

# Prise en compte du paramètre nuisance acoustique lors de la conception d'un ensemble machine électrique asynchrone – convertisseur statique de puissance.

Arnaud Hubert, Guy Friedrich

Université de Technologie de Compiègne (UTC)  
Laboratoire d'électromécanique, BP 529 60205 Compiègne cedex, France  
e-mail : arnaud.hubert@utc.fr, guy.friedrich@utc.fr

**Résumé** - La prise en compte de facteurs liés à l'environnement et à la qualité de vie est une réalité incontournable pour tous les concepteurs de produits manufacturés. Il est désormais impossible de mettre sur le marché un produit qui ne respecte pas les normes de bruits. De plus, d'un point de vue marketing, le faible niveau de bruit est un atout supplémentaire. L'activité industrielle a toujours été une activité fort bruyante et si de nombreux efforts ont été fait pour la protection du personnel, il est dorénavant de bon ton de réduire le bruit des équipements directement à leurs sources et plus spécialement celui des machines asynchrones qui sont les machines tournantes les plus utilisées industriellement.

Mots-clés – bruit, vibrations, machine asynchrone, convertisseur statique.

## I. Introduction

En matière d'entraînement électromécanique, les achats industriels s'orientent principalement vers les machines asynchrones. Ce type de machine est réputé pour sa robustesse et son entretien quasi nul. De plus, sa simplicité de conception en fait un outil performant et économique. Le problème de bruit de ces machines est loin d'être récent et il suffit de se rapporter à quelques ouvrages de référence pour s'apercevoir qu'il est traité depuis de nombreuses années [1]. Les spécifications d'utilisation ont cependant évolué ainsi que les modes d'utilisation. Les contraintes économiques poussent à la réalisation de machines de plus en plus compacte et légère, ce qui ne favorise évidemment pas la réduction du bruit. Il est également de plus en plus courant, non pas d'alimenter ces machines directement par le réseau mais au travers d'une électronique de puissance qui permet de faire varier la vitesse de rotation et de mieux contrôler le comportement global. On parle dès lors d'ensembles machines - convertisseurs statiques. Ces systèmes se généralisent d'autant plus que l'électronique de puissance évolue rapidement et que ses coûts diminuent. Bien sûr, ces évolutions ne vont pas sans l'apparition de problèmes inédits en ce qui concerne le bruit et les vibrations<sup>1</sup>.

Les solutions consistant à isoler d'un point de vue acoustique une machine pour limiter son rayonnement sont des solutions d'urgence. Il est beaucoup plus noble de tenter de réduire le bruit directement à sa source, c'est-à-dire au niveau des champs magnétiques et du comportement vibro-acoustique de la machine.

L'utilisation même de convertisseur statique conduit inévitablement à l'injection de courant "pollués" dans la machine. Cette "pollution"<sup>2</sup> donne naissance aux champs magnétiques (et aux efforts) qui vont faire vibrer la structure statorique et qui se traduisent par une augmentation des nuisances acoustiques.

Dès lors, la réduction du bruit à la source n'est plus uniquement l'affaire d'un spécialiste en vibro-acoustique, mais elle résulte de l'interaction de diverses spécialités qui vont de la commande et électronique de puissance à l'acoustique en passant par la conception électromécanique et la caractérisation vibratoire. Le problème devient vite complexe et il est délicat d'en cerner tous les aspects. Le travail en commun de spécialistes de chaque domaine donne de très bons résultats [3] mais un concepteur électromécanicien ou un électronicien de puissance n'a pas toujours la "culture" pour utiliser les travaux des spécialistes en acoustique, c'est pourquoi il est important de dresser des passerelles entre les deux mondes.

Notre travail consiste à développer des outils, à la fois, simple et suffisamment précis, pour coupler la chaîne entière d'émission acoustique. Ce travail doit non seulement permettre au concepteur de machine d'introduire dans ces paramètres la notion de bruit mais également à l'électronicien de puissance d'adapter sa stratégie de commande et de conversion statique à la machine.

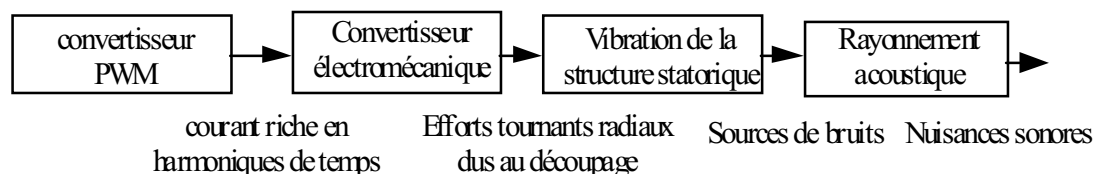


figure 1 : Chaîne d'émission acoustique « machine – convertisseur ».

<sup>1</sup> Le problème du bruit et des vibrations dans l'association machine - convertisseur n'est pas spécifique à la machine asynchrone, il est par exemple celui qui freine le plus l'utilisation des machines à reluctance variable. Pour le cas de telles machines, on pourra se reporter à [2].

<sup>2</sup> Un convertisseur statique de type modulation de largeur d'impulsion (PWM) consiste en l'application d'une succession d'impulsion de tension de largeur variable aux bornes de la machine électrique. D'un point de vue fréquentiel, cette succession d'impulsions se comporte comme une tension

## II. Méthode de modélisation

Les méthodes de modélisation par éléments finis sont de plus en plus utilisées en modélisation, tant dans le domaine du dimensionnement électromécanique que dans le domaine vibratoire et acoustique. Cependant, de par la taille et les temps de calculs mis en jeu, ces outils ne sont pas forcément adaptés au pré-dimensionnement d'actionneurs électromécaniques et de leurs alimentations. Des tentatives prometteuses de couplage par E.F. entre les différents domaines de la physique commencent à voir le jour : prise en compte du convertisseur dans le calcul électromécanique [4] ou bien couplage magnéto-mécano-acoustique [5], mais ces méthodes restent encore l'apanage des spécialistes en modélisation. Notre travail, certainement plus modeste, consiste à concevoir un outil simple et efficace (même si moins précis) d'aide à la conception d'ensemble « machine – convertisseur » qui permettrait d'évaluer le niveau sonore corrélé au type d'alimentation retenue.

Notre approche s'appuie sur un outil qui a fait largement ces preuves dans la résolution des problèmes régis par des équations aux dérivées partielles : l'approche de Fourier qui consiste à projeter les variables dans l'espace fréquentiel (projection de la variable temps et espace). Cette projection permet de faire facilement des filtrages et de ne faire apparaître que les éléments importants ce qui est vital pour le pré-dimensionnement d'un ensemble complexe.

## III. Description de la modélisation

### A. Prise en compte du convertisseur

Le dimensionnement d'un actionneur électrotechnique se limite généralement à la machine seule bien que cette dernière soit maintenant pratiquement toujours associée à un convertisseur statique. Les difficultés de modélisation proviennent du fait que les constantes de temps mises en jeu dans les différents domaines (électronique de commutation, phénomènes magnétiques quasi-statiques, évolution thermique) sont complètement différentes, ce qui rend les calculs longs et imprécis. Une approche fréquentielle permet de ne conserver que les paramètres de grande importance.

Le convertisseur est l'élément qui permet d'appliquer une tension à la machine. Ainsi sa prise en compte au niveau fréquentiel conduit à appliquer non pas une consigne (en régime permanent) mais tout un spectre de tension résultant du convertisseur et de sa stratégie de modulation (pleine onde, PWM à échantillonnage naturelle, synchrone, asynchrone, optimisé, aléatoire...). Dans cette étude, nous utilisons une stratégie de découpage à échantillonnage naturel synchrone. Le spectre des tensions d'une telle stratégie est bien connu des électroniciens de puissance. En voici l'allure pour une fréquence fondamentale de 50 Hz et une fréquence de découpage de 1500 Hz :

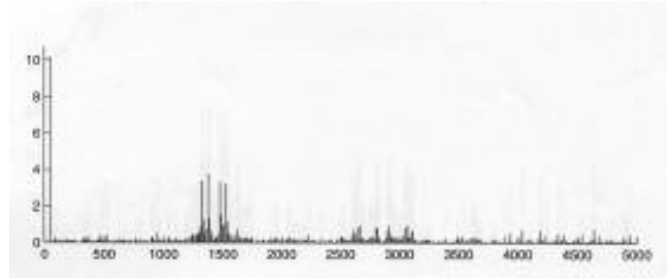


Figure 2 : spectre de tension résultant de la conversion statique (Amplitude de la tension (V) en fonction de la fréquence (Hz) ).

### B. Conversion électromécanique

Pour conserver l'approche fréquentielle, nous avons utilisé la théorie dite « des champs tournants » (Winding Field Theorie) qui consiste à modéliser les différents champs magnétiques créés comme la superposition de champs harmoniques élémentaires tournant dans l'entrefer de la machine. Cette théorie, largement répandue dans la communauté électrotechnique, nécessite quelques hypothèses de linéarité (comme la non saturation des matériaux magnétiques) ainsi que la concentration de l'énergie magnétique dans l'entrefer. Ces hypothèses peuvent être critiquable, il n'en reste pas moins qu'au stade du pré-dimensionnement, elles sont acceptables.

L'utilisation de cette théorie nécessite également la connaissance des courants qui circule dans les différents enroulements (de même qu'un calcul magnétostatique par éléments finis) or la stratégie de conversion statique ne fixe pas les courants mais uniquement les tensions. Il a donc été nécessaire de développer un modèle de schéma complet [6] [7] qui permette d'abord d'évaluer les spectres des courants circulant dans les bobinages statoriques et rotoriques et seulement ensuite de pouvoir calculer les champs tournants. Les différents courants et champs magnétiques doivent tenir compte des harmoniques de temps (tension), des harmoniques d'espace (répartition des bobinages) ainsi que de la variation de perméance (ouverture des encoches).

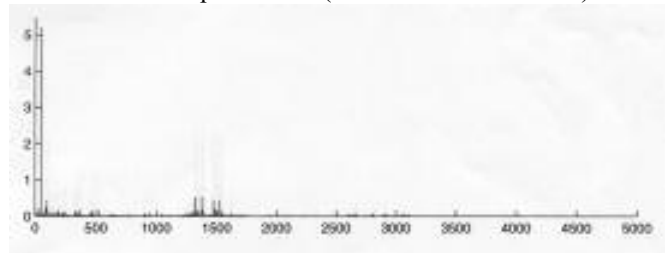


Figure 3 : spectre de courant résultant de la conversion statique et de la géométrie de la machine. (Amplitude du courant (A) en fonction de la fréquence (Hz) ).

La connaissance des différents champs tournant nous permet de définir les couples moyens et pulsant par interaction des champs stator et rotor [8] ainsi que des efforts radiaux à l'aide du tenseur de Maxwell [9].

La multiplication de champs tournants harmoniques (issue du tenseur de Maxwell:  $\sigma = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0}$ ) peut être transformé en une nouvelle combinaison de champs tournants harmoniques (par les relations trigonométriques) et c'est ainsi que nous modélisons les efforts électromagnétiques radiaux à l'origine de bruits et de vibrations comme une superposition d'efforts harmoniques radiaux tournant dans l'entrefer.

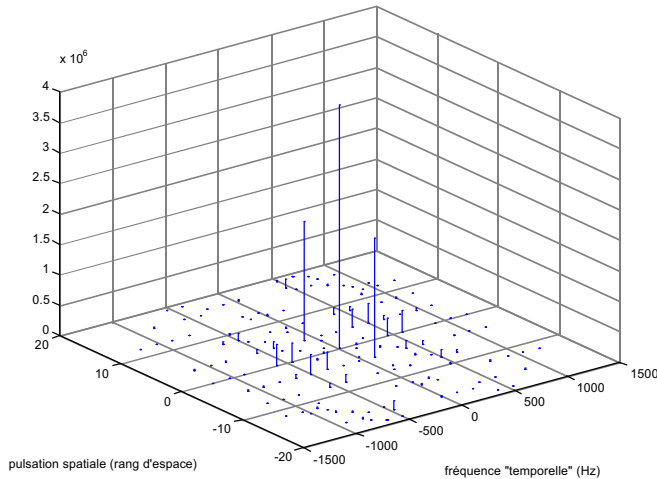


Figure 4 : spectre 2D (temps et espace) des efforts radiaux tournant dans l'entrefer

À un rang d'espace  $m$  et un rang de temps  $n\omega$  correspond un champ harmonique  $\cos(n\omega t + m\theta)$  tournant dans l'entrefer à la vitesse  $\frac{n\omega}{m}$  [10].

### C. Comportement mécanique et vibrations

De notre modélisation électromécanique, nous connaissons les efforts radiaux comme une superposition de champs tournants harmoniques. Afin de connaître la réponse dynamique de la structure à cette excitation, la méthode la plus adaptée nous a semblé être la méthode de superposition modale. Cette technique consiste à étudier la réponse libre de la structure pour en extraire les modes propres (valeurs et vecteurs propres). Nous projetons ensuite les excitations dans la base constituée des vecteurs propres (qui, par définition, sont orthogonaux). Sous certaines conditions (liées à l'amortissement) les réponses de la structure sur chacune des coordonnées modales sont découplées les unes des autres.

On transforme alors un système de  $K$  équations couplées du second ordre en temps en  $K$  équations du second ordre découplées les unes des autres. Dans le cas d'une structure continue,  $K$  est infini, cependant à partir d'un certain rang, certaines coordonnées modales peuvent être négligées. Cette approche est très similaire dans le principe à une étude harmonique (projection dans l'espace de Fourier). De même que les fonctions trigonométriques, les coordonnées modales sont orthogonales entre elles et peuvent former une base.

Cette technique a déjà été utilisée en éléments finis pour le calcul des vibrations de machines électriques [11] [12], nous avons tenté d'en développer une version analytique en remarquant que le comportement d'un stator et très proche de celui d'un cylindre.

Les modes propres d'une telle structure sont des fonctions trigonométriques (sinus et cosinus) alors que les efforts électromagnétiques le sont également. L'orthogonalité qui existe entre des fonctions trigonométriques de pulsations différentes explique que la projection des efforts électromagnétiques dans la base modale n'a de résultante non nulle que sur les modes de même « allure spatiale » que la force considérée. Cette constatation permet de simplifier grandement les efforts qui génèrent un travail sur la base modale puisqu'un effort n'a à être projeté que sur une seule coordonnée de la nouvelle base.

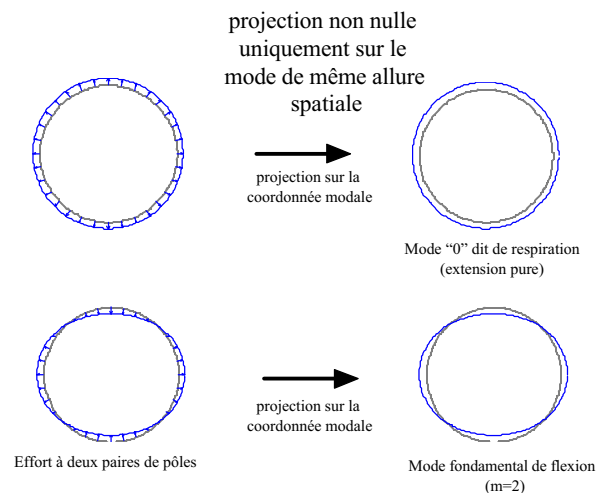


Figure 5 : représentation d'un effort et de l'unique coordonnée sur laquelle on peut le projeter.

En considérant les amortissements comme nuls (structure très faiblement amortie, il est nécessaire que les excitations projetées (forces exprimées sur la base modale) aient des fréquences différentes de la fréquence propre puisque, alors seul l'amortissement limite l'amplitude. Nous devons donc nécessairement choisir une stratégie PWM qui « place » les excitations en dehors des fréquences de résonance de la structure mécanique. Ceci est même l'un des éléments essentiels dans la conception d'un ensemble machine - convertisseur à faible niveau de bruit.

Une fois ces efforts projetés, la réponse dynamique de la structure n'est finalement que la superposition de la réponse sur chaque coordonnée modale (de fréquence propre  $\pi_i$ ). On obtient alors la réponse d'une équation différentielle d'ordre deux en temps soumis à une excitation sinusoïdale [13].

$$\Phi(t) = \sum_i \frac{A_i}{p_i^2 - \omega^2} \sin(\omega.t)$$

Pour connaître la réponse dans la base initiale, il ne reste alors qu'à ramener cette fonction  $\Phi(t)$  de la base modale vers la base initiale:  $u(t, \theta) = \sum_i \Phi_i(t) \cdot w_i(\theta)$  avec  $w_i(\theta)$  le vecteur propre  $i$  normalisé.

#### D. Développement d'un modèle de rayonnement.

Notre étude ne s'intéresse qu'au rayonnement direct du stator bien qu'il est démontré de plus en plus souvent qu'une part importante du bruit provient de la transmission des vibrations aux éléments environnants (bâti, fixations...) qui rayonnent à leur tour. Ce bruit indirect connu sous le nom de « bruit solidien » ou d'origine solidienne (structure borne sound) n'est pas pris en compte dans cette étude.

En conservant notre approche analytique, le rayonnement du stator peut être approché par celui d'un cylindre soumis à une superposition de vibrations sinusoïdales en temps et en espace (le long de la périphérie) :

$$v(t, \theta) = \sum_i v_i(t) \cdot \cos(i\theta).$$

La pression acoustique sera connue en résolvant une équation des ondes en coordonnées cylindriques. La solution est alors déterminée analytiquement au moyen de fonctions de Bessel et de Neumann [14].

Pour trouver la solution en champ libre, on fixe les deux conditions aux limites :

- La vitesse vibratoire est égale à la vitesse acoustique à la périphérie du cylindre ( $r = a$ ).
- La condition de rayonnement de Sommerfeld (rayonnement en champ libre = pas de réflexion).

Il est alors possible d'estimer la pression acoustique d'un stator en calculant la pression rayonnée par un cylindre en champ libre. Cette solution se présente sous la forme suivante où  $H_i^{(2)}$  est une fonction de Hankel de second type d'ordre  $i$ ,  $k$  est le nombre d'onde,  $\rho$  la masse volumique de l'air et  $c$  la célérité du son :

$$p(r, \theta) = \sum_i -v_i \frac{j \cdot \rho \cdot c}{H_i^{(2)}(k \cdot a)} \cdot \cos(i\theta) \cdot H_i^{(2)}(k \cdot r)$$

#### IV. Conclusion

Le travail réalisé permet de développer un modèle reliant la pression acoustique (bruit) à la stratégie PWM (spectre de tension). Bien que faisant nécessairement certaines hypothèses de simplification pour conserver une approche analytique, ce modèle permet toutefois, simplement et assez rapidement une aide à la conception d'ensemble « machine – convertisseur » par tout électrotechnicien n'ayant pas forcément les outils ou la culture pour prendre en compte le paramètre nuisances acoustique dans son modèle.

#### V. Bibliographie

- [1] H. Jordan, *Geraüsharme Elektromotoren*, W. Girardet, Essen, 1950.
- [2] F. Camus, B. Humeau, M. Besbes et M. Gabsi, "Réduction des vibrations des machines à reluctance variable. Action sur la commande.", Journée Vibrations et bruit acoustique des machines électriques, LESIR, ENS Cachan 1997.
- [3] M. Gabsi, T. Loyau, G. Lovat, "Comportement vibroacoustique d'un moteur électrique dans son environnement", Colloque EF'99 Lille 1999.
- [4] M. Ito, K. Kawabata, F. Tajima, N. Motoi, « Coupled magnetic field analysis with circuit and kinetics modelings of brushless motors », IEEE Trans. Mag., vol 33, n°2, march 1997.
- [5] T. Bauer, G. Henneberger, « Three-dimensional calculation and optimization of the acoustic field of an induction Furnace caused by electromagnetic forces », IEEE trans. Mag., vol 35, n°3, may 1999.
- [6] P.L. Alger, *The Nature Polyphase of Induction Machines*, John Wiley & Sons, 1951.
- [7] R. Chavernez, M. Padeloup, « Les pertes parasites dans les moteurs d'induction », Bulletin de la direction des études et recherches, série B n°2 1969, EDF.
- [8] J. Chatelain, *traité d'électricité de l'EPFL vol X : Machines électriques*, 1983 Presses polytechniques romandes.
- [9] B. Heller, V Hamata, *Harmonic field effects in induction machines*, Elsevier 1977.
- [10] H. Mikami, K. Ide, M. Takahashi, K. Kajiwara, « Dynamic harmonic field analysis of an inverter-fed induction motor for estimating harmonic secondary current and electromagnetic force », IEEE trans. E.A., vol 14, n°3, sept. 1999.
- [11] D. Verdyck, J.M. Belmans, « An acoustic model for a permanent magnet machine : modal shapes and magnetic forces », IEEE I.A., vol 30, n°6, nov./dec. 1994.
- [12] Y. Lefevre, « De la modélisation des vibrations d'origine magnétique à la conception des machines silencieuses », Journée vibrations et bruits acoustique des machines électriques, LESIR, ENS Cachan, France, avril 1997.
- [13] D.J. Ewins, *Modal testing : theorie and practice*, Research Studies Press Ltd (John Wiley & Sons) 1984.
- [14] L. Cremer, M. Heckl, E.E. Ungar, *Structure-Borne Sound*, Springer-Verlag 1988.