

Investigation des pertes dans les plateaux et doigts de serrage dans les machines de fortes puissances

W. MOHAND OUSSAID^{1,2,3}, A. TOUNZI¹, R. ROMARY², A. BENABOU¹, W. BOUGHANMI³ et D. LALOY³

¹ Univ. Lille, Arts et Métiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 L2EP, F-59000 Lille, France.

² Univ. Artois, UR 4025, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE), Béthune, F-62400, France.

³ JEUMONT Electric 59572, Jeumont France.

RESUME -Le calcul des pertes supplémentaires des machines électriques a toujours été une tâche délicate. Dans cet article, une investigation des pertes dans les plateaux et les doigts de serrage de machines de fortes puissances est effectuée. L'étude se focalise sur l'effet de la composante axiale du flux de fuite en extrémité sur ces pertes. Pour ce faire, un modèle numérique par éléments finis (E.F.) d'une maquette expérimentale dédiée à cette problématique est présenté et des calculs sont effectués pour différents matériaux du plateau et des doigts de serrage. Par ailleurs, une attention est portée à l'influence de l'écran de flux sur les pertes globales en extrémité.

Mots-clés—effets 3D, modélisation numérique, écran de flux, machines électriques, matériaux pour machines électriques, pertes.

1. INTRODUCTION

Les dispositifs de serrage sont utilisés pour appliquer la pression nécessaire au maintien des tôles du stator dans le cas des machines de grande puissance telles que les grands turbogénérateurs. Ils sont constitués de différents matériaux conducteurs dans lesquels sont induits des courants, principalement dus à la composante axiale du flux magnétique de fuite en extrémité. Ces derniers génèrent des pertes qui impactent le rendement des machines. Le choix de structures et de matériaux bien adaptés pour limiter ces pertes est donc très important. Cependant, celles-ci sont difficiles à déterminer car elles se trouvent dans une zone inaccessible aux mesures. La quantification de telles pertes est donc souvent menée à l'aide de simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis en 3D [1-5]. Toutefois, la majeure partie des études a porté sur des considérations numériques telles que l'effet de peau sur les surfaces conductrices, où le maillage doit être dense, en plus de la difficulté de prendre en compte les connexions d'extrémité dans les modèles de grands générateurs, où les conditions de symétrie ne peuvent pas être utilisées, ce qui entraîne une augmentation significative de la taille du modèle et du temps de calcul. Certaines études ont souligné la sensibilité des pertes par courants de Foucault à la valeur de perméabilité relative du matériau conducteur, d'où l'importance d'avoir une précision suffisante de la courbe d'aimantation $B(H)$ du matériau [1]. D'un autre côté, des écrans de flux sont également utilisés dans ce type de machine pour atténuer la composante axiale du flux [2]. En effet, ces derniers sont couramment utilisés pour protéger à la fois le stator et le plateau de serrage. Ces écrans sont essentiellement de grands anneaux en matériau hautement conducteur (généralement en cuivre ou en aluminium) conçus de manière à ce que les courants de Foucault induits à l'intérieur de l'écran empêchent

la pénétration normale du flux magnétique et éviter ainsi des courants induits dans les premières tôles du circuit magnétique et donc un échauffement de ce dernier. L'écran a donc deux effets : il protège tout corps conducteur directement derrière lui, et augmente la longueur du chemin parcouru par le flux d'enroulement aux extrémités, réduisant ainsi l'amplitude globale du flux de fuite lui-même. Le premier effet réduit les pertes dans le plateau de serrage, tandis que le second contribue à minimiser les pertes dans le stator, et ainsi protéger les tôles magnétiques en extrémité contre la surchauffe. La conception de cet écran est bien plus complexe qu'il ne pourrait être perçue initialement. À la fois la géométrie radiale/circonférentielle et l'épaisseur axiale optimale doivent être déterminées. Dans [6], une étude simplifiée a été menée où nous nous sommes intéressés uniquement à l'effet de la composante axiale du flux de fuite sur les pertes dans ces dispositifs. Dans cet article, en utilisant une configuration simple, une étude est effectuée en calculant les pertes dans les dispositifs de serrage pour différents matériaux et à différentes fréquences d'alimentation sans et avec écran de flux.

La première partie de l'article traite de l'introduction du modèle numérique ainsi que les propriétés électriques et magnétiques des différents matériaux. Ensuite, un calcul des pertes par courants induits dues à la composante axiale du flux de fuite est effectué. Dans une deuxième partie, l'effet d'un écran de flux en cuivre sur ces pertes est analysé. L'objectif est de déterminer la combinaison optimale entre le matériau du dispositif de serrage et l'épaisseur de l'écran qui permet de minimiser les pertes totales par courants induits en extrémité du dispositif électromagnétique étudié.

2. PERTES PAR COURANTS INDUITS DANS LES DISPOSITIFS DE SERRAGE

Pour étudier l'impact de la composante axiale du flux de fuite sur les pertes par courants induits dans les dispositifs de serrage, une maquette expérimentale dédiée est utilisée. Elle est composée d'un empilement de tôles magnétiques M600-65A, d'une bobine circulaire ainsi que d'un ensemble plateaux-doigts de serrage. Ce dernier élément est considéré pour trois matériaux différents : laiton, acier magnétique et acier inoxydable. La Figure 1 montre le dispositif modélisé.

Les caractéristiques magnétiques et électriques des tôles du circuit magnétique et des structures de serrage ont été caractérisées au laboratoire sur cadre Epstein ou dispositif mini-SST (Single Sheet Tester) et par la méthode des 4 pointes

[7]. Le Tableau 1 regroupe les valeurs des propriétés des matériaux qui seront utilisées dans la simulation 3D.

Tableau 1. Propriétés électriques et magnétiques des matériaux.

| Matériau | Conductivité électrique σ (MS/m) | Perméabilité relative μ_r |
|------------------|---|-------------------------------|
| Laiton | 15 | 1 |
| Acier magnétique | 6.475 | 1020 |
| Acier inoxydable | 1.4 | 2 |

Afin de réduire les temps de calculs par éléments finis (E.F.), seul un motif élémentaire composé d'une encoche et d'une dent (1/48 du stator) est modélisé avec un maillage dont une vue est donnée à la Figure 2.

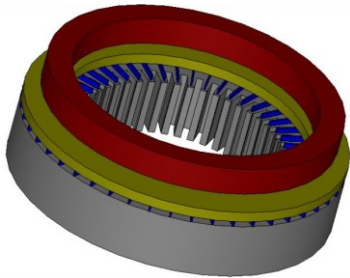


Fig. 1. Géométrie du système étudié, du bas vers le haut : le circuit magnétique (stator), les doigts de serrage, le plateau et la bobine circulaire.

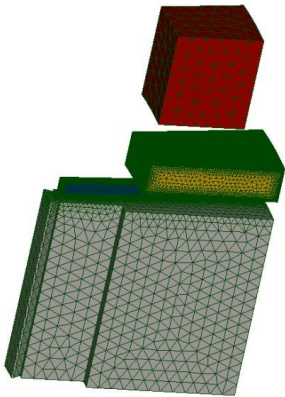


Fig. 2. Maillage du système (1/48^{ème} de la géométrie complète).

Afin de quantifier de manière précise les courants induits dans les dispositifs de serrage, un nombre suffisant d'éléments est imposé au maillage du plateau et des doigts de façon à prendre en considération l'effet de peau dans les différents matériaux à la fréquence d'étude la plus élevée. L'expression de cet effet, rappelée ci-dessous, montre le lien avec la fréquence qui nécessite l'adaptation du maillage en conséquence.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma \mu \pi f}} \tag{1}$$

En pratique, il est généralement recommandé d'avoir *a minima* trois éléments dans l'épaisseur de peau pour estimer correctement les courants induits dans un milieu conducteur [6]. Enfin, pour éviter tout biais numérique, le même maillage réalisé pour le cas le plus contraignant (acier magnétique pour la fréquence étudiée la plus élevée) est utilisé pour effectuer toutes les simulations. Ces dernières sont menées en utilisant la formulation magnétodynamique $A - \varphi$ dans *Code_Carmel* [8] pour un courant sinusoïdal alimentant la bobine circulaire de

valeurs efficaces entre 3 et 12 A et pour des fréquences de 50 Hz à 200 Hz.

La Figure 3 montre la densité des courants induits dans l'inox, le laiton et l'acier magnétique pour les fréquences de 50 et 200 Hz. Comme on pouvait le prévoir, les courants induits sont localisés sur l'ensemble du plateau de serrage pour les deux fréquences dans le cas de l'inox. Pour le laiton et à 50 Hz, les courants de Foucault apparaissent sur toute la surface du plateau, alors que l'effet de peau est visible avec des courants circulant de manière non uniforme sur la structure de serrage à 200 Hz. Dans le cas de l'acier magnétique, l'effet de peau est beaucoup plus visible à 50 Hz et 200 Hz, les courants induits se produisent uniquement sur les bords du plateau. Cela s'explique par le fait que l'acier magnétique présente les valeurs d'épaisseur de peau les plus faibles et l'acier inoxydable les valeurs de profondeur de peau les plus élevées.

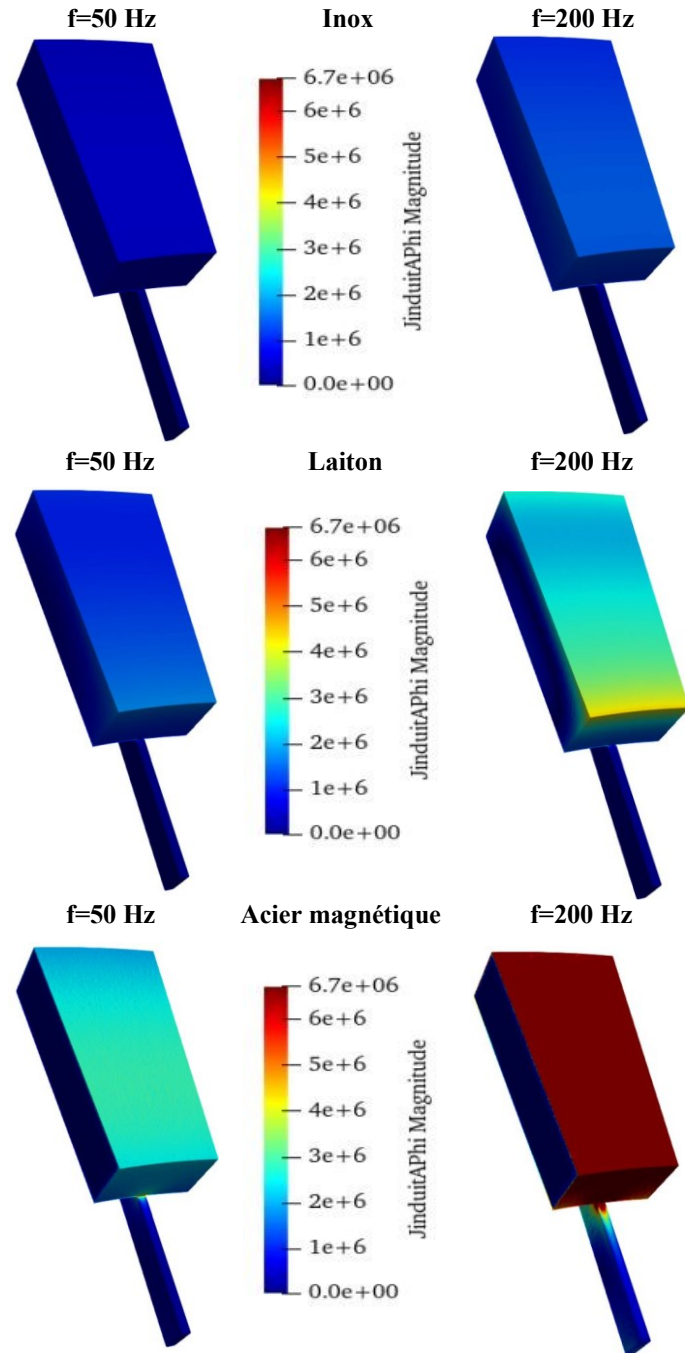


Fig. 3. Densité des courants induits (A/m²) pour des structures de serrage en inox, en laiton et en acier magnétique.

Sur la Figure 4, les pertes par courants induits dans le dispositif de serrage sont tracées en fonction de la fréquence pour chaque matériau. À 50 Hz, les pertes dans les matériaux non-magnétiques (laiton, inox) sont très proches et sont plus importantes que pour le plateau de serrage en acier magnétique malgré une conductivité électrique plus faible pour l'inox. À 200 Hz, les pertes dans le cas de l'inox croissent de manière considérable. Ceci s'explique par le fait que les courants induits circulent sur toute la surface du plateau car la valeur de l'épaisseur de peau de l'inox est la plus élevée [6]. Par ailleurs, une nette augmentation des pertes est observée à 200 Hz par rapport à une fréquence de 50 Hz pour le cas de l'acier magnétique en comparant avec la structure en laiton.

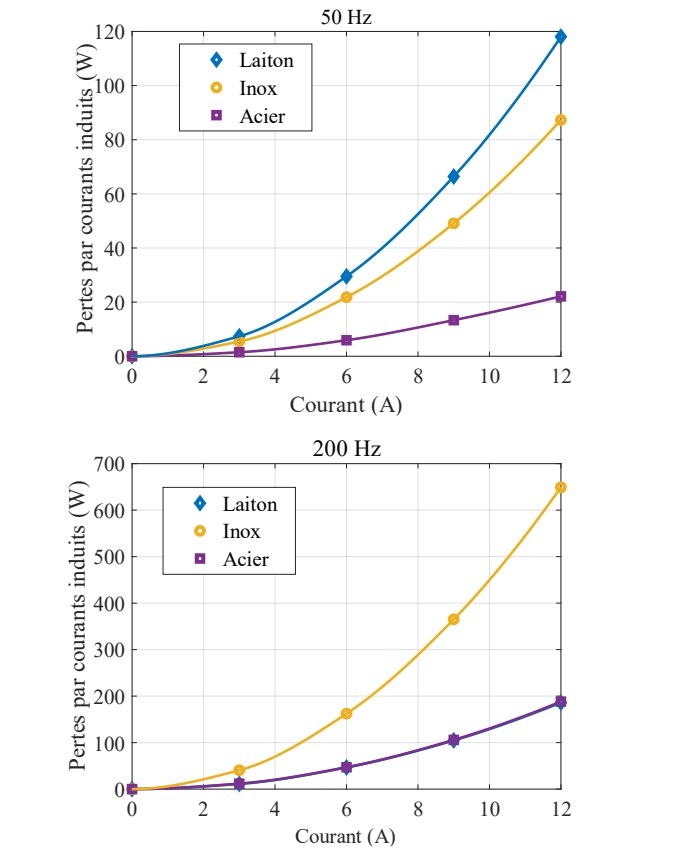


Fig. 4 Pertes par courants induits dans les dispositifs de serrage.

2.1. Influence de l'écran de flux sur les pertes dans les dispositifs de serrage

Le même système que le précédent a été modélisé en rajoutant un écran de flux en cuivre dont l'épaisseur est de 2 mm au-dessus du plateau de serrage comme le montre la Figure 5. La Figure 6 montre que dans le cas d'une structure de serrage en inox, les courants sont principalement induits dans l'écran de flux à 50 Hz.

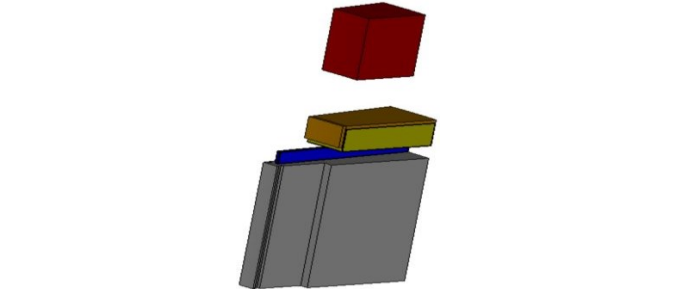


Fig. 5. Géométrie du système étudié, du bas vers le haut : le circuit magnétique, le doigt de serrage, le plateau, l'écran de flux et la bobine circulaire.

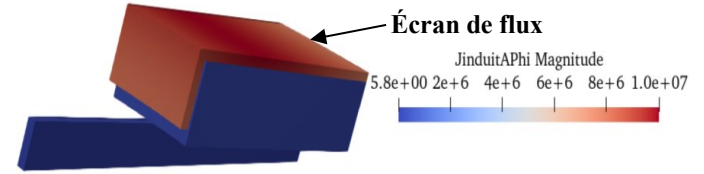


Fig. 6. Densité des courants induits (A/m²) pour une structure de serrage en inox avec écran de flux en cuivre à 50 Hz.

Le Tableau 2 présente une comparaison des pertes calculées pour les trois matériaux, avec et sans écran de flux, à 50 Hz et 200 Hz, dans le cas où la bobine circulaire est alimentée par un courant sinusoïdal de 12 A efficace. En présence de l'écran de flux, les pertes totales calculées représentent la somme des pertes dans l'écran du flux et dans les dispositifs de serrage.

Les résultats obtenus sont différents suivant les natures des matériaux. À 50 Hz, et en présence de l'écran de flux, des pertes par courants induits totales diminuent par rapport au cas « sans écran » de flux pour une structure de serrage en laiton alors qu'elles augmentent pour le cas de l'inox et très fortement pour un dispositif en acier magnétique. Dans ces deux derniers cas, les pertes totales sont principalement localisées dans l'écran de flux. À 200 Hz, les tendances sont différentes. Ainsi, les pertes totales diminuent par rapport au cas « sans écran de flux » pour le laiton et l'inox, alors qu'elles augmentent significativement pour le plateau en acier magnétique. Pour cette fréquence, les pertes sont principalement localisées au niveau de l'écran de flux quel que soit le matériau de circuit de serrage, ce qui signifie que le flux magnétique en extrémité est dévié et contenu par l'écran de flux.

Tableau 2. Comparaison des pertes calculées avec et sans écran de flux à 50 Hz et 200 Hz.

| Matériau Pertes (W) | 50 Hz | | | 200 Hz | | |
|---|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | Laiton | Inox | Acier | Laiton | Inox | Acier |
| Pertes totales sans écran de flux | 118 | 87.3 | 21.9 | 186.1 | 649.1 | 188.2 |
| Pertes totales avec écran de flux | 93.6 | 168.1 | 174.2 | 142.6 | 251.6 | 267.1 |
| Pertes dans l'écran de flux | 39.3 | 146.3 | 166.5 | 87 | 220.5 | 257.8 |
| Pertes dans les dispositifs de serrage (cas avec écran de flux) | 53.8 | 21.9 | 7.7 | 55.4 | 31.1 | 9.4 |

Dans la suite, l'étude se concentre sur les pertes pour le cas de structures de serrage en acier magnétique et en acier inoxydable car les pertes totales augmentent pour ces deux matériaux en présence de l'écran de flux, ce qui n'est pas souhaitable car cela affecte le rendement de la machine. Des écrans de flux avec différentes épaisseurs ont été modélisés et les pertes totales ont été calculées. Les dimensions des écrans de flux sont données dans le Tableau 3, et la Figure 7 montre la géométrie de l'écran 2.

Tableau 3. Dimensions des écrans de flux en cuivre.

| | Écran 1 | Écran 2 | Écran 3 |
|------------------------------------|---------|---------|---------|
| Épaisseur de la face (mm) | 7 | 10 | 15 |
| Épaisseur du rebord intérieur (mm) | 8 | 8 | 8 |

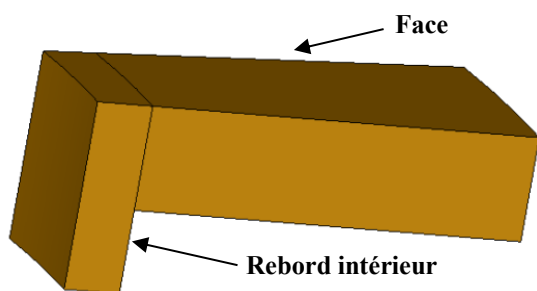


Fig. 7. Géométrie de l'écran 3.

Le Tableau 4 et le Tableau 5 présentent les pertes par courants induits calculées pour les trois écrans de flux à 50 et 200 Hz respectivement. De manière générale, en augmentant l'épaisseur de l'écran de cuivre, les pertes totales diminuent. À 50 Hz, les pertes totales augmentent pour une structure de serrage en acier magnétique par rapport au cas « sans écran de flux » pour les trois écrans et avec l'écart qui diminue en augmentant l'épaisseur. Tandis que pour une structure en inox les pertes totales diminuent par rapport au cas « sans écran de flux » pour les trois écrans. À 200 Hz, les pertes totales diminuent pour les deux matériaux par rapport au cas « sans écran de flux ». La Figure 8 permet de visualiser la densité des courants induits dans l'écran 3 pour une structure de serrage en acier magnétique à 50 Hz. Les courants induits circulent dans un plus grand volume mais avec une amplitude réduite en comparant avec l'écran d'épaisseur 2 mm de la Figure 6. En effet, l'augmentation de l'épaisseur de l'écran à des valeurs supérieures ou aux alentours de la valeur d'épaisseur de peau du cuivre, qui est d'environ 9.38 mm à 50 Hz, conduit à une réduction des pertes globales dans l'écran de cuivre.

Tableau 4. Comparaison des pertes calculées avec et sans écran de flux à 50 Hz

| Matériau Pertes (W) | Écran 1 | | Écran 2 | | Écran 3 | |
|---|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | Inox | Acier | Inox | Acier | Inox | Acier |
| Pertes totales sans écran de flux | 87.3 | 21.9 | 87.3 | 21.9 | 87.3 | 21.9 |
| Pertes totales avec écran de flux | 72.29 | 72.65 | 58.16 | 57.69 | 47.19 | 47.1 |
| Pertes dans l'écran de flux | 69.74 | 71.74 | 56.79 | 57.16 | 46.66 | 46.85 |
| Pertes dans les dispositifs de serrage (cas avec écran de flux) | 2.55 | 0.87 | 1.36 | 0.53 | 0.53 | 0.25 |

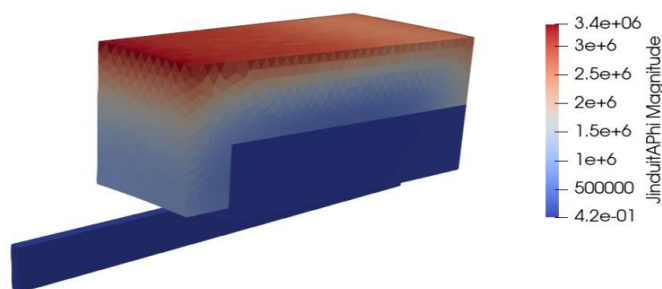


Fig. 6. Densité des courants induits (A/m^2) pour une structure de serrage en inox avec écran de flux en cuivre à 50 Hz.

Tableau 5. Comparaison des pertes calculées avec et sans écran de flux à 200 Hz.

| Matériau Pertes (W) | Écran 1 | | Écran 2 | | Écran 3 | |
|---|---------|--------|---------|-------|---------|-------|
| | Inox | Acier | Inox | Acier | Inox | Acier |
| Pertes totales sans écran de flux | 649.1 | 188.2 | 649.1 | 188.2 | 649.1 | 188.2 |
| Pertes totales avec écran de flux | 100.88 | 102.74 | 95.17 | 97.51 | 93.59 | 95.77 |
| Pertes dans l'écran de flux | 98.46 | 101.11 | 94.16 | 96.44 | 93.12 | 95.12 |
| Pertes dans les dispositifs de serrage (cas avec écran de flux) | 2.42 | 1.63 | 1.013 | 1.066 | 0.47 | 0.65 |

3. CONCLUSION

Des pertes significatives sont générées dans les structures de serrage en raison de la composante axiale du flux magnétique de fuite en extrémité. Nous avons montré l'influence de l'écran de flux sur les pertes par courants induits dans ces dispositifs, et ce pour trois matériaux. Il est clair que le bouclier de flux doit remplir sa tâche de blindage, mais il doit également le faire sans subir de pertes excessives à l'intérieur du bouclier lui-même. En effet, le choix de la dimension optimale de l'écran de flux est important afin de minimiser les pertes ainsi que le choix du matériau pour les dispositifs de serrage, tout cela en gardant un compromis raisonnable entre les exigences techniques et le coût de ces matériaux.

4. REFERENCES

- [1] F. J. Waldhart, J. P. Bacher, et G. Maier, « Modeling eddy current losses in the clamping plate of large synchronous generators using the finite element method », in *Automation and Motion International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives*, juin 2012, p. 1468-1473. doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264435.
- [2] Mecrow, B. C., Jack, A. G., & Cross, C. S. (1989, September). Turbogenerator electromagnetic design-the design of eddy current shields for screening of end-regions. In 1989 Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives Conf. Publ. No.??) (pp. 111-115).
- [3] H. M. Hamalainen, J. Pyrhonen, J. Nerg, et J. Puranen, « 3-D Finite Element Method Analysis of Additional Load Losses in the End Region of Permanent-Magnet Generators », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no 8, p. 2352-2357, août 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2190741.
- [4] A. Stermecki, O. Biro, I. Bakhsh, S. Rainer, G. Ofner, et R. Ingruber, « 3-D Finite Element Analysis of Additional Eddy Current Losses in Induction Motors », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no 2, p. 959-962, févr. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2011.2173919.
- [5] Y. Liang, H. Yu, et X. Bian, « Finite-Element Calculation of 3-D Transient Electromagnetic Field in End Region and Eddy-Current Loss Decrease in Stator End Clamping Plate of Large Hydrogenerator », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no 12, p. 7331-7338, déc. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2460231.
- [6] W. M. A. Mohand Oussaid, A. Tounzi, R. Romary, A. Benabou, D. Laloy and W. Boughanmi, "Investigation of Losses in Fingers and Clamping Plates of High-Power Electrical Machines," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2022, pp. 2187-2192, doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910787.
- [7] M. Jamil, A. Benabou, S. Clenet, L. Arbenz, J.-C. Mipo, Development and validation of an electrical and magnetic characterization device formative parallelepiped specimen, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* (2019) S1–S8, <https://doi.org/10.3233/JAE-191491>.
- [8] *Code Carmel*, LAMEL (L2EP & EDF R&D), version 2.2.0 du 30/09/2021, <https://de-carmel.univ-lille.fr/>.