



Mémoire de Fin de Cycle

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Présenté par :

Mr. BOUCHEBBAH Badis

Option : Électrotechnique industriel

Mr. BENNICHE Nabil

Option : Énergie renouvelable

Thème

**Étude et modélisation du Transfert Sans fil d'Énergie
Électrique en Continu**

Encadré par :

Pr. Bachir MAUCHE

Remerciement

Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de nous avoir guidés vers le droit chemin, et de nous avoir aidés tout au long de nos années d'études.

On tient à remercier sincèrement Monsieur B.MAUCHE, Professeur à l'université de Bejaia (Algérie), qui, on tant que directeur de mémoire et encadreur, s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi pour l'inspiration, l'aide, la confiance et la patience qu'on constituer un port considérable sans le quel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos remerciement s'étendre également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptent d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous aider de prêt ou de loin pendant toute la durée de notre parcours éducatif.

Dédicaces

A celui à qui je dois tout ;

A mes très cher parents qui se sont sacrifier pour m'offrir un climat idéale de travail et qui n'ont jamais cessé de me témoigner leur affection et de m'apporter leurs soutient depuis toujours, que le bon dieu les garde et les protège.

A mes sœurs.

A toutes les personnes qui nous aidées à réaliser se mémoire.

B. Badis

Dédicaces

A la mémoire de mes très chères et regretté grands-mères ;

A mes parents Tahar et Terbah qui mon beaucoup aider ;

A mes chers frères Kamel et Rabah ;

A mes sœurs Malika et Farida ;

Mes cousins Belkacem et Said ;

A mon binome Badis ;

A mes très chers amis Lyes, Amrane, Walid, Billal, Nasir, Mano, Ali, dodine, Hamid, Rahim, Loucif, Ahmed ;

A tous ceux-là, je dédie ce Modeste travail.

B. Nabil

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
LISTE DES FIGURES.....	4
LISTE DES TABLEAUX	6
INTRODUCTION GENERALE	8
I- Principe de transmission sans fil d'énergie électrique.....	10
I.1- Introduction	11
I.2- Contexte et Historique.....	11
I.3- Développement du concept de TSFE.....	12
I.4- Problématique et objectif de TSFE	13
I.4.1- Problématique.....	13
I.4.2- Objectif.....	14
I.5- Description des techniques TSFE	14
I.5.1- Dispositifs mobiles	14
I.5.2- Appareils domestiques et applications logistiques	15
I.5.3- Véhicules électriques	16
I.6- Systèmes de transmission de puissance sans fil.....	17
I.6.1- Rayonnement en champ lointain.....	17
I.6.2- Couplage non-résonnant en champ proche	18
I.6.3- Couplage résonnant en champ proche	20
I.7- Avantages et inconvénients des différents systèmes TSFE	21
I.8- Techniques employées dans les applications TSFE.....	22
I.8.1- Induction magnétique	22
I.8.2- Résonance magnétique	23
I.8.3- Couplage capacitif.....	24
I.9- Application des techniques TSFE	26
I.9.1- Dispositifs domestiques	26
I.9.2- Véhicules électriques	26
I.9.3- Application médicale	27
I.10-Conclusion.....	29

II- Modélisation électromagnétique du TSFE	30
II.1- Introduction	31
II.2- Lois fondamentales en électrotechnique	31
II.2.1- Équation de Maxwell.....	31
II.2.2- Équations de maxwell dans le cas quasi-stationnaire.....	31
II.2.3- Lois de comportement des milieux	32
II.2.3.1-Loi d'Ohm	32
II.2.3.2-Relation magnétique.....	32
II.2.3.3-Relation diélectrique.....	32
II.3- Système axisymétrique.....	33
II.4- Principe de fonctionnement d'un couplage inductif	34
II.5- Modèle électromagnétique	35
II.5.1- Lien inductif entre deux spires.....	35
II.5.2- Couplage inductif entre deux bobines plates	39
II.6- Mise en équation du système	40
II.6.1- Équation générale	40
II.6.2- Tension de sortie.....	41
II.6.3- Couplage inductif résonnant série-série	42
II.6.4- Optimisation de la puissance	43
II.7- Conclusion.....	44
III- Application et résultats.....	45
III.1-Introduction	46
III.2-Données de l'application	46
III.2.1- Caractéristiques géométriques et électromagnétiques	46
III.2.2- Tension d'entrée	47
III.3-Résultats.....	49
III.3.1- Tension de sortie fréquentielle	49
III.3.2- Courant de sortie temporelle et fréquentielle.....	50
III.3.3- Puissance de sortie.....	51
III.3.4- Tension et courant de sortie temporelles.....	52
III.3.5- Série de fourrier de la tension et du courant de sortie.....	53
III.4-Conclusion.....	55

CONCLUSION GENERALE.....56
REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES.....57

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Transfert de puissance sans fil par le couplage non-résonant	19
Figure I-2 : TSFE par couplage non-résonant	19
Figure I-3 : Circuits magnétiques couplés, flux commun et flux de fuites ...	22
Figure I-4 : Schéma de système TSFE par induction magnétique	23
Figure I-5 : Schéma d'un système TSFE par résonance magnétique	24
Figure I-6 : Structure type du système à couplage capacitif.....	25
Figure I-7 : Principe de transmission de puissance par lien inductive	28
Figure II-1 : Géométrie de la bobine	33
Figure II-2 : 2D axisymétrique.....	34
Figure II-3 : Spires désaxées	35
Figure II-4 : Modèle électrique équivalent à deux spires	36
Figure II-5 : Facteur de couplage en fonction de la distance entre deux bobines	37
Figure II-6 : Efficacité énergétique entre deux bobines	38
Figure II-7 : Couplage inductif entre deux bobines	39
Figure II-8 : Deux bobines plates couplées entre elle désalignements angulaire et axial	40
Figure II-9 : Schéma du système de couplage sans résonance	40
Figure II-10 : Schéma de couplage avec compensation	42
Figure III-1 : Allure de la tension d'entrée.....	48
Figure III-2 : Analyse fréquentielle de la tension d'entrée.....	48
Figure III-3 : Tension de sortie en fonction de la fréquence.....	49
Figure III-4 : Allure du courant d'entrée	50
Figure III-5 : Analyse fréquentielle du courant d'entrée	50
Figure III-6 : Évolution de la puissance en fonction des fréquences et harmoniques.....	51
Figure III-7 : Tension de sortie en fonction du temps.....	52
Figure III-8 : Allure du courant de sortie	52
Figure III-9 : Analyse fréquentielle de la tension de sortie.....	53

Figure III-10 : Analyse fréquentielle du courant de sortie 53
Figure III-11 : Puissance en fonction de la distance..... 54
Figure III-12 : Courbe de rendement en fonction de la fréquence..... 54
Figure III-13 : Courbe de rendement en fonction de la fréquence..... 55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Système de couplage résonant comparé avec d'autres systèmes pour le WPT	19
Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques du système	45
Tableau III.2 : Paramètres électromagnétique.....	46

TSFE : Transfert sans fil d'énergie électrique

WPT: Wireless power transmission (transfert sans fil d'énergie électrique)

MIT: Massachusetts Institute of Technology

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor

Qi : Energie souffle vital

APT : Télécommunauté Asie-Pacifique

LED: Light electronic diode

RF : Radio fréquence

SBPA : Signal Binaire Pseudo-Aléatoire

INTRODUCTION GENERALE

Ce mémoire aborde le problème du couplage magnétique de deux bobinages dont les flux ne sont pas dirigés par des matériaux ferromagnétiques, autrement dit de bobines « sans fer ». L'étude porte ainsi en un premier temps sur l'élaboration théorique d'un modèle électrique des bobines à couplages faibles ; l'exploitation de ce modèle à l'occasion d'une étude en fréquence permettant de mettre en évidence un phénomène de résonance dans la transmission de puissance existant entre les deux enroulements. Par ailleurs, une étude magnétostatique permet de privilégier certaines géométries et particularités physiques des bobinages utilisés. Enfin, les conditions mises en évidence, portant sur la géométrie et les résonances, sont utilisées, testées et validées autour de la réalisation d'une transmission de puissance de l'ordre de 60 W entre deux bobinages séparés de 50 cm environ. [13]

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

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

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

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

Le troisième chapitre est consacré à l'application du modèle développé à une configuration géométrique et électromagnétique du TSFE où nous exposons les différents résultats des couplages fort et faible ainsi que ceux obtenus pour les systèmes inductifs résonnants. [14]

I. Principe de transmission sans fil d'énergie électrique

I.1 Introduction

Les méthodes de récupération d'énergie reçoivent actuellement une attention très significative de la part de la communauté de la recherche. En particulier, dans le cas des dispositifs médicaux implantables où le transfert sans fil d'énergie (TSFE) est devenu la méthode principale dans ce genre d'applications. En effet, Cette méthode de transfert d'énergie écarte tout risque d'infection au niveau de la peau, ainsi que la nécessité de chirurgie invasive pour un changement de pile. Cet article veut faire le point sur ce principe de transfert d'énergie par lien inductif. Un modèle analytique original de calcul des paramètres électriques du circuit équivalent aux bobines utilisées a été développé. Par ailleurs, une nouvelle structure composée de trois bobines visant à améliorer le rendement énergétique du lien inductif a été étudiée. Les résultats obtenus sont bien meilleurs que ceux obtenus par l'usage de deux bobines. [1]

I.2 Contexte et Historique

Le nombre d'appareils portables présents dans nos vies est en augmentation continue depuis la fin du 20^{ème} siècle, bien que ceux-ci soit limité par l'éphémère durée de charge des batteries/piles. La conséquence directe est l'intrusion des chargeurs et câbles d'alimentation dans notre quotidien, ce qui tend de plus en plus à limiter la mobilité offerte par les appareils sans fils. Dans certains domaines d'application, les batteries ne peuvent tout simplement pas être utilisées en raison de leur taille (micro-implants biomédicaux) ou de leur inaccessibilité (capteur de déformation implanté pendant 40 ans dans des structures de béton). Beaucoup d'effort de recherche a été consacré pour solutionner ces problèmes, et le transfert de puissance sans fil (wireless power transmission, WPT) à des appareils portables est devenu un moyen évident et réalisable pour résoudre ce problème. En réalité, il y a plus de cent ans, Tesla avait déjà proposé plusieurs systèmes de WPT utilisant des champs électromagnétiques de forte intensité, variant dans le temps. Mais à cette époque, il n'y avait que peu de

nécessité pour le WPT, parce que les systèmes de distribution électrique par câble était généralement d'une plus grande efficacité et moins coûteux pour les appareils électriques, comme les ampoules, utilisées à l'époque. Aujourd'hui, les dispositifs de transfert de puissance à courte distance sans fil en utilisant l'induction électromagnétique sont utilisés de plus en plus dans les produits de l'industrie pour la recharge sans contact. Cependant en raison de la limitation de la distance de transfert, cette technologie ne peut pas charger les appareils portables sur des distances de plus de 1/5^{ème} de la dimension de l'émetteur de puissance. Le couplage résonant est une méthode efficace qui permet de prolonger la distance de transfert jusqu'à une distance moyenne (plus de 2 ou 3 fois la dimension de l'émetteur ou récepteur). Celle-ci est analysée en détail dans un célèbre article théorique du MIT (cité plus de 1200 fois). [4]

I.3 Développement du concept de TSFE

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 (TSFE) sont étudiées, par exemple la transmission par faisceau radiofréquence, par induction d'un champ magnétique, par résonance, etc. Les applications de la TSFE vont des dispositifs mobiles et portables aux véhicules électriques en passant par les appareils domestiques et les équipements de bureau. De nouvelles caractéristiques sont définies, offrant par exemple une certaine latitude pour le positionnement des chargeurs. Certaines techniques permettent de recharger simultanément plusieurs dispositifs. Aujourd'hui, les techniques TSFE par induction sont largement disponibles sur le marché, tandis que les techniques TSFE par résonance font leur apparition sur le marché grand public. L'industrie automobile envisage d'utiliser la TSFE pour les véhicules électriques dans un avenir proche.

Les spécifications portent principalement sur les fréquences adaptées pour la TSFE pour pouvoir atteindre le niveau de puissance d'émission et l'efficacité énergétique requises, et sur les dimensions physiques des bobines et des antennes. Toutefois, les études sur la coexistence de la TSFE avec les systèmes radio existants sont maintenant examinées avec soin et font apparaître de nombreux problèmes qu'il convient de résoudre rapidement. Certains pays et certaines organisations internationales s'occupant de radiocommunications examinent actuellement la réglementation des radiocommunications nécessaire en vue de l'introduction des techniques TSFE. Certains résultats et certains examens en cours sont désormais accessibles à tous, par exemple le rapport de la Télécommunauté Asie-Pacifique (APT) sur la TSFE [5] et le rapport de l'APT sur la TSFE [6] contiennent les dernières informations en date sur l'examen de la réglementation par les pays membres de l'APT en vue de l'introduction de la TSFE.

Le présent Rapport donne des informations sur la TSFE au moyen de techniques autres que la transmission par faisceau radioélectrique, en tant qu'éléments de réponse à la Question.

Le présent Rapport contient des informations sur des réglementations nationales, mais ces informations n'ont pas d'incidence sur la réglementation au niveau international. [3]

I.4 Problématique et objectif de TSFE

I.4.1 Problématique

Dernièrement de nombreux dispositifs électriques sont apparue vue la progression explosive de la technologie aussi bien dans les domestiques que dans les endroits publics, ces dispositifs nécessitent une consommation d'énergie a travers des fils qui encombre l'environnement et qui nuit a l'esthétique en plus des frais économiques que cause ces câbles.

Le transfert d'énergie sans fil peut devenir alors une alternative et une solution intéressante à ces inconvénients et tantôt une innovation qui peut faciliter l'utilisation de l'énergie électrique.

Le problème qui se pose aujourd'hui est bien le rendement médiocre de cette nouvelle alternative ce pour laquelle nous essayent d'y remédier dans ce document on exploite la résonance des circuits couplés magnétiquement.

I.4.2 Objectif

L'objectif de la spécification est d'offrir aux utilisateurs une technique de recharge adaptée au monde réel qui soit pratique, sûre et exceptionnelle, tout en définissant les bases techniques pour permettre aux entreprises de fabriquer des produits conformes. Il s'agit de spécifier une interface pour l'émetteur et le récepteur d'énergie sans fil, le couplage mutuel et l'inductance mutuelle – une marge de manœuvre étant laissée aux responsables de la mise en œuvre pour la plupart des options.

Pour adapter la transmission d'énergie sans fil aux conditions du monde réel, une certaine latitude est offerte au niveau spatial, ce qui laisse un large choix concernant le coefficient de couplage, la taille des dispositifs, les conditions de charge et l'espacement entre l'émetteur et le récepteur d'énergie. Ainsi, les concepteurs de produits de transmission d'énergie sans fil disposent d'une grande latitude pour mettre en œuvre des systèmes de recharge, et les consommateurs en retirent des avantages exceptionnels.

I.5 Description des techniques TSFE

I.5.1 Dispositifs mobiles

La TSFE par induction utilise des techniques d'induction. Les applications sont les suivantes:

1. Téléphones cellulaires, Smartphones, tablettes, ordinateurs bloc-notes;

2. Matériel audiovisuel: appareils photo-numériques;
 1. Équipements professionnels: outils numériques pratiques, systèmes de prise de commande à table;
 - Autres: matériel d'éclairage (LED), robots, jouets, dispositifs installés à bord de véhicules, matériel médical, dispositifs de soins de santé.

Certaines techniques de ce type peuvent nécessiter que le dispositif soit positionné exactement sur la source d'énergie. En général, le dispositif à recharger doit être en contact avec la source d'énergie, par exemple le socle de recharge. La puissance de fonctionnement est supposée être comprise entre plusieurs watts et plusieurs dizaines de watts.

TSFE par résonance pour les dispositifs mobiles tels que les téléphones cellulaires et les dispositifs multimédias portables tels que les Smartphones et les tablettes :

La TSFE par résonance utilise des techniques de résonance, pour lesquelles la latitude au niveau spatial est plus grande que pour les techniques d'induction. Les applications sont les suivantes, pour une orientation quelconque (x, y et z) sans techniques d'alignement:

Téléphones cellulaires, Smartphones, tablettes, ordinateurs bloc-notes, dispositifs à porter sur soi;

Appareils photo-numériques, caméscopes numériques, lecteurs de musique, téléviseurs portables;

Outils numériques pratiques, systèmes de prise de commande à table, matériel d'éclairage (par exemple LED), robots, jouets, dispositifs installés à bord de véhicules, matériel médical, dispositifs de soins de santé, etc.

1.5.2 Appareils domestiques et applications logistiques

Il est possible que les caractéristiques et aspects nécessaires dans ce cas soient analogues à ce qu'ils sont dans le cas de la TSFE pour les dispositifs portables et multimédias. Toutefois, la puissance utilisée est généralement

plus élevée. Par conséquent, il se peut que certains pays exigent que des dispositions réglementaires supplémentaires soient respectées.

Plus la puissance de fonctionnement des équipements grand public tels que les téléviseurs grand écran est élevée, plus la TSFE pour ces produits nécessite une puissance de recharge élevée, supérieure à 100 W, pour laquelle la certification ne pourra pas être obtenue dans certains pays au vu des catégories réglementaires et des politiques en matière de radiocommunications qui existent.

Les méthodes d'induction magnétique et de résonance magnétique peuvent être utilisées en fonction du type d'applications de la TSFE :

Appareils domestiques ou applications logistiques. Les applications sont les suivantes:

Appareils domestiques: appareils électroménagers, mobilier, cuisinière, mixeur, téléviseur, petit robot, matériel audiovisuel, matériel d'éclairage, dispositifs de soins de santé, etc.;

Applications logistiques: matériel de stockage dans un entrepôt logistique, matériel médical, transmission aérienne sur des lignes de produits LCD et à semi-conducteurs, véhicules à guidage automatique (VGA), etc.

La puissance de fonctionnement devrait être comprise entre plusieurs centaines de watts et plusieurs kW en raison de la consommation d'énergie des dispositifs. Les fréquences adaptées sont inférieures à 6 780 kHz si l'on tient compte des émissions RF, de l'exposition et des performances du système. [3]

I.5.3 Véhicules électriques

Le principe de la TSFE pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables est de recharger lesdits véhicules sans câble d'alimentation lorsque la TSFE est disponible.

La puissance de recharge peut varier en fonction des exigences des utilisateurs. En général, pour des véhicules de tourisme dans leur garage, une puissance de l'ordre de 3,3 kW est acceptable. Toutefois, certains utilisateurs souhaitent que la recharge soit rapide ou il se peut que leur véhicule nécessite une puissance beaucoup plus élevée pour un usage particulier. Une puissance de 20 kW ou plus est également envisagée aujourd'hui.

La puissance de recharge peut varier d'un poids lourd à l'autre. Pour ces véhicules, une puissance initiale équivalente à 75 kW peut être nécessaire. Une puissance de 100 kW ou plus est également envisagée.

Si l'alimentation électrique des véhicules électriques par la TSFE se généralisait, la taille des batteries des véhicules électriques pourrait être réduite et les trajets pourraient ne plus être limités.

L'énergie rechargée dans un véhicule sera utilisée pour la conduite, l'alimentation de dispositifs supplémentaires dans le véhicule, la climatisation et d'autres besoins liés au véhicule.

Les techniques et applications TSFE sont examinées à la fois lorsque le véhicule est en stationnement et lorsqu'il circule. [3]

I.6 Systèmes de transmission de puissance sans fil

Il y a principalement trois types de méthode de transfert de puissance sans fil ; la transmission de puissance par rayonnement en champ lointain, la transmission de puissance par couplage non-résonnant en champ proche et la transmission de puissance par couplage résonnant en champ proche.

I.6.1 Rayonnement en champ lointain

Une antenne à forte directivité est capable de transférer une puissance dans son champ lointain par rayonnement. Les antennes ou réseaux d'antennes directionnelles peuvent être très petites si elles fonctionnent à des fréquences hautes et la distance de transmission peut être dix fois ou plusieurs centaines de fois de la dimension de l'antenne avec une efficacité

de transmission acceptable. Cependant, la transmission de puissance de ce type est sur une ligne droite (*line of sight*), qui ne peut être interrompue par des obstacles (qui interfêreraient avec le fort champ électrique), et un mécanisme de suivi de récepteur doit être nécessairement utilisé pour ajuster la direction du faisceau de rayonnement. En outre, l'interférence du champ électrique avec le corps humain constitue une menace pour la santé humaine, et donc des normes de sécurité sont développées pour limiter l'exposition humaine aux champs électromagnétiques radiofréquences. [4] et [9] Ce type de transmission est encore tout à fait adapté pour la transmission de puissance élevée vers un désert, tels que la transmission de l'énergie solaire récoltée par un satellite vers la terre. [2]

I.6.2 Couplage non-résonnant en champ proche

Le système de couplage en champ proche, que ce soit dans le cas résonant ou non- résonnant, opère généralement le long des lignes de champ magnétique dont l'intensité est beaucoup plus forte que celle des champs électriques dans la région non-radiative. La plupart des matériaux usuels n'interagissent que peu avec des champs magnétiques, et par conséquent, les interactions avec les objets de l'environnement peuvent être négligées dans beaucoup de situation. C'est la raison pour laquelle le corps humain peut supporter de plus forte densité d'énergie de champ magnétique qu'électrique. Pour une même norme de sécurité, l'utilisation du champ magnétique permet donc de transférer plus de puissance. Le couplage non résonant est utilisé pour transférer la puissance sans fil par l'inductance magnétique, et n'est pas dépendant de la fréquence de résonance de l'émetteur ni des circuits du récepteur. Les systèmes du WPT par le couplage non-résonant sont montrés dans la figure I.1 et le modèle de circuit pour le système du WPT par couplage non-résonant est montré dans la figure I.2. Cette méthode présente une caractéristique large bande de transmission de puissance. Les impédances sont insensibles aux ports d'entrée, aux ports de sortie, ainsi que de la distance de transfert, ce qui rend ces systèmes assez économiques. Ces caractéristiques indiquent que le couplage

magnétique non-résonant est adapté aux appareils peu coûteux pour la transmission de puissance à la courte distance (transmission « sans contact »). Aujourd'hui, le couplage non-résonant pour la transmission de puissance sans fil est de plus en plus utilisé pour charger les batteries de manière sans fil dans l'électronique grand public, tels que les téléphones cellulaires, les tablettes et les ordinateurs portables, etc. La norme Qi pour les appareils de WPT (inférieure à 5W) à courte distance est déjà en vigueur. L'objectif de la norme Qi est de faire chuter le prix des appareils à transfert de puissance sans contact jusqu'à être plus compétitifs que des chargeurs à fil.



Figure I-1 Transfert de puissance sans fil par le couplage non-résonant

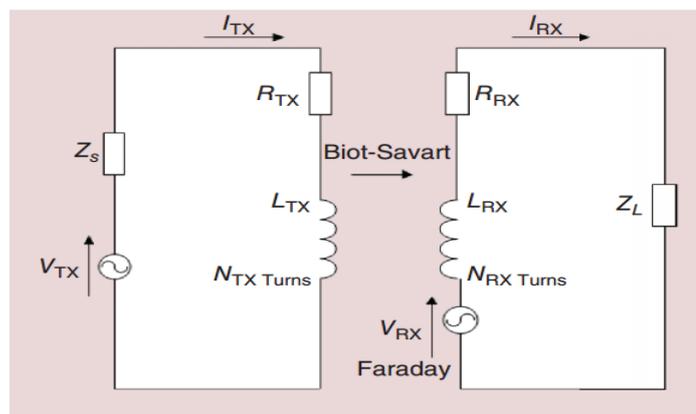


Figure I-2 : TSFE par couplage non-résonant

I.6.3 Couplage résonnant en champ proche

D'un autre côté, les techniques de transfert de puissance par couplage à la résonance sont capables d'atteindre une plus grande portée. Les résonateurs à haut coefficient de qualité Q ont la capacité de stocker une grande quantité d'énergie avec de faible perte, ce qui signifie que la plage de couplage fort est beaucoup plus large que dans le cas non-résonant. Dans un résonateur, les énergies électriques et magnétiques peuvent être stockées à des endroits différents. Si l'on souhaite que l'énergie magnétique soit prédominante, il faut confiner l'énergie électrique dans une zone la plus proche possible du résonateur, tout en laissant l'énergie magnétique se développer dans une zone beaucoup plus large pour permettre le couplage. La résonance sera fortement influencée par la proximité d'autres résonateurs ayant la même fréquence de résonance, mais sera très peu influencée par la présence d'un résonateur fonctionnant à une fréquence différente. Cela signifie que la transmission de puissance par couplage magnétique est sensible à la distance entre les résonateurs, mais pas aux autres objets dans le trajet de transmission.

Il y a plus d'un siècle, Tesla a découvert que la puissance électrique peut être transférée sans fil entre deux bobines couplées magnétiquement. Il utilisait alors une paire de boucles résonnantes LC consistant en une bobine et un condensateur. Une analyse détaillée de la faisabilité de l'utilisation d'objets résonnants, tels que des bobines, des bagues, des résonateurs diélectriques, couplées magnétiquement pour le WPT a publié il y a six ans. Dans un article de Science [10], des chercheurs du MIT rapportent avoir utilisé des bobines à self-résonance de diamètre de 60cm dans un régime de couplage fort, ce qui leur a permis de démontrer expérimentalement un transfert de puissance efficace sur des distances allant jusqu'à 2.5 fois de diamètre des bobines (efficacité de 70%) et jusqu'à 3.5 fois de diamètre (efficacité de 40%). La distance et la puissance de la transmission sont beaucoup plus grandes que dans le cas non-résonant, ce qui est l'avantage évident de cette technique. Cependant, le mécanisme intrinsèque de cette

technique impose certaines difficultés à son utilisation commerciale, car la fréquence de résonance et les impédances d'entrée et de sortie sont très sensibles à la variation de la distance de transmission, lorsque les résonateurs sont dans la région de couplage fort. En outre, la distance de transmission est limitée et n'est pas suffisante pour charger les appareils portables dans une pièce entière. La faible efficacité et le coût plus élevé comparé aux les chargeurs filaires ralentisse le développement de ces applications destinées à la vie quotidienne.

I.7 Avantages et inconvénients des différents systèmes TSFE

D'une manière générale, les trois types de technique WPT ont des applications différentes. L'antenne à grande directivité est adaptée pour transférer la puissance en point à point sans obstacles, là où l'utilisation de câble serait impossible ou coûteux. La technique de transmission de puissance non-résonance peut être utilisée pour charger les appareils portables commodément à la courte distance. La technique de transmission de puissance par résonance permet d'étendre la distance de transmission, mais la variation de distance de transmission, complexifie le système WPT et nécessite l'utilisation de réseaux d'adaptation d'impédance et d'un oscillateur ajustable afin d'optimiser l'efficacité de transmission.

Tableau I.1 : Système de couplage résonant comparé avec d'autres systèmes pour le WPT.

	<i>Entre des antennes à directivité grande au champ lointain</i>	<i>Couplage non-résonnant au champ proche</i>	<i>Couplage résonnant au champ proche</i>
<i>Distance de transmission</i>	Moyenne - Loin	Proche (moins de 1/5 de la dimension des coupleurs)	Proche – Moyenne (entre 1 à 3 fois de la dimension des coupleurs)
<i>Directionnalité</i>	Grande	Moyenne	Faible
<i>Capacité de puissance</i>	Moyen - Grande	Faible (au-dessous de 5 watts)	Moyenne (au delà de la centaine de watts)
<i>Sécurité au corps humain</i>	Parfois dangereux	Sécuritaire	Sécuritaire
<i>Complexité du système</i>	Moyenne (sans mécanisme de suivi), Complexe (avec un mécanisme de suivi)	Simple	Complexe

Par conséquent, il est probable que le WPT à distance fixe trouve sa valeur commerciale dans l'alimentation des bus électriques ou des voitures électriques.

Le WPT à la moyenne distance variable pourrait trouver un marché dans certains domaines particuliers d'application où le coût relativement plus élevés peut être acceptée, telles que l'alimentation des implants médicaux dans le corps humain. Chacune des trois méthodes a ses avantages et ses inconvénients, comme le montre le tableau I.1 [2]

I.8 Techniques employées dans les applications TSFE

I.8.1 Induction magnétique

Lorsque deux bobines à induction sont suffisamment proches, le flux magnétique généré par l'une des bobines peut traverser en partie l'autre. Lorsque ce flux est variable cela induit une force électromotrice dans cette deuxième bobine. On conçoit aisément que le couplage total sera obtenu lorsque la totalité du flux sera entièrement partagé par les deux bobines. Lorsque ce n'est pas le cas, on pourra définir pour chaque bobine un flux de fuite et un flux total qui traverse la bobine considéré, somme du flux mutuel et du flux de fuite. [15]

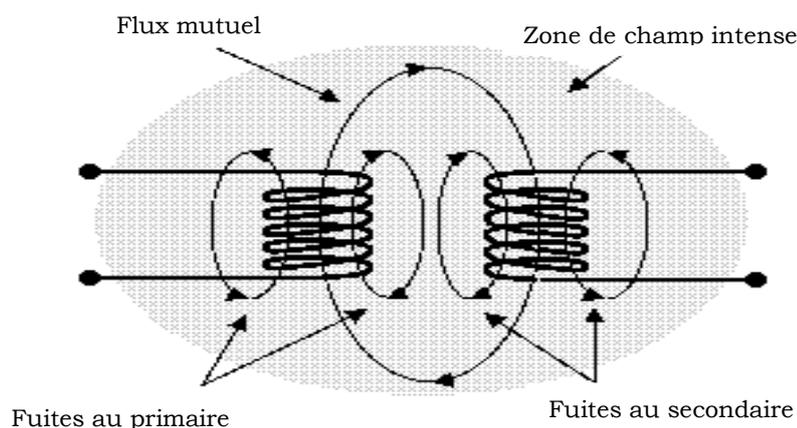


Figure I-3 : Circuits magnétiques couplés, flux commun et flux de fuites

La TSFE par induction magnétique est une technique bien connue, qui est utilisée depuis longtemps dans les transformateurs, dans lesquelles une bobine primaire et une bobine secondaire sont couplées par induction. La transmission d'énergie par induction dans l'air, dans laquelle les bobines primaire et secondaire sont séparées physiquement, est également une technique connue depuis plus d'un siècle. Appelée TSFE à couplage étroit, cette technique est caractérisée par le fait que le rendement de la transmission d'énergie chute si la distance dans l'air est supérieure au diamètre de la bobine et si les bobines ne sont pas alignées en delà de la distance de décalage. Le rendement de la transmission d'énergie dépend du facteur de couplage entre les inducteurs et de leur qualité.

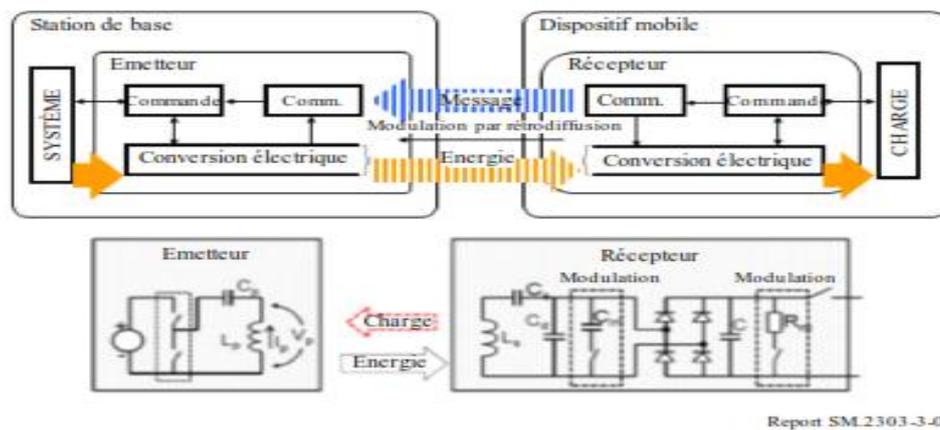


Figure I-4 : Schéma de système TSFE par induction magnétique

Cette technique permet d'obtenir un rendement plus élevé que la méthode de résonance magnétique. Elle est commercialisée pour la recharge des Smartphones. 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.

I.8.2 Résonance magnétique

La TSFE par résonance magnétique est également appelée TSFE 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 [7]. 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). 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. La TSFE 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. On trouvera des détails techniques pratiques dans un grand nombre d'articles techniques. [3] et [8]

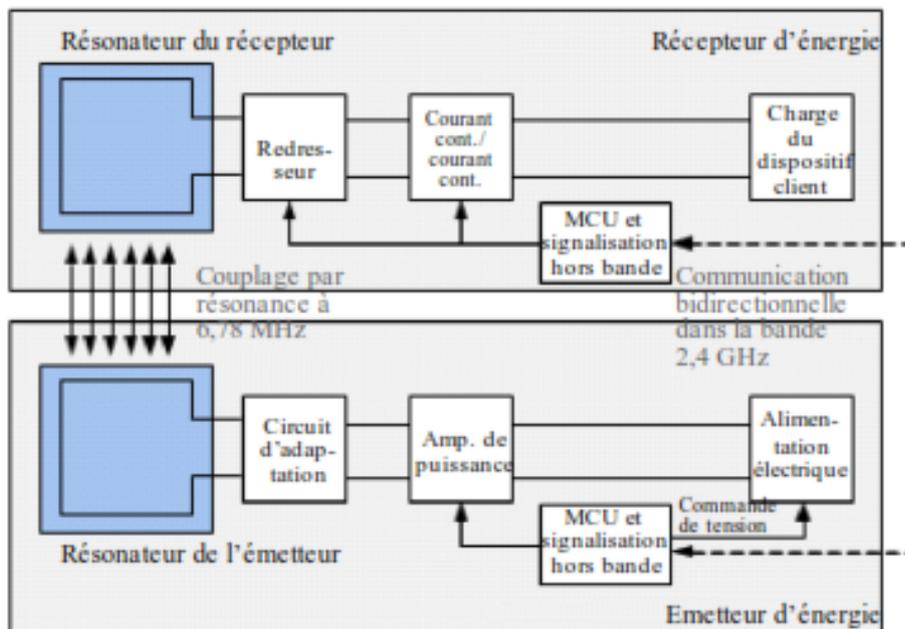


Figure I-5 : Schéma d'un système TSFE par résonance magnétique

I.8.3 Couplage capacitif

Le système TSFE par couplage capacitif possède deux ensembles d'électrodes et n'utilise pas de bobines comme dans le cas des systèmes

TSFE de type magnétique. 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 indiqués ci-après. La Figures 5 représente sa structure type.

Le système à couplage capacitif offre une certaine latitude pour le positionnement horizontal avec un système de recharge facile à utiliser pour les utilisateurs finals.

Une électrode très mince (moins de 0,2 mm) peut être utilisée entre l'émetteur et le récepteur du système, ce qui permet de l'intégrer dans les dispositifs mobiles de faible épaisseur.

Pas de génération de chaleur dans la zone de transmission d'énergie sans fil. Autrement dit, la température ne s'élève pas dans cette zone, de sorte que la batterie est protégée contre la chaleur y compris lorsqu'elle est placée à proximité.

Le niveau d'émission du champ électrique est faible en raison de la structure du système de couplage. Le champ électrique émane des électrodes destinées à la transmission d'énergie.

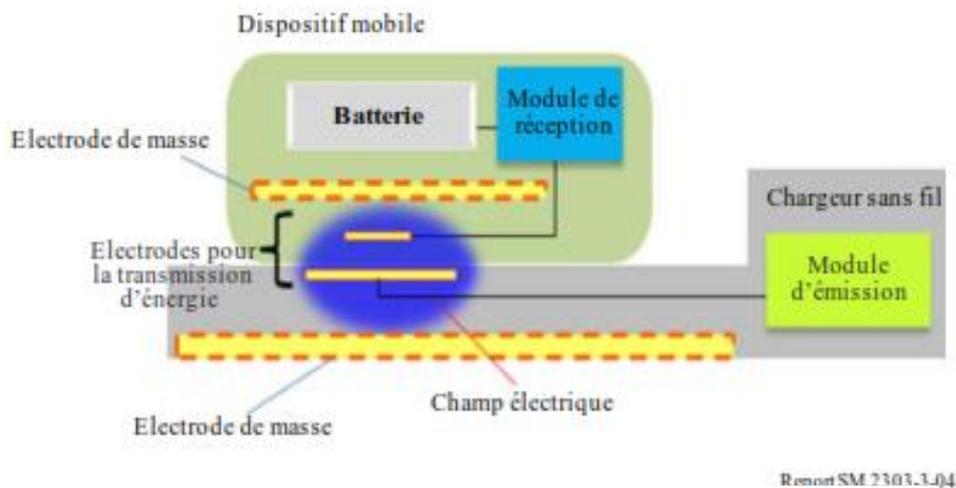


Figure I-6 : Structure type du système à couplage capacitif

I.9 Application des techniques TSFE

I.9.1 Dispositifs domestiques

Les sources de transmission d'énergie par induction (émetteurs) peuvent être interdépendantes ou être intégrées dans les plans de travail de la cuisine ou dans les tables de repas. Ces émetteurs pourraient permettre d'associer la TSFE à un appareil avec un système classique de chauffage par induction.

Pour les appareils domestiques, le niveau de puissance est généralement de plusieurs kilowatts exploités par 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. Et, outre le fait qu'il doit être peu onéreux, il est également essentiel que l'émetteur soit léger et de petite taille pour être installé dans la cuisine. La distance entre l'émetteur et le récepteur est censée être inférieure à 10 cm. Des systèmes TSFE sont déjà intégrés dans les lignes de produits des panneaux à semi-conducteurs et LCD. [3]

I.9.2 Véhicules électriques

Il existe plusieurs types de méthodes TSFE, mais la transmission d'énergie sans fil utilisant un champ magnétique (TSFE-CM) est l'une des principales méthodes étudiées aux fins de la normalisation (par exemple CEI PT61980 et SAE J2954TF) en ce qui concerne la TSFE pour les véhicules

électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables. La TSFE-CM pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables utilise à la fois l'induction et la résonance magnétique. L'énergie électrique est transmise de la bobine primaire à la bobine secondaire efficacement par un champ magnétique en utilisant la résonance entre la bobine et le condensateur.

Pour mouvoir un poids lourd tel qu'un bus électrique, l'infrastructure du système doit incorporer des bandes électrifiées dans la chaussée qui transmettront magnétiquement de l'énergie audit véhicule électrique. Le bus se déplace le long de ces bandes sans s'arrêter pour recharger ses batteries: on parle de véhicule électrique en ligne (OLEV). Le bus peut aussi être rechargé à l'arrêt (arrêt de bus ou garage). Le bus en ligne dans un parc d'attractions ou en ville est le premier système exploité en tant que poids lourd électrique dans le monde.

La conception du champ magnétique entre la bobine d'émission et la bobine de réception est essentielle dans la conception du système TSFE pour que l'énergie et le rendement soient les plus élevés possibles.

En premier lieu, le champ magnétique doit être en résonance grâce à l'utilisation de bobines d'émission et de réception en résonance afin d'obtenir une énergie et un rendement élevés.

En deuxième lieu, la forme du champ magnétique doit être contrôlée, grâce à l'utilisation d'un matériau magnétique comme un tore de ferrite, de manière qu'il y ait le moins de résistance magnétique possible sur le trajet du champ magnétique, afin de réduire les fuites de champ magnétique et d'augmenter l'énergie transmise. On parle de technologie SMFIR (champ magnétique à forme contrôlée en résonance). [3]

I.9.3 Application médicale

Un courant alternatif à travers la bobine externe induit un champ magnétique alternatif. Ce champ magnétique est capté par une bobine de

réception, produisant une force électromotrice dans celui-ci. Ainsi, la puissance est transférée à l'implant.

Notons que les dimensions des bobines sont toujours supposées petites par rapport à la longueur d'onde et seul le champ proche est considéré. Un couplage magnétique très fort peut être réalisé par une canalisation du flux magnétique à l'aide d'un noyau ferromagnétique. Dans ce cas, les flux magnétiques à travers les bobines de transmission et de réception sont presque identiques, comme pour un transformateur.

Cependant pour des implants biomédicaux, un noyau ferromagnétique est difficile à réaliser et donc seulement une petite partie du flux magnétique est captée par la bobine secondaire. Afin de garantir la sécurité humaine, la puissance transmise de l'unité extérieure doit alors être conforme aux normes de sécurité.

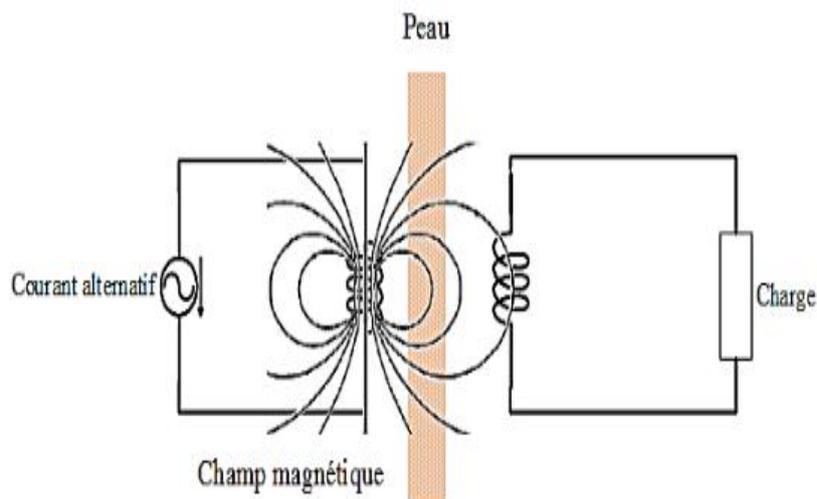


Figure I-7 : Principe de transmission de puissance par lien inductive

Dans un lien inductif, le courant est beaucoup plus important dans les bobines d'induction que dans les tissus biologiques environnants. En fait, étant donné que la conductivité du corps humain est minime devant celle du cuivre utilisé pour le bobinage, le champ électrique ne s'écoule pas à travers le corps, ce qui définit la transmission de puissance inductive comme le standard dans l'alimentation transcutanée. Bien que les liens inductifs aient été initialement conçus pour le transfert de puissance, ils disposent la

possibilité d'un transfert des données vers l'implant par une modulation puis une démodulation au côté secondaire, sachant qu'un débit élevé de données nécessite une haute fréquence de transfert de puissance (minimum une vingtaine de fois le débit de données). L'implant peut également transmettre des données dans la direction opposée, vers le contrôleur externe, en modulant sa consommation d'énergie ou en modifiant les caractéristiques de réglage de la bobine secondaire et de son condensateur de résonance [12]. Une description plus détaillée sur les caractéristiques du lien inductif, de son architecture et de son principe de fonctionnement sera abordée dans le deuxième chapitre.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisée une étude qualitative de TSFE, ainsi que les différentes techniques de couplage citant au passage quelques applications existantes. Dans ce qui suit, nous nous intéressant à la modélisation du transfert inductif non résonant et résonnant série-série.

II. Modélisation électromagnétique du TSFE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les aspects fondamentaux de l'électromagnétisme. Au début, un rappel de la théorie du couplage magnétique va être survolé. Ensuite, nous allons caractériser le couplage inductif pour démontrer l'impact de la variation des paramètres du lien sur la qualité du transfert d'énergie. Nous allons nous limiter au régime quasi-stationnaire et à la configuration axisymétrique pour poser les équations nécessaire au modèle à simuler.

II.2 Lois fondamentales en électrotechnique

II.2.1 Équation de Maxwell

Le phénomène du magnétisme est basé sur les lois suivantes :

1. Théorème d'Ampère et Loi de Biot et Savart
2. Force de Lorentz et de Laplace,
3. Loi d'induction de Faraday et de Lenz.

Les équations de Maxwell contiennent ces trois lois en faisant intervenir des opérateurs vectoriels assez complexes (divergence, rotationnel). Dans notre étude, ces équations peuvent être envisagées plus simplement. En effet, d'une part les distances de la région ou on l'observe les phénomènes sont faible devant la longueur d'onde du champ électromagnétique, d'autre part, il n'y a pas de champ électrostatique important, on peut donc négliger le "courant de déplacement" D , ce qui nous permet de nous limiter qu'au régime quasi-stationnaire. [11]

II.2.2 Équations de maxwell dans le cas quasi-stationnaire

On défini les équations comme suit :

$$\text{Maxwell-Ampere} \quad \overrightarrow{rot}\vec{H}=\vec{j} \quad (a)$$

$$\text{Maxwell-Faraday} \quad \overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (b) \quad (II.1)$$

$$\text{Maxwell-Thomson} \quad \text{div}\vec{B} = 0 \quad (c)$$

$$\text{Maxwell-Gauss} \quad \text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{d})$$

Où :

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

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

$\vec{J}[A/m^2]$ Et $\rho[C/m^3]$: densités de courant de conduction et de charge électrique.

II.2.3 Lois de comportement des milieux

II.2.3.1 Loi d'Ohm

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.2})$$

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

II.2.3.2 Relation magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.3})$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$\mu[H/m]$: Perméabilité magnétique

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

μ_r : Perméabilité magnétique du milieu

II.2.3.3 Relation diélectrique

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.4})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

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

$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} [F/m]$: Permittivité électrique du vide

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré

II.3 Système axisymétrique

La figure II.3 montre une configuration dont l'inducteur est plan spiral et en négligeant l'hélicité des spires inductrices, ce système possède une symétrie de révolution. Le problème devient bidimensionnel.

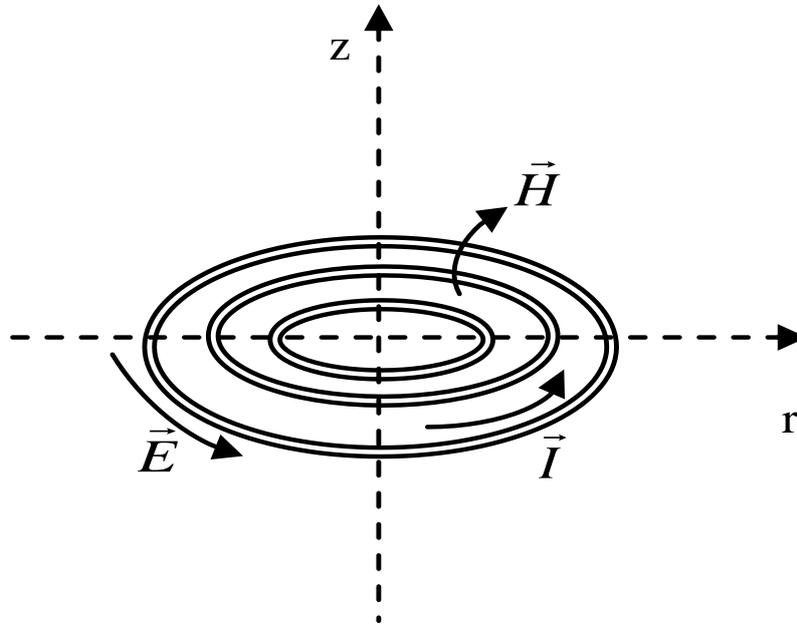


Figure II-1 : Géométrie de la bobine

Le potentiel se réduit à sa composante azimutale suivant l'axe θ qui ne dépend que de r et z , où l'inconnue est perpendiculaire au plan r - z (Figure II.4)

D'où :

$$\begin{cases} \vec{A} = A_{\theta}(r, z)\vec{e}_{\theta} & (a) \\ \vec{J} = J_{\theta}(r, z)\vec{e}_{\theta} & (b) \end{cases} \quad (II.5)$$

Seront considéré dans la suite de l'étude comme étant des scalaire et sont égaux respectivement à A_{θ}, J_{θ} .

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

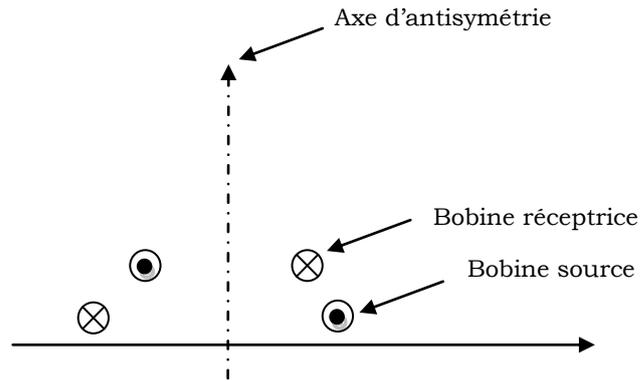


Figure II-2 : 2D axisymétrique

Le calcul vectoriel en coordonne cylindrique et l'utilisation de la notation complexe permettent d'atteindre le résultat suivant:

$$\begin{cases} \text{div}(gr\vec{a}dA) = \mu_0 J & (a) \\ \vec{J} = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + gr\vec{a}dV \right) & (b) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

II.4 Principe de fonctionnement d'un couplage inductif

Le comportement d'un lien inductif comprenant un circuit primaire (système d'émission) et un circuit secondaire (système de réception) peut être traité à deux niveaux d'abstraction différents : une description des champs électromagnétiques et une description au niveau circuit. Ces deux abstractions sont complémentaires, cependant il peut être difficile de faire le passage d'une à l'autre. La description électromagnétique est basée sur la géométrie et la composition physique des éléments de liaison, mais elle ne donne pas l'information directe sur la façon dont les signaux électriques se propagent dans le lien de transfert de puissance. Aussi, une description au niveau circuit peut être utilisée pour déduire les caractéristiques du lien, mais les paramètres clefs, c'est-à-dire les éléments composant le circuit comme les inductances, les éléments parasites et le coefficient de couplage,

peuvent seulement être extraits de la description des champs électromagnétiques. Cette extraction de paramètres n'est pas toujours une tâche facile due à la complexité des équations découlant la géométrie du dispositif. Pour ce faire nous allons présenter une méthode analytique qui permet de calculer ces paramètres électriques dans le cas de deux bobines couplées entre eux et situées arbitrairement dans l'espace.

II.5 Modèle électromagnétique

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 plate 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.

II.5.1 Lien inductif entre deux spires

Considérant deux spires situées arbitrairement dans l'espace (désalignements axial et angulaire) et couplées entre elles. 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 $c (x_c, y_c, z_c = d)$ (figure II.3).

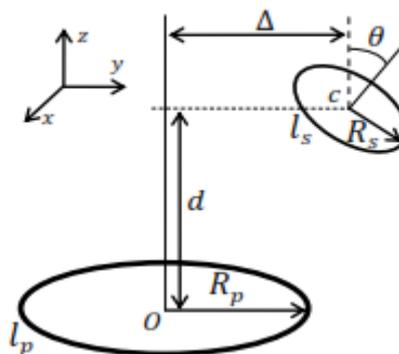


Figure II-3 : Spires désaxées

Chaque spire est équivalente à une inductance L en série avec une résistance R (figure II.6). En effet, R caractérise la résistance interne de l'inductance. D'une façon générale, Les paramètres électriques d'une spire dépendent de la fréquence.

Par conséquent, le modèle électrique équivalent à deux spires couplées est représenté sur la figure II.4 L_p et L_s étant les inductances propres de spires l_p et l_s respectivement. R_p , R_s sont les résistances internes de chaque spire respectivement. M_{ps} est la mutuelle inductance entre les deux spires couplées.

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.

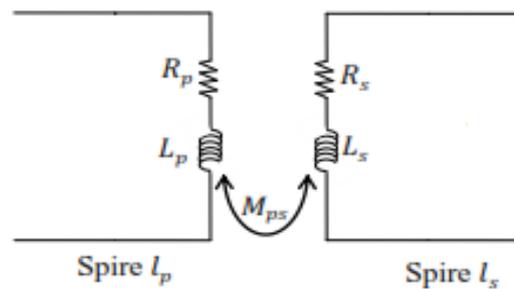


Figure II-4 : Modèle électrique équivalent à deux spires

L'inductance propre d'une spire de rayon R et de section a est donnée par:

$$L(a, R) = \mu_0 a \left(\ln \left(\frac{8a}{R} \right) - 2 \right) \quad (II.7)$$

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

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (II.8)$$

Avec Met la mutuelle inductance, L_1 et L_2 sont les inductances propres de chaque bobine.

Ce facteur dépend fortement de la géométrie des bobines (dimension et forme), de leur position relative (distance et angle) et de la propriété de leurs matériaux. Ainsi, lui donner une expression analytique de façon judicieuse n'est pas une tâche facile. Cependant, Roz et Fuentes l'ont estimé par l'équation suivante :

$$K = \frac{r_{L1}^2 r_{L2}^2 \cos \theta}{\sqrt{r_{L1} r_{L2}} \left(\sqrt{d_a^2 + r_{L1}^2} \right)^3} \quad (II.9)$$

r_{L1} et r_{L2} sont les rayons respectifs de la bobine primaire et secondaire; d_a et θ sont respectivement la distance axiale et l'angle entre les bobines. Néanmoins, l'équation (II.24) ne s'applique que si $r_{L1} \geq r_{L2}$.

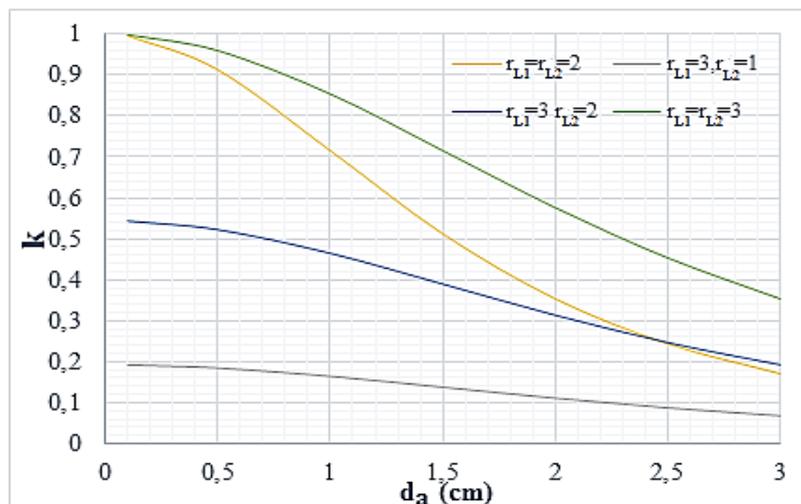


Figure II-5 : Facteur de couplage en fonction de la distance entre deux bobines

Dans le cas des deux bobines alignées axialement ($\theta = 0$), un écartement des bobines entraîne une diminution non linéaire du facteur de couplage k . cela peut-être remarquée dans la figure II.7 interprétée de l'équation (II.24). 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 viennent bien confirmer les mesures réalisées par le groupe de recherche de Philips à Eindhoven. Ils démontrent qu'une efficacité de puissance optimale est atteinte lorsque les bobines primaires et secondaires ont les mêmes rayons. Leur résultat a été exposé dans la figure II.8 qui présente dans une échelle logarithmique, l'efficacité énergétique en fonction de la distance axiale entre les bobines d_a (normalisée avec le diamètre de la plus grande bobine D). L'efficacité a été prélevée pour différents ratios de diamètre $\frac{D_2}{D}$, avec D_2 est le diamètre de la plus petite bobine. [1]

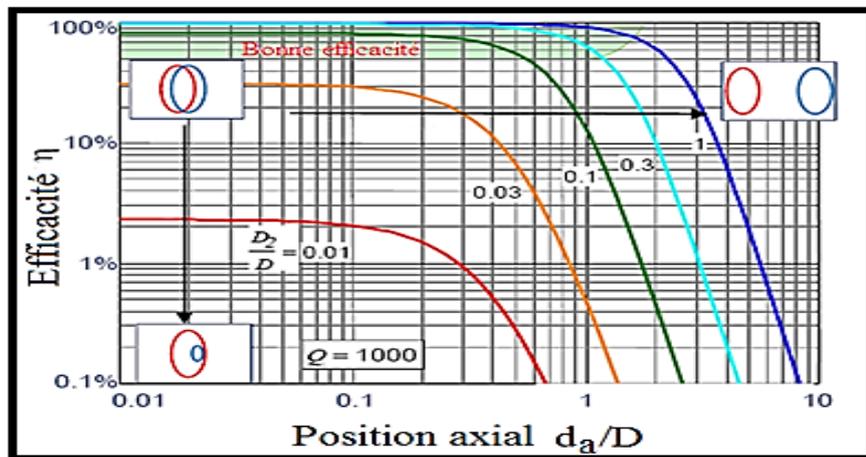


Figure II-6 : Efficacité énergétique entre deux bobines

L'inductance mutuelle M peut être calculée à partir des expressions (II.23) et (II.24) après avoir déterminé l'inductance de chaque spire ainsi que le coefficient de couplage entre elles.

La figure II.7 représente le 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. Le rendement de la puissance transmise noté «PTE» (Power Transfer Efficiency) peut être optimisé si les deux coupleurs résonnent à la même fréquence. En effet, 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 . 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 .

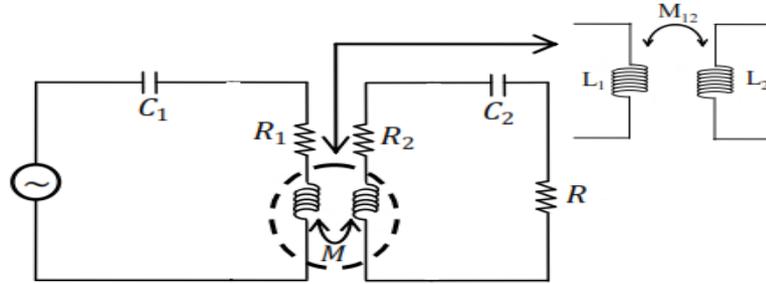


Figure II-7 : Couplage inductif entre deux bobines

II.5.2 Couplage inductif entre deux bobines plates

Considérons maintenant deux bobines plates constituées de spires concentriques de différents diamètres (cf. figure II.8). 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 .

Dans le cas d'une bobine plate constituée de N spires concentriques de rayon identiques, son inductance propre L est équivalente à l'inductance propre d'une seule spire (équation(II.22)) multipliée par N^2 . Par contre dans le cas d'une bobine plate constituée de N spires concentriques chacune de rayon R_i ($i = 1, 2, \dots, N_p$) et de section a (cf. figure II.8), son inductance propre L_p est égale :

$$L_p = \sum_{i=1}^{N_p} L(R_i, a) + \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} M(R_i, R_j, \Delta=0, d=0, \theta=0)(1 - \delta_{i,j}) \quad (II.10)$$

Avec $\delta_{i,j} = 1$ pour $i \neq j$ et vaut 0 pour $i = j$. [1]

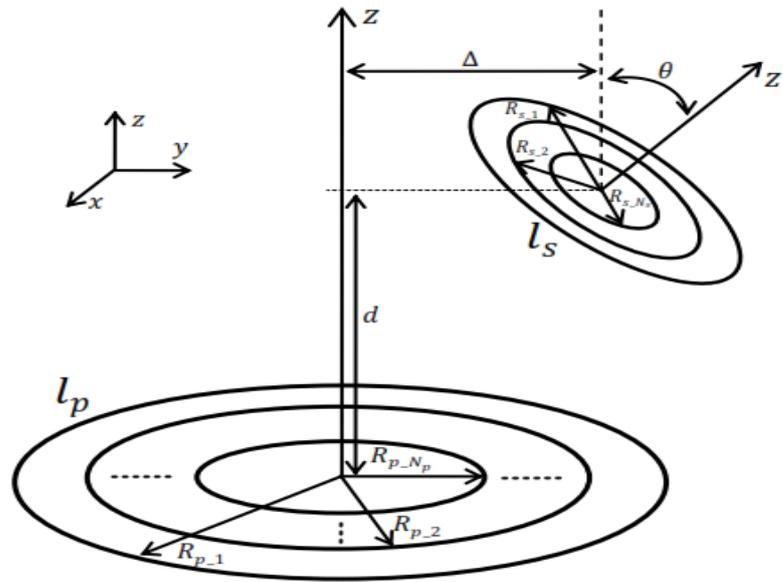


Figure II-8 : Deux bobines plates couplées entre elle
désalignements angulaire et axial

II.6 Mise en équation du système

II.6.1 Équation générale

Le système à étudier se ramène à un transformateur sans circuit magnétique (vide), il est composé de deux parties ; une partie émettrice alimentée par une source de tension continue variable, et d'une partie réceptrice reliée à une charge, comme le montre la figure II.9.

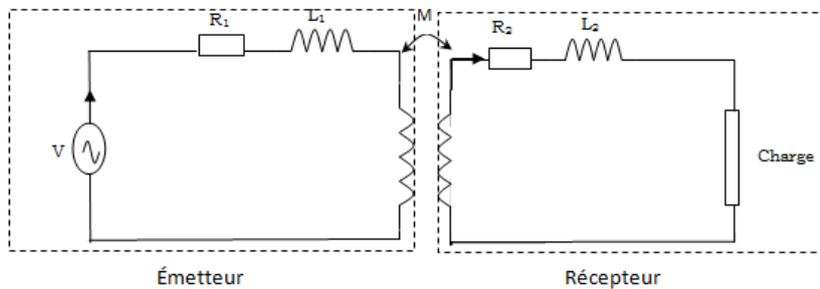


Figure II-9 : Schéma du système de couplage sans résonance

Ainsi, le système d'équations à résoudre est :

$$\begin{cases} (R_1 + jL_1\omega)I_1 + jM\omega I_2 = U_1 \\ (R_2 + jL_2\omega)I_2 + jM\omega I_1 = -U_2 \end{cases} \quad (II.13)$$

Avec :

$\omega = 2\pi f$: pulsation électrique.

f [Hz] : Fréquence.

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

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

M [H] : Mutuelle inductance entre les bobines.

Le coefficient de couplage est donné par :

$$K_p = M / \sqrt{L_1 L_2} \quad (II.14)$$

Le rapport de transformation est donné par :

$$m = M / L_1 = u_2 / u_1 \quad (II.15)$$

II.6.2 Tension de sortie

Lorsque $I_2 = 0$, le système d'équation (II.5) se réduit à :

$$\begin{cases} (R_1 + jL_1\omega)I_1 = U_1 \\ jM\omega I_1 = U_{20} \end{cases}$$

La tension récupérée au récepteur est :

$$U_{20} = \frac{jM\omega}{R_1 + jL_1\omega} U_1 \quad (II.16)$$

Lorsque la sorti du système est reliée a la charge résistive la tension de sortie est :

$$\begin{cases} (R_1 + jL_1\omega)I_1 + jM\omega I_2 = U_1 & (1) \\ (R_1 + R_2 + jL_2\omega)I_2 + jM\omega I_1 = 0 & (2) \\ U_2 = RI_2 & (3) \end{cases} \quad (II.17)$$

De l'équation (II.17.2), on tire l'expression de courant I_1 :

$$I_1 = -\frac{R + R_2 + jL_2\omega}{jM\omega} I_2 \quad (\text{II.18})$$

On remplace I_1 dans l'équation (II.17.1), on aura :

$$I_2 = \frac{jM\omega}{M^2\omega^2 + (R_1 + jL_1\omega)(R_2 + R + jL_2\omega)} U_1 \quad (\text{II.19})$$

De l'équation de (II.19) dans l'équation (II.17.3), la tension de sortie est comme suite :

$$U_2 = \frac{jMR\omega}{M^2\omega^2 + (R_1 + jL_1\omega)(R_2 + R + jL_2\omega)} U_1 \quad (\text{II.20})$$

II.6.3 Couplage inductif résonnant série-série

Pour compenser les pertes dues au couplage faible, on insère une capacité au primaire et une autre au secondaire :

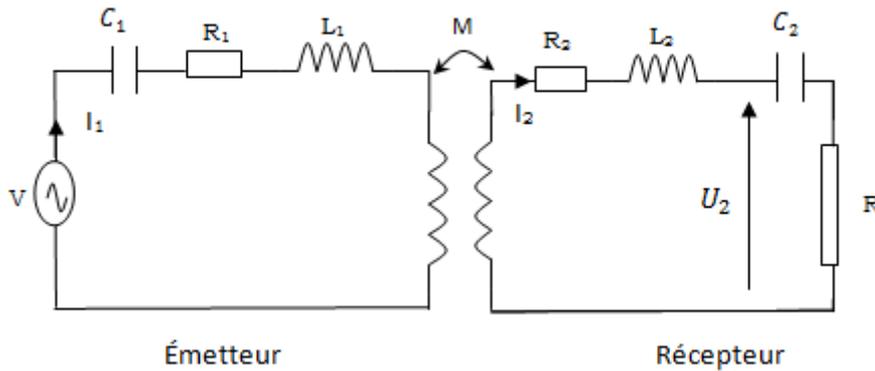


Figure II-10 : Schéma de couplage avec compensation

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

$$\begin{cases} (Z_{C1} + Z_1)I_1 + Z_m I_2 = U_1 & (1) \\ Z_m I_1 + (Z_2 + Z)I_2 = 0 & (2) \\ U_2 = ZI_2 & (3) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + jL_1\omega \\ Z_{C1} = -\frac{j}{C_1\omega} \end{cases} \quad \begin{cases} Z_2 = R_2 + jL_2\omega \\ Z_{C2} = -\frac{j}{C_2\omega} \end{cases} \quad Z_m = jM\omega \quad Z = \frac{RC_2\omega - j}{\omega C_2}$$

De l'équation (II.21-2), on tire :

$$I_1 = -\frac{Z_2 + Z}{Z_m} I_2 \quad (\text{II.22})$$

En remplaçant l'expression du courant I_1 dans l'équation (II.21-1), on obtient :

$$I_2 = \frac{Z_m}{Z_m^2 - (Z_{C1} + Z_1)(Z_2 + Z)} U_1 \quad (\text{II.23})$$

$$I_2 = \frac{jMC_1C_2\omega^3}{A + jB} U_1 \quad (\text{II.24})$$

Telle que :

$$A = (-M^2C_1C_2 + L_1L_2C_1C_2)\omega^4 + (-L_2C_2 - R_1R_2C_1C_2 - RR_1C_1C_2 - L_1C_1)\omega^2 + 1$$

$$B = (-R_1L_2C_1C_2 - L_1R_2C_1C_2 - L_1C_1C_2R)\omega^3 + (C_2R_2 + RC_2 + R_1C_1)\omega$$

On remplace l'expression du courant I_2 dans l'équation (II.21-3), on a :

$$U_2 = \frac{ZZ_m}{Z_m^2 - (Z_{C1} + Z_1)(Z_2 + Z)} U_1 \quad (\text{II.25})$$

II.6.4 Optimisation de la puissance

La puissance transférée du primaire au secondaire est égale à la résistance de la charge multiplié par le carré du courant secondaire.

On remplace le courant I_2 par l'expression (II.24) :

$$P_2 = RI_2^2 \quad (\text{II.26})$$

On aboutit :

$$P_2 = \frac{RM^2 C_1^2 C_2^2 w^6}{A^2 + B^2} U_1^2 \quad (\text{II.27})$$

La formule qu'on obtient est très complexe et c'est quasiment impossible à déterminer ses maximums à travers sa dérivée, on opte alors pour une solution graphique.

Pour optimiser la puissance correctement, on doit tenir compte d'au moins 5 paramètres :

La fréquence de hachage (w_0), le rang de l'harmonique à compensé (n), la capacité d'entrée (C_1), la capacité de sortie (C_2) et la mutuelle (M) ou encore la distance entre les deux bobines

Une fonction à plus de deux paramètres ne peut être optimisée qu'avec des méthodes d'optimisation spécifiques. Dans notre travail, pour simplifier on fixe les capacités C_1 et C_2 tout en s'assurant d'avoir des fréquences de résonance primaires et secondaire identiques soit $L_1 C_1 = L_2 C_2$ et on essayera d'obtenir une puissance acceptable en choisissant une fréquence de hachage adéquate.

II.7 Conclusion

Les formulations présentées ont pour objectif la conception d'un système de transfert d'énergie par couplage inductif performant et efficace. Pour ce faire, nous avons développé un modèle analytique permettant d'évaluer, avec précision, les paramètres électriques et électromagnétiques ainsi que les performances en termes de rendement énergétique du lien inductif. Cette approche analytique autorise le dimensionnement rapidement d'un lien électromagnétique et d'établir son modèle électrique équivalent, mais aussi de permettre l'usage des routines d'optimisation pour la conception.

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 la tension et de la puissance de sortie en fonction de la fréquence, d'une part et d'autre part, l'évolution des mêmes grandeurs en fonction de la distance entre les deux bobines.

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), dont les valeurs de rayon des bobines et le nombre de spire comme suite :

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques du système

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

Pour simuler le système de transfert d'énergie composé de deux bobines, nous avons calculé l'inductance propre et mutuelle

Toutes les simulations qui seront exposées sont obtenues à parties des paramètres arbitraires suivant

Remarques : la partie secondaire constituée d'un redresseur, d'un régulateur de tension et d'une charge sera interprétée par une résistance R

Tableau III.2 : Paramètres électromagnétiques

La capacité primaire C1	52.411 (nF)
L'inductance primaire L1	8.3906 (μ H)
La résistance de la bobine (I) R1	0.246325 (Ω)
La mutuelle M	6.6883 (μ H)
La capacité secondaire C2	52.411 (nF)
L'inductance secondaire L2	8.3906 (μ H)
La résistance de la bobine (II) R2	0.246325 (Ω)
La charge R	100 (Ω)

III.2.2 Tension d'entrée

La tension d'entrée est une source tension continue variable obtenue grâce a un hacheur mise en série avec une batterie. Le signal de sortie doit être riche en fréquence afin de récupérer le maximum de puissance au secondaire (récepteur), on choisit pour cela un signal binaire pseudo aléatoire (SBPA) avec une longueur de registre N=4 et donc une longueur de séquence :

$$L_{SBPA} = 2^N - 1 = 15 \quad (\text{III.1})$$

Sa décomposition en série de Fourier nous donnera une somme d'harmonique de fréquence multiples a la fréquence du fondamental, pour notre étude on considérait ce signal comme une superposition de signaux sinusoïdaux de fréquences différentes donc les équations seront développées juste pour le fondamental et on les généralisera pour les autres harmoniques.

$$X(t) = X_0 + \sum_1^{\infty} (an * \cos(n\theta) + bn * \sin(\sin(n\theta))) \quad (\text{II.2})$$

Valeur moyenne du signal :

$$X_0 = \frac{8E_{max} + 7E_{min}}{15}$$

$$an = \frac{\Delta E}{n\pi} \left(-\sin\left(\frac{n6\pi}{15}\right) + \sin\left(\frac{n8\pi}{15}\right) - \sin\left(\frac{n16\pi}{15}\right) + \sin\left(\frac{n20\pi}{15}\right) - \sin\left(\frac{n22\pi}{15}\right) \right) \quad (\text{a})$$

$$bn = \frac{\Delta E}{n\pi} \left(-1 + \cos\left(\frac{n6\pi}{15}\right) + \cos\left(\frac{n12\pi}{15}\right) - \cos\left(\frac{n16\pi}{15}\right) + \cos\left(\frac{n18\pi}{15}\right) - \cos\left(\frac{n20\pi}{15}\right) \right) \quad (\text{b}) \quad (\text{II.3})$$

$$A_n = \sqrt{an^2 + bn^2} \quad (\text{c})$$

III.3 Résultats

III.3.1 Tension de sortie fréquentielle

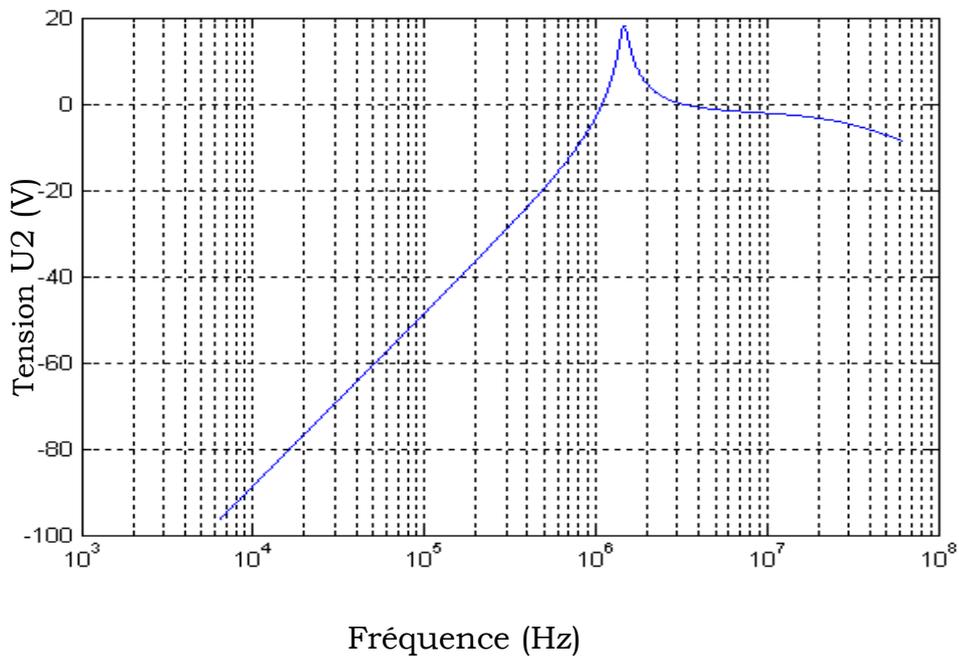


Figure III-3 : Tension de sortie en fonction de la fréquence

III.3.2 Courant de sortie temporelle et fréquentielle

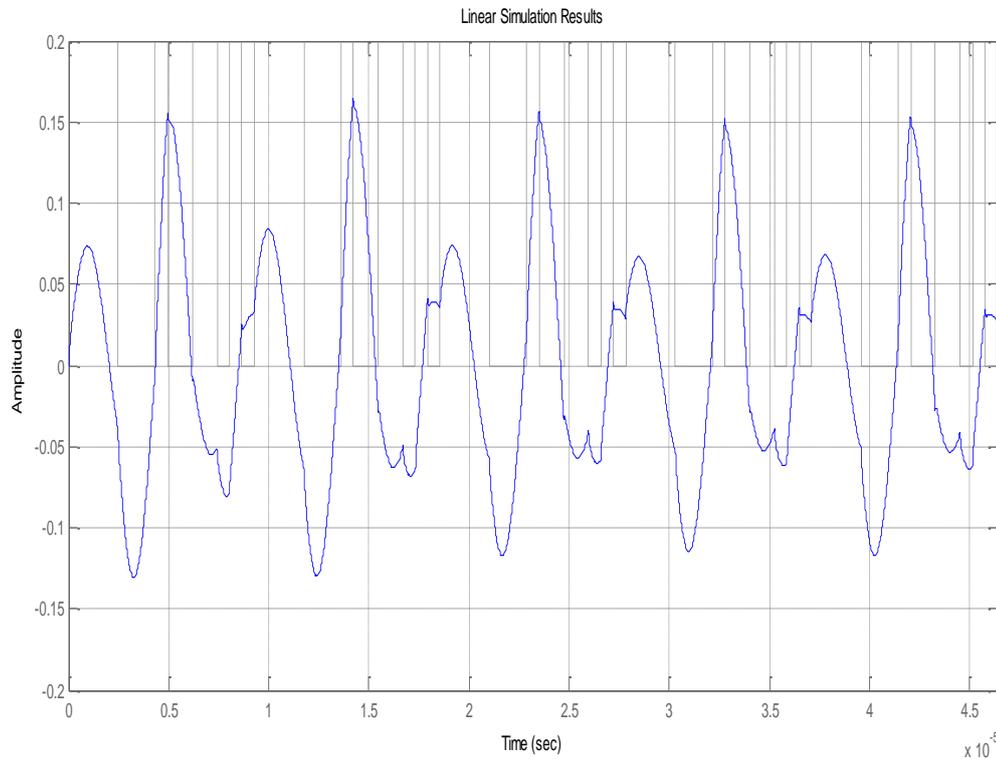


Figure III-4 : Allure du courant d'entrée

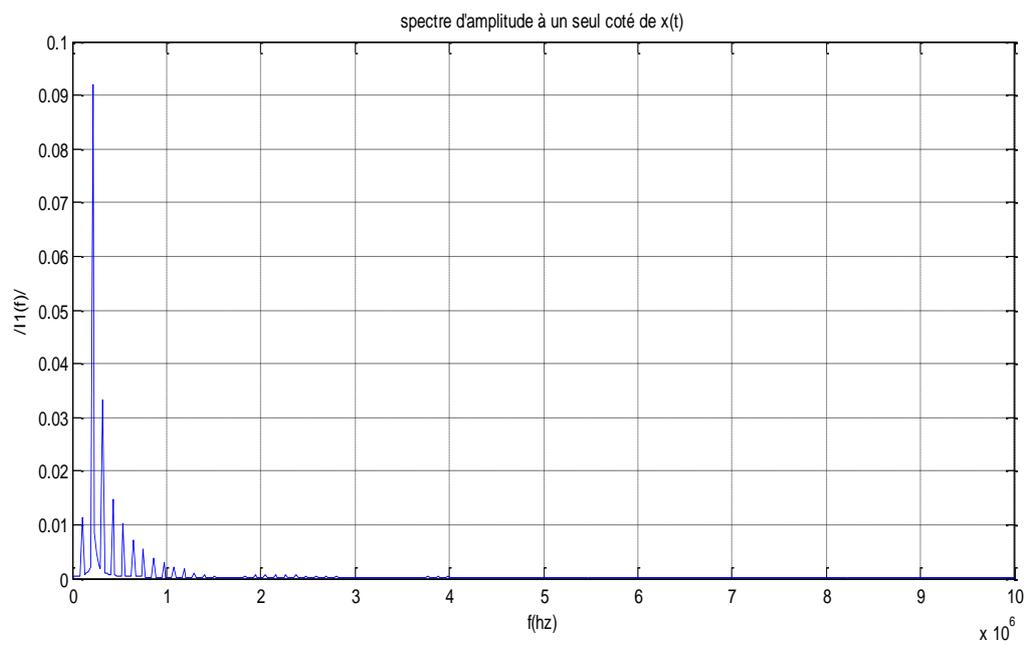


Figure III-5 : Analyse fréquentielle du courant d'entrée

III.3.3 Puissance de sortie

La puissance consommée par la charge pour des différentes fréquences et harmoniques :

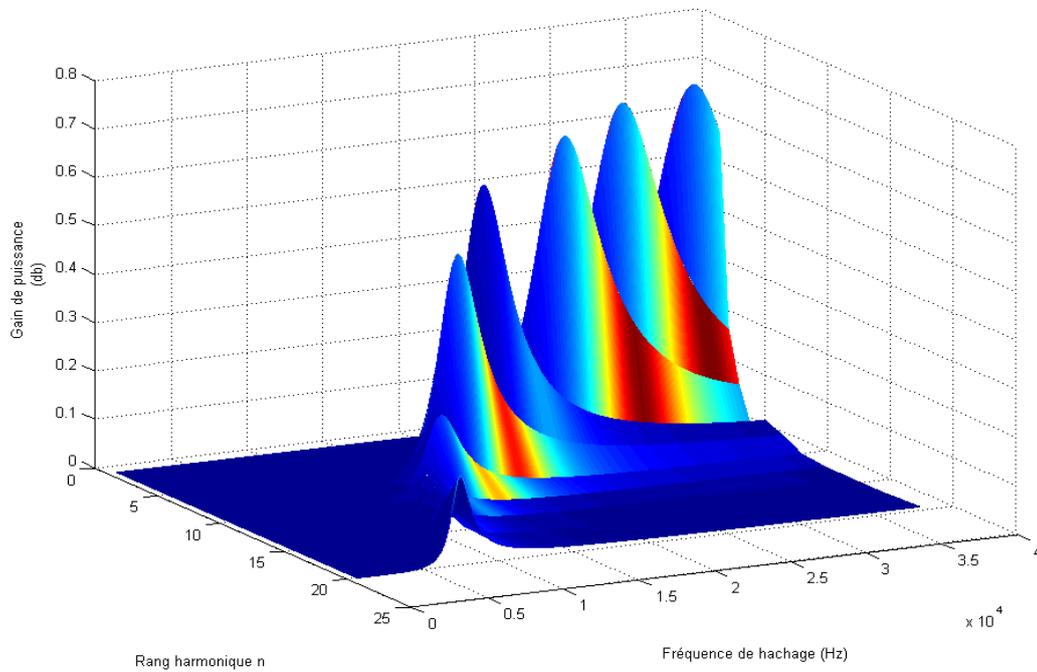


Figure III-6 : Évolution de la puissance en fonction des fréquences et harmoniques

De ce graphe, on déduit la fréquence de hachage égale à $f_0 = 1.078 \cdot 10^5$ Hz qui correspond à la puissance maximale pour les paramètres utilisés.

III.3.4 Tension et courant de sortie temporelles

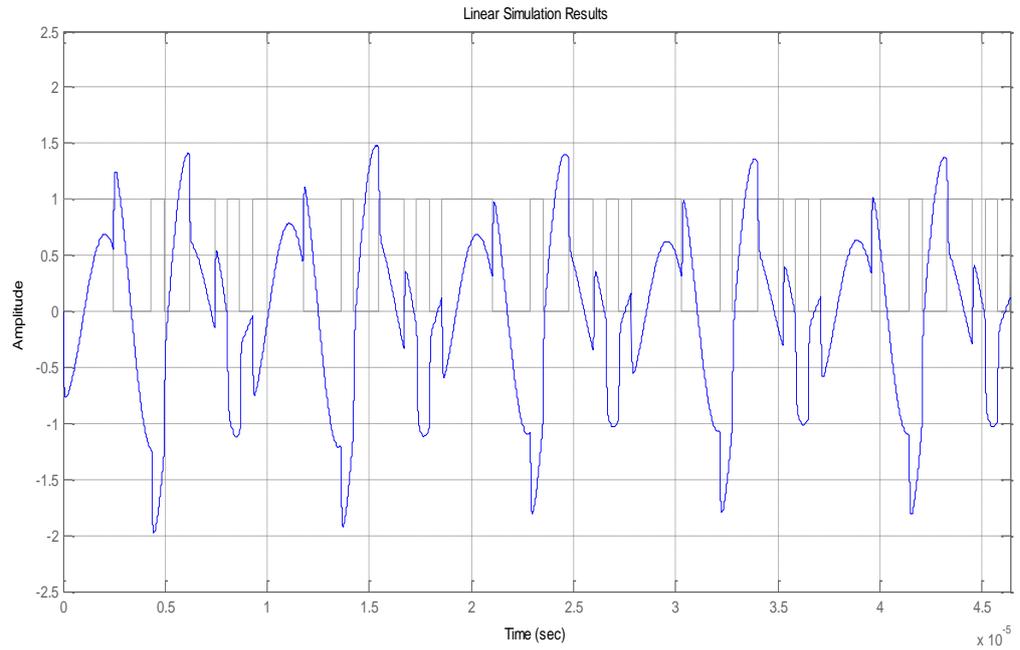


Figure III-7 : Tension de sortie en fonction du temps

Les simulations temporelles sont basées sur la fréquence déduite précédemment.

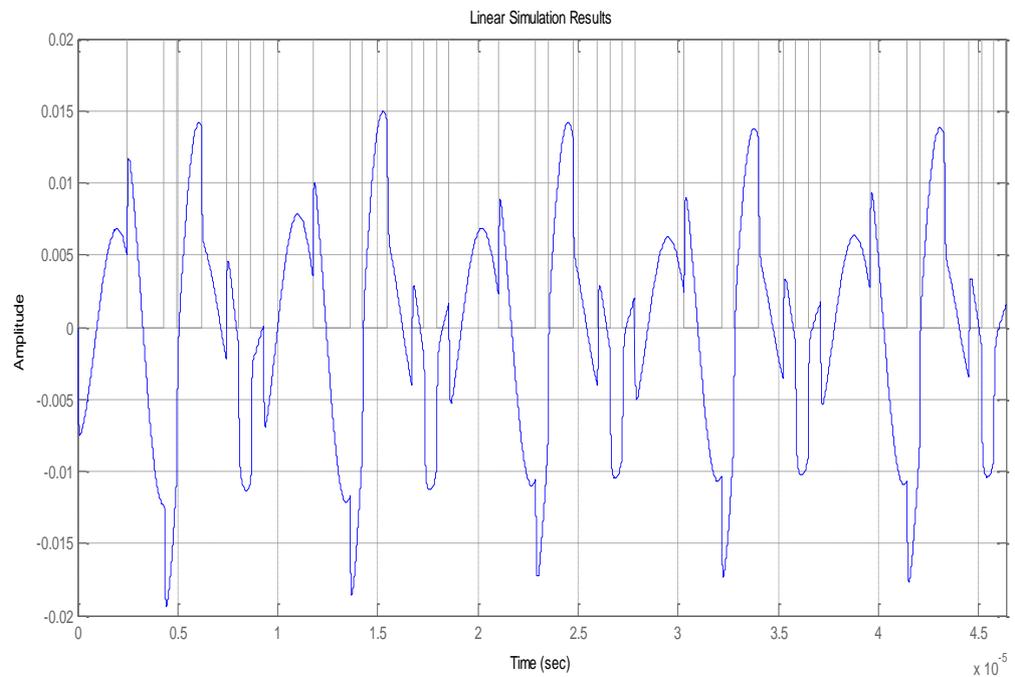


Figure III-8 : Allure du courant de sortie

III.3.5 Série de fourrier de la tension et du courant de sortie

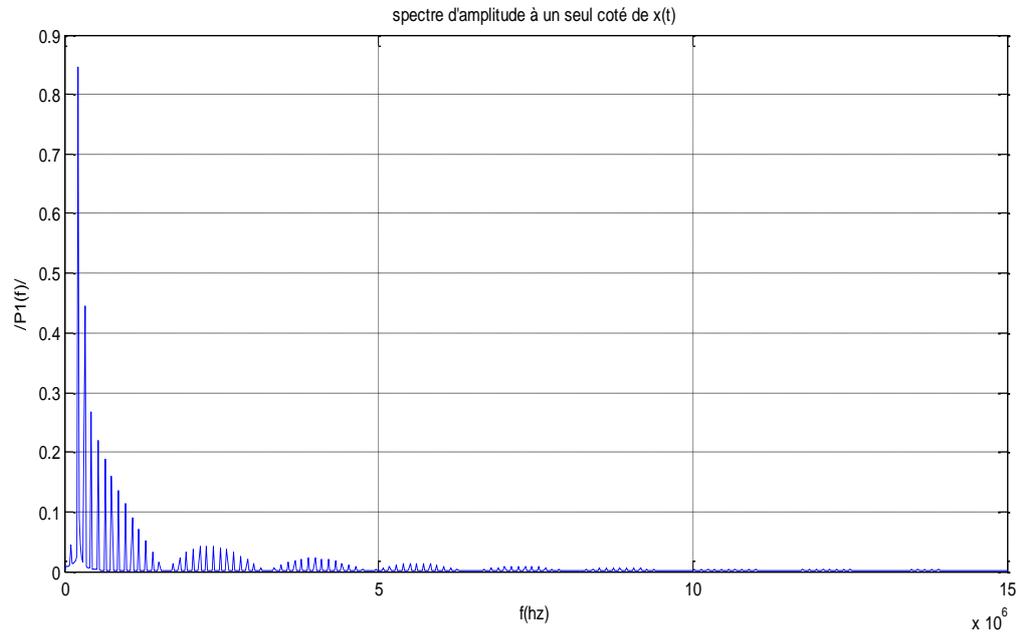


Figure III-9 : Analyse fréquentielle de la tension de sortie

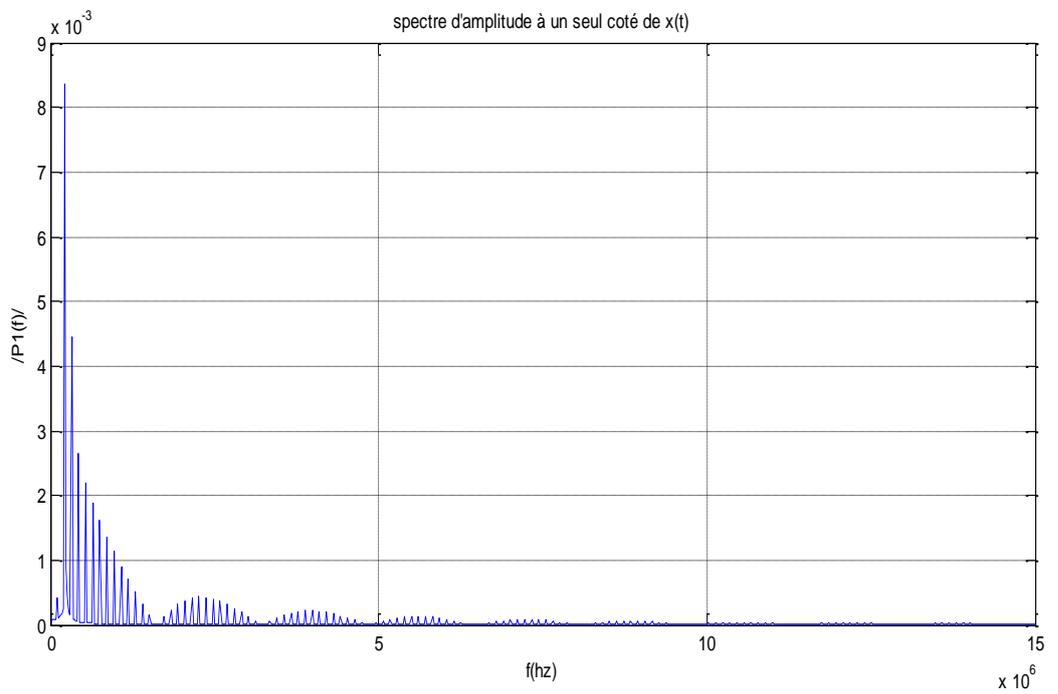


Figure III-10 : Analyse fréquentielle du courant de sortie

La figure suivante nous montre que la puissance diminue, lorsqu'on augmente la distance :

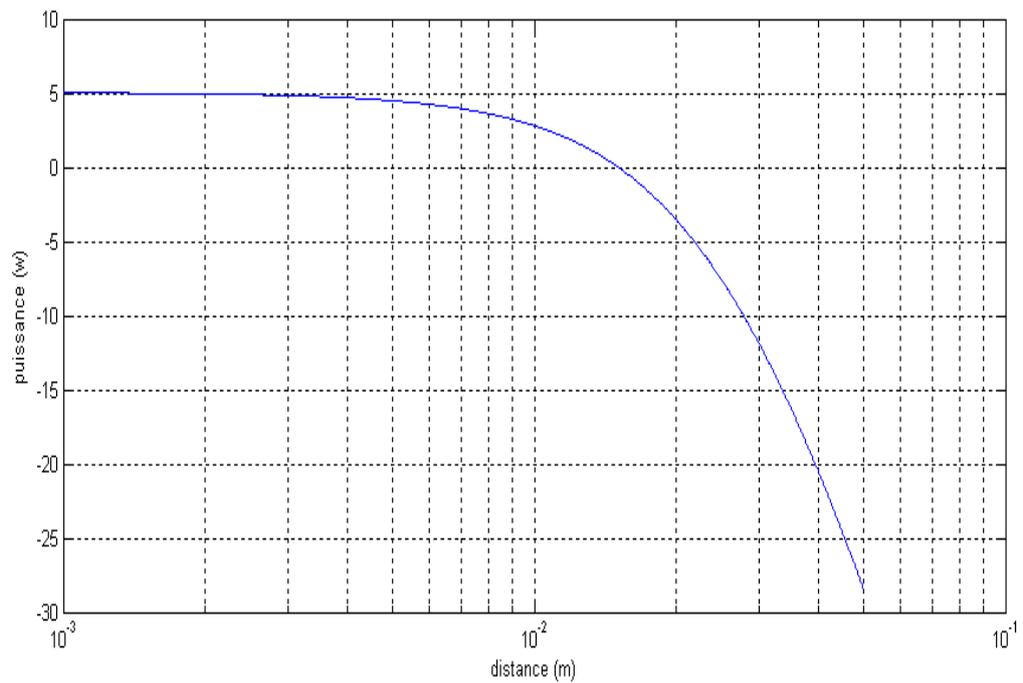


Figure III-11 : Puissance en fonction de la distance

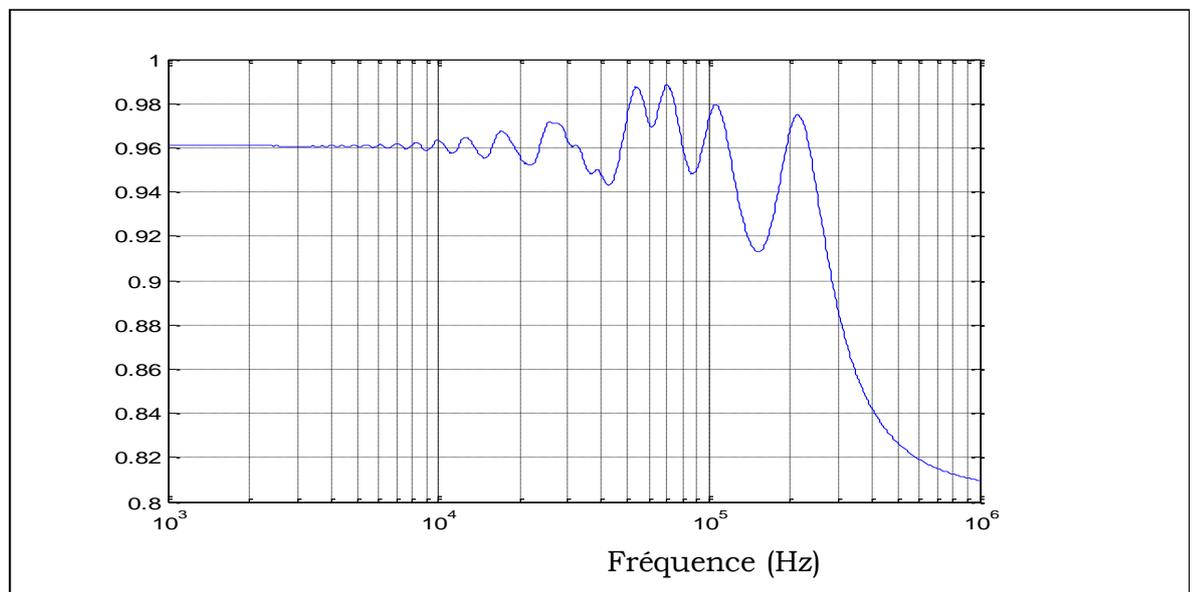


Figure III-12 : Rendement en fonction de la fréquence (faible distance)

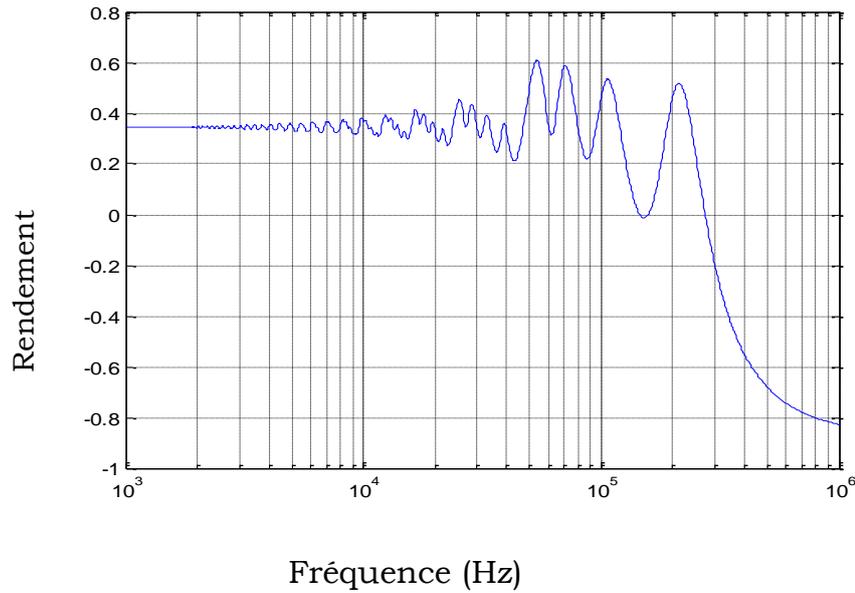


Figure III-13 : Rendement en fonction de la fréquence (grande distance)

III.4 Conclusion

Nous constatons la difficulté de la modalisation de transfert d'énergie sans fil. En effet, ce domaine en plein essor est très riche et nécessite beaucoup de temps pour plus l'approfondir. Ce que nous avons présenté ici n'est qu'une étude préliminaire qui vise à mieux comprendre le phénomène TSFE et voir l'impacte de l'utilisation d'une tension continue comme source d'entre et maîtriser les paramètres qui influent sur la puissance transmise.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à la modélisation du phénomène de transfert d'énergie sans fil.

Le transfert d'énergie sans fil est une nouvelle technologie au cours de développement qui vise à répondre à des besoins énergétiques soit dans les domaines industrielles et domestique. Ce domaine est désormais une réalité applicable pour sont efficacité et l'illimitation du câblage.

Au cours de se projet, nous avons présenté le principe de transmission et sa modélisation électromagnétique. Le modèle mathématique obtenu est implante sous environnement MATLAB.

On constate que la puissance transmise dépend de la distance entre les deux bobines ; plus la distance est grande plus la puissance est faible. Pour y remédier, on insère des capacités au primaire et au secondaire pour réaliser un schéma série-série résonnant. Ainsi, la puissance optimale est donnée par le phénomène de résonance qui dépend de la fréquence de hachage.

REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Laroussi Bettaieb, « transmission d'énergie par couplage inductif. Applications aux capteurs biomédicaux intégrés », Symposium de Génie Electrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE 2014, ENS Cachan, France, 8-10 Juillet 2014.
2. Wang Wei « étude de la transmission d'énergie sans fil (WPT) basée sur la résonance couplée magnétique», Université de MONTRÉAL juillet 2014.
3. Union internationale des télécommunications «transmission d'énergie sans fil au moyen de technique autres que la transmission par faisceau radiofréquence », Genève 06/2015.
4. Karalis, J.D. Joannopoulos, and M.Soljagic, "Efficient wireless non-radiative midrange energy transfert, Ann .Phys" vol.323, pp.34-48, Jan.2008
5. Document 1A/133, note de liaison de la Télécommunauté Asie-Pacifique au Groupe de travail 1A de l'UIT-R.
6. Document 1A/198, note de liaison de la Télécommunauté Asie-Pacifique au Groupe de travail 1A de l'UIT-R.
7. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300Ghz), Health Physics April 1998, Volume 74, Number 4
8. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireles Power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, vol. 317, pp. 83-6, 07/06 2007.
9. Claude Chevassu polycopie de cours 'Electromagnétique pour l'électrotechnique' Version à jour du 26/06/2008
10. B. C. Towe, "Passive Biotelemetry by Frequency Keying," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol. BME-33, pp. 905-909, 1986.

11. Luc Lasne, François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah, « Etude des bobines couplées et transmission d'énergie à distance sous conditions de résonance », Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA 351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.
12. Messaad Boudjema, « Etude électromagnétique du transfert sans fil d'énergie par voie de couplage inductif résonant série-parallèle », Université de Bejaia 2017.
13. F. W. Grover, "Inductance calculations," New York, Dover, 1964.
14. C. Snow, "Formulas for computing capacitance and inductance," National bureau of standards circular 544, Washington DC, Dec. 1954
15. D. Yu, and K. S. Han, "Self-inductance of air-core circular coils with rectangular cross-section," IEEE trans. on Magnetics, Vol. 23, pp. 39163921, Nov. 1987.