

Mesure par *self-sensing* sur les actionneurs piézoélectriques et commande en boucle fermée

Ioan Alexandru Ivan, Micky Rakotondrabe, Philippe Lutz*, Valentin Gurgu, Didace Habineza, Rosario Toscano

Institut FEMTO-ST, département AS2M, Université de Franche-Comté/CNRS/ENSMM,
24 rue Alain Savary, 25000 – Besançon
*contact : plutz@femto-st.fr

Université de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), ENISE,
CNRS UMR 5513, 58 Rue Jean Parot, 42023 – Saint-Etienne

RESUME : Cet article présente la mise en place d'une nouvelle maquette multidisciplinaire de TP pour les étudiants en Master-2 et en école d'ingénieurs de cursus Mécatronique, Automatique, Electronique ou encore Robotique. La maquette, issue des résultats de recherche du département AS2M de FEMTO-ST et de l'ENISE/LTDS, vise à former les étudiants au contrôle en boucle fermée d'actionneurs piézoélectriques en utilisant une technique de *self-sensing*. Le principe consiste à utiliser le matériau piézo-électrique à la fois comme actionneur et capteur, permettant ainsi d'avoir un niveau d'intégration élevé. Durant le TP, les éléments demandés aux étudiants sont : 1) l'analyse de la maquette avec compréhension du principe de fonctionnement, 2) la modélisation et l'identification des paramètres du modèle, 3) la reconstruction d'un observateur et l'implémentation de celui-ci, 4) l'utilisation du signal estimé/mesuré pour une application en commande en boucle fermée avec un correcteur de structure PID. L'intérêt de ce TP est multiple : multidisciplinarité, transfert de la recherche vers l'enseignement, nouvelle technologie en instrumentation et en automatique. Cet article présente donc la structure de la maquette, les expériences pédagogiques et le bilan pédagogique liés à l'utilisation de cette maquette de TP innovante.

Mots clés : actionneurs piézoélectriques, capteurs, mesure par *self-sensing*, modélisation et identification, reconstruc-teur, estimateur, commande PID, micromécatronique.

1 INTRODUCTION

Les matériaux piézoélectriques sont très intéressants pour le développement de systèmes dans des domaines très variés : aéronautique, aérospatial, automobile, militaire, médical, recherche fondamentale, microscopie ... Les raisons de ce succès sont multiples : bande passante élevée (dizaines de kiloHertz possibles), très haute résolution (dizaines de nanomètres possibles) et une raideur pouvant être très faible (pour certains polymères piézoélectriques) ou très élevée. Par ailleurs, le principe physique de ces matériaux fait qu'il est possible de les utiliser pour le développement d'actionneurs ou pour le développement de capteurs. Enfin, leur alimentation étant électrique, la conception et le développement des systèmes sont rendus plus faciles, contrairement aux systèmes actionnés thermiquement par exemple.

Le département AS2M (Automatique et Systèmes MicroMécatroniques), de l'institut FEMTO-ST travaille sur le développement d'actionneurs et de systèmes à base de matériaux piézoélectriques ainsi que sur la commande de ceux-ci depuis la fin des années 1990. Les résultats prometteurs issus du projet européen microPADS [1-3] et du projet national MYMESYS [4-5] de ces dernières années ont montré qu'il était possible d'employer le matériau piézoélectrique à la fois comme actionneur et comme capteurs (*self-sensing*), et donc de mettre en place une commande en boucle fermée sans nécessité de capteurs extérieurs. L'intérêt majeur est de

permettre des commandes en position (et en force) ayant les hautes performances d'un système bouclé sans souffrir de la mise en place de capteurs. Cela permet un haut niveau d'intégration et d'embarquabilité, essentiel pour certains systèmes, tels que les microsystèmes où l'espace utilisable est très limité. Pour ces microsystèmes, il est difficile voire impossible de trouver des capteurs convenables et capables de mesurer les signaux mis en jeu : les capteurs précis et ayant les bandes passantes nécessaires sont à la fois très onéreux et non embarquables (exemples : interféromètres, capteurs laser par triangulation, ...); et les capteurs embarquables n'ont pas les performances requises et sont fragiles (jauges de déformations,...). Les techniques par *self-sensing* permettent donc de s'affranchir de cette limite technologique.

Le *self-sensing* piézoélectrique n'est pas récent. Les premières applications datent du début des années 1990 [6]. A cause de la fuite des charges électriques sur les matériaux piézoélectriques (due à une résistance de fuite interne), les mesures possibles étaient en dynamique, et les applications ont toujours été l'amortissement de vibrations. La recherche menée au département AS2M à travers les deux projets cités ci-dessus a permis d'utiliser le *self-sensing* comme mesure à la fois dynamique et quasi-statique [2] et a ouvert d'autres applications nécessitant le contrôle de la dynamique et de la précision à la fois. Ces résultats de recherche ont été transcrits d'abord en cours puis en TP à l'Université de Franche-Comté à Besançon depuis l'année scolaire

2013-2014 afin de mettre à la portée des étudiants les nouvelles technologies d'instrumentation et les techniques de mesure et de commande développées au sein de FEMTO-ST.

Cet article présente la mise en place d'une maquette de TP *self-sensing*, les expériences pédagogiques et le bilan pédagogique à l'issue des premiers enseignements. A Besançon la maquette est utilisée dans le cadre du module/cours Micromécatronique donné aux étudiants en Master-2 de l'Université de Franche-Comté et aux étudiants de l'ENSMM suivant le cursus master. A l'ENI de Saint-Etienne cette maquette est destinée à enrichir les TP d'automatique actuels d'une nouvelle filière de formation intitulée « Génie Sensoriel » enfin de sensibiliser les étudiants au contrôle de microsystèmes d'une part et aux techniques de fusion de capteurs, d'autre part.

L'article est organisé comme suit. Nous présenterons d'abord en section-2 le principe de la technique *self-sensing* ainsi que de la maquette de TP utilisée. En section-3, nous détaillerons les expériences pédagogiques menées. Le bilan pédagogique sera présenté en section-4. Enfin, les conclusions et les perspectives seront données en section-5.

2 PRINCIPE ET PRESENTATION DE LA MAQUETTE SELF-SENSING

2.1 Principe de la technique *self-sensing*

Une technique *self-sensing* consiste à utiliser une structure piézoélectrique à la fois comme actionneur et capteur. Cela est possible grâce aux principes physiques réversibles du matériau : 1) l'effet inverse piézoélectrique est utilisé pour l'actionnement : sous contrainte électrique, le matériau se déforme, 2) et l'effet direct piézoélectrique est utilisé pour la mesure : lorsque le matériau est déformée, des charges électriques apparaissent sur les surfaces de celui-ci.

Le principe d'une mesure par *self-sensing* est présenté sur la Fig.1. Un actionneur piézoélectrique fournit une déformation, et donc un déplacement y , lorsqu'on lui applique une tension électrique u (effet inverse). Par effet direct piézoélectrique et par effet diélectrique (capacitif), la déformation ainsi que la tension appliquée font apparaître une charge électrique Q sur les électrodes de l'actionneur. Grâce à un circuit électronique (Fig 2.a), cette charge est transformée en tension exploitable u_o . Enfin, un reconstruteur (ou estimateur) permet de reconstruire et d'estimer le déplacement y de l'actionneur. Les entrées de l'estimateur sont les signaux disponibles, c-à-d le signal de commande u et le signal exploitable u_o , tandis que sa sortie est l'estimée \hat{y} . Le circuit électrique et le reconstruteur constituent le conditionneur de la mesure par *self-sensing*. Il existe plusieurs techniques de *self-sensing* selon les capacités de mesure de celui-ci : mesure de déplacement, mesure de force, mesure de déplacement et de force, mesure en dynamique, mesure en statique, mesure statique et dynamique. Plus d'explications sur ces différentes possi-

bilités peuvent être trouvées dans [7]. La technique proposée aux étudiants dans ce TP permet de mesurer le déplacement en statique et dynamique afin de permettre une commande en boucle fermée par la suite.

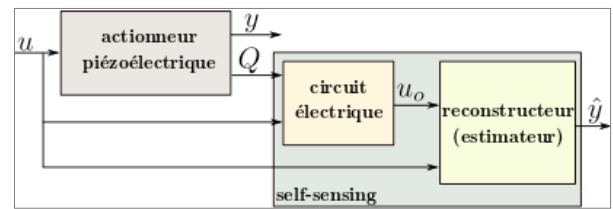


Fig. 1 : principe d'une mesure par self-sensing.

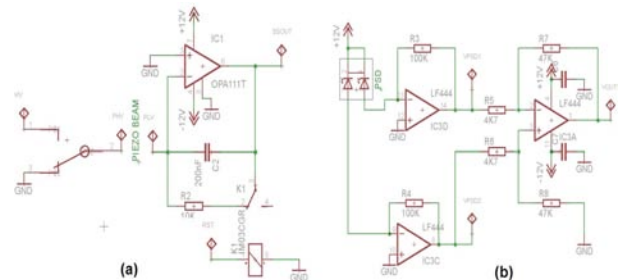


Fig. 2 : les schémas électroniques a) du circuit self-sensing et b) du conditionnement du capteur PSD.

2.2 Présentation de la maquette de TP

La maquette *self-sensing*, présentée sur les Figures 3-5 a été réalisée par la société ALCA Systems SRL [8] suivant les plans mis au point par Ioan Alexandru Ivan (Fig. 3), la partie électronique self-sensing (Fig.2.a) étant issue des travaux précédents des projets MicroPAdS et MYMESYS et la partie détection optique (Fig.2.b) étant développée à l'ENISE.

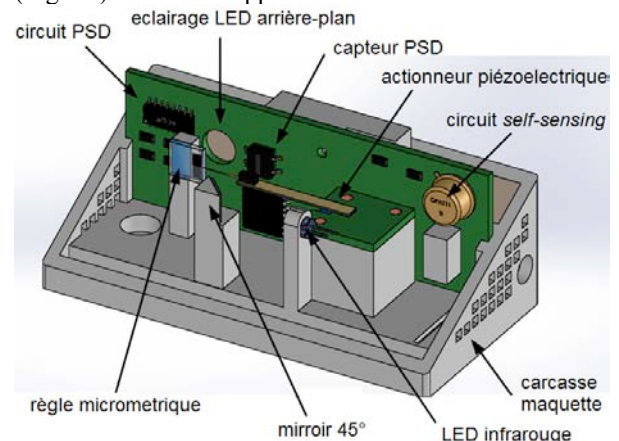


Fig. 3 : structure CAD de la maquette.

La maquette est brièvement composée des éléments suivants :

- un amplificateur de haute tension permettant d'envoyer une commande u jusqu'à +/- 140 Volts (Fig.4),
- un actionneur piézoélectrique de structure poutre encastrée-libre ayant une déflexion y lorsqu'on applique une tension électrique u (Fig.4-5),

- un montage pour la visualisation et la calibration de la déflexion de l'actionneur constitué d'une pointe fine collée au bout de l'actionneur, d'une règle micrométrique (division de $10\mu\text{m}$) et d'une caméra microscopique (Fig 5.b et c).
- un ensemble LED infrarouge - capteur photosensible PSD (*position sensing detector*) afin de mesurer la déflexion de la poutre avec une résolution micrométrique. Cette mesure est seulement utilisée pour l'identification des paramètres et pour la validation du self-sensing,
- le circuit électronique de self-sensing, et de conditionnement des divers signaux (fig 4). Ce circuit comporte également un microcontrôleur pour la protection du circuit self-sensing contre les dépassements de tension et aussi pour la sélection de la commande (commande externe-dSPACE ou interne-potentiomètre).

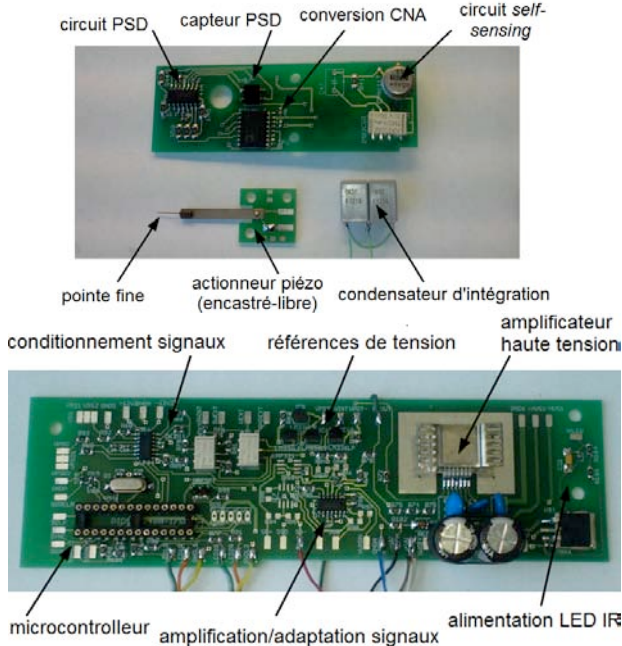


Fig. 4 : les principaux circuits électroniques de l'application.

Nous utilisons également une carte dSPACE (DS1103) et un ordinateur pour l'acquisition des données et pour la génération du signal de commande u . L'estimateur du *self-sensing* ainsi que le correcteur en boucle fermée sont implémentés dans ce système d'acquisition *via* le logiciel MATLAB-SIMULINK. Le programme CONTROLDESK (Fig 5.d) est utilisé conjointement avec MATLAB-SIMULINK pour modifier en temps réel les paramètres de l'estimateur et du correcteur et d'enregistrer les données expérimentales. La fréquence d'échantillonnage de l'ensemble du système d'acquisition est réglée à 5kHz ce qui est largement suffisant pour prendre en compte la dynamique de l'actionneur et la dynamique du conditionneur du *self-sensing*. La Fig.6 présente le schéma-bloc général de l'expérimentation.

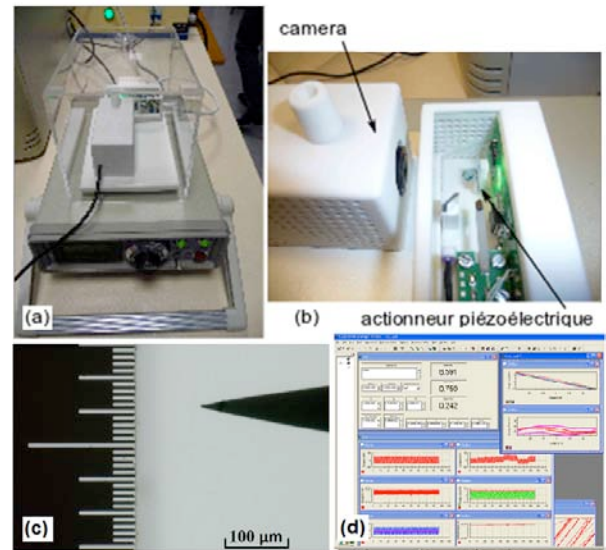


Fig. 5 : a-b) photographie de la maquette assemblée, c) image microscopique de la pointe obtenue par la caméra et d) l'interface utilisateur dSPACE Controldesk.

3. EXPERIENCES PEDAGOGIQUES

La première maquette, achetée cette année par l'Université de Franche-Comté sera doublée à l'aide du volet pédagogique du LABEX ACTION [9]. Elle a été mise en place pour la première fois durant l'année scolaire 2013-2014 dans le cadre du module/cours Micromécatronique donné aux étudiants de 2^{ème} année de Master en Mécatronique, Microsystèmes et Electronique Embarquée (M2E2). Des étudiants en 3^{ème} année de l'ENSM [10] en cursus Master suivent également ce cours/module. Ainsi, les origines (licence, DUT, prépa...) des étudiants sont diverses : mécanique, électronique, automatique, physique etc. La répartition des étudiants dans ce TP est faite de telle sorte que les binômes ou trinômes mixent ces origines. Le sujet de TP *self-sensing*, expliqué dans la suite, a été dimensionné pour qu'il soit faisable en 4h. Un pré-requis en Automatique de base (modélisation, commande en boucle fermée par PID) et en électronique de base (ampli-op, circuits RC...) est demandé aux étudiants. Enfin, une brève introduction aux actionneurs piézoélectriques a été donnée aux étudiants avant la séance de TP. Cette introduction, ne dépassant pas 30 minutes lors d'un TDAO ou d'un cours antérieur au TP, présente le principe physique d'un matériau piézoélectrique (effets direct et inverse), les applications existantes (actionneurs, capteurs...), et une modélisation dynamique linéaire d'un actionneur piézoélectrique. Une courte introduction sur le principe de la technique *self-sensing* a également été donnée en cours.

A l'ENISE l'acquisition a été faite dans le cadre de la mise en place d'une nouvelle filière de formation intitulée Génie Sensoriel et aussi du master bio-ingénierie. Cette maquette est destinée à enrichir les TP d'automatique enfin de sensibiliser les étudiants aux

techniques de fusion de capteurs, au contrôle de micro-systèmes, notamment aux micro-actionneurs qui jouent un rôle important dans le biomédical. Le déroulement de la séance est similaire au modèle M2E2, avec la précision que le rajout d'un capteur laser par triangulation permet aussi la synthèse en configuration fusion de capteur des méthodes self-sensing et PSD.

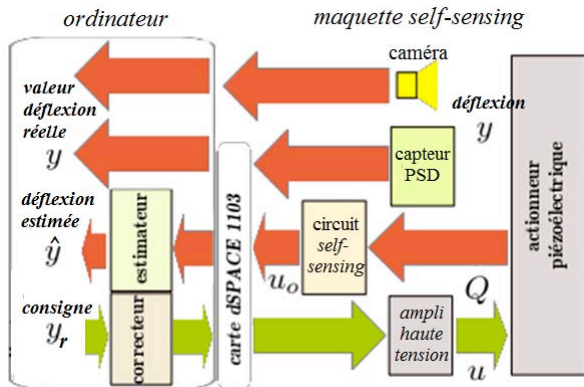


Fig. 6 : diagramme complet de la maquette pour l'expérimentation.

Tandis que l'objectif global de la maquette de TP est de découvrir une nouvelle technique de mesure qu'est la *self-sensing* issue de la recherche, les étapes du TP, en nombre de quatre, permettent aux étudiants de découvrir ou d'appliquer des techniques fondamentales en électronique, en automatique, en traitement de signal et en piézoélectricité. Ces quatre étapes sont :

- la modélisation,
- l'identification des paramètres,
- la synthèse d'estimateur,
- et la commande en boucle fermée.

3.1 Modélisation

Après avoir expliqué le principe général du *self-sensing*, dans cette étape, il est demandé aux étudiants de modéliser l'actionneur piézoélectrique ainsi que le circuit électrique. Pour cela, le schéma électrique équivalent de l'actionneur piézoélectrique est expliqué et mis à disposition leur permettant ainsi de déduire un modèle facilement exploitable pour la suite. Tandis que l'hypothèse de linéarité de l'actionneur et du circuit électrique est imposée, il est cependant demandé aux étudiants d'intégrer dans les modèles de ceux-ci la non-perfection des amplificateurs opérationnels utilisés et les fuites (fuite dans l'actionneur, courant de bias, ...). Quelques équations élémentaires, en particulier celles des fuites, sont données dans le sujet afin d'aider les étudiants à avancer dans la démarche sans trop perdre de temps. Enfin, les étudiants dérivent un modèle unique de l'actionneur et du circuit à partir des modèles élémentaires trouvés. Ce modèle a pour entrée la tension d'alimentation u de l'actionneur et pour sortie la tension exploitable u_0 du circuit électrique ainsi que la déflexion réelle y .

L'étape de modélisation permet aux étudiants de comprendre les principes de l'actionneur et du circuit électrique et de savoir les mettre en équations.

3.2 Identification des paramètres

L'étape d'identification des paramètres consiste à retrouver certains paramètres du modèle dérivé de l'étape précédente. Ces paramètres sont supposés initialement non-connus, les autres paramètres (principalement du circuit électrique) étant identifiables depuis le circuit. Après avoir appliqué un signal d'entrée u bien déterminé (échelon, impulsion, sinus) à l'actionneur, les étudiants enregistrent grâce à CONTROLDESK ce signal u , la sortie y et le signal exploitable u_0 . Ensuite, il est proposé aux étudiants d'appliquer les techniques d'identification paramétrique telles que ARX, ARMAX, ... avec le toolbox *Identification* de MATLAB [11] sur ces données expérimentales afin d'identifier les paramètres inconnus. L'encadrant du TP explique le principe de telles techniques et montre un exemple simple d'identification pour laisser ensuite les étudiants travailler en autonomie.

L'apport majeur de cette étape est de permettre aux étudiants de découvrir les techniques d'identifications paramétriques et l'utilisation du toolbox *Identification* de MATLAB, sachant qu'auparavant ils n'avaient vu que l'identification pour les systèmes simples (1^{er} ordre, 2nd ordre, 1^{er} ordre avec intégrateur, 1^{er} ordre avec retard et modèle de Broïda).

3.3 Synthèse d'un estimateur et son implémentation

Une fois la modélisation et l'identification faites, un estimateur permettant de reconstruire la déflexion y . Pour cela, la condition imposée est la suivante : $\hat{y}(t) = y(t)$ quelque soit t . Cette condition signifie que la mesure *self-sensing* sera « statique » et « dynamique » à la fois. En d'autres termes, on souhaite que le *self-sensing* soit capable de mesurer/estimer le déplacement y à faible et à haute fréquence de fonctionnement. Après avoir dérivé l'estimateur à partir de cette condition et à partir du modèle identifié, cet estimateur est implémenté dans MATLAB-SIMULINK, affiné puis validé. Plus précisément, la valeur $\hat{y}(t)$ estimée par le *self-sensing* est comparée avec la déflexion réelle qui est fournie par la caméra et/ou par le capteur PSD. L'affinement consiste donc à ajuster un ou plusieurs paramètres afin de minimiser l'erreur d'estimation, si nécessaire.

L'étape synthèse d'estimateur permet aux étudiants de comprendre l'intérêt d'un reconstituer de signal lorsqu'on n'a pas de capteurs ou lorsque le nombre de capteurs est limité. Par ailleurs, dans cette étape, la notion de déconvolution, ou inversion de dynamique, est vue par les étudiants. En effet, une déconvolution est nécessaire ici afin de garder l'estimation dynamique. Les étudiants peuvent donc observer durant l'expérimentation de l'estimateur ce qu'est une mesure « statique » et une mesure « dynamique » et voir l'intérêt de cette dernière malgré sa complexité de mise en œuvre.

3.4 Application en commande en boucle fermée

Enfin, le signal estimé $\hat{y}(t)$ est utilisé pour faire une commande en boucle fermée. Pour cela, on demande aux étudiants d'utiliser un correcteur de structure PID (proportionnel intégral et dérivé). L'objectif ici n'est pas le réglage du correcteur mais plutôt de montrer l'intérêt du *self-sensing* pour des applications de commande. Les paramètres initiaux du correcteur sont donnés et les étudiants les affinent si besoin.

3 BILAN PEDAGOGIQUE

Le caractère multidisciplinaire (électronique, automatique, piézoélectricité, traitement de signal) de ce TP *self-sensing* a beaucoup attiré l'attention des étudiants. Ce caractère multidisciplinaire est un élément important dans leur cursus et formation en mécatronique. Un autre élément intéressant, confirmé par des retours positifs de la part des étudiants, est qu'au delà de l'objectif général (découverte de la technique de *self-sensing*), chacune des quatre étapes du TP a des objectifs propres permettant d'appliquer ou d'apprendre des techniques de l'électronique ou de l'automatique (modélisation, identification paramétrique, outils et toolbox avancés de MATLAB, observateurs...). Enfin, le fait d'avoir mixé dans les binômes/trinômes d'étudiants des formations différentes a certainement été la raison de la facilité d'échanges et de critique de résultats entre eux : chacun ayant donné ou expliqué son point de vue sur les résultats ou sur les problèmes rencontrés. La Fig.7 montre une photographie d'un binôme et d'un enseignant durant une séance de TP *self-sensing*.



Fig. 7 : une photographie d'un binôme d'étudiants mixte (Université de Franche-Comté et ENSMM) et de l'enseignant durant une séance de TP *self-sensing*.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article a présenté le principe et le retour d'expériences sur la mise en place d'un TP *self-sensing* à l'Université de Franche-Comté et à l'ENISE. L'intérêt de la maquette est multiple pour les étudiants : la pluridisciplinarité du TP (mécanique, électronique, piézoélectrique, automatique, traitement de signal), une nouvelle technologie d'instrumentation et de commande, et

enfin un aperçu direct des résultats de recherche dans les laboratoires.

Le *self-sensing* proposé dans ce TP est dédié aux actionneurs piézoélectriques. Cependant, le principe du *self-sensing* peut également être appliqué sur d'autres systèmes actionnés et ayant certaines propriétés de « réversibilité » tels que les systèmes magnétiques ou capacitifs. Les étudiants pourront donc utiliser de telle technique d'instrumentation innovante sur différents systèmes plus tard lorsqu'ils seront face à un besoin de mesure, mais qu'il manque des capteurs convenables.

5 ACKNOWLEDGMENTS

Issue des résultats de recherche du département AS2M de FEMTO-ST, la maquette de TP a été financée par l'Université de Franche-Comté et par l'ENISE. Les nouvelles maquettes en cours de réalisation sont financées par le projet ANR MYMESYS (ANR-11-EMMA-006: High Performances Embedded Measurement Systems for multiDegrees of Freedom Microsystems) et par le LABEX ACTION (ANR-11-LABEX-01-01). La mise en œuvre a été réalisée par la société ALCA Systems [8].

REFERENCES

- [1] *Projet européen microPADS*, "Microstructured Piezoelectric Adaptronic Systems", FP7-PEOPLE-2007-2-1-IEF, july 2008 to july 2010, <http://sites.femto-st.fr/micropads/>.
- [2] Ioan Alexandru Ivan, Micky Rakotondrabe, Philippe Lutz and Nicolas Chaillet, 'Quasi-static displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators', *Review of Scientific Instruments (RSI)*, Vol.80(6), 065102, June 2009
- [3] Ioan Alexandru Ivan, Micky Rakotondrabe, Philippe Lutz and Nicolas Chaillet, 'Current integration force and displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators', *Review of Scientific Instruments (RSI)*, Vol.80(12), 2126103, December 2009.
- [4] Micky Rakotondrabe, Ioan Alexandru Ivan, Sofiane Khadraoui, Philippe Lutz and Nicolas Chaillet, 'Simultaneous displacement and force self-sensing in piezoelectric actuators and applications to robust control of the displacement', *IEEE/ASME - Transactions on Mechatronics (T-mech)*, accepted, DOI.10.1109/TMECH.2014.2300333.
- [5] *Projet national ANR Emergence MYMESYS*, "High performances embedded measurement systems for multi-degrees of freedom microsystems", ANR-11-EMMA-006, jan 2012 to sept 2014, <http://sites.femto-st.fr/mymesys/>.
- [6] J.J. Dosch, D.J. Inman, E. Garcia, "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control", *J. of Intell. Mater. Syst. and Struct.*, vol 3, pp. 166-185, 1992
- [7] Micky Rakotondrabe, 'Smart materials-based actuators at the micro/nano-scale: characterization, control and applications', edited book, Springer - Verlag, New York, ISBN 978-1-4614-6683-3, 2013.
- [8] www.alcasystems.ro, e-mail : office@alcasystems.ro
- [9] ANR-11-LABEX-01-01, <http://www.labex-action.fr/>
- [10] ENSMM, <http://www.ens2m.fr/>
- [11] L. Ljung, "System identification toolbox", *The Matlab user's guide*.