

Krigeage multi-fidélité pour le dimensionnement de coupleur magnétique multi-enroulement

Floran Cassin^{1,2}, Adrien Mercier¹, Eric Labouré¹, Jeanne-Marie Dalbavie², Patrice Gomez²

¹ Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Sorbonne Université, CNRS,

Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette

² Ikos Consulting, 92300, Levallois-Perret

Contact : floran.cassin@centralesupelec.fr

RESUME – Les convertisseurs Multiple-Active Bridge (MAB) permettent des transferts d'énergie entre plusieurs sources et charges via un coupleur magnétique multi-enroulements. Ce coupleur joue un rôle clé dans les performances du système, son dimensionnement conditionnant les flux de puissance. Or, les outils de modélisation haute fidélité comme les simulations par éléments finis (FEM) 3D sont coûteux en temps de calcul. Ce travail propose une méthodologie originale basée sur le krigeage multi-fidélité, combinant un petit nombre de simulations 3D précises à un grand nombre de simulations 2D moins coûteuses. L'objectif est de construire des métamodèles fiables pour estimer les paramètres du coupleur, tout en réduisant fortement les besoins en calculs. Les résultats montrent que cette approche améliore la précision prédictive sur la majorité des paramètres du modèle magnétique, en particulier lorsque peu de simulations 3D sont disponibles. Ces métamodèles ont été validés par comparaison avec des simulations LTSPICE, confirmant leur pertinence pour le dimensionnement rapide de convertisseurs MAB.

Mots-clés – Finite-element method, Métamodélisation, Krigeage multi-fidélité, Solid-State Transformer, Multi-active bridge.

1. INTRODUCTION

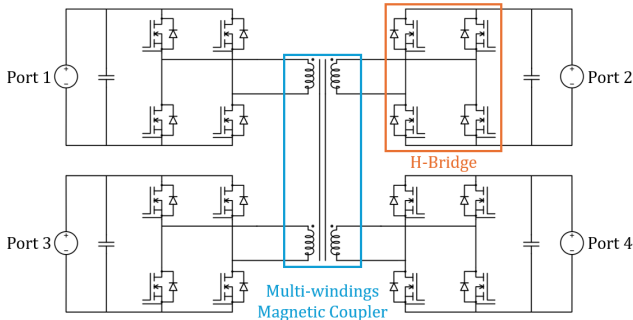


FIG. 1. MAB convertier

Les convertisseurs de type Multiple-Active Bridge (MAB) (Fig. 1) sont une solution possible de la famille des AC-coupled et de plus en plus envisagées dans les systèmes requérant des transferts d'énergie multiples entre différentes sources et charges. Dans cette famille de convertisseurs, on peut synthétiser les équations des flux de puissance entre un port j et un port k pour les différentes stratégies de commandes [1][2][3] sous la forme :

$$P_{jk} = \frac{nV_j V_k}{8fl_{jk}} \times \Phi \quad (1)$$

Avec :

- n le rapport de transformation entre les ports j et k ;

- V_j et V_k la tension aux bornes de leur enroulement ;
- f la fréquence de découpage du convertisseur ;
- l_{jk} l'inductance équivalente entre ces deux ports ;
- Φ un terme de régulation dépendant de la commande utilisée.

Le point commun à toutes ces stratégies vient du rôle clé joué par le coupleur magnétique, l'échange de puissance entre deux ports étant directement dépendant de l'inductance équivalente reliant ceux-ci (ie. l_{jk} Eq 1).

Le dimensionnement du coupleur magnétique est donc primordial, car il influence directement les valeurs des différentes inductances de couplage entre les ports, qui définissent à leur tour les transferts d'énergie au sein du système. Dans le domaine de la conception des composants magnétiques, l'utilisation de la méthode des éléments finis (FEM) est actuellement la solution privilégiée en raison de la complexité des phénomènes impliqués dans ces composants. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est inhérent au temps de calcul. En effet, en fonction de la géométrie et du maillage étudiés, les simulations par éléments finis en 3D apportent des résultats ayant une bonne précision mais peuvent être particulièrement longues quand celles en 2D sont plus rapides mais moins précises.

Cet article propose une méthode permettant le développement de métamodèle de krigeage dit multi-fidélité, utilisant à la fois un grand nombre de simulations rapides mais peu précises et un faible nombre de simulations précises mais ayant un temps de calcul plus élevé. Ces métamodèles peuvent être par la suite utilisés pour dimensionner un coupleur magnétique en essayant un nombre bien plus grand de configurations géométriques en un temps très faible.

2. MODÈLE DISTRIBUÉ

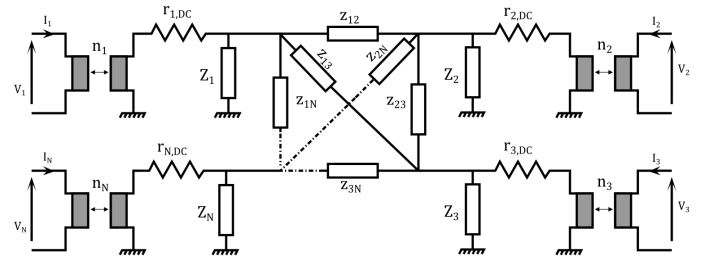


FIG. 2. Distributed model

Une partie de la littérature sur les coupleurs magnétiques est consacrée aux différents modèles à enroulements multiples. Un modèle relativement courant pour les applications impliquant plus de trois ports est le modèle Cantilever [4]. Cependant, les travaux futurs consisteront à produire un prototype et à détermi-

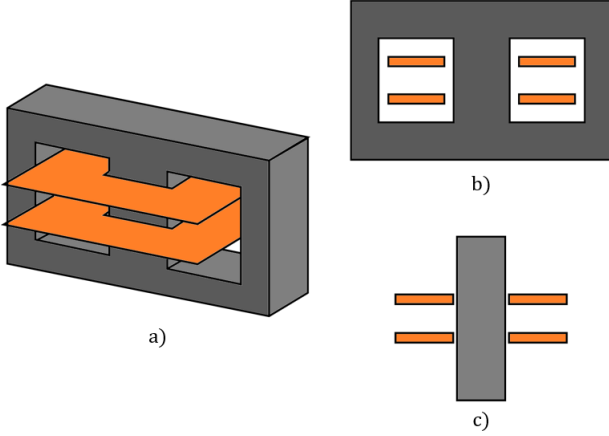


FIG. 3. Principe de la méthode double 2D : diviser la géométrie 3D a) en deux parties 2D : l'intérieur de la fenêtre de bobinage b) l'extérieur de la fenêtre de bobinage c)

ner le modèle à l'aide de mesures. Or, l'obtention précise des paramètres de ce modèle est un défi en raison de sa sensibilité aux mesures, en particulier pour les enroulements fortement couplés [5].

Pour ce faire, nous utiliserons un modèle distribué (Fig. 2) construit de telle sorte que chaque port k contient un coupleur idéal avec un rapport de tour de n_k , une résistance série $r_{k,DC}$ représentant la résistance statique de l'enroulement k , une impédance parallèle Z_k , que nous appellerons l'impédance magnétisante du port k , et des impédances de liaison z_{jk} reliant chacun des ports par paires. Plus précisément, en considérant cette impédance z_{jk} comme une combinaison en série d'une inductance l_{jk} et d'une résistance r_{jk} , nous tenons compte de l'impact de la fréquence sur les paramètres du modèle. Le modèle distribué apporte plusieurs avantages :

- il permet une analyse directe du transfert d'énergie entre deux ports par l'intermédiaire de l'impédance de liaison z_{jk} ;
- il ne favorise aucun port en particulier, chaque port ayant les mêmes paramètres que les autres ;
- il inclut la résistance statique en série ainsi que les impédances au lieu des seules inductances, ce qui permet de prendre en compte les effets dynamiques du coupleur.

Dans notre application, nous cherchons à déterminer l'inductance équivalente l_{jk} simplement pour étudier les flux de puissance entre les ports.

3. GÉOMÉTRIE DES SIMULATIONS FEM

3.1. Géométrie 3D

Le coupleur étudié est similaire à un coupleur de type EI, avec des enroulements qui peuvent être constitués d'une simple ou d'une double couche de conducteurs. Chaque enroulement contient un nombre n_k de tours. Les enroulements sont empilés les uns sur les autres, ce qui signifie qu'il n'est pas possible d'entrelacer les couches entre les différents enroulements.

La caractéristique du coupleur considéré dans notre étude provient de la présence d'un entrefer à l'interface entre deux blocs magnétiques. Ces entrefers sont représentées par l'introduction d'un espace plan entre les différents blocs magnétiques, d'une épaisseur $e_{entrefer}$ estimée à partir des mesures et modélisée à l'aide d'un réseau de reluctance. Cette épaisseur étant beaucoup plus faible que les autres dimensions du coupleur, il est nécessaire de mailler finement cette zone dans la simulation FEM pour obtenir des résultats précis. Cependant, cela augmente considérablement le temps de simulation.

3.2. Géométries 2D

3.2.1. Avec entrefer

Une partie importante des enroulements est située en dehors de la fenêtre de bobinage du coupleur magnétique. Ces parties d'enroulement présentent un comportement magnétique spécifique, ce qui entraîne une augmentation notable des fuites magnétiques. Dans le cas d'une simulation FEM 2D, pour tenir compte des différences de comportement entre les parties des enroulements situées à l'intérieur de la fenêtre de bobinage du circuit magnétique et celles situées à l'extérieur, la méthode d'étude « double 2D » présentée sur la figure 3, étudiée dans la littérature [6][7][8], est utilisée ici.

La méthode dite du double 2D permet de se passer de simulations FEM 3D, souvent bien plus chronophages que les simulations FEM 2D, tout en prenant en compte l'ensemble de la géométrie du coupleur magnétique. Celle-ci consiste à diviser le circuit magnétique en deux parties : une vue de face représentant la section de bobinage dans la fenêtre de bobinage, et une vue de côté pour les têtes de bobines. En analysant les champs magnétiques pour les deux parties et en sommant leur contribution, on obtient les paramètres du modèle électrique du coupleur total.

Comme évoqué précédemment, la particularité du coupleur considéré dans notre étude provient de l'existence d'entrefers parasites à l'interface de deux briques magnétiques. On représente ces entrefers par l'introduction d'un espace plan entre les différentes briques magnétiques, d'une longueur e_{airgap} estimée à partir d'une analyse par réseau de reluctance. Cette longueur étant très inférieure aux autres dimensions du coupleur, il est nécessaire de mailler finement cette zone pour obtenir une simulation représentative, ce qui augmente considérablement le temps de calcul.

3.2.2. Sans entrefer

Pour accélérer les simulations FEM, une solution simple consisterait à supprimer l'entrefer de la simulation. Pour ce faire, nous utilisons un modèle homogénéisé qui intègre à la fois le matériau magnétique du bloc et l'entrefer. Le matériau homogène équivalent, ayant la même reluctance, doit donc présenter une perméabilité relative équivalente donnée par :

$$\mu_{r,eq} = \mu_r \left(\frac{h_{brick} + e_{airgap}}{h_{brick} + \mu_r e_{airgap}} \right) \quad (2)$$

La suppression de l'entrefer peut avoir un effet sur la distribution des courants électriques dans les conducteurs, en faisant disparaître à tort l'effet de frange. Cependant, comme le bobinage est suffisamment éloigné de l'entrefer parasite, cet effet n'aura pas de conséquence.

En permettant une réduction significative du nombre de noeuds pour le maillage, cette méthode permet d'accélérer le temps de simulation.

4. MÉTAMODÉLISATION PAR KRIGEAGE

4.1. Modèle de krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation pouvant être considérée comme un modèle prédisant la sortie $\hat{y}(X)$ à partir d'un terme de régression $m(X)$ représentant le comportement global du système, et d'un processus stochastique modélisant les écarts locaux, basé sur une fonction de corrélation $Z(X)$:

$$\hat{y}(X) = m(x) + Z(x) \quad (3)$$

$$m(x) = \sum_{j=1}^k \beta_j f_j \quad (4)$$

avec $f_1, \dots, f_k$ représentant la base de fonctions et β_j leurs coefficients de pondération. $Z(X)$ est un processus stochastique à

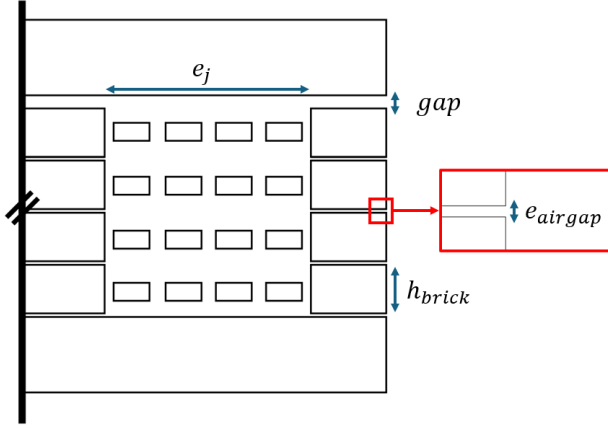


FIG. 4. Schema des paramètres géométriques

moyenne nulle, avec une fonction de covariance donnée par :

$$\text{cov}[Z(x^{(i)}), Z(x^{(j)})] = \sigma^2 R(x^{(i)}, x^{(j)}) \quad (5)$$

avec σ^2 la variance du processus et R la corrélation.

Les hyperparamètres du krigeage sont déterminés et optimisés afin de rendre le métamodèle robuste.

4.2. Modèle de krigeage multi-fidélité

La métamodélisation par krigeage multi-fidélité est une méthode utilisée pour modéliser des systèmes complexes, comme en mécanique des fluides [9] ou pour les moteurs électriques linéaires [10], en combinant des données provenant, par exemple, de différentes simulations numériques d'un même phénomène, mais de précisions variables. L'objectif de cette méthode est de construire un modèle de prédiction $\hat{y}_{HF}$ de haute fidélité du phénomène, tout en utilisant des informations de moindre fidélité. On peut résumer ceci en se basant sur la notation introduite dans [11] :

$$f_{HF}(x) = \rho f_{LF}(x) + \delta(x) \quad (6)$$

$$f_{LF}(\cdot) \perp \delta(\cdot) \quad (7)$$

Avec f_{HF} et f_{LF} les bases de fonctions respectivement de haute fidélité et de basse fidélité, $\delta(\cdot)$ la fonction de disparité qui rend compte des différences entre les fonctions de haute et de basse fidélité, et ρ un facteur permettant de prendre en compte la corrélation entre les différentes fidélités.

En modélisant explicitement ces relations hiérarchiques entre les simulations, le krigeage multi-fidélité permet de réduire les coûts de calcul tout en maintenant une bonne précision dans les prédictions. Le cadre théorique détaillé du krigeage multi-fidélité ne sera pas approfondi dans cet article; le lecteur intéressé pourra cependant se référer aux travaux présentés dans [12], [13] et [14], où les fondements et les principales formulations sont exposés.

5. VALIDATION

5.1. Methodologie

Les méthodes mises en place utilisent les bibliothèques python SMT 2.0 [15] et OpenTURNS [16], à partir de résultats obtenus par simulation FEM 3D avec Comsol 6.2 et FEM 2D avec FEMM 4.2 [17]. En se référant à la figure 4, on cherche à dimensionner le coupleur magnétique avec comme paramètres variables la largeur de la fenêtre de bobinage e_j , la hauteur des blocs magnétiques h_{brick} et un espace entre les jambes et la fermeture gap .

Pour l'étude des différentes méthodes, il a été réalisé 64 simulations 3D, 128 simulations 2D avec entrefer et 256 simulations

sans entrefer. La construction d'un modèle de krigeage simple fidélité se fait sur $N \in [4, 8, 16, 32, 64]$ simulations 3D. Un modèle de krigeage multi-fidélité, lui, se construit tel qu'on utilise aussi N simulations 3D avec 3 possibilités :

- $4 \times N$ simulations 2D avec entrefer avec $N \in [4, 8, 16, 32, 64]$;
- $16 \times N$ simulations 2D sans entrefer $N \in [4, 8, 16]$;
- $4 \times N$ simulations 2D avec entrefer et $16 \times N$ simulations 2D sans entrefer $N \in [4, 8, 16]$.

Afin de comparer les différents métamodèles, on utilisera une base de simulations 3D de validation non utilisée pour l'entraînement des modèles de krigeage, afin d'étudier l'écart quadratique moyen normalisé (NRMSE) entre les modèles et le jeu de données de validation :

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_j^{N_{val}} (\hat{y}(X_j) - y_j)^2}}{(\max(y_j) - \min(y_j))\sqrt{N_{val}}} \quad (8)$$

5.2. Résultats $N \leq 64$

Dans un premier temps, on considère tous les cas cités précédemment. On compare le meilleur modèle de krigeage simple fidélité pour tout N au meilleur modèle de krigeage multi-fidélité pour tout N . Dans les figures 5 et 6, on affiche les résultats des NRMSE pour chaque paramètre du modèle distribué explicitement précédemment.

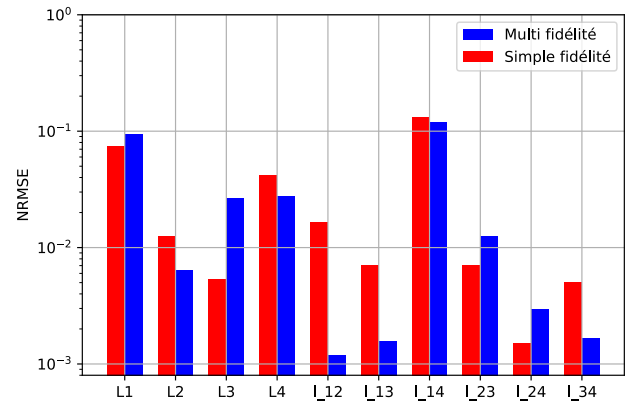


FIG. 5. Comparaison des NRMSE des deux modèles de krigeage pour les paramètres inductifs avec $N \leq 64$

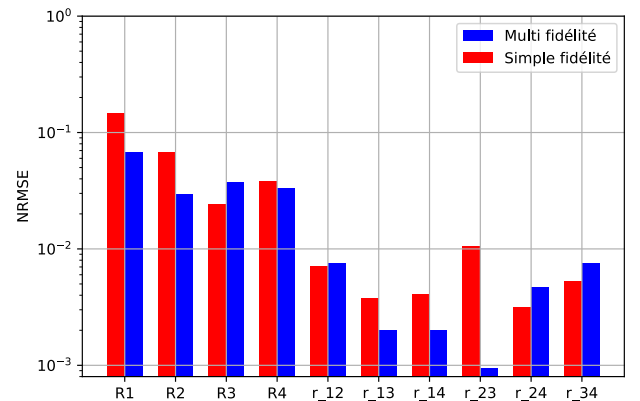


FIG. 6. Comparaison des NRMSE des deux modèles de krigeage pour les paramètres résistifs avec $N \leq 64$

On observe que pour 12 paramètres, le modèle de krigeage

multi-fidélité apporte une amélioration de la précision comparativement au modèle de krigeage simple fidélité. Cette amélioration peut être significative, comme pour l_{12} où le NRMSE est presque 20 fois plus faible, ou plus proche comme pour l_{14} . Cependant, pour les 8 autres paramètres, l'utilisation de données de plus faible fidélité dégrade le modèle de krigeage, comme par exemple pour le paramètre L_3 où le NRMSE du modèle simple fidélité est 5 fois inférieur à celui du modèle multi-fidélité.

5.3. Résultats $N \leq 16$

Le développement de la méthodologie, afin d'accélérer le temps de process, est pensé pour utiliser un nombre réduit de simulations 3D. Dans ce cas d'étude, on compare le meilleur modèle de krigeage simple fidélité pour tout $N \leq 16$ au meilleur modèle de krigeage multi-fidélité pour tout $N \leq 16$. Comme précédemment, sur les figures 7 et 8, on affiche les résultats des NRMSE pour chaque paramètre du modèle distribué.

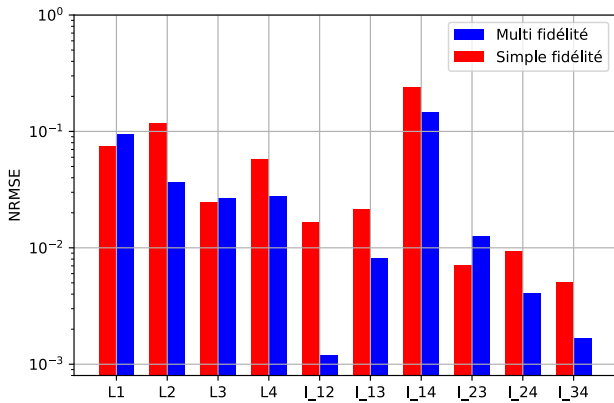


FIG. 7. Comparaison des NRMSE des deux modèles de krigeage pour les paramètres inductifs avec $N \leq 16$

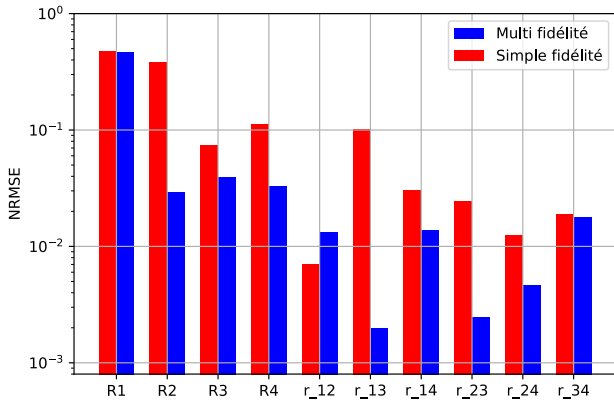


FIG. 8. Comparaison des NRMSE des deux modèles de krigeage pour les paramètres résistifs avec $N \leq 16$

On observe qu'après réduction du nombre de simulations 3D utilisées pour l'entraînement, on compte désormais 16 paramètres pour lesquels le modèle de krigeage multi-fidélité apporte une amélioration de la précision comparativement au modèle de krigeage simple fidélité. En effet, les NRMSE des modèles de krigeage multi-fidélité sont soit restés similaires avec la réduction du nombre de simulations 3D, soit ont augmenté dans des proportions comparables à celles des krigeages simple fidélité, comme pour les paramètres L_2 et l_{13} . On note cependant que le modèle de krigeage multi-fidélité du paramètre r_{12} a vu sa précision baisser, contrairement au modèle de krigeage simple fidélité.

5.4. Résultats $N \leq 8$

Dans ce cas d'étude, on réduit une nouvelle fois le nombre de simulation 3D afin de comparer le meilleur modèle de krigeage simple fidélité pour tout $N \leq 8$ au meilleur modèle de krigeage multi-fidélité pour tout $N \leq 8$. Comme précédemment, sur les figures 9 et 10, on affiche les résultats des NRMSE pour chaque paramètre du modèle distribué.

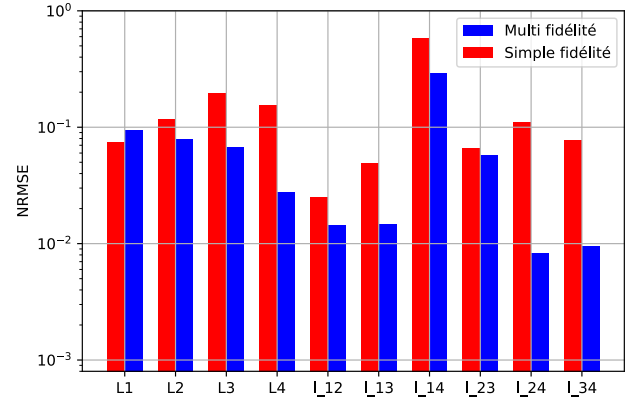


FIG. 9. Comparaison des NRMSE des deux modèles de krigeage pour les paramètres inductifs avec $N \leq 8$

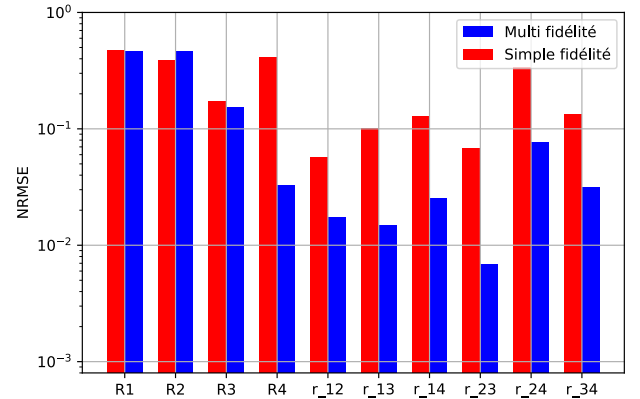


FIG. 10. Comparaison des NRMSE des deux modèles de krigeage pour les paramètres résistifs avec $N \leq 8$

On observe qu'après réduction du nombre de simulations 3D utilisées pour l'entraînement, on compte désormais 18 paramètres pour lesquels le modèle de krigeage multi-fidélité apporte une amélioration de la précision comparativement au modèle de krigeage simple fidélité. En effet, les NRMSE des modèles de krigeage ont globalement tous augmenté; cependant, ils se sont bien plus détériorés en simple fidélité qu'en multi-fidélité. De plus, pour les deux paramètres L_1 et R_2 , on observe une faible différence entre les deux méthodes.

Néanmoins, dans le cas où l'on dispose de peu de simulations 3D pour l'entraînement, bien que le krigeage multi-fidélité apporte une amélioration relative, la précision globale de l'estimation du modèle distribué reste insuffisante.

5.5. Etude sur un modèle électrique

Afin d'évaluer de façon macroscopique l'apport du nombre de simulations 3D, on étudie la réponse simulée d'un modèle électrique de coupleur construit à partir des métamodèles entraînés précédemment, en les comparant aux coupleurs de la base de validation des simulations 3D. Pour cela, on construit le modèle distribué du coupleur sur LTSPICE à partir des métamodèles, puis on injecte les courants dans les ports de la même façon que

dans les simulations 3D. Ensuite, on compare les tensions aux bornes de ces ports entre la simulation LTSPICE et les simulations 3D.

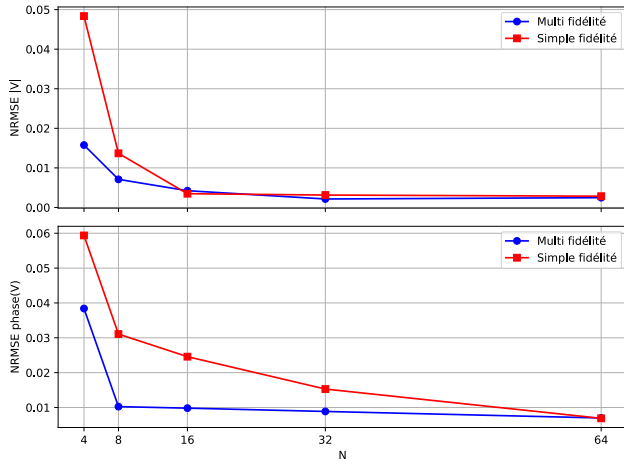


FIG. 11. Comparaison des NRMSE des deux modèles de krigeage pour les tensions aux bornes des enroulements selon N

Sur la figure 11, on affiche le NRMSE du module et de la phase des tensions aux ports du coupleur entre la simulation LTSPICE et des simulations 3D. On observe une nette décroissance des NRMSE avec l'augmentation du nombre de simulations 3D utilisées pour l'entraînement des modèles de krigeage, que ce soit en simple fidélité ou en multi-fidélité. Ceci est cohérent avec les sections précédentes traitant des paramètres individuels du modèle distribué. On note également qu'à partir de $N = 16$, l'augmentation du nombre de simulations ne permet plus qu'une amélioration marginale du modèle de krigeage multi-fidélité, contrairement au modèle simple fidélité qui continue de gagner en précision, notamment sur le déphasage des tensions.

6. CONCLUSION

Ce travail propose une méthodologie pour le dimensionnement rapide et précis de coupleurs magnétiques multi-enroulements dans les convertisseurs Multiple-Active Bridge (MAB), en s'appuyant sur la métamodélisation par krigeage multi-fidélité. Après avoir souligné le rôle critique du coupleur magnétique dans les transferts d'énergie au sein des convertisseurs MAB, nous avons introduit un modèle distribué paramétré par des grandeurs inductives et résistives permettant de capturer fidèlement le comportement électromagnétique du système.

L'approche proposée combine des simulations FEM 3D précises mais coûteuses avec des simulations 2D moins fidèles mais rapides, permettant la construction de métamodèles capables d'explorer efficacement l'espace de conception. L'analyse comparative entre krigeage simple et multi-fidélité montre que ce dernier améliore la précision prédictive pour la majorité des paramètres du modèle distribué, en particulier lorsque le nombre de simulations 3D est limité. Ces bénéfices se confirment également à l'échelle d'un modèle électrique complet simulé dans LTSPICE, où les tensions aux bornes du coupleur reconstruit à partir des métamodèles montrent une bonne concordance avec les données de référence.

Ces résultats démontrent que le krigeage multi-fidélité constitue une alternative performante et économique aux méthodes classiques de dimensionnement magnétique. Les perspectives immédiates portent sur la validation expérimentale des modèles simulés et leur intégration dans une boucle d'optimisation automatisée du convertisseur ainsi que dans l'analyse de la sensibilité des échanges de flux de puissance par rapport aux paramètres incertains tel que les entrefer parasites e_{airgap} .

7. RÉFÉRENCES

- [1] B. Zhao, Q. Yu and W. Sun, "Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bi-directional DC-DC Converter for Power Distribution in Microgrid," IEEE Transactions on Power Electronics, 2012
- [2] H. Bai and C. Mi, "Eliminate Reactive Power and Increase System Efficiency of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC-DC Converters Using Novel Dual-Phase-Shift Control," IEEE Transactions on Power Electronics, 2008
- [3] Y.A. Harrye, K.H. Ahmed, G.P. Adam and A.A. Aboushady, "Comprehensive steady state analysis of bidirectional dual active bridge DC/DC converter using triple phase shift control," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics, 2014
- [4] R.W. Erickson and D. Maksimovic, "A multiple-winding magnetics model having directly measurable parameters," PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1998
- [5] Florian Cassin, "Modélisation et analyse de modèle de coupleur magnétique multi-enroulements pour un convertisseur électrique réversible multi-entrées multi-sorties" JCGE - Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, GDR SEEDS, 2024
- [6] R. Prieto et al., "Model of integrated magnetics by means of 'double 2D' finite element analysis techniques," 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1999
- [7] R. Prieto et al., "Study of 3-D magnetic components by means of 'double 2-D' methodology," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003
- [8] R. Bakri et al., "Impact of aluminum casing on high-frequency transformer leakage inductance and AC resistance," 24th European Conference on Power Electronics and Applications, 2022
- [9] I. Abdallah, C. Lataniotis, B. Sudret "Hierarchical Kriging for multi-fidelity aero-servo-elastic simulators - Application to extreme loads on wind turbines" Probabilistics Engineering Mechanics, 2017
- [10] S. Ahmed, C. Grabher, H.J. Kim and T. Koseki, "Multifidelity Surrogate Assisted Rapid Design of Transverse-Flux Permanent Magnet Linear Synchronous Motor" IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020
- [11] M.C. Kennedy, A. O'Hagan "Bayesian calibration of computer models" Journal of the Royal Statistical Society, 2001
- [12] M.C. Kennedy, A. O'Hagan "Predicting the output from a complex computer code when fast approximations are available" Biometrika, 2000
- [13] A.I.J. Forrester, A. Söbester and A.J. Keane "Multi-fidelity optimization via surrogate modelling" Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007
- [14] L. Le Gratiet "Multi-fidelity Gaussian process regression for computer experiments" Thesis, 2013
- [15] P. Saves et al., "SMT 2.0 : A Surrogate Modeling Toolbox with a focus on hierarchical and mixed variables Gaussian processes" Advances in Engineering Software, 2024
- [16] M. Baudin et al., "OpenTURNS : An Industrial Software for Uncertainty Quantification in Simulation" Handbook of Uncertainty Quantification, 2016
- [17] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2