



HAL
open science

Dynamique d'une structure feuillée-soudée d'un stator de moteur de traction ferroviaire: essais et validation de modèles

Sid Ahmed Chentouf, Sheng Jun Huang, Jean-Louis Raynaud, Claude Laitem, Nouredine Bouhaddi

► To cite this version:

Sid Ahmed Chentouf, Sheng Jun Huang, Jean-Louis Raynaud, Claude Laitem, Nouredine Bouhaddi. Dynamique d'une structure feuillée-soudée d'un stator de moteur de traction ferroviaire: essais et validation de modèles. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413609

HAL Id: hal-01413609

<https://hal.science/hal-01413609>

Submitted on 10 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Dynamique d'une structure feuillée-soudée d'un stator de moteur de traction ferroviaire: essais et validation de modèles

S.A. Chentouf¹, S-H. Huang¹, J-L Raynaud¹, C. Laitem², N. Bouhaddi¹

¹ Femto-ST, UMR 6174, Laboratoire de Mécanique Appliquée R. Chaléat (Université de Franche Comté)
24 Chemin de l'Épitaphe – 25000 Besançon
sidahmed.chentouf@femto-st.fr

² ALSTOM Transport
7, avenue de Lattre de Tassigny – 25290 Ornans
claude.laitem@transport.alstom.com

Résumé — La maîtrise du comportement dynamique des moteurs de traction ferroviaire est un enjeu majeur pour garantir leur fiabilité de fonctionnement. Le stator est particulièrement ciblé en raison de sa structure feuilletée et de l'assemblage de ses bobines. L'objectif de ce papier est de comprendre et modéliser de façon fiable ces deux composants. Une approche par homogénéisation du feuilleté a permis d'en valider un modèle éléments finis. Une approche par étapes de l'effet des bobines sur le stator a permis d'en retenir une modélisation représentative.

Mots clés — Dynamique / Stator ferroviaire / Feuilleté / Bobines / Règles modélisation.

Introduction

Une modélisation fiable du comportement dynamique des moteurs de traction ferroviaire passe obligatoirement par la maîtrise du comportement du stator. Beaucoup d'études se focalisent sur divers points de ce dernier à cause de l'assemblage particulier de ses composants, notamment son cœur feuilleté et ses bobines enroulées et insérées. Le stator subit en plus un traitement d'imprégnation par une vapeur de résine qui affecte son comportement. Ces aspects en font un assemblage complexe et très hétérogène. Des règles génériques et pratiques de modélisation sur les composants du stator sont un aspect encore peu développé.

Ceci constitue l'objectif principal de cette étude. Le but à terme est d'établir une modélisation fiable en fonction des caractéristiques de l'empilement de tôles ainsi que des bobines.

Des approches analytiques ont été menées par Verma, Singal et Williams [2] et [5] et des tendances de comportement des feuilletés ont été dégagées notamment l'effet de la hauteur de l'empilement. Garvey [1] ainsi que Wang et Williams [6] ont étudié l'effet de l'empilement sur les types de déformées d'un cylindre stratifié. Watanabe [3] a réalisé une étude expérimentale détaillée traitant les effets du feuilleté, des bobines, de l'imprégnation et de la température sur l'ensemble du stator.

Nous traitons ici le cas d'un design de stator différent. En effet, il est question ici d'un stator feuilleté-soudé contrairement aux stators précédents qui sont feuilletés-frettés dans une carcasse. Nous cherchons à établir, en plus du modèle fiable, une série de règles de modélisation génériques en fonction des paramètres matérielles et géométriques du stator.

Dans la suite du papier, nous allons présenter l'étude expérimentale et la modélisation de la structure du stator en deux phases : sans et avec ses bobines afin de comprendre l'effet de chacun de ces composants séparément et d'en proposer et de valider des modèles génériques.

1 Présentation de la structure du stator

Le type de structures de stator étudié ici est globalement un assemblage de 3 composants principaux:

Le cœur du stator ou feuilleté (Figure 2) : Le cœur du stator est un empilement de centaines de feuilles de tôles très fines.

La carcasse: soudée directement sur quelques zones du cœur du stator, elle maintient l'empilement de tôles de l'extérieur.

Le bobinage (Figure 1): bobines insérées dans les encoches du cœur feuilleté. Leurs extrémités, sont tressées, en porte-à-faux par rapport aux extrémités du stator et sont reliées entre elles par un anneau en cuivre.

Le stator assemblé est imprégné par une vapeur de résine.

Contrairement aux stators frettés dans une carcasse, étudiés dans la littérature, la structure à laquelle nous nous intéressons est feuilletée et maintenue par des entretoises. Cette variante implique que la distribution de la rigidité de la carcasse n'est pas uniforme autour du feuilleté.

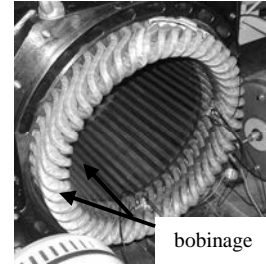


Figure 1 – Stator équipé

2 Etude du stator nu et validation de son modèle éléments finis

Des essais d'analyse modale sur le stator nu et une modélisation appropriée par éléments finis ont été réalisés. Pour compléter cette dernière, nous proposons un modèle analytique du feuilleté. Nous analysons la modélisation du stator par sensibilité sur les composants ; ce qui permettra à terme de la recalculer aux résultats expérimentaux.

2.1 Analyse expérimentale

La figure 2 illustre le montage en libre-libre de la structure, un pot vibrant électrodynamique pour une excitation en bruit blanc, plus appropriée pour ce type de structures, ainsi que la disposition des capteurs accélérométriques. La structure est instrumentée en 65 points de manière optimale de telle sorte qu'un maximum de modes propres soit identifié dans la bande fréquentielle d'intérêt [0,2600 Hz].

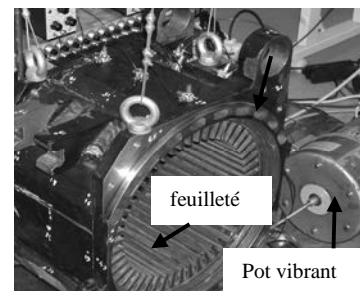


Figure 2 – Montage du stator nu en suspension libre-libre

2.2 Modélisation éléments finis

2.2.1 Présentation du modèle

Le modèle éléments finis proposé représente les parties de la structure avec leur géométrie réelle. Le feuilleté est représenté par un volume homogène équivalent (Figure 3). Les matériaux de la carcasse sont connus et ne pose *a priori* aucun problème d'estimation. L'empilement de tôles, comme étudié dans [6], a un comportement très différent de celui d'un cylindre isotrope. Une modélisation en matériau orthotrope est donc plus appropriée [4]. D'après les travaux [6], un modèle « plan » où la modélisation d'une seule feuille suffirait à

déterminer tous les modes globaux de la structure feuilletée épaisse, n'est pas retenu dans notre cas. Si les travaux [5] et [6] montrent que les amplitudes des déformées non radiales pures sont très faibles pour un feuilleté et que seuls les modes radiaux plans, déterminés par une modélisation plane, subsistent, dans le cas présenté ici, seuls 2 modes sur 9 identifiés sont radiaux plans. Ceci peut s'expliquer par le design « en entretoises » de la carcasse contrairement au design « fretté » précédent. La difficulté principale de la modélisation est donc d'estimer les coefficients d'un matériau représentatif du comportement d'un empilement de tôles.

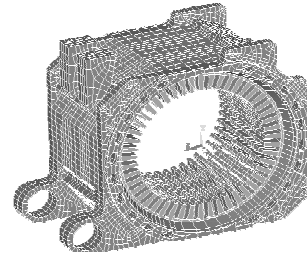


Figure 3 – Modélisation éléments finis du stator nu

2.2.2 Problème direct : estimation des paramètres par méthode d'homogénéisation

La technique adoptée pour estimer les paramètres matériaux du feuilleté est une approche d'homogénéisation. Son principe est de calculer les coefficients d'un stratifié contenant N couches de tôles et $(N-1)$ couches de résine. Deux méthodes sont proposées : la méthode des lois des mélanges et une méthode spécifique aux structures stratifiées périodiques. La première a l'avantage d'être pratique mais elle est peu fiable pour les matériaux orthotropes notamment pour estimer les coefficients de Poisson. Nous avons donc proposé d'y imposer des coefficients de Poisson nuls. Nous avons ainsi fait l'hypothèse que le feuilleté est assimilé à un matériau composite dans la limite d'un découplage entre ses comportements axial et longitudinal. La deuxième est plus fiable pour un matériau composite homogène, ce qui n'est pas tout à fait le cas du feuilleté du stator car la cohésion de ce dernier n'est pas assurée par sa résine (matrice) mais par la carcasse soudée qui l'entoure.

L'analyse des résultats des deux méthodes montre que les lois des mélanges considérées avec des coefficients de Poisson nuls sont les plus représentatives. Tous les modes mesurés sont en effet retrouvés par le modèle contrairement à la deuxième méthode. Les écarts fréquentiels sont compris entre -13% et 7.9% comparé à ceux de la deuxième, compris entre -13% et 18%. Les MAC sont compris entre 81% et 96%. La deuxième méthode donne des MAC compris entre 77% et 94%.

2.3 Confrontation mesure-calculs et validation du modèle

2.3.1 Sensibilité des paramètres

Par le recalage nous corrigeons les résultats du modèle en ajustant ses paramètres aux résultats expérimentaux. Afin d'optimiser le nombre de paramètres à ajuster, nous réalisons une étude à partir de la sensibilité sur le modèle. Par une procédure de simulation de *Monte Carlo* sur les paramètres, les tendances sur les fréquences propres et les déformées modales sont calculées. Des coefficients de corrélation (écarts sur sorties; variations paramètres entrés) sont analysés, ce qui permet de sélectionner les paramètres influents sur les premiers modes propres. Les coefficients du matériau du feuilleté sont ainsi sélectionnés pour le recalage et sont initialisés aux valeurs calculées par la méthode d'homogénéisation précédente.

2.3.2 Recalage de modèle par la méthode de sensibilité

La technique choisie pour le recalage est celle de la sensibilité. Elle consiste à minimiser les distances entre les grandeurs de sortie, qui sont les fréquences propres et les déformées modales, mesurées et calculées. La méthode se base sur le développement au premier ordre suivant :

$$y_v^{ex} = y_v^a + \sum_{i=1}^p \frac{\partial y_v^a}{\partial k_i} dk_i \quad (1)$$

$$\lambda_v^{ex} = \lambda_v^a + \sum_{i=1}^p \frac{\partial \lambda_v^a}{\partial k_i} dk_i \quad (2)$$

Où : y_v^{ex}, y_v^a respectivement les v^{ieme} vecteurs propres expérimental et actualisé,

$\lambda_v^{ex}, \lambda_v^a$ respectivement les v^{ieme} fréquences propres expérimentale et actualisée

p : Nombre de composants de la structure,

k_i : Paramètre du composant i .

Mode exp	Mode avant recalage	$\Delta f/f$ %	MAC %	Mode après recalage	$\Delta f/f$ %	MAC %
#1	#1	-2.5	92	#1	-0.25	93
#2	#2	+7.9	96	#2	0.77	97
#3	#3	+6.1	93	#3	1.6	93
#4	#4	-6.5	94	#4	-2.06	94
#5	#5	+4.8	81	#5	2.74	84
#6	#7	+6.9	95	#6	1.71	95
#7	#9	+6.5	86	#7	0.77	85
#8	#8	-3.1	90	#8	0.54	86
#9	#6	-13	81	#9	1.91	85

Tableau 2. Corrélations mesures - modèle stator nu

fréquentiels sont inférieurs à 3% et les corrélations des déformées modales supérieures à 84%.

L'homogénéisation sera retenue comme une bonne méthode d'estimation des coefficients du feuilleté du stator. Quant à l'écart résiduel sur les modes à l'issue du recalage de modèle, il peut se justifier par la difficulté d'estimer la fraction volumique de la résine dans le feuilleté ou par des paramètres externes tels que les contraintes résiduelles dans les soudures.

3 Etude et modélisation du stator bobiné

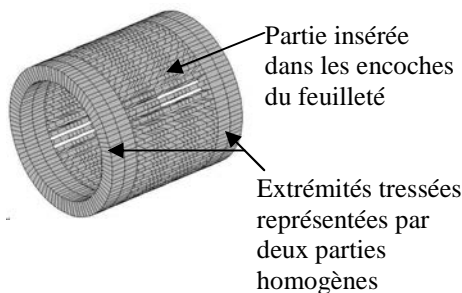


Figure 4 – Géométrie globale adoptée pour le modèle des bobines

Nous construisons un modèle éléments finis en reprenant le modèle du stator nu validé et nous y intégrons un volume « bobines » (Figure 4) dont une partie est insérée dans les encoches du feuilleté et les extrémités libres et « tressées » sont modélisées par des anneaux.

3.1 Résultats expérimentaux du stator équipé

Les résultats expérimentaux (Figure 5) confirment les tendances observées dans [3] à savoir un arrondissement des pics de résonance, la chute des amplitudes ainsi que la baisse globale des fréquences propres. En effet l'amplitude maximum des résonances passe de 0.5 g/N dans le cas

Un écart mesure – calcul minimal est approché par sensibilisation du modèle par rapport à ses paramètres influents. L'écart constitue la fonction coût qui est minimisée au cours d'un processus itératif. Les résultats des corrélations avant et après recalage du modèle sont présentés Tableau 2. A l'issue du recalage, tous les modes identifiés expérimentalement sont maintenant prédits par le calcul y compris les modes de déformées non radiales pures, contrairement à une modélisation plane. Les écarts

Nous réalisons des analyses modales expérimentales sur le stator bobiné, avec l'objectif d'établir des règles de modélisations génériques. Nous choisissons ici de modéliser la totalité des bobines avec leurs extrémités tressées libres, contrairement aux modélisations rencontrées qui représentaient uniquement les parties insérées dans le feuilleté.

Un stator, avec ses bobines, de même série que le stator précédent est complètement étudié. Nous reproduisons la même procédure d'essai que celle mise en place dans le cas du stator nu.

du stator nu à 0.02 g/N dans le cas du stator bobiné. Par ailleurs, un couplage important est observé entre les premières déformées modales qui ne sont plus apparentées à des déformées types de cylindre, comme c'est le cas pour le stator nu. L'introduction des bobines rajoute, en plus de la masse, des raideurs localisées à l'ensemble du stator bobiné.

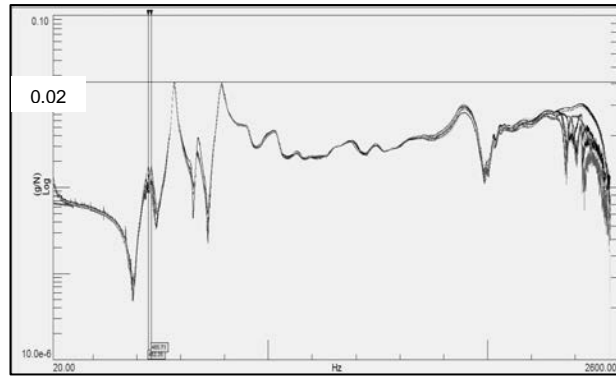
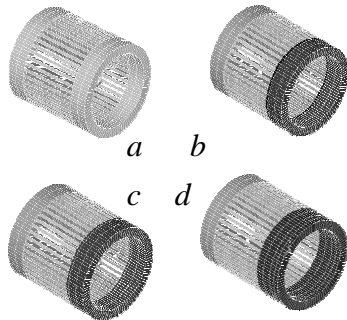


Figure 5 – FRFs stator bobiné – bande utile [0-2600Hz]

3.2 Différentes modélisations des bobines

Compte tenu des résultats expérimentaux, une approche progressive de modélisation est réalisée à travers 4 modélisations successives des bobines: *a*, *b*, *c* et *d* (Figure 6):



Modèle a : Monobloc. Le matériau choisi est le cuivre.

Modèle b : 5 blocs *isotropes* de matériaux différents : 2 extrémités libres, 1 bloc central encastré dans les encoches du feuilleté et 2 zones de liaisons.

Modèle c : 3 blocs *orthotropes* de matériaux différents : 1 bloc central et 2 extrémités libres.

Modèle d : 4 blocs *orthotropes* de matériaux différents : 1 bloc central, 2 extrémités libres. Une des extrémités comprend 2 matériaux distincts. Cette modélisation est la plus proche de la géométrie réelle ; elle tient compte du cercle extrémité en cuivre d'alimentation électrique.

Figure 6 – Modélisations des bobines

3.3 Corrélations mesure-calculs et modélisation retenue

Quelques résultats des corrélations mesures-modèles sont illustrés Figure 7. Une modélisation simplifiée *a* des bobines ne suffit pas à prédire tous les modes. Des modélisations plus riches : *b*, *c* et *d* sont envisagées. La modélisation *b* est fine car elle représente toutes les zones des bobines. Elle reste néanmoins peu pratique. La modélisation *c* est identique à *a* mais introduit des matériaux orthotropes. La modélisation *d*, plus fidèle à la géométrie réelle, donne les meilleures corrélations mesures-modèle avec un maximum de modes prédits, un écart fréquentiel de moins de 5% et des MAC supérieurs à 84%. Elle sera retenue pour l'établissement de règles de modélisation sur les bobines. L'étape à venir est de justifier les valeurs des matériaux de *d* par une approche prédictive. A noter qu'à ce stade de l'étude aucun recalage de modèle n'a été effectué, car non nécessaire, au vue des erreurs acceptables obtenues par le modèle *d*.

4 Conclusion

La modélisation d'un stator de machine de traction ferroviaire est peu aisée au vue de la complexité des composants qu'elle doit prendre en compte. Une modélisation plane ne peut être retenue pour le type de stator étudié car elle ne prédit pas suffisamment de modes de type « hors plan de tôles », réellement présents dans la structure réelle.

L'établissement de règles de modélisation génériques pour de telles structures est un processus qui a été décomposé ici en deux phases : étude du stator nu et ensuite du stator équipé de ses bobines. Des essais dynamiques de validation ont été réalisés lors de chaque phase.

Etude du stator nu :

Une méthode d'homogénéisation du feuilleté du stator, partie délicate de la modélisation, a été proposée. Un modèle éléments finis, utilisant les résultats de cette méthode, a été construit et validé par un recalage basé sur la méthode de sensibilité.

Etude du stator équipé :

Les bobines modifient de façon notable la masse et la rigidité du stator et apporte un niveau d'amortissement important. Plusieurs modélisations ont été proposées et corrélées aux résultats d'essais. Une modélisation simplifiée monobloc du composant « bobines » ne peut être retenue car elle ne peut prédire plus de 2 modes globaux sur 9. Seule une modélisation multi-blocs utilisant des matériaux orthotropes peut prédire les premiers modes globaux de la structure.

Un plan d'expérience numérique sur les paramètres des bobines permettra de compléter cette étude dans l'objectif d'établir des règles de modélisation/conception du bobinage et par conséquent du stator équipé. D'autres études à venir concerneront l'analyse des dispersions sur plusieurs moteurs de même design ; l'objectif visé est la conception robuste de ces structures.

La prédiction de l'amortissement par le calcul des niveaux vibratoires est également une étude intéressante que l'on peut envisager.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier ALSTOM-Transport pour le financement de cette étude.

5 Références

[1] S.D Garvey. The vibrational behaviour of laminated component in electrical machine. The 4th International Conference on Electrical Machines and Drives. p226-231- 1989
 [2] R.K Singal, S.P Verma and K. Williams. Vibrations of long and short laminated stators of electrical machines. Part III: Results for short stators and validity of simplified frequency equation. *Journal of Sound and Vibration* 129(1), page31- page 44,1989
 [3] S. Watanabe, S. Kenjo, K.Ide, F. Sato, M. Yamamoto Natural frequencies and vibration behaviour of motor stators. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No.4 April 1983.
 [4] C. Wang and J.C.S. Lai.. Vibration Analysis of an induction Motor. *Journal of Sound and Vibration* 224(4), page 733 – page 756,1999.
 [5] K. Williams, R.K Singal and S.P Verma. Vibrations of long and short laminated stators of electrical machines. Part II: Results for long stators *Journal of Sound and Vibration* 129(1), page 15 - page 29, 1989
 [6] H. Wang and K. Williams. Effects of laminations on the vibrational behaviour of electrical machine stators. *Journal of Sound and Vibration* 202(5), page 703- page 715, 1997.

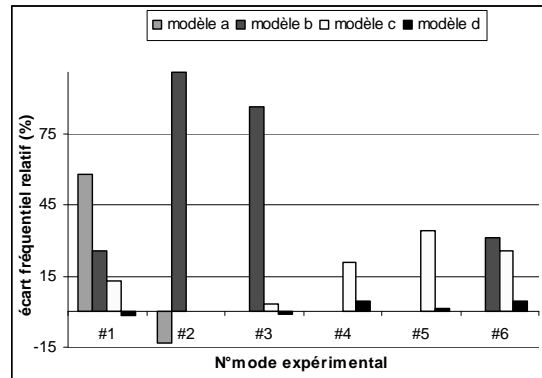


Figure 7–Stator bobiné: corrélations fréquentielles mesures - modèles