

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

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



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue d'obtention du diplôme de :

MASTER en Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Couplage inductif multi-bobines :
application au transfert de l'énergie
électrique sans contact**

Réalisé par :

Desdous Lotfi

Lecheheb Abderrahime

Encadré par :

Mr. Mohdeb Naamane

Promotion 2020

Remerciements

*Avant tout nous remercions "**Allah**" tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la force pour accomplir ce travail.*

Merci à Dieu de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

Nous adressons nos remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce modeste travail. En particulier :

- ***Mr. MOHDEB NAAMANE*** : *notre directeur de mémoire pour sa patience, et surtout ses conseils judicieux, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

Nos vifs remerciements à :

- ***Nos chers parents***, *pour leur soutien constant et leurs encouragements.*

Nos remerciements à monsieur le président et les membres du jury qui nous font honneur d'accepter de juger notre travail. Enfin, nous souhaitons remercier chaleureusement toutes les personnes qui, en prodiguant des conseils et en relevant les obstacles, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

SOMMAIRE

Remerciement	I
Summaries	II
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Introduction générale	1

CHAPITRE I

L'état de l'art de transfert d'énergie sans fil

I.1. Introduction	3
II. L'état de l'art	3
II.1 Recharge statique	5
II.2 Recharge dynamique	6
III. Techniques employées dans les applications TESF ou liées à ces applications	8
III.1 Pour les dispositifs portables et mobiles	8
III.1.1 Technique TESF par induction magnétique	8
III.1.2 Technique TESF par résonance magnétique	9
III.1.3 Technique TESF par couplage capacitif	9
III.2 Pour les appareils domestiques	10
III.3 Pour les véhicules électriques	11
III.4 Pour l'armée	13
III.5 Le milieu médical	13
IV. Les avantages de l'énergie sans fil	13
V. Conclusion	14

Chapitre II

Modèle théorique du transfert d'énergie sans fil

I. Introduction	15
II. Les Différents Modes De Couplage	15
III. Analyse du WPT via des résonances magnétiques couplées	16
IV. Compensation de la puissance réactive	16
V. Les différentes géométries de bobine	17
VI. Théorie du transfert d'énergie sans fil	18

VI.1 Le facteur de couplage.....	20
VI.2 Mutuelle inductance	20
VI.2.a Lien inductif entre deux spires	21
VI.2.b Lien inductif entre deux bobines plates.....	22
VI.3 Calcule du self inductance L	23
VII. Modèle électrique de circuit serie-serie	23
VIII. Conclusion.....	26

Chapitre III

Résultats et simulations

I. Introduction.....	27
II. Modèle proposé.....	27
III. Position relative.....	27
IV. Résultats de simulation	28
IV.1 Effet des distances verticales sur les performances du système.....	29
IV.2 Effet des désalignements latéraux sur les performances du système.....	31
V. Conclusion.....	32
Conclusion générale.....	33
Références.....	34

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1 : Transmission d'énergie par ondes radio - Nikola Tesla dans son laboratoire de Colorado Springs.....	3
Fig.I.2 : Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion : a) Vue d'ensemble, b) Réseau de 2376 rectennas	4
Fig.I.3 : Waseda Electric Bus, source	4
Fig.I.4 : Secondaire du système Primove développé par Bombardier, (a) secondaire pendant le déplacement, (b) secondaire abaissé lors de la recharge.....	5
Fig.I.5 : Bobines utilisées par le MIT pour tester la résonance magnétique.....	6
Fig.I.6 : Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train.....	6
Fig.I.7 : Recharge par induction dynamique d'un véhicule électrique.....	7
Fig.I.8 : Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté	7
Fig.I.9 : Système DWPT développé par Renault-Supelec, source.....	8
Fig.I.10 : Schéma du montage TESF par couplage inductif.....	8
Fig.I.11 : Système de recharge par induction de téléphone portable.....	8
Fig.I.12 : Schéma du montage utilisé pour la TESF par couplage magnétique résonant.....	9
Fig.I.13 : Schéma du système TESF par couplage capacitif.....	10
Fig.I.14 : Appareils de cuisine à alimentation sans fil	11
Fig.I.15 : La TESF-CM pour les véhicules électriques	12
Fig.I.16 : Système de charge par induction d'une voiture	12
Fig.I.17 : Prototype de gilet équipé de la technologie WiTricity	13
Fig.I.18 : Un stimulateur cardiaque ainsi qu'une bobine prototype	13
Fig.II.1 Les différents modes de couplage	15
Fig.II.2 Topologies de résonance : a) SS, b) SP, c) PS and d) PP	16
Fig.II.3 Schéma électrique équivalent de la topologie SS (à la fréquence de résonance)	17
Fig.II.4 Formes des bobines de CI : a) circulaire, b) carrée et c) elliptique.....	18
Fig.II.5 Champ magnétique généré par la bobine d'émission traversant la bobine réceptrice ...	18
Fig.II.6 Variation du facteur de couplage.....	20
Fig.II.7 Couplage inductif entre deux spires placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial).....	21
Fig.II.8 Deux bobines plates couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaires et axial)	22
Fig.II.9 Une bobine spirale	23

Fig.II.10 Modèle électrique équivalent du système de transfert d'énergie	24
Fig.II.11 Modèle électrique équivalent du lien inductif entre deux bobines placées arbitrairement dans l'espace	24
Fig.III.1 Couplage inductif entre deux spires placées arbitrairement dans l'espace	27
Fig.III.2 Vue en coupe d'une bobine spirale circulaire.....	27
Fig.III.3 Arrangement basique de la liaison sans fil : a) Alignement frontal, (b) désalignement angulaire, et (c) désalignement latéral.....	28
Fig.III.4 Comparaison entre les résultats de l'approche analytique pour différentes valeurs de distance : a) Inductance mutuelle, b) Coefficient de couplage.....	29
Fig.III.5 Comparaison entre les résultats de l'approche analytique pour différentes valeurs de distance : a) Efficacité du transfert ; b) Puissance.....	29
Fig. III.6 performances des combinaisons P-Sx en fonction des désalignements a) Inductance mutuelle ; b) Facteur de couplage	30
Fig.III.7 Efficacité de transfert des cinq bobines de couplage ci-dessus par rapport au désalignement à un entrefer de 4 cm a) Efficacité du transfert ; b) Puissance.....	30
Fig.III.8 Efficacité de transfert et puissance en fonction du désalignement à différents entrefer a) Puissance b) Efficacité de transfert.....	31

Liste des tableaux

Table I : Dimensions des bobines.....	29
---------------------------------------	----

Introduction générale

Il y a plus de cent ans, Tesla avait déjà proposé plusieurs systèmes de transfert d'énergie sans contact utilisant des champs électromagnétiques de forte intensité, variant dans le temps. Les avancées dans le domaine des communications sans fil ont largement aidé au développement des techniques de transmission d'énergie sans fil. Le développement moderne des systèmes de transmission sans fil a été largement stimulé par les avancées dans le domaine des télécommunications et de la télédétection radar qui ont eu lieu pendant la 2ème guerre mondiale. C'est l'utilisation des microondes qui relance la perspective de la transmission d'énergie sans fil [27].

L'évolution technique rapide dans ce domaine tend à montrer que dans l'avenir, le nombre d'appareils électroniques grand public rechargeables ou utilisables sans fil prendra une large place. Le nombre de fabricants d'inductances pour la charge sans contact et de circuits intégrés va lui aussi augmenter pour répondre aux besoins croissants des utilisateurs.

Une découverte en 2006 a permis d'améliorer le rendement afin que la transmission d'énergie sans fil soit attirante. Marin Soljacic un professeur assistant du département physique et du laboratoire de recherche du Massachusetts Institute of Technology ainsi que ces collègues ont pu allumer une ampoule de 60 watts à 2 mètres de distance avec un rendement total de 40%. Cette amélioration est l'utilisation de la résonance magnétique et le système se nomme WiTricity. Dans l'exemple de l'ampoule, les bobines ont été conçues pour résonner à 10MHz et ainsi transférer le maximum d'énergie. Le fait d'utiliser la résonance magnétique permet d'avoir un rendement correct à des fréquences inférieures aux gigahertz pour une application commerciale, et permet de ne pas interférer avec d'autres appareils fonctionnant sur d'autres fréquences. Depuis 2009 des consortiums internationaux ont été créés pour établir des standards concernant le rendement du transfert de la puissance, la sécurité... [28].

Dans le couplage magnétique deux bobines utilisent que l'on considère couplés par induction mutuelle ou couplés magnétiquement. Il fonctionne sur des distances très faibles, typiquement de l'ordre de quelques centimètres, mais se caractérise par un très bon rendement.

Le couplage magnétique résonant entre deux structures, généralement des enroulements circulaires, permet de faire du transfert d'énergie en champ proche. Les fréquences de

fonctionnement sont relativement faibles (de l'ordre de quelques MHz), ce qui fait que l'émetteur et le récepteur sont assez encombrants.

Un transfert efficace de puissance peut être effectué en utilisant deux ou plusieurs objets résonants à la même fréquence. Comparé au couplage inductif non résonant, le couplage résonant est plus efficace. L'amélioration est due à l'utilisation du régime de couplage fort des objets résonants, ce qui permet de maximiser le transfert.

La détermination de l'inductance d'une bobine peut être nécessaire pour la compréhension de la conception d'un système de transfert d'énergie sans fil. Il existe plusieurs formules analytiques pour évaluer l'inductance mutuelle.

Dans ce travail, nous étudions le TSFE par une méthode de couplage résonance magnétique entre deux bobines spirales circulaires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

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

Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé des expressions analytiques et électriques pour étudier les performances d'un système TESF et donné de la physique derrière la transmission d'énergie par couplage magnétique.

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

Chapitre I : L'état de l'art de transfert d'énergie sans fil

I. INTRODUCTION

La transmission de puissance sans fil est une technologie ayant un énorme potentiel qui permet le développement des systèmes et des réseaux hautement intégrés et autonomes. La transmission de puissance sans fil offre un potentiel énorme dans un vaste champ d'applications. L'électricité sans fils permettrait d'éliminer ou de réduire grandement la taille des batteries [1-2-3].

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.

II. L'ÉTAT DE L'ART

Au début du 20^{ème} 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.

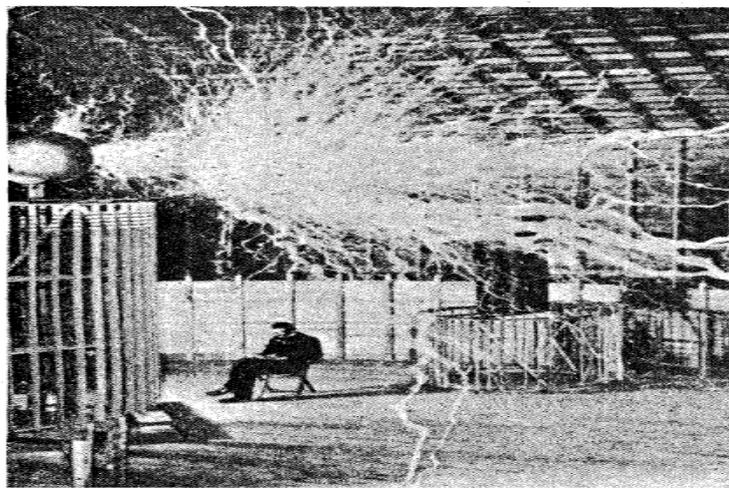


Fig. I.1 : Transmission d'énergie par ondes radio - Nikola Tesla dans son laboratoire de Colorado Springs

En 1969, Peter Glaser présente le concept de SPS (Solar Power System). Ce projet pourrait présenter une alternative aux problèmes énergétiques que connaît la planète, mais aussi comme source d'énergie propre et écologique. Le système issu de ce projet comporte un satellite en orbite géostationnaire qui capte l'énergie solaire, cette énergie solaire est convertie en énergie microonde et envoyée sur terre.

En 1975, l'expérimentation terrestre de Goldstone menée par Raytheon représente un tournant historique dans le domaine de la TEF. Elle a contribué de manière considérable à la validation du concept et à la crédibilité du projet SPS. Avec un système pilote, une puissance continue de 30 KW a été récupérée et un rendement global de 54% a été mesuré et certifié. La distance entre les antennes d'émission et de réception est de 1.6 Km [1].

A partir de 1994, le laboratoire d'Electronique, d'Energétique et des Procédés de l'université de la Réunion (France), en collaboration avec l'équipe japonaise de l'ISAS, s'est lancé dans un projet d'envergure qui consistait à étudier la faisabilité d'un transport d'énergie sans fil pour alimenter l'île de Grand Bassin, région qui est fortement accidentée et difficilement accessible. La puissance d'émission était de 800 W sur une distance de 40 m. En réception, une rectenna composée de 2376 antennes dipôles réparties sur une surface de 11.76 m² a été utilisée pour collecter et convertir une partie de l'énergie RF émise. Trois lampes de 9 W furent allumées grâce au dispositif développé, ce dernier présentait un rendement global d'environ 5% [2].



a)



b)

Fig.I.2 : Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion : a) Vue d'ensemble
b) Réseau de 2376 rectennas



Fig.I.3: Waseda Electric Bus, source

II.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.3). 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].

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



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

Une découverte en 2006 a permis d'améliorer le rendement afin que la transmission d'énergie sans fil soit attirante. Marin Soljacic un professeur assistant du département physique et du laboratoire de recherche du Massachusetts Institute of Technology ainsi que ces collègues ont pu allumer une ampoule de 60 watts à 2 mètres de distance avec un rendement total de 40%. Cette amélioration est l'utilisation de la résonance magnétique et le système se nomme WiTricity. Dans l'exemple de l'ampoule, les bobines ont été conçues pour résonner à 10MHz et ainsi transférer le maximum d'énergie. Le fait d'utiliser la résonance magnétique permet d'avoir un rendement correct à des fréquences inférieures aux gigahertz pour une application commerciale, et permet de ne pas interférer avec d'autres appareils fonctionnant sur d'autres fréquences.

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 [6].



Fig.I.5 : Bobines utilisées par le MIT pour tester la résonance magnétique.

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.6 : Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train.

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.II.6). 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.

II.2 Recharge dynamique

Dans ce type de recharge, le véhicule se charge en roulant (Fig.I.7). 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].

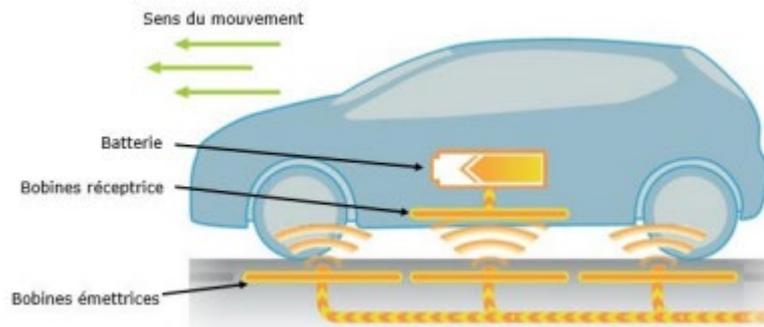


Fig.I.7 : Recharge par induction dynamique d'un véhicule électrique

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.8).

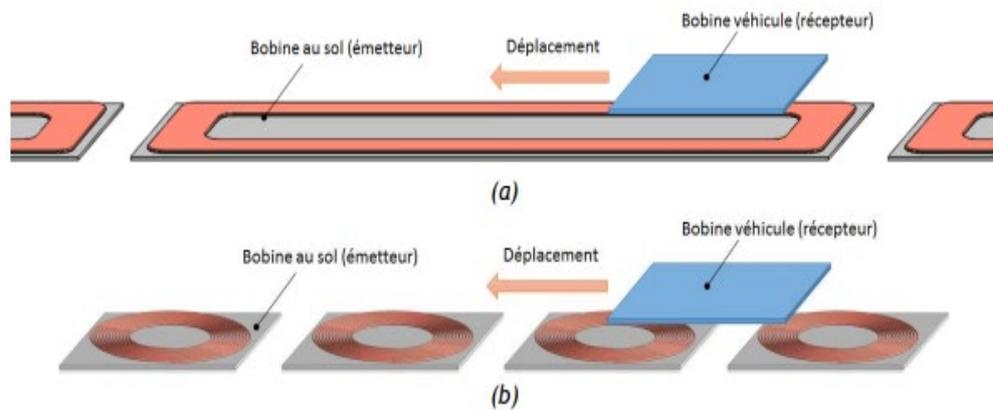


Fig.I.8 : Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté [3]

Pour les systèmes à émetteur unique (Fig.I.8.a) la bobine réceptrice est de taille réduite 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.8.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 [3-11-12-13-14-15].

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 [16].



Fig.I.9 : Système DWPT développé par Renault-Supelec, source [16]

III.TECHNIQUES EMPLOYEES DANS LES APPLICATIONS TESF OU LIEES A CES APPLICATIONS

III.1 Pour les dispositifs portables et mobiles

III.1.1 Technique TESF par induction magnétique

La TESF par induction magnétique est une technique bien connue, qui est utilisée depuis longtemps dans les transformateurs. La transmission d'énergie par induction dans l'air, dans laquelle la bobine primaire et la bobine secondaire sont séparées physiquement, est également une technique connue depuis plus d'un siècle. Avec un réseau de bobines, cette technique offre par ailleurs une certaine souplesse concernant l'emplacement de la bobine du récepteur par rapport à l'émetteur [17].

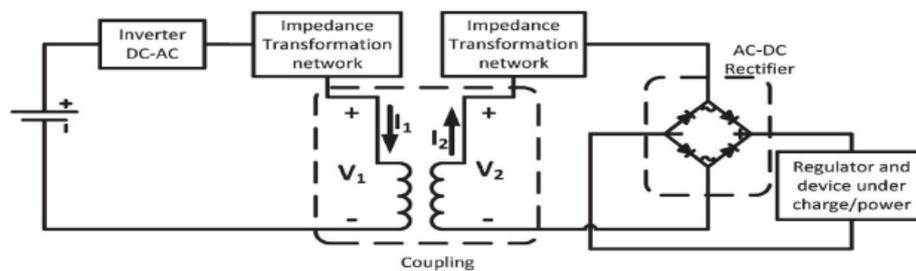


Fig.I.10 : Schéma du montage TESF par couplage inductif

Cette technique est largement employée dans la recharge sans fil de la batterie interne de dispositifs grand public tels que des brosses à dents électriques ou des souris sans fil, les téléphones portables. Le schéma simplifié du montage est donné dans la Fig.I.11.



Fig.I.11 : Système de recharge par induction de téléphone portable

III.1.2 Technique TESH par résonance magnétique

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, et il a été validé expérimentalement en 2007. La méthode utilise une bobine et un condensateur en tant que résonateur, l'énergie électrique étant transmise par résonance électromagnétique entre la bobine de l'émetteur et celle du récepteur (couplage par résonance magnétique). La TESH par résonance magnétique permet de transmettre l'énergie électrique sur une distance pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres. Cette technique offre également une certaine souplesse concernant l'emplacement de la bobine du récepteur par rapport à la bobine d'émission [3-6-18-19-20].

L'élément émetteur et l'élément récepteur sont des circuits RLC (résistance, bobine, condensateur) accordés tous les deux sur une même fréquence de résonance. Lorsque la bobine émettrice est alimentée avec un signal calé sur la fréquence de résonance, ce montage permet d'alimenter un récepteur de même fréquence de résonance sans qu'il soit nécessaire d'aligner les deux bobines. La distance séparant les deux bobines peut également être bien plus grande que lorsque la résonance n'est pas utilisée.

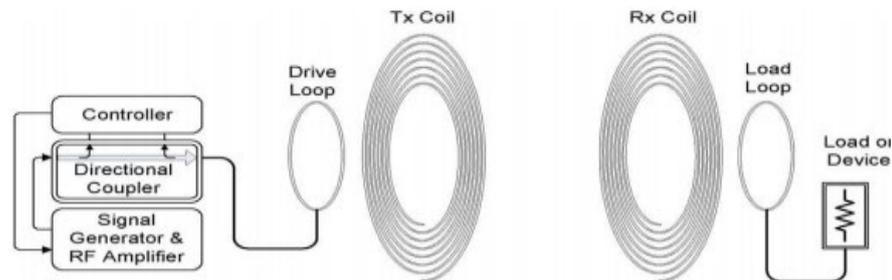


Fig.I.12 : Schéma du montage utilisé pour la TESH par couplage magnétique résonant

Les principales applications « grand public » du couplage par résonance se sont longtemps concentrées dans le secteur médical, notamment pour permettre la recharge des pacemakers de façon non invasive. Elle est désormais aussi utilisée par certaines normes pour la recharge des smartphones et tablettes. Le rendement élevé permet également d'envisager des applications à plus forte puissance, comme la recharge d'ordinateurs portables (quelques dizaines de watts), mais aussi de véhicules électriques (plusieurs kW).

III.1.3 Technique TESH par couplage capacitif

Le système TESH par couplage capacitif possède deux ensembles d'électrodes et n'utilise pas de bobines comme dans le cas des systèmes TESH de type magnétique (Fig.I.13). L'énergie est transmise via un champ d'induction généré par le couplage des deux ensembles d'électrodes. Le système à couplage capacitif présente les avantages suivants :

- Pas de génération de chaleur dans la zone de transmission d'énergie sans fil.
- Le niveau d'émission du champ électrique est faible en raison de la structure du système de couplage.

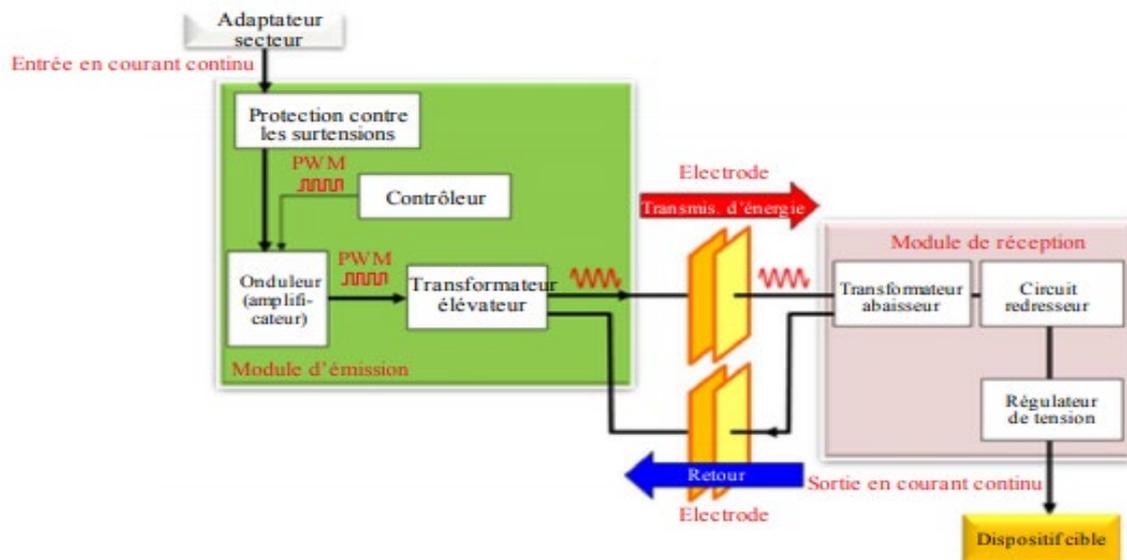


Fig.I.13 : Schéma du système TESF par couplage capacitif [21]

III.2 Pour les appareils domestiques

Pour les appareils domestiques, le niveau de puissance va généralement jusqu'à plusieurs kilowatts, et pour la charge, on peut utiliser un moteur ou un système de chauffage. Les produits futurs prendront en charge une puissance de plus de 2 kW et un nouveau projet d'appareils de cuisine sans cordon est actuellement examiné. Compte tenu de la forte utilisation d'énergie chez les particuliers, il est préférable d'utiliser des fréquences de l'ordre de plusieurs dizaines de kHz pour limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques. Des dispositifs très fiables tels que les IGBT sont généralement utilisés et ces dispositifs fonctionnent dans la gamme de fréquences 10-100 kHz. Les produits utilisés dans la cuisine doivent respecter les exigences en matière de sécurité et de champs électromagnétiques. La distance entre l'émetteur et le récepteur est censée être inférieure à 10 cm. Les images ci-après montrent des exemples d'appareils de cuisine à alimentation sans fil qui seront bientôt commercialisés [1-2-3-15-20-21].



Fig.I.14 : Appareils de cuisine à alimentation sans fil

III.3 Pour les véhicules électriques

Il existe plusieurs types de méthodes TESF, mais la transmission d'énergie sans fil utilisant un champ magnétique (TESF-CM) est l'une des principales méthodes étudiées aux fins de la normalisation en ce qui concerne la TESF pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables. La TESF-CM pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables utilise à la fois l'induction et la résonance magnétique. Les applications prévues pour les véhicules de tourisme reposent sur les aspects suivants [21] :

1) Cadre d'utilisation de la TESF : résidence, appartement, parking public, etc.

5) Un système TESF pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables à au moins deux bobines, l'une étant le dispositif primaire et l'autre le dispositif secondaire. L'énergie électrique est transmise du dispositif primaire au dispositif secondaire par un flux/champ magnétique.

6) Emplacement des dispositifs (emplacement des bobines) :

a) Dispositif primaire : sur ou dans le sol.

b) Dispositif secondaire : sous le véhicule.

7) Entrefer entre les bobines primaire et secondaire : moins de 30 cm.

8) Exemple de classe de puissance d'émission : 3 kW, 6 kW ou 20 kW.

9) Sécurité : le dispositif primaire ne peut commencer à transmettre de l'énergie que si le dispositif secondaire est situé au bon endroit pour la TESF. Le dispositif primaire doit cesser la transmission en cas de difficulté à maintenir une transmission en toute sécurité.

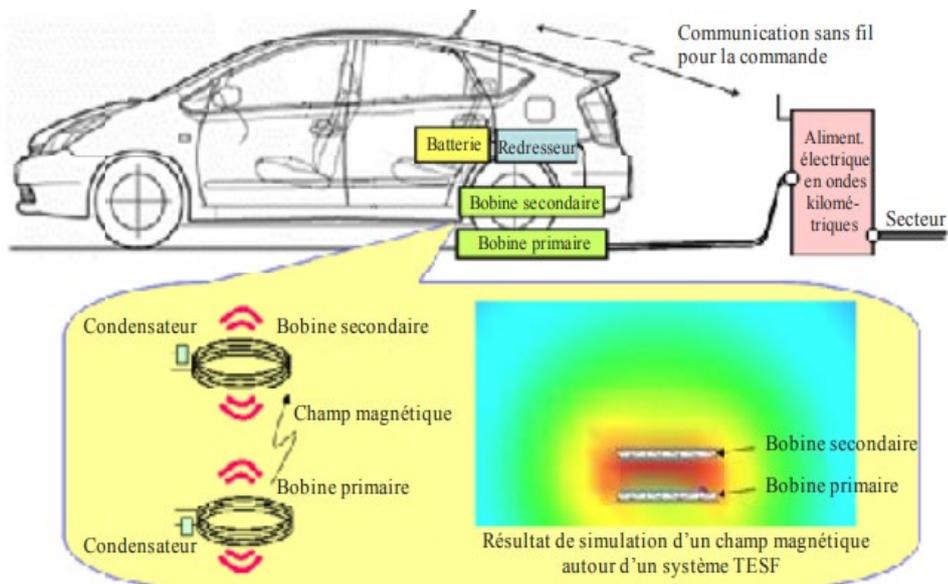


Fig.I.15 : La TESF-CM pour les véhicules électriques [21]

Les véhicules électriques et hybrides présentent un grand intérêt écologique, mais la recharge rebutent 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.

La Fig.I.16 résume le principe de la charge par induction.

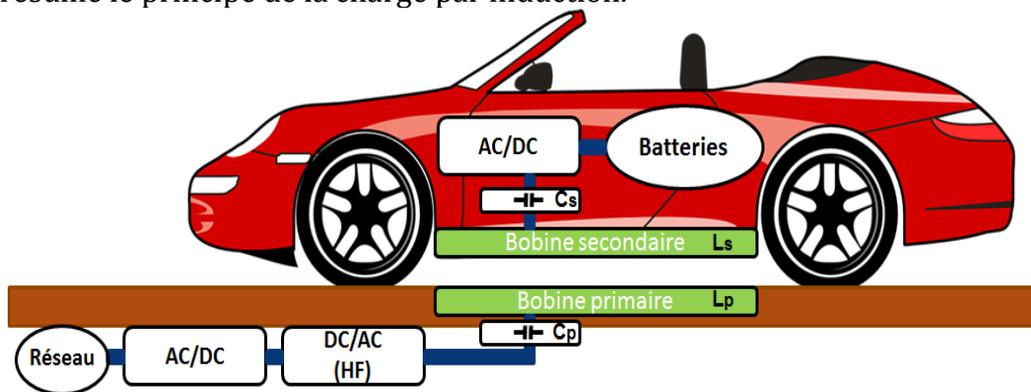


Fig.I.16 : Système de charge par induction d'une voiture

Dans un premier temps un convertisseur AC-DC redresse la tension du réseau. Un convertisseur DC-AC alimente ensuite la bobine primaire, posée sur le sol ou enterrée, à une fréquence variante entre 20 et 100kHz. La bobine primaire génère alors un champ magnétique qui va induire une tension alternative aux bornes de la bobine secondaire intégrée au véhicule. Un convertisseur AC-DC connecté à cette bobine secondaire permet la recharge des batteries. Les condensateurs de résonance notés C_p et C_s sont utilisés au primaire et au secondaire pour compenser l'énergie réactive des bobinages [15].

III.4 Pour l'armée

L'entreprise WiTricity travaille sur des composants de la prochaine génération militaire, et vise à optimiser la forme, l'ajustement et la fonction des systèmes et des dispositifs militaires afin qu'ils soient plus efficaces, sûrs et fiables. L'entreprise élabore aussi le transfert d'énergie du gilet du soldat au casque et du casque à la lunette optique pour permettre de la désembuer.



Fig.I.17 : Prototype de gilet équipé de la technologie WiTricity

III.5 Le milieu médical

Le domaine médical profitera aussi de la recharge sans-fil, notamment pour les stimulateurs cardiaques. Tous les 5 à 7 ans un changement de batterie doit être effectué pour que le stimulateur soit toujours sous tension, cette opération est identique à celle de la pose du stimulateur. Pour éviter cette lourde opération, la transmission d'énergie sans fil sans fil permettra de recharger la batterie et ainsi de repousser la date de l'opération.

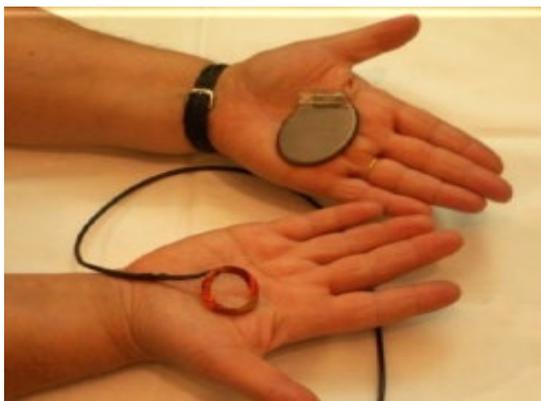


Fig.I.18 : Un stimulateur cardiaque ainsi qu'une bobine prototype

IV. LES AVANTAGES DE L'ENERGIE SANS FIL

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

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

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

V. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté un état de l'art du domaine de la transmission d'énergie sans fil. Ensuite, On a présenté les différentes techniques de transmission d'énergie sans fil et enfin, les différents domaines d'applications de transmission d'énergie sans fil.

Chapitre II : Modèle théorique du transfert d'énergie sans fil

I. INTRODUCTION

La modélisation d'un système WPT est cruciale pour l'évaluation et l'optimisation des performances. La simplicité et la précision du modèle sont importantes. Dans ce chapitre on va proposer des méthodes de calcul permettant d'évaluer les paramètres influents dans le transfert d'énergie sans fil.

II. LES DIFFERENTS MODES DE COUPLAGE

Le récepteur radio donne une bonne idée de la question des circuits couplés. L'antenne reçoit des courants de haute fréquence qu'il faut transmettre d'une manière particulière à d'autres circuits. Il s'agit d'un passage d'énergie d'un étage (dit amplificateur) à l'autre, donc d'un couplage.

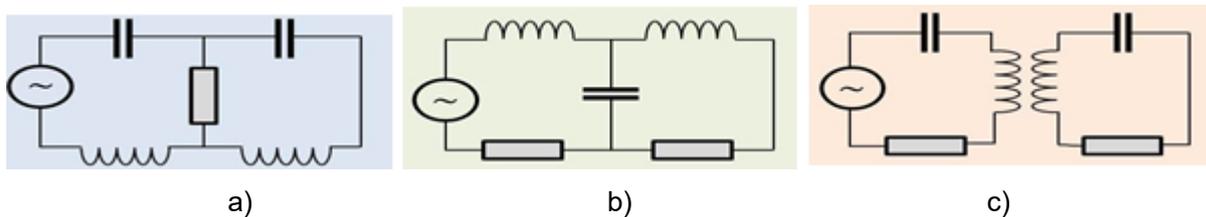


Fig.II.1 Les différents modes de couplage

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

- Le couplage par résistance (Fig.II.1.a)
- Le couplage par capacité (Fig.II.1.b)
- Le couplage par inductance (Fig.II.1.c)

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

III. ANALYSE DU WPT VIA DES RESONANCES MAGNETIQUES COUPLEES

Il existe quatre topologies de circuit résonnant qui pourraient être utilisés dans le système TESF. 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). Par conséquent, les topologies peuvent être décrites comme suit : SS, SP, PS et PP, elles sont représentées sur la Fig.II.2 .

Les inductances et les condensateurs (C_1 , C_2) sont déterminés de façon à annuler la partie réactive de la puissance transférée. Les circuits (L,C) (au primaire et secondaire du coupleur) permettent d'améliorer le transfert de puissance, de minimiser la puissance apparente de la source d'entrée et d'assurer une transmission de la puissance active à la charge. Les inconvénients sont les valeurs élevées de tension ou de courant relatifs aux composants de résonance.

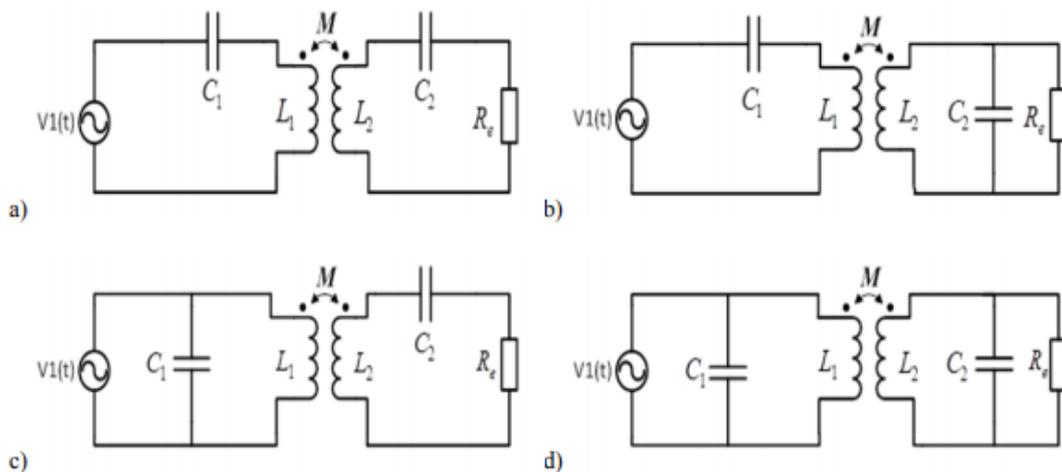


Fig.II.2 Topologies de résonance : a) SS b) SP c) PS and d) PP

IV. COMPENSATION DE LA PUISSANCE RÉACTIVE

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. D'une façon générale, la compensation est indispensable, l'adjonction d'un condensateur calculé pour annuler l'énergie réactive totale à une fréquence choisie.

Dans le cas de la topologie SS les valeurs des capacités de compensation primaire et secondaire sont indépendantes de la valeur de la mutuelle. Par conséquent, la puissance réactive est totalement compensée quelle que soit la position de l'inducteur par rapport à l'induit [22].

- **Dans le cas de la topologie SS :**

La topologie de compensation SS étant adoptée, il faut maintenant définir l'architecture des convertisseurs électroniques qui lui seront associés et qui seront mis en œuvre dans le

démonstrateur. Avec une compensation SS et à la fréquence de résonance, le schéma électrique équivalent de la Fig.II.3 devient :

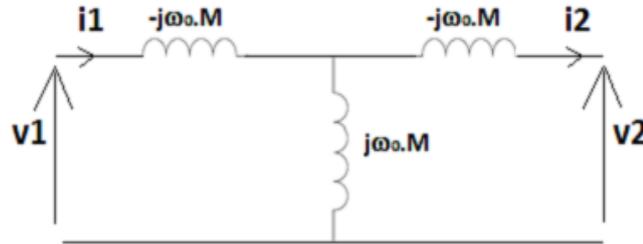


Fig.II.3 Schéma électrique équivalent de la topologie SS (à la fréquence de résonance)

Trois équations électriques, établies à la fréquence de résonance, sont importantes pour comprendre le fonctionnement de la topologie SS et choisir l'architecture du convertisseur. Il s'agit de :

- La relation entre le courant I_2 et la tension V_1 :

$$I_2 = \frac{V_1}{\omega_0 M} \quad (\text{II. 1})$$

- La relation entre le courant I_1 et la tension V_2 :

$$I_1 = \frac{V_2}{\omega_0 M} \quad (\text{II. 2})$$

- La relation entre la puissance transférée et les tensions V_1 et V_2

$$P = \frac{V_1 V_2}{\omega_0 M} \quad (\text{II. 3})$$

À coupleur et fréquence de résonance donnés, on peut déduire de ces relations que :

- ✓ Le réglage du courant secondaire nécessite de régler V_1 tout en restant à la résonance.
- ✓ Le courant primaire dépend de la tension secondaire, dans le cas présent probablement dépendante de la tension batterie (fonction du convertisseur présent au secondaire).
- ✓ La puissance absorbée dépend du produit des tensions primaire et secondaire.

V. LES DIFFERENTES GEOMETRIES DE BOBINE

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

De nombreuses formes de bobines peuvent être choisies à la fois pour les parties primaire et secondaire : circulaire, carrée ou elliptique comme illustré à la Fig.II.4. Les bobines fabriquées

habituellement et utilisées dans cette application sont réalisées en fil de Litz isolé, pour lequel les effets de peau et de proximité sont très faibles dans la gamme de fréquences considérée [12].

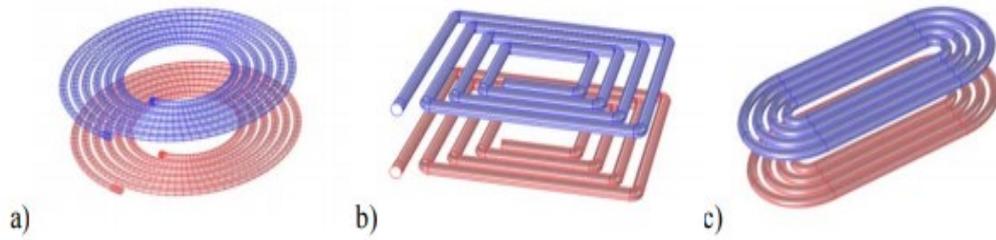


Fig.II.4 Formes des bobine de CI: a) circulaire, b) carrée et c) elliptique

Pour améliorer le couplage, un matériau magnétique non conducteur est parfois ajouté en tant que blindage. Des ferrites sont généralement utilisées parce qu'elles sont presque sans perte jusqu'à plusieurs centaines de kHz. Grâce à ce circuit magnétique, l'induction est principalement concentrée entre les deux bobines ce qui contribue à l'amélioration du couplage et permet d'éviter l'échauffement parties conductrices à proximité du coupleur inductif [23].

De ce fait, sans blindage magnétique, les passagers du véhicule et les piétons autour du véhicule seront exposés à des champs magnétiques d'intensité largement supérieures au niveau recommandé par les normes. Afin de réduire l'intensité de ce champ magnétique rayonné, un blindage magnétique doit être mis en place.

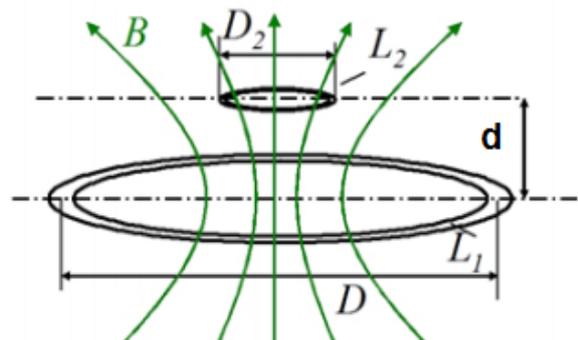


Fig.II.5 Champ magnétique généré par la bobine d'émission traversant la bobine réceptrice.

VI. THEORIE DU TRANSFERT D'ENERGIE SANS FIL

Cette partie concerne l'étude de la physique derrière la transmission d'énergie par couplage magnétique. Nous exposerons une étude théorique du couplage par résonance magnétique qui est à la base de notre travail.

Selon la loi d'Oersted, un courant constant produit un champ magnétique autour de lui. En outre, la loi de Biot- Savart décrit la relation entre le champ magnétique, l'amplitude, la direction, la proximité et la durée du courant électrique par lequel il a été généré :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \cdot \vec{e}}{r^2} \quad (\text{II. 4})$$

Où r est le vecteur de déplacement complet de la source de courant au point sur le terrain, e est le vecteur unitaire de r , $I dl$ est le courant point source infinitésimale dans le fil, μ_0 est la perméabilité de l'espace libre. Supposons que nous avons deux bobines alignées séparées par une certaine distance dans la région de champ proche (Fig.II.5). Le champ magnétique généré par la bobine circulaire TX au point x (de la bobine RX) serait alors :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N I a^2}{2(a^2 + d^2)^{3/2}} \quad (\text{II. 5})$$

Où N est le nombre de spires, I est le courant émetteur de l'inducteur, a est le rayon de la bobine TX, d est la distance entre TX et RX.

L'expression du flux magnétique traversant le récepteur a pour expression :

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} ds \quad (\text{II. 6})$$

Où B est la densité de flux magnétique généré par l'émetteur et S est l'aire de la surface de la bobine réceptrice. Comme le courant de la bobine émettrice est une fonction du temps, il produit une variation du flux magnétique dans la bobine réceptrice, une force électromotrice (FEM) est induite dans la bobine RX, son expression est donnée en appliquant la loi de Faraday :

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II. 7})$$

Où ϕ est le flux magnétique. La FEM génère un courant dans la bobine secondaire dont le champ magnétique s'oppose à la variation temporelle du flux magnétique selon la loi de Lenz. Par conséquent, la puissance est transférée de la bobine TX à la bobine RX. L'auto-induction est une propriété du circuit qui se manifeste lorsque son propre champ magnétique s'oppose au changement de courant dans le circuit. L'auto-inductance de la bobine peut être définie comme suit :

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad (\text{II. 8})$$

Où N est le nombre de spires, ϕ est le flux magnétique et I est le courant de la bobine. En combinant (II.4) et (II.5) on obtient :

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (\text{II. 9})$$

$$\varepsilon = -M \frac{dI}{dt} \quad (\text{II. 10})$$

Où L est l'auto-inductance de la bobine, M est l'inductance mutuelle des deux bobines, I est le courant de la bobine. De toute évidence, la FEM induite dans la bobine est directement proportionnelle à l'auto-inductance, à l'inductance mutuelle des bobines et à la vitesse avec

laquelle le courant est en train de changer. Une autre représentation de l'inductance mutuelle est la suivante :

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \tag{II. 11}$$

Où k est le facteur de couplage et L_1, L_2 sont les inductances de TX et RX, respectivement. Le facteur de couplage définit le degré de couplage, à savoir combien du flux total a effectivement pénétré dans la bobine réceptrice. Ce facteur peut avoir une valeur comprise entre 0 et 1 (de zéro au couplage parfait).

VI.1 Le facteur de couplage

Ce facteur est compris entre 0 et 1 où 1 représente un couplage parfait entre les deux bobines, tous les flux magnétiques générés sont reçu par la bobine réceptrice. Il varie selon la distance entre les deux bobines (Z) et le ratio du diamètre de la bobine réceptrice (D2) divisé par le diamètre de la bobine émettrice (D).

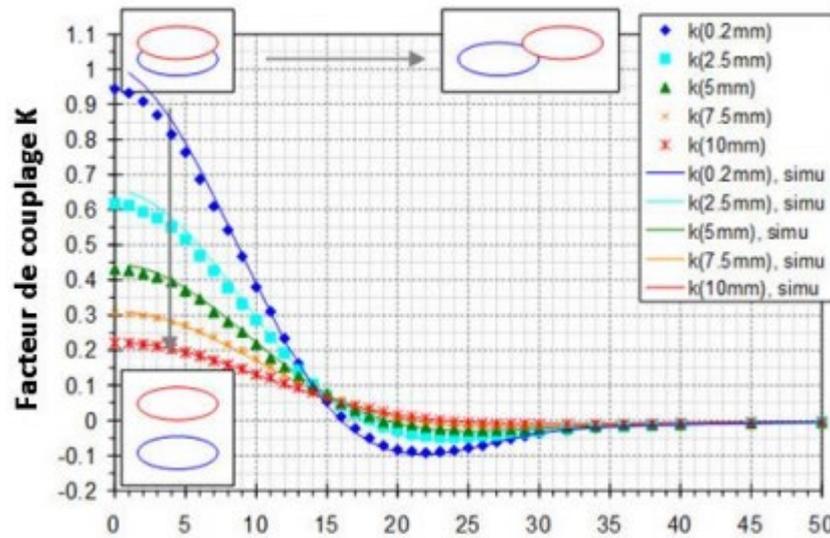


Fig.II.6 Variation du facteur de couplage

La figure ci-dessus montre l'effet du facteur de couplage pour un arrangement idéal de bobines plates, avec un diamètre de 30mm. Cette figure montre le facteur de couplage calculé (représenté par les lignes) et mesuré (représenté par des points) pour des bobines placées parallèlement mais décalées horizontalement l'une de l'autre.

VI.2 Mutuelle inductance

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 spirale et également la mutuelle inductance entre deux bobines couplées formant un lien inductif et placées

arbitrairement dans l'espace. Pour ce faire, nous allons commencer par étudier le cas de deux spires élémentaires.

a) Couplage inductif entre deux spires

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 $c(x_c, y_c, z_c = d)$.

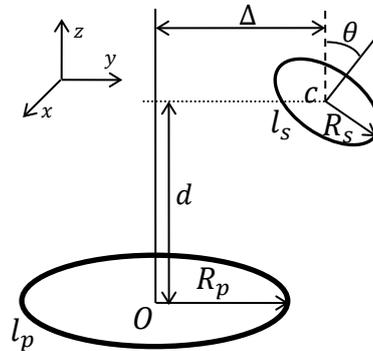


Fig.II.7 Couplage inductif entre deux spires placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaire et axial).

Chaque spire est équivalente à une inductance L en série avec une résistance R . D'une façon générale, Les paramètres électriques d'une spire dépendent de la fréquence. L_p et L_s étant les inductances propres de spires l_p et l_s respectivement. R_p, R_s, C_p et C_s sont les résistances internes et les capacités parasites de chaque spire respectivement. M_{ps} est la mutuelle inductance entre les deux spires couplées [24].

Dans la suite nous détaillons le principe de calcul analytique qui permet de déterminer les valeurs de l'inductance propre L et la mutuelle inductance M entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

S. BABIC et all. ont développé une méthode analytique qui permet de calculer la mutuelle inductance entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace (en présence de désalignements axial et latéral). Nous avons utilisé ces expressions pour déterminer la self-inductance L , la mutuelle inductance M et le coefficient de couplage k . La formule de la mutuelle inductance entre deux spires situées arbitrairement dans l'espace est donnée par [25]:

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

$$M(r_1, r_2, d, \theta, \Delta) = \frac{\mu_0}{\pi} \sqrt{r_2 r_1} \int_0^\pi \frac{(\cos(\theta) - \frac{\Delta}{r_2} \cos(\phi)) \psi(k)}{\sqrt{v^3}} d\phi \tag{II.13}$$

$$V = \sqrt{1 - \cos^2(\phi) \sin^2(\theta) - 2 \frac{\Delta}{r_2} \cos(\phi) \cos(\theta) + \frac{\Delta}{r_2^2}} \quad (\text{II.14})$$

$$k = \frac{4\alpha V}{(1+\alpha V)^2 + \xi^2} \quad (\text{II.15})$$

$$\xi = \beta - \alpha \cos(\phi) \sin(\theta), \alpha = \frac{r_2}{r_1}, \beta = \frac{d}{R_1} \quad (\text{II.16})$$

$$\psi(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) = Q_{\frac{1}{2}}(x), x = \frac{2-k^2}{k^2} \quad (\text{II.17})$$

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 et r_1, r_2 transmettent et reçoivent des rayons de spires de bobine. Sa valeur est de $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. $K(k)$ et $E(k)$ sont l'intégrale elliptique complète de la première et le deuxième type, respectivement. $Q_{1/2}(x)$ est la fonction de Legendre du deuxième type.

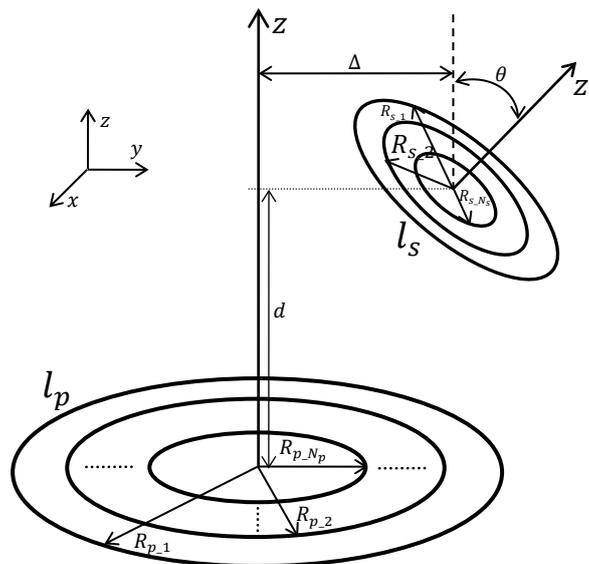


Fig.II.8 Deux bobines plates couplées entre elles et placées arbitrairement dans l'espace (désalignements angulaires et axial)

b) Couplage inductif entre deux bobines plates

Considérant maintenant deux bobines plates constituées des spires concentriques de différents diamètres. La première bobine (transmission) notée l_p est formée de N_p spires chacune de rayon $R_{p,i}$ ($i = 1, 2, \dots, N_p$). La deuxième bobine (réception) notée l_s est formée de N_s spires chacune de rayon $R_{s,j}$ ($j = 1, 2, \dots, N_s$). Dans la suite nous allons détailler la méthode de

calcul qui permet de déterminer la valeur de l'inductance propre L de chaque bobine ainsi que la mutuelle inductance M .

La mutuelle inductance M_{ps} entre les deux bobines plates L_p et L_s est donnée par la formule suivante [25] :

$$M_{ps} = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_s} M(R_{p_i}, R_{s_j}, \Delta, d, \theta). \quad (II.18)$$

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} .

VI.3 Calcule du self inductance L

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 [26]:

$$L = \frac{a^2 N^2}{8a + 11c} \quad (II.19)$$

Où « N » est le nombre de tours. Les paramètres c et a peuvent être donnés [9]:

$$c = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} \quad (II.20)$$

$$a = \frac{D_{out} - c}{2} = \frac{D_{out} + D_{in}}{4} \quad (II.21)$$

$$D_{out} = D_{in} - (p + w)N \quad (II.22)$$

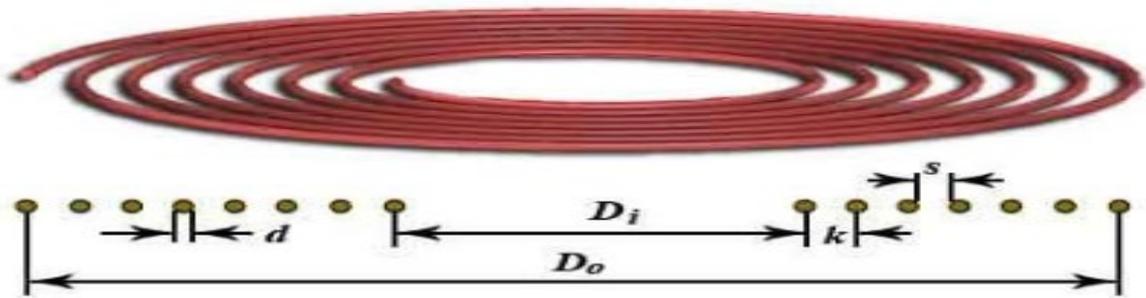


Fig.II.9 Une bobine spirale

VII. MODELE ELECTRIQUE DE CIRCUIT SERIE-SERIE

Comme on le voit en Fig.II.10, 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.

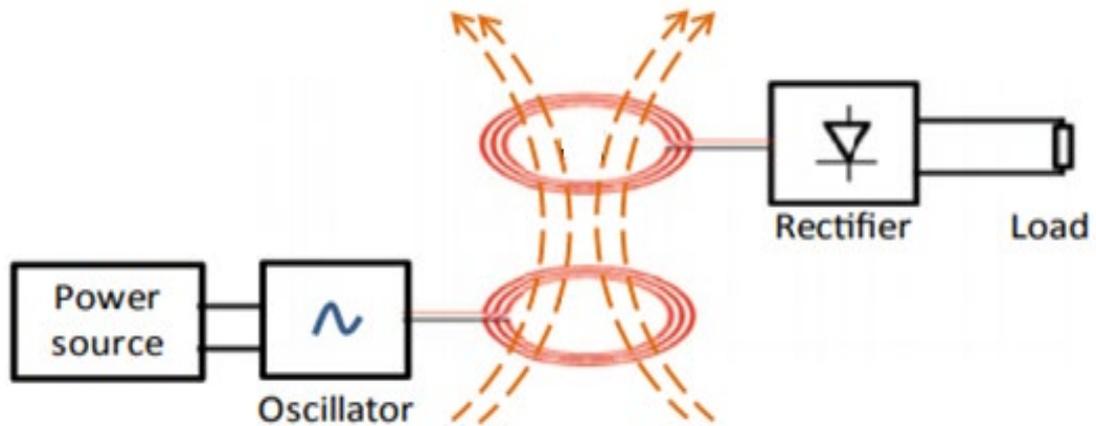


Fig.II.10 modèle électrique équivalent du système de transfert d'énergie.

En effet, la charge R est alimentée par l'intermédiaire du lien inductif de deux bobines couplées. deux capacités d'accord sont utilisées (C_1 et C_2) et leurs valeurs dépendent de la fréquence choisie et des inductances propres L_1 et L_2 . Dans ces conditions la fréquence de résonance est égale à f_0 . Une parfaite connaissance de la valeur de la self inductance L permet de déterminer correctement la valeur de la capacité d'accord C qui fait résonner la bobine à la fréquence choisie f_0 .

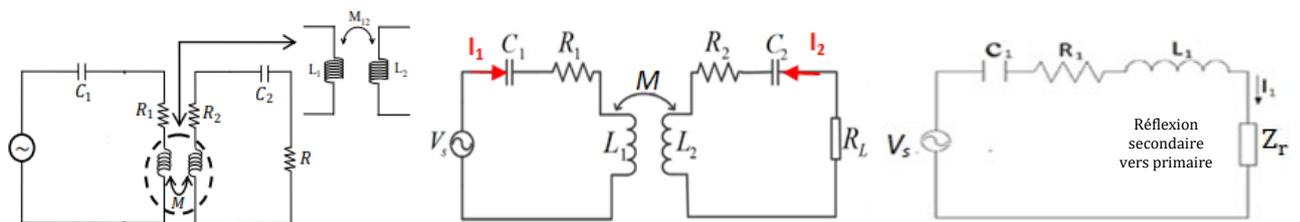


Fig.II.11 Modèle électrique équivalent du lien inductif entre deux bobines placées arbitrairement dans l'espace

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

$$V_s = Z_1 I_1 + Z_m I_2 \tag{II.12}$$

$$0 = (Z_2 + R_L) I_2 + Z_m I_1 \tag{II.13}$$

Et

$$Z_1 = R_1 + j\omega_0 L_1 + \frac{1}{j\omega_0 C_1} \tag{II.14}$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega_0 L_2 + \frac{1}{j\omega_0 C_2} + R_L \tag{II.15}$$

$$Z_m = j\omega_0 M \tag{II.5}$$

La tension dépendante de la bobine émettrice due à la bobine réceptrice est donnée par : $V_{12} = -Z_m I_2 = I_1 \frac{Z_m^2}{(Z_2 + R_L)}$. En divisant V_{12} par I_1 , nous obtenons une expression de l'impédance Z_r comme : $Z_r = \frac{V_{12}}{I_1}$. L'impédance totale est :

$$Z_{in} = Z_1 + Z_r = Z_1 + \frac{Z_m^2}{(Z_2 + R_L)} \quad (II.6)$$

La puissance (P_{in} d'alimentation d'entrée) délivrée à l'entrée du circuit est calculée comme suit :

$$P_{in} = |I_1|^2 Re(Z_{in}) \quad (II.7)$$

En revanche, la puissance (puissance de sortie P_{out}) effectivement délivrée à la charge peut être exprimée comme :

$$P_{out} = |I_2|^2 R_L \quad (II.8)$$

Nous divisons Eq. (II.8) sur Eq. (II.7) pour obtenir l'efficacité de transmission (η) en fonction de l'impédance du système :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left| \frac{Z_m}{(Z_2 + R_L)} \right|^2 \frac{R_L}{Re(Z_{in})} \quad (II.9)$$

L'étape suivante consiste à déterminer pour quelle résistance à la charge l'efficacité est à son maximum. Pour ce faire, la dérivée de l'équation Eq. (II.9) par rapport à R_L doit être égale à zéro [3]-[6] :

$$\frac{d\eta(R_L)}{dR_L} = 0 \quad (II.10)$$

Wang propose une formule dérivée de la théorie des circuits pour obtenir la résistance de charge optimale pour une certaine induction mutuelle entre deux résonateurs, car l'induction mutuelle dépend de la distance, cette formule indique également quelle est la résistance de charge optimale pour une certaine distance entre deux résonateurs. La formule pour la résistance de charge optimale est :

$$R_L = \sqrt{\frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_1} + R_2^2} \quad (II.11)$$

Lorsque la distance entre la bobine P_x et les bobines S_x augmente, le flux magnétique diminue. Cette diminution du flux magnétique diminue M entre le S_x et le P_x . Avec tous les autres paramètres maintenus constants, la diminution de M , entraîne une diminution de R_L .

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 [2]-[3]-[4] :

$$\eta_{\max} = \frac{(kQ)^2}{(1+\sqrt{(kQ)^2+1})^2} \quad (\text{II.12})$$

Où Q est le facteur de qualité combiné des deux bobines.

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 :

$$Q = \sqrt{Q_2 Q_1} \quad (\text{II.13})$$

et:

$$Q_{1,2} \approx \frac{\omega_0 L_{1,2}}{R_{1,2}} \quad (\text{II.14})$$

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

Dans ces conditions la fréquence de résonance est égale à $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$. Une parfaite connaissance de la valeur de la self inductance L permet de déterminer correctement la valeur de la capacité d'accord C qui fait résonner la bobine à la fréquence choisie f_0 .

VIII. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons proposé des expressions analytiques et électriques pour étudier les performances d'un système TSEF. Ces expressions constituent des grandes fiabilités pour le dimensionnement des systèmes TSEF. Ce chapitre concerne l'étude de la physique derrière la transmission d'énergie par couplage magnétique. Nous avons exposé une étude théorique du couplage par résonance magnétique qui est à la base de notre travail.

Chapitre III : Résultats et simulations

I. INTRODCUTION

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

II. MODÈLE PROPOSÉ

Dans la suite nous détaillons le principe de calcul analytique qui permet de déterminer les valeurs de l'inductance propre L et la mutuelle inductance M entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace. La géométrie de deux bobines circulaires de tours N_1 et N_2 est illustrée sur la Fig.III.1. On suppose que l'espacement entre les spires, p_1 et p_2 , sont bien inférieures aux valeurs de rayons de bobine, anneaux r_1 et r_2 . D'après la Fig.III.2, il est évident que D_{out} est le diamètre extérieur ; D_{in} est le diamètre intérieur et w est le diamètre du fil utilisé pour fabriquer la bobine.

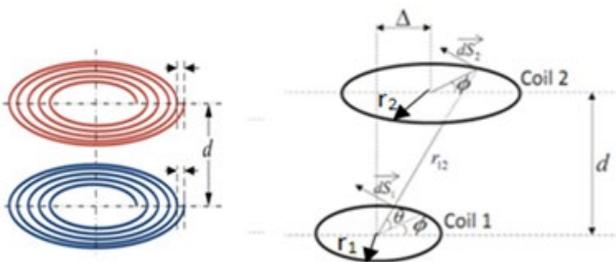


Fig.III.1 Couplage inductif entre deux spires placées arbitrairement dans l'espace.

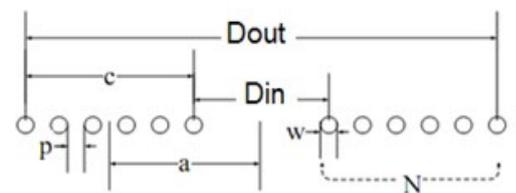


Fig.III.2 Vue en coupe d'une bobine spirale circulaire

III. POSITION RELATIVE

Dans les applications pratiques telles que les systèmes de charge sans fil pour véhicules électriques ou le système de charge sans fil pour appareils mobiles, S_x peut être latéralement désaligné avec P_x dans toutes les directions [7]. Placer les bobines d'envoi et de réception dans une position parfaite est une tâche difficile, ce qui n'est pas réaliste dans tous les scénarios

d'application. En faisant, le désalignement latéral des bobines est persistant, une diminution importante de l'efficacité de transmission d'énergie du système se produit [8-9-10].

Dans un système WPT, les positions relatives du S_x et du P_x peuvent être classées en trois types :

- Parfaitement aligné
- Angulairement mal aligné
- Désaligné latéralement.

Dans un système WPT parfaitement aligné (Fig.III.3.a), les axes de P_x et S_x sont parfaitement alignés, tandis que le plan S_x est parallèle au plan P_x . Dans un système WPT angulairement désaligné (Fig.III.3.b), il y a un angle (θ) entre l'axe de P_x et l'axe de S_x . Dans un système WPT latéralement désaligné (Fig.III.3.c), le plan de S_x est parallèle au plan de P_x . S_x est mobile dans son plan, entraînant le désalignement latéral « Δ » entre les axes de S_x et P_x . Sur la Fig.III.2.c, l'angle α représente dans quelle mesure le centre de S_x s'écarte angulairement de l'axe de P_x .

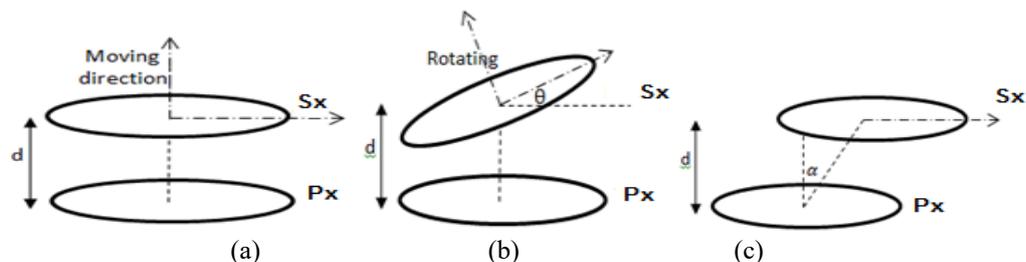


Fig.III.3 Arrangement basique de la liaison sans fil.

a) Alignement frontal, (b) désalignement angulaire, et (c) désalignement latéral

IV. RÉSULTATS DE SIMULATION

L'efficacité de transmission de puissance des systèmes inductifs dépend fortement de la distance latérale « Δ » et de la distance verticale « d » séparant les bobines. Pour analyser l'influence des inductances mutuelles sur les performances des systèmes WPT, le modèle de simulation est mis en place à l'aide de MATLAB. Cinq combinaisons de paires de bobines ont été envisagées pour trouver la topologie la moins sensible.

Pour trouver l'interaction la moins sensible aux différents déplacements, des exemples de conception ont été présentés dans cette section. Par exemple, dans toutes les combinaisons P- S_x , le primaire est resté le même dans les cinq paires de bobines. Cependant, la bobine secondaire S_x est d'une taille différente. Dans tous les cas, la fréquence de travail est choisie comme 40 kHz. Les paramètres clés correspondants sont répertoriés dans le tableau I, où l'inductance de la bobine et la résistance sont directement mesurées à l'aide du compteur LCR. Les paramètres

électriques ont été calculés pour une tension de sortie 48 V et puissance de 500 W et la tension d'entrée était considérée comme 120 V.

Table I : Dimensions des bobines [12]

Type	N	D _{out} (mm)	D _{in} (mm)	p (mm)	w (mm)	R (Ohm) (Measured)	L (μH) (Measured)	L(μH) (Analytical)
Coil-P	52	280	140	0	1.244	1	722.56	728.64
Coil-S1	16.4	280	140	0.03	1.244	32.43×10^{-2}	75.91	72.51
Coil-S2	15	240	166	1.244	1.244	27.90×10^{-2}	75.50	74.8
Coil-S3	20	196	96	1.244	1.244	0.29	74.24	73.99
Coil-S4	13	280	214	1.244	1.244	0.28	75.44	75.11
Coil-S5	16.4	220	140	1.244	1.244	28.65×10^{-2}	74.61	73.33

IV.1 Effet des distances verticales sur les performances du système

Les courbes de la Fig.III.4 représente le facteur de couplage et l'inductance mutuelle entre les bobines en fonction de la distance verticale (variable de 0 mm à 300 mm). En comparant les combinaisons P-Sx, P-S4 a la plus forte inductance mutuelle. Et aussi, P-S2 arrive en deuxième position et P-S3 est la dernière place. Différentes géométries de bobines peuvent produire différents types d'inductance mutuelle.

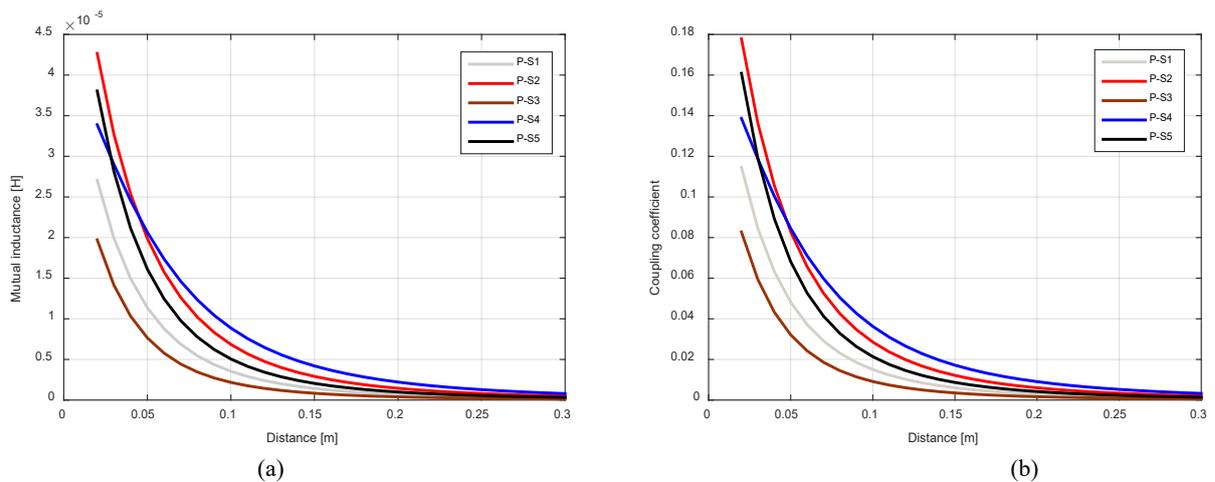


Fig.III.4 Comparaison entre les résultats de l'approche analytique pour différentes valeurs de distance : a) Inductance mutuelle, b) Coefficient de couplage

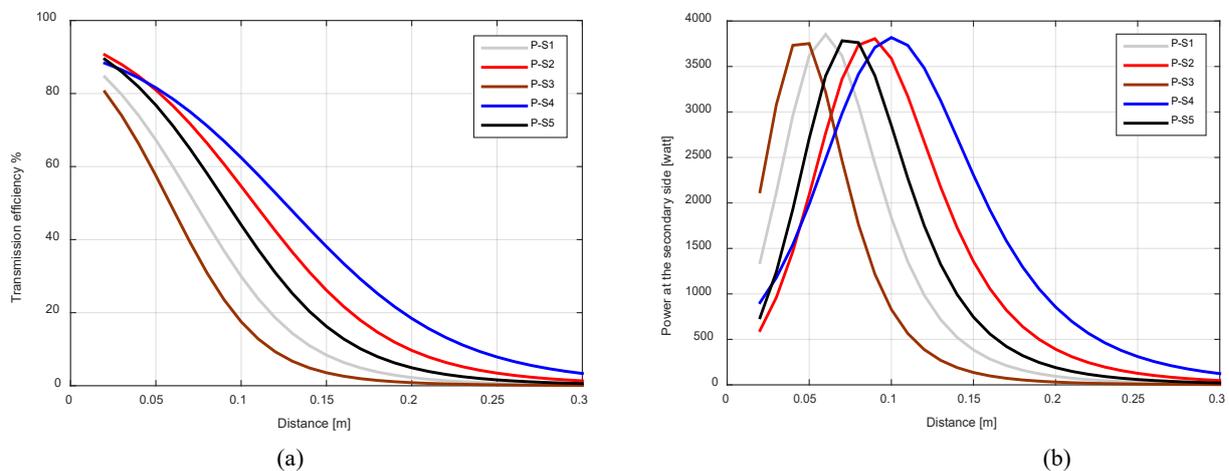


Fig.III.5 Comparaison entre les résultats de l'approche analytique pour différentes valeurs de distance :

a) Efficacité du transfert ; b) Puissance

La représentation graphique de la puissance et l'efficacité de transmission est illustrée à la Fig.III.6. L'efficacité énergétique diminue lorsque la distance verticale augmente. En outre, nous pouvons dire que le P-S4 a les meilleures performances parmi toutes les autres bobines. Il produit le meilleur rendement énergétique, est beaucoup plus élevé que le rendement énergétique produit par d'autres bobines.

Les résultats montrent qu'il n'est pas nécessaire de garder une distance minimale pour obtenir une puissance de sortie maximale et la puissance maximale est obtenue à une distance de 17 cm plutôt qu'à une distance minimale, c'est-à-dire 8 cm. Cela prouve qu'en WPT, une certaine distance est nécessaire pour obtenir la puissance de sortie maximale à laquelle notre système devient complètement résonnant. Selon les Fig.III.4 et Fig.III.5, les tendances de performances sont les suivantes : P-S4 > P-S2 > P-S5 > P-S1 > P-S3.

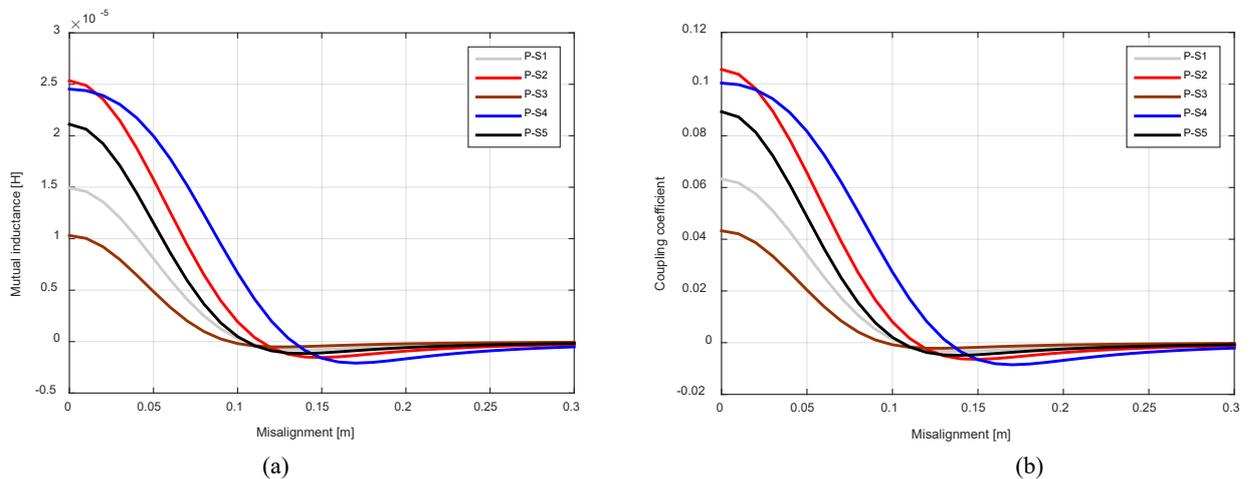


Fig. III.6 Performances des combinaisons P-Sx en fonction des désalignements :
 a) Inductance mutuelle b) Facteur de couplage

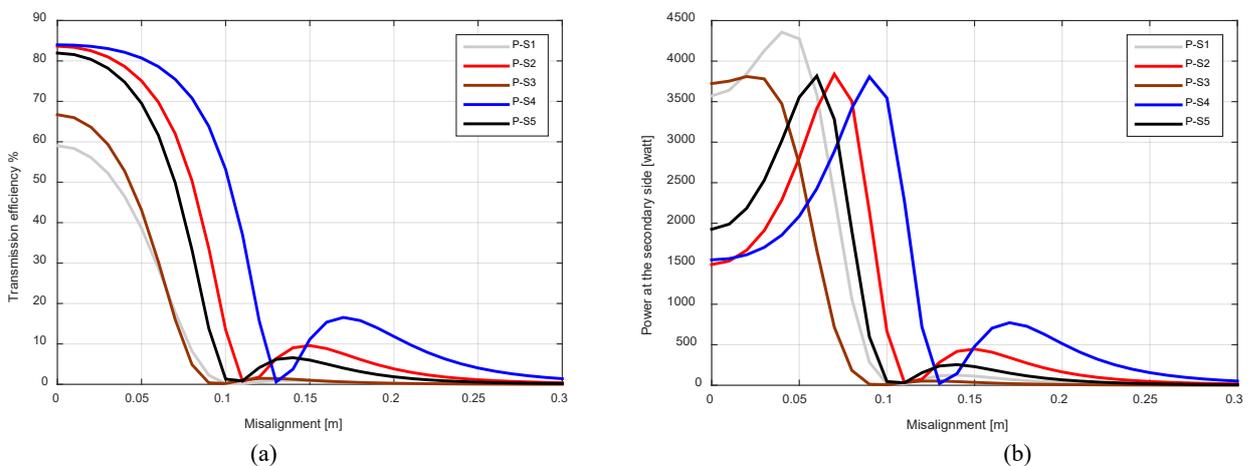


Fig.III.7 Efficacité de transfert des cinq bobines de couplage ci-dessus par rapport au désalignement à un entrefer de 4 cm a) Efficacité du transfert ; b) Puissance

IV.2 Effet des désalignements latéraux sur les performances du système

Dans les dispositifs WPT, certains désalignements latéraux doivent être envisagés pour obtenir un transfert de puissance à haute efficacité. À partir des tracés illustrés à la Fig.III.18, on peut observer que la paire P-S4 donne les meilleures performances par rapport les autres. Par contre, la paire P-S3 donne les pires performances. De plus, en cas de désalignement latéral important, toutes les lignes de champ magnétique produites par les bobines émettrices ne passent pas par la bobine réceptrice.

Comme illustré la Fig.III.6, la combinaison P-S4 présente les meilleures performances par rapport aux autres combinaisons. A partir de ces simulations, les courbes représentant les évolutions du facteur de couplage et l'inductance mutuelle en fonction des désalignements ont été reportées sur la Fig.III.6. dans la Fig.III.7, les combinaisons P-Sx ont des évolutions non identiques et les valeurs sont différentes lorsque la puissance atteint un maximum. On peut noter que pour P-S4, dans un décalage horizontal d'environ 140 mm la puissance est nulle. Cela est dû à l'annulation du flux à ce stade, où le flux magnétique de même amplitude mais avec des directions opposées traverse la bobine réceptrice.

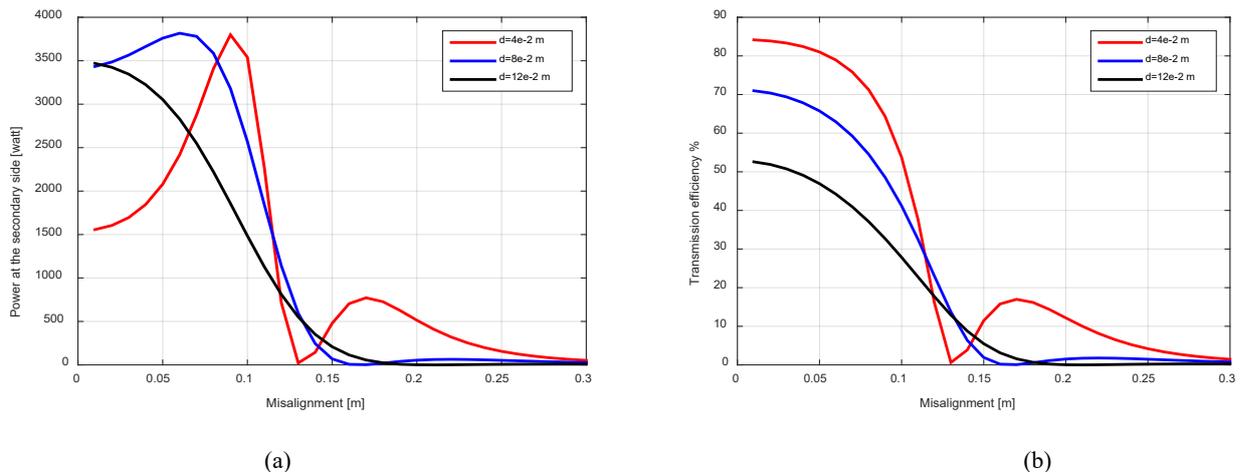


Fig.III.8 Efficacité de transfert et puissance en fonction du désalignement à différents entrefer
 a) Puissance b) Efficacité de transfert

Dans la combinaison P-S4, l'efficacité diminue fortement lorsque le désalignement est de 140 mm, car le flux magnétique dans la bobine réceptrice est fortement diminué. Et il y a une augmentation de l'efficacité en cas de désalignement de 150 mm. En augmentant la distance verticale «d» de 4 mm à 12 mm du diamètre de la bobine émettrice, la puissance transmise diminue de plus de 19% et 60% de sa valeur initiale. L'efficacité du système diminue car la distance verticale entre les bobines augmente, la quantité de liaison de flux magnétique entre les bobines diminue. Cela entraîne moins de transfert de puissance et une efficacité moindre.

À partir de la Fig.III.8, nous pouvons conclure que le transfert de puissance maximum se produise en minimisant la distance entre les bobines. Sur la base des résultats précédentes, nous

concluons que les systèmes WPT dépendent fortement à la fois du désalignement latéral et des distances verticales.

V. CONCLUSION

Grâce à un modèle analytique-électrique, on a réussi d'examiner les performances d'un système WPT. Dans ce travail, on a analysé la corrélation entre les paramètres de conception de la bobine en spirale circulaire et les performances du système WPT sur la base de la théorie des circuits couplés et du modèle analytique du système.

Conclusion générale

Ce projet concerne l'étude de la physique derrière la transmission d'énergie par couplage magnétique. La modélisation d'un système WPT est cruciale pour l'évaluation et l'optimisation des performances. La simplicité et la précision du modèle sont importantes. Dans ce chapitre on va proposer des méthodes de calcul permettant d'évaluer les paramètres influents dans le transfert d'énergie sans fil.

Dans ce projet de fin d'étude, on a réussi de donner une méthodologie efficace pour étudier un système de transfert d'énergie sans fil. Cette démarche basée sur un couplage entre un calcul analytique en 3D pour calculer l'inductance mutuelle et un modèle fondé sur la théorie des circuits afin de déterminer les performances du système de transfert d'énergie sans fil. Le calcul analytique basé sur la formule de Babic. Ce calcul analytique en 3D est évidemment plus difficile que celui en 2D. Le calcul est plus difficile à cause des intégrations successives. Dans ce projet, nous avons donné des expressions analytiques en 3D capable de résoudre les problèmes d'interaction entre les bobines. Nous avons exposé une étude théorique du couplage par résonance magnétique qui est à la base de notre travail. La topologie de compensation SS étant adoptée, il faut maintenant définir l'architecture des convertisseurs électroniques qui lui seront associés et qui seront mis en œuvre dans le démonstrateur. Nous avons exposé une étude théorique du couplage par résonance magnétique qui est à la base de notre travail. Ces modèles constituent des grandes fiabilités pour le dimensionnement des systèmes TSEF.

En pratique, nous avons donné aux gens de l'électrotechnique des outils en 3D non coûteux et elles constituent des grandes fiabilités pour le calcul analytique des inductances mutuelles entre les bobines spirales.

Références

- [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>
- [6]: A. Brecher and D. Arthur, "Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications (FTA Report No. 0060)," no. 0060, pp. 1–61, 2014
- [7]: http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE_11_20171201.pdf
- [8]: <https://www.pluglesspower.com/gen2-tech-specs/>
- [9]: U. C. Berkeley, "Roadway Powered Electric Vehicle Project Track Construction and Testing Program Phase 3D," Traffic, 1995
- [10] S. MOHANH « Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances, » IEEE Journal of Solid -State Circuits, 34, no 10 (1999), pp. 1419-1424.
- [10]: http://www.serpentine.ch/p_realisations/Realisations.html
- [11]: C. B. Auvigne, "Electrical and Magnetical Modeling of Inductive Coupled Power Transfer Systems PAR," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2015
- [12]: K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse, and K. Takeda, "Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles," World Electr. Veh. J., vol. 6, no. 4, pp. 848–857, 2013
- [13]: K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse, and K. Takeda, "Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles," World Electr. Veh. J., vol. 6, no. 4, pp. 848–857, 2013
- [14]: <https://www.fabric-project.eu/>
- [15]: https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_en.pdf
- [16]: 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

- [17]: R. Bosshard, J. Mühlethaler, J. W. Kolar, and I. Stevanović, "The η - α -Pareto front of inductive power transfer coils," in Proc. 38th IECON, 2012, pp. 4270–4277
- [18]: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer
- [19]: Karim Kadem, « Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques », Thèse Université Paris-Saclay, 2020
- [20]: Paul-Antoine Gori, « Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique », Thèse Université Paris-Saclay, 2019
- [21] 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
- [22] A. Hammoud. Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts. Université Montpellier, 2017.
- [23] M. IBRAHIM. Analyse d'Interopérabilité d'un Système de Recharge Sans Contact pour le Véhicule Electrique. UNIVERSITE PARIS-SUD.2015
- [24] L. Bettaieb, F. Costa, J. C. Lourme 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.
- [26] H. Wheeler, "Simple Inductance Formulas for Radio Coils," Proceedings of the I.R.E., October 1928.
- [27] Bouacida, A. Chargeur batteries sans file pour voiture electrique gere par pic 16F877. Diplôme de master. génie électronique. Annaba : Université Badji mokhtar, 2018.
- [28] Lhafhaf, A., El alaoui, A., El jalouli, M., Materred, D. et Obdam, G. (2014).Recharge sans fil des téléphones mobiles. Repéré à http://thierryperisse.free.fr/documents/projet_linel/projets-L3EEAREL/projet-Thierry/projet-chargeur-batterie-smartphone/SPI_FIPA17_Chargeur_sans_fil_de_telephones_mobiles.pdf