

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Électrotechnique

N° ...../2023

## **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Electromecanique**

**SPECIALITE: Electromecanique**

## **Thème**

**Modélisation numérique et analytique du comportement  
magnétique d'un système de transmission d'énergie par couplage  
inductif dans l'environnement automobile**

**Présenté Par : Dechemi Mohammed Allaoua**

**Encadré Par : Mohdeb Naamane**

**Djoufelkit Aymen**

**Date de soutenance: 05..../...06..../2023.....**

### **Jury de Soutenance**

**Président :ISSAM BOUSBA**

**Grade .....**

**Univ MSB jijel**

**Encadreur : Mohdeb Naamane**

**Grade .....**

**Univ MSB jijel**

**Examineur 1:AMMAR BOULACEL**

**Grade .....**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2022 /2023**

# *Remerciement*

*Tout d'abord, nous remercions le grand Dieu qui nous a donné l'occasion de vivre cette journée et le remercions de nous avoir donné la force, le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*On tient à remercier notre encadreur Mr. «Mohdeb Naaman » pour ses conseils pertinents et éclairés, son aide était pour nous d'une importance capital dans la réalisation et à la réussite de ce travail.*

*Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.*

*On exprime nos profonds remerciements à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail ainsi qu'à tous les enseignants du département électromécanique.*

# *Dédicaces*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices,  
leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs  
prières tout au long de mes études,*

*A mes chers frères pour leurs encouragements  
permanents, et leur soutien moral,*

*A toute ma famille, mes amis et toute la  
promotion 2022/2023 'Electromecanique' pour  
leur soutien tout au long de mon parcours  
universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos  
vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien  
infaillible,*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Med Allaoua.*

# *Dédicaces*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices,  
leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs  
prières tout au long de mes études,*

*A mes chers frères pour leurs encouragements  
permanents, et leur soutien moral,*

*A toute ma famille, mes amis et toute la  
promotion 2022/2023 'Electromecanique' pour  
leur soutien tout au long de mon parcours  
universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos  
vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien  
infaillible,*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Aymen.*

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **CHAPITRE I:ETAT DE L'ART SUR LA TRANSMISSION DE PUISSANCE SANS FIL**

<b>I.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Histoire .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Couplage inductif et inductif resonant .....</b>	<b>4</b>
<b>I.4 les grandes innovations.....</b>	<b>5</b>
I.4.1 La transmission d'énergie sans fil par satellite solaire.....	5
I.4.2 La transmission d'électricité sans fil par micro-ondes.....	5
I.4.3 La transmission d'énergie sans fil par des faisceaux laser.....	5
<b>I.5 Les projets de recharge par induction.....</b>	<b>5</b>
<b>I.6 La recharge par induction pour une voiture.....</b>	<b>6</b>
I.6.1 Recharge statique .....	6
I.6.2 Recharge dynamique .....	8
<b>I.7 Les véhicules compatibles.....</b>	<b>11</b>
<b>I.8 Conclusion .....</b>	<b>11</b>

## **CHAPITRE II:MODELISATION DES COUPLEURS INDUCTIFS**

<b>II.1 introduction.....</b>	<b>12</b>
<b>II.2 coupleur magnetique.....</b>	<b>12</b>
<b>II.3 Coupleurs inductifs.....</b>	<b>13</b>
<b>II.4 Système d'alimentation sans fil.....</b>	<b>18</b>
II.4.1 Modélisation du couplage série-série et série-parallèle.....	18
<b>□ ÉVALUATION DU RENDEMENT .....</b>	<b>21</b>
<b>II.5 Modélisation du coupleur inductif.....</b>	<b>22</b>
II.5.1 Mutuelle inductance entre deux bobines .....	22
II.5.2 Prise en compte de la résonance.....	24

<b>II.6</b>	<b>conclusion.....</b>	<b>26</b>
<b>CHAPITRE III:APPLICATION ET RESULTATS .....</b>		<b>27</b>
<b>III.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>III.2</b>	<b>Données de l'application .....</b>	<b>27</b>
III.2.1	Caractéristiques géométriques et électromagnétiques.....	27
III.2.2	Schéma de l'étude .....	28
<b>III.3</b>	<b>Étude de l'influence DES différents paramètres géométriques ET PHYSIQUES sur le couplage inductif 28</b>	
III.3.1	Etude de l'influence du déplacement axial entre les deux bobines sur la mutuelle inductance et coefficient de couplage.....	28
III.3.2	Etude de l'influence du désalignement entre les deux bobines sur la mutuelle inductance et coefficient de couplage.....	30
III.3.3	Effet du désalignement et de la variation de l'entrefer sur le rendement.....	31
III.3.4	Effet de la résistance de charge $R_c$ sur l'efficacité énergétique du lien.....	32
III.3.5	Puissance et rendement en fonction de désalignement.....	32
<b>III.4</b>	<b>La zone morte de l'efficacité de transmission.....</b>	<b>33</b>
<b>III.5</b>	<b>Optimisation du couplage inductif.....</b>	<b>36</b>
<b>III.6</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>37</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>40</b>

# Listes des Figures

Figure I.1 Démonstration de système d'alimentation sans fil en allumant une ampoule située à deux mètres d'une source d'énergie .....	4
Figure I.2 Schéma fonctionnel générique d'un système par d'alimentation sans fil inductif .....	4
Figure I.3 Une ampoule alimentée sans fil induction, en 1910.....	4
Figure I.4 Schéma fonctionnel d'un système couplage inductif résonant .....	5
Figure I.5 Transfert de puissance pour les véhicules électriques .....	6
Figure I.6 La recharge du voiture électrique par induction .....	6
Figure I.7 La recharge du bus électrique par induction Les bobines situées .....	7
Figure I.8 Secondaire du système Primove développé par Bombardier, .....	7
Figure I.9 Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train [11].....	8
Figure I.10 Schéma de fonctionnement d'un tramway électrique de la technologie Primove...9	
Figure I.11 Un système de charge dynamique pour recharger les véhicules électrique .....	9
Figure I.12 Projet Serpentine : 'capsule' autonome alimenté sans contact.....	10
Figure I.13 Système DWPT développé par Renault-Supelec, source [16].....	10
Figure I.14 Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté .....	11
Figure II.1 Schéma inductif équivalent d'un coupleur à deux enroulements.....	12
Figure II.2 Inductance mutuelle décrivant l'interaction entre deux bobines [5] .....	13
Figure II.3 Règle de la main droite pour définir la direction du champ magnétique .....	14
Figure II.4 Deux bobines couplées entre eux et leur modèle électronique .....	16
Figure II.5 Facteur de couplage en fonction de la distance entre deux bobines [11] .....	17
Figure II.6 L'efficacité énergétique entre deux bobines [11] .....	17
Figure II.7 Représente le modèle électrique équivalent du système de transfert d'énergie....	18
Figure II.8 Le modèle de couplage (a) série-série (SS) et (b) série-parallèle (SP) et (c) leurcircuit équivalent vu du côté primaire [14].....	19
Figure II.9 Deux bobines toriques de sections rectangulaires couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial) [19]-[20].....	22
Figure II.10 Section rectangulaire de bobine torique divisée en $(2N + 1) \times (2K + 1)$ éléments dont chacun est équivalent à une spire élémentaire [19].....	23
Figure II.11 Le modèle de couplage : (a) série-série (SS) et (b) leur Circuit équivalent vu du côté primaire.....	24
Figure III.1 Schéma de l'étude sur le couplage magnétique avec les bobines alignées .....	28
Figure III.2 Coefficient de coulage en fonction de déplacement axial.....	29
Figure III.3 Inductance mutuelle en fonction de déplacement axial .....	29

Figure III.4 Coefficient de couplage en fonction de la distance entre les bobines et leur désalignement parallèle .....	29
Figure III.5 Inductance mutuelle en fonction de la distance entre les bobines et leur désalignement parallèle .....	29
Figure III.6 Évolution de l'efficacité de liaison en fonction du décalage selon Oy .....	30
Figure III.7 Évolution du facteur de couplage liaison en fonction du décalage selon Oy .....	30
Figure III.8 Évolution de l'efficacité de liaison en fonction du désalignement et l'entrefer	31
Figure III.9 Efficacité de transfert d'énergie en fonction de la en fonction.....	32
Figure III.10 Simulation du rendement en fonction du désalignement .....	33
Figure III.11 Simulation de la puissance de sortie en fonction du désalignement .....	33
Figure III.12 Identification de la bande morte d'efficacité de transmission ( $R_c=10$ ) .....	34
Figure III.13 Schéma d'illustration pour l'élimination du Région morte de l'efficacité de transmission : Rotation angulaire de la bobine réceptrice .....	34
Figure III.14 Elimination de la région morte de l'efficacité de transmission par rotation angulaire de la bobine réceptrice ( $\beta= 82^\circ$ ).....	35
Figure III.15 Évolution de la puissance transmissible et l'efficacité de transmission pour différents largeur des bobines .....	36
Figure III.16 Évolution de l'inductance mutuelle et le coefficient de couplage pour différents largeur des bobines .....	37

## Liste des Tableaux

Tableau III.1 Caractéristiques géométriques du système .....	27
Tableau III.2 Paramètres électriques de circuit émetteur et le circuit récepteur proposés.....	28

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'électricité sans fil est un rêve aussi vieux que l'électricité elle-même. La mise au point de la première technique de transmission d'énergie sans fil (TESF) – la technique d'induction – remonte au XIXe siècle. 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. On ne parle pas ici de recharger à faible distance, mais de transmettre l'électricité sur de longues distances, afin de se passer des lignes haute tension et des pylônes disgracieux.

La transmission d'énergie sans fil TESH ou Wireless Power Transmission WPT, est une technique permettant la distribution de l'énergie électrique sans utiliser de support matériel. Cette technique est destinée à être utilisée pour alimenter des lieux difficiles d'accès.

La TESH par résonance magnétique est également appelée TESH à faible couplage. Le principe théorique de cette méthode de résonance magnétique a commencé à être élaboré en 2005 par le Massachusetts Institute of Technology. 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.

Aujourd'hui, les techniques TESH par induction sont largement disponibles sur le marché, tandis que les techniques TESH par résonance font leur apparition sur le marché grand public.

L'industrie automobile envisage d'utiliser la TESH pour les véhicules électriques dans un avenir proche. En faisant correspondre la fréquence de résonance des deux bobines avec un facteur Q élevé, l'énergie électrique peut être transmise sur une grande distance sur laquelle le couplage magnétique entre les deux bobines est faible.

L'une des difficultés de TESH provient des contraintes qui sont imposées dans la disposition de la bobine secondaire vis-à-vis de la bobine primaire. En effet, dans un tel système, la transmission se fait par l'intermédiaire de deux inductances, l'une située dans le récepteur et l'autre dans l'émetteur. Ces bobines ont habituellement différentes formes, et la bobine secondaire doit être positionnée à proximité de la bobine primaire, sinon il ne reçoit

plus assez d'énergie. La transmission de puissance ne s'opère que lorsque la bobine secondaire est correctement aligné avec la bobine primaire et à une distance en rapport avec le diamètre des deux.

Le projet de fin d'étude est composé de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous introduisons la transmission d'énergie à distance par induction électromagnétique. Nous discutons de l'intérêt potentiel de combiner ces deux technologies en s'appuyant sur une étude bibliographique.

Le deuxième chapitre rassemble les éléments théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'un transfert d'énergie. Nous présenterons le fonctionnement d'un système TESF non résonant puis résonant.

Nous concluons ces travaux de ce projet de fin d'étude par un bilan des résultats obtenus. Le troisième chapitre est consacré à la modélisation analytique et l'optimisation d'un système de transmission d'énergie sans fil. Nous apportons une explication à la zone morte de la transmission d'un tel système et discutons des paramètres qui pourraient permettre d'améliorer ses performances.

# **Chapitre I:Etat de l'art sur 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 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

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 [1]-[2].

En 1891, l'inventeur serbo-américain Nikola Tesla a conçu la bobine Tesla, un dispositif unique fonctionnant sur le principe de la résonance électrique et capable de transmettre l'électricité sans fil. Cependant, la bobine ne pouvait conduire l'électricité sans fil que sur de courtes distances et, en raison de son potentiel limité, elle ne s'est pas avérée être une application pratique pour le transfert d'électricité sans fil.

Tesla a toujours été obsédé par son idée d'énergie sans fil, et dans les années qui suivirent, il travailla à la construction d'une station d'énergie capable d'effectuer des transmissions d'énergie sans fil (Wireless Power Transmission) à haute tension. Grâce à cette expérimentation, Tesla visa à transmettre des messages sans fil sur de longues distances, en utilisant soit une série de tours stratégiquement positionnées, soit un système de ballons suspendus [3]-[4].

Il construisit une station de transmission sans fil à Long Island (appelée la tour Tesla) qui, selon lui, pourrait démontrer que la transmission d'électricité sans fil à longue distance est possible.

Nikola Tesla est peut-être mort en 1943 en laissant son rêve d'électricité sans fil inachevé, mais au cours des 100 dernières années, un certain nombre d'expériences et d'études ont prouvé que l'inventeur de génie était peut-être sur la bonne voie dans son approche consistant à utiliser la terre au lieu des fils comme moyen de transmission de l'énergie sans fil.

Aujourd'hui, diverses méthodes de transmission d'énergie sans fil sont mises au point et des recherches sont en cours pour les mettre en œuvre à grande échelle.

Le 7 juin 2007 un prototype est réalisé par des américains, permet d'alimenter une ampoule de 60 watts à une distance de 2 mètres, avec un rendement de 40 %. Actuellement le

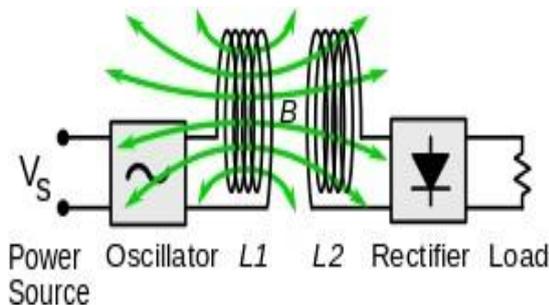
transfert d'énergie par couplage inductif résonant est souvent utilisé dans énormément d'implants commercialisés (Fig.I.1) [5]-[6].



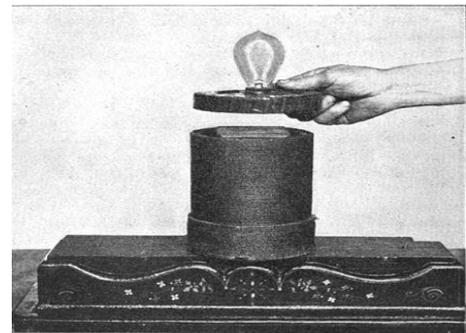
**Figure I.1** Démonstration de système d'alimentation sans fil en allumant une ampoule située à deux mètres d'une source d'énergie

### I.3 Couplage inductif et inductif résonant

Le couplage inductif est la plus ancienne et la plus largement utilisée, et pratiquement la seule à ce jour utilisée dans les produits commerciaux (Fig.I.3). Dans le couplage inductif, 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.2). 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 [6]-[7].



**Figure I.2** Schéma fonctionnel générique d'un système par d'alimentation sans fil inductif



**Figure I.3** Une ampoule alimentée sans fil induction, en 1910

Le couplage inductif résonant (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.4). La résonance entre les bobines peut augmenter considérablement le couplage et le transfert de puissance [8]-[9]-[10].

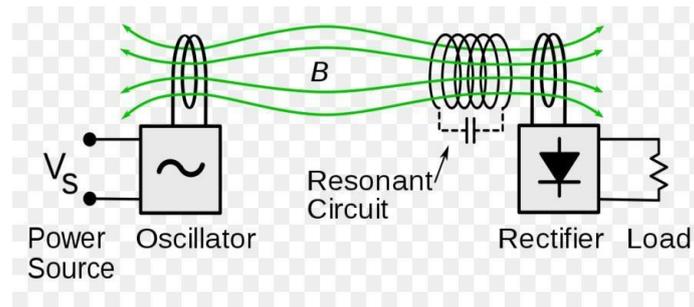


Figure I.4 Schéma fonctionnel d'un système couplage inductif résonant

## I.4 les grandes innovations

### I.4.1 La transmission d'énergie sans fil par satellite solaire

Il s'agit d'une méthode basée sur l'utilisation de satellites solaires placés dans l'espace, en orbite géostationnaire. Le but de l'utilisation de satellites solaires est de pouvoir collecter l'énergie dans l'espace et de la transmettre à la Terre via une antenne au sol ou à travers une station du réseau principal [11]-[12].

### I.4.2 La transmission d'électricité sans fil par micro-ondes

La transmission d'énergie par micro-ondes, ou ondes radiofréquences, est une technique assez récente. Elle permet de transformer le rayonnement micro-ondes en courant électrique continu via un récepteur micro-ondes et un redresseur de courant continu. En août 2021, des recherches ont révélé que la transmission de puissance sans fil par ondes radiofréquences est très efficace pour alimenter les fusées lancées dans l'espace. Cette innovation permet d'alléger le poids des fusées, dont 90 % de la masse est représentée par le carburant [11].

### I.4.3 La transmission d'énergie sans fil par des faisceaux laser

En matière d'électricité sans fil, les diodes laser à l'état solide restent les plus efficaces. Il s'agit d'un dispositif identique à celui utilisé dans les communications par fibre optique et par laser en espace libre. Pour transmettre une énergie au moyen du laser, il faut utiliser un récepteur photovoltaïque. Celui-ci reçoit les faisceaux laser, avec lesquels il génère ensuite de l'énergie.

La marine américaine a diffusé, sans fil, 1,6 kW de puissance sur un kilomètre grâce à la technologie des micro-ondes. Cette technique pourrait permettre d'alimenter en énergie des troupes ou des navires, en limitant les besoins d'approvisionnement traditionnels.

## I.5 Les projets de recharge par induction

Ils sont à la fois nombreux et encourageants. En 2003, deux chercheurs italiens ont lancé des bus se rechargeant par induction. Seule limite, pas de recharge en roulant, mais au-dessus de points de charges situés aux arrêts. Depuis 2013, la ville de Gumi (Corée du Sud) dispose d'une ligne de 23 km fonctionnant sur le même principe. La charge sans câble de 100

kW permettrait de réduire par cinq la taille des batteries. Le même système équipe une ligne de 8 bus à Milton Keynes (Royaume-Uni) [13].

## I.6 La recharge par induction pour une voiture

De la même manière que pour les smartphones, la charge par induction fonctionne grâce à un champ électromagnétique. Une bobine émettrice est située dans la plaque de recharge au sol, tandis qu'une bobine réceptrice placée sous le véhicule permet de capter cette énergie sans aucun fil ni branchement physique. Plus précisément, lorsque le courant électrique circule dans la première bobine, un champ magnétique se diffuse et vient être captée ici par la deuxième bobine.



Figure I.5 Transfert de puissance pour les véhicules électriques

### I.6.1 Recharge statique

De nombreuses compagnies dans le monde ont développé leurs propres systèmes de recharge sans contact statiques. Les japonais ont développé un système de recharge par induction électromagnétique. Sa commercialisation est envisagée en 2010.

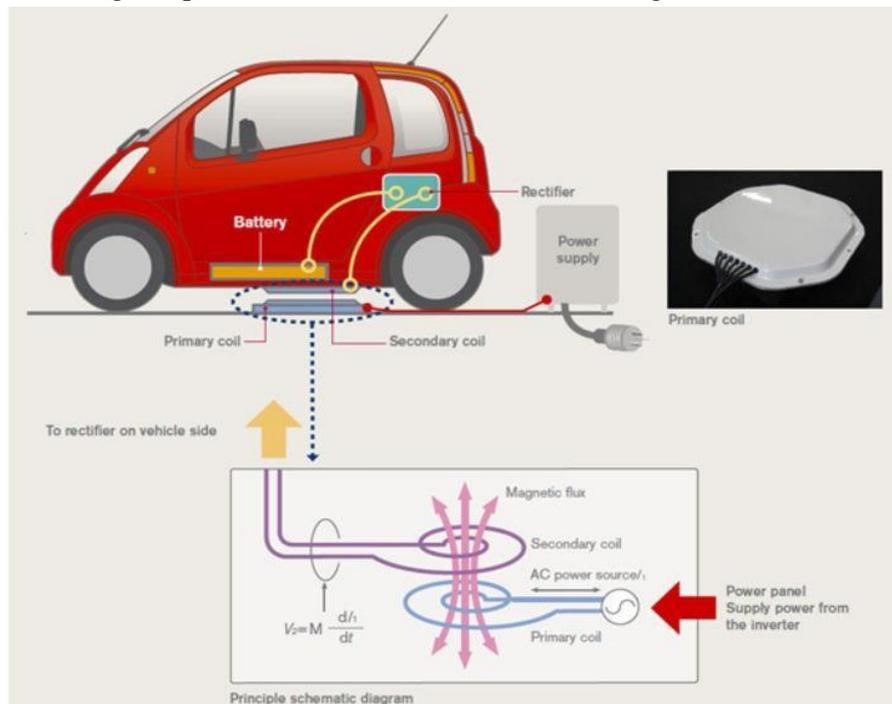
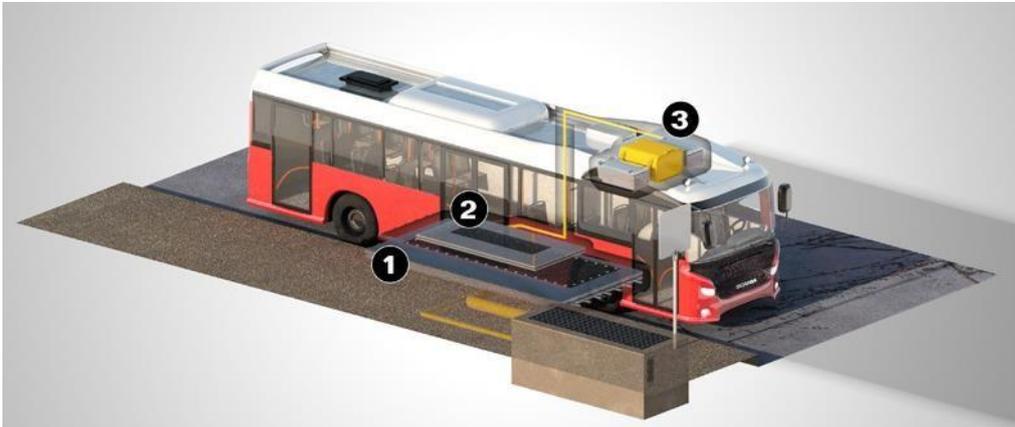


Figure I.6 La recharge du voiture électrique par induction

En coopération avec Showa Aircraft Industry [14], Nissan a développé un système qui rendrait la recharge des batteries des voitures électriques plus pratique. En effet, ce système, baptisé Hypermini, fonctionne sans contact, donc sans fil, grâce à l'induction électromagnétique.

Le modèle présenté par le constructeur automobile japonais affiche une puissance de 10 KW. Il se destine aux zones de stationnement comme les parkings. Il peut recharger plusieurs véhicules stationnés. Un modèle de 3 KW, utilisable par les particuliers à domicile, est en projet. La commercialisation est programmée pour 2010.

Ce système de recharge a cependant un gros inconvénient : son inefficacité énergétique. Nissan ne fournit aucune information sur le rendement électromagnétique (qui dépasse rarement les 60%). Les pertes d'énergies sont d'autant plus importantes que le décalage entre l'induit (la bobine embarquée par le véhicule) et l'inducteur (la bobine du système installé dans la zone de stationnement) est grand. Le constructeur espère améliorer le système pour qu'il accepte un alignement à 10 cm près sans dégrader le rendement [15].



**Figure I.7 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]

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].



(a) secondaire pendant le déplacement, (b) secondaire abaissé lors de la recharge [4]

**Figure I.8 Secondaire du système Primove développé par Bombardier,**

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.8).

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 [16].

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 [18].

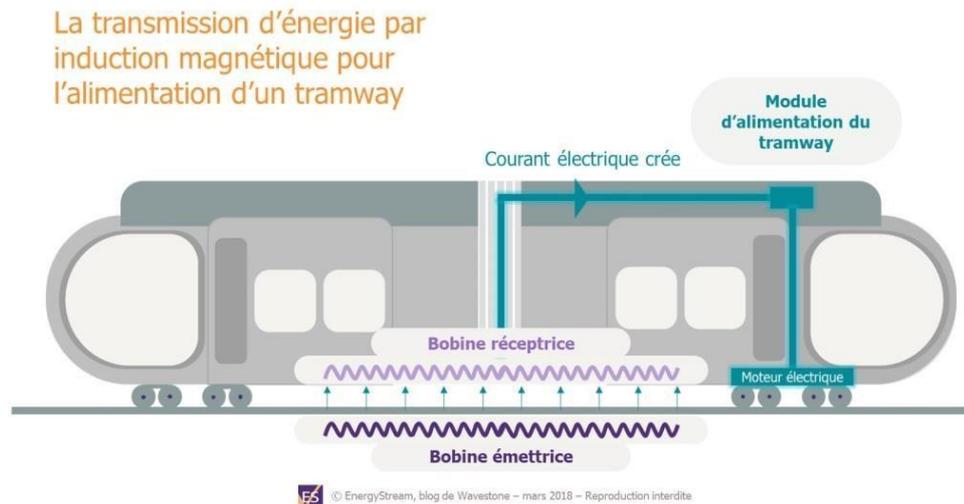


**Figure I.9** Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train [11]

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.9). 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.6.2 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].



**Figure I.10 Schéma de fonctionnement d'un tramway électrique de la technologie Primove**

La technologie Primove développée depuis 2010 par Bombardier et protégée par de nombreux brevets permet le rechargement des tramways électriques par induction magnétique. Les équipements de recharge sont enterrés au niveau des stations du tramway et permettent l'alimentation sans contact de l'engin roulant notamment au moment de l'accélération, fortement consommatrice en énergie. L'induction permet de faire fonctionner le tramway sans mise en place et entretien de caténaires, simplifiant ainsi l'aménagement de l'espace urbain. Cette technologie est déjà utilisée pour alimenter les trains de Nanjing, en Chine, et d'Augsbourg en Allemagne (Fig.I.10).

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.



**Figure I.11 Un système de charge dynamique pour recharger les véhicules électrique**

Projet Serpentine EPFL Réalisé à Lausanne (Fig.I.12), 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].



**Figure I.12 Projet Serpentine : 'capsule' autonome alimenté sans contact**

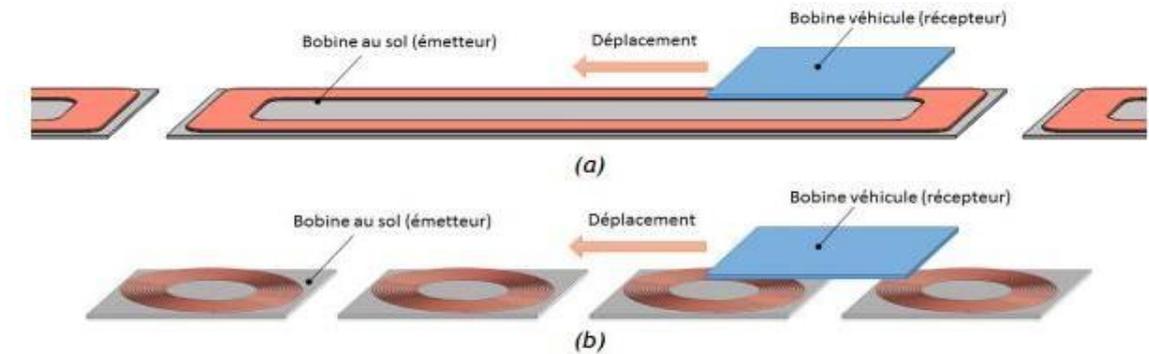
Le constructeur français Renault a développé pour sa part un système de recharge inductif de 2,5 kW pour une distance de 15 cm entre émetteur et récepteur à une fréquence de 85 kHz. Le projet a été réalisé en collaboration avec Centrale-Supelec (Fig.I.12).



**Figure I.13 Système DWPT développé par Renault-Supelec, source [16]**

Dans ce type de recharge, le véhicule se charge en roulant (Fig.I.13). 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 [3-10].

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.13).



**Figure I.14 Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté**

Pour les systèmes à émetteur unique (Fig.I.14.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.14.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.7 Les véhicules compatibles

Pour que la charge par induction fonctionne, il faut que les véhicules électriques soient compatibles. Et aucun ne l'est aujourd'hui. Seul BMW a annoncé la recharge à induction en 2018, à commencer par une option sur la BMW 530e en Allemagne. Jusqu'à 3,2 kW seulement, elle est cependant indisponible en 2019. Mercedes-Benz avait aussi annoncé une Classe S S500e compatible en 2017, mais ne l'a finalement jamais commercialisée.

## I.8 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. A cette partie, nous avons examiné en détail le transfert d'énergie sans fil et exploré les différentes applications existantes. Nous avons établi les bases et clarifié certains concepts essentiels pour la compréhension de la problématique.

## **Chapitre II: Modélisation des coupleurs inductifs**

## II.1 introduction

Comme le précise l'intitulé du chapitre, nous exposerons un état de l'art sur les coupleurs et les méthodes de calcul des inductances qui sont importantes à la conception des systèmes de transfert d'énergie. La modélisation d'un coupleur inductif est cruciale pour l'évaluation et l'optimisation des performances [1]-[2]. La simplicité et la précision du modèle sont importantes. La plupart des bobines que l'on voit dans le transfert d'énergie possèdent une forme spirale circulaire, rectangulaire, carrée, polygonale. Les bobines toriques sont très connues pour fournir un accroissement des performances du système. Dans ce chapitre on va proposer des méthodes de calcul permettant d'évaluer les paramètres influents dans le transfert d'énergie sans fil.

## II.2 coupleur magnétique

Un coupleur inductif est basé sur le même principe qu'un transformateur et doit remplir la même fonction : transférer une énergie sans contact matériel d'un enroulement plus ou moins complexe à un autre. La différence se situe dans l'absence de canalisation totale du flux magnétique par des matériaux à forte perméabilité.

Le coupleur est un système magnétique à deux enroulements qui peut se représenter de façon générale par deux inductances, primaire et secondaire, et une inductance mutuelle, notées respectivement  $L_1$ ,  $L_2$  et  $M$  (Fig.II.1).

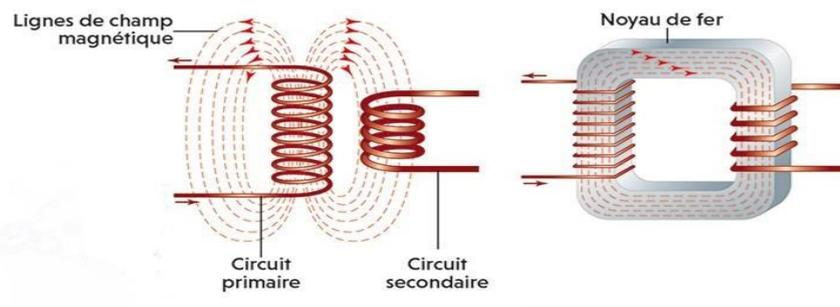


Figure II.1 Schéma inductif équivalent d'un coupleur à deux enroulements

Le coefficient de couplage, noté  $k$ , permet de quantifier la qualité du transfert du flux d'un enroulement à l'autre. Lorsque les circuits magnétiques primaire et secondaire sont de géométries différentes, ce qui peut être le cas pour le transfert d'énergie sans contact par

induction, il est nécessaire d'introduire les coefficients de couplage rapportés au primaire et au secondaire [3], notés respectivement  $k_1$  et  $k_2$ .

### II.3 Coupleurs inductifs

Les coupleurs 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.2) [4].

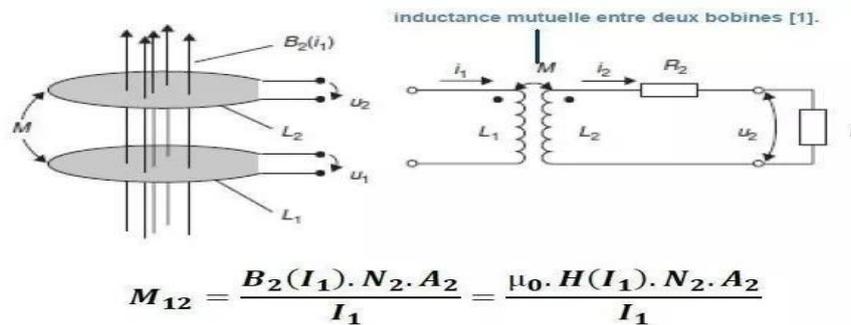


Figure II.2 Inductance mutuelle décrivant l'interaction entre deux bobines [5]

Le lien inductif est constitué d'une bobine primaire émettant un champ magnétique  $\vec{B}$ . Ce champ induit dans toute bobine de son entourage proche une tension qui oscille selon la fréquence du champ. Elle est caractérisée, par une amplitude calculée à partir de la loi d'Ampère:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \tag{II.1}$$

Avec  $i$  est le courant qui traverse un conducteur électrique de longueur élémentaire  $dl$  et  $\mu_0$  est la perméabilité dans le vide

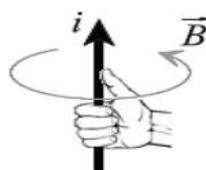


Figure II.3 Règle de la main droite pour définir la direction du champ magnétique.

Chaque élément de courant  $i \vec{dl}$  crée en un point P un champ magnétique élémentaire  $d\vec{B}$ . Ceci est exprimé par l'intégration de la loi de Biot et Savart [7]:

$$dB = \frac{\mu}{4\pi} \frac{idl \sin(\theta)}{r^2} \quad (\text{II.2})$$

Où r est la distance entre l'élément de longueur dl et le point P.

La quantité de champ magnétique passant à travers une surface donnée S désignée par le flux magnétique  $\phi_B$  est exprimée par :

$$\phi_B = \iint_S B dS \quad (\text{II.3})$$

Selon la loi de Faraday, la variation de ce flux magnétique à travers un conducteur en forme de boucle induit une force électromotrice [7] :

$$e_m = \oint \vec{E} \vec{dl} \quad (\text{II.4})$$

Où  $\vec{E}$  est le champ électrique induit par la variation du flux magnétique  $\phi_B$ .

Si les deux bobines sont à proximité l'une de l'autre, le courant  $i_1$  qui circule dans la bobine primaire met en place un flux magnétique  $\phi_{21}$  à travers la bobine secondaire. Une force électromotrice induite apparaît alors dans la bobine secondaire, telle que :

$$V_2 = \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (\text{II.5})$$

À l'aide du théorème de Stokes et la formule de Neumann [8], nous mène à une expression bien connue dans un système doté de deux bobines couplées magnétiquement :

$$V_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} \tag{II.6}$$

Où  $M_{12}$  est l'inductance mutuelle.

Le courant  $i_2$  induit de la même manière, une tension  $V_1$  dans la bobine primaire ;

$$V_1 = M_{12} \frac{di_2}{dt} \tag{II.7}$$

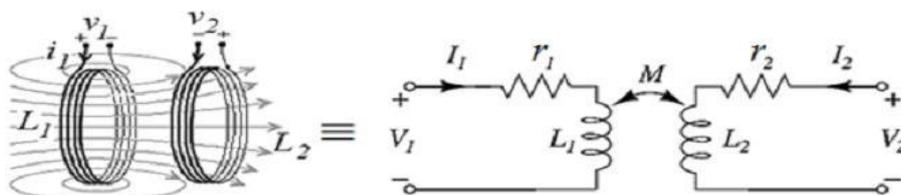
L'inductance mutuelle  $M$  est alors le paramètre qui décrit le couplage entre deux bobines. Une force électromotrice d'induction apparaît également dans une seule bobine si le courant dans cette bobine est variable.

$$V_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \tag{II.8}$$

Ce phénomène est appelé auto-induction avec la bobine primaire est l'inductance propre, nommée aussi auto-inductance. Cette inductance est directement proportionnelle au carré du nombre de spires  $n_1$  de la bobine et en fonction de la géométrie de la bobine présentée par la section du fil  $A_1$  et de sa longueur  $l_1$ .

$$L_1 = \frac{\mu n_1^2 A_1}{l_1}$$

(II.9)



### Figure II.4 Deux bobines couplées entre eux et leur modèle électronique

Les deux phénomènes d'induction (auto-induction et induction mutuelle) agissent toujours simultanément. De cette façon, le réseau d'équations pour l'ensemble des deux bobines est [9]:

$$V_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (\text{II.10})$$

$$V_2 = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Les résistances séries équivalentes  $r_1$  et  $r_2$  seront alors ajoutées aux équations. D'où la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & r_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec  $\omega$  est la fréquence angulaire du signal exprimée aussi en fonction de la fréquence  $f$ .

Pour exprimer le couplage entre deux bobines, il existe une autre variable hormis l'inductance mutuelle  $M$ . C'est le facteur de couplage  $k$  dont la valeur est comprise entre 0 et 1 [1]:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (\text{II.13})$$

Ce facteur dépend fortement de la géométrie des bobines, de leur position relative et de la propriété de leurs matériaux. Cependant, Roz et Fuentes l'ont estimé par l'équation suivante [11]:

$$K = \frac{r_{L1}^2 r_{L2}^2 \cos(\theta)}{\sqrt{r_{L1}^2 r_{L2}^2 (\sqrt{d_a^2 + r_{L1}^2})^3}} \quad (\text{II.14})$$

Ou  $r_{L1}$  et  $r_{L2}$  sont les rayons respectifs de la bobine primaire et secondaire;  $d_a$  et  $\theta$  sont respectivement la distance axiale et l'angle entre les bobines. Néanmoins, l'équation ne s'applique que si  $r_{L2} \leq r_{L1}$  [11].

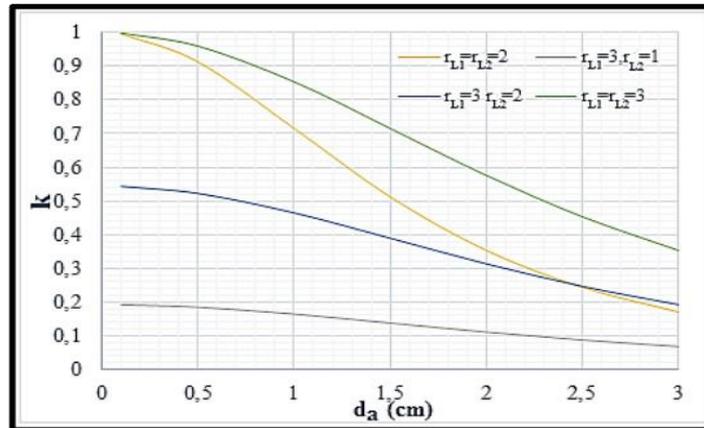


Figure II.5 Facteur de couplage en fonction de la distance entre deux bobines [11]

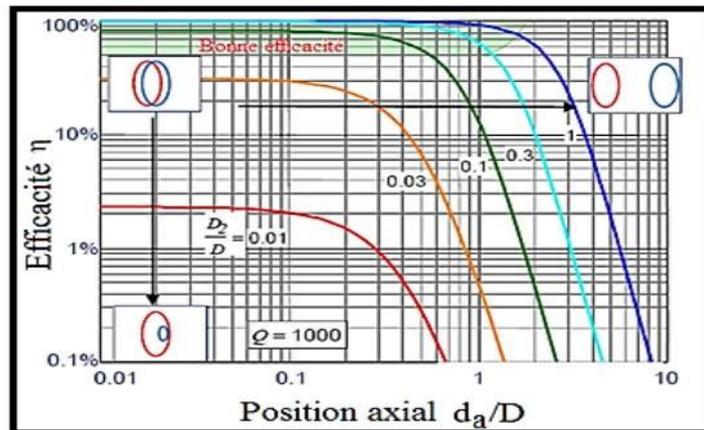


Figure II.6 L'efficacité énergétique entre deux bobines [11]

On constate aussi que le facteur de couplage augmente tout en agrandissant le rayon des bobines. D'autre part, le facteur de couplage est nettement plus grand pour des bobines de mêmes rayons. Ces résultats confirment que l'efficacité de puissance optimale est atteinte lorsque les bobines primaires et secondaires ont les mêmes rayons.

## II.4 Système d'alimentation sans fil

Comme on le voit en Fig.II.7, un système d'alimentation sans fil est constitué de deux circuits : un circuit émetteur et un circuit récepteur. 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 [12].

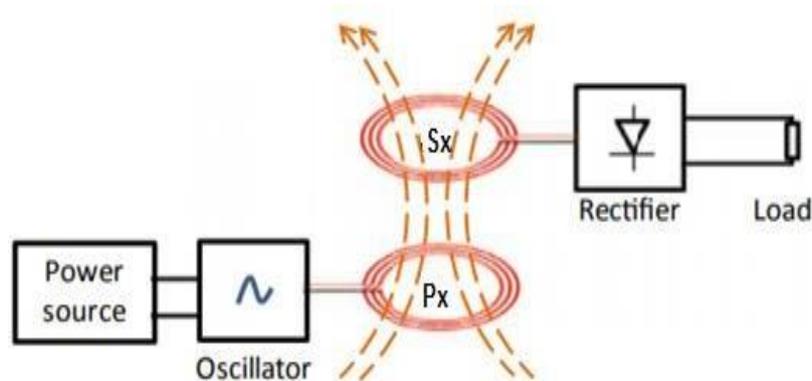
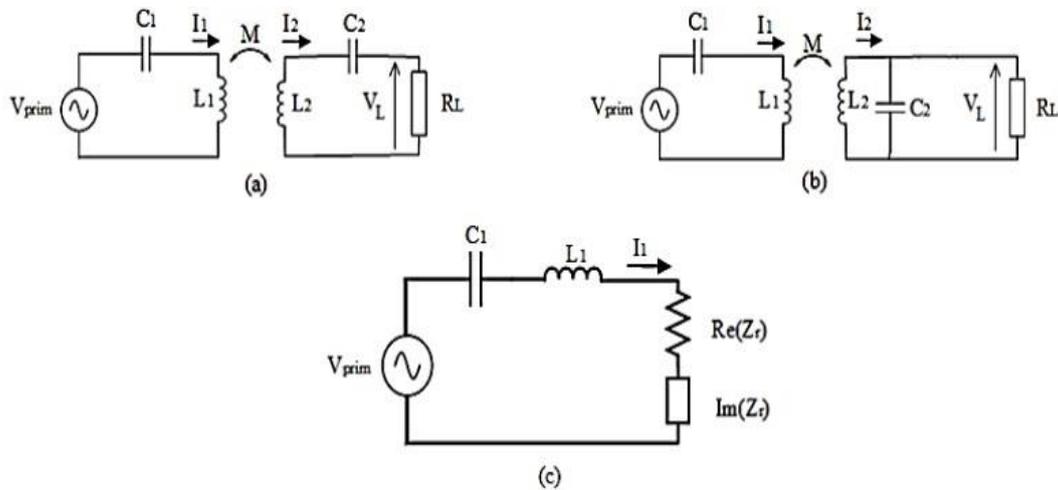


Figure II.7 Représente le modèle électrique équivalent du système de transfert d'énergie

### II.4.1 Modélisation du couplage série-série et série-parallèle

Pour que le modèle électrique du couplage inductif corresponde le plus possible à un lien inductif réel, on ajoute deux condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  respectivement dans les circuits primaire et secondaire pour assurer un fonctionnement à la résonance et améliorer l'efficacité énergétique du lien [13].

Dans ce travail, nous choisissons le circuit primaire résonant-série pour des raisons de simplicité. Pour étudier l'impact de la variation de la charge secondaire  $R_L$  et du facteur de couplage  $k$  sur le circuit primaire et sur la qualité du lien. Pour un modèle de circuit simplifié, les valeurs des résistances séries équivalentes de la bobine primaire  $r_1$  et secondaire  $r_2$  sont ignorées, car ils sont généralement beaucoup plus faibles que la charge  $R_L$ .



**Figure II.8 Le modèle de couplage (a) série-série (SS) et (b) série-parallèle (SP) et (c) leur circuit équivalent vu du côté primaire [14]**

La Fig.II.8.c représente le circuit équivalent des systèmes (SS) et (SP) observé à partir de la source de tension alternative  $V_{prim}$ . Une application simple de la loi d'ohm conduit à la détermination de l'impédance équivalente vue du côté primaire lors du couplage [14] :

$$Z_{prim} = \frac{V_{prim}}{I_1} = Re(Z_r) + j(\omega L_1 + Im(Z_r)) - \frac{1}{j\omega C_1} \quad (II.15)$$

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

$$Z_r = Re(Z_r) + j Im(Z_r) = \frac{\omega_0^2 M^2}{Z_2} \quad (II.16)$$

Avec  $(Z_r)$ ,  $Im(Z_r)$  et  $Z_2$  sont respectivement la résistance réfléchie, la réactance réfléchie et l'impédance totale du circuit secondaire. Cette dernière est exprimée dans (II.17) pour chacune des approches SS et SP [15].

$$Z_2 = \begin{cases} R_L + j\omega_0 L_2 - \frac{j1}{\omega_0 C_2} \\ R_L + \frac{1}{j\omega_0 C_2 + \frac{1}{R_L}} \end{cases} \quad (II.17)$$

En substituant (II.17) dans (II.16), on obtient respectivement la résistance réfléchie pour les approches SS et SP [16]:

$$\begin{cases} \text{Re}(Z_r) = \frac{\omega_0^4 C_2^2 M^2 R_L^2}{(\omega^2 L_2 C_2 - 1) + \omega^2 C_2^2 R^2} & SS \\ \text{Re}(Z_r) = \frac{R^2 (\omega^2 L_2 C_2 - 1)^2 + \omega^2 L_2^2}{L_2^2} & SP \end{cases} \quad (II.18)$$

D’où, la puissance transférée du primaire au secondaire est égale à la résistance réfléchie multipliée par le carré du courant primaire [15]:

$$P_{sec} = \text{Re}(Z_r) I_1^2 \quad (II.19)$$

Si la fréquence d’opération est égale à la fréquence de résonance du côté secondaire, on obtient :

$$\begin{cases} \text{Re}(Z_r) = \frac{\omega_r^2 M^2}{R_L} & SS \\ \text{Re}(Z_r) = \frac{M^2 R_L}{L_2^2} & SP \end{cases} \quad (II.20)$$

On constate que la résistance réfléchie (dans les deux approches) est proportionnelle au carré de l’inductance mutuelle. Donc, un fort couplage entre les deux bobines augmente évidemment la puissance transférée au circuit secondaire  $P_{sec}$ . De la même façon à partir de (II.18) et (II.16), les réactances réfléchies peuvent aussi être déterminées [16] :

$$\begin{cases} \text{Im}(Z_r) = \frac{-\omega_0^3 C_2^2 M^2 (\omega_0^2 L_2 C_2 - 1)}{(\omega^2 L_2 C_2 - 1) + \omega^2 C_2^2 R^2} & SS \\ \text{Im}(Z_r) = \frac{-\omega_0^3 C_2^2 M (R_L C_2 (\omega_0^2 L_2 C_2 - 1) + L_2)}{(\omega^2 L_2 C_2 - 1)^2 + \omega_0^2 L_2^2} & SP \end{cases} \quad (II.21)$$

À la résonance du circuit secondaire, on aura :

$$\begin{cases} \text{Im}(Z_r) = 0 \\ \text{Im}(Z_r) = \frac{\omega_r^2 M^2}{L_2} \end{cases} \quad SP \quad (\text{II.22})$$

Afin d'assurer une transmission d'énergie maximale, la réactance de l'impédance équivalente vue du côté primaire ( $Z_{prim}$ ), qui symbolise la puissance réactive, doit être annulée [17]:

$$\text{Im}(Z_{prim}) = j \left( \omega L_1 + \text{Im}(Z_r) - \frac{1}{\omega C_1} \right) = 0 \quad (\text{II.23})$$

Pour atteindre cet objectif, le contrôle de la capacité primaire peut être un moyen pour compenser à la fois l'auto-inductance primaire  $L_1$  et la réactance réfléchiée ( $Z_r$ ). En substituant (II.23) dans (II.22), la valeur de la capacité primaire de compensation est déterminée pour les deux approches (SS) et (SP). Contrairement à l'approche (SS), la capacité primaire  $C_1$  pour l'approche (SP) dépend du facteur de couplage  $k$  [18]:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{\omega_r^2 L_1} \quad SS \\ C_2 = \frac{1}{\omega_r^2 (L_1 - \frac{M}{L_2})} \quad SP \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Il est clair d'après (II.24) que si un circuit primaire série est employé (pour  $\omega = \omega_r$ ), la capacité de compensation primaire requise est indépendante de la charge secondaire  $RL$ . Cependant, il faut mentionner que ce n'est pas aussi le cas pour un circuit primaire parallèle.

• **Évaluation du rendement**

L'efficacité du lien peut être calculée de plusieurs façons. Supposons que le circuit secondaire est accordé à la résonance, le facteur  $\eta$  est défini comme le rapport de la puissance consommée par ( $Z_r$ ), identique à la puissance transférée à la partie secondaire, avec la puissance totale d'entrée  $P_{in}$  dissipée dans  $R(Z_r)$  et  $r_1$  :

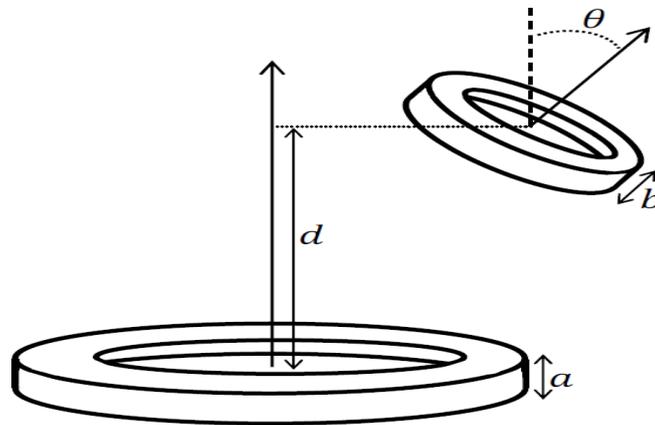
$$\eta = \frac{P_{sec}}{P_{in}} = \frac{Re(Z_r)}{Re(Z_r) + r_1} \quad (\text{II.25})$$

## II.5 Modélisation du coupleur inductif

### II.5.1 Mutuelle inductance entre deux bobines

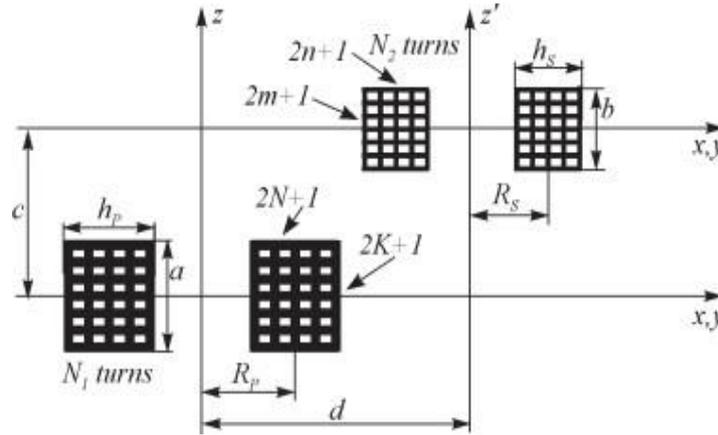
Dans cette partie, nous allons présenter la méthode analytique que nous avons élaborée et qui permet de déterminer la self-inductance d'une bobine de forme toriques et également la mutuelle inductance entre deux bobines couplées formant un lien inductif et placées arbitrairement dans l'espace.

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.9).



**Figure II.9 Deux bobines toriques de sections rectangulaires couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial) [19]-[20]**

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.



**Figure II.10** Section rectangulaire de bobine torique divisée en  $(2N + 1) \times (2K + 1)$  éléments dont chacun est équivalent à une spire élémentaire [19].

Le même principe de calcul a été appliqué pour déterminer la mutuelle inductance, notée  $M_{ps}$ , entre les deux bobines toriques de section rectangulaires. La mutuelle inductance  $M_{ps}$  est donnée par l'équation suivante [21]-[22]-[23]-[24]-[25]:

$$M_{ps} = \frac{N_1 N_2 \sum_{g=-K}^{g=K} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{p=-m}^{p=m} \sum_{l=-n}^{l=n} M(g, h, p, l)}{(2K+1)(2N+1)(2m+1)(2n+1)} \quad (\text{II.26})$$

Le terme  $M(g, h, l, p)$  correspond à la mutuelle inductance entre les deux spires de la même bobine.  $K(q)$  et  $E(q)$  sont des fonctions de Bessel de premier et deuxième ordre.

$$M(g, h, p, l) = \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{\frac{R_p(g, h) R_s(l, p)}{R_s(l, p)}} \int_0^\pi \frac{(\cos(\theta) - \frac{\Delta}{R_s(l, p)} \cos(\phi)) \psi(k)}{\sqrt{V^3}} d\phi \quad (\text{II.27})$$

$$R_p(g, h) = R_p + \frac{h_p}{(2N+1)} h, h = -N, \dots, N \quad (\text{II.28})$$

$$R_s(l, p) = R_s + \frac{h_s}{(2n+1)} l, l = -n, \dots, n \quad (\text{II.29})$$

$$q = \sqrt{\frac{4\alpha V}{(1+\alpha V)^2 + \xi^2}} \quad (\text{II.30})$$

$$\xi = \beta - \alpha \cos(\phi) \sin(\theta), \alpha = \frac{R_s(l, p)}{R_p(g, h)}, \beta = \frac{z}{R_p(g, h)} \quad (\text{II.31})$$

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

$$V = \sqrt{1 - \cos^2(\phi) \sin^2(\theta) - 2 \frac{\Delta}{R_s(l, p)} \cos(\phi) \cos(\theta) + \frac{\Delta^2}{R_s^2(l, p)}} \quad (\text{II.33})$$

$$\psi(k) = \frac{(2-q) K(q)}{q} - \frac{2}{q} E(q) = Q_1(x), x = \frac{2-q^2}{q^2} \quad (\text{II.34})$$

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

$$L = \frac{10 \pi N^2 R_1^2}{6 R_1 + 9l + 10(R_2 - R_1)} \quad (II.35)$$

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

### II.5.2 Prise en compte de la résonance

Dans toutes les applications de l'induction on retrouve la même problématique, à savoir la mise en jeu d'une énergie réactive très importante en regard de la puissance active transférée, du fait du caractère inductif des bobinages. Si l'on ne mettait pas en œuvre de compensation, le surdimensionnement des bobinages et des convertisseurs d'alimentation serait considérable.

La mise en équation peut s'effectuer au premier harmonique ; en effet, les circuits résonants engendreront des courants quasi sinusoïdaux pour des fréquences proches de la résonance (point de puissance maximale). La tension de sortie de l'onduleur et celle ramenée par le redresseur peuvent être remplacées par leurs termes fondamentaux. Le schéma, dans le cas de la compensation série-série, peut alors se réduire au schéma équivalent suivant (Fig.II.11).

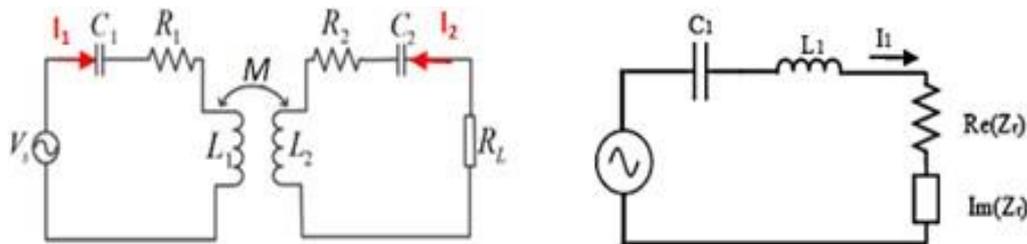


Figure II.11 Le modèle de couplage : (a) série-série (SS) et (b) leur Circuit équivalent vu du côté primaire.

Nous appliquons la loi des mailles dans le système et nous obtenons une solution équations ci-dessous [20]-[21]-[22]:

$$\begin{cases} (-j/C_1\omega)I_1 + (R_1 + jL_1\omega)I_1 + jM\omega I_2 = U_1 \\ (RC_2\omega - j/C_2\omega)I_2 + (R_2 + jL_2\omega)I_2 + jM\omega I_1 = 0 \\ U_2 = (RC_2\omega - j/C_2\omega)I_2 \end{cases} \quad (II.36)$$

Avec :

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jL_1\omega & , & & Z_2 &= R_2 + jL_2\omega & , & & Z_m &= jM\omega \\ Z_{C1} &= -j/C_1\omega & & & Z_{C2} &= -j/C_2\omega & & & & \\ Z &= (RC_2\omega + j)/\omega C_2 & & & & & & & & \end{aligned} \quad (II.37)$$

Nous avons donc l'équation (II.25) comme suit :

$$\begin{cases} (Z_{C1} + Z_1)I_1 + Z_m I_2 = U_1 \\ Z_m I_1 + (Z_2 + Z)I_2 = 0 \\ U_2 = ZI_2 \end{cases} \quad (II.38)$$

De l'équation (II.2.26) nous obtenons l'énoncé  $I_1$  qui est:

$$I_1 = -\frac{Z_2 + Z}{Z_m} I_2 \quad (II.39)$$

On remplace  $I_1$  par l'expression dans l'équation de (II.1.26), on aura :

$$I_2 = \frac{Z_m}{Z_m^2 - (Z_{C1} + Z_1)(Z_2 + Z)} U_1 \quad (II.40)$$

On remplace l'équation (II.40) dans l'équation (II.39), la tension de sortie est comme suite:

$$U_2 = \frac{Z_m Z}{Z_m^2 - (Z_{C1} + Z_1)(Z_2 + Z)} U_1 \quad (II.41)$$

• **L'efficacité du système**

L'efficacité du système peut également être exprimée en termes de coefficient de couplage magnétique  $k$  et de facteur de qualité  $Q$ . Il a été démontré que l'efficacité de transfert maximale réalisable dépend de la composition des bobines et peut être donnée comme [18]-[20]-[21]-[22]:

$$\eta_{max} = \frac{(kQ)^2}{(1 + \sqrt{(kQ)^2 + 1})^2} \quad (II.42)$$

Où  $Q$  est le facteur de qualité combiné des deux bobines et  $k$  est une valeur sans unité comprise entre 0 et 1. Le facteur de couplage « $k$ » est défini comme la quantité de flux magnétique pénétrant dans la bobine réceptrice par rapport au flux généré global.

Le facteur de qualité est une mesure du bon fonctionnement d'une seule bobine. Un facteur de qualité global combiné du système est défini comme suit:

$$Q = \sqrt{Q_2 Q_1} \quad (II.43)$$

et:

$$Q_{1,2} \approx \frac{\omega_0 L_{1,2}}{R_{1,2}} \quad (\text{II.44})$$

Où R est la résistance de la bobine à la fréquence de fonctionnement.

## II.6 conclusion

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

## **Chapitre III: Application et résultats**

### III.1 Introduction

Ce chapitre est réservé à l'application du modèle développé dans le chapitre précédent. Le modèle est implémenté sous MATLAB. Les résultats obtenus concernent l'évolution de l'inductance mutuelle, coefficient de couplage, rendement, et la puissance de sortie en fonction des déplacements axiaux et latéraux.

### III.2 Données de l'application

#### III.2.1 Caractéristiques géométriques et électromagnétiques

Le Tableau III.1 illustre les caractéristiques géométriques du bobinage étudié qui est composé d'une bobine primaire (émettrice) et d'une bobine au secondaire (réceptrice). Des simulations par le modèle analytique sont nécessaires pour évaluer le système en fonction de ces déplacements. Les simulations seront effectuées en magnétostatique en 2 dimensions selon la géométrie représentée Fig. III.1. Tous les paramètres qui rentrent dans le dimensionnement sont représentés dans un tableau récapitulatif III.1.

**Tableau III.1 Caractéristiques géométriques du système**

	Différentes grandeurs géométriques	
Bobine primaire	Diamètre extérieur	15 cm
	Diamètre intérieur	13 cm
	Nombre de tours	9
	Epaisseur du bobinage	2 cm
Bobine secondaire	Diamètre extérieur	15 cm
	Diamètre intérieur	13 cm
	Nombre de tours	9
	Epaisseur du bobinage	2 cm
Espacement	Déplacement axial (d)	Variable
	Désalignement (c)	Variable

Tableau III.2 Paramètres électriques de circuit émetteur et le circuit récepteur proposés

Paramètre	Bobine primaire	Bobine secondaire
Condensateurs de résonance	10.932 (nF)	10.932 (nF)
Résistances séries des bobines	15 mΩ	15 mΩ
Inductance propres	3.7074 (μH)	3.7074 (μH)
Résistance de charge Rc	10 à 30	
Tension de source	Vs= 70 V	
Fréquence de résonance f <sub>0</sub>	225 kHz	

### III.2.2 Schéma de l'étude

Dans la première configuration, la bobine émettrice reste fixe au point central qui a pour coordonnées  $(x=0, y=0, z=0)$  tandis que la bobine réceptrice, se déplace en translation selon les axes X et Z. La translation s'effectue sur différentes positions Z de 0 à 0.5 m et en X de 0.5 m à -0.5 m par incréments de 0.01 m.

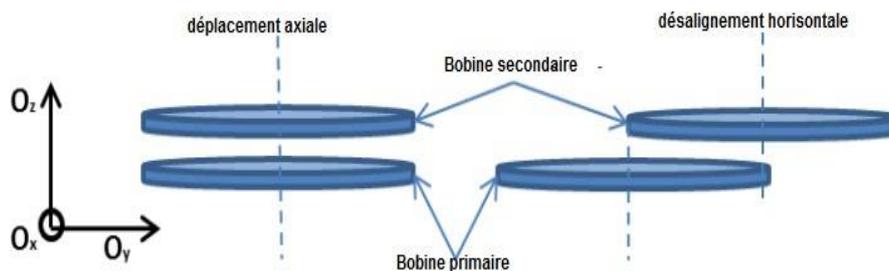
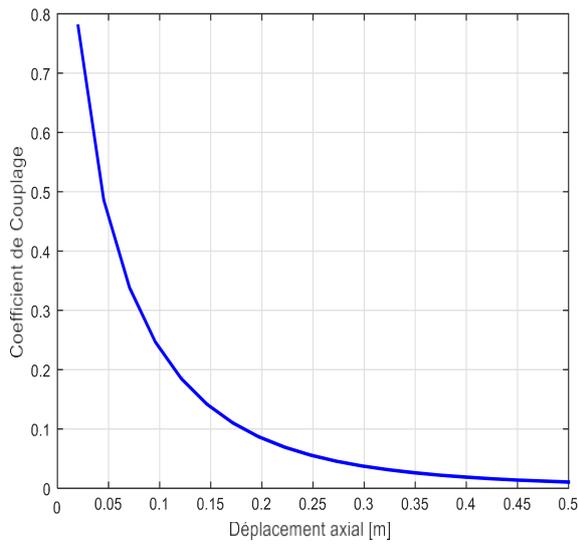


Figure III.1 Schéma de l'étude sur le couplage magnétique avec les bobines alignées

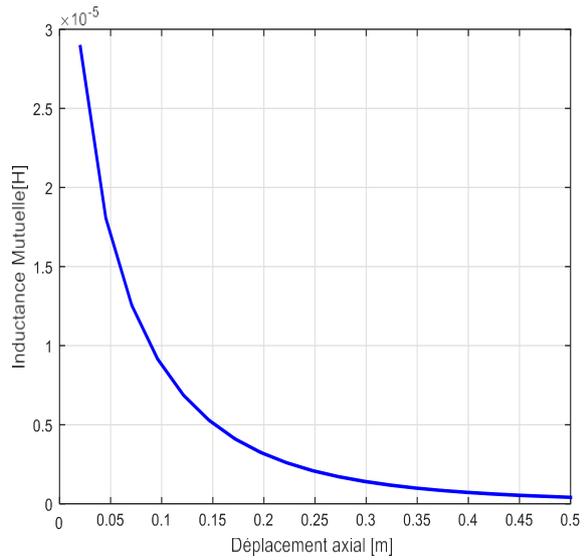
## III.3 Étude de l'influence DES différents paramètres géométriques ET PHYSIQUES sur le couplage inductif

### III.3.1 Etude de l'influence du déplacement axial entre les deux bobines sur la mutuelle inductance et coefficient de couplage

Il est essentiel de connaître le facteur de couplage et inductance mutuelle lorsque les bobines inductives sont dans les meilleures conditions possibles (alignées et centrées), il est également important de voir son évolution lorsque les conditions de couplages deviennent plus critiques. Comme indiqué par les Fig.III.12 et III.3, le décalage en Oy va être utilisé pour modéliser des antennes non centrées et donc des cas typiques d'utilisations. Les limites du transfert d'énergie inductif vont ici apparaître et illustreront bien le principe du couplage en champ proche.

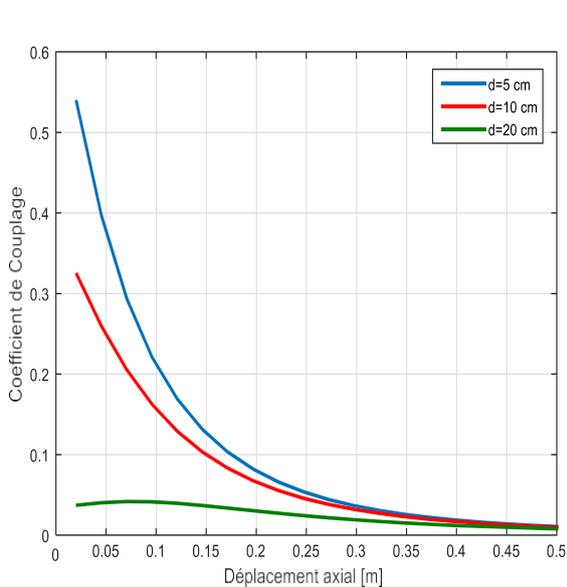


**Figure III.2 Coefficient de couplage en fonction de déplacement axial**

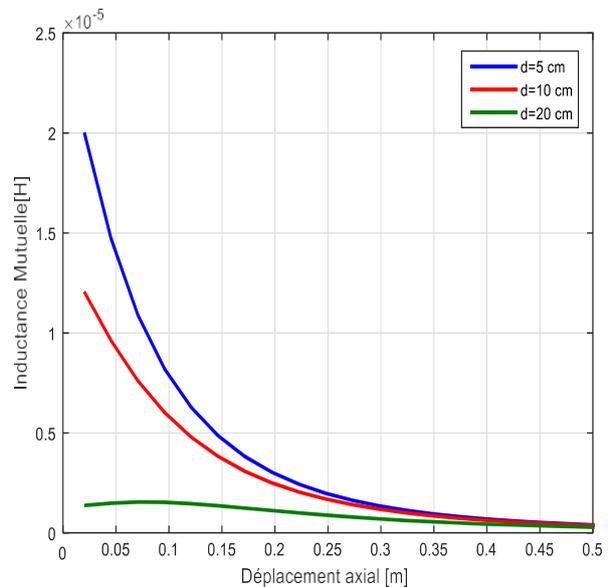


**Figure III.3 Inductance mutuelle en fonction de déplacement axial**

On voit donc bien que la mutuelle inductance  $M$  entre les deux bobines commence par une valeur qui avoisine la valeur de l'inductance propre pour diminuer ensuite exponentiellement avec l'augmentation de la distance entre ces deux bobines. Ce qui prouve l'exactitude des hypothèses de départ posées plus haut, concernant la mutuelle inductance entre deux bobines collées l'une à l'autre et l'approximation de  $M$  donnée sur la Fig.III.3.

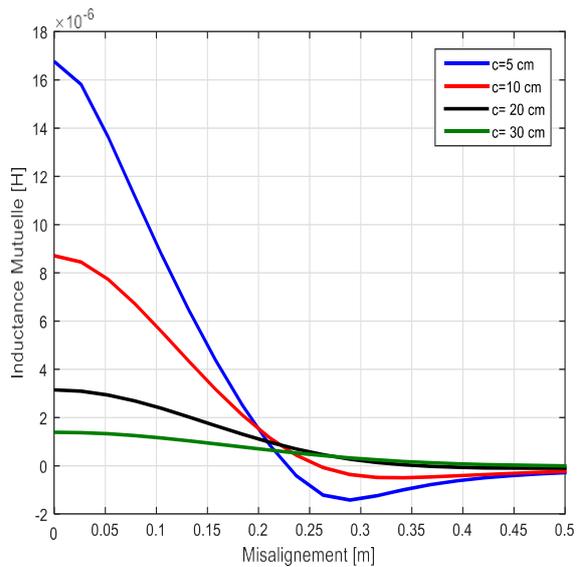


**Figure III.4 Coefficient de couplage en fonction de la distance entre les bobines et leur désalignement parallèle**

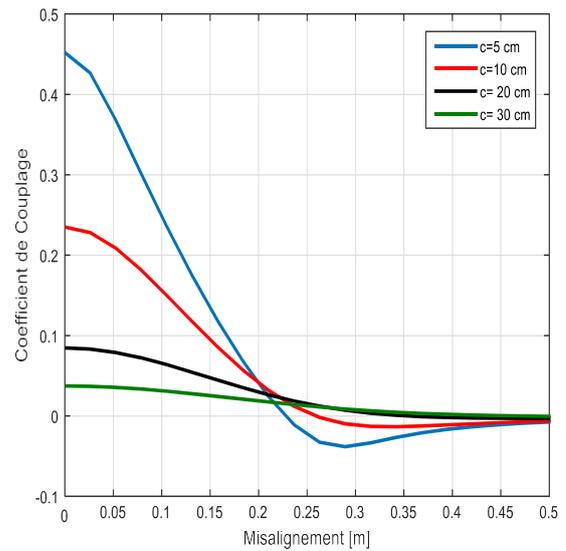


**Figure III.5 Inductance mutuelle en fonction de la distance entre les bobines et leur désalignement parallèle**

Les deux figures ci-dessus représentent la variation de la mutuelle inductance entre les deux bobines toriques avec des désalignements de 5 cm, 10 cm, 20 cm. Il ressort de l'analyse des résultats que la mutuelle inductance entre les deux bobines est d'autant plus grande que les deux bobines sont plus proches et sont moins désalignés. Ce résultat confirme que le meilleur couplage est obtenu avec des bobines presque collées l'une à l'autre et un désalignement nul entre les deux bobines. La Fig.III.2 permet de lire la valeur de  $M$  attendue pour un espacement et un désalignement donnés des deux bobines.



**Figure III.7 Évolution du facteur de couplage liaison en fonction du décalage selon Oy**



**Figure III.6 Évolution de l'efficacité de liaison en fonction du décalage selon Oy**

### III.3.2 Etude de l'influence du désalignement entre les deux bobines sur la mutuelle inductance et coefficient de couplage

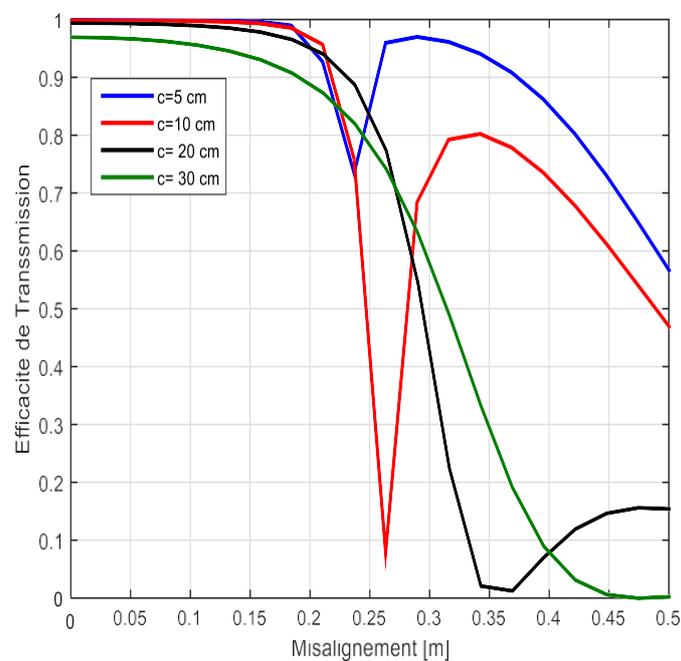
Les Fig.III.6 et III.7 représentent le résultat de la simulation de notre coupleur pour un désalignement sur l'axe des X variant de 0 à 100% et une distance variant de 5 à 30 cm d'entrefer entre les deux bobines.

Les Fig.III.6 et III.7 montrent l'influence de la variation de désalignement sur les grandeurs physiques du coupleur inductif. L'impact de la distance entre les bobines est montré sur les Figures tandis que la Fig.III.8 montrera les effets de l'éloignement de la bobine réceptrice par rapport à la bobine émettrice. L'inductance mutuelle est annulée pour  $|X|= 20$  à 25 cm. Puis change de signe et devient négative. Ceci est dû à l'inversion du courant dans le

secondaire. Les Figures montrent clairement que le coefficient de couplage dépend de l'inductance mutuelle ; les deux sont au maximum lorsque les axes primaires et secondaires coïncident, diminuent presque de la même manière pendant un décalage partiel et s'annulent lorsque le décalage est total.

### III.3.3 Effet du désalignement et de la variation de l'entrefer sur le rendement

La Fig. III.8 montre l'évolution de l'efficacité de liaison en fonction du désalignement et l'entrefer. Ce rendement est le rapport entre la puissance apparente de sortie et la puissance apparente d'entrée du système. D'après la Fig.III.8, l'efficacité de liaison présente trois zones bien différentes. En effet, pour une distance inter-bobine  $d \leq 0.2$  m, le rendement énergétique dans le cas de deux bobines vaut environ 90%, le transfert d'énergie est plus important. Et aussi, pour  $d=0.2$  cm à 0.35 cm, l'efficacité de liaison décroît beaucoup plus vite ce qui entraîne une zone ombrée d'efficacité de transmission. Cependant, la zone ombrée de l'efficacité de transmission où l'efficacité est de 0 % en raison de la diminution de l'efficacité par rapport à la taille de la bobine. Il a été possible de supprimer efficacement le phénomène de région d'ombre d'efficacité de transmission dans le système MR-WPT grâce à la rotation de la bobine réceptrice

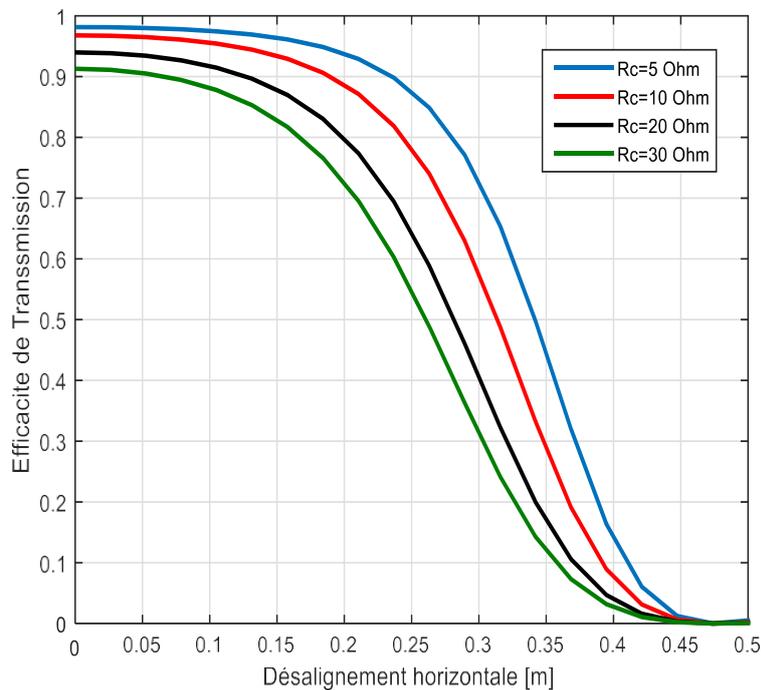


**Figure III.8 Évolution de l'efficacité de liaison en fonction du désalignement et l'entrefer**

### III.3.4 Effet de la résistance de charge $R_c$ sur l'efficacité énergétique du lien

Pour vérifier l'effet de la variation de la résistance de charge sur l'efficacité de transfert d'énergie, nous avons tracé en maintenant tous les composants de circuit constants, à l'exception de la valeur de  $R_c$  qui varie entre  $5 \Omega$  et  $30 \Omega$ .

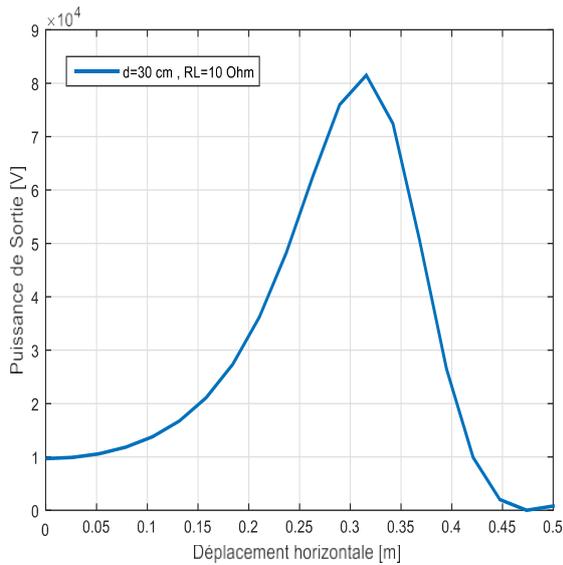
La Fig.III.9 présente la variation de l'efficacité de transfert d'énergie en fonction de la du désalignement pour différentes valeurs de la résistance de charge. Les résultats montrent que, l'efficacité de transfert d'énergie augment également proportionnellement avec la diminution de résistance de charge.



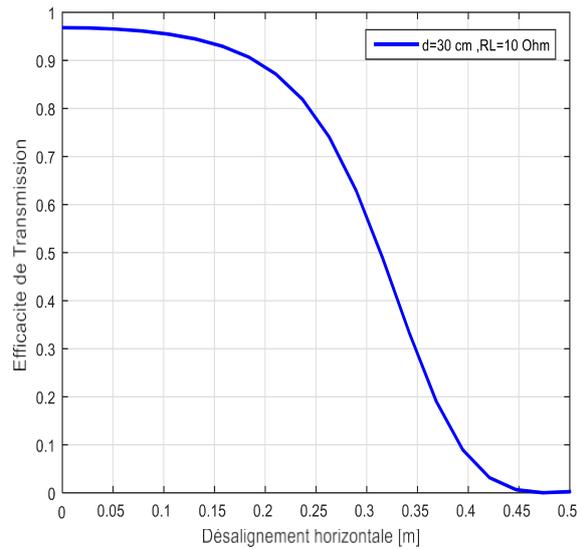
**Figure III.9 Efficacité de transfert d'énergie en fonction de la en fonction du désalignement pour différentes valeurs de la résistance de charge  $R_c$**

### III.3.5 Puissance et rendement en fonction de désalignement

Les résultats de la simulation montrent qualitativement que le rendement est élevé lorsque la bobine réceptrice est à un faible désalignement. Puis le rendement diminue lorsque la bobine réceptrice s'éloigne. La puissance reçue par la bobine réceptrice est élevée lorsqu'il se trouve sur une position éloignée par rapport à la bobine émettrice.



**Figure III.11 Simulation de la puissance de sortie en fonction du désalignement**



**Figure III.10 Simulation du rendement en fonction du désalignement**

Ces résultats montrent qu'il est difficile d'avoir simultanément un rendement maximum et une puissance maximale sur la même position et à la même fréquence.

### III.4 La zone morte de l'efficacité de transmission

Grâce à des analyses et à des simulations de modélisation physique, cette partie identifie la cause et la nature de la bande morte de l'efficacité de transmission dans les systèmes de transmission mal alignés latéralement.

La bande morte de l'efficacité de transmission existe entre la région à haut rendement et la région à faible rendement avec une forme approximative de « V ». est fonction du désalignement latéral et a pour résultat de limiter la plage de désalignement. A cette zone, l'efficacité de la transmission chute brusquement à zéro.

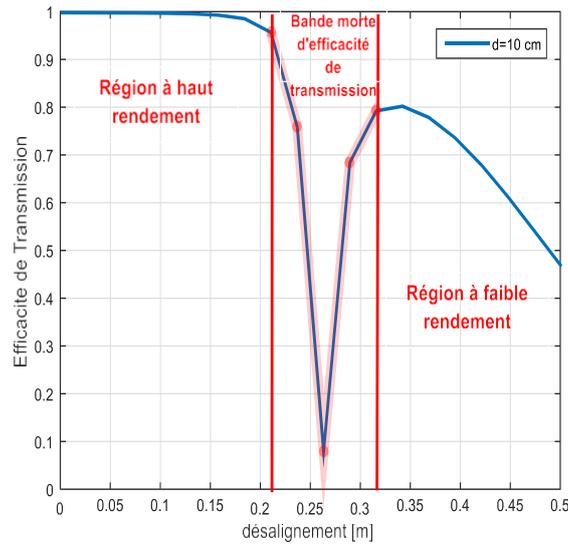


Figure III.12 Identification de la bande morte d'efficacité de transmission ( $R_c=10$ )

On peut observer à partir de la Fig.III.12 que la bande morte de l'efficacité de transmission réduit considérablement la plage de rendement élevé du système de transfert d'énergie sans contact et son efficacité de transmission globale pour les applications où un désalignement latéral existe.

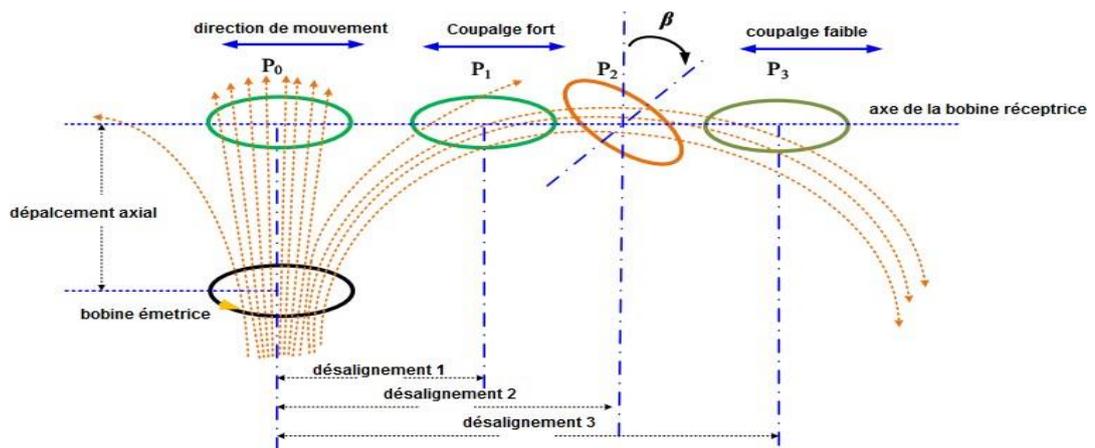
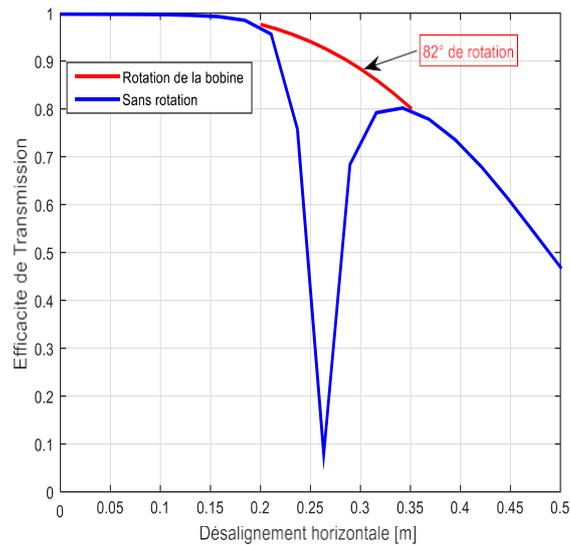


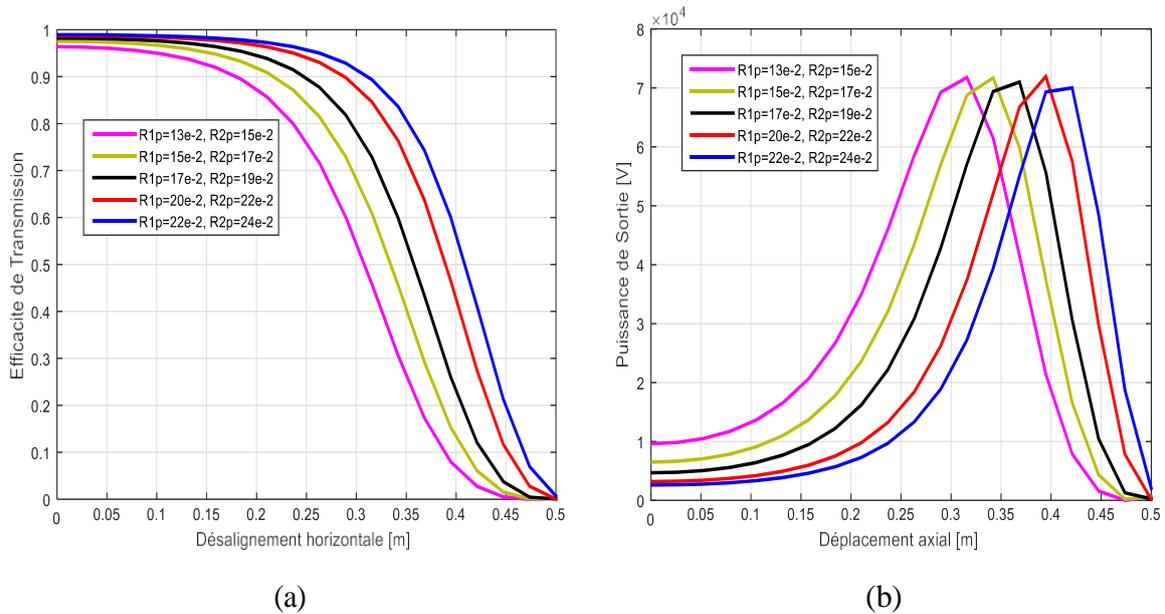
Figure III.13 Schéma d'illustration pour l'élimination du Région morte de l'efficacité de transmission : Rotation angulaire de la bobine réceptrice

La Fig.III.13 illustre l'effet du réglage du paramètre  $\beta$  dans la région morte. En d'autres termes, la bobine réceptrice est tournée angulairement afin d'éliminer la bande. Cela entraînera une augmentation de la quantité de flux traversant la bobine réceptrice à P2, ce qui entraînera l'élimination du point de couplage nul et l'augmentation de l'efficacité de transmission dans cette (les valeurs du coefficient de coupage augmentent), comme illustré à La Fig.III.13.



**Figure III.14 Elimination de la région morte de l'efficacité de transmission par rotation angulaire de la bobine réceptrice ( $\beta= 82^\circ$ )**

La courbe d'efficacité de transmission maximale obtenue est illustrée à la Fig.III.14. La courbe rouge représente l'efficacité de transmission maximale obtenue en utilisant la rotation angulaire de la bobine réceptrice, ce qui élimine la zone morte de transmission. La courbe d'efficacité de transmission maximale améliorée complète est illustrée à la Fig.III.14.



**Figure III.15 Évolution de la puissance transmissible et l'efficacité de transmission pour différents largeur des bobines**

### III.5 Optimisation du couplage inductif

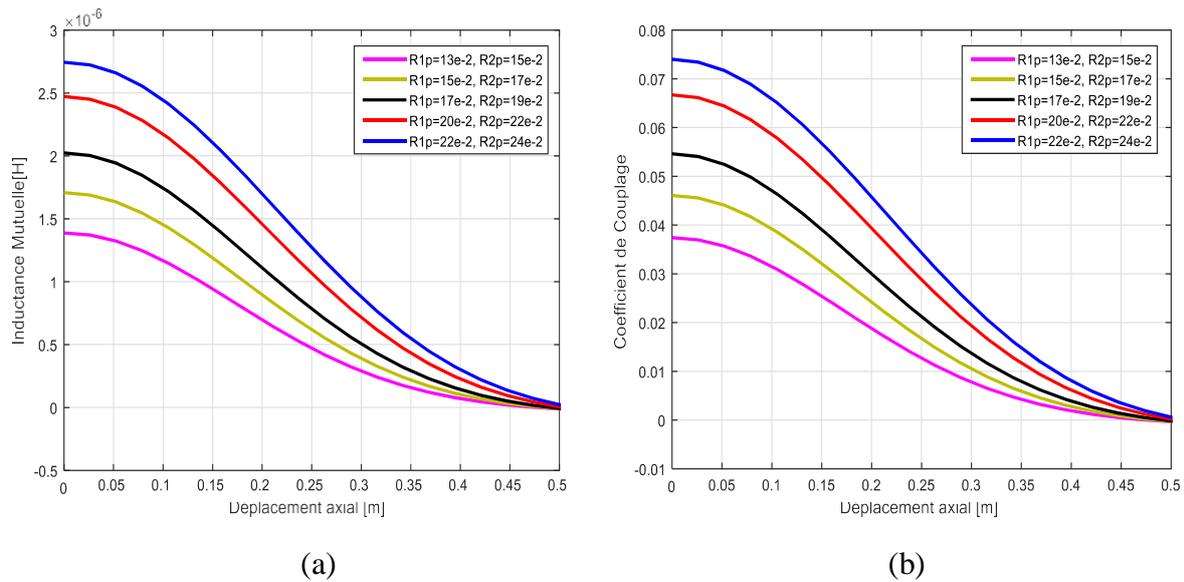
Le dimensionnement est rendu délicat pour le mauvais couplage impose, lignes de champ qui sont mal canalisées, la structure de conversion, la compensation choisie pour connaître les niveaux des courants, la forme du circuit magnétique.

La définition des dimensions du coupleur ainsi que celle des rapports de forme est un exercice très complexe qui impose de considérer, via un processus d'optimisation, l'ensemble des contraintes. Afin d'assurer un bon rendement, il sera nécessaire :

- soit d'augmenter la largeur du bobinage, conduisant à un bobinage étalé de faible hauteur. Cette solution sera préférée pour des raisons pratiques de réalisation.
- soit de réduire la largeur du bobinage.

Ces deux solutions ont été mises en évidence par le processus d'optimisation.

À partir du constat précédent, nous procédons à une série de simulations pour différentes dimensions du bobinage du rayon du coupleur, et ceci pour déterminer le bobinage optimale. Les conditions de simulation sont données dans le Fig.III.15 et Fig.III.16.



**Figure III.16 Évolution de l'inductance mutuelle et le coefficient de couplage pour différents largeur des bobines**

Le processus vise à optimiser le rendement ou la surface occupée par le coupleur et permet de déterminer les dimensions du circuit magnétique et des bobinages ainsi que la fréquence et la densité de courant. L'examen de ces résultats montre qu'il y a d'optimum. À un rendement maximal avec puissance de sortie très élevé, la largeur de la bobine émettrice extérieure devra être la plus grande possible pour maximiser le couplage inductif, ce qui privilégiera les coupleurs « étalés » de rayon important. En particulier, les résultats ont montré l'influence très forte de la largeur de la bobine sur l'inductance mutuelle, cette largeur devant être suffisante pour augmenter l'induction.

### III.6 Conclusion

Les travaux présentés dans cette partie ont comme objectif la modélisation et l'optimisation d'un système de transfert d'énergie par couplage inductif. Pour ce faire, nous avons proposé un modèle analytique permettant d'évaluer les paramètres électriques et électromagnétiques ainsi que les performances en termes de rendement énergétique du lien inductif. Un système de transfert d'énergie composé de bobines toriques a été proposé.

Grâce à des simulations de modélisation physique, cette partie identifie la cause et la nature de la bande morte de l'efficacité de transmission dans les systèmes de transmission mal alignés latéralement. Pour résoudre ce problème, la bobine réceptrice est tournée angulairement afin d'éliminer la zone morte de l'efficacité de transmission.

Aussi à cette partie, nous avons proposé un processus d'optimisation basé sur le changement géométriques de la bobine primaire pour augmenter le rendement du couplage. Cette solution sera préférée pour des raisons pratiques de réalisation.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les travaux de recherches présentés dans ce projet de fin d'étude ont consisté en une étude du transfert d'énergie entre deux bobines inductives. L'objectif est de caractériser le comportement électrique et magnétique de ces bobines et d'optimiser les performances de couplage magnétique et d'efficacité énergétique dans un environnement automobile.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous nous sommes attachés à décrire l'état de l'art de transfert d'énergie sans fil ainsi que les différentes technologies développées pour transférer une puissance entre une bobine primaire vers un élément secondaire.

Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés à la définition des coupleurs inductifs et les paramètres qui le caractérisent. Après des rappels théoriques sur la génération d'un champ magnétique à partir d'un courant et l'inductance créée par les enroulements d'une bobine, nous avons présenté la modélisation électromagnétique de ces coupleurs inductifs ainsi des modèles analytiques sur l'inductance mutuelle entre deux bobines toriques et la définition du coefficient de couplage magnétique. La notion d'efficacité énergétique bobine-bobine est abordée au travers d'une formulation calculant l'efficacité énergétique maximale et prenant en compte le facteur de couplage ainsi que les facteurs de qualité des bobines.

Dans la dernière partie, nous nous sommes intéressés à aux applications et les résultats. Les travaux présentés dans cette partie ont comme objectif la modélisation et l'optimisation d'un système de transfert d'énergie par couplage inductif. Pour ce faire, nous avons proposé un modèle analytique permettant d'évaluer les paramètres électriques et électromagnétiques ainsi que les performances en termes de rendement énergétique du lien inductif. Un système de transfert d'énergie composé de bobines toriques a été proposé.

Grâce à des simulations de modélisation physique, cette partie identifie la cause et la nature de la bande morte de l'efficacité de transmission dans les systèmes de transmission mal alignés latéralement. Pour résoudre ce problème, la bobine réceptrice est tournée angulairement afin d'éliminer la zone morte de l'efficacité de transmission.

Aussi à cette partie, nous avons proposé un processus d'optimisation basé sur le changement géométriques de la bobine primaire pour augmenter le rendement du couplage. Cette solution sera préférée pour des raisons pratiques de réalisation.

## Bibliographie

### Chapitre 01 :

- [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] ÉRIC LABOURÉ. Recharge sans contact de véhicules électriques. Publication 3EI N° 3EI 2020-100
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] C. T. Rim and Chris Mi, Wireless Power Transfer for Electric Vehicles. 2017
- [6] <https://www.waseda.jp/top/en-news/49596>
- [7] [http://www.serpentine.ch/p\\_realisations/Realisations.html](http://www.serpentine.ch/p_realisations/Realisations.html)
- [8] [http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE\\_11\\_20171201.pdf](http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE_11_20171201.pdf)
- [9] <http://www.assistancetechnic26.fr/blog/depanneur-electromenager/fonctionnement-plaque-induction/>
- [10] Transmission d'énergie sans fil au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radiofréquence. Rapport UIT-R SM.2303-1.
- [11] <https://www.usinenouvelle.com/article/la-recharge-du-vehicule-electrique-s-affranchit-du-fil.N1924012>
- [12] [https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST\\_OLEV\\_en.pdf](https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_en.pdf)
- [13]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_power\\_transfer](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer)
- [14] : Karim Kadem, « Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques », Thèse Université Paris-Saclay, 2020
- [15] : Paul-Antoine Gori, « Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique », Thèse Université Paris-Saclay, 2019  
[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf)
- [16] <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/technologie-renault-teste-route-recharge-voitures-electriques-33574/>
- [17] A. Hammoud. Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts. Université Montpellier, 2017.
- [18] M. IBRAHIM. Analyse d'Interopérabilité d'un Système de Recharge Sans Contact pour le Véhicule Electrique. UNIVERSITE PARIS-SUD.2015
- [19] <https://www.energystream-wavestone.com/2018/03/lelectricite-fil-bientot-realite-quotidien/>

### Chapitre 02 :

- [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'Odysée, Flammarion, Paris, 1983
- [6] P. GORI, « Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique », Thèse Université Paris-Saclay, 2019
- [7] Transmission d'énergie sans fil au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radiofréquence. Rapport UIT-R SM.2303-1. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2303-1-2015-PDF-F.pdf)
- [8] A. HAMOUD. Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts. Université Montpellier, 2017.
- [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](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 microsystemes," 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](http://www.ambrell.fr).
- [14] M. IBRAHIM, « Analyse d'interopérabilité d'un système de recharge sans contact pour véhicule électrique », Thèse de doctorat université Paris-Sud, Ecole doctorale science et technologie de l'information, des télécommunications et des systèmes, Septembre 2014.
- [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.
- [23] S. MOHANH « Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances, » IEEE Journal of Solid -State Circuits, 34, no 10 (1999), pp. 1419-1424.

[24] L. Bettaieb, F. Costa . Transmission d'énergie par couplage inductif. Application aux capteurs biomédicaux intégrés. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France.

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