

# Implémentation d'une commande de type "sans-modèle" pour l'asservissement numérique d'un banc de caractérisation magnétique

Loïc MICHEL, Olivier GHIBAUDO, Cédric BOUDINET, François BLACHE, Oualid MESSAL et Afef LEBouc

Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

**RESUME** – Dans cet article, nous présentons une stratégie inédite d'asservissement numérique destinée à piloter un banc de caractérisation de matériaux magnétiques doux de type cadre Epstein. L'objectif est de garantir la forme de l'induction magnétique quelque soit l'excitation et le matériau. Compte-tenu du caractère non-linéaire des courbes d'aimantation des matériaux magnétiques, une commande originale de type "sans-modèle" est considérée. Les propriétés dynamiques en boucle fermée permettent d'assurer une certaine robustesse vis-à-vis des modifications du point de fonctionnement, associé essentiellement à la forme de l'hystérésis magnétique. Le fonctionnement et les performances de l'asservissement sont illustrés à la fois par des simulations basées sur le modèle d'hystérésis magnétique de Jiles-Atherton et expérimentalement.

**Mots-clés** – Asservissement numérique, commande sans modèle, hystérésis magnétique, mesure magnétique, cadre Epstein.

## 1. INTRODUCTION

Le cadre Epstein utilisé permet de caractériser des matériaux magnétiques doux sur une large plage de fréquence [DC - qq dizaines de kHz] et pour différentes formes d'ondes et différents niveaux d'induction. Le principe est de créer un champ magnétique  $H$  à l'intérieur du matériau grâce à un courant d'aimantation  $i_H$ . Le matériau procure une réponse magnétique qui correspond physiquement à l'induction magnétique  $B$  obtenue après intégration numérique de la tension  $v_B$  mesurée aux bornes du bobinage de mesure. Pour décrire expérimentalement un cycle majeur à saturation traduisant une forte non linéarité (Fig. 1), l'alimentation linéaire de puissance utilisée est capable de fournir le courant primaire  $i_H$  (image du champ magnétique) et d'imposer, indirectement, la tension secondaire  $v_B$  (image de l'induction magnétique) comme illustré sur la Fig. 3. Afin de satisfaire des conditions de mesures expérimentales qui soient au plus proche des règles normatives, il est nécessaire de respecter un facteur de forme qui en régime sinusoïdale doit être inférieur à 1%. En particulier, l'objectif est d'assurer des formes d'ondes imposées sur l'induction magnétique, sachant d'une part que le matériau à caractériser possède un comportement non linéaire, et d'autre part, que le cadre Epstein n'est pas une inductance pure (résistance parasite et inductance de fuite).

Pour contrôler la forme de l'induction  $B$  (i.e de  $v_B$ ), il est nécessaire de recourir à un asservissement soit analogique soit numérique. L'asservissement numérique est ici privilégié car il assure une bonne reproductibilité et il amoindrit les sources d'auto-oscillations.

Il y a deux manières d'implanter un contrôleur numérique : corriger en temps réel, ou calculer la forme de la consigne à appliquer pour avoir une induction maîtrisée par une procédure récursive itérative [1], [2]. La forte non linéarité du problème rend difficile l'asservissement en temps réel, c'est pourquoi on préfère adopter la méthode récursive itérative. Il existe dans la littérature différentes méthodes numériques pour asservir des bancs de caractérisation magnétique. Par exemple, certains

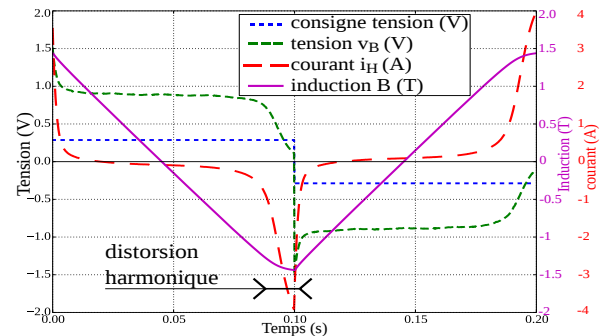


Fig. 1. Mesures sur cadre Epstein réalisées sans asservissement sur des tôles FeSi-NO à 5 Hz en induction quasi triangulaire. La distorsion harmonique sur B est visible pour des niveaux qui approchent la saturation du matériau.

travaux utilisent des compensations multi-harmoniques pour corriger la forme de l'induction mais sont restreints aux signaux sinusoïdaux [3], ou bien font appel à une correction complexe et intrinsèquement peu stable des phases associées aux harmoniques des signaux traités [4]. D'autres travaux [5] requièrent au préalable une identification supplémentaire des éléments du schéma électrique équivalent au circuit magnétique à caractériser. Ainsi, nous proposons dans cet article une méthode basée sur une commande de type "sans-modèle" dans le but d'asservir les grandeurs représentatives de l'hystérésis magnétiques mesurées sur un cadre Epstein. L'objectif final est de garantir de faibles distorsions harmoniques sur les formes d'ondes mesurées.

## 2. ASSERVISSEMENT NUMÉRIQUE "SANS-MODÈLE"

Proposée initialement par Fliess et Join [6], la commande sans-modèle a été appliquée avec succès dans l'asservissement de nombreux systèmes multi-physiques ([6] comprend une liste non-exhaustive d'applications). Décrite comme une commande auto-ajustante ("self-tuning controller") dans [7], elle prévoit l'estimation d'un modèle ultra-local dont le but est d'approximer le système à commander par une loi linéaire comportant la dérivée de la sortie contrôlée. La première application dans la commande des convertisseurs de puissance [8] a notamment permis de développer une version modifiée de la loi de com-

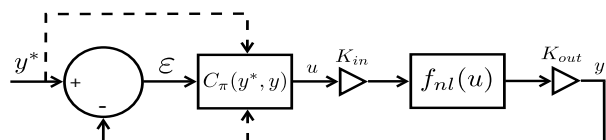


Fig. 2. Schéma global de l'asservissement proposé.

mande "sans-modèle". Cette loi de commande modifiée introduit une unique fonction d'initialisation en lieu et place de la dérivation temporelle.

### 2.1. Présentation

Considérons un système dynamique non-linéaire  $f_{nl}$  "Single Input Single Output" (SISO) à contrôler :

$$u \mapsto y, \quad \begin{cases} \dot{x} = f_{nl}(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

La commande "sans-modèle" est une application  $C_\pi : (y^*, y) \mapsto u$  dont le but est de contrôler la sortie  $y$  de (1) par pilotage de l'entrée  $u$  et en considérant une sortie de référence  $y^*$ . Le schéma général de l'asservissement, incluant le contrôleur  $C_\pi$ , est donné par la Fig. 2.

Pour tout instant  $t_k$ ,  $k \in \mathbb{N}^*$ , on définit le contrôleur discret  $C_\pi$  tel que symboliquement :

$$u_k = \int_0^t K_i \varepsilon_{k-1} d\tau \Big|_{k-1} \{ u_{k-1} + K_p (\alpha e^{-\beta k} - y_{k-1}) \} \quad (2)$$

où  $y^*$  est la trajectoire de référence ;  $K_p$  et  $K_I$  sont deux gains positifs réels ;  $\varepsilon_{k-1} = y_{k-1}^* - y_{k-1}$  est l'erreur de poursuite ;  $\alpha e^{-\beta k}$  est une fonction d'initialisation avec les constantes  $\alpha$  et  $\beta$  réelles.

### 2.2. Implémentation pratique

La Fig. 3 présente le synoptique général envisagé de l'asservissement numérique ; le cadre Epstein est modélisé par un schéma électrique équivalent de type transformateur. Le contrôleur  $C_\pi$  est programmé au sein d'une application LabVIEW, qui pilote une alimentation linéaire de puissance régulée en tension via la grandeur  $u$  ; cette alimentation fournit le courant magnétisant  $i_H$ . La tension  $v_B$  est mesurée et numérisée pour fournir l'information de "feedback"  $y$  pour le contrôleur  $C_\pi$ .

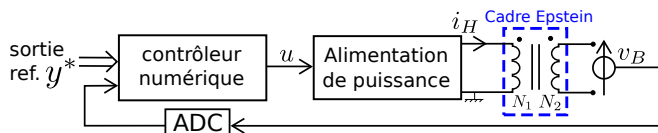


Fig. 3. Synoptique général de l'asservissement numérique du cadre Epstein.

### 3. SIMULATIONS

Notons  $v_H = f_{BH}(i_H)$ , le système dynamique non-linéaire décrivant le cycle d'hystérésis  $B(H)$  en fonction du courant  $i_H$ . Une étude préliminaire de l'asservissement "sans-modèle" du cadre Epstein est conduite par simulation à partir du modèle d'hystérésis dynamique de Jiles-Atherton pour décrire la fonction  $f_{nl}(x, u)$  de la boucle fermée de la Fig. 2. Dans un premier temps, il s'agit d'asservir directement  $B$  à une consigne sinusoïdale en pilotant  $i_H$ . Pour l'asservissement, on considère  $i_H = K_{in} u$ ,  $y = K_{out} \int v_b dt$  and  $v_b \propto dB/dt$  et un coefficient  $K_e$  tel que le modèle numérique d'hystérésis s'écrit :

$$y = f_{JA}(u) = K_{in} K_e u + K_{out} J_{BH}(K_{in} u) \quad (3)$$

Illustrons la simulation de l'asservissement numérique par la Fig. 4, qui décrit l'entrée  $u$  et la sortie  $y$  de la boucle fermée en fonction du temps. On considère un cas particulier d'hystérésis magnétique défini pour une fréquence donnée et on cherche à asservir le champ d'induction  $B$  à une consigne  $y^*$ .

### 4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX PRÉLIMINAIRES

La Fig. 5 montre les performances de l'asservissement numérique proposé sur le dispositif de caractérisation magnétique en régime quasi-statique (10 Hz). Ces performances ont été évaluées en comparaison avec les mesures sans asservissement.

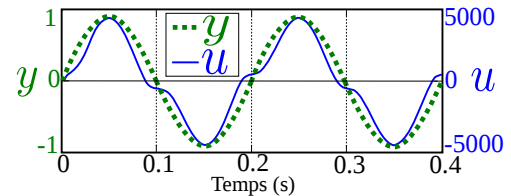


Fig. 4. Exemple de simulation de  $u = H$  [A/m] et  $y = B$  [T] en fonction du temps en régime quasi-statique (5 Hz).

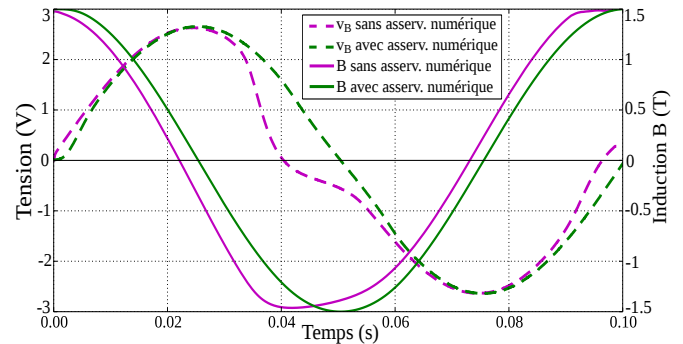


Fig. 5. Mesures sur cadre Epstein réalisées sans et avec asservissement numérique à 10 Hz.

### 5. CONCLUSIONS

Nous avons présenté la mise en œuvre inédite d'un asservissement de type "sans-modèle", basé sur la commande sans-modèle développée par Fliess et Join, pour le contrôle des grandeurs magnétiques au sein du cadre Epstein. Les résultats de simulation montrent de bonnes performances dynamiques quant au suivi de la consigne sinusoïdale.

L'article final comprendra notamment, d'autres simulations qui présentent l'asservissement de l'hystérésis sous différentes conditions de fréquence, des résultats expérimentaux grâce au pilotage LabVIEW du cadre Epstein ainsi qu'une stratégie de réglage des paramètres du correcteur  $C_\pi$ .

### 6. REMERCIEMENTS

Cette étude est financée par le projet COCTEL piloté par RENAULT-SAS et accompagné par l'ADEME.

### 7. RÉFÉRENCES

- [1] G. Bertotti, E. Ferrara, F. Fiorillo, M. Pasquale, « Loss measurements induction waveform on amorphous alloys under sinusoidal using a digital feedback technique », J. Appl. Phys., vol. 73, no. 10, May 1993.
- [2] F. Fiorillo et F. Mazaleyrat, « Mesures magnétiques - Mesurage des propriétés magnétiques des matériaux », Techniques de l'ingénieur, no. D1505, pp. 1-16, 2009.
- [3] Y. Zhang, Y. Long, Q. Qu, R. Ye, Y. Chang, « Precise AC magnetic measurement under sinusoidal magnetic flux by using digital feedback of harmonic compensation », J. Magn. Magn. Mater., vol. 312, pp. 443-448, 2007.
- [4] S. Zurek, P. Marketos, T. Meydan, A. J. Moses, « Use of novel adaptive digital feedback for magnetic measurements under controlled magnetizing conditions », IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 11, pp. 4242-4249, Nov. 2005.
- [5] K. Matsubara, N. Takahashi, K. Fujiwara, T. Nakata, M. Nakano, H. Aoki, « Acceleration technique of waveform control for single sheet tester », IEEE Trans. Magn., vol. 31, no. 6, pp. 3400-3403, Nov. 1995.
- [6] M. Fliess and C. Join, « Model-free control », International Journal of Control, vol. 86, issue 12, pp. 2228-2252, Jul. 2013.
- [7] K.J. Åström and P.R. Kumar, « Control : A perspective », Automatica, vol. 50, issue 1, pp. 3-43, Jan. 2014.
- [8] L. Michel, C. Join, M. Fliess, P. Sicard and A. Chériti, « Model-free control of dc/dc converter », in 2010 IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, pp.1-8, June 2010.