

# Modèle dynamique de stators de moteurs ferroviaires

S-A. CHENTOUF<sup>a</sup>, J-L. RAYNAUD<sup>a</sup>, S-J. HUANG<sup>a</sup>, N. BOUHADDI<sup>a</sup>, C. LAITEM<sup>b</sup>

a. Institut Femto-st, UMR 6174, Département de Mécanique Appliquée Raymond Chaléat, 24 Chemin de l'épithape, 25000 BESANCON

b. ALSTOM Transport, 7 avenue de Lattre de Tassigny, 25290 Ornans

## Résumé :

*La maîtrise du calcul dynamique des stators de moteurs ferroviaires représente un enjeu majeur pour le concepteur. Parmi les difficultés de modélisation de ces derniers figurent le comportement de leur cœur hétérogène feuilleté et bobiné ainsi que la complexité de leur assemblage. L'objectif de ce travail consiste à construire et valider, par une approche allant des composants à la structure complète, le modèle d'un stator d'architecture type en effectuant des corrélations calculs-essais. Ceci permet à terme de caractériser son comportement moyen et d'établir des règles de modélisation transposables à d'autres architectures.*

## Abstract :

*Accurate determination of values of resonant frequencies and vibration characteristics of railway motor stators is an important issue for designers. The presence of heterogeneous laminated core, windings and assembling complexity of stators represent its main modelling difficulties. The aim of this paper consists on developing and validating, with a step by step approach, a model of a typical design stator by confronting it to experimental results. This approach leads finally to characterize mean behaviour of a typical design stator and to establish generic modelling rules for such structures.*

## Mots clefs : Dynamique, stator ferroviaire, feuilleté, bobinage, règles de modélisation

## 1 Introduction

La prédiction du comportement basses fréquences des moteurs ferroviaires est primordiale pour valider, selon des normes expérimentales souvent difficiles à mettre en place, leur comportement dynamique. Une modélisation prédictive de leur comportement dynamique passe obligatoirement par la maîtrise de celle 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 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 [4] 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 [5] 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 dans ce papier le cas d'une conception de stator différente. En effet, il est question d'une structure feuilletée-soudée contrairement aux stators étudiés dans la littérature qui sont feuilletés-frettés dans une carcasse. Nous cherchons à établir, en plus d'un modèle prédictif, 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 [6].

## 2 Structure d'un stator de moteur ferroviaire

Le type de structures de stators étudié ici est globalement un assemblage de 3 composants (figure 1).

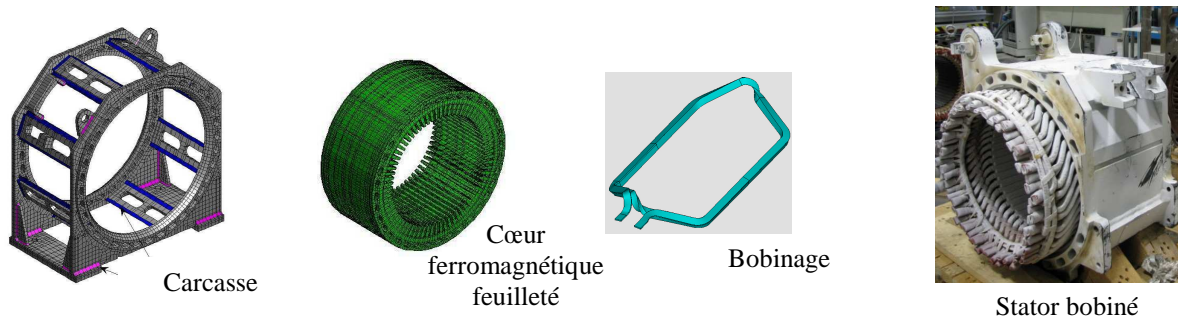


FIG. 1 – Stator d'un moteur ferroviaire et ses composants

D'abord le cœur ferromagnétique feuilleté sous forme d'un empilement de centaines de feuilles de tôles très fines. Vient ensuite la carcasse qui est soudée sur le cœur du stator et maintient l'empilement de tôles de l'extérieur. Enfin, le bobinage, ensemble de 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 appelé « cercle de phases ».

Le stator assemblé est imprégné par une vapeur de résine qui influe sur son comportement. Celle-ci vient à la fois s'immiscer entre les couches du cœur feuilleté et imbiber les isolants du bobinage.

## 3 Etude d'un stator type et règles de modélisation proposées

Dans ce paragraphe, nous traitons, à travers des études expérimentales et numériques, le cas d'une d'architecture typique d'un stator de moteur de traction ferroviaire. En raison des retours d'expérience du concepteur, les principales difficultés de modélisation sont localisées dans le cœur feuilleté et le bobinage. La démarche suivie (figure 2) consiste alors à aborder le problème des stators en deux étapes :

- **L'étude du stator nu, sans ses bobinages** : il s'agit de cibler l'étude sur le cœur feuilleté maintenu par sa carcasse. Une analyse modale expérimentale et une corrélation calcul-essai sont réalisées.
- **L'étude du stator bobiné** : il s'agit d'étudier l'effet des bobinages sur le comportement dynamique du stator. Une analyse modale expérimentale et un recalage de modèle sont réalisés.

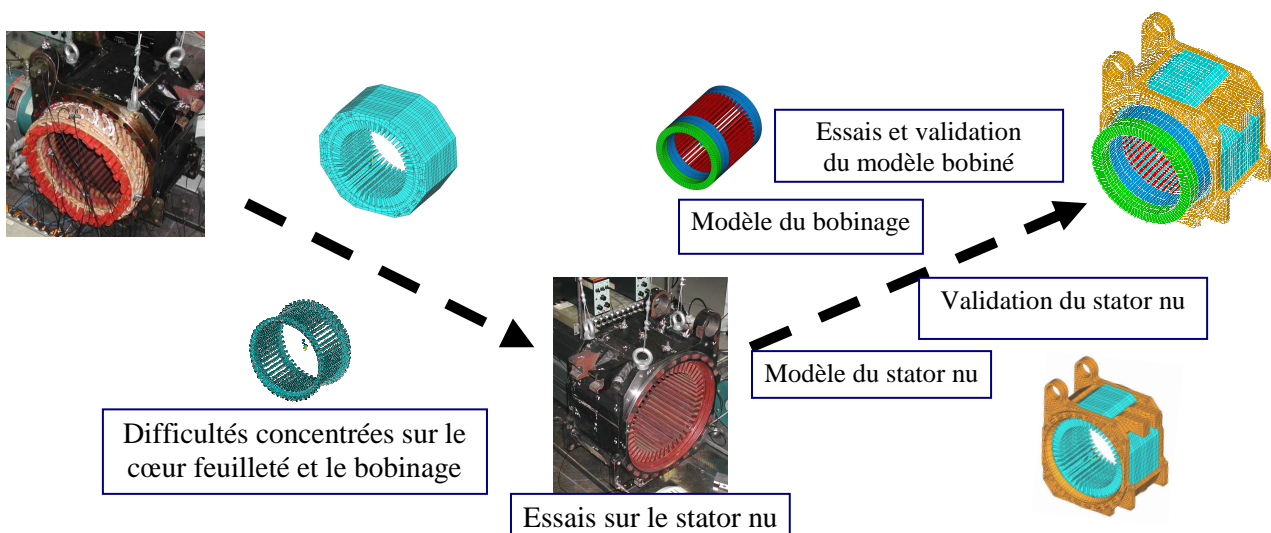


FIG. 2 – Démarche d'étude d'un stator de moteur ferroviaire

## 3.1 Etude du stator nu

### 3.1.1 Analyse modale expérimentale

Une analyse modale expérimentale est réalisée avec un montage en libre-libre de la structure, un pot vibrant électrodynamique pour une excitation en bruit blanc, plus appropriée pour ce type de structures. 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, 2000 ] Hz pour un nombre de capteurs donné.

### 3.1.2 Modélisation éléments finis

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 2). Les matériaux de la carcasse sont connus et ne posent *a priori* pas de problème d'estimation. D'après les travaux de [4-5], 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 retenue. Une telle modélisation, dans le cas étudié, peut prédire uniquement 2 modes sur 9 ; les 7 modes restant sont « non-radiaux » et ne peuvent être calculés que par un modèle 3D. Ces résultats expérimentaux peuvent s'expliquer par le design « en entretoises » de la carcasse, plus influent, contrairement au design « fretté » présenté dans la littérature. Le cœur feuilleté a par ailleurs un comportement très différent de celui d'un cylindre isotrope [5]. Une modélisation en matériau orthotrope est donc plus appropriée et est proposée dans cette étude.

La technique adoptée pour estimer les paramètres du matériau orthotrope équivalent 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. La méthode classique des lois des mélanges est utilisée. Afin de se rapprocher de la réalité physique du cœur feuilleté, dont la structure n'est pas solide mais discontinue, nous avons proposé d'imposer que ses coefficients de Poisson soient pris 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. L'analyse des résultats de cette hypothèse montre que le modèle est représentatif. Tous les modes mesurés sont en effet prédits. Les écarts fréquentiels sont compris entre -13% et 7.9%. Les valeurs des MAC mesure-calculs sont compris entre 81% et 96%.

### 3.1.3 Confrontation mesure-calculs et validation de modèle

Par la technique de recalage par méthode de sensibilité, nous ajustons les paramètres du modèle qu'il soit prédictif des résultats expérimentaux. Afin d'optimiser le nombre des paramètres à corriger, nous réalisons au préalable une étude de sensibilité sur le modèle. Par une procédure de simulation de *Monte Carlo* sur des paramètres du modèle, les tendances sur les fréquences propres et les déformées modales sont calculées. Des coefficients de corrélation (écarts sur les sorties; variations des paramètres d'entrée) sont analysés, ce qui permet de sélectionner les paramètres les plus influents sur les premiers modes propres. Cette étude permet de sélectionner les coefficients du matériau du feuilleté pour le recalage. Ces derniers sont initialisés aux valeurs calculées par la méthode d'homogénéisation précédente.

La technique d'ajustement choisie est la méthode de recalage par sensibilité. Elle consiste à minimiser les distances entre les grandeurs de sortie mesurées et calculées, à savoir les fréquences et vecteurs propres. La méthode se base sur le développement au premier ordre des grandeurs expérimentales en fonction des grandeurs calculées. 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. A l'issue du recalage, les écarts fréquentiels relatifs par rapport à la mesure sont inférieurs à 3% et les corrélations des déformées modales sont supérieures à 84%.

L'homogénéisation sera retenue comme une bonne méthode d'estimation *a priori* des coefficients du feuilleté du stator.

## 3.2 Etude du stator bobiné

Un stator bobiné de même série que le stator nu est étudié sous la même procédure d'essai que celle mise en place dans le cas précédent.

Nous construisons un modèle éléments finis en reprenant le modèle du stator nu validé et nous y intégrons

un volume « bobines » dont une partie est insérée dans les encoches du feuilleté et dont les extrémités libres sont modélisées par des anneaux homogènes.

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

TAB. 1 – Corrélations mesures – calculs : stator nu

Les résultats expérimentaux (figure 3) confirment les tendances observées dans [3], à savoir un arrondissement des pics de résonance, la chute des amplitudes de 10 dB environ par rapport aux réponses du stator nu ainsi que la diminution globale des fréquences propres. Par ailleurs, un couplage important est observé entre les premières déformées modales qui ne sont plus apparentées à des déformées typiques de cylindre, comme c'est le cas pour le stator nu. De plus, le bobinage modifie la répartition de masse et le comportement vibratoire global de l'ensemble du stator.

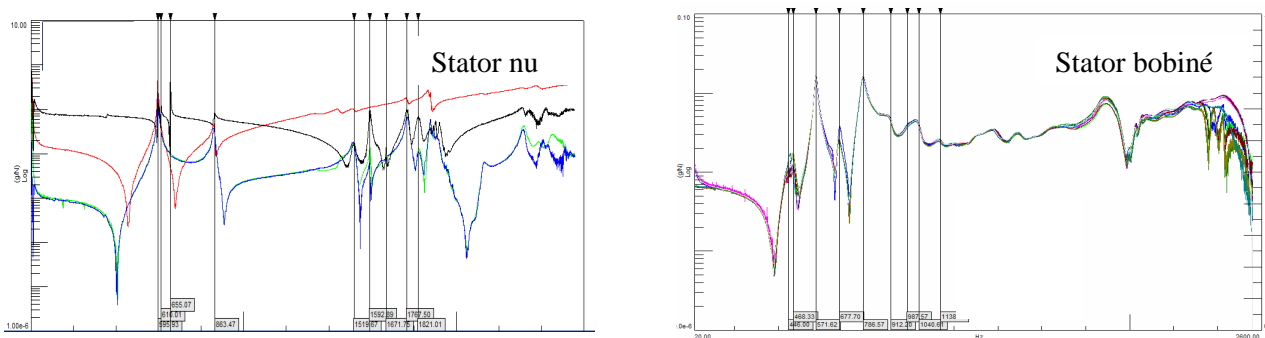


FIG. 3 – Fonctions de réponses fréquentielles expérimentales: résultats sur les stators nu et bobiné

### 3.2.1 Modélisations proposées et modèle retenu

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 4-a):

**Modèle a :** Monobloc. Le matériau équivalent 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 élaborée et la plus proche de la géométrie réelle ; elle tient compte du cercle extrémité d'alimentation électrique.

Quelques résultats des corrélations mesures-modèles sont illustrés (figure 4-b). Une modélisation simplifiée (figure 4-a : *a*) des bobines ne suffit pas à prédire tous les modes. Les modélisations *b* et *c* sont plus fines mais restent néanmoins peu prédictives. La modélisation *d* est la plus fidèle à la géométrie réelle et introduit des matériaux orthotropes. Elle assure les meilleures corrélations mesures-modèle avec un maximum de modes prédits, un écart fréquentiel de moins de 5% et des MAC mesure-calculs supérieurs à 84%. Elle est retenue comme un bon estimateur *a priori* du comportement du bobinage.

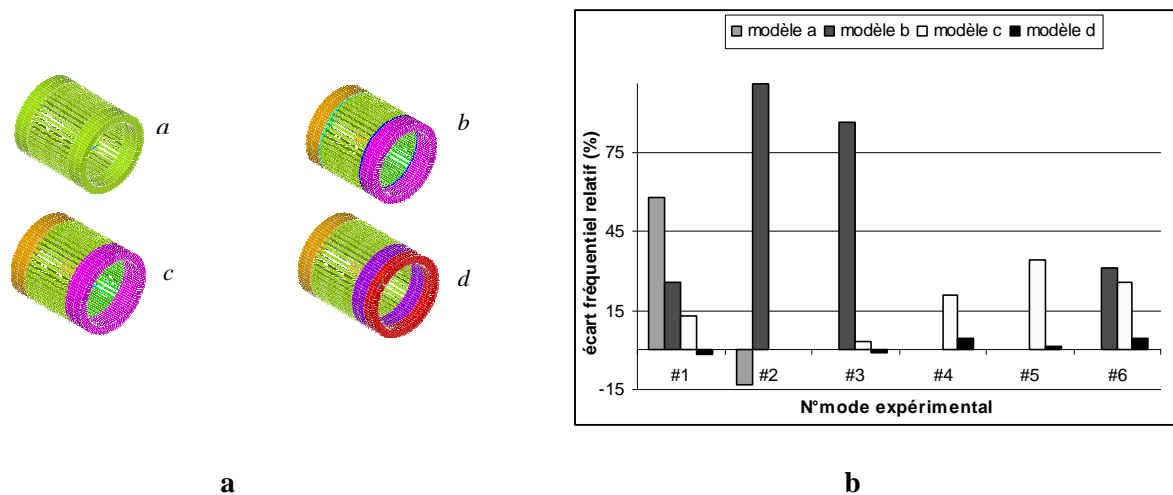


FIG. 4 – Modélisation du bobinage: (a) Modélisations proposées, (b) Confrontation mesures- calculs

### 3.2.2 Recalage et validation de modèle

<i>Ecart fréquentiel relatif mesures-calculs (%)</i>		<i>MAC mesures-calculs (%)</i>	
<i>Avant recalage</i>	<i>Après recalage</i>	<i>Avant recalage</i>	<i>Après recalage</i>
0.6	-3.9	85	85
-2.3	1.3	88	91
0.9	-1.9	86	87
-2.3	-4.3	96	95
5.3	2.2	88	87

TAB. 2 – Corrélation mesure-calcul et recalage de modèle : stator bobiné

Une étude de sensibilité paramétrique analogue à celle effectuée sur le stator nu a été réalisée sur le stator bobiné. Elle permet de conclure sur la prédominance des extrémités du bobinage sur le comportement dynamique global. Une phase de recalage de modèle par méthode de sensibilité, et dont les résultats sont illustrés dans le tableau 2, a été réalisée. On constate une légère amélioration des résultats de prédiction après le recalage. Ceci est dû au fait que les écarts initiaux étaient faibles. Autrement dit, la solution optimale, pour cette modélisation et avec ses paramètres initiaux, ne peut aller au-delà de cette précision. Suite à ce recalage, le modèle proposé du stator bobiné est validé. L'ensemble des hypothèses de modélisation établies, notamment celles qui concernent le cœur feuilleté homogénéisé et le bobinage en 4 blocs orthotropes, sont retenues comme des règles de modélisation.

## 4 Retranscription des règles de modélisation à une architecture différente

Dans le but de valider le caractère générique des règles de modélisation établies sur le stator d'architecture typique étudié plus haut, nous les retranscrivons au cas d'un stator d'architecture différente et plus complexe (figure 5-b) en termes de géométrie, de dimensions et de propriétés matérielles. Dans le tableau 3, le bilan de la confrontation mesure-calcul de ce stator modélisé selon les règles établies est donné.

Le modèle prédit les deux premiers modes avec de bons niveaux d'erreurs fréquentielles relatives (de l'ordre de 3% en valeur absolue) et de MAC (supérieurs à 77%).

La prédiction sur les deux modes d'ordre plus élevé se dégrade. Ceci se justifie par la difficulté du modèle à prendre en compte les phénomènes physiques mis en jeu au fur et à mesure que les déformées se complexifient. En effet, les interactions énergétiques entre l'empilement feuilleté et les extrémités du bobinage, deviennent plus complexes. Néanmoins les deux premiers modes globaux de la structure ont été prédits correctement sans la mise en place d'un processus de recalage. En phase de conception, ce niveau de prédiction est convenable et évite un recours systématique à des essais souvent lourds à mettre en place.

<i>N° mode expérimental</i>	<i>Fréquence expérimentale (Hz)</i>	<i>Erreur fréquentielle relative (%)</i>	<i>Mac mesure-calcul (%)</i>
#1	276.0	-1.6	92.4
#2	287.0	-3.1	77.2
#3	309.8	31.6	82.9
#4	321.1	13.48	45.0

TAB. 3 – Prédiction des règles de modélisation retranscrites sur un stator d'architecture différente

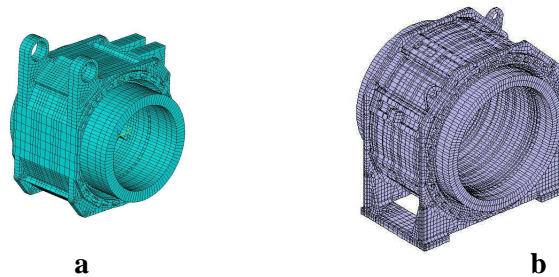


FIG. 5 –a- modèle validé du stator type, b- modèle d'un stator différent réalisé selon les règles établies

## 5 Conclusion

La modélisation d'un stator de moteur de traction ferroviaire est peu aisée au vue de la complexité de ses composants. Une modélisation plane, ne peut être retenue pour les types de stators étudiés car elle ne prédit pas suffisamment de modes de type « non-radiaux », présents dans la structure réelle. L'établissement de règles de modélisation génériques pour de telles structures est un processus qui a été mené sur un stator d'architecture type et a été décomposé en deux phases : l'étude du stator nu et ensuite du stator bobiné. Des essais dynamiques de validation ont été réalisés lors de chaque phase. Une modélisation respectant ces règles a été réalisée sur un stator d'architecture différente. Elle a assuré une bonne prédiction des premiers modes d'ensemble à basses fréquences de la structure sans recours à un recalage de modèle. Toutefois cette qualité de prédiction se dégrade au fur et à mesure que les déformées se complexifient.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant d'affiner les modèles éléments finis proposés pour la zone des extrémités du bobinage. En effet, des phénomènes de non-linéarités de contact et de grands déplacements y ont été observés et une modélisation homogène simplifiée ne peut les prendre en compte. 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.

## References

- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] S-A. Chentouf. Simulations et Essais Dynamiques sur Stators de Moteurs de Traction. Thèse de Doctorat de l'Université de Franche Comté. Soutenue le 11/03/2011.