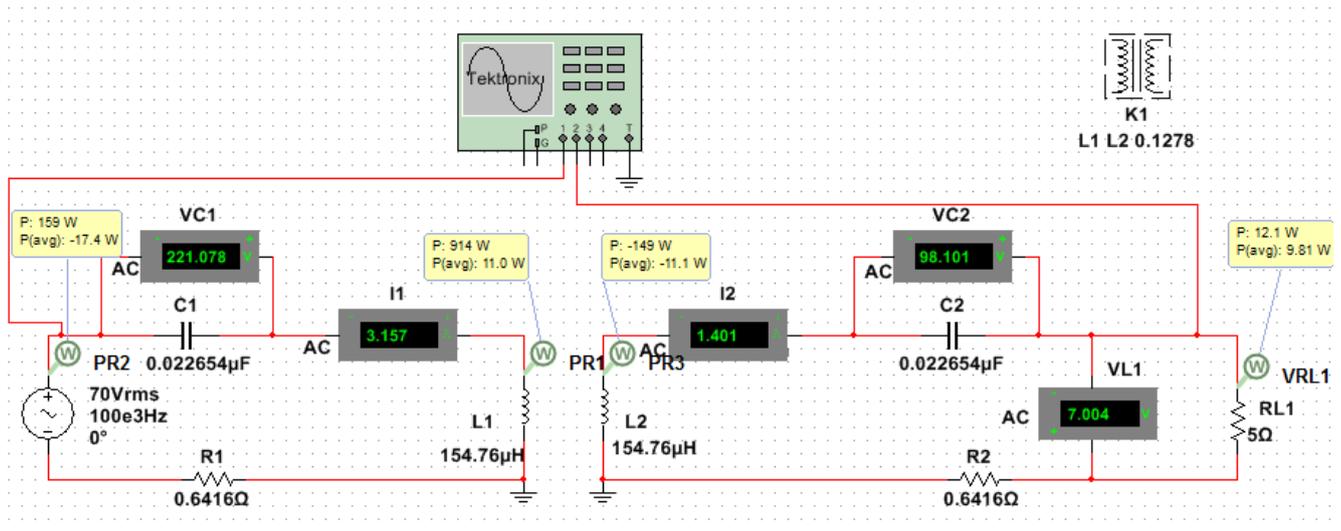


Fig.III.15 Effet de la fréquence sur le lien inductif résonant $f=100\text{kHz}$

II.4 Conclusion

Dans cette chapitre, nous présentons l'influence des paramètres géométriques et électriques des bobines tel que la distance inter-spire, le rayon de spire, le nombre de spire et la distance entre les bobines sur différents paramètres du lien inductif tel que : le coefficient de couplage, l'inductance mutuelle et l'efficacité du transfert d'énergie. On constate que la variation de ces paramètres vont influe sur le lien inductif.

Conclusion générale

La modélisation d'un système de transfert d'énergie sans contact est cruciale pour l'évaluation et l'optimisation des performances. 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. L'objectif principal de ce projet de fin d'étude est de proposer un système de transfert d'énergie sans fil qui transmettra une énergie adéquate aux dispositifs de charge. Dans cette recherche, nous nous sommes intéressés l'utilisation d'une technique de transfert d'énergie sans fil basée sur le couplage inductif par résonance magnétique.

Dans cette manuscrite, le travail est orienté vers la modélisation et l'optimisation des bobines spirales dans un système de transfert d'énergie sans fil, notre premier objectif est de proposer un méthode de conception analytique d'un lien inductif basé sur des bobines spirales qui nous donnent les gradeurs globales de transfert sans contact telle que coefficient de couplage, le facteur de qualité et l'efficacité de transfert et pour le deuxième objectif était la conception paramétrique basés sur les paramètres de la bobine spirale tell que le nombre de spires, l'inter-spire, diamètre de fil permettant d'améliore ainsi le transfert d'énergie sans fil. Le calcul est basé sur la formule de Neumann. Babic et al, ont travaillé sur ce problème, et ils ont réussi à résoudre le calcul en publiant les premières expressions analytiques en 3D en 2010. 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. Grace ces relations, nous avons optimisées des paramètres géométriques de la bobine spirale. Les objectifs d'optimisation consistent à trouver les parametre les plus inflente sur le comportement du transfert d'énergie sans contact.

Résumé

Dans cette mémoire, le travail est orienté vers la modélisation et l'optimisation des bobines hélicoïdales dans les systèmes de transfert d'énergie sans fil, et notre premier objectif est de proposer une méthode de conception analytique pour les liens inductifs à base de bobines hélicoïdales, nous fournissant ainsi une approche globale sans contact. Coefficient de couplage de transmission, facteur de qualité et efficacité de transmission et autres indicateurs hiérarchiques, Le deuxième objectif est de connaître les éléments affectant la transmission d'énergie sans fil .

Abstract

In this manuscript, work is directed towards modeling and optimization of helical coils in wireless power transmission systems, and our first objective is to propose an analytical design method for inductive bonds based on helical coils. . transmission coupling coefficient, quality factor, transmission efficiency and other hierarchical indicators, the second purpose is to design a parametric based on the parameters of the helical coil.

ملخص

في هذه المخطوطة ، يتم توجيه العمل نحو نمذجة وتحسين الملفات الحلزونية في نظام نقل الطاقة اللاسلكي ، وهدفنا الأول هو اقتراح طريقة تصميم تحليلي للربط الاستقرائي على أساس الملفات اللولبية التي تعطينا النقل الثاني هو معرفة .الشامل لعدم الاتصال الدرجات مثل معامل الاقتران وعامل الجودة وكفاءة النقل الهدف العناصر المأثرة في نقل الطاقة ال لا سلكي
