

Modélisation d'un Système TESC pour Drones

Mohammed TERRAH ^{1,2,3}, Mostafa-Kamel SMAIL ^{1,2,3}, Lionel PICHON ^{1,2}, Mohamed BENSETTI ^{1,2}

¹ Lab. de Génie Electrique et Electronique de Paris (GeePs), CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 91192 Gif-sur-Yvette, France.

² Sorbonne Université, CNRS, Lab. de Génie Electrique et Electronique de Paris, 75252 Paris, France.

³ Institut Polytechnique des Sciences Avancées Paris - IPSA, 94200 Ivry-sur-Seine, France.

RESUME – Les systèmes de Transfert d'Énergie Sans Contact (TESC) connaissent une utilisation croissante ces dernières années dans divers domaines, notamment pour les drones où ils offrent des solutions pratiques pour le rechargement autonome. Cet article présente une méthodologie complète de modélisation d'un système TESC adapté aux drones, intégrant des contraintes d'encombrement et de performance. L'approche repose sur la combinaison de deux modèles : un modèle magnétique, développé à l'aide de la Méthode des Éléments Finis (MEF), et un modèle électrique basé sur les lois de Kirchhoff. Une validation expérimentale est également menée, confirmant la cohérence entre les résultats numériques et les mesures réelles, et soulignant la fiabilité du modèle développé pour des études avancées d'optimisation ou de compatibilité électromagnétique.

Mots-clés – Système TESC, Coupleur magnétique, Inductances, MEF, Désaxement.

1. INTRODUCTION

Dans les dernières années, l'application des systèmes TESC est devenue très répandue, notamment dans les véhicules électriques, l'électronique domestique (téléphones, montres, PC, manettes de jeu, etc.) et, plus particulièrement, les drones [1] – [4]. Pour les drones, cette technologie permet d'étendre la portée effective de leur mission et d'offrir un processus de recharge autonome, contrairement aux méthodes traditionnelles qui nécessitent un retour à la base et une intervention humaine, ce qui réduit l'efficacité des opérations.

Dans cet article, nous présentons la modélisation d'un système TESC appliqué aux drones. L'objectif est de développer un modèle capable de reproduire le comportement magnétique et électrique d'un système TESC en présence du drone étudié, afin d'optimiser ses performances. Le coupleur responsable du TESC repose généralement sur deux bobines pour le transfert d'énergie. Afin d'optimiser le couplage magnétique tout en protégeant l'électronique embarquée, une plaque ferrite a été intégrée dans le système.

Le drone étudié est un DJI F450, un modèle peu coûteux et facilement personnalisable, adapté à de multiples applications. Le système TESC a été développé et adapté à ce drone dans le but de maximiser la tolérance aux désalignements capable de survenir lors d'un atterrissage imprécis. Toutefois, ce drone possède une base équipée d'un circuit imprimé assurant la distribution du courant de la batterie vers ses moteurs. Lors de l'ajout du système TESC, ce circuit imprimé agit comme blindage, protégeant ainsi l'électronique embarquée. D'autre part, il réduit le couplage magnétique, entraînant ainsi une dégradation du rendement du système TESC, d'où l'ajout d'une plaque de ferrite sous la base pour améliorer le rendement énergétique du système.

Dans [5], une étude similaire a été réalisée sur un drone de même gamme, le DJI F550. Toutefois, cette étude considérait l'ensemble de la base comme un circuit imprimé, ce qui ne reflète pas précisément le cas réel. De plus, en raison de la distance relativement importante entre les deux bobines, l'effet du circuit imprimé s'apparente à celui d'un blindage complet.

Dans ce travail nous proposerons un modèle TESC capable de reproduire le comportement réel du système en fonction du désalignement en présence du drone. Le modèle s'articule autour de deux axes principaux : Une modélisation par MEF pour déterminer les paramètres du coupleur, et la simulation du circuit électrique équivalent pour évaluer les grandeurs électriques ainsi que le rendement du système. Les résultats obtenus sont validés expérimentalement via une étude du modèle magnétique et du rendement énergétique du système. L'objectif final de ce modèle est d'optimiser le système TESC afin d'améliorer son rendement tout en minimisant la masse additionnelle (plaque de ferrite+ bobine secondaire).

2. DESCRIPTION DU SYSTÈME TESC

Un système TESC a été spécialement conçu pour le drone DJI F450. La configuration et les dimensions clés du système sont présentées dans la figure 1 et résumées dans le tableau 1. La bobine émettrice est désignée par T_x et la bobine réceptrice par R_x .

La bobine émettrice est fixée dans une station de charge au sol, tandis que la réceptrice est fixée sur la base inférieure du drone. Les deux bobines sont de forme circulaire plane pour minimiser l'encombrement sous le drone, réduisant ainsi les perturbations aérodynamiques. La structure circulaire assure des performances constantes face aux désalignements latéraux (en x, y) ainsi qu'au désalignement angulaire (Fig. 2). Ce choix de conception standard favorise également une meilleure compatibilité avec d'autres modèles de drones de géométrie similaires.

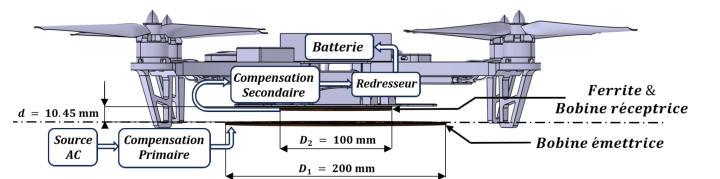


FIG. 1. Vue globale du système WPT embarqué.

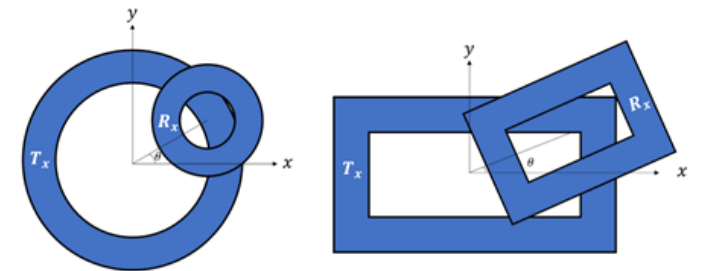


FIG. 2. Exemple d'un désaxement latéral et angulaire pour une configuration de bobine circulaire et rectangulaire.

Par ailleurs, les caractéristiques de la batterie du drone sont également mentionnées, puisqu'elles constituent la base pour définir les besoins en puissance à assurer par le système de recharge.

TABLEAU 1. Caractéristiques du coupleur.

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Nombre de spires de T_x	N_1	6	—
Nombre de spires de R_x	N_2	6	—
Diamètre externe de T_x	D_1	100	mm
Diamètre externe de R_x	D_2	50	mm
Distance entre les bobines	d	10.45	mm
Côté de la plaque de ferrite	l_f	100	mm
Marge de désaxement	d_x	[-100 100]	mm
Puissance de la batterie	P_L	63	W
Tension de la batterie	V_{bat}	12.6	V
Capacité de la batterie	C	5	Ah

3. MODÈLE MAGNÉTIQUE DU COUPLEUR

La première étape de l'approche de modélisation proposée consiste à utiliser la MEF (Fig. 3) pour caractériser le couplage inductif. L'objectif est de déterminer les inductances propres L_1 et L_2 , ainsi que les résistances R_1 et R_2 des bobines, et l'inductance mutuelle M en fonction du désalignement d_x à une fréquence de 150 kHz. Les bobines, conçues avec du fil de Litz, présentent une faible résistance en courant alternatif, qui reste proche de leur résistance en courant continu.

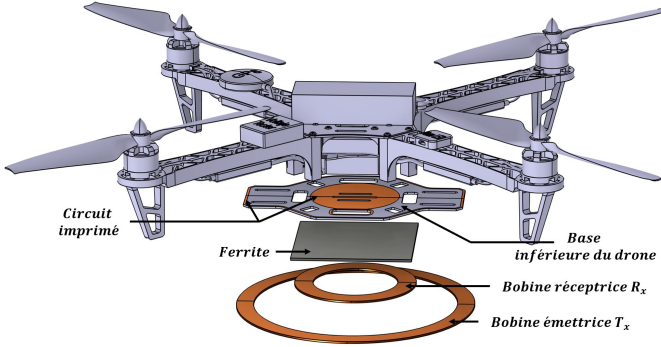
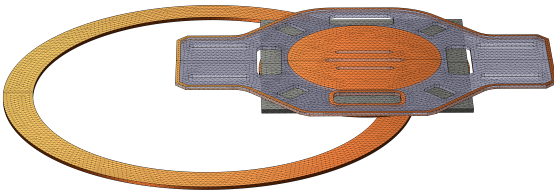


FIG. 3. Esquisse détaillée du coupleur

Dans le modèle MEF 3D, seule la base inférieure est prise en compte, car elle contient un circuit imprimé noté PCB (pour Printed Circuit Board) (Fig. 4). Les autres parties du drone n'ont pas été prises en compte dans le modèle 3D afin de réduire la complexité. Ces éléments, constitués de matériaux non conducteurs, n'ont pas d'impact significatif sur le comportement du champ magnétique.

FIG. 4. Modèle MEF du coupleur ($d_x = 75$ mm)

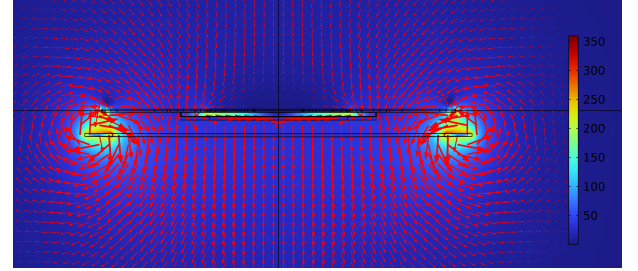
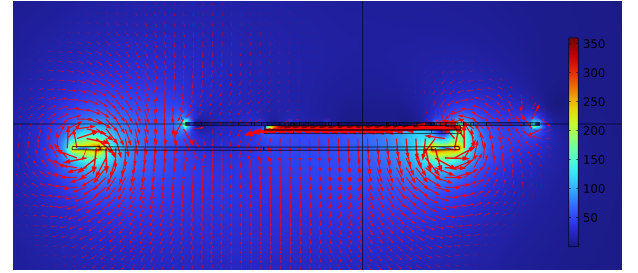
La figure 5 illustre la distribution des lignes de champ magnétique générées par le système WPT, lorsque la bobine émettrice est alimentée par un courant sinusoïdal de 1 A, tandis que la bobine réceptrice est laissée en circuit ouvert. Deux configurations sont représentées : un alignement parfait entre les bobines ($d_x = 0$ mm), et un désalignement de $d_x = 50$ mm.

La présence du PCB sur la base du drone influence significativement la distribution du champ magnétique. En effet, en raison des courants de Foucault induits dans les plans conducteurs du PCB, un champ magnétique est induit. Conformément à la loi de Lenz, ce champ s'oppose localement au champ primaire émis par la bobine, agissant ainsi comme un écran par-

tiel. Ce phénomène perturbe la trajectoire naturelle des lignes de champ, provoquant leur déviation ce qui diminue la densité de flux magnétique reçue la bobine réceptrice,

Dans ce contexte, la plaque de ferrite joue un rôle essentiel en canalisant les lignes de champ autour de la bobine réceptrice. Grâce à sa forte perméabilité magnétique, elle réduit l'effet négatif du PCB et améliore le couplage entre les bobines.

À 50 mm de désaxement (Fig. 5b), un champ plus important est observé au niveau de la plaque de ferrite. Ceci s'explique par la position de la plaque qui se retrouve superposée au conducteur de la bobine émettrice, où le champ est naturellement plus concentré, indiquant un couplage localement renforcé, supérieur à celui observé en alignement parfait.

a) $d_x = 0$ mmb) $d_x = 50$ mmFIG. 5. Distribution des lignes de champ magnétique B (μT) sur le plan "xz".

4. MODÈLE ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT

La deuxième étape de la conception du modèle TESC consiste à simuler le comportement électrique du système TESC en fonction du désalignement. Le circuit électrique équivalent utilisé est basé sur une topologie de compensation série-série (SS) (Fig. 6). Cette topologie a été choisie car elle offre une meilleure tolérance au désalignement ainsi qu'une efficacité stable [1].

La résistance de charge R_L est calculée, au premier harmonique [6], selon 1 à partir des caractéristiques de la batterie notées dans le tableau 1.

$$R_L = \frac{8 \cdot V_{bat}^2}{\pi^2 \cdot P_L} \quad (1)$$

Une fois les grandeurs électriques (L_1 , R_1 , L_2 , R_2 , M) déterminées en fonction du désalignement par le modèle MEF, les condensateurs (C_1 , C_2) sont calculés à l'aide de l'équation (2).

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1} \quad , \quad C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (2)$$

Le modèle électrique analytique (3) est obtenu en appliquant les lois de Kirchhoff au modèle électrique (Fig. 6).

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \left[R_1 + j(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}) \right] \bar{i}_S - j\omega M \bar{i}_L \\ 0 = \left[R_L + R_2 + j(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega}) \right] \bar{i}_L - j\omega M \bar{i}_S \end{cases} \quad (3)$$

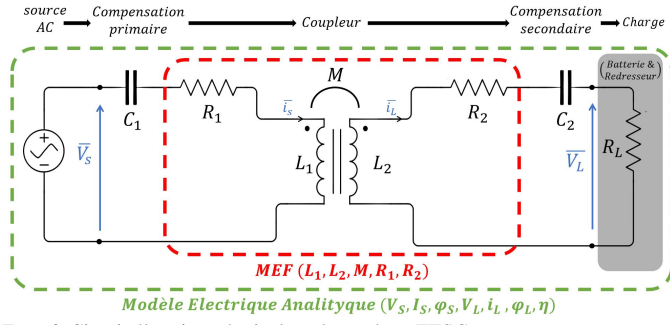


FIG. 6. Circuit électrique équivalent du système TESC

Le rendement énergétique du système η est calculé à l'aide de l'équation (4) en utilisant le circuit électrique équivalent. Il est ensuite évalué en fonction du désalignement, où φ_S et φ_L représentent les déphasages entre les courants et les tensions de la source et de la charge, respectivement.

$$\eta = \frac{V_L I_L \cos(\varphi_L)}{V_S I_S \cos(\varphi_S)} \quad (4)$$

5. VALIDATION DU MODÈLE

5.1. Validation des paramètres du coupleur

Les inductances caractérisant le système ont été mesurées à l'aide d'un RLC mètre, et la comparaison avec les résultats simulés est illustrée dans la figure 7. Le protocole expérimental utilisé pour cette validation est détaillé dans [7].

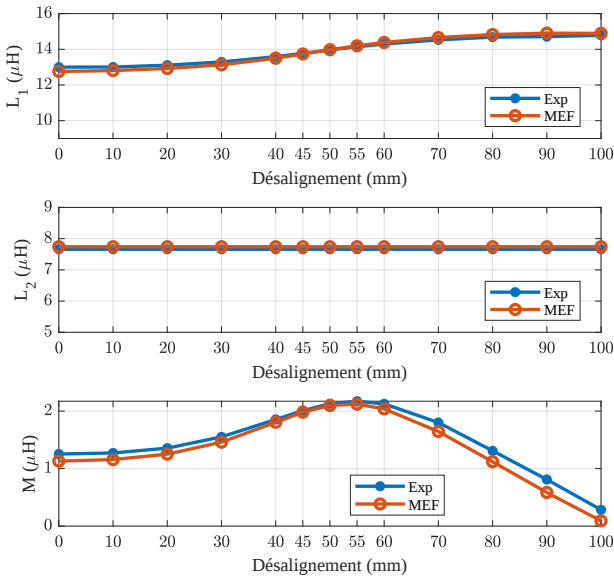


FIG. 7. Inductances du coupleur en fonction du désaxement

La figure 7 illustre la variation des inductances principales du système en fonction du désalignement. Les résultats obtenus par MEF et les mesures expérimentales présentent des tendances quasi identiques, avec un écart inférieure à 10 %.

L'inductance primaire L_1 présente une légère augmentation en fonction du désalignement, en raison de la proximité de la plaque de ferrite au-dessus de la bobine réceptrice. L'inductance secondaire L_2 , contrairement à L_1 , est constante en fonction du désalignement. Quant à l'inductance mutuelle, on observe un couplage plus fort entre les bobines lorsqu'elles sont désalignées. Ce phénomène peut s'expliquer par la différence de taille entre les bobines.

5.2. Validation du rendement énergétique

Le banc d'essai utilisé pour évaluer le rendement énergétique du système WPT et valider le modèle de simulation est présenté dans la figure 9, la chaîne de branchement détaillée est illustrée dans la figure 10. Le montage est composé d'une source DC et d'un onduleur demi-pont afin de fournir la source AC. L'onduleur est commandé par une tension carré de 150 kHz généré par un GBF. L'ensemble est suivi d'un bloc de compensation primaire C_1 connecté au coupleur, d'un bloc de compensation secondaire C_2 et d'une charge résistive équivalente R_L . Un oscilloscope est utilisé pour visualiser les courants et les tensions au niveaux de la source et de la charge. Afin de permettre l'étude de désaxement, la bobine réceptrice est montée sur un bras mécanique motorisé, ce dernier permet l'ajustement précis de la position de la bobine.

La Figure 8 montre la validation expérimentale du rendement du système. Les résultats montrent un rendement compris entre 70 et 80 % pour un désalignement entre 0 mm et 75 mm, ce qui indique un fort couplage entre les deux bobines. Au-delà de 75 mm, une diminution progressive de l'efficacité est observée jusqu'à 100 mm, ce qui s'explique par le faible couplage entre les bobines, comme le montre la courbe d'inductance mutuelle (Fig. 7).

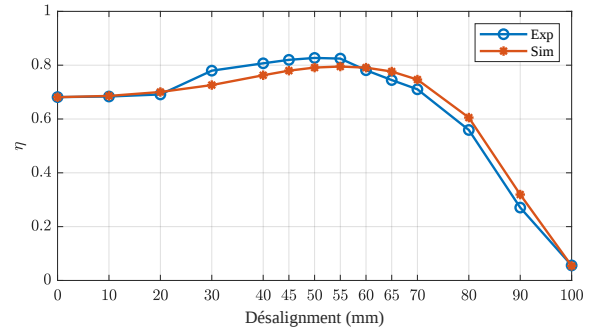


FIG. 8. Rendement énergétique en fonction du désaxement.

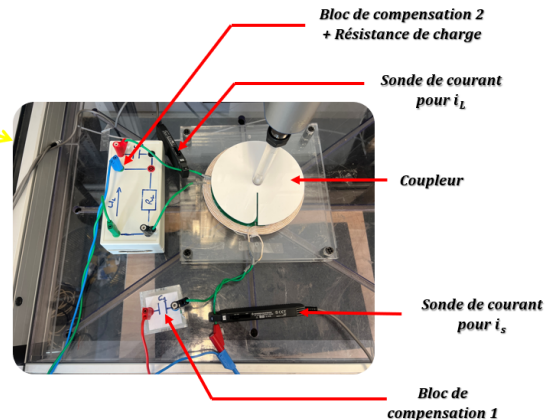
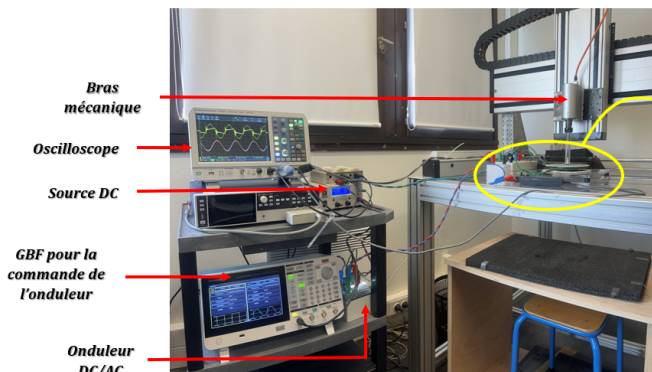


FIG. 9. Banc d'essai expérimental.

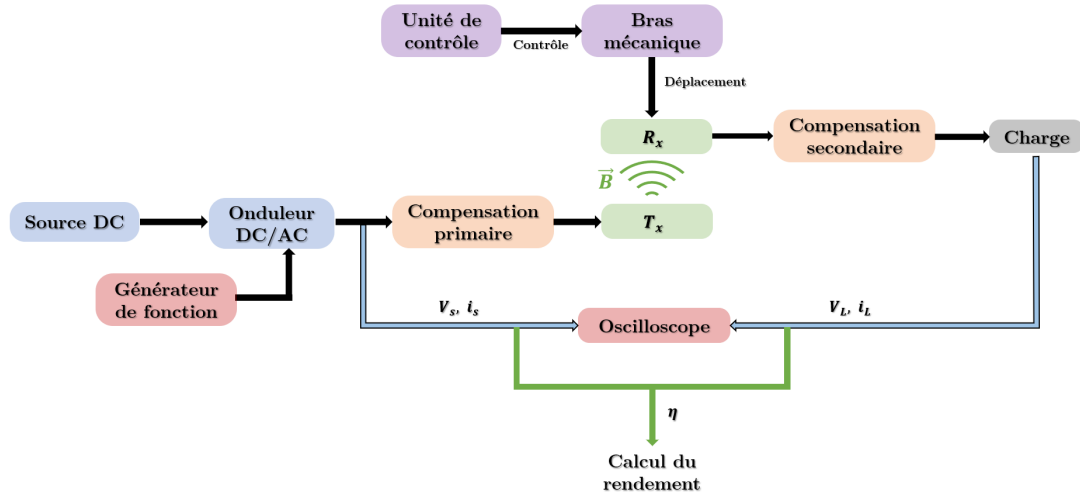


FIG. 10. Schéma de branchement du banc d'essai.

5.3. Adaptation du modèle pour des problèmes paramétriques

Afin de réaliser une étude paramétrique ou une d'optimisation, le modèle TESC est adapté pour permettre une exploration automatisée et fluide de différentes configurations. Cette automatisation est réalisée via le module « LiveLink for Matlab » de Comsol, qui établit une interface directe entre Comsol Multiphysics et Matlab.

L'outil utilisé permet de piloter les simulations Comsol depuis l'environnement Matlab, en automatisant la variation des paramètres géométriques du système, le lancement des simulations, ainsi que le post-traitement des résultats. Cette approche combine la précision de la modélisation par MEF avec la flexibilité de programmation et la puissance de traitement de Matlab.

L'objectif de cette intégration est de créer un modèle unifié, capable de s'adapter dynamiquement à toute configuration définie par le nombre de spires des bobines, dans le cadre de résoudre un problème d'optimisation rigoureusement défini. Le schéma de fonctionnement du modèle développé est présenté dans la figure 11.

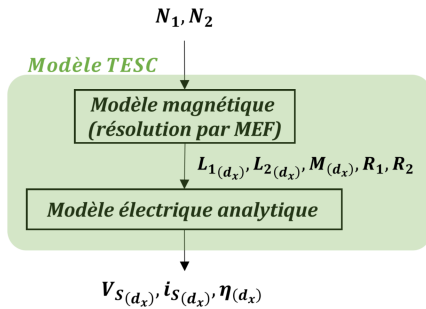


FIG. 11. Schéma explicatif du fonctionnement du modèle TESC adapté.

À noter que le modèle TESC développé peut être appliquée pour la réalisation d'études paramétriques ou d'optimisation. Pour ce faire, il est essentiel d'identifier au préalable les variables géométriques principales sur lesquelles le modèle doit s'appuyer, en cohérence avec les paramètres définis dans le problème d'optimisation. Il est tout aussi important d'adapter les sorties du modèle en fonction des objectifs spécifiques de l'étude (par exemple : rendement, tolérance au désalignement, masse, niveau de champ rayonné, etc.), afin de garantir une évaluation pertinente et ciblée des performances du système.

Cette méthodologie de modélisation, bien que développée pour un cas d'étude spécifique, présente une grande flexibilité. Elle peut être facilement adaptée à d'autres applications de transfert d'énergie sans contact, telles que les véhicules électriques, les robots autonomes, ou encore les appareils électro-

niques portables. En ajustant les contraintes géométriques et mécaniques ainsi que les objectifs fonctionnels, le même cadre de modélisation peut servir à concevoir des systèmes TESC performants et optimisés, quel que soit le domaine d'application. Ainsi, la méthodologie proposée offre une base robuste et généralisable pour accompagner l'intégration du TESC dans des systèmes embarqués exigeants.

6. CONCLUSION

Dans cet article, une méthodologie de modélisation d'un système de TESC destiné à un drone équipé d'un circuit imprimé à sa base a été présentée. La modélisation par MEF a permis de reproduire avec précision le comportement électromagnétique du coupleur, en tenant compte de l'impact des éléments structuraux tels que le PCB. Parallèlement, l'analyse du circuit électrique équivalent a permis d'évaluer les performances énergétiques du système, notamment en fonction du désalignement entre les bobines.

En perspective, le modèle développé servira de base à une étude d'optimisation visant à identifier une configuration TESC offrant un compromis optimal entre rendement, masse embarquée et robustesse au désalignement. En complément, une analyse de compatibilité électromagnétique (CEM) sera conduite afin de minimiser le champ magnétique rayonné et de garantir la fiabilité de l'électronique embarquée du drone.

7. RÉFÉRENCES

- [1] P. K. Chittoor et al., "A Review on UAV Wireless Charging : Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards," IEEE Access, vol. 9, pp. 69 235–69 266, 2021.
- [2] X. Li et al., « Magnetic Coupler Optimization for Inductive Power Transfer System of Unmanned Aerial Vehicles », Energies 2021, 14, 7024.
- [3] C. Cai et al., "A Multichannel Wireless UAV Charging System With Compact Receivers for Improving Transmission Stability and Capacity," IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 1, pp. 997–1008, 2022.
- [4] Y. Zeng et al., "Optimization Design of Wireless Charging System with Uniform Magnetic Field for Multi-Drone," pp. 1–6, 2021.
- [5] T. Campi, et al., « Magnetic field levels in drones equipped with Wireless Power Transfer technology », 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC), Shenzhen, China, 2016, pp. 544–547.
- [6] M. Ibrahim et al, "Advanced Modeling of a 2-kW Series-Series Resonating Inductive Charger for Real Electric Vehicle," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 2, pp. 421–430, Feb. 2015.
- [7] M. Terrah et al., « Parametric Design Approach for Wireless Power Transfer System : UAV Applications ». Drones 2024, 8, 735.