

Table de transfert d'énergie sans contact

Tanguy PHULPIN, Doha NAJI, Vinicius De MORAES, Wassim KABBARA

GeePs - Group of electrical engineering - Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, 3 & 11 rue Joliot Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette, France

Mots clés (en français et en anglais) : Transfert d'énergie Inductif, MIMO IPT, Etude Magnétique

Résumé/Abstract

Le transfert d'énergie inductif est une technologie en développement, tant pour les véhicules électriques que pour les applications domestiques. Ce travail de gestion d'énergie, au cœur des ondes électromagnétiques, porte sur la réalisation d'une table composée de plusieurs, par exemple 9 bobines émettrices reliées en série, dédiées à alimenter une ou plusieurs bobines réceptrices reliées à un redresseur pour y transférer suffisamment d'énergie et alimenter ainsi un appareil électronique posé sur la table. Des modélisations via le logiciel COMSOL, puis des réalisations de ces prototypes nous renseignent sur l'intérêt d'une telle structure dont les applications pourraient être diverses telles que dans une maison intelligente ou encore pour la recharge de drones.

Inductive Power Transfer (IPT) is a developing technology, both for electric vehicles and for domestic applications. The presented work concerns the realization of a universal charging table composed of several transmitting coils, for example 9, connected in series or in parallel dedicated to transferring power to one or more receiving coils connected to a rectifier whose purpose is to transfer enough energy to power an electronic device placed on the table. System's modeling is done via the COMSOL software, then the realization of these prototypes informs us about the interest of such a structure whose applications could be various such as in a smart house or for the charging of drones.

1 Introduction

Aujourd'hui, le TRansfert d'Energie Sans Contact (TRES-C) se développe fortement, sous l'impulsion des véhicules électriques notamment. Il est possible d'utiliser pour cela le transfert d'énergie sans contact capacitif ou inductif même si pour de faibles puissances, l'inductif est privilégié car présentant un meilleur rendement [1]. C'est donc sur ce dernier que nous allons nous focaliser dans cette étude dont le but est de réaliser une table de transfert d'énergie sans contact. Ce genre de travaux avait déjà été proposé, sans prendre en considération les aspects de norme électromagnétique à respecter, limitant ainsi de facto la commercialisation du système [2]. Récemment, Apple ainsi que de nombreux industriels ont proposé des chargeurs sans contacts en considérant seulement une bobine et non tout une surface.

Présentement, plusieurs bobines primaires, présentant un blindage en ferrite à leur recto [3], sont reliées en série afin de pouvoir alimenter une ou plusieurs bobines secondaires isolées. Il serait ainsi possible de poser son téléphone ou son ordinateur sur la table et de le recharger sans aucuns branchements additionnels hormis potentiellement un adaptateur composé d'une bobine secondaire et d'un redresseur. L'idée de ce dispositif est d'éviter les connexions, sources de défaillances et de gênes, et de limiter le champ magnétique rayonné en utilisant le principe de compensation des lignes de champ magnétique soit, en opposant le passage du courant dans chaque bobines primaires adjacentes. Ainsi le champ magnétique résultant est nettement atténué par rapport à une bobine seule, sauf dans le cas où un transfert d'énergie est souhaité, avec la présence d'une bobine secondaire. Auquel cas via le coefficient de couplage du dispositif, une tension est induite dans le secondaire alors que le champ magnétique rayonné aux alentours reste très faible, sous la norme fixée par l'ICNIRP [4]. Afin de valider le fonctionnement de cette table et de l'optimiser, des simulations sous le logiciel COMSOL sont réalisées puis validées expérimentalement. Des conclusions et des perspectives seront enfin proposés.

2 Modélisation de la table

Pour réaliser ces prototype, nous avons utilisé des inductances de forme ronde bien que rectangulaire fût plus judicieux pour minimiser le champ magnétique résultant et maximiser les zones de transfert d'énergie. Nous les avons simulés en série en considérant un courant sinus d'amplitude 0,3A et de fréquence 100kHz, circulant en opposition de phase entre chaque bobine adjacente, comme représenté en Figure 1.(a). Sans aucuns récepteurs au secondaire, la mesure de l'induction magnétique à 5 cm au dessus des bobines émettrices reste très faible, autour de 13,7 μ T puisque intrinsèquement compensée par les bobines adjacentes alors qu'il est pour une bobine seule de 23,3 μ T et pour un ensemble de bobine polarisé dans le même sens nettement plus important. Lorsque nous simulons une bobine réceptrice, nous observons un coefficient de couplage assez faible, qui décroît rapidement avec l'écartement, Figure 1.b. Cette valeur de coefficient de couplage semble logique d'après la théorie [5] et le

fait que l'inductance équivalente du primaire soit nettement supérieure à l'inductance du secondaire, mais cela n'est pas rédhibitoire du fait de l'importance de la valeur de la mutuelle, qui, pour une fréquence de résonance équivalente du primaire et du secondaire, maximise le transfert d'énergie [6].

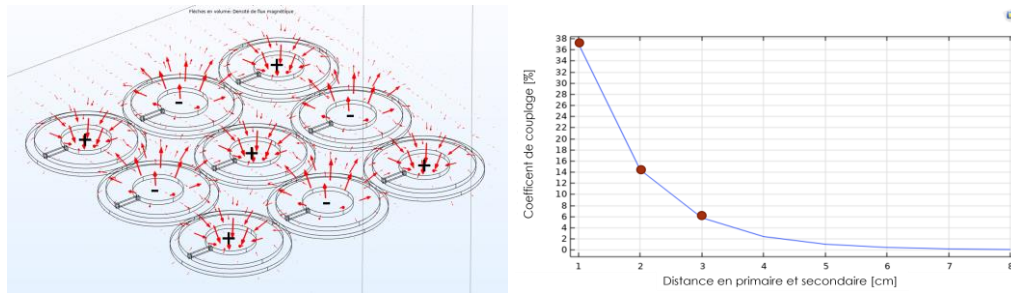


Figure 1: (a) Modélisation COMSOL de la table de transfert d'énergie avec plusieurs bobines émettrices possédant un courant opposé et un seul secondaire ; (b) Modélisation COMSOL du coefficient de couplage entre une bobine réceptrice positionnée exactement au dessus de la bobine émetrice centrale.

3 Réalisation des prototypes

Après ajout de capacités de compensation adaptés et soudure des 9 bobines émettrices, en considérant l'inversion des sens de chaque bobine, nous mesurons à l'analyseur d'impédance la fréquence de résonance correspondante de la bobine équivalente de la table lorsqu'une bobine réceptrice est présente. La valeur de la capacité est ainsi calculée pour avoir une résonance série-série autour de 100kHz. Lors du test (Figure 1.(a) et (b)), une plaque de 0,5 cm de plexiglass repose sur les inductances primaires, un signal continu de 30V-0,3A est converti par un onduleur dont nous pouvons régler la fréquence. Le maximum de courant est transféré pour une fréquence de 110kHz. Cette différence par rapport aux 100kHz théorique s'explique par l'addition d'inductance via les fils de câblage. La puissance transférée est suffisante pour allumer la charge composée d'une capacité, calculée pour compenser le déphasage lié à la bobine, et d'une lampe. Un courant de 2A est observé au secondaire pour un rendement mesuré d'environ 75% en considérant tout le système.

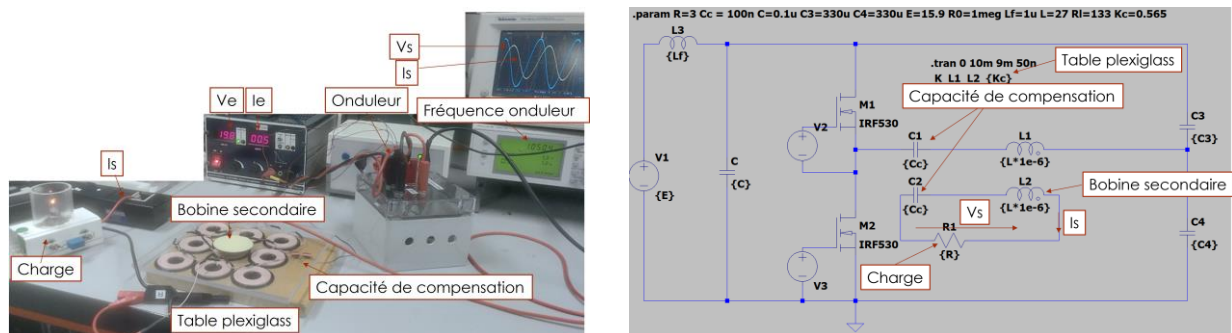


Figure 2: (a) Photographie du banc de test avec onduleur puis coupleur primaire en série et en parallèle ; (b) Simulation LTSpice de la table de transfert d'énergie sans contact

Le maximum de transfert de puissance se produit lorsque la bobine secondaire est parfaitement en face d'une bobine primaire, justifiant ainsi l'amélioration du prototype avec l'utilisation d'une géométrie carrée des bobines de la table primaire. L'étude de l'alignement des bobines n'a pas été investigué plus en détails comme dans [7] car nous avons considéré que l'induction rayonné était maximale lorsque le courant primaire était maximale, ce qui était le cas seulement lors du centrage de la bobine secondaire avec celle primaire. Les valeurs d'induction magnétique sont relevées à l'aide d'une sonde inductive et sont répertoriées dans le tableau suivant (Tableau 1).

Tableau 1 : Mesures de champ magnétique au niveau du secondaire du système, soit 0,5 cm au dessus

Caractéristiques électriques	Induction (μT)
Bobine seule	354,816
Table TRES	214,272

Les résultats parlent d'eux-mêmes quant à l'efficacité du dispositif par rapport à la réduction du champ magnétique rayonné. La norme étant de l'ordre de 6 μT , une épaisseur de plexiglas supérieure est nécessaire mais notons que

cette configuration de bobinage est indispensable pour une éventuelle commercialisation. Il est à noter également qu'avec un courant primaire supérieure, les émissions rayonnées pourraient être également supérieures, mais un compromis avec l'épaisseur de la table plexiglass doit être trouvé. De plus, l'induction mesuré sur la bobine extérieur n'est pas compensée entièrement. Une solution est alors proposée pour résoudre cette problématique avec l'ajout sur l'extérieur de la table, coté secondaire, d'une lisière composée de matériaux magnétique tels que des ferrites (*Figure 1*).

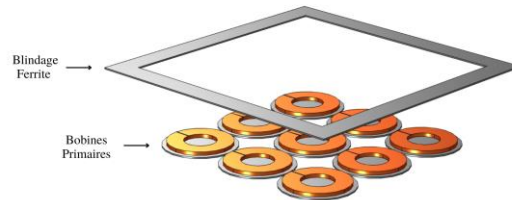


Figure 3: Proposition d'amélioration du dispositif avec bobine de forme carré et lisière de ferrite sur la table au secondaire

Des cartographies via Comsol sont réalisés afin de valider l'intérêt de la lisière magnétique. Une réduction d'un facteur deux est observée, ce qui est moins performant que la réduction liée à la compensation mais ce qui permet tout de même de réduire ce rayonnement.

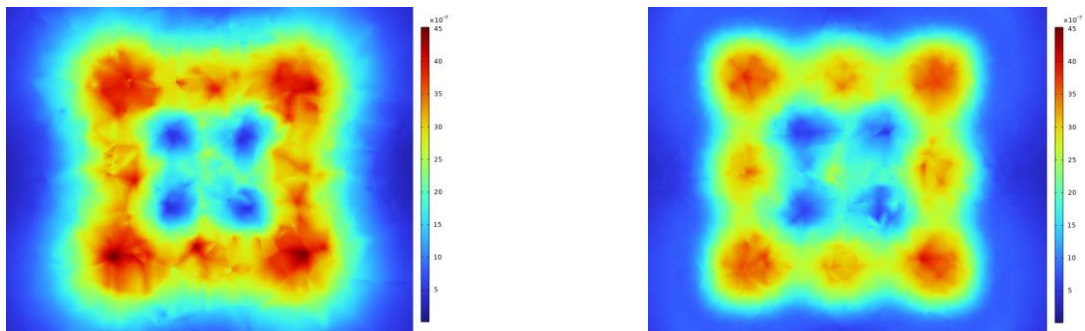


Figure 4: (a) Modélisation COMSOL de l'induction magnétique mesurée à 5cm au-dessus de la table de transfert d'énergie sans lisière ; (b) Modélisation COMSOL de l'induction magnétique mesurée à 5cm au-dessus de la table de transfert d'énergie avec lisière

4 Mesure de puissance pour plusieurs secondaires

L'idée de cette table est de pouvoir transférer de l'énergie à plusieurs secondaires pour charger plusieurs appareils en simultanée ou plusieurs secondaires pour un transfert d'une puissance plus grande. Un second prototype est alors ajouté à l'expérience (*Figure 4*). Bien que les deux bobines secondaire soient fonctionnelles, donc que les deux lampes soient allumées, la puissance reçue par la première bobine et sa charge est légèrement diminuée. Les résultats et la différence entre 1 bobine et 2 bobines secondaires sont consignés dans le tableau suivant dans lequel V_{in} est la tension en sortie de l'onduleur (*Tableau 2*). Pour leur fréquence de résonance respective, L'ajout d'une seconde charge a pour effet de diminuer le courant dans la charge 1. Un courant plus important est également fourni par l'alimentation DC passant de 900 mA à 779 mA. La seconde charge est néanmoins allumée avec un courant non négligeable de 1,53 A, quasiment égal au premier courant 1,47A. Cette différence peut-être provoqué par la non exactitude du centrage des bobines secondaires. Un fonctionnement avec plusieurs bobines identiques augmenterait linéairement la puissance fournie et donc reçu par les charges.

Les perspectives à la suite de ce travail serait de réaliser une table plus grande entièrement maillée d'inductance carrées, peut-être en faisant seulement des rangées de bobines connecté ensemble avec à chaque fois un condensateur à l'entrée afin de limiter la résistance DC de chaque rangée bobine, puis de réaliser un secondaire constitué de quatre bobines en opposition de phase, de manière à transférer suffisamment de puissance pour

alimenter par exemple un ordinateur. La taille et le choix des conducteurs limite actuellement l'échauffement admissible, et peut être optimisée pour autoriser une puissance supérieure de charge de l'appareil. Enfin, un travail sur l'optimisation de la tailles des bobines, et de leur nombre de brin, voire leur épaisseur sera pertinente de manière à augmenter la puissance transférable tout en garantissant un champ magnétique émis au niveau de la table inférieur à la norme en vigueur.

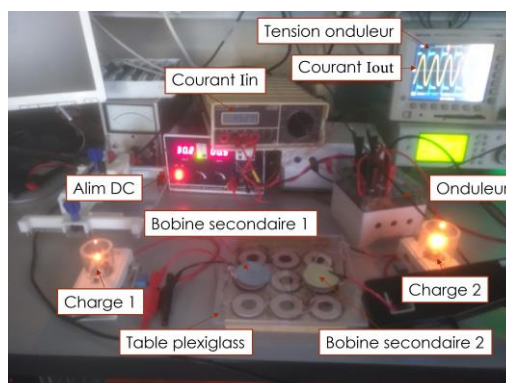


Figure 4: Photographie du banc de test avec ondulateur puis coupleur primaire avec compensation série-série et deux inductances secondaires reliées à leur charge

Caracs électriques	Lampe 1	Lamp 2	Onduleur
Centré 1 bobine $f=105,4$ kHz	$V_{out1}=3,9V$ $I_{out1}=2,12A$	X	$V_{in}=15$ V $I_{in}=0,778$ A
Centré 2 bobines $f=111kHz$	$V_{out1}=1,87$ V $I_{out1}=1,47$ A	$V_{out2}=2,27$ V $I_{out2}=1,53$ A	$V_{in}=15$ V $I_{in}=0,900$ A

Tableau 2 : Comparaison électrique du système avec un ou deux secondaires

5 Conclusions

L'idée d'une table de transfert d'énergie sans contact par induction sous les seuils réglementaires d'émission de champ magnétique est présentée dans cette étude. La preuve de fonctionnement a été apportée par simulation et expérimentalement et laisse entrevoir de nombreux critères d'optimisation pour diverses applications. La validation du prototype de table de transfert d'énergie sans contact respectant les normes permet d'imaginer des futurs innovations.

Références bibliographiques

- [1] J. Dai and D. C. Ludois, "A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6017-6029, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2415253.
- [2] C. L. W. Sonntag, E. A. Lomonova, J. L. Duarte, and A. J. A. Vandenput, "Specialized Receiver for Three-Phase Contactless Energy Transfer Desktop Applications," The 12th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-11, September 2007.
- [3] Datasheet TDK "WT505090-20K2-A10"
- [4] "ICNIRP GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz TO 100 kHz)," *Health Phys.*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, Dec. 2010, doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- [5] J. Zhang, D. Qu, Z. Wang, X. Yuan, W. Sun, et H. Liu, « A Study of Effective Coupling Coefficient and Its Application to Evaluate the WPT Pads », in *2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, Beijing, China, sept. 2019, p. 1568-1572. doi: [10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019562](https://doi.org/10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019562).
- [6] X. Dai, X. Li, et Y. Li, « Cross-coupling coefficient estimation between multi-receivers in WPT system », in *2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, Chongqing, China, mai 2017, p. 1-4. doi: [10.1109/WoW.2017.7959388](https://doi.org/10.1109/WoW.2017.7959388).
- [7] J. Li, F. Yin, L. Wang, B. Cui, et D. Yang, « Electromagnetic Induction Position Sensor Applied to Anti-Misalignment Wireless Charging for UAVs », *IEEE Sensors J.*, vol. 20, n° 1, p. 515-524, janv. 2020, doi: [10.1109/JSEN.2019.2940925](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2940925).