

INTRODUCTION GENERALE :

L'avancée technologique a bousculé la vie des hommes, ces 100 dernières années ont été caractérisées par un développement massif d'une gamme variée de dispositifs électroniques portatifs, dans le domaine du grand public, tels que les « smartphone » ou les tablettes. La tendance générale est d'aller de plus en plus vers une miniaturisation des dispositifs afin de faciliter leur portabilité et leur intégration dans l'environnement de tous les jours.

Un des problèmes les plus sensibles à résoudre réside dans la source d'énergie de ces dispositifs. Le plus souvent, l'utilisation des câbles d'alimentation n'est pas envisageable, au vue de la nature « nomade » de ces dispositifs. La majorité des dispositifs portatifs d'aujourd'hui utilisent des batteries comme source d'énergie. En ce qui concerne les batteries rechargeables, le processus de recharge est généralement basé sur un chargeur filaire, ce qui limite en quelques sortes la portabilité réelle de ces dispositifs « sans fil ». Dans un contexte où l'électricité est de plus en plus utilisée notamment dans l'alimentation de nos futurs appareils mobiles, sa transmission est une problématique d'actualité. On remarque aussi de plus en plus une multiplication des câbles, pour charger tous nos appareils électriques, toujours plus nombreux. Les appareils électroniques sont dorénavant de plus en plus nombreux et gourmands en énergie (Smartphones), leur chargement est inévitablement problématique de par la diversité des connectiques non compatibles. Que faire pour rendre ses appareils plus portatifs possibles et qui ne dépendent pas de câble d'alimentation?

Afin de bien représenter ce mémoire ; ce travail se divisera en 3 parties dont la première partie parle de la généralité sur la transmission d'énergie sans fil, la seconde c'est à propos de la méthodologie sur la transmission d'énergie par couplage résonant et la dernière partie parlera d'une simulation et application d'un projet sur la transmission d'énergie sans fil.

INTRODUCTION PARTIELLE :

Les dernières années ont été caractérisées par un développement massif d'une gamme variée de dispositifs électroniques portatifs, aussi bien dans le domaine du grand public, tels que les « smartphone » ou les tablettes, mais aussi des applications industrielles, comme les réseaux de capteurs sans fil [Agha *et al.*, 2009, Gungor et Hancke, 2009, Tan et Panda, 2011] ou encore des applications dans le domaine médical [Mahfouz *et al.*, 2011]. La tendance générale est d'aller de plus en plus vers une miniaturisation des dispositifs afin de faciliter leur portabilité et leur intégration dans l'environnement de tous les jours. Un des problèmes les plus sensibles à résoudre réside dans la source d'énergie de ces dispositifs. Des systèmes d'alimentation sans fil devraient améliorer la disponibilité, la fiabilité et le confort d'utilisation de ces dispositifs.

CHAPITRE I GENERALITES

I.1 Définitions :

I.1.1 La transmission d'énergie sans fil :

La transmission d'énergie sans fil (TESF) est une méthode permettant de transmettre de l'énergie électrique à un appareil sans avoir besoin de connexion physique ni d'appareil conducteur tels que les fils électriques. En bref, le phénomène se produit lorsqu'on induit un courant dans une bobine et qu'on approche une autre bobine. L'autre bobine va capter le flux et générer un courant à son tour (Photos 1.1). La transmission est faite par le phénomène induction électromagnétique.



Photos 1.1 Photos d'un système de transmission d'énergie sans fil [WiTricity - The Wireless Power Transfer, june 2007] [1]

I.1.2 Induction électromagnétique :

Le phénomène induction électromagnétique c'est lorsqu'un courant est induit aux bornes d'une bobine, celle-ci crée un flux d'induction magnétique, qui est égal au champ magnétique (B) multiplié par la surface et lorsque qu'une autre bobine rencontre ce flux d'induction magnétique, il se crée un courant induit et une force électromotrice (une tension, en V) dans cette deuxième bobine. C'est le physicien anglais Michael Faraday qui a fait l'étude cet induction et a énoncé des lois connues sous le nom des lois de Faraday.

I.1.3 Inductance :

Une inductance est un composant dans lequel le passage d'un courant engendre un champ d'induction magnétique. Ceci se traduit par la création de lignes de flux magnétique autour du composant (souvent une bobine). L'inductance est appelée L et crée un flux magnétique noté ϕ qui s'exprime en Weber. Le flux total ϕ est égal au flux du champ magnétique B à travers une surface S.

I.1.4 Résonance :

La résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques (électriques, mécaniques...) sont sensibles à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et proche d'une fréquence dite « fréquence de résonance ».

Dans un circuit comportant une capacité C et une inductance L en parallèle, il se crée une résonance entre elles : c'est-à-dire que pour une certaine fréquence telle que $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, le courant dans la boucle bobine/condensateur est bien plus important que le courant I fourni par l'alimentation.

I.2 Principe de fonctionnement de la transmission d'énergie sans fil basé sur la bobine couplée magnétique :

I.2.1 Principe de fonctionnement :

Bien que les stratégies puissent être très différentes, le transfert d'énergie sans fil est en général un processus en 3 étapes :

- L'énergie électrique alternative ou continue est fournie à une génératrice haute fréquence et ensuite amenée à la structure émettrice.
- L'onde électromagnétique se propage vers la structure réceptrice.
- L'énergie est captée et transformée en tension alternative puis continue et par suite utilisée pour alimenter une charge.

Pour le principe de fonctionnement la transmission d'énergie doivent suivre 3 ordres bien défini (figure 1.1) : ce sont le système d'émission, la transmission et en fin la réception.

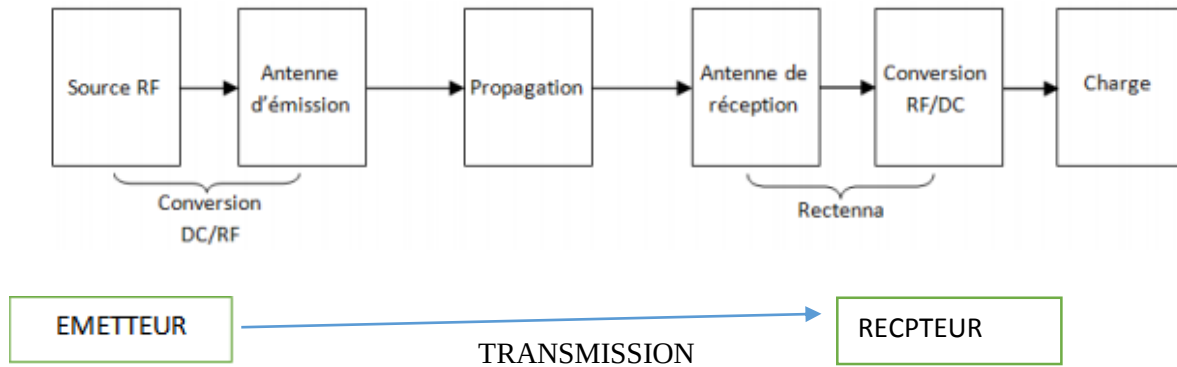


FIGURE 1.1 L'ordre de fonctionnement d'une transfère d'énergie.

I.2.2 Démarche à suivre :

La transmission d'énergie sans fil est présentée comme étant un processus en trois étapes : La transformation de l'énergie sous forme DC en énergie RF, le transport de cette énergie d'un point à un autre, la collecte de celle-ci et sa conversion en énergie continue. La Figure 1.4 donne une vue schématique de ce processus. Chacune de ces étapes représente un défi technologique majeur que les projets précédemment cités ont contribué à dépasser. Nous allons revenir sur ces trois étapes dans le détail en nous attachant à présenter les verrous levés et ceux qui doivent encore l'être.

Ces 3 phases sont indépendante car le courant à transmettre ne passe pas sans l'émetteur ni la transmission ou encore le récepteur. Chacune des 3 phases de fonctionnement se voit imposer des contraintes à respecter afin d'assurer le bon fonctionnement du système au niveau technique, sa viabilité économique et le respect des normes existantes dans le domaine.

I.2.2.1 Emission :

La fonction principale de l'émetteur c'est d'émettre une trame d'énergie c'est-à-dire de propagé le courant électrique ; que c'est soit un courant alternatif ou un courant continu.

Pour ce faire le système doit avoir 3 éléments :

- Une source d'énergie
- Un circuit de génération du signal émis
- Une antenne d'émission

a) Source d'énergie :

Elle peut être alimentée de deux manières suivantes :

- Fonctionnement sur secteur

- Alimentations par piles/accumulateur (par exemple pour le cas de télécommandes)

b) Génération du signal émis :

Cet élément contient des appareils électriques nécessaires et utiles pour transmettre le courant électrique sans problème dans l'antenne d'émission. La source d'énergie doit tout d'abord envoyer une trame d'énergie. Cette énergie sera envoyée dans la bobine de transmission.

c) Antenne d'émission :

C'est l'antenne émettrice (bobine ou diode) qui doit faire passer le courant électrique dans le récepteur.

L'énergie ou le signal de puissance sera émis vers le récepteur à travers cette antenne, elle varie selon le type de transmission utilisé. Pour d'autre on utilise un bobine et pour d'autre on utilise des diodes.

I.2.2.2 La transmission :

C'est dans cette partie que l'onde électromagnétique se propage dans le vide pour être récupérer par le récepteur c'est-à-dire le phénomène de propagation de puissance

.

I.2.2.3 Réception :

C'est l'antenne réceptrice qui permet au récepteur de capter l'énergie propagée par l'antenne émettrice.

Le distributeur de charge :

Après avoir récupérer par la bobine réceptrice l'énergie sera utilisé pour alimenter des appareils portatifs. C'est la phase terminale de la TESF.

I.2.3 Schéma de principe :

La figure 1.2 montre le principe d'une transmission d'énergie sans fil. (Figure 1.2)

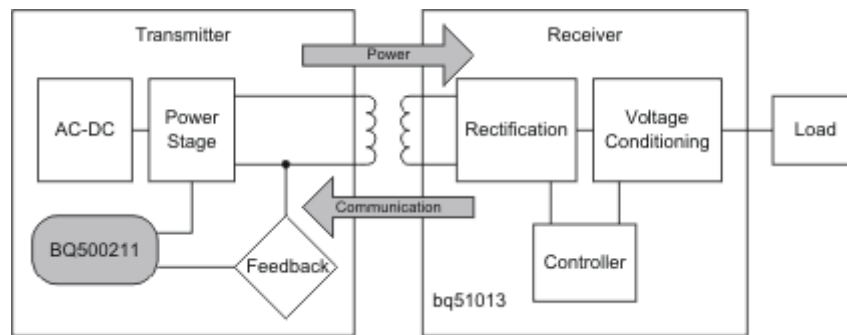


FIGURE 1.2 Schémas de principe d'une transmission d'énergie sans fil par bobine couplée magnétique [Low *et al.*, 2009].

CHAPITRE II LES DIFFERENTES SYSTEMES DE TRANSMISSION DE PUISSANCE SANS FIL

II.1 Les trois types de TESF :

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
- la transmission de puissance par couplage résonnant en champ proche.

II.1.1 La transmission de puissance par 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* en anglais), qui ne peut être interrompue par des obstacles (qui interfèreraient 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 d'humain constitue une menace pour la santé d'humaine, et donc des normes de sécurité sont développées pour limiter l'exposition humaine aux champs électromagnétiques radiofréquences. 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.

Les sources à haute fréquence sont basées sur différentes technologies. Les sources à base de semi-conducteurs sont prédominantes, mais souffrent de limitations sur la puissance délivrable en haute fréquence. A une fréquence de 2,45 GHz, la puissance maximale délivrable est limitée à quelques centaines de Watts.

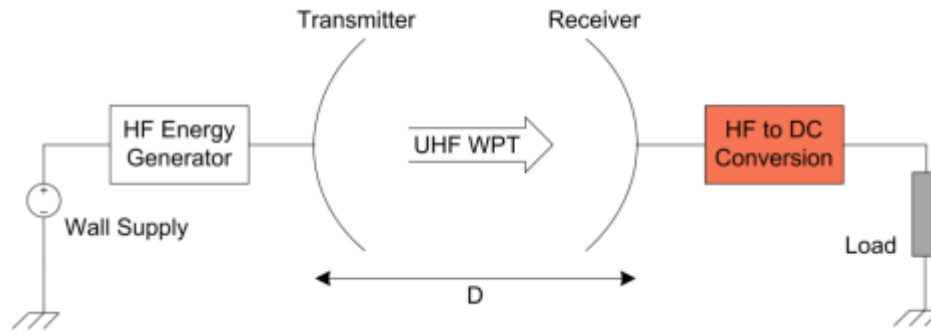


FIGURE 1.3 – Représentation schématique du processus de transmission d'énergie sans fil par ondes électromagnétiques [Low *et al.*, 2009].

II.1.2 La transmission de puissance par couplage non-résonnant en champ proche ou transfert par couplage inductif :

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. 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.

Le transfert de puissance est réalisé généralement via l'induction magnétique entre deux bobines à air. Le schéma simplifié du montage est donné à la Figure 1.4.

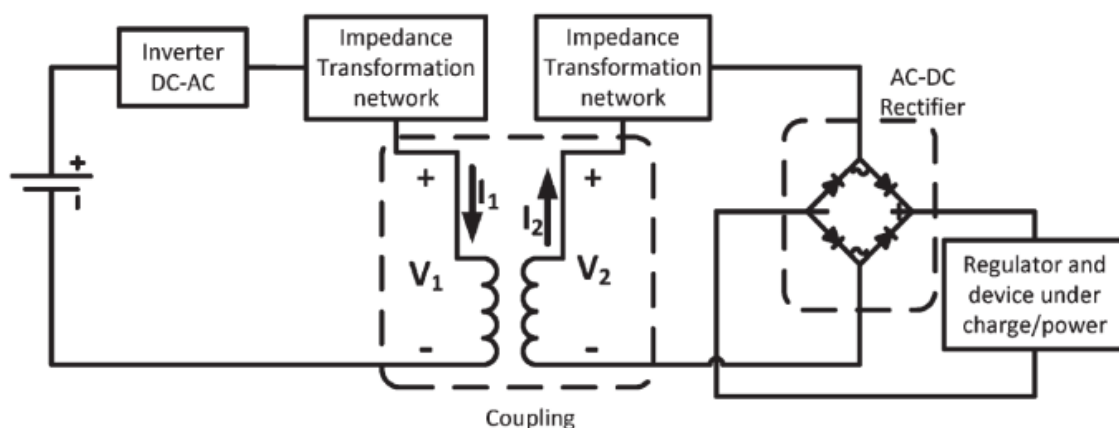


FIGURE 1.4 – Schéma de principe du montage utilisé pour la transmission d'énergie sans fil par couplage inductif [Low *et al.*, 2009].

Outre les applications grand public bien connues qui ont été citées précédemment, on peut également mentionner des systèmes de recharge sans fil par induction d'appareils comme

les téléphones portables, comme ceux proposés par la société PowerKiss© [PowerKiss Company,]. Ils proposent des anneaux récepteurs qui se connectent directement aux téléphones portables et des anneaux émetteurs intégrés dans des tables. Le téléphone se charge dès lors que le récepteur est placé sur l'émetteur.



Photos 1.2 Photos d'un transfert de puissance sans fil par le couplage non-résonant [PowerKiss Company,]

II.1.3 La transmission de puissance par couplage résonnant :

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.

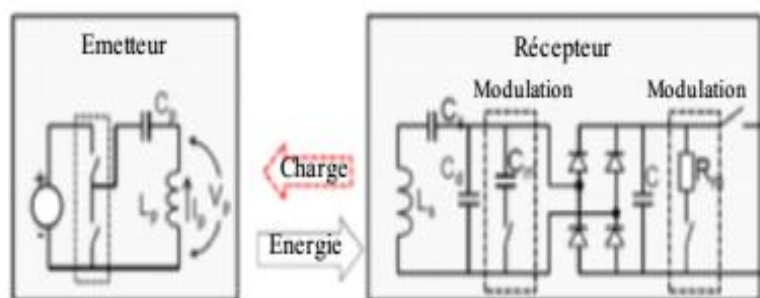
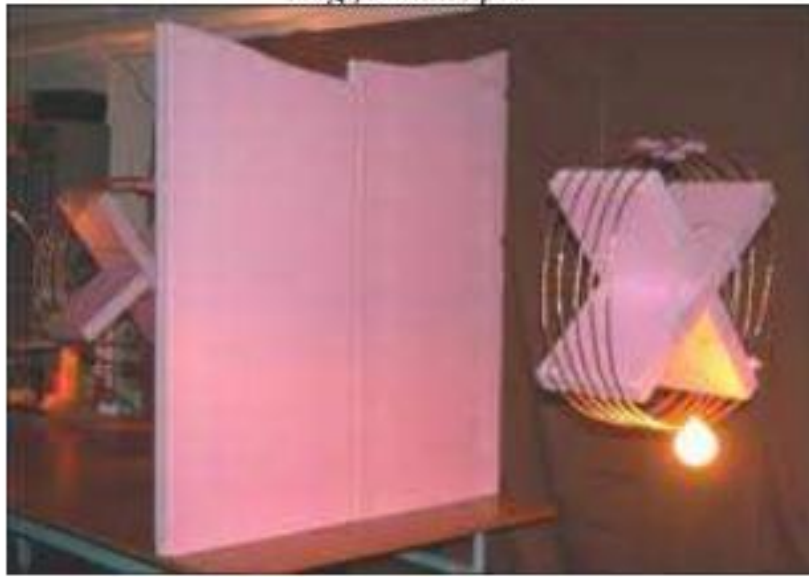


FIGURE 1.5 Transfert de puissance sans fil par le couplage résonant [1]



Photos 1.3 Photos d'expérience de Marin Soljačić et son équipe avec un mur entre les deux bobines résonnant [WiTricity - The Wireless Power Transfer, June 2007.] [1]

II.1.4 Comparaison entre ces 3 systèmes de transmission de puissance :

Ce tableau montre les différences entre les 3 systèmes de transmission d'énergie sans fil.

Tableau 1.1 Comparaison des différents systèmes de TESF :

	<i>Entre des antennes à directivité grande au champ lointain</i>	<i>Couplage non résonnant au champ proche</i>	<i>Couplage résonnant</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	Sécuritaire
<i>Complexité du système</i>	Moyenne (sans mécanisme de suivi), Complexe (avec un mécanisme de suivi)	Complexe (avec un mécanisme de suivi)	Complexe

II.2 Applications mises au point pour utiliser les techniques de la TESF :

II.2.1 Dispositifs portables et mobiles :

I.2.1.1 TESF par induction pour les dispositifs mobiles tels que les téléphones cellulaires et les dispositifs multimédias portables :

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

– dispositifs mobiles et portables: téléphones cellulaires, smartphones, tablettes, ordinateurs bloc-notes;

- matériel audiovisuel: appareils photo-numériques;
- équipements professionnels: outils numériques pratiques, systèmes de prise de commande à table;
- autres: matériel d'éclairage (par exemple LED), robots, jouets, dispositifs installés à bord de véhicules, matériel médical, dispositifs de soins de santé, etc. 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.

II.2.1.2 TESH par résonance pour les dispositifs mobiles tels que les téléphones cellulaires et les dispositifs S:

La TESH 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.

II.2.2 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 TESH 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 TESH 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 TESH

- 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.

II.2.3 Véhicules électriques :

Le principe de la TESH pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides rechargeables est de recharger lesdits véhicules sans câble d'alimentation lorsque la TESH 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 TESH 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 TESH sont examinées à la fois lorsque le véhicule est en stationnement et lorsqu'il circule.

II.3 Les inconvénients et les avantages de la TESH :

II.3.1 Ses avantages :

II.3.1.1 Pour le grand public :

La TESH peut l'alimenter sans fil des appareils fixes (téléviseurs à écran plat, haut-parleurs sans fil, ...), toujours sans fil, éliminant donc câblage personnalisé coûteux, câbles disgracieux et blocs d'alimentation. Mais aussi, TESH permet l'alimentation sans fil de périphériques des ordinateurs de bureau (souris, claviers, imprimantes, écrans).

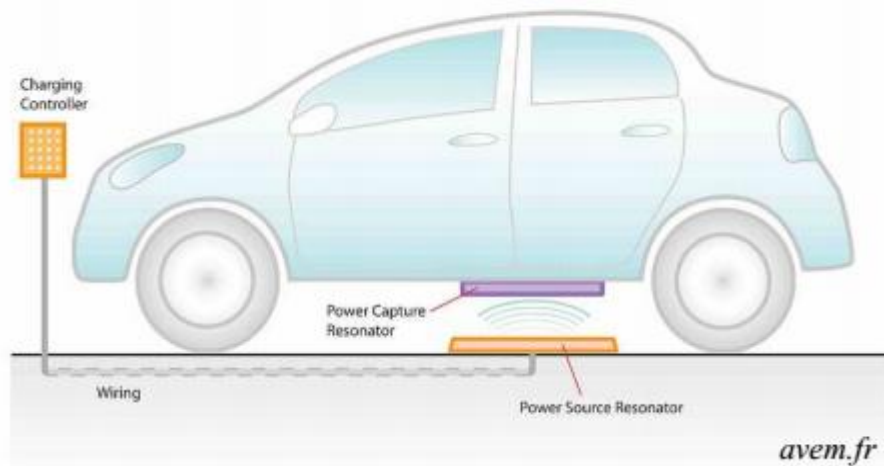
La TESH peut rechargée des appareils du quotidien, quel que soit la demande en puissance et le nombre d'appareils à recharger. Elle projette en effet d'effectuer, d'une part, la recharge de l'électronique mobile (téléphones, ordinateurs portables, ...) sans fil (Photos 1.4), de manière automatique, et partout : dans les maisons, les voitures, les bureaux, les points d'accès publics.



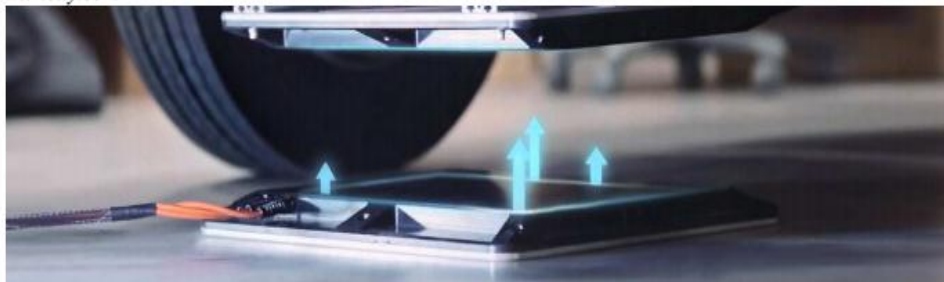
Photos 1.4 Démonstration d'une recharge de téléphone portable sans fil. [WiTricity - The Wireless Power Transfer, June 2007.] [1]

II.3.1.2 Pour l'automobile :

Les véhicules électriques et hybrides présentent un grand intérêt écologique, mais la recharge rebutent les consommateurs : il faut la faire plus ou moins souvent, à certains endroits seulement en dehors de la maison, et pas d'une manière très pratique. Grâce au Kit de développement WIT-3300, le conducteur n'a plus besoin de brancher sa voiture à une source d'alimentation avec câbles : 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 (Photos 1.4).



witricity.com



Photos 1.4 Chargeur sans fil d'une voiture électrique. [IEEE Vehicular Technology Magazine (IEE/IEEE), Vol. 2, Issue 2, 38-44, June 2007] [1]

II.3.1.3 Pour l'industrie :

L'industrie représente un véritable défi en ce qui concerne l'alimentation en électricité, que ce soit pour l'installation ou bien le rendement. En effet, on doit souvent avoir recours à des câblages dans des endroits éloignés, ou bien les équipements sont hors du champ de recharge des batteries. De plus, l'utilisation de combustibles fossiles et de moteurs à combustion ne produisent pas une quantité d'énergie suffisante pour être très efficace. Il y a une solution à ces problèmes, c'est de créer des interconnexions électriques sans fil par exemple pour la rotation et la mise en mouvement de robots, mais aussi pour les environnements où il est difficile de câbler, voire impossible, comme les mines ou les sous-marins. Également, l'entreprise vise à assurer l'alimentation sans fil de capteurs et d'actionneurs. Ainsi, il n'est plus nécessaire d'installer des câblages coûteux ou de remplacer les piles. Les appareils mobiles pourront eux aussi bénéficier de la recharge sans fil (robots mobiles, véhicules autonomes, outils), et pourront alors se passer de mécanismes complexes d'accueil, de recharge manuelle et batteries de remplacement.

II.3.1.4 Pour l'armée :

Actuellement, il y a un certain nombre de projets militaires en développement ou en cours d'évaluation, notamment la recharge sans fil automatique pour les systèmes militaires de haute technologie, tels que les appareils alimentés par batteries mobiles ou les robots mobiles

sans pilote et avion. Certains chercheurs en physique tendent à offrir un grand potentiel pour une multitude d'applications militaires d'aujourd'hui par exemple WiTricity une entreprise qui fabrique des matériels à l'aide de la TESF et elle 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.

Par exemple l'entreprise WiTricity a élaboré un transfert d'énergie du gilet du soldat au casque et du casque à la lunette optique pour permettre de la désembuer.



Photos 1.5 Prototype de gilet équipé de la technologie WiTricity. [WiTricity - The Wireless Power Transfer, juin 2007]

II.3.1.5 Pour la médecine:

Les chariots médicaux transportant des ordinateurs et d'autres instruments de diagnostic pourraient être rechargés et alimentés sans fil à partir de sources intégrées tout au long de l'hôpital, ce qui élimine le besoin de câbles et la recharge de la batterie stationnaire. En ce qui concerne les appareils qui ne peuvent être branchés sur un chargeur comme implants biomédicaux, le problème devient encore plus délicat à cause de la chirurgie nécessaire pour le remplacement d'une pile. Souvent, la taille de la batterie limite même la viabilité de capteurs biomédicaux *in-vivo*. Enfin, la chirurgie nécessaire au remplacement de la batterie, expose le patient à de nouveaux risques, qui peuvent être particulièrement élevés, comme c'est le cas pour les aînés.

Certains dispositifs médicaux implantés exigent un niveau élevé de puissance pour les faire fonctionner. L'entreprise WiTricity a pour but de remplacer l'induction magnétique traditionnelle de dispositifs de puissance à travers la peau, qui avait toujours provoqué un échauffement excessif des tissus et qui ne permettait qu'un transfert d'énergie peu efficace. Grâce à la technologie WiTricity, le dispositif de capture d'énergie peut être implanté profondément dans la cavité du corps, plusieurs centimètres sous la peau. De même, la source d'énergie peut être de plusieurs centimètres de la surface de la peau, facilitant notamment la mise en place de dispositifs d'assistance ventriculaire, stimulateurs cardiaques, et de

défibrillateurs. Ainsi, les lignes de commande qui pénètrent la peau ne seraient plus nécessaires, cela limiterait en plus le risque d'infection. Enfin, les chariots médicaux transportant des ordinateurs et d'autres instruments de diagnostic pourraient être rechargés et alimentés sans fil à partir de sources intégrées tout au long de l'hôpital, ce qui élimine le besoin de câbles et la recharge de la batterie stationnaire.

II.3.2 Les inconvénients de la TESF :

L'utilisation de la TESF pose beaucoup de problèmes, ces problèmes apparaissent dans plusieurs domaines, dont : le domaine budgétaire, humanitaire et fiabilité.

- **Les problèmes budgétaires :**

La fabrication de la TESF est très coûteuse. Par exemple en 1901 Nicola Tesla fabriquait un tour appelé tour de Tesla qui a pour but de transmettre d'énergie électrique et des formations sans fil mais en 1917 ses travaux étaient démolis car il manquait de financement.

- **Les problèmes de santé :**

Même si nous vivons en permanence au contact du champ magnétique terrestre, nous sommes tout de même sensibles à ce type de champ. En effet, la TESF induit au niveau de la peau des personnes exposées une modification de la répartition des charges électriques. On peut donc assister à des réactions cutanées, des malaises, des troubles visuels et même des risques cancérogènes accrus, etc.

- **Les problèmes de fiabilité :**

Cette transmission n'est pas encore vraiment fiable car il y a encore des pertes pendant le transfert de puissance comme dans l'expérience de Tesla qui a rencontré des problèmes tels que la dispersion de la puissance.

La distance de l'émission est aussi limitée pour le couplage résonnant et non-résonnant ce qui pose un problème dans son utilisation. Pour partager le plus grand nombre de lignes de champ, les bobines doivent être dans une position particulière : si elles ne sont pas dans une bonne position, elles partagent moins de lignes de champ et le rendement est moins grand. C'est en étant superposées qu'elles sont le mieux couplées.

CONCLUSION PARTIELLE :

Les travaux autour des systèmes de transmission d'énergie sans fil sont portés par le développement accéléré des dispositifs électroniques nomades (smartphones, tablettes, capteurs sans fil). Ces dispositifs intègrent de plus en plus de fonctionnalités et la possibilité de les alimenter sans fil apporterait un grand avantage qui leur permettrait de limiter l'encombrement des batteries.

Plusieurs techniques de transmission d'énergie sans fil existent et le choix d'une méthode par rapport à une autre se fait en fonction des spécificités de l'application visée. Il est possible de transmettre de l'électricité d'un point A à un point B sans utiliser de fil entre les deux, notamment grâce à un champ magnétique variable et la résonance.

INTRODUCTION PARTIELLE :

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 1/5ème 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). Les progrès des micro-technologies permettent une évolution toujours plus rapide de l'électronique faible puissance et le développement rapide des techniques de couplage résonant (ou de résonance couplées) qui sont utilisés pour transférer de l'énergie à la distance d'environ deux fois la taille des éléments réactifs dans les documents de référence [4]. Le travail présenté dans cette thèse propose une nouvelle topologie pour d'émetteur permettant le transfert par couplage inductif (ou magnétique) résonnant avec un rayonnement (pertes par rayonnement) réduit. Il est mieux adapté au fonctionnement à haute fréquence que les techniques à bobines «classiques » qui souffrent généralement de faible Q due à la rugosité de la surface et à l'oxydation. Cette technologie utilise un mode de guide d'ondes cylindriques telles que le mode TE₀₁, connus pour avoir de faibles pertes par conduction par rapport à la ligne de transmission par fil et d'autres modes de basse pour guides d'ondes. En outre, la distribution du champ du mode TE₀₁ est tout à fait similaire à celle de la bobine, ce qui signifie 0 donc qu'un couplage magnétique entre les deux différents types de résonateurs devrait fonctionner.

CHAPITRE III COUPLAGE MAGNETIQUE

III.1 Rappel :

III.1.1 Définition du couplage magnétique :

Le transfert par couplage magnétique c'est une transmission de puissance qui se réalise grâce à l'induction magnétique entre deux bobines à air, dans laquelle la bobine primaire et la bobine secondaire sont séparées physiquement. et n'est pas dépendant de la fréquence de résonance de l'émetteur ni des circuits du récepteur. Il fonctionne sur des distances très faibles (en champ proche), typiquement de l'ordre de quelques centimètres, mais se caractérise par un très bon rendement.

III.1.2 La base de la TESF :

Tout conducteur électrique, dès lors qu'il est parcouru par un courant, produit dans son environnement une répartition spatiale du vecteur « champ (ou excitation) magnétique » : $\vec{H}$ et De la vecteur « induction » : $\vec{B}$. La connaissance de ces deux vecteurs en tout point M de l'espace constitue la résolution du problème magnétique associé. Pourtant, une grandeur supplémentaire est très souvent utilisée : le « flux » de l'induction qui traverse une bobine : ϕ .

Le flux de $\vec{B}$ à travers une surface S s'écrit :

$$\Phi_S = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (1)$$

Cette grandeur scalaire est le plus souvent calculée de façon à sommer l'intégralité du champ produit par la bobine et on définit ainsi le « flux propre » ϕ comme celui traversant la section de la bobine.

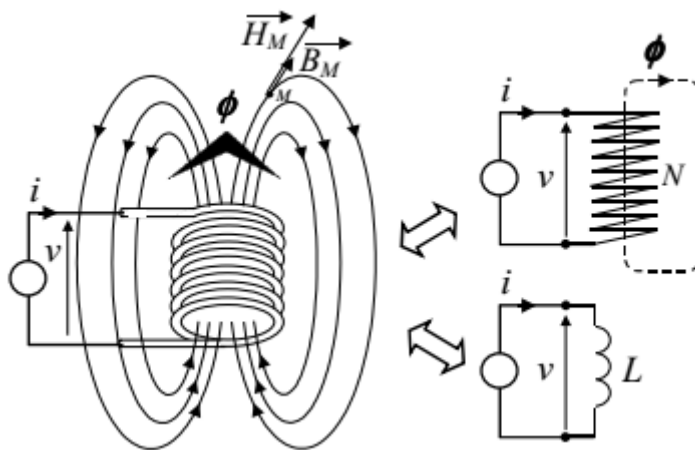


FIGURE 2.1 : Bobinage et flux propre [Luc Lasne François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA 351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.]

Lorsque deux bobinages sont disposés à proximité, le « partage » de leurs lignes de champs représente un « couplage » magnétique.

Il y a plusieurs couplages de bobine qui peut exister dans la TESF:

III.1.2.1 Cas de deux bobines en couplage total :

Lorsque deux bobinages sont disposés à proximité, le « partage » de leurs lignes de champs représente un « couplage » magnétique. Le « couplage total » correspond simplement au fait que l'intégralité des lignes de champ traversant une bobine traverse également l'autre. Dans ce cas précis, représenté sur la *figure 2*, une grandeur supplémentaire M , appelée « inductance mutuelle » apparaît.

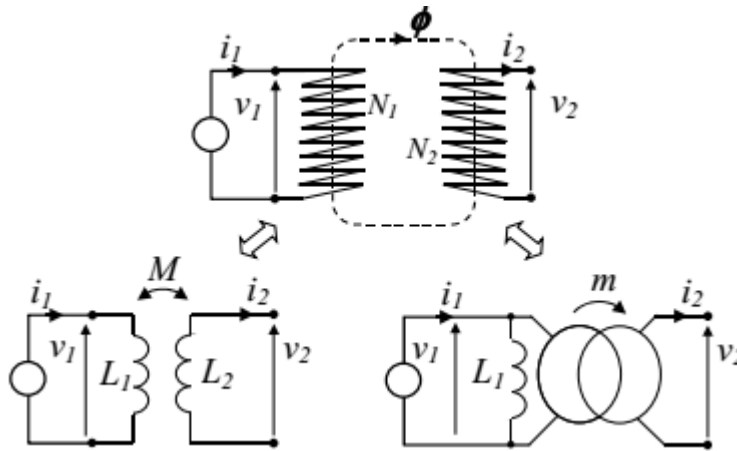


FIGURE 2.2 : Couplage total [Luc Lasne François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA 351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.]

Cette grandeur représente le fait que le *bobinage 2* intercepte l'unique flux ϕ à travers ses N_2 spires ; la tension v_2 induite étant alors uniquement due aux variations du courant i_1 . Dans ce nouveau cadre, il est important de retenir les définitions suivantes : Au flux unique partagé par les deux bobines correspond le flux total intercepté par les N_2 spires :

$$N_2 \cdot \phi = M \cdot i_1 \quad (2)$$

Avec :

$$\phi = \frac{N_1 \cdot i_1}{\mathfrak{R}} \quad (3)$$

Ainsi :

$$M = \frac{N_1 \cdot N_2}{\mathfrak{R}} \quad (4)$$

En faisant apparaître les inductances propres des deux bobines :

$$L_1 = \frac{N_1^2}{\Re} \quad \text{Et} \quad L_2 = \frac{N_2^2}{\Re} \quad (5)$$

Il vient :

$$M = \frac{N_1 \cdot N_2}{\Re} = \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (6)$$

L'inductance mutuelle M peut ainsi servir, lorsque $i_2 = 0$, à exprimer la tension induite aux bornes du *bobinage* 2 :

$$v_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \quad (7)$$

En utilisant le fait que :

$$v_1(t) = L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \quad (8)$$

Il vient :

$$v_2(t) = \frac{M}{L_1} \cdot v_1(t) = \frac{N_2}{N_1} \cdot v_1(t) \quad \text{avec } i_2 = 0 \quad (9)$$

III.1.2.2 Cas de deux bobines en couplage partiel :

Lorsque le couplage n'est pas « total », il est impératif de bien dissocier les flux « propres » des bobines des flux « mutuels ». La *figure 2.3* représente ainsi chacun des bobinages traversés à la fois par le flux mutuel ϕ et par un flux non partagé dit « de fuite » : ϕ_{f1} ou ϕ_{f2} .

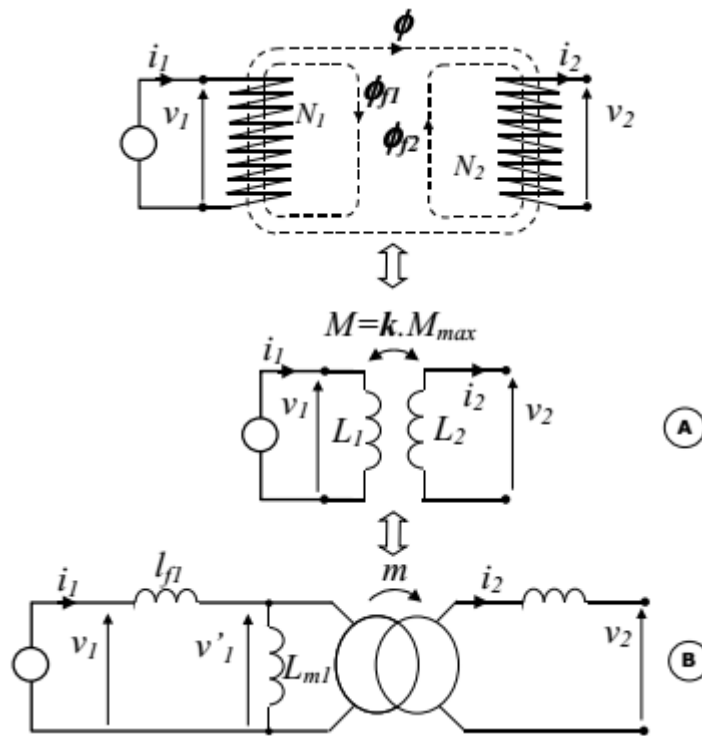


FIGURE 2.3 : Couplage partiel [Luc Lasne François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA 351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.]

Dans ces conditions, on peut formaliser le problème comme suit : Le flux mutuel étant diminué par les fuites, le flux total intercepté par le *bobinage* 2 est inférieur à celui résultant d'un couplage total (ou « maximal »).

On écrit ainsi :

$N_2 \cdot \phi = M \cdot i_1 = k \cdot M_{\max} \cdot i_1$ où le terme $k \in [1,0]$ est appelé « **coefficient de couplage** » ;

L'inductance mutuelle maximale étant donnée par :

$$M_{\max} = \sqrt{L_1 \cdot L_2} . \quad (10)$$

Le problème se ramène ainsi à la connaissance des deux inductances propres L_1 , L_2 et des coefficients de couplage (schéma A):

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (11)$$

La notion de coefficient de couplage peut pourtant être identifiée, comme le représente le schéma B de la *figure 3*, par un schéma équivalent organisé autour d'un transformateur idéal. En effet, la séparation des flux peut être interprétée comme la présence d'un flux dit « de fuite » relatif à chaque bobinage ; ce qui revient à la présence de deux « inductances de

fuites » dans le schéma : L_{f1} et L_{f2} ; le flux mutuel étant alors ramené à l'inductance L_{m1} .

Démonstration :

Il est alors important, dans ce schéma de faire le lien avec les grandeurs précédentes en retenant que :

$$v_1(t) = \frac{d(N_1(\phi + \phi_{f1}))}{dt} = \frac{d(N_1 + \phi)}{dt} + \frac{d(N_1 + \phi_{f1})}{dt} \quad (12)$$

$$v_1(t) = L_{m1} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{f1} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (13)$$

- La conservation des flux impose : $L_1 = L_{m1} + L_{f1}$ et $L_2 = L_{m2} + L_{f2}$, L_{m2} étant l'inductance du flux mutuel ramenée au secondaire du transformateur.

- Le rapport de transformation apparaissant dans le schéma s'écrit :

$$m = \frac{M}{L_{m1}} + \frac{\sqrt{L_{m1} \cdot L_{m2}}}{L_{m1}} \quad (14)$$

- Le bobinage 2 étant ouvert, la tension à ses bornes s'écrit :

$$v_2(t) = m \cdot v_1'(t) ; \quad (15)$$

La formule du diviseur de tension donnant :

$$v_1'(t) = \frac{L_{m1}}{L_{m1} + L_{f1}} \cdot v_1(t) \quad (16)$$

Il vient alors :

$$v_2'(t) = \frac{L_{m1}}{L_{m1} + L_{f1}} \cdot m \cdot v_1(t) = \frac{k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}}{L_1} \cdot v_1(t) \quad (17)$$

$$\text{Soit donc : } k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = L_{m1} \cdot m = \sqrt{L_{m1} \cdot L_{m2}} \quad (18)$$

Et on identifie ainsi :

$$k = \sqrt{\frac{L_{m1} \cdot L_{m2}}{L_1 \cdot L_2}} \quad (19)$$

Ou encore :

$$k = \sqrt{\frac{L_{m1} \cdot L_{m2}}{(L_{m1} + L_{f1}) \cdot (L_{m2} + L_{f2})}} \quad (20)$$

NB : Le couplage total est bien compatible avec cette formule puisque les inductances de fuites nulles ramènent le coefficient de couplage à l'unité.

NB : L'objectif de ce développement est de montrer qu'il est équivalent de raisonner sur le schéma équivalent de type A ou B, ce dernier étant très pratique puisque mettant en œuvre un transformateur idéal dont les propriétés sont utiles à la construction de schémas équivalents simplifiés.

III.1.2.3 Cas de deux bobines identiques, fonction de transfert et fréquence de résonance :

Pour plusieurs raisons, le cas particulier de deux bobinages identiques se révèle particulièrement intéressant. La première raison réside dans la simplification du schéma équivalent due aux constats suivants :

Le rapport de transformation devient unitaire en raison de l'égalité des nombres de spires, soit :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = 1 \quad (21)$$

Les inductances propres sont égales, soit :

$$L_1 = L_2 = L$$

Les inductances magnétisantes ramenées au primaire et secondaire sont égales, soit :

$$L_{m1} = L_{m2} = L_m$$

L'expression du coefficient de couplage se simplifie alors également :

$$k = \sqrt{\frac{L_{m1} \cdot L_{m2}}{L_1 \cdot L_2}} = \frac{L_m}{L} \quad (22)$$

Il vient alors :

$$L_m = k \cdot L \quad (23)$$

Et

$$L_{f1} = L_{f2} = L_f = L - L_m = 1(-k) \cdot L \quad (24)$$

Enfin, les diverses résistances équivalentes et capacités parasites s'écrivent :

$$R_1 = R_2 = R \text{ et } C_1 = C_2 = C$$

Le schéma équivalent ramené au primaire revient ainsi à celui représenté sur la figure 5 :

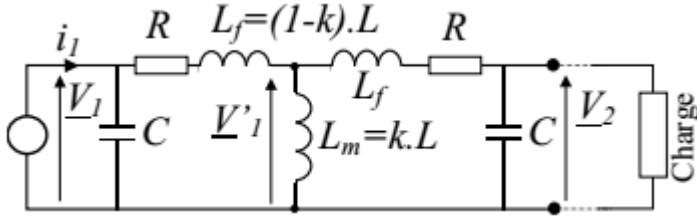


FIGURE 2.4 : Schéma simplifié [Luc Lasne François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA 351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.]

Afin de caractériser correctement la tension obtenue au secondaire et la puissance transmissible à une charge, il est suffisant de calculer les éléments du schéma équivalent de Thévenin [3] du modèle.

En un premier temps, la tension secondaire à vide s'écrit (les calculs intermédiaires, basés sur des formules de pont diviseur d'impédances, ne sont pas détaillés) :

$$V_{2eq} = \frac{\frac{1}{jC\omega}}{\frac{1}{jC\omega} + R + j.L\omega} V_1' \quad (25)$$

Soit

$$V_{2eq} = \frac{K.jL\omega.V_1}{R(1+j.RC\omega+j^2LC\omega^2)+j.L\omega(1+j.RC\omega)+j.L\omega.j^2LC\omega^2.(1-k^2)} \quad (26)$$

Dans le cas du couplage faible, le coefficient de couplage k est bien inférieur à 1 et il est possible d'écrire $1-k^2 \cong 1$.

Dans ce cas, l'expression de la tension secondaire à vide se simplifie et s'écrit :

$$V_{2eq} \cong \frac{K.jL\omega}{(R+j.L\omega)(1-LC\omega^2+j.RC\omega^2)} \cdot V_1 \quad (27)$$

Cette expression laisse apparaître clairement la pulsation et la fréquence de résonance :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (28)$$

Et

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (29)$$

Une ultime simplification apparaît en considérant que $R \ll L\omega$ (ceci est vérifié expérimentalement), ce qui donne :

$$V_{2eq} \cong \frac{k}{(1-LC\omega^2+j.RC\omega)} \cdot V_1 \quad (30)$$

Ensuite, le calcul de l'impédance équivalente du modèle de Thévenin aboutit, grâce à l'hypothèse $1-k^2 \cong 1$, à l'expression simple suivante :

$$Z_{eq} \cong \frac{R+j.L\omega}{(1-LC\omega^2+j.RC\omega)} \quad (31)$$

Le schéma de la Figure 2.5 se réduit ainsi à l'association série représentée sur la figure 6.

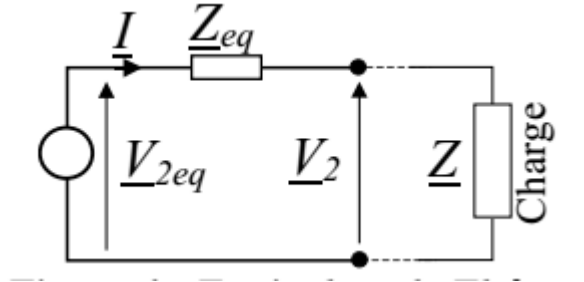


FIGURE 2.5 : Equivalent de Thévenin [Luc Lasne François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA 351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.]

Conclusion intermédiaire portant sur un couple de bobines identiques :

Il est important, à partir des calculs précédents, de bien noter les particularités suivantes : La fréquence de résonance est unique et ne dépend que des grandeurs constantes L et C . Elle ne dépend pas, dans le cas du couplage faible, c'est à dire en dehors du champ proche, du coefficient de couplage. Cette remarque est de première importance dans l'objectif d'un fonctionnement à récepteur mobile. Pour illustrer ceci, la figure 2.7 représente le diagramme de Bode de la fonction de transfert du circuit : $\frac{V_{2eq}}{V_1}(j\omega)$.

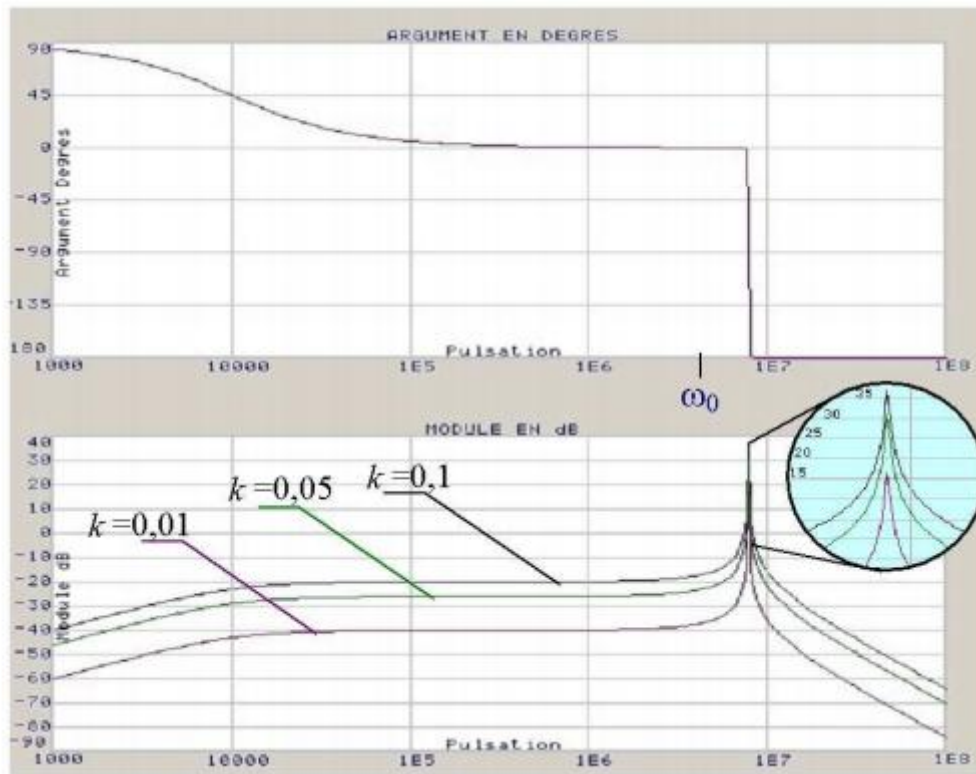


FIGURE 2.6 : Fonction de transfert [Diagramme réalisé à l'aide du logiciel TPA, Stéphane Ygorra.] [2]

A la résonance, la tension V_{2eq} est maximale et conforme à la relation suivante :

$$V_{2eq}max \cong \frac{k}{j.RC\omega_0} \cdot V_1 \quad (32)$$

Cette expression peut être présentée sous la forme :

$$V_{2eq}min \cong -j.Q.k.V_1 = \frac{k}{j.2\xi} V_1 \quad (33)$$

Où Q est le facteur de qualité ($Q = \frac{L.\omega_0}{R}$)

et ξ le coefficient d'amortissement ($2\xi = R\sqrt{\frac{C}{L}}$)

A la résonance également, l'impédance équivalente de Thévenin se réduit à :

$$Z_{eq}min \cong \frac{R+j.L\omega_0}{j.RC\omega_0} \cong \frac{L}{RC}$$

$$(36)$$

$$(\text{si } R \ll L\omega)$$

Il faut bien noter dans cette expression que L est proportionnelle à N^2 et R à N , autrement dit ces deux grandeurs sont dépendantes du nombre de spires N et on retiendra :

$$V_{eqmax} \propto \frac{k}{\sqrt{C}} \cdot V_1 \quad (37)$$

Et

$$Z_{eqmin} \propto \frac{R}{C} \quad (38)$$

Enfin, connaissant le modèle de Thévenin à la résonance du système, il est facile d'exprimer la puissance maximale transmissible à la charge (voir *figure 8*). Celle-ci correspond au cas de l'adaptation d'impédances, c'est à dire à

$$Z = Z_{eqmin} = \frac{L}{R.C} \quad (39)$$

L'expression de la puissance maximale est ainsi :

$$P_{max} = \frac{V_{2max}^2}{4.Z_{eqmin}} \cong \frac{k^2.V_1^2}{4.R} \quad (40)$$

Cette expression révèle ainsi que la puissance maximale transmissible est limitée de façon prépondérante par la résistance parasite des enroulements : R . En d'autres termes il n'est possible de faire croître cette puissance qu'en n'utilisant qu'un nombre réduit de spires d'un conducteur spécialement choisi en regard de la gamme de fréquence. Enfin, cette résistance étant fixée, le réglage de la tension d'entrée V_1 semble le seul moyen de compenser l'action du coefficient de couplage.

On retiendra ainsi la proportionnalité suivante :

$$P_{max} \propto \frac{k^2.V_1^2}{R} \quad (41)$$

Ainsi que les notions résumées sur la *figure 8* :

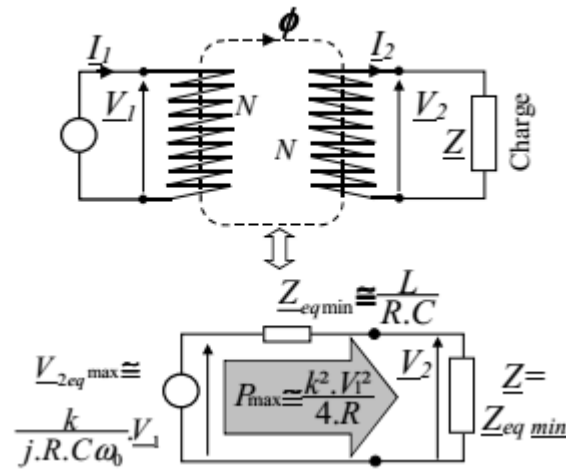


FIGURE 2.7 : Transmission de puissance à $f = f_0$ [Luc Lasne François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA 351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.]

III.2 Cas de deux bobines différentes :

Le couplage de deux bobines « différentes », c'est à dire composées de nombres de spires non identiques et de géométries non semblables, est intéressant dans l'absolu. En revanche, ce cas semble être défavorable en termes de résonance. Cette étude se limite ainsi au cas particulier d'enroulements identiques résonant à une seule fréquence rendant extrêmes toutes les grandeurs du système. Cependant, l'approche généraliste portant sur le schéma équivalent de la *figure 2.4* semble incontournable et fera l'objet d'une étude future.

CHAPITRE IV EXPLICATIONS APPROFONDIES DU SYSTEME DE TRANSFERT D'ENERGIE PAR COUPLAGE MANGETIQUE RESONANT:

IV.1 Contextes :

Le couplage magnétique résonant entre deux structures, généralement des enroulements circulaires (*Figure 2.8*), 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 [3]. 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 [3]. L'amélioration est due à l'utilisation du régime de couplage fort des objets résonants, ce qui permet de maximiser le transfert.

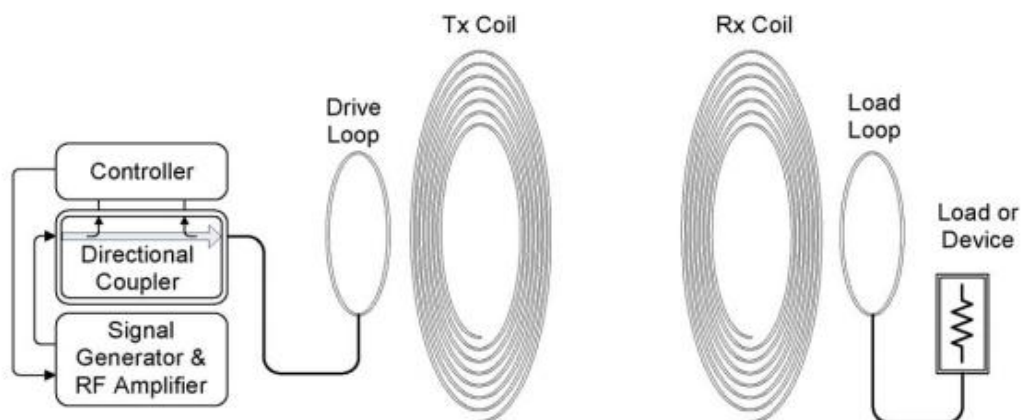


FIGURE 2.8 – Schéma de principe du montage utilisé pour la transmission d'énergie sans fil par couplage magnétique résonant [Sample *et al.*, 2011]

Lors qu'il n'y a pas de résonance la bobine se comporte comme une grosse résistance et refuse de laisser passer beaucoup de courant, à l'inverse quand il y a résonance une partie de l'énergie obtenue est présente dans le circuit ; au moment où le condensateur est chargé au maximum et quand il se vide dans la bobine sa tension élevée force un courant important à circuler dans celle-ci parce que en électricité plus il y a de tension plus il y a de courant qui peut circuler. Une partie de l'énergie est remise dans le condensateur l'autre est récupérée au final on force donc la bobine à aspirer plus d'énergie à partir du flux magnétique que s'il n'y avait pas de résonance la différence n'est pas réalisable car sans résonance on obtient une puissance minable.

Pour obtenir cette résonance il suffit d'ajouter un condensateur parallèle avec la bobine mais il y a une condition à respecter, il faut que la fréquence de circuit soit la même

que la fréquence du système émetteur. Il faut donc adapter parfaitement la capacité avec un ou plusieurs condensateurs en fonction de l'inductance de la bobine et de la fréquence.

La résonance c'est qu'un condensateur et une bobine peut s'échanger d'énergie car le condensateur sert à **stocker des charges électriques opposées sur ses armatures**, il est notamment utilisé pour stabiliser une alimentation électrique car il se décharge lors de chutes de tension et se charge lors des pics de tension. Il est utilisé pour traiter des signaux périodiques, pour le filtrage par exemple. Il sert à séparer un courant alternatif d'un courant continu car il bloque ce dernier, et bien sûr à stocker de l'énergie. Un système sans résonance ne donne que de puissance minable dans la deuxième bobine et diminue beaucoup le rendement.

IV.2 La structure de transmission :

La structure de transmission est formée d'une simple spire et d'une bobine. Lorsque le signal provenant du générateur arrive dans la spire, le champ magnétique oscillant excite la bobine de transmission, qui se comporte de la même manière qu'un circuit oscillant RLC (c'est un circuit contenant une résistance R, une bobine (induction L) et un condensateur (capacité C)). Le récepteur se comporte de manière analogue, à la différence que la source est remplacée par la charge à alimenter. L'interaction à distance a lieu entre les deux bobines qui peuvent être assimilés à deux circuits résonants RLC à haut facteur de qualité, Q (*Figure 2.9*).

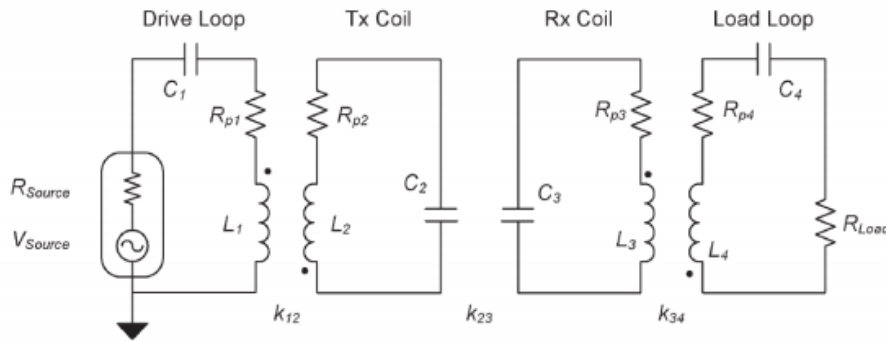


FIGURE 2.9 – Circuit équivalent d'un système de transmission d'énergie par couplage magnétique résonant [Sample *et al.*, 2011]

Le circuit équivalent simplifié consiste en quatre circuits résonants liés magnétiquement par les **coefficients de couplage** k_{12} , k_{23} et k_{34} . En définissant

$$Q_i = \frac{1}{R_i} \sqrt{\frac{L_i}{C_i}} \quad (42)$$

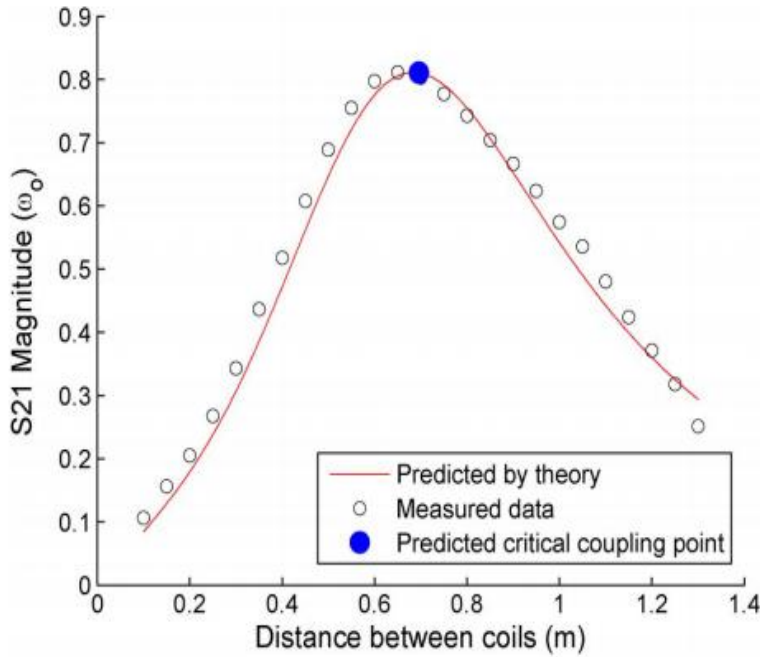
Comme le coefficient de qualité et en considérant un système symétrique, l'expression de **la fonction de transfert** peut s'exprimer, à $\omega = \omega_0$, comme :

$$\left(\frac{V_{load}}{V_{source}}\right)_{\omega_0} = \frac{ik_{23}k_{12}^2Q_1^2Q_2^2}{k_{23}^2Q_2^2 + (1+k_{12}^2Q_1Q_2)^2} \quad (43)$$

En dérivant cette expression de la fonction de transfert par rapport à k_{23} , on obtient la valeur critique qui maximise le couplage entre les deux structures, soit :

$$k_{critique} = \frac{1}{Q_i} + k_{12}^2Q_1 \quad (44)$$

Ce **coefficient de couplage** varie évidemment avec la distance. Il en découle qu'il y a une distance qui maximise le rendement du transfert d'énergie, comme le montre le graphique de la *Graphe 1.1*. Ce constat va en quelque sorte contre l'intuition pour les systèmes de transmission d'énergie sans fil, en particulier lorsqu'on compare avec le couplage inductif, pour lequel l'efficacité du couplage a une dépendance en $\frac{1}{r^3}$ ou bien dans le cas des antennes où la dépendance est en $\frac{1}{r^2}$.



Graphe 1.1 – Évolution du couplage entre l'émetteur et le récepteur en fonction de la distance [Sample *et al.*, 2011]

IV.3 Les performances de la transmission de puissance par couplage résonant :

Les performances de la transmission de puissance par couplage résonant sont principalement déterminées par la performance des résonateurs utilisés. Un bon résonateur pour le TESF doit avoir un facteur Q élevé et un coefficient de couplage élevé, qui est le rapport de la mutuelle inductance à la self-inductance. La comparaison des différents types des résonateurs sont énumérés dans le *tableau 1.1*. Les bobines 3D ainsi que les résonateurs à spirale sont adaptés à l'application de transmission de puissance d'élevé à moyenne distance dans l'espace libre à basse fréquence. Le résonateur diélectrique est beaucoup plus approprié en haute fréquence (pour de petites tailles) telle que le domaine d'application des implants biomédicaux.

IV.4 Le résonateur :

C'est les deux les matériaux qui transmettent champ magnétique. Les bobines sont largement utilisées dans la transmission traditionnelle de puissance non résonance inductive, en raison de leur transmission de puissance par champ magnétique dominant. Lorsque la bobine fonctionne à la fréquence de résonance, l'énergie électrique est égale à l'énergie magnétique. L'énergie électrique est stockée dans l'espace situé entre les fils, alors que l'énergie magnétique est stockée dans un espace beaucoup plus large pour former le couplage magnétique.

Les bobines permettant la transmission de puissance peuvent avoir différentes géométrie. En général, les bobines hélicoïdales (de type solénoïde) «3-D »ont une inductance plus élevé que les bobine de type spirale (planaire), «2-D » ayant le même diamètre, parce que l'espace efficace de stockage de l'énergie magnétique des bobines de 3-dimensions peut être plus grand que dans le cas planaire. Lorsqu'une bobine résonne, sa fréquence de résonance est également un paramètre important qui affecte les pertes de conducteur et le facteur Q. La bobine 3D peut avoir une fréquence de résonance plus élevée et moins de pertes par rayonnement que la bobine plane. C'est la raison pour laquelle les bobines 3D peuvent avoir un facteur Q beaucoup plus élevée. Le facteur Q et le coefficient de couplage des bobines déterminent le rendement de transmission de puissance.

- La résistance des bobines 3D peuvent être calculée comme suit,

$$R_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} \cdot \frac{l}{4\pi a} \quad (45)$$

Où l est la longueur du fil de la bobine de résonateur, a est le rayon du fil; σ est la conductivité du matériau de la bobine, et ω est la fréquence angulaire de résonance.

- La résistance de rayonnement de la bobine 3D peut être calculée comme suit,

$$R_r = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left[\frac{\pi}{12} n^2 \left(\frac{\omega r}{c} \right)^4 + \frac{2}{3\pi^3} \left(\frac{\omega h}{c} \right)^2 \right] \quad (46)$$

Où n est le nombre de spires de la bobine, r est le rayon de la bobine, h est la hauteur de la bobine, c est la vitesse de la lumière, et ω est la fréquence angulaire de résonance.

➤ L'inductance peut être calculée comme suit,

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi\epsilon_0 |I_0|^2} \int_{C1} \int_{C1} d\vec{r} d\vec{r}' \frac{\vec{j}(\vec{r}) \cdot \vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (47)$$

Où $|I_0|$ est l'amplitude maximale du courant distribué sur les bobines, $C1$ est l'intégrale de chemin sur la première bobine.

➤ L'inductance mutuelle peut être calculée comme suit,

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi\epsilon_0 |I_0|^2} \int_{C1} \int_{C2} d\vec{r} d\vec{r}' \frac{\vec{j}(\vec{r}) \cdot \vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (48)$$

Où $|I_0|$ est l'amplitude maximale du courant distribué sur les bobines; $C1$ est l'intégrale de chemin sur la première bobine; $C2$ est l'intégrale de chemin sur la deuxième bobine.

➤ Le coefficient de couplage peut être calculé comme suit,

$$k = M_{12} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (49)$$

Où L_1 et L_2 sont les self-inductances de la bobine 1 et de la bobine 2; M_{12} est l'inductance mutuelle entre la bobine 1 et la bobine 2.

➤ La capacité équivalente série de la bobine peut être calculée comme suit,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 |\rho_0|^2} \int_{C1} \int_{C1} d\vec{r} d\vec{r}' \frac{\rho(\vec{r}) \cdot \rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (50)$$

Où $\rho(\vec{r})$ est la densité de charge à la position $\vec{r}$, $|\rho_0|$ est la charge totale sur le condensateur équivalent.

➤ La fréquence de résonance est,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (51)$$

Où L est l'inductance équivalente et C est la capacité équivalente.

- Le facteur Q_c ne considère que les pertes de conduction et le facteur de Q_r ne considère que les pertes par rayonnement. Tous les deux ont les relations suivantes,

$$\blacksquare \quad Q_c = \frac{\omega L}{R_c} \quad (52)$$

Et

$$\blacksquare \quad Q_r = \frac{\omega L}{R_r} \quad (53)$$

- Le facteur Q totale à la relation suivante,

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \quad (54)$$

Dans le cas symétrique où les deux bobines résonnantes sont identiques et les deux boucles ont la même géométrie, la relation entre la tension aux bornes de la charge (V_{Load}) et la tension au niveau de la source (V_{Source}) est décrite ainsi:

$$\left(\frac{V_{Load}}{V_{Source}} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{k_{cc} k_{lc}^2 Q_{coil}^2 Q_{loop}^2}{k_{cc}^2 Q_{coil}^2 + (1 - k_{lc}^2 Q_{coil} Q_{loop})^2} \quad (55)$$

Où k_{cc} est le coefficient de couplage entre les bobines de résonance,

k_{lc} est le coefficient de couplage entre la bobine de résonance et la boucle,

Q_{coil} et Q_{loop} sont les facteurs de Q de la bobine et la boucle.

IV.5 Différents résonateurs pour le couplage magnétique résonnant :

Il y a plusieurs résonateurs qui peuvent être utiles dans la transmission d'énergie sans fil mais la plus connue sont le résonateur en boucle et le résonateur à anneaux imbriqués.

IV.5.1 Le résonateurs en boucle ou Résonateurs de type solénoïde :

Le résonateur chargé par des condensateurs est planaire, ce qui est beaucoup plus facile à être réalisé en circuit imprimé. Le principe de résonance est approprié pour le TESF en espace libre, car l'énergie électrique est stockée dans l'espace entre les fils et le facteur Q peut être très élevé. Toutefois, lorsque la bobine est imprimée sur un PCB (polychlorophényles (des composés chimiques aromatiques colorisés)), la perte diélectrique diminue grandement le facteur Q. Le résonateur est chargé par des condensateurs à faible pertes diélectriques, ce qui réduit les pertes électrique du système de transmission. Des recherches ont déjà portée sur le rendement TESF de résonateurs de boucle chargées montré dans la *Figure 2.10* dans l'espace libre. La distance de transmission est similaire à celle des bobines 3D, mais la taille, beaucoup plus compact, permet l'intégration sur carte de circuit imprimé.

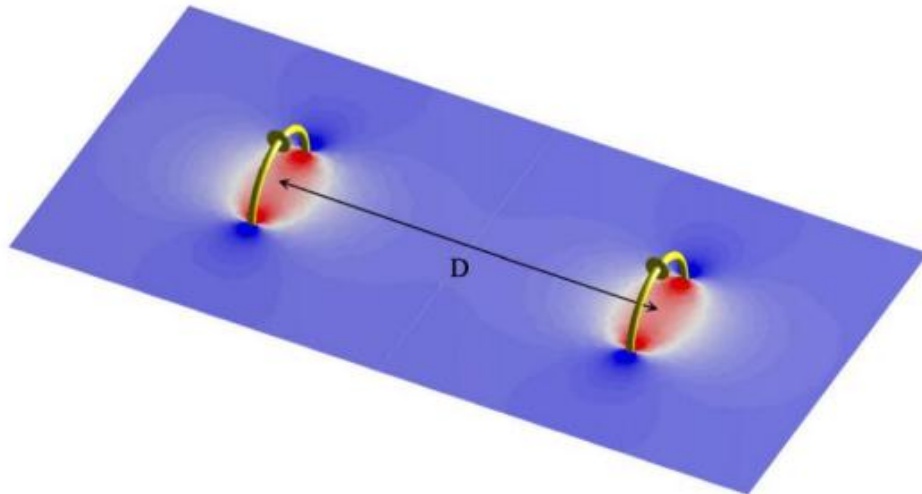


FIGURE 2.10 Le résonateur en boucle [Wei Wang, 2014.]. [5]

a) L'inductance du résonateur en boucle :

L'inductance du résonateur en boucle peut être calculée comme suit,

$$L = \mu_0 r \left[\ln \left(\frac{8r}{a} \right) - 2 \right] \quad (56)$$

Où r est le rayon du résonateur en boucle, a est le rayon de la section du fil. Si le condensateur est idéal et les pertes de conduction et les pertes par rayonnement sont considérés, la résistance série équivalente R de la boucle a la relation suivante [5],

$$R = R_c + R_r \quad (57)$$

$$R_c \approx \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} \left(\frac{r}{a}\right) \quad (58)$$

$$R_r \approx \frac{\pi}{6} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\sigma}} \left(\frac{r}{\lambda}\right)^4 \quad (59)$$

Où R_c est la résistance série équivalente du fait des pertes par conduction du résonateur en boucle; R_r est la résistance série équivalente prenant en compte les pertes par rayonnement du résonateur en boucle, r est le rayon de la boucle; λ est la longueur d'onde en espace libre à la fréquence de travail; σ est la conductivité du matériau du fil; ω est la fréquence angulaire.

b) La capacitance de la boucle :

La capacitance de la boucle peut être calculée comme suit,

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (60)$$

Où A est la surface du condensateur à plaques, d est la distance entre les deux plaques du condensateur; ϵ_r est la permittivité relative.

Les équations des facteurs Q et des tensions de sortie des bobines peuvent être appliqués sur le résonateur à spirale chargé. Les résonateurs diélectriques sont largement utilisés dans les filtres à Q élevé et antennes compactes et multimodes. Si la permittivité est suffisamment élevée, la quasi-totalité de l'énergie électrique est confinée dans les résonateurs diélectriques et laisse sortir uniquement l'énergie magnétique permettant pour le couplage.

Le mode «whisper-gallery » a été étudié et montre une très bonne suppression du rayonnement. Toutefois, il a été constaté que la permittivité doit être très élevée (au-dessus 65) pour obtenir un facteur Q assez élevé pour transférer l'énergie à une distance similaire aux bobines 3D.

IV.5.2 Résonateurs diélectriques en céramique :

Des disques de céramiques, montré dans la *Figure 2.11*, ayant une permittivité de 147.7 sont utilisés dans [5] pour simuler la transmission de puissance fonctionnant avec le mode «whisper gallery » ($m = 2$). Cependant les céramiques de permittivité aussi élevée (plus de 100) ont généralement aussi un coefficient de température (> 100), ce qui rend son

utilisation impossible dans la vie quotidienne. Un disque de céramique avec une permittivité plus faible (65.6) travaillant sur le même mode de résonance «whisper galery » ($m = 3$) est simulé dans [5] et l'on constate que le coefficient de couplage diminue en raison du nombre de mode supérieur à la résonance ($m=2$).

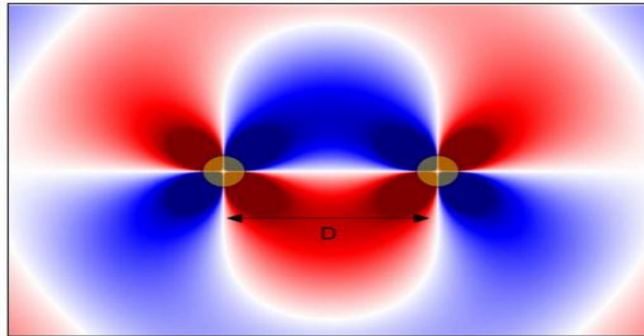


FIGURE 2.11 Distribution du champ de la transmission de puissance entre deux disques en céramique à permittivité élevée [Wei Wang, 2014.]. ($r = 147.7$) dans son mode de «whisper galery » à la résonance ($m=2$) [5].

IV.5.3 Résonateurs à anneau :

Les anneaux sont «reliés » les uns aux autres par un flux magnétique commun et peuvent être considérés comme des éléments parallèles dans un résonateur. Comme les anneaux sont liés les uns avec les autres, le couplage entre les anneaux est très fort. Les anneaux imbriqués fonctionnent comme un résonateur unique, capable de transférer de la puissance à un autre résonateur, en présentant de bonnes distances par couplage magnétique à la fréquence de résonance. Cependant, parmi les anneaux imbriqués, le couplage non résonant est fort aussi, quand comparé à celle de résonance. Cela signifie que même si les condensateurs ne sont pas en mesure de faire résonner chaque boucle exactement à la même fréquence, le couplage non résonant entre les boucles permettra d'homogénéiser la fréquence de fonctionnement du résonateur. Néanmoins, plus les anneaux auront une fréquence de résonance proche l'une de l'autre, plus le facteur Q du résonateur sera élevé.

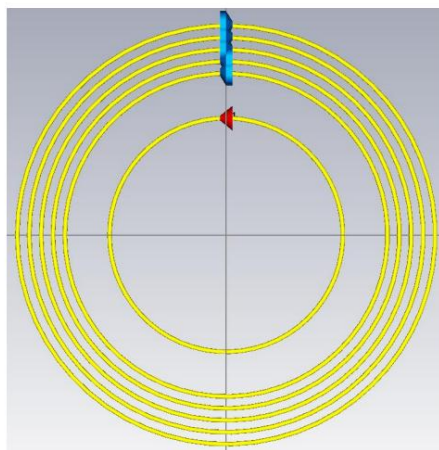


FIGURE 2.12 Le résonateur à anneaux imbriqués, chacun chargé par un condensateur [Wei Wang, 2014.].

L'efficacité de transmission des anneaux imbriqués est proche de celle des bobines 3D, et est beaucoup plus élevée que l'efficacité de la bobine spirale.

Ce type de résonateur devrait avoir une meilleure performance que le résonateur à spirale. Au contraire de ce dernier qui ajuste sa fréquence de résonance en changeant l'espacement entre les enroulements, le résonateur à anneaux imbriqués ajuste sa fréquence de résonance à l'aide de condensateurs localisés. L'avantage c'est que la fréquence de résonance peut être réglée (en choisissant le bon condensateur céramique) à la valeur optimale, quasiment sans changer l'inductance mutuelle. La distribution du courant sur chaque anneau permet d'optimiser les pertes de conduction. Un certain nombre de conducteurs est donc utilisé, ce qui permet d'obtenir un meilleur coefficient de couplage, quand comparé au résonateur à spirale. Un résonateur à anneaux imbriqués métalliques ayant un diamètre de 150 mm est proposé dans cette section (figure 2.12). Les anneaux reliés les uns aux autres par un flux magnétique commun peuvent être considérés comme des éléments parallèles dans un résonateur.

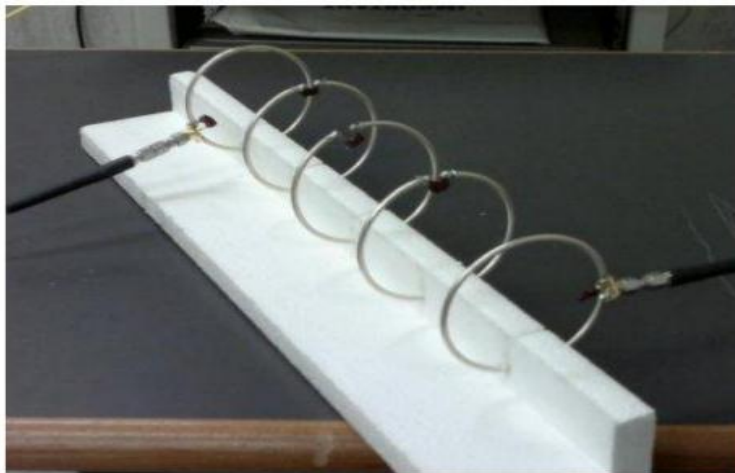
IV.5.4 Comparaisons des différents des résonateurs :

Tableau 1.2 Comparaisons des différents des résonateurs

	<i>Résonateurs de type solénoïde</i>	<i>Résonateurs spirale(ou anneau)</i>	<i>Résonateurs diélectriques en céramique</i>
<i>Gamme de fréquences</i>	~1MHz à ~100MHz	~1MHz à ~100MHz	~500MHz à ~10GHz
<i>Mécanismes de perte</i>	pertes par conduction, pertes par rayonnement	pertes par conduction, pertes par rayonnement	pertes par conduction, pertes diélectrique
<i>Coefficient de couplage</i>	Grand	Grand	Moyen
<i>Distance de transfert</i>	0,05m à 5m	0,05m à 5m	0,01m à 0,2m
<i>Coût</i>	Faible	Faible	Moyen

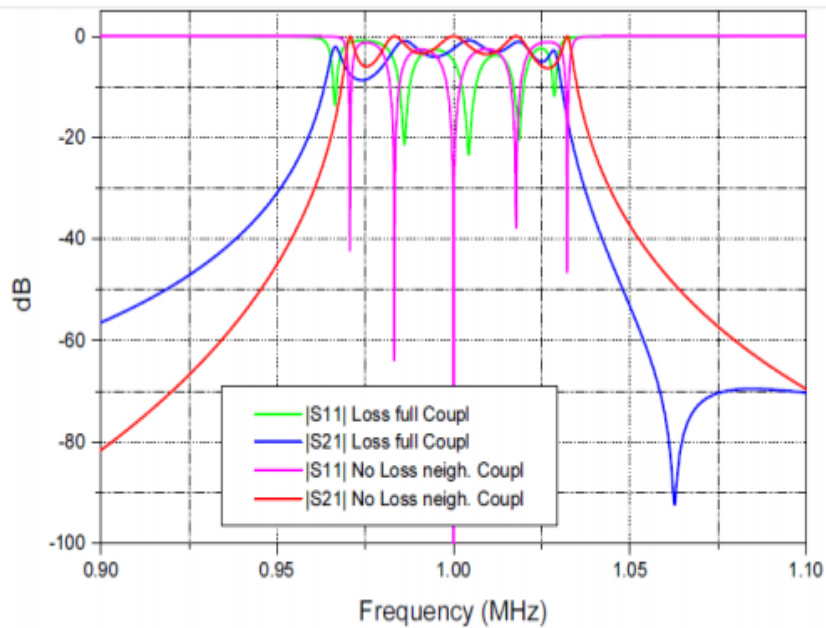
IV.6 La répétition et le désalignement :

Un système de transmission de puissance utilisant deux résonateurs résonants et identiques est capable d'opérer un transfert sur une distance de 2 à 4 fois le diamètre des résonateurs, ce qui n'est pas assez long pour certaines applications parce que le champ proche du résonateur diminue beaucoup plus rapidement que le champ de rayonnement. Un répétiteur, placé à courte distance des résonateurs peut augmenter considérablement le champ dans le trajet de transmission et rendre la distance de transfert plus élevée. Un système de TESF constitué de cinq résonateurs, qui fonctionnent tous à la même fréquence et qui sont tous placés en ligne est montré sur la *Figure 2.16*. Il est montré dans [6] qu'un système symétrique sans perte avec un nombre pair d'inverseurs K , peut être adapté à la fréquence de résonance. D'autre part, un réseau symétrique sans perte avec un nombre impair d'inverseurs K peut être adapté à la fréquence de résonance en choisissant convenablement le premier et le dernier inverseur. Comme nous l'avons vu dans la *Figure 2.13*. Il y a 5 points maximum de transmission locaux, équivalant au nombre de résonateurs.



Photos 2 Photos de Cinq résonateurs disposés en ligne. [Wei Wang, 2014.]. [6]

Chaque résonateur est modélisé par une impédance, tandis que le couplage entre résonateurs est modélisé par inverseurs immittance. Dans cet agencement, il est supposé que seuls les résonateurs adjacents peuvent se coupler à l'autre.



GRAPHE 1.2 Comparaison des paramètres S de 5 résonateurs répartis uniformément prenant en compte les pertes dans la boucle et le couplage mutuel entre les boucles. [6]

Sur la photo 2.13 les résonateurs ont un facteur Q d'environ 540. La fréquence est normalisée par rapport à la fréquence de résonance de 80 MHz. Les résonateurs sont placés à une distance égale au diamètre des résonateurs.

Le désalignement angulaire et le désalignement latéral des résonateurs sont montrés dans la *Figure 2.14*. Ils ont été étudiés dans de nombreux documents, par exemple dans [7]. La dimension maximale des bobines dans [6] est de 0,4m et la fréquence de travail est de 6.78 MHz. On a trouvé que le désalignement angulaire de 45 degrés diminue peu l'efficacité de transmission, montrés dans la *Figure 2.14*, et le désalignement latéral montré dans la *Figure 2.14* dans un rayon équivalent à celui du résonateur à peu d'influence sur l'efficacité de transmission. Ce sont les avantages de l'utilisation des systèmes de transmission de couplage par résonance. Par contre, la transmission de puissance antennes à fort gain est très sensible au désalignement angulaire et au désalignement latéral en raison de la directivité élevée. Le couplage non-résonant est sensible au désalignement latéral en raison de la distance limitée de transmission.

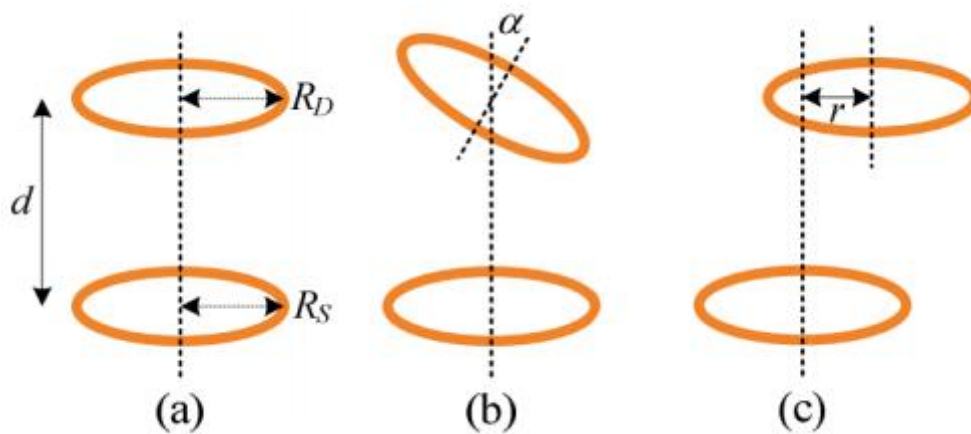
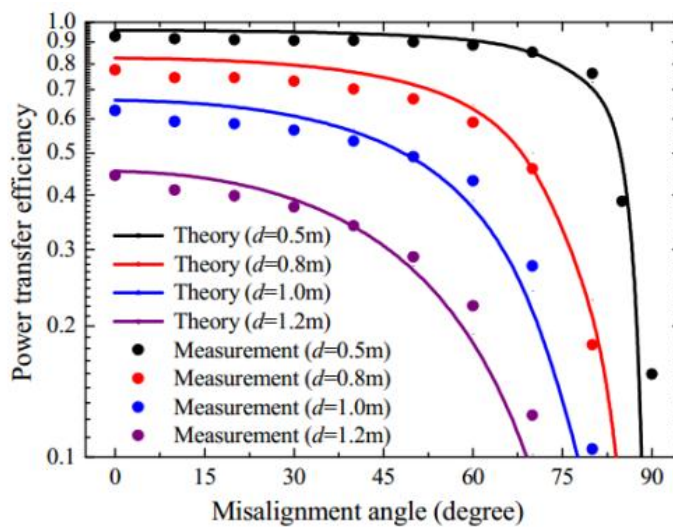
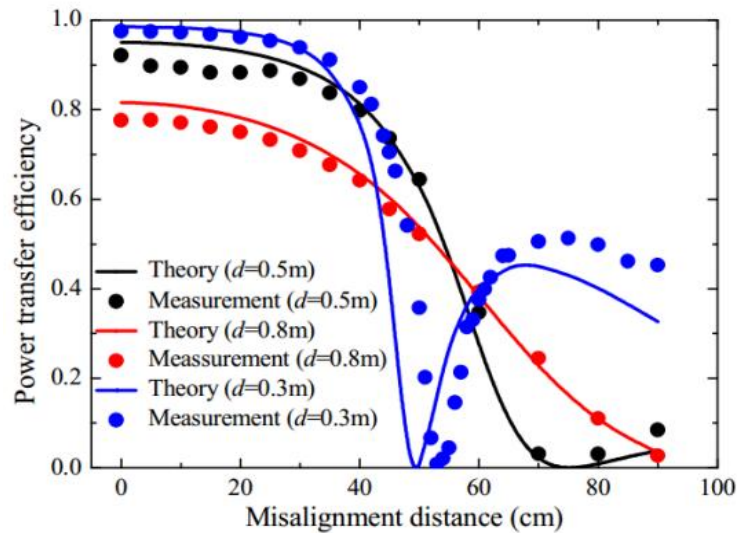


FIGURE 2.13 Arrangement basique de la liaison sans fil. [Wei Wang, 2014.].

- (a) alignement frontal,
- (b) désalignement angulaire, et
- (c) désalignement latéral.



GRAPHE 1.3 L'efficacité du transfert d'énergie de la source à l'appareil par rapport à l'angle de désalignement (cas du désalignement angulaire) [7]



GRAPHE 1.4 Efficacité du transfert d'énergie de la source à l'appareil en fonction du désalignement (cas du désalignement latéral) [7]

IV.7 Adaptation d'impédance et redressement :

Depuis quelques années, des recherches dans le monde entier ont permis d'optimiser le TEF et beaucoup de progrès ont été réalisés. Il est maintenant connu que l'impédance d'entrée et de sortie optimale du système TEF doit diminuer à mesure que la distance augmente entre les résonateurs. Un schéma typique de système TEF à résonance magnétique couplée est montré dans la *Figure 2.8*.

On peut changer la distance entre la boucle d'excitation et le résonateur pour réaliser l'adaptation d'impédance optimale. Cette méthode d'adaptation d'impédance nécessite certains dispositifs mécaniques et occupe trop d'espace. C'est pourquoi il est souvent plus convenable d'utiliser des réseaux de circuits de condensateurs et d'inducteurs accordables pour réaliser les transformations d'impédance en conséquence. Certains de ces équipements sont disponibles commercialement et permettent de contrôler l'adaptation de l'impédance jusqu'à au moins 3 MHz, avec une efficacité de transmission allant jusqu'à 95% [8]. Certains chercheurs ont trouvé que des réseaux d'adaptation supplémentaires comprenant des réactances fixes pouvaient être ajoutés dans le système TEF pour optimiser l'efficacité dans une certaine plage de distance de transmission si les impédances à l'entrée et à la sortie sont aussi fixes [9]. Un schéma typique de système TEF à résonance magnétique couplée est le suivant [10].

CONCLUSION PARTIELLE :

Les travaux autour des systèmes de transmission d'énergie sans fil sont portés par le développement accéléré des dispositifs électroniques nomades (smartphones, tablettes, capteurs sans fil). Ces dispositifs intègrent de plus en plus de fonctionnalités et la possibilité de les alimenter sans fil apporterait un grand avantage qui leur permettrait de limiter l'encombrement des batteries.

Plusieurs techniques de transmission d'énergie sans fil existent et le choix d'une méthode par rapport à une autre se fait en fonction des spécificités de l'application visée. Dans le cadre du projet RWU, où il y a des fortes contraintes quant aux dimensions de l'émetteur et du récepteur, ainsi que le besoin de réaliser un réveil sur une distance de plusieurs mètres, le choix du transfert par microondes s'impose. Les niveaux d'énergie impliqués sont très faibles, en raison des normes sanitaires de protection des personnes, d'où la nécessité d'avoir en réception des récepteurs très sensibles et qui soient capables de fermer l'interrupteur de puissance avec un faible niveau de tension d'entrée.

INTRODUCTION PARTIELLE :

À la même distance de transmission, il a été démontré qu'un système de transmission de énergie sans fil (TESF) utilisant un certain nombre de résonateurs mis en ligne et ayant la même fréquence d'opération, présente une plus grande efficacité de transmission par rapport au système de transmission composé seulement de deux résonateurs. Toutefois, ces résonateurs de relais placés en ligne, occupent beaucoup d'espace dans le chemin de transmission, et ainsi devenant irréaliste pour certaines applications. Également, on constate que lorsque les résonateurs sont verticales l'un par rapport à l'autre, et qu'il n'y a pas de défaut d'alignement latéral, l'efficacité de transmission est égal à 0. Ceci est due au fait que le champ magnétique généré à partir de l'émetteur est symétrique aux deux côtés du récepteur. Cependant, lorsqu'il y a un défaut d'alignement latéral, le récepteur qui est vertical à l'émetteur, peut continuer à recevoir la puissance de l'émetteur. En se basant sur ces connaissances, le système avec relais à côté est le meilleur compromis pour un bon environnement de travail et le system de transmission de puissance sans fil. Le résonateur de relais à côté peut être installé sur le plafond, sur le plancher de la salle, ou sur les deux côtés latéraux du mûr, qui n'occupent pas l'espace de la vie quotidienne. Plusieurs relais peuvent également être installés, et ceci augmenterait l'efficacité et la distance de transmission.

CHAPITRE V AMÉLIORATION DE LA TRANSMISSION D'ÉNERGIE SANS FIL PAR RÉPÉTEUR LATÉRAL

V.1 La simulation des résonateurs sur le côté pour le relais :

La simulation a été faite en utilisant le logiciel CST. La carte de circuit imprimé n'est pas incluse dans le modèle de simulation dans le but d'améliorer la vitesse de simulation. Vu que la plupart des champs électriques sont contenus dans le condensateur, des pertes diélectriques générées par la carte de circuit imprimé peuvent être négligées. Le matériau du conducteur est défini comme le cuivre pour inclure les pertes de conduction dans la simulation. Les résultats de la simulation indiquent une résonance à 65 MHz. Les performances de ce système du TESF ayant une dimension de 150 mm, atteignent un rendement de plus de 70% à une distance de deux fois le diamètre du résonateur. Parce que les condensateurs que nous utilisons ont une erreur maximale de capacité de 2% et la simulation sur cette figure ne montre que la fréquence de résonance, la détérioration de l'efficacité en fonction de la tolérance des condensateurs n'est pas évidente.

Le modèle de simulation est illustré à la figure 3.1. Nous utilisons quatre résonateurs à anneaux imbriqués avec un diamètre de 1,5 m. Deux résonateurs pour la source et pour la charge et deux sur le côté pour le relais afin de pouvoir transférer la puissance sur une distance de 6 m. La distance entre les deux relais est de 3 m, qui est la distance entre le plafond et le plancher. Étant donné que la direction du champ magnétique sur le côté est dans le plan vertical à la direction de transfert de puissance, des relais sont placés à une distance égale à la source qu'à la charge.

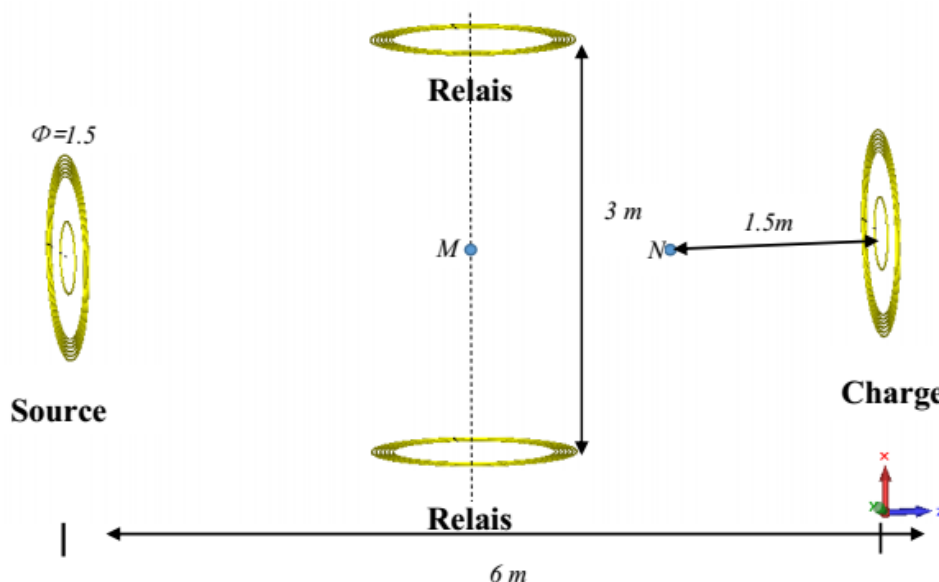


FIGURE 3.1 schéma de relais sur les côtés par deux résonateurs [Wei Wang, 2014.]. [11]

À partir des résultats de simulation des anneaux résonateurs imbriqués de 0,15 m de diamètre, nous savons que la fréquence d'opération optimale est d'environ 46 MHz. Étant donné que la perte de rayonnement est principalement liée au diamètre de ces résonateurs, la

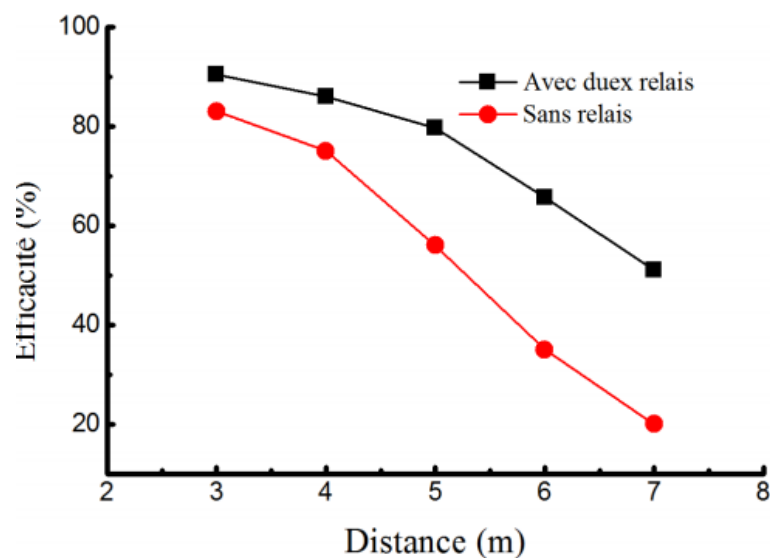
fréquence de fonctionnement optimale pour ces résonateurs à anneaux de 1,5 m de diamètre doit être d'environ 4,6 MHz. Après l'optimisation, la fréquence de fonctionnement est de 4,9 MHz tenant en considération la présence de condensateurs. Les paramètres de conception sont compilés dans le tableau 1.3 ci-dessous.

Tableau 1.3 Les paramètres de anneaux imbriqués de 0,15m de diamètre*

R 1	1500mm
R 2	1470mm
R 3	1440mm
R 4	1410mm
R 5	1380mm
R 6	1350mm
C 1	55pF
C 2	60pF
C 3	65pF
C 4	70pF
C 5	75pF
C 6	80pF

V.2 Les résultats de la simulation :

Les résultats de la simulation de l'efficacité de transmission du dispositif de relais, en fonction de la distance sont illustrés à la Graphe 2.1. Pour la comparaison, les résultats obtenus sans les relais sont aussi montrés à la figure 4.2. On constate que l'utilisation de deux résonateurs relais sur le côté améliore l'efficacité de transmission.



GRAPHE 2.1 Efficacité de transmission en fonction de la distance [Wei Wang, 2014.].

L'intensité du champ électrique et celle du champ magnétique sont montrées à la figure 3.2 et la figure 3.3 respectivement. On remarque que le champ électrique est présent dans l'espace très proche au résonateur et diminue rapidement lorsque la distance augmente. Cependant, le champ magnétique existe dans un espace beaucoup plus grand par rapport à son homologue électrique. Les deux relais fonctionnent très bien avec les résonateurs à la source et à la charge. Leur phases sont opposées l'une à l'autre, ce qui signifie que le champ électrique et le champ magnétique entre les deux relais sont améliorés et que les champs à l'extérieur des deux relais sont supprimés. Ceci améliore grandement les performances de transmission du système TESF.

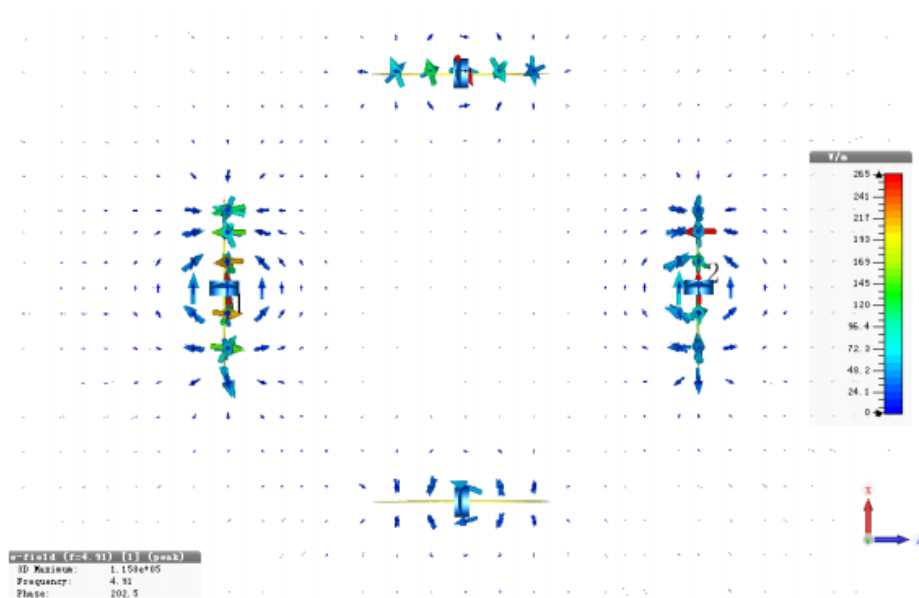


FIGURE 3.2 L'intensité du champ électrique au plan x-z (V/m) [Wei Wang, 2014.].

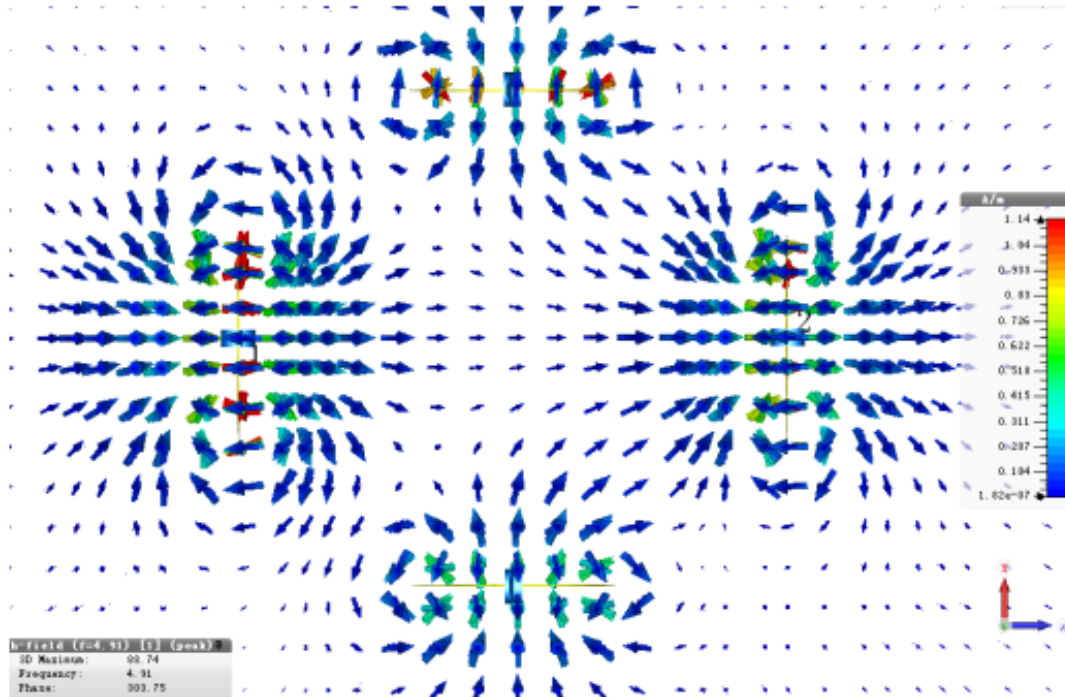


FIGURE 3.3 L'intensité du champ magnétique au plan x-z (A/m) [Wei Wang, 2014.].

La densité d'énergie du champ électrique et celle du champ magnétique au plan x-y à place E sont montrées à figure 3.4 et la figure 3.5 respectivement. Le plan x-y coupe les deux relais dans le centre et à travers les condensateurs. Selon ces figures, on remarque que l'énergie électrique est principalement stockée dans les condensateurs, et que l'énergie magnétique est stockée dans un espace beaucoup plus large que celui de son homologue électrique.

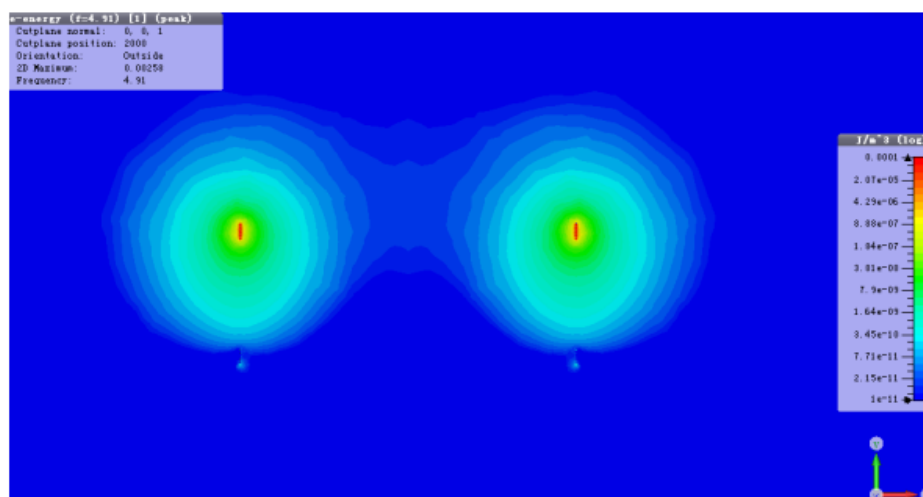


FIGURE 3.4 La densité d'énergie du champ électrique au plan x-y à place E (J/m³) [Wei Wang, 2014.].

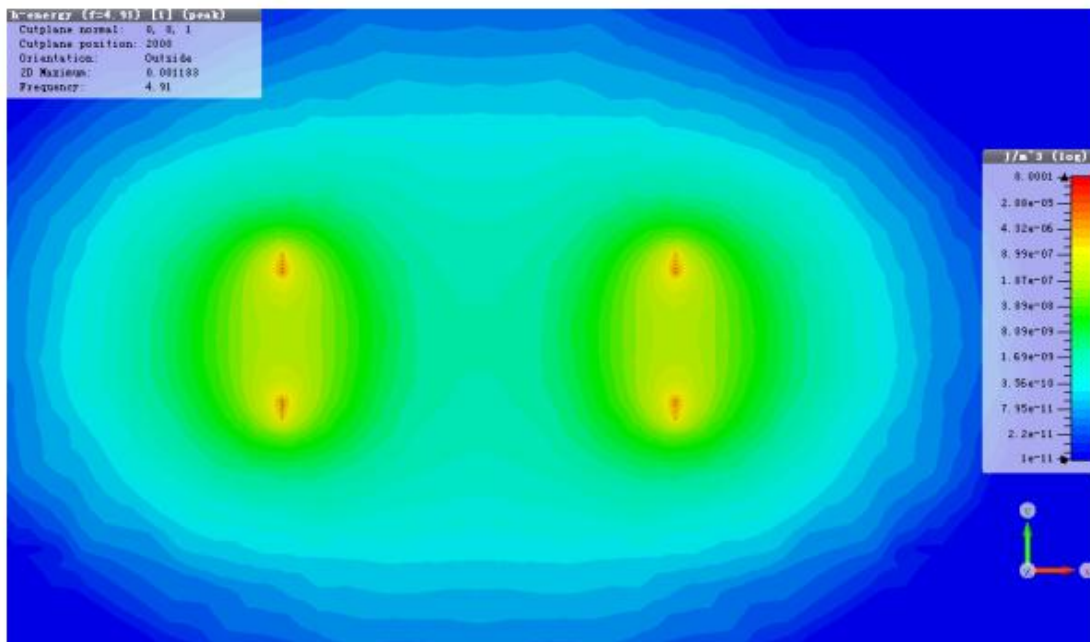


FIGURE 3.5 La densité d'énergie du champ magnétique au plan x-y à place E (J/m³). [Wei Wang, 2014.].

La densité d'énergie du champ électrique et celle du champ magnétique au plan x-y F sont montrées à la figure 3.6 et la figure 3.7 respectivement. Ce plan x-y à place F est au 3/4 de la distance de transmission à partir de la source. Selon ces figures, on remarque que l'énergie électrique est stockée dans la région beaucoup plus petite que celle de son homologue magnétique. Cela signifie que dans la transmission sans fil de puissance utilisant deux résonateurs relais que c'est toujours le champ magnétique qui est dominant.

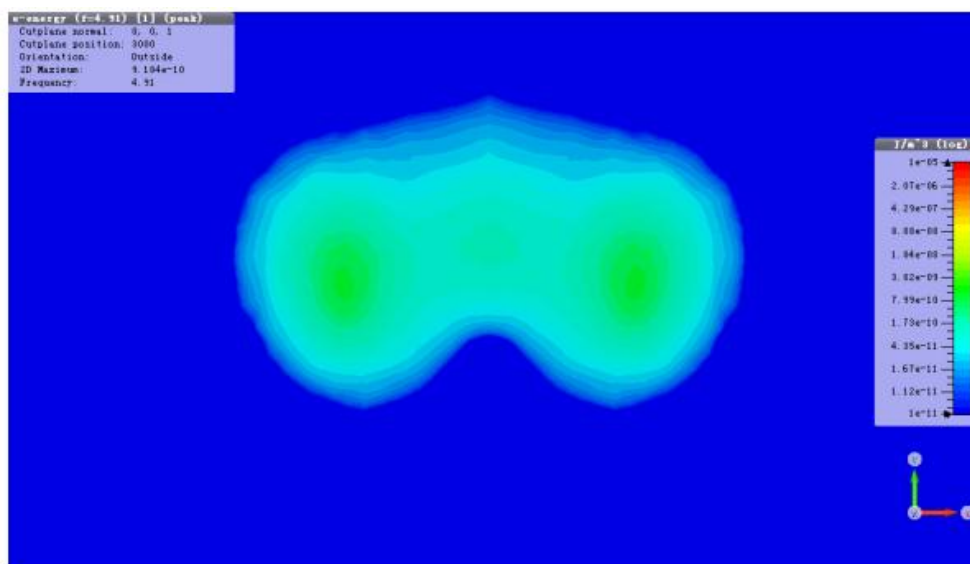


FIGURE 3.6 La densité d'énergie du champ électrique au plan x-y à place F (J/m³). [Wei Wang, 2014.].

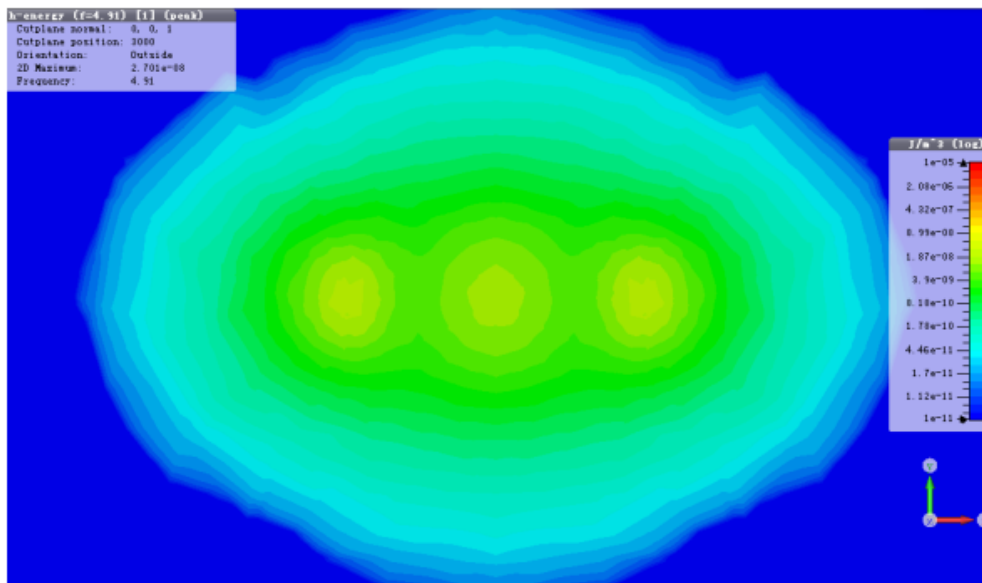


FIGURE 3.7 La densité d'énergie du champ magnétique au plan x-y à place F (J/m³). [Wei Wang, 2014.].

CHAPITRE VI APPLICATION ET SIMULATION

VI.1 Objectifs :

Le prototype que nous développons est une transmission d'énergie pour alimenter une chambre (6m x 3m x 3m) toute entière qui alimente tous les appareils électronique dans la chambre sans que l'utilisateur ne doive brancher de câbles ni des prise dans la maison. Les objectifs de ce projet sont :

- De débarrasser des fils électrique pour éviter les problèmes liés à celle-ci comme le cours circuit ...
- Alimenter des appareils en même temps (télévisions, ordinateurs, chaine wifi, radio, téléphone...).
- Améliorer la portabilité des matérielles portatif comme les téléphones portables et les ordinateurs portables car Il faut que le téléphone puisse se recharger en totalité en un temps le plus rapide possible.

VI.2 Choix de la transmission d'énergie utilisé :

Dans cette réalisation on utilise la transmission d'énergie sans fil couplage magnétique par résonance. Cette méthode est prouvée par son efficacité et par ces rendements de transfert plus élevé.

VI.3 Le but de ce montage :

Le but de ce montage est de fournir 60 W au récepteur (230 V) utilisée comme charge, c'est à dire à l'impédance.

$$Z = \frac{230^2}{60} \approx 800 \Omega$$

VI.4 Choix de résonateur :

On a utilisé des anneaux imbriqués car l'avantage c'est que la fréquence de résonance peut être réglée à la valeur optimale, quasiment sans changer l'inductance mutuelle. La distribution du courant sur chaque anneau permet d'optimiser les pertes de conduction. Un certain nombre de conducteurs est donc utilisé, ce qui permet d'obtenir un meilleur coefficient de couplage, quand comparé au résonateur à spirale

VI.5 Application : cas de transmission d'énergie sans fil entre un grand transmetteur stationnaire et un petit récepteur mobile avec l'utilisation de répéteur :

Le modèle de simulation est montré à la figure 3.8. Nous pouvons utiliser quatre résonateurs à anneaux imbriqués avec un diamètre de 1,5 m, deux en tant que source et deux en tant que relais, pour alimenter une chambre de 6m x 3m x 3m. Le récepteur est de 0,15m de diamètre.

À partir des résultats de simulation du chapitre V, il est connu que les fréquences de résonance optimales pour le résonateur de 0,15 m de diamètre et celui de 1,5 m de diamètre sont d'environ 46MHz et 4,6MHz respectivement. Sachant que, lorsque la fréquence de résonance est supérieure à la fréquence optimale les pertes de rayonnement augmentent rapidement, la fréquence de résonance commune a été fixée à 12 MHz, ce qui est proche de la fréquence de résonance optimale du résonateur de 1,5 m de diamètre. Certains des paramètres du résonateur sont présentés dans le Tableau 1.4. Les paramètres du résonateur de 1,5 m de diamètre sont répertoriés et ceux du résonateur de 0,15 m de diamètre dans le Tableau 1.4.

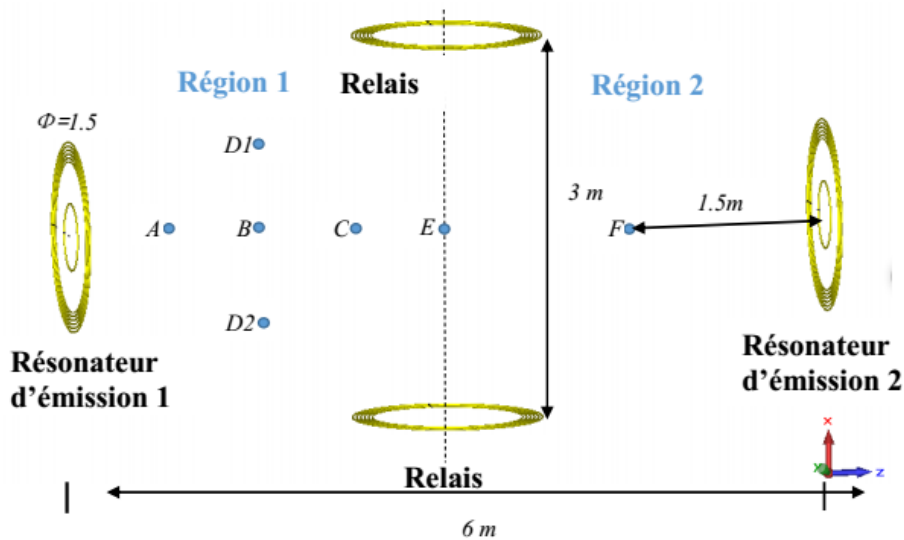


FIGURE 3.8 Le système avec deux résonateurs relais sur les côtés. [11]

Tableau 1.4 Les paramètres de résonateur à anneaux imbriqués

Diamètre du résonateur d'émission	Diamètre du fil utilisé dans le résonateur d'émission	Diamètre du résonateur de réception	Diamètre du fil utilisé dans le résonateur de réception	Fréquence de résonance commune	Quantité commun d'anneaux dans les résonateurs
1,5 m	0,015 m	0,15 m	0,0015 m	12MHz	6

Tableau 1.5 Les paramètres de anneaux imbriqués

Anneaux imbriqués de 1,5 m de diamètre	
R 0	310mm
R 1	1500mm
R 2	1470mm
R 3	1440mm
R 4	1410mm
R 5	1380mm
R 6	1350mm
C 1	8.5pF
C 2	9.0pF
C 3	10pF
C 4	10.5pF
C 5	11pF
C 6	11.5Pf

Le cas d'un récepteur à anneaux imbriqués placé dans la zone de transmission est simulé en utilisant le logiciel CST (Computer Simulation Technology), tel qu'illustré par les points A, B, C, D1, D2. Les résultats de simulation de l'efficacité de transmission sont montrés dans le tableau 1.6. La plus grande efficacité est à 0,75 m à partir de la source, alors que la plus faible efficacité est à 2,25 m de la source.

Tableau 1.6 Les résultats de simulation dans le cas d'un récepteur

	Lieux de réception			
	A	B	C	D1/D2
Efficacité	42,2%	16,4%	9,8%	11,9%
Distance de la source	0,75m	1,5m	2,25m	2,12m

Dans les applications réelles, il peut y avoir plusieurs récepteurs chargeant simultanément. Les résultats présentés dans le tableau 1.7 ci-dessous montrent le cas où deux récepteurs sont placés dans la zone de transmission. Lorsque les deux récepteurs sont placés aux points A et B, celui au point A à la plus grande efficacité, alors que celui au point B a la plus faible efficacité en raison du blocage du récepteur A.

Lorsque les deux récepteurs sont mis à D1 et à D2 symétriquement, ils ont la même efficacité. Selon les résultats de simulation, si l'émetteur transmet 50W, plusieurs petits appareils portables peuvent être chargés simultanément.

Tableau 1.7 Les résultats de simulation dans le cas de deux récepteurs

	Lieux de réception			
	Un à A, l'autre à B		Un à D1, l'autre à D2	
Rapport de puissance reçue sur la puissance transmise	L'un à A	L'un à B	L'un à D1	L'un à D2
	38.6%	6.7%	9.4%	9.4%
Efficacité Ou rendement	45.3%		18.8%	

VI.6 Conditions d'optimisation du transfert de puissance ou du rendement :

Si l'objectif du montage est la transmission de la puissance maximale $P_{\max}$ vers la charge, il est nécessaire d'assurer l'adaptation d'impédance du système. Dans ces conditions il suffit de vérifier les conditions suivantes :

- La charge doit être résistive pure ($Z=R_{charge}$) puisque l'impédance équivalente de Thévenin l'est aussi à la résonance. La connaissance de la puissance désirée $P_{\max}$ et de la tension reçue par la charge permet de calculer :

$$R_{charge} = \frac{V_2^2}{P}$$

On a :

- La résistance et l'inductance des bobinages étant fixés, il est néanmoins possible de placer un condensateur d'adaptation C_{adapt} en parallèle sur le bobinage récepteur.
- L'adaptation d'impédances sera alors assurée si

$$Z_{eq\ min} = \frac{L}{R \cdot (C + C_{adapt})} = R_{charge}$$

- La fréquence de résonance présentera alors la valeur :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C + C_{adapt})}}$$

La connaissance du produit $k \cdot V_1 = \sqrt{4 \cdot P \cdot P_{\max}}$ permettra enfin de fixer la distance maximale à partir de la tension maximale disponible ou encore de calculer quelle tension d'entrée est nécessaire au transfert de puissance à une distance donnée (la distance fixant le coefficient k).

Il est par ailleurs possible de rajouter le condensateur C_{adapt} uniquement pour abaisser Si la mise en équation du couplage de deux enroulements révèle l'utilité du phénomène de

résonance, il semble également important de formaliser quelles géométries particulières semblent propices à la transmission d'énergie à distance.

Il semble ainsi, visuellement du moins, plus intéressant d'utiliser un bobinage de rayon important de manière produire une induction mieux répartie dans son environnement. Enfin, un bobinage étroit, voire plan, permet à la décroissance du champ d'être peu dépendante de la distance à l'axe. En d'autres termes, ce type d'enroulement produit un front de décroissance de l'induction pratiquement plan, ce qui est intéressant puisque alors le bobinage récepteur n'a pas besoin d'être exactement centré avec l'émetteur.

Quantitativement, le bobinage plan semble donc être le meilleur compromis en champ lointain, ce qui conforte les remarques précédentes. Il conviendra ainsi de s'orienter plutôt vers des solutions de type « disque » éventuellement creux puisque la simulation ne fait apparaître le bénéfice des spires centrales que dans l'environnement proche du solénoïde.

VI.7 Impact de la dispersion des composants :

L'étude réalisée implique d'avoir les mêmes fréquences d'accord pour les circuits primaire et secondaires. Or, il est impossible d'atteindre cet objectif en pratique, à cause de la tolérance des composants, de leur vieillissement ou encore des variations en fonction de la température. Il subsistera nécessairement une différence entre la pulsation de résonance ω_1 du circuit primaire celle du circuit secondaire notée ω_2 .

Ce désaccord entre circuits revient à considérer que si un des circuits est accordé à une pulsation ω_0 , l'autre est accordé à une fréquence $\omega_0 + \Delta\omega$. Cet écart peut être causé par une variation de la valeur de l'inductance et/ou du condensateur résonnant, au primaire comme au secondaire. Pour simplifier les calculs, on considère que le circuit résonnant de référence est le secondaire ($\omega_2 = \omega_0$), l'écart $\Delta\omega$ étant appliqué au primaire.

SIMULATION

1. LA TRANSMISSION SANS AMELIORATION :

La réalisation de cette simulation est faite à partir du logiciel power point ; il représente l'évolution de la transmission d'énergie sans fil et les différents systèmes de fonctionnement de la TESF.

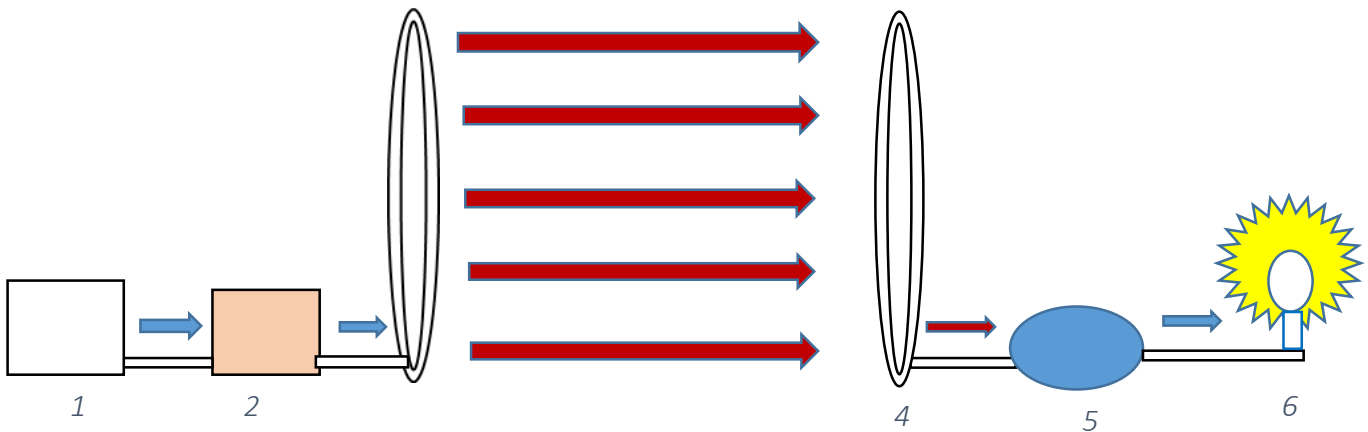


FIGURE 3.9 Simulation d'une transmission d'énergie sans fil par résonance

→ : Energie électrique

→ : Energie magnétostatique

1 : Alimentation

2 : système d'oscillation de fréquence

3 : bobine émettrice

4 : bobine réceptrice

5 : transformateur d'énergie magnétostatique en énergie électrique

6 : Appareils électriques qui sont alimenté par le système

Explication :

Le courant qui circule dans la bobine est particulier normal en relier une source d'alimentation avec une bobine on obtient juste un court-circuit. C'est là que le système d'oscillation (2) intervient, il transforme le courant continu (en volts) en un courant sinusoïdal (en fréquence) parce que seul un fil (3) traversé par un courant électrique variable produit un flux magnétique variable et ces sont ces variations de flux qui permettent de transmettre de l'énergie de la même façon une seconde bobine (4) qui reçoit ce flux peut le convertir à nouveau en électricité. C'est comme le fonctionnement du transformateur qui utilise un noyau solide qui

guide le flux magnétique de la première bobine vers la seconde qui est très important car si une partie du flux magnétique qui ne traverse pas la seconde bobine il ne pas transmis c'est qui entraine une très grosse répercutions sur le rendement.

Dans le cas de la transmission d'énergie sans fil le but de se passer de le noyau solide ; on ne peut donc pas récupérer la totalité des flux émit surtout quand la distance entre les deux bobine est importante, on transmet donc très peu d'énergie et on en consomme beaucoup. Pour résoudre ce problème on utilise la résonance, il faut savoir qu'un condensateur et une bobine reliée ensemble (5) sont capable de s'échangé de l'énergie. Un condensateur se décharge dans une bobine qui produit un champ magnétique à proximité ; une fois le condensateur déchargé, le champ magnétique qui entoure la bobine s'effondre ce qui produit à nouveau un courant électrique qui recharge le condensateur et termine la boucle.

Donc s'il n'y a pas de résonance la bobine se comporte comme une grosse résistance et refuse de laisser passer beaucoup de courant, à l'inverse quand il y a résonance une partie de l'énergie obtenue est présent dans le circuit ; on s'intéresse au moment où le condensateur est charger au maximum, quand il se vide dans la bobine sa tension élevé force un courant important a circulé dans celle-ci parce qu'en électricité plus il y a de tension plus il y a de courant qui peut circuler. Une partie est remise dans le condensateur l'autre est récupérer, au final on force donc la bobine à aspirer plus d'énergie à partir de flux magnétique que s'il n'y avait pas de résonance. Mais pour obtenir cette résonance il faut que la fréquence de résonance du circuit soit la même que la fréquence du système émettrice.

Le problème de cette méthode si on double la distance entre les deux bobine le rendement ne sont plus le même c'est-à-dire que si on éloigne la bobine réceptrice de la bobine émettrice on obtient moins en moins d'énergie.

2. TRANSMISSION AVEC AMELIOARATION :

Pour améliorer le rendement de la précédente simulation on a utilisé deux relais de soutien pour étendre la surface de transfert d'énergie par ces bobines.

Le système de fonctionnement de cette méthode de transmission est donc identique à la méthode de transmission par résonance sauf pour les deux relais qui aide à améliorer le rendement obtenue. Dans cette méthode d'amélioration on peut voir qu'on peut capter toujours d'énergie même à l'extérieur de la surface des deux résonateurs.

→ : Energie électrique

→ : Energie magnétostatique

1 : Alimentation

2 : système d'oscillation de fréquence

3 : bobine émettrice

4 : bobine réceptrice

5 : transformateur d'énergie magnétostatique en énergie électrique

6 : Appareils électriques qui sont alimenté par le système

7 : Premier relais

8 : Deuxième relais

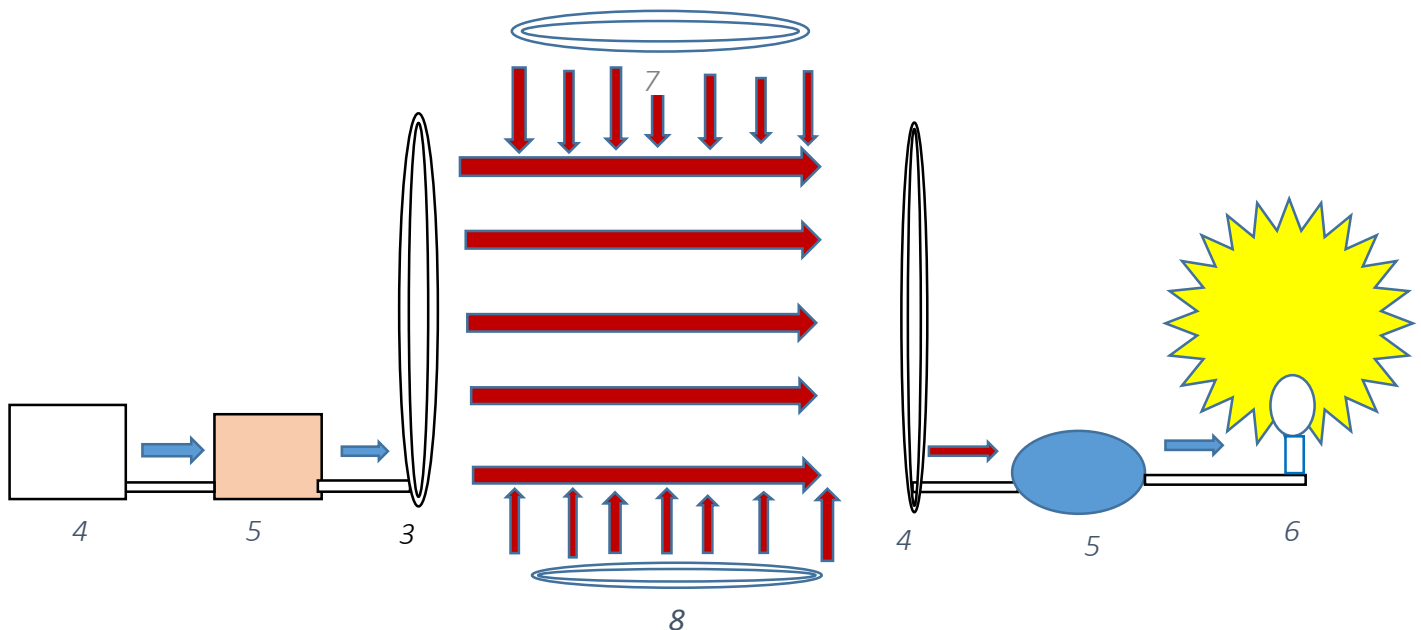


FIGURE 4 Simulation avec amélioration de la transmission d'énergie sans fil par résonance

CONCLUSION PARTIELLE :

Il a été également prouvé que si une structure résonante intermédiaire est introduite entre l'émetteur et le récepteur, l'efficacité du transfert d'énergie ainsi que la distance franchissable augmentent considérablement [Kim *et al.*, 2011]. Cette structure intermédiaire peut être placée soit suivant un alignement coaxial ou bien perpendiculaire à la direction émetteur-récepteur (Figure 3.8). La même technique peut être adaptée pour le transfert d'énergie vers des multiples récepteurs de petite taille, situés dans la zone de champ magnétique uniforme d'un émetteur de taille plus grande [Cannon *et al.*, 2009].

CONCLUSION GENERALE :

On a vu dans la première partie que les systèmes de transfert d'énergie se divisent en trois parties bien définies (transmission par couplage inductif ; transmission par couplage résonnant et le transfert radiatif) et ils ont tous des démarches. Tous ces systèmes ont leur propre avantage et leur inconvénient. En bref, la généralité du système TESF est présentée dans cette partie.

Dans la partie II, le résonateur à anneaux imbriqués a été proposé. L'efficacité de la transmission est proche de celle du résonateur hélicoïdal 3D et est beaucoup plus élevée que le résonateur à bobine planaire conventionnelle. Le système de transmission sans fil de puissance (TESF) utilisant des résonateurs de relais, est considéré comme un moyen efficace pour augmenter la distance de transmission.

Dans la partie III, les résonateurs à anneaux imbriqués sont utilisés comme relais sur le côté, et selon les résultats de simulation, il y a une amélioration apparente de l'efficacité de la transmission. La transmission de puissance entre le grand résonateur à anneaux imbriqués et le petit résonateur à anneaux imbriqués est étudiée. Les résultats vérifient la possibilité de charger simultanément sans fil plusieurs appareils portables se trouvant dans une chambre. Il est prévisible que la distance de transmission peut être augmentée si plusieurs émetteurs et relais sont utilisés dans le système du TESF. On y trouve aussi une expérience réalisable pour une transmission d'énergie dans la vie quotidienne (toutes les mesures, les formules nécessaires et les calculs numériques).

La transmission d'énergie sans fil est l'un des méthodes pour rendre les appareils indépendants de fil électrique et à être plus portatif que possible. Si tout cela concerne la TESF et l'évolution électrique alors qu'en est-il des robots humanoïdes qui sont autonomes et intelligents qui ne dépend plus des hommes ?