

Modèle multiphysique pour la prédiction du rayonnement acoustique d'une bobine électrique à noyau d'air

A. Benamar¹, P. Gning¹, N. Dauchez¹, V. Lanfranchi¹, K. Bouayed²,

¹ Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, CNRS, FRE 2012 Roberval, Centre de recherche Royallieu, CS 60 319, 60203 Compiègne cedex, France

² ESI Group, Compiègne, France

Résumé — En raison des normes environnementales, il est nécessaire de trouver des solutions de réduction du bruit pour les dispositifs à haute tension. L'objectif de cet article est de prédire la réponse vibroacoustique d'une bobine à noyau d'air monocouche à partir de son alimentation électrique. L'excitation prise en compte est la force de Laplace. Ce champ est créé par la bobine grâce au courant appliqué à son entrée. Le modèle multiphysique présenté est le résultat d'un chaînage de différents logiciels numériques pour le calcul électromagnétique, mécanique et vibroacoustique. Le modèle électromagnétique permet de calculer la distribution et les amplitudes des forces de Laplace appliquées sur la structure mécanique de la bobine. Le modèle mécanique permet de déterminer la base modale de la bobine sur laquelle les forces de Laplace sont appliquées. Enfin, la réponse vibroacoustique modale est calculée sur la base des résultats précédents. Une validation expérimentale du modèle est présentée pour une bobine de haut-parleur.

Mots clés — Vibroacoustique, Electromagnétique, Couplage multiphysique.

1 Introduction

Face aux normes environnementales, les solutions de réduction du bruit pour les appareils à haute tension comme les inductances et les réacteurs sont nécessaires. Ces appareils génèrent un champ électromagnétique qui interagit avec le courant électrique faisant vibrer la structure qui à son tour émet du bruit. Dans cet article, nous nous concentrons sur les bobines à noyau d'air utilisées dans les réseaux électriques. La figure 1 montre une inductance à air composée de plusieurs bobines concentriques séparées par des entretoises. L'étude du bruit d'origine électromagnétique est un sujet de recherche depuis

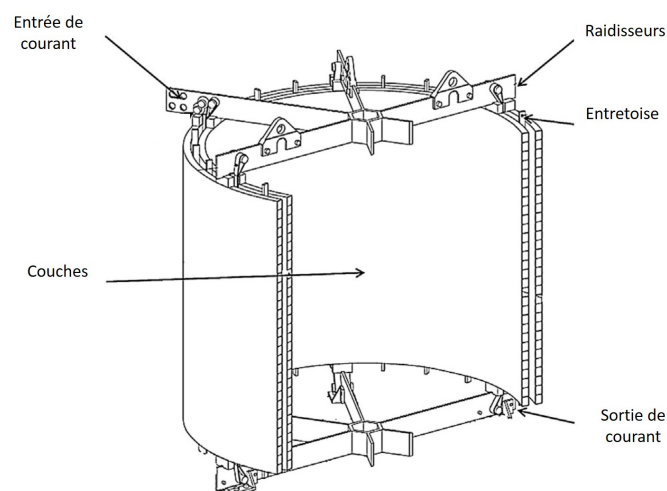


FIGURE 1 – Réacteur industriel à noyau d'air

plusieurs décennies [1]. Différentes méthodes analytiques ou numériques ont été développées en fonction de l'appareil étudié. Ces appareils peuvent être des machines électriques ou des inductances à noyau de fer. La grande partie des sujets traités dans la littérature concerne les dispositifs constitués de matériaux

ferromagnétiques. Dans le domaine des machines tournantes, Lebesnerais [2] a développé un modèle analytique multiphysique reliant les forces de Maxwell à un modèle vibroacoustique pour effectuer une boucle d'optimisation. Les modèles numériques [3] permettent d'obtenir une information plus détaillée de la répartition du bruit autour de la machine. D'autres études prennent en compte des facteurs influents tels que la conception [4], la température [5] ou les propriétés viscoélastiques de la résine du stator [6]. Dans une approche orientée vers la dynamique des structures, Baldizzone [7] a proposé une méthode expérimentale pour identifier les fréquences critiques afin de réduire le risque de dommages mécaniques. Enfin, concernant le sujet des bobines à noyau d'air aucune étude numérique multiphysique n'a été réalisée à la connaissance des auteurs. Seule une étude multiphysique analytique est proposée pour une bobine monocouche simplifiée. En effet, des hypothèses fortes sont posées pour simplifier le calcul analytique de la densité de flux (constante à l'intérieur de la bobine) cela n'est plus valable pour un petit rapport de la hauteur/rayon de la bobine simple ou multicouche.

L'objectif de cet article est de prédire le comportement vibroacoustique d'un réacteur à noyau d'air monocouche à partir de son alimentation électrique et jusqu'à sa réponse acoustique. Le modèle multiphysique couplant électromagnétique, mécanique et vibroacoustique est d'abord présenté. Ce modèle reprend les travaux de thèse de P. Gning [8, 9] avec une mise à jour de la chaîne de calcul. La chaîne de calcul est ensuite appliquée dans le cas d'une bobine de 0.1 m de diamètre et 0.018 m de hauteur (voir la figure 2), destinée à la fabrication de haut-parleurs. Les résultats obtenus sont finalement comparés à des résultats expérimentaux.

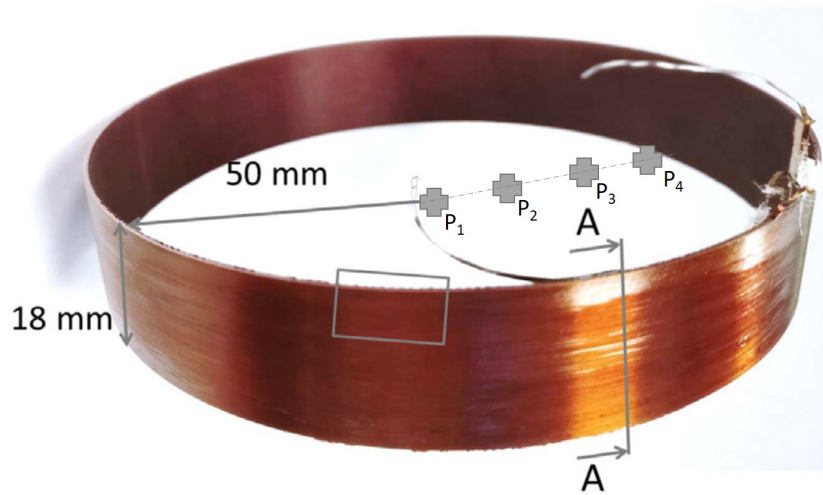


FIGURE 2 – Bobine d'un haut parleur

2 Modèle multiphysique

Dans cette section, le modèle multiphysique associant l'électromagnétisme, la mécanique des structures et la vibroacoustique est présenté.

2.1 Base théorique

Lorsqu'une densité de courant $\vec{J}$ est appliquée sur une bobine, un champ $\vec{B}$ est généré. Le courant va alors interagir avec la densité de flux $\vec{B}$ pour générer des forces de Laplace dont la densité $d\vec{F}_L$ est donnée par :

$$d\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

La figure 3 montre la distribution des forces de Laplace et la densité du flux sur la section (A-A) de la bobine. Après avoir calculé la force de Laplace, un calcul mécanique est effectué pour déterminer la base modale solution de :

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] \Theta_m = 0, \quad (2)$$

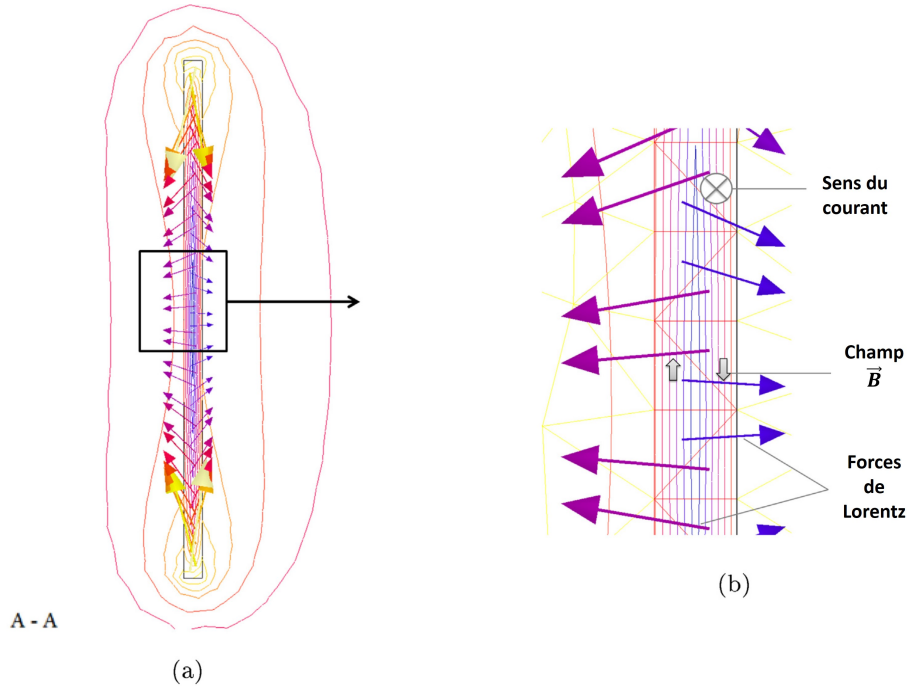


FIGURE 3 – (a) Section (A-A) de la bobine (b) Vue agrandie de la section (A-A) avec les forces de Laplace F_L et le champ B .

avec $\mathbf{K}$ la matrice de rigidité, $\mathbf{M}$ la matrice de masse, m le rang du mode et Θ_m la base modale. Afin de pouvoir faire le calcul modal, les forces modales F_{Lm} sont déterminées à partir de des forces de Laplace F_L par :

$$F_{Lm} = \int_V \Theta_m(x, y, z) \cdot dF_L(x, y, z) dV. \quad (3)$$

Les forces modales de Laplace sont utilisées par la suite pour le calcul des accélérations de la réponse dynamique de la structure. Le calcul vibroacoustique est réalisé par la suite et s'écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}(1 + j\eta) - \omega^2 \mathbf{M} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{Lm} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

avec η le coefficient d'amortissement de la structure, $\mathbf{W}$ le champ de déplacement, $\mathbf{P}$ la pression acoustique et $\mathbf{C}$ la matrice de couplage entre la structure et le fluide.

2.2 Etapes de calcul

Le calcul multiphysique est constitué de 4 étapes comme le montre la figure 4 :

- L'étape 1 est un calcul électromagnétique utilisant le logiciel libre FLUX3D [10] qui permet de résoudre les équations de Maxwell. L'entrée est la densité de courant électrique $\vec{J}$ et la sortie est le champ de forces de Laplace $\vec{F}_L$ dans le volume du conducteur de la bobine. Les résultats sont calculés en régime harmonique, c'est-à-dire à une seule fréquence.
- L'étape 2 est le calcul de la base modale avec le logiciel Nastran [11].
- L'étape 3 est la détermination des forces modales F_{Lm} en projetant les forces modales F_L sur la base modale calculée à l'étape 2 en utilisant une routine développée à cet effet.
- Dans l'étape 4 les forces modales et la base modale sont utilisées pour le calcul vibroacoustique sur le logiciel VaOne distribué par ESI group.

Des outils numériques ont été développés pour assurer le transfert et la projection des forces de Laplace du maillage électromagnétique au maillage mécanique. De plus, les maillages associés pour effectuer ce calcul multiphysique sont différents et dépendent de la physique prise en compte. Pour le calcul électromagnétique, il est nécessaire de mailler à la fois la bobine et le volume d'air qui l'entoure. Le volume intérieur de la bobine est maillé plus finement pour pouvoir voir les variations du champ $\vec{B}$. Ainsi, un maillage tétraédrique est utilisé. Le nombre d'éléments total est de 240 179 dont 12 811 dans le volume

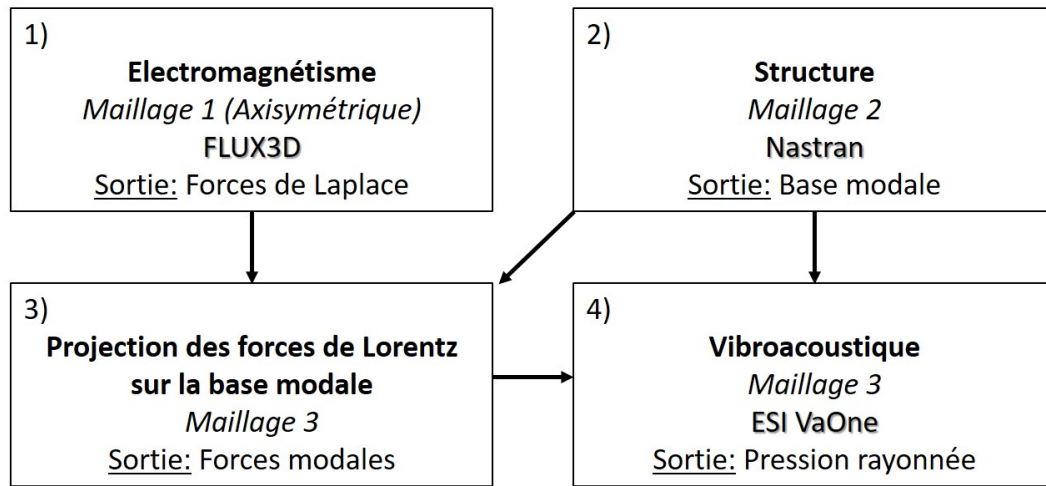


FIGURE 4 – Etapes de la chaîne de calcul multiphysique.

du conducteur. Le maillage de la structure consiste à discrétiser la structure de la bobine. Ce maillage est composé de 1440 éléments d’hexaèdre avec 12 nœuds dans le sens axial un seul élément dans le sens radial. Le couplage vibroacoustique est réalisé sur le Logiciel ESI VaOne. Le solveur BEM (Boundary Element Method) utilisé est basé sur une formulation de Galerkin pour les variables acoustiques (pression et vitesse) et permet l’utilisation de la formulation indirecte basée sur le saut de pression. La méthode des éléments de frontière ne nécessite qu’un maillage de surface de la peau externe de la bobine (6240 éléments triangulaires) et le problème acoustique est ensuite résolu en calculant le saut de pression.

3 Application : bobine monocouche

3.1 Description de la bobine

La méthode décrite précédemment est appliquée sur une bobine destinée pour la fabrication de haut-parleurs. Les dimensions de la bobine sont données dans le tableau 1. Le fil est fait de cuivre, dont les propriétés sont données dans le tableau 2. La bobine est imprégné d’une fine couche de résine et les spires sont tenues ensemble par un film en kapton de 0.1 mm d’épaisseur qui est négligée dans le modèle.

TABLE 1 – Dimensions de la bobine.

	Valeur	Unité	Symbole
Rayon extérieur	5 E-2	m	R
Hauteur	1.8 E-2	m	H
Nombre de tour	106		N
Longueur fil	33.3	m	L
Largeur fil	6.5 E-4	m	h
Epaisseur fil	1.7 E-4	m	e

TABLE 2 – Propriétés du cuivre utilisé.

	Valeur	Unité	Symbole
Masse volumique	89.2	Kg/m ³	μ
Module de Young	124	GPa	E
Coefficient de Poisson	0.33		ν

3.2 Résultats

Dans cette section la réponse vibroacoustique de la bobine présentée dans les tableaux 1-2 est calculée sur la base de la chaîne de calcul multiphysique précédemment définie. La première consiste à calculer le champ de forces de Laplace pour une alimentation en courant de 0.5 A RMS. La figure 5 montre le champ magnétique $\vec{B}$ créé ainsi que le champ des forces volumiques de Laplace associées.

Après calcul de la base modale et projection des forces de Laplace, un calcul vibroacoustique est réa-

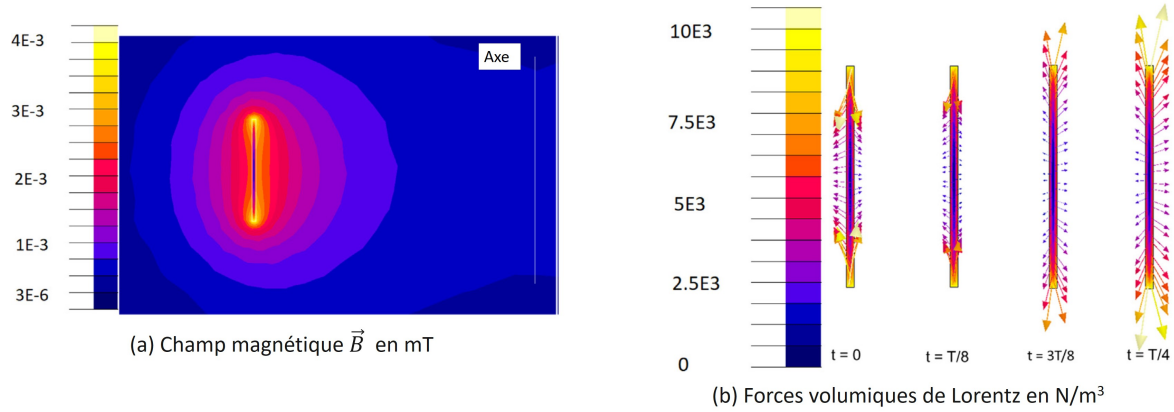


FIGURE 5 – (a) Champ magnétique $\vec{B}$. (b) Forces de Laplace à 4 instants de la période T d'excitation.

lisé. La figure 6 montre le niveau de pression acoustique sur une bande de fréquence [0-16000] Hz pour différentes positions dans la bobine. Comme le montre le résultat, le mode de structure (0,0) est celui qui rayonne le plus. Bien qu'ils soient clairement apparents, les modes (2,0) et (3,0) contribuent moins au rayonnement acoustique de la structure comme le montre la figure 6. Une validation expérimentale

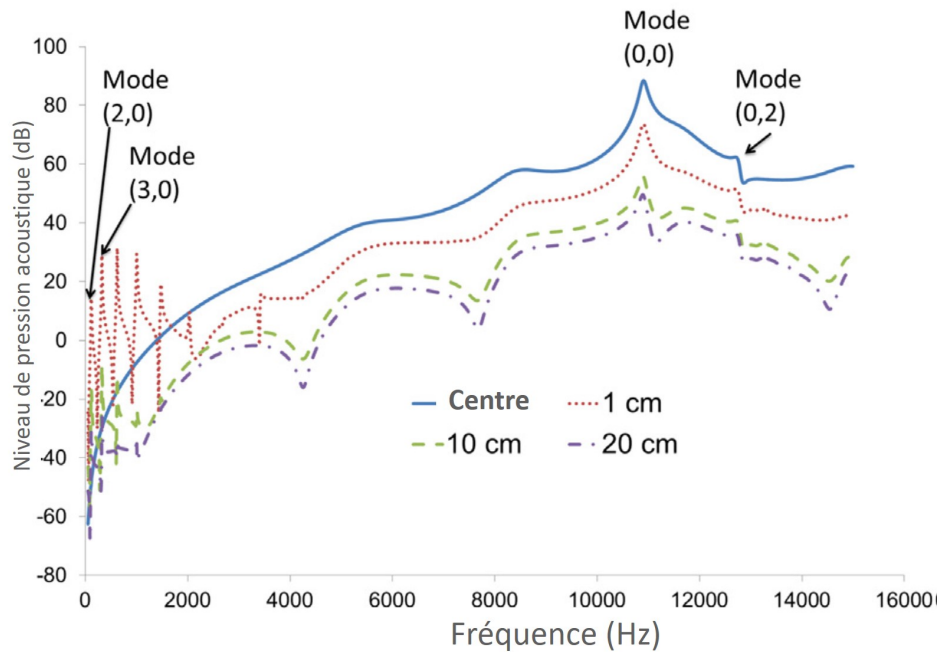


FIGURE 6 – Réponse fréquentielle de la bobine pour différentes distances du centre.

est réalisée permettant ainsi de comparer les résultats numériques à des valeurs de référence. La bobine présentée dans la figure 2 est utilisée. Une mesure microphonique est réalisée au niveau des 4 positions (P_1, P_2, P_3, P_4) montrée sur la figure. La figure 7 montre une comparaison mesure/calcul autour des modes (0,0), (2,0) et (3,0). La comparaison montre une bonne concordance des résultats numériques et expérimentaux.

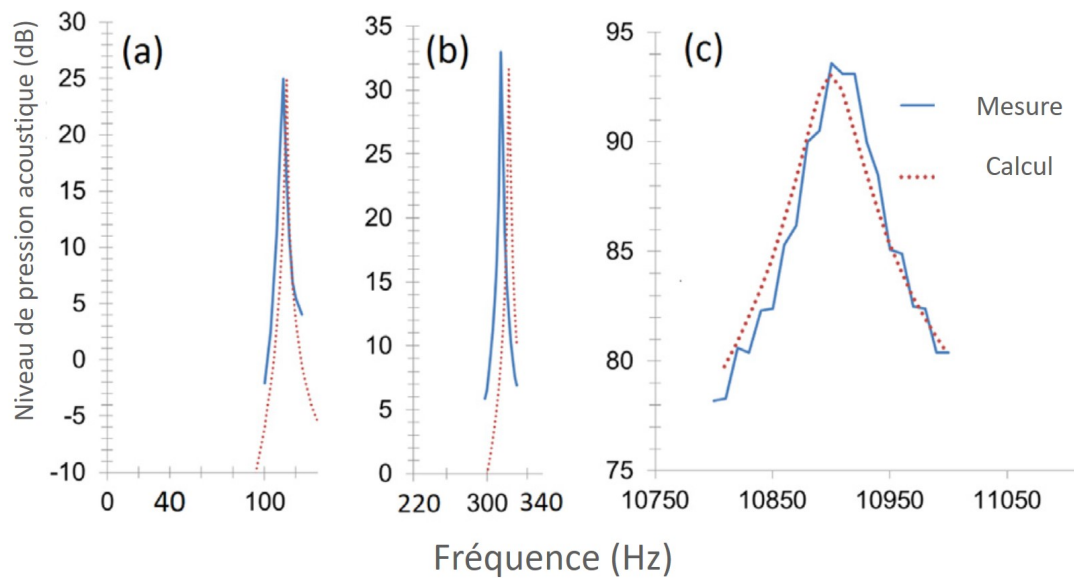


FIGURE 7 – Comparaison des niveaux de pression acoustique simulés et mesurés autour des fréquences des modes de structure : (a) mode (2,0) ; (b) mode (3,0) ; (c) mode (0,0).

4 Conclusion

Un modèle multiphysique de calcul de la réponse vibroacoustique d'une bobine à noyau d'air à partir de son alimentation électrique harmonique a été proposé. Ce modèle consiste à calculer en différentes étapes, la réponse électromagnétique, le champ de force de Laplace associé, la base modale de la structure de la bobine, la projection des forces de Laplace sur la base modale et finalement utiliser les résultats des différentes étapes pour calculer la réponse vibroacoustique de la structure. Ce modèle a été validé avec succès avec des expériences réalisées. Les résultats acoustiques finaux montrent la nécessité de concevoir des configurations optimisées pour réduire le bruit rayonné. Dans ce cadre, le modèle a été utilisé pour l'étude d'une solution innovante dite bobine ajourée qui permet de réduire considérablement le bruit de bobine. Cette solution a fait l'objet d'un dépôt de brevet [12].

5 Remerciements

Nous tenons à remercier la SATT LUTECH et RTE pour le suivi et le financement de ce projet.

Références

- [1] Jacek F. Gieras, Chong Wang, and Joseph Cho Lai. *Noise of polyphase electric motors*. Clarendon Press, 2005.
- [2] Jean Le Besnerais, Aurélie Fasquelle, Michel Hecquet, Julien Pellé, Vincent Lanfranchi, Souad Harmand, Pascal Brochet, and Andry Randria. Multiphysics modeling : Electro-vibro-acoustics and heat transfer of PWM-fed induction machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57(4) :1279–1287, 2010.
- [3] Chenjie Lin and Babak Fahimi. Prediction of acoustic noise in switched reluctance motor drives. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 29(1) :250–258, 2014.
- [4] A Tan-Kim, V Lanfranchi, S Vivier IEEE Transactions ..., and Undefined 2016. Vibro-acoustic simulation and optimization of a claw-pole alternator. *ieeexplore.ieee.org*.
- [5] A Tan-Kim, V Lanfranchi, J. Legranger, F. Palleschi, and M. Redon. Influence of temperature on the vibro-acoustic behavior of claw-pole alternators. In *Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2014*, pages 1628–1634, 2014.
- [6] Pierre Millithaler, Jean Baptiste Dupont, Morvan Ouisse, Émeline Sadoulet-Reboul, and Nouredine Bouhaddi. Viscoelastic property tuning for reducing noise radiated by switched-reluctance machines. *J. Sound Vib.*, 407 :191–208, oct 2017.

- [7] Stefano Baldizzone, Colin J. Novak, and Narayan C. Kar. Experimental investigations of noise and vibration in electric machines. In *2012 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo, ITEC 2012*, 2012.
- [8] Paul Gning, Vincent Lanfranchi, Nicolas Dauchez, and Kaiss Bouayed. Multiphysics model for predicting the sound radiation of a single-layer air-core coil. *Appl. Acoust.*, 146 :327–333, mar 2019.
- [9] Paul Gning, Vincent Lanfranchi, and Nicolas Dauchez. Influence of the multi-component electrical feed of air-core industrial reactors on their sound radiation. *Acta Acust.*, 4(4) :14, 2020.
- [10] Analyse électromagnétique, électrique et thermique | Altair Flux (<https://altairengineering.fr/flux/>).
- [11] MSC Nastran (<https://www.mscsoftware.com/fr/product/msc-nastran>).
- [12] Nicolas Dauchez, Vincent Lanfranchi, and Paul Gning. Bobine électrique à faible rayonnement acoustique (Patent pending W0202/157081), 2020.