

Transfert d'énergie sans contact par induction dynamique multi-puissance

Tanguy PHULPIN, Wassim KABBARA, Mohamed BENSETTI

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

RESUME –

– Le transfert d'énergie sans contact dynamique est l'une des solutions envisagées pour surmonter la problématique d'autonomie des véhicules électriques. Cette technologie permettra aussi de réduire le poids, le volume des batteries et le coût des véhicules électriques. Cependant, une question importante demeure : cette approche peut-elle être uniquement réservée aux véhicules légers ou peut-elle être généralisée à d'autres types de véhicules à diverses puissances (camions, bus). Dans ce contexte, est proposé dans ce papier une topologie innovante unique de coupleur magnétique pour la recharge dynamique, conçue pour s'adapter aussi bien aux véhicules légers qu'aux véhicules lourds. Cette approche repose sur l'élimination des couplages parasites entre les bobines émettrices et réceptrices adjacentes permettant ainsi une configuration multi-entrée et multi-sortie (MIMO) sans parasites. Pour atteindre cet objectif, un prototype de coupleur à échelle réduite ($1/10^{\text{ème}}$) a été simulé puis réalisé expérimentalement pour valider la faisabilité d'un tel système. Le système à échelle réduite avec plusieurs couplages juxtaposés a permis de transférer une puissance quasiment doublée par rapport à la puissance d'un coupleur unique.

Mots-clés— *Transfert d'énergie dynamique par induction (DIPT) – coupleur – multi-puissance –multi entrées et multi sorties (MIMO)*

1. INTRODUCTION

Le transfert d'énergie dynamique sans contact par induction (DIPT), entre deux bobines, une émettrice et l'autre réceptrice, est une solution technologique en développement permettant la recharge d'un véhicule électrique en mouvement. Cette solution permettra de réduire la taille des batteries embarquées et de se passer de la connexion filaire. Cette technologie est aujourd'hui limitée à la charge d'une seule puissance de référence pour laquelle le système a été conçu, tel que dans le projet INCIT-EV [1]. Dans le cas de la charge de véhicule électrique en mouvement, une puissance de 30kW par coupleur a été définie dans [2] quel que soit la vitesse du véhicule.

Sachant lorsque la vitesse est plus faible, le temps d'interaction est plus long entre les bobines, favorisant ainsi une recharge plus efficace. Toutefois, une telle puissance peut s'avérer insuffisante pour des véhicules plus énergivores tels que les utilitaires ou les poids lourds, qui nécessiteraient des puissances de l'ordre de 60 kW à 90 kW.

. Le laboratoire GeePs a développé un dispositif DIPT 2kW qui permet la charge en continu et non impulsif du véhicule grâce à une commande faisant varier la fréquence de l'onduleur

et à une stratégie de séquençage spécifique de l'alimentation des bobines à courant constant [3]. Le véhicule en déplacement nécessite non seulement d'être alimenté mais aussi de se recharger lorsqu'il roule sur une portion adaptée, par exemple avec plusieurs bobines et donc avec une plus grande puissance. Une solution de charge multi puissance a ainsi été proposée, et permet de limiter les couplages intempestifs de bobines émettrices et réceptrices adjacentes, pouvant être préjudiciable pour la fiabilité et l'efficacité des dispositifs. En effet, des tensions induites importantes entre bobines adjacentes peuvent affecter l'intégrité des composants dans l'onduleur alimentant les bobines. C'est pourquoi cet article présente une solution innovante permettant une charge à multi entrées et multi sorties (MIMO).

La première partie de ce papier présente la problématique ainsi que la solution proposée pour la réduction du couplage indésirable entre bobines adjacentes. Elle est suivie par la description d'un prototype expérimental et d'une présentation des premiers résultats des tests avec seulement des mesures via un analyseur d'impédance pour étudier les couplages, puis des mesures expérimentales pour valider le dispositif. Enfin, des préconisations sont formulées pour évaluer la pertinence de cette solution dans le développement de cette technologie.

2. PRESENTATION DE LA SOLUTION MIMO

La configuration de bobines la plus adaptée au DIPT est celle d'une succession de bobines de forme carrée [4], mais le problème pour la charge multi-puissance est la présence de couplage parasites, entre les bobines émettrices (Tx) adjacentes et entre la bobine émettrice (Tx) et les bobines réceptrices (Rx, Rx-1, Rx+1) comme représenté schématiquement dans la Figure 1. Dans cette représentation apparaissent les différents coefficients de couplages k_{ij} , indiquant la présence de tensions induites lorsque la bobine Tx est alimentée. Ces tensions induites altéreraient l'efficacité du système en augmentant les pertes et la fiabilité des onduleurs. Une gestion optimale de la commande des onduleurs liés aux bobines émettrices est néanmoins possible pour éviter les couplages lors de l'alimentation d'une bobine seule, tels que la mise en circuit-ouvert, ou en court-circuit via un interrupteur AC 4 quadrants [5] mais ces solutions ne sont pas applicables dans le cas de plusieurs bobines réceptrices car plusieurs transferts d'énergie en parallèle sont réalisés. La littérature propose de travailler sur différentes géométries de bobines, avec par exemple le chevauchement de bobines Tx, l'utilisation de géométries polarisées ou l'utilisation de barres métalliques comme éléments de blindage [4]. Toutefois, aucune des solutions proposées, à l'exception de

l'espacement des modules Tx, ne permet d'éliminer le couplage entre le module Rx et les modules Tx voisins limitant le transfert de forte puissance. Augmenter la puissance transférée dépendra alors du courant maximal et donc de l'échauffement maximal acceptable par la bobine Tx ou à l'utilisation des solutions triphasées [6].

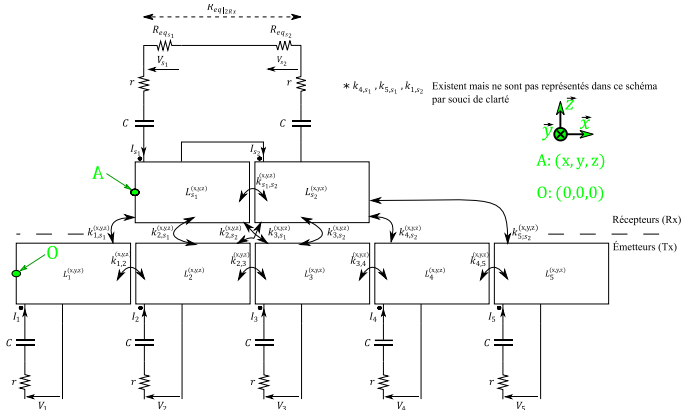


Figure 1: Couplages parasites entre bobines émettrices et réceptrices dans un système DIPT.

La solution proposée consiste à alterner des bobines émettrices (Tx) de géométries différentes afin de garantir un faible coefficient de couplage entre elles. Dans notre étude, des bobines de forme carrée et de forme double D ont été utilisées. Les bobines réceptrices (Rx) pourraient alors contenir en parallèle les deux types de topologies, carrées et double D superposées l'une sur l'autre. Comme représenté sur la Figure 2, tous les couplages non intempestifs seraient ainsi réduits afin de ne conserver qu'un couplage quasi constant pour les bobines réceptrices, facilitant de surcroît la commande des onduleurs, car ne nécessitant pas une synchronisation entre bobines émettrices et pouvant ainsi de fonctionner à des fréquences indépendantes.

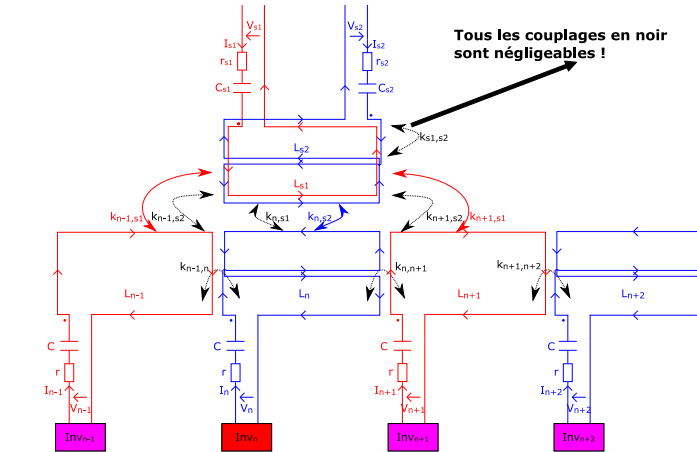


Figure 2: Proposition de la solution DIPT multi-puissance.

Les émetteurs inactifs peuvent être laissés en mode circuit ouvert sans affecter les performances globales. Avec cette configuration, plusieurs canaux magnétiques isolés peuvent transférer de l'énergie sans aucune interaction entre eux.

3. VALIDATION EXPERIMENTALE

Pour valider cette approche, un modèle électromagnétique a été réalisée sous COMSOL et validé expérimentalement. Les bobines utilisées sont à échelle réduite (1/10^{ème}) de la configuration réelle. Les dimensions de ce prototype sont données dans le Tableau 1. Les résultats de modélisation ont été

comparés expérimentalement en utilisant des bobines réalisées au laboratoire (Figure 3).

La mutuelle entre chaque bobines primaires et secondaire a été simulée avec ComsolTM et mesurée à l'aide d'un analyseur d'impédance à la fréquence de 85kHz tel que dé en se basant sur les normes [7] dans trois différentes configurations en fonction de la position de la bobine Rx par rapport à la route Tx comme représenté dans la Figure 4. Pour illustrer le déplacement de la bobine réceptrice, un banc mécanique est utilisé : en (a), la bobine secondaire est centrée sur la bobine carrée dite TxL1, en (b), cette même bobine est centrée sur la bobine double D dite TxL0, et en (c), elle se trouve entre les deux bobines. Les résultats des mesures de mutuelles sont fournis respectivement dans les Tableau 2, Tableau 3 et Tableau 4.

Une bonne concordance entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales est observée, avec une très faible erreur relative. Cette concordance entre modélisation et mesure confirme la validité du modèle utilisé et met en évidence l'efficacité de la nouvelle structure proposée, qui permet de minimiser tous les couplages indésirables. Ces couplages, exprimés en termes de mutuelles inductances ($M_{L_0L_1}$, $M_{L_0S_1}$, et $M_{L_1S_2}$), sont très faibles quelle que soit la position du module Rx. En position (a), la mutuelle entre les bobines carrées du primaire et du secondaire est significative, atteignant 1,43 μ H, tandis qu'elle est très faible avec les bobines adjacentes de type double D. En position (b), la situation est inversée : la mutuelle avec les bobines double D atteint 1,33 μ H, alors qu'elle devient négligeable avec les bobines carrées. Enfin, en position (c), un couplage partiel est observé, impliquant à la fois une moitié de la bobine double D et une moitié de la bobine carrée, ce qui se traduit par des mutuelles d'environ 0,6 μ H chacune. Ces résultats confirment que la structure proposée permet un découplage efficace et contrôlé selon la configuration spatiale des bobines.



Figure 3: Prototypes de bobines à échelle réduite (bobines Tx double D, et carrées).

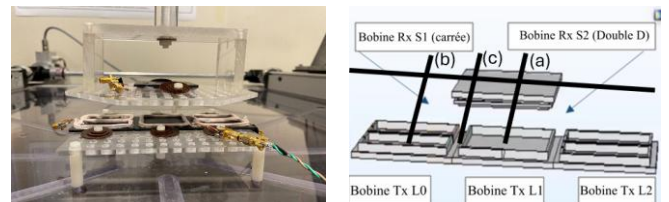


Figure 4: Prototypes réalisés de bobines à échelle réduite avec les bobines Tx double D, et carrée.

Paramètres	Valeur	Unité
Nombre de spires	6	
Nombres de couches	2 couches de 3	
Distance entre la Ferrite et du fil de Litz	0	mm
Diamètre extérieur du fil de Litz	1.2	mm
Épaisseur de la Ferrite	2	mm
Dimension de la Ferrite	53*53	mm
Épaisseur totale (bobine + ferrite)	4.6	mm
Entrefers (surface de ferrite à la surface de ferrite)	15	mm
Dimensions extérieures de la bobine double D Tx/Rx	46*46	mm
Dimensions intérieures de la bobine double D Tx/Rx	15.8*38.8	mm
Tx Dimension extérieure de la bobine carrée	46*46	mm
Tx Dimension intérieure de la bobine carrée	38.8*38.8	mm
Rx Dimension extérieure de la bobine carrée	53.2*53.2	mm
Rx Dimension intérieure de la bobine carrée	46*46	Mm
Fréquence de fonctionnement de l'onduleur	85	kHz

Tableau 1: Caractéristiques techniques des bobines réalisées.

Afin de valider la solution proposée pour un transfert multi puissance, une seconde bobine secondaire dite mixte mélangeant la bobine double D et la bobine carrée a été conçue et un transfert de puissance est réalisé.

Tableau 2 : Résultats de simulations et de mesures de la nouvelle topologie en position (a)

Position (a)	L_0 [μH]	L_1 [μH]	S_1 [μH]	S_2 [μH]	$M_{L_1S_1}$ [μH]	$M_{L_1S_2}$ [μH]	$M_{L_0L_1}$ [μH]
Mesure	7.81	5.45	5.47	7.92	1.43	$1.58e-5$	$2.49e-6$
Simulation	7.70	5.155	5.344	7.90	1.36	$\emptyset$	$\emptyset$
ϵ_{err}	1.43%	5.72%	2.36%	0.25%	5.19%	/	/
Notes :	• L'erreur relative est définie : $\epsilon_{err} = \left \frac{Y_{sim} - Y_{exp}}{Y_{exp}} \right \times 100\%$						

Tableau 3 : Résultats de simulations et de mesures de la nouvelle topologie en position (b)

Position (b)	L_0 [μH]	L_1 [μH]	S_1 [μH]	S_2 [μH]	$M_{L_0S_1}$ [μH]	$M_{L_0S_2}$ [μH]	$M_{L_0L_1}$ [μH]
Mesure	7.94	5.38	5.42	7.93	$1.01e-4$	1.33	$1.11e-5$
Simulation	7.85	5.15	5.34	7.90	$\emptyset$	1.28	$\emptyset$
ϵ_{err}	1.15%	4.47%	1.50%	0.04%	/	3.91%	/
Notes :	• L'erreur relative est définie : $\epsilon_{err} = \left \frac{Y_{sim} - Y_{exp}}{Y_{exp}} \right \times 100\%$						

Tableau 4 : Résultats de simulations et de mesures de la nouvelle topologie en position (c)

Position (c)	L_0 [μH]	L_1 [μH]	S_1 [μH]	S_2 [μH]	$M_{L_0S_1}$ [μH]	$M_{L_0S_2}$ [μH]	$M_{L_1S_1}$ [μH]	$M_{L_1S_2}$ [μH]	$M_{L_0L_1}$ [μH]
Mesure	7.89	5.49	5.45	7.91	$1.25e-4$	0.647	0.592	$1.18e-5$	$5.01e-7$
Simulation	7.74	5.135	5.31	7.89	$\emptyset$	0.635	0.588	$\emptyset$	$\emptyset$
ϵ_{err}	1.94%	6.91%	2.64%	0.38%	/	1.89%	0.68%	/	/
Notes :	• L'erreur relative est définie comme suit : $\epsilon_{err} = \left \frac{Y_{sim} - Y_{exp}}{Y_{exp}} \right \times 100\%$								

4. VALIDATION EN PUISSANCE

Pour cette partie expérimentale sur des prototypes à échelle réduite, mais dont un facteur linéaire peut être appliqué pour un passage à échelle réelle. Les bobines sont à échelle réelle espacée de 15 cm entre le sol et le véhicule mais avec une tension de l'ordre de 220V. Ici la tension appliquée est de 20V à l'entrée des onduleurs, ce qui induit des couplages très faibles donc nous négligeons l'espace entre les bobines primaires et secondaires pour mesurer un courant au secondaire.

Une première mesure est faite pour calibration en ne testant qu'une seule bobine primaire et une seule bobine secondaire, avec des résultats assez similaires, qu'elles soient carrées ou double D. Un onduleur constitué d'un demi-pont capacitif, commutant pour une ondulation fixée par un GBF externe autour de 90 kHz, est utilisé tel que représenté dans la Figure 5 et alimente un circuit LC série dont la fréquence de résonance est fixée autour des 90 kHz avec L autour de 6 μH +/- 1 μH , et une

capacité C de 100 nF. La bobine secondaire donc l'inductance est équivalente est connectée à une capacité de compensation également de 100 nF et à une résistance de puissance de 6,8 Ω fixée sur un radiateur (Figure 6). L'idée de cette calibration est d'évaluer le transfert d'énergie sans contact dans un système simple et ultérieurement de caractériser les perturbations liées à la solution proposée. Pour une tension d'alimentation de 20V et de sortie de l'onduleur autour de 14V efficace, nous obtenons un courant mesuré à l'aide d'une pince ampèremétrique dans les deux cas avec une valeur assez proche, autour de 110mA pour une bobine double D et 298mA pour une bobine carrée, comme cela peut être visualisé dans la Figure 7 et la Figure 8.

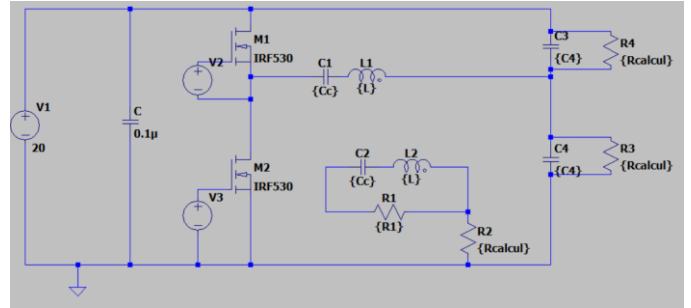


Figure 5: Schématique LTSpice du système de transfert d'énergie sans contact inductif utilisé pour valider le démonstrateur.

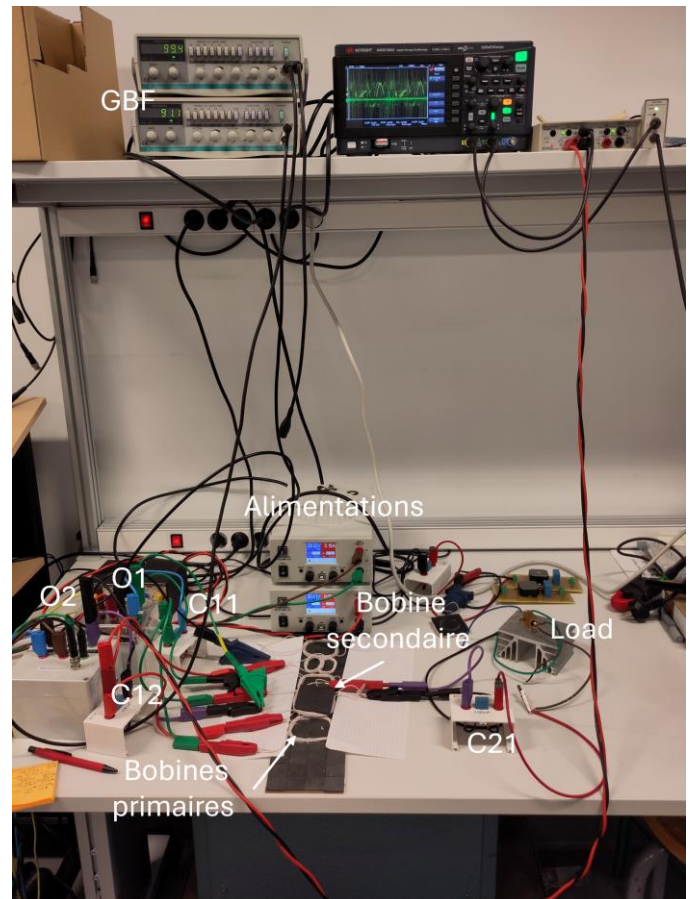


Figure 6: Observation du circuit de transfert d'énergie sans contact avec un seul secondaire sur une seule charge 6,8 Ω .

Par la suite, nous avons testé la charge d'une seule bobine secondaire selon différentes positions tel qu'étudié précédemment avec les résultats en (a), (b) et (c). Comme observé sur la Figure 6, nous avons construit une piste avec les bobines précédemment décrites sur des plaques de ferrites en alternant double D et carré. Dans cette partie, deux onduleurs

similaires à celui utilisé précédemment sont utilisés et commandés par deux GBF distincts avec des signaux proches de la fréquence de résonance de chacun des onduleurs (93,7kHz et 84,6kHz) mais différentes pour observer la compatibilité d'une commande différente. Ces onduleurs, dits O1 et O2, sont reliés également via les capacités en série de 100 nF, respectivement aux différentes bobines carrées et aux bobines double D. Seule une bobine secondaire est posée sur la bobine primaire afin de faciliter les mesures. La tension et le courant de la bobine primaire carrée sont relevés en Figure 9 correspondant à la configuration (a) afin de déterminer la puissance débitée par les alimentations stabilisées. Sans secondaires, nous mesurons à la sortie de O1 et O2, une tension efficace de 13,2V et sur la charge un courant de 242mA sur la bobine carrée et pendant que 4mA est délivré à O2 pour la bobine double D, ce qui signifie l'absence d'un couplage parasite entre bobines primaires. Nous avons malgré cela la mise en parallèle de circuits résistifs ce qui consomme dans notre cas d'application un léger courant et des perturbations liées aux commutations supplémentaires. Dans la configuration (c), le courant sur la charge est autour de 152 mA (Figure 10) avec une contribution de O1 (90 mA) et de O2 (62 mA) alors que dans la configuration (b), le courant sur la charge est de 111,3 mA alors qu'il est de 5 mA à l'entrée de O1 (Figure 11). Les mesures réalisées correspondent au fonctionnement théorique et simulé précédemment. En comparaison avec la Figure 7, il est possible de remarquer que le couplage entre bobines primaires est faible et ne génère aucune perturbation sur les bobines adjacentes.

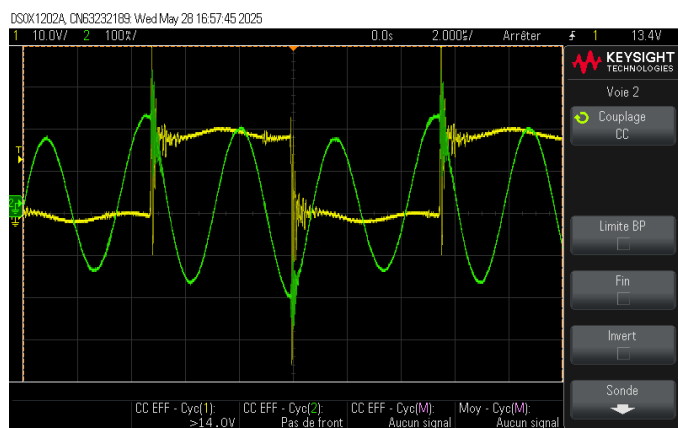


Figure 7: Tension et courant pour un coupleur seul constitué d'une bobine primaire double D et d'une bobine secondaire mixte.

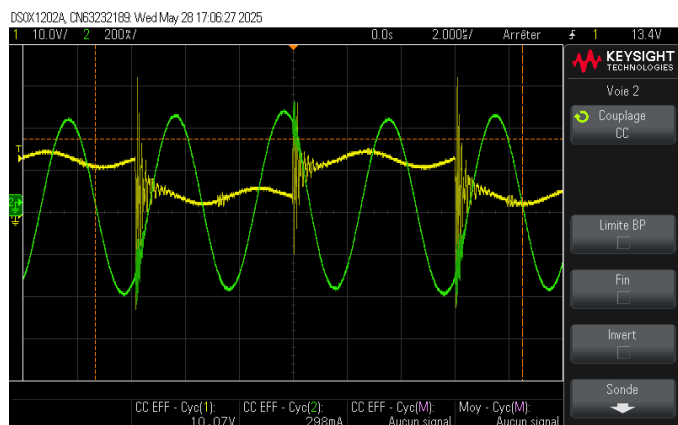


Figure 8: Tension et courant pour un coupleur seul constitué d'une bobine primaire carrée et d'une bobine secondaire mixte.

La légère variation de courant liée à O2 peut s'expliquer par la fabrication artisanale des bobines à échelle réduite et le fait que

le bobinage O1 a un meilleur couplage initial. De plus, les faibles courants dans les bobinages primaires sans secondaires s'expliquent là aussi par une fabrication artisanale, avec des formes de bobines légèrement circulaires et non parfaitement rectangulaires.

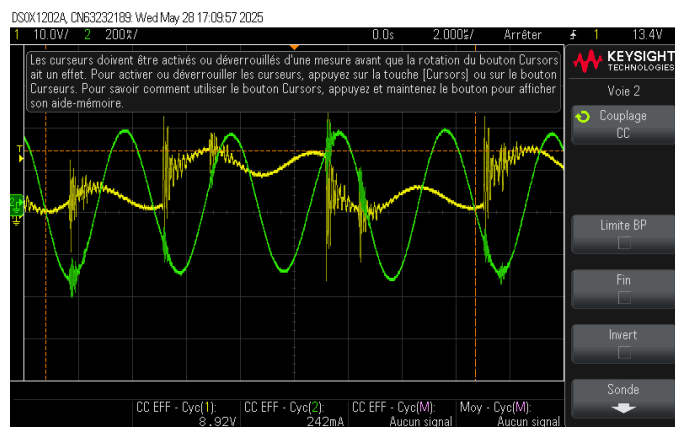


Figure 9: Tension et courant pour une bobine mixte en position (a), sur route inductive mixte

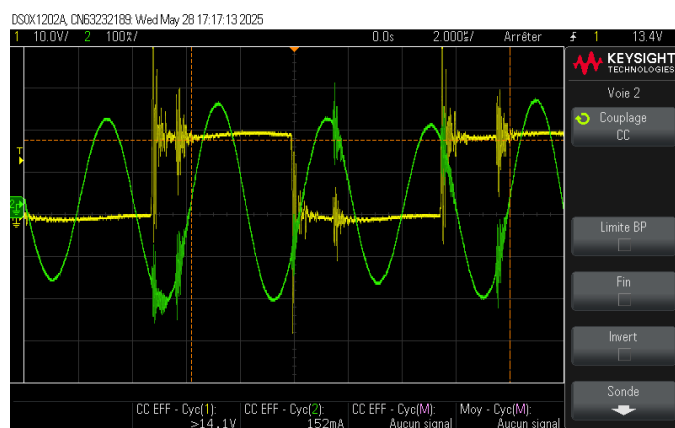


Figure 10: Tension et courant pour une bobine mixte en position (c), sur route inductive mixte

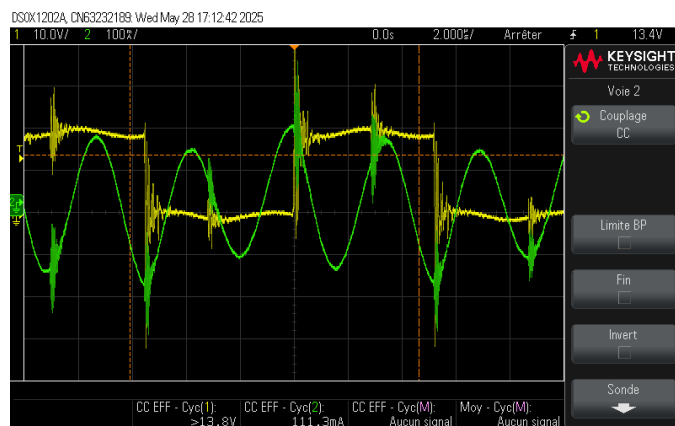


Figure 11: Tension et courant pour une bobine mixte en position (b), sur route inductive mixte

Afin d'aller plus loin, une seconde bobine secondaire est conçue, alliant double D et carré. Cette bobine est positionnée juste à la suite de la première bobine secondaire, et est connectée elle aussi à une capacité de compensation. Leur fonctionnement est validé en simultanée comme indique la valeur de courant délivré dans les deux bobines secondaires à la Figure 12. Ces deux sorties sinusoïdales ne peuvent pas être connectées ensemble, même si la fréquence de commutation des onduleurs était égale car une

différence temporelle entre les valeurs de tension risquerait de créer une différence de potentielle fatale à l'électronique. C'est pourquoi deux redresseurs, suivi de capacité de découplage sont ajoutés en série avant d'atteindre une charge commune de $6,8\Omega$. Lorsque les bobines secondaires sont positionnées parfaitement au-dessus des bobines primaires, le courant débité sur les alimentations DC à l'entrée de O1 est de 160mA et pour O2 est de 200mA alors qu'ils étaient respectivement autour de 5mA sans la présence des bobines secondaires. Le courant à la sortie du redresseur est passé in fine de 26,2 mA à 39,3 mA avec les 2 bobines et environ 2, 2V comme observé dans les Figures 13 et 14.

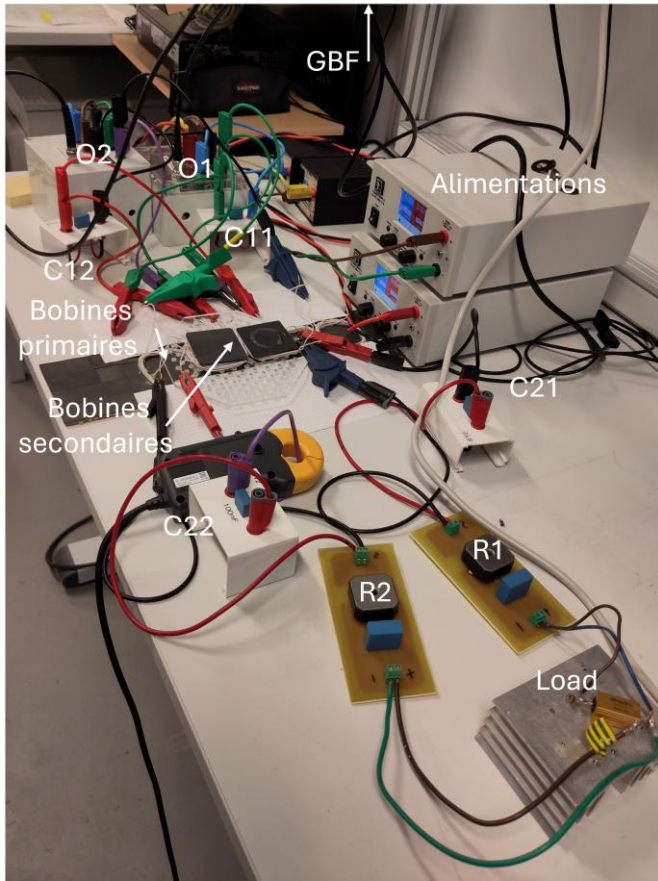


Figure 12: Circuit de transfert d'énergie sans contact avec le secondaire avec deux bobines distinctes, deux capacités (C21 et C12) et deux redresseurs (R1 et R2) associés sur une seule charge (Load).

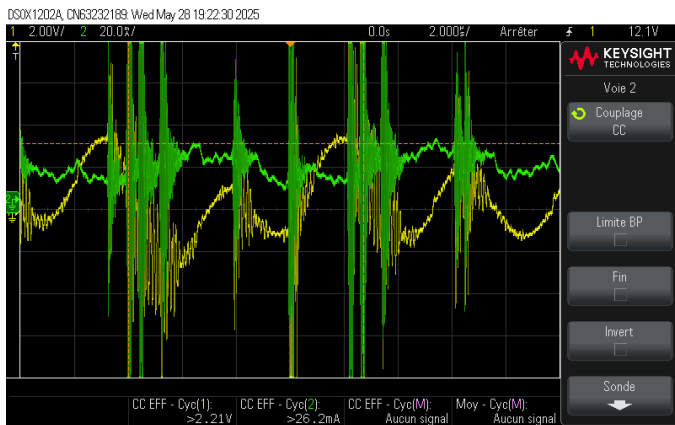


Figure 13: Tension et du courant au niveau du redresseur pour une seule et deux bobines mixtes au secondaire de la route inductive mixte.

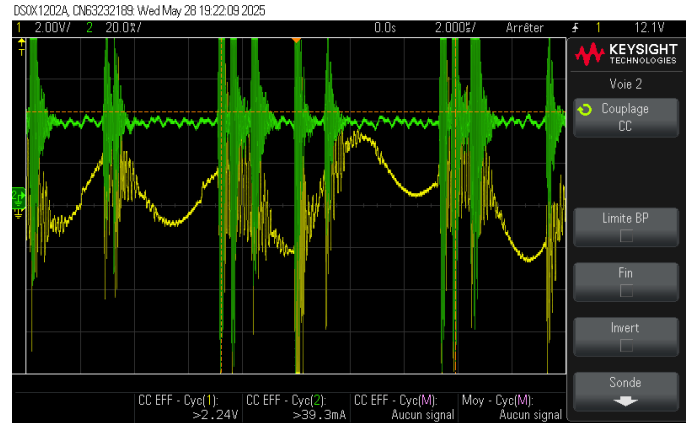


Figure 14: Tension et du courant au niveau du redresseur pour une seule et deux bobines mixtes au secondaire de la route inductive mixte.

Pour une même tension, nous avons réussi à largement augmenter le courant de charge en ajoutant une seconde bobine. L'ajout de cette bobine ne perturbe pas le fonctionnement de la première bobine et peut fonctionner à des fréquences différentes, optimisées par rapport à leur valeur de résonance respective. Bien que les puissances soient assez faibles et le rendement non optimisé, ces travaux seront réalisés dans de prochaines études.

5. CONCLUSIONS

Cet article présente une solution innovante pour la recharge sans contact multi-puissance des véhicules en mouvement sur une route inductive. Les premiers résultats, issus de simulations et d'expérimentations sur des prototypes à échelle réduite, se révèlent très prometteurs. Ils ouvrent la voie à une éventuelle mise en œuvre de cette solution bien que des mesures de rendement soit encore à réaliser dans les perspectives pour des puissances à échelle réelle.

6. REFERENCES

- [1] Z. Obeid *et al*, "Design and analysis for dynamic wireless charging infrastructure in INCIT-EV H2020 project," presented at the CIRED 2022 workshop on E-mobility and power distribution systems, Jun. 2022. doi : 10.1049/icp.2022.0713.
- [2] A. Caillierez, D. Sadamac, A. Jaafari, et S. Loudot, "Dynamic inductive charging for electric vehicle : modelling and experimental results," p. 1.7.01-1.7.01, Jan. 2014, doi : 10.1049/cp.2014.0423.
- [3] W. Kabbara, M. Bensetti, T. Phulpin, A. Caillierez, S. Loudot et D. Sadamac, "A Control Strategy to Avoid Drop and Inrush Currents during Transient Phases in a Multi-Transmitters DIPT System," *Energies*, vol. 15, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2022, doi : [10.3390/en15082911](https://doi.org/10.3390/en15082911).
- [4] K. Kadem, M. Bensetti, Y. Le Bihan, E. Labouré, et M. Debbou, "Optimal Coupler Topology for Dynamic Wireless Power Transfer for Electric Vehicle," *Energies*, vol. 14, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2021, doi : 10.3390/en14133983.
- [5] W. Kabbara, T. Phulpin, M. Bensetti, A. Caillierez, S. Loudot, et D. Sadamac, "Proposition and Comparison of Several Solutions for High Induced Voltage across Inactive Transmitting coils in a Series-Series Compensation DIPT System," in 2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe), Sep. 2022, pp. 1-10.
- [6] M. Aganti, B. Chokkalingam, S. Padmanaban, S. S. Williamson, "A three-phase coil coupling wireless power transfer pad for electric vehicles battery charging systems", *Results in Engineering*, Volume 25, 2025, 103856, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103856>.
- [7] T. Phulpin, M. Bensetti, W. Kabbara. "A Review of Standard in Inductive Power Transfer", *Research Article. Journal of Electrical Electronics Engineering*, 2024, 3 (1), pp.9. 10.33140/JEEE.03.01.09. hal-0466374