

# Excitateur électromagnétique de broche d'usinage

David TLALOLINI<sup>1,2</sup>, Sylvain RIALLAND<sup>3</sup>, Mathieu RITOU<sup>1,2</sup>  
David NOEL<sup>1,2</sup>, Sébastien LE LOCH<sup>1,2</sup>, Benoît FURET<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IRCCyN, UMR-CNRS 6597, 1 rue de la noë - BP 92101 - 44321 NANTES Cedex 3 - France

<sup>2</sup>Université de Nantes-IUT de Nantes, 2 av du Professeur Jean Rouxel, 44475 Carquefou - France

<sup>3</sup>SYNERVIA, Rue Christian Pauc - BP 10605 - 44306 NANTES Cedex 3 - France

*david.tlalolini@ircsyn.ec-nantes.fr - sylvain.rialland@synervia.fr -  
mathieu.ritou@ircsyn.ec-nantes.fr - david.noel@ircsyn.ec-nantes.fr -  
sebastien.le-loch@univ-nantes.fr - benoit.furet@ircsyn.ec-nantes.fr*

## Resumé

Dans cet article, nous présentons un système amplificateur-excitateur électromagnétique capable de solliciter des broches d'usinage tournant à haute vitesse. Ce système est constitué de quatre amplificateurs de puissance et de quatre électro-aimants pour produire des forces électro magnétiques, expérimentalement, autour de 200 N dans une gamme des fréquences de 0 à 4000 Hz. L'analyse de la sollicitation radiale de la broche par notre système, nous a permis de mesurer la Fonction de Réponse en Fréquence à vitesses de rotation comprises entre 4000 et 24000 tr/mn. L'intérêt principale de notre système est donc de mesurer le comportement vibratoire des broches de façon à optimiser son utilisation en usinage.

**Mots-clés:** Excitateur électromagnétique, excitateur de broche, analyse modale, amplificateur de puissance

## 1 Introduction

L'objectif premier est d'identifier expérimentalement le comportement dynamique des broches d'usinage à grandes vitesses. La modélisation a montré que la Fonction de Réponse en Fréquence (notée par la suite FRF) évolue avec la vitesse de rotation de la broche [1]. Afin de pouvoir tracer ces diagrammes de Campbell, il nous a été nécessaire de développer un dispositif spécifique permettant l'excitation d'un rotor, tout en évitant tout contact ou frottement entre la partie en mouvement et la partie fixe. Aucun système commercial ne convenant, l'objectif du laboratoire IRCCyN a été de concevoir et de réaliser un module d'excitation électromagnétique. Ce module est constitué de quatre électro-aimants à noyau de Fer-Silicium, dont le courant est asservi pour produire des efforts radiaux sur le rotor suivant deux axes perpendiculaires.

Afin de mieux répondre à la quantification du comportement vibratoire des broches, notre excitateur a été dimensionné de manière à produire des efforts atteignant 200 N, du continu jusqu'à des fréquences de 4 kHz. Pour ce faire, les parties électrique, magnétique et mécanique ont été conçues. Les simulations numériques effectuées sous simulink ont permis de dimensionner l'électro-aimant. Pour chaque axe, deux électro-aimants sont pilotés constituant ainsi les actionneurs de notre système. Le dispositif a été fabriqué par l'IRCCyN, à l'IUT de Nantes. Pour alimenter ces actionneurs, des amplificateurs de puissance asservis en courant ont été spécifiquement conçus et réalisés par SYNERVIA, partenaire de l'IRCCyN. Ils sont basés sur des ponts en H permettant de fournir 15A en continu. Enfin, le profil d'effort appliqué à la broche est piloté à l'aide

d'une interface graphique également conçue au sein du laboratoire. Cette interface, développée sous Labview, fournit les consignes de référence aux amplificateurs et gère l'acquisition et le traitement des signaux (courants, déplacements et efforts).

## 2 Module exciteur électromagnétique

### 2.1 Présentation de l'exciteur électromagnétique

L'exciteur électromagnétique est constitué de quatre électro-aimants, chacun définissant un quart de la structure statorique de l'exciteur. Cette configuration peut s'expliquer par le fait qu'un électro-aimant ne peut générer que des forces d'attraction. Pour solliciter un axe comprenant deux directions, il faut donc deux électro-aimants. Cette configuration à quatre électro-aimants est illustrée dans la figure 1.

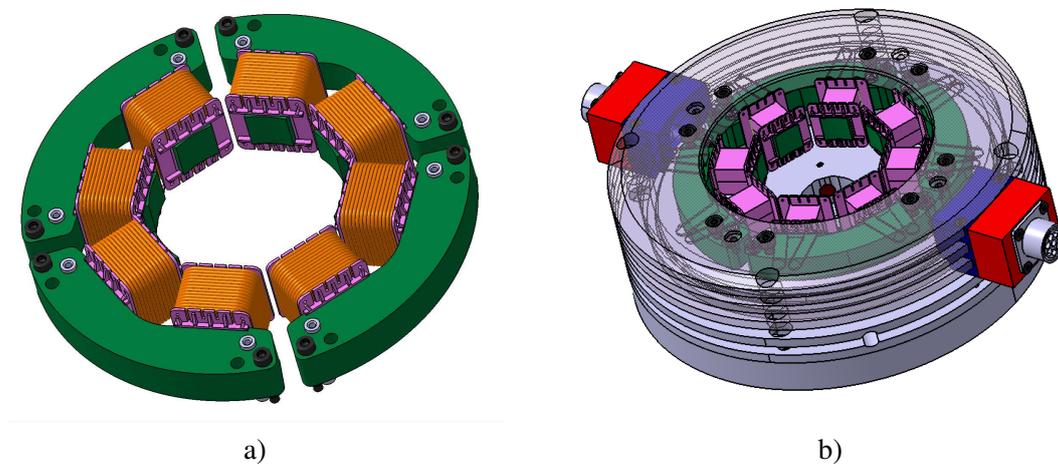


FIGURE 1 – Illustration du placement des quatre électro-aimants et vue du module exciteur

Pour notre application, les électro-aimants ont été désignés en forme de fer à cheval, composés de deux bobines raccordées en parallèle de façon à former un pôle nord et un pôle sud. Les circuits magnétiques ont été fabriqués à base de tôles en Fer-3%Silicium à grains orientés, GO. Pour obtenir un flux magnétique convenablement circulaire, les tôles à GO ont été assemblées en les décalant d'un angle de 90 degrés par rapport à la direction de laminage d'une tôle par rapport à celle qui la précède, [2]. Les détails techniques sont donnés dans le tableau 1.

### 2.2 Estimation de la force

La valeur de la force dans un électro-aimant dépend de la densité de flux  $B$  et de la surface  $S$  traversée par le flux. Lorsqu'on utilise un électro-aimant où les deux pôles sont utilisés pour attirer une masse, la force agissant sur la masse est donnée par l'expression :

$$F = \frac{B^2 S}{\mu_0} \quad (1)$$

où

- $F$  est la force d'attraction, en newtons [N] ;
- $B$  est la densité de flux, en teslas [T] ;
- $S$  est la section traversée, en  $m^2$  et
- $\mu_0$  la perméabilité du vide :  $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ .

Dans une configuration à quatre électro-aimants où quatre paires de pôles sont utilisées pour générer des efforts radiaux, la force est donnée par l'équation :

$$F = \frac{B^2 S}{8 \mu_0} \cos(\pi/8) \quad (2)$$

où la section  $S$  de chaque pôle est calculée en fonction du diamètre intérieur  $d$  de l'excitateur et la largeur du pôle  $w$ , [3]. La section est donc donnée par l'équation :

$$S = d \pi 0.5 w \quad (3)$$

En choisissant la valeur de  $B = 1,6$  T, valeur hors saturation, la force maximale qu'on peut atteindre sur une section  $S = 60,5 \times 10^{-3} \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 13,6 \times 10^{-3}$  sera de 304,06 N.

Données des électro-aimants	
Nombre de bobines	2
Raccordement des bobines	parallèle
Nombre de spires par bobine	46
Diamètre du fil	1,25 mm
Résistance par électro-aimant	0,02216 $\Omega$
Inductance par électro-aimant	0,973 mH

TABLE 1 – Détails techniques d'un électro-aimant

### 2.3 Mode d'asservissement

Lorsqu'un courant circule dans les bobines d'un électro-aimant, une force électromagnétique est produite dans une seule direction. Pour solliciter un axe comprenant deux directions, deux électro-aimants sont asservis pour produire des forces électromagnétiques. Ce mode d'asservissement entraîne à piloter les électro-aimants en mode différentiel, c'est-à-dire, lorsque les électro-aimants sont alimentés par un courant constant, appelé courant de pré-magnétisation  $I_0$ , un courant  $I_x$  est additionné à l'électro-aimant exerçant une force dans la direction positive et il est soustrait de l'électro-aimant opposé, ce qui permet d'avoir un comportement dans le courant de commande et l'effort généré sur l'axe [4]. Le pilotage s'effectue ainsi en boucle ouverte. Un exemple de ce mode de pilotage pour l'axe  $y$  est illustré dans la figure 3.

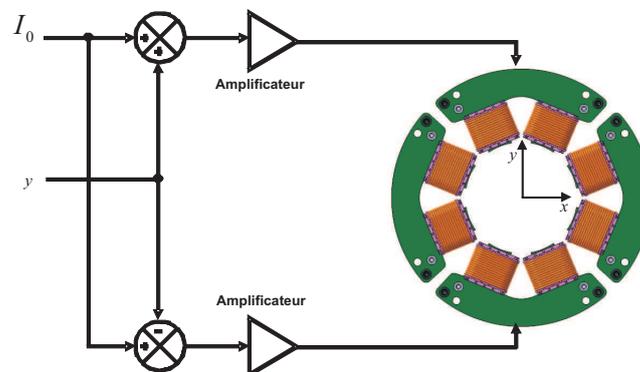


FIGURE 2 – Schéma du mode différentiel de pilotage des électro-aimants

### 2.3.1 Amplificateurs de puissance

Quatre amplificateurs de puissance ont été conçus par l'équipe EETR de SYNERVIA. Ils fournissent les courants qui circulent dans les bobines des électro-aimants. Il s'agit d'amplificateurs à modulation de largeur d'impulsions (MLI) architecturés autour de ponts en H permettant de fournir 15A en continu et 10Arms jusqu'à des fréquences de 5kHz. A partir d'une consigne en tension ( $\pm 10V$  de forme quelconque de DC jusqu'à 5kHz), ils assurent l'asservissement en courant dans la charge et ont la capacité de piloter des bobines dont l'inductance peut aller de  $200\mu H$  jusqu'à plusieurs mH. Le synoptique simplifié ci-dessous présente le fonctionnement général d'un amplificateur.

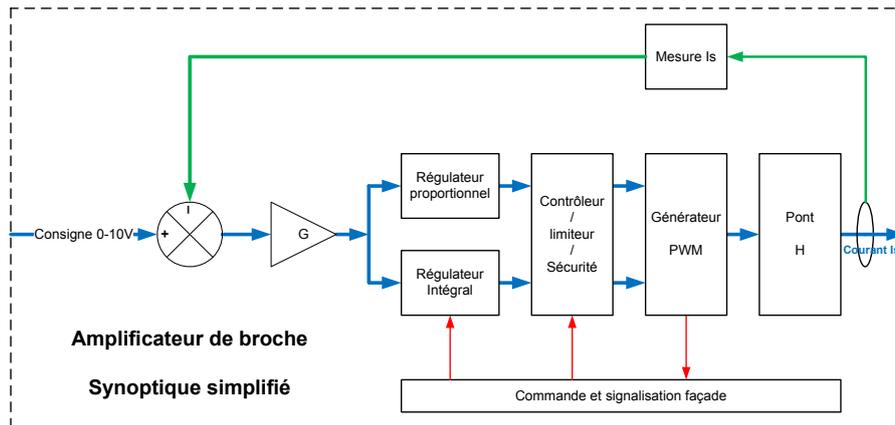


FIGURE 3 – Synoptique simplifié d'un amplificateur

Chaque amplificateur se présente sous forme d'une cassette 6U 21TE ce qui permet de composer un ensemble homogène de quatre amplificateurs dans un rack 19" 6U. La photo des deux amplificateurs est illustrée dans la figure 4



FIGURE 4 – Photo du rack avec deux amplificateurs

### 3 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale a comme objectif de mesurer la FRF d'une broche d'usinage. A cette fin, la broche sera sollicitée radialement par l'excitateur pour pouvoir tracer les diagrammes de Campbell à différentes vitesses de rotation.

#### 3.1 Configuration de la plateforme

La figure 5 illustre une photo de la plateforme expérimentale mise en place. Elle est constituée de l'excitateur électromagnétique, deux capteurs à courants de Foucault KEYENCE EX-201 et une platine dynamométrique Kistler type 9255B pour mesurer les déplacements et les efforts produits par la sollicitation radiale. La broche sollicitée est une broche Fischer MFW2310-24 montée sur une Machine-Outil à Commande Numérique Huron KX30. Le système d'acquisition et génération de données CompacDAQ-9172 de *National Instruments* a été utilisé pour fournir les consignes de référence aux amplificateurs et pour gérer l'acquisition et le traitement des signaux.

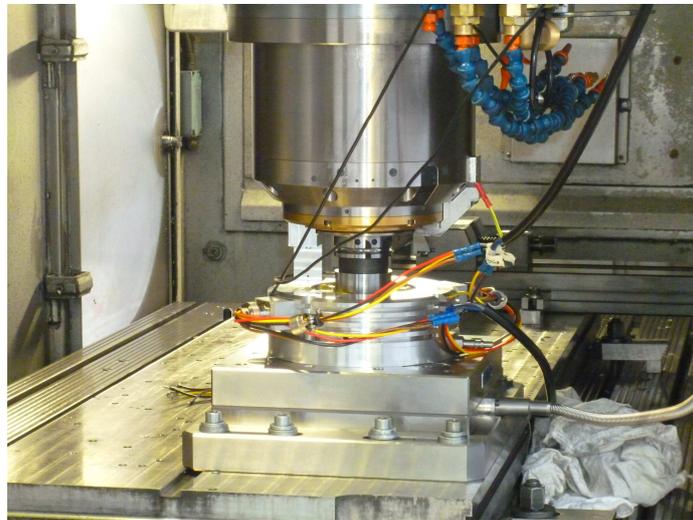


FIGURE 5 – Illustration de la plateforme expérimentale.

#### 3.2 Paramétrage choisi

Après la configuration de la plateforme expérimentale, la sollicitation de la broche sera effectuée suivant l'axe  $y$ . Les signaux de consigne sont définis par la superposition du courant de pré-magnétisation  $I_0$  et d'un courant sinusoïdale  $I_y$  dont la fréquence varie linéairement. Ce mode de sollicitation est couramment nommée *swept sinus*. Il nous permettra d'obtenir une FRF pour une vitesse de rotation de broche donnée, sur un balayage en fréquence continue. Ce balayage en fréquence est comprise entre une plage de 0 à 4000 Hz. Le courant est donc défini par l'équation suivante :

$$I_y = A \sin (\Phi(t)) \quad (4)$$

avec

$$\Phi(t) = 2 \pi (\delta_f t^2 + f_0 t) , \quad \delta_f = \frac{f_e - f_0}{T} \quad (5)$$

où  $A$  est l'amplitude,  $f_0$  et  $f_e$  sont respectivement les fréquences initiale et finale de la gamme des fréquences et  $T$  est la durée du balayage en secondes. Les courants régulés, proportionnels aux

consignes, permettant de produire des forces électromagnétique dans les deux directions de l'axe  $y$  sont donc définis comme :

$$I_{y+} = I_0 + I_y, \quad I_{y-} = I_0 - I_y \quad (6)$$

## 4 Résultats

La sollicitation radiale de la broche par l'excitateur électromagnétique, nous a permis de mesurer les FRF, ces traces sont illustrés dans la figure 6. Ces mesures ont été obtenus sur une plage de fréquences de 0 à 4000 Hz, pour des vitesses de rotation de la broche comprises entre 4000 et 24000 tr/mn.

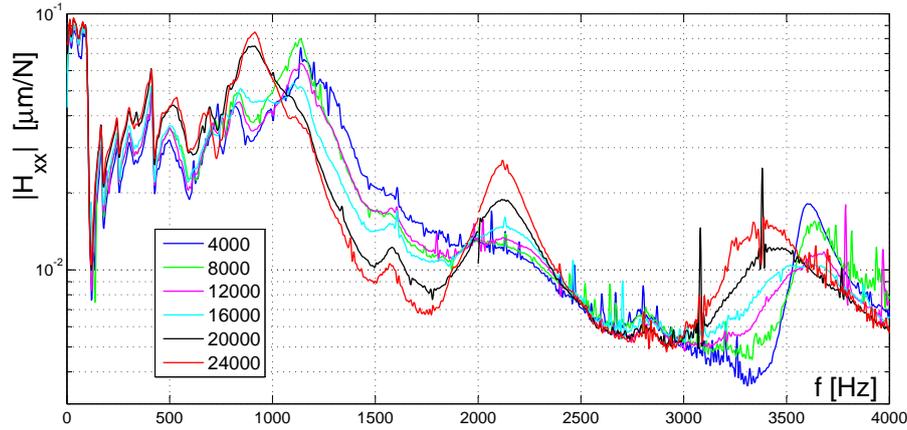


FIGURE 6 – Tracé de la FRF pour des vitesses de rotation de la broche comprises entre 4000 et 24000 tr/mn

Il faut signaler que les forces électromagnétiques ont été déduites par un modèle électro-magnéto-mécanique du palier magnétique car la bande passant de la platine dynamométrique est limitée à 2000 Hz. Cette platine a été utilisée pour mesurer les efforts à sollicitation quasi-statiques de la broche de façon à identifier les paramètres du modèle de la force. Ce modèle est donc défini par l'équation 7

$$f_y = k_y y + k_i I_y \quad (7)$$

avec

$$k_y = k_c \frac{I_0^2}{g_0^3}, \quad \text{et} \quad k_i = k_c \frac{I_0}{g_0^2} \quad (8)$$

Cette équation correspond à la linéarisation de la force électromagnétique autour de  $(I_y, y) = (0, 0)$ . Pour le calcul de cette force, le paramètre  $k_c$  a été identifié par la méthode des moindres carrés. Dans le tableau 2 on illustre les valeurs des paramètres utilisés pour tracer les FRF.

Tension [V]	$I_0$ [A]	$I_y$ [A]	$A$ [A]	$T$ [sec]	$f_0$ [Hz]	$f_e$ [Hz]	$g_0$ [mm]	$k_c$
180	7	$I_{y+} - I_{y-}$	1,5	30	0	4000	0,25	$3,9070 \times 10^{-7}$

TABLE 2 – Paramètres utilisés pour calculer la force électromagnétique

## 5 Conclusion

Un outil d'excitation radiale permettant de solliciter des broches d'usinage tournant à haute vitesse a été présenté. Notre système amplificateur-exciteur a été capable de développer des forces électromagnétiques atteignant 200 N en continu. Le calcul de la force par un modèle mathématique et les mesures instantanées des déplacements, nous ont permis de mesurer la FRF de la broche tournant à des vitesses allant de 4000 à 24000 tr/mn. Ce système, fabriqué entièrement par l'IRC-CyN et Synervia, reste un outil fortement performant pour mesurer le comportement vibratoire des broches de façon à optimiser son utilisation en usinage.

## Références

- [1] D. Noel, M. Ritou, S. Le Loch and B. Furet, *Bearings influence on the dynamic behavior of HSM spindle*, In Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Vol. 4, pp. 107-114. , July 2-4, 2012, Nantes, France.
- [2] Lopez S., *Définition de nouvelles structures de circuits magnétiques de machines AC utilisant des tôles à grains orientés*, Thèse de doctorat, 2011, France.
- [3] Schweitzer G., *Active magnetic bearings - chances and limitations*, Proc. 6th International IFToMM Conference on Rotor Dynamics, Sydney, Sept. 30 - Oct. 3, 2002.
- [4] Loesch F. (2001), *Identification and automated controller design for active magnetic bearing system*, Diss. ETH, Zurich Nr. 14474.